

UNIVERSITE HENRI POINCARÉ – NANCY I  
ECOLE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER  
INSTITUT AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON  
ECOLE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE RENNES

**D.E.A. NATIONAL DE SCIENCE DU SOL**

**Mohamed Koulam DICKO**

Inscrit à l'Ecole Supérieure Agronomique de Montpellier

**ETUDE DE L'IMPACT DES MECANISMES BIO-GEOCHIMIQUES  
SUR LE BILAN DE L'ALCALINITE DES SOLS SUBMERGES**

Cas d'un Sol Sableux de l'Office du Niger – Mali

Stage effectué aux Laboratoires Soltrop et Ecotrop du Programme Agronomie (CIRAD-AMIS)

Maîtres de stage :

Alain AVENTURIER                      Soltrop

Michel PUARD                              Ecotrop

Membres du Jury

J. BERTHELIN                      CPB-CNRS NANCY

PR. C. CHEVERRY                      ENSA RENNES - Rapporteur

PR. M.C. GIRARD                      INA-PG

PR. J.C. REMY                      ENSA Montpellier

A. AVENTURIER                      CIRAD-AMIS Montpellier

**Juillet 1999**

## AVANT PROPOS

Une pensée particulière envers mon grand-père dont je n'ai pas eu la chance de partager les derniers jours.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur Claude Cheverry qui a bien voulu être le rapporteur de ce mémoire et pour ses propos très encourageants.

Ce travail a été réalisé au sein des laboratoires « Soltrop » et « Ecotrop » du programme agronomie (CIRAD-AMIS).

Je remercie le chef du Programme, Monsieur Florent Maraux qui a rendu possible toutes les démarches administratives nécessaires à mon inscription au DEA.

Je remercie les chefs des deux laboratoires Messieurs Jean Louis Jacob et Francis Ganry pour m'avoir accueilli dans de bonnes conditions au sein de leurs équipes.

Je remercie Messieurs Michel Puard et Alain Aventurier pour la très grande qualité de l'encadrement. Merci à Monsieur Robert Oliver pour sa précieuse contribution et ses conseils en informatique.

Je remercie particulièrement Monsieur Vincent Vallès pour son entière disponibilité, son appui sans réserve à l'interprétation des résultats.

Le travail est également à situer dans le cadre des activités de PSI/CORAF-MALI pour la lutte contre la dégradation des sols.

Je remercie Mamadou Kabirou N'Diaye coordinateur du programme, Serge Marlet, et Jean Pierre Barral pour leur confiance et leur soutien tant sur le terrain que pendant mon séjour en France. Je remercie la mission française de coopération à Bamako qui a bien voulu prendre la charge financière de cette étude.

Je remercie mon petit frère Nicolas Condom dont les travaux sur le terrain ont d'avantage motivé la mise en place de cette étude, pour son respect envers ma personne et son concours pour l'interprétation des résultats.

Je remercie Marc Swarc, Marion Breysse et Madame Gisèle Heral-Llimous et leurs collaborateurs pour la qualité des analyses.

Je remercie particulièrement Alain aventurier, Jean Paul Finart et leurs adorables épouses qui ont rendu mon séjour Montpelliérain très agréable, ainsi que Monsieur et Madame Mamadou (Kondio) Bâ à Paris.

## RESUME

### **Etude de l'impact des mécanismes bio-géochimiques sur le bilan de l'alcalinité des sols submergés (cas d'un sol sableux de l'Office du Niger – Mali).**

Dans un contexte de riziculture irriguée par submersion (Office du Niger), l'étude des différentes formes d'alcalinité et celle des mécanismes qui peuvent l'influencer revêt une importance particulière. Cette étude a pour but de mettre en évidence les différents processus impliqués dans le bilan de l'alcalinité qu'ils soient d'origine géochimique liée aux phénomènes d'oxydoréduction ou en relation avec la plante.

L'expérimentation a consisté à suivre, à l'aide de deux dispositifs, l'évolution du pH, Eh, pCO<sub>2</sub> ainsi que celle de la composition chimique de la solution du sol, de la lame d'eau et du complexe d'échange.

Les observations suivantes ont été faites :

- En présence d'une lame d'eau, des niveaux de potentiel redox très faibles ont été enregistrés (-200 à -300 mV), la pression partielle de gaz carbonique augmente d'autant plus qu'une culture existe. Ils sont indicateurs de l'attaque des oxydes métalliques contribuant ainsi, avec la dissolution des minéraux alcalins, à produire de l'alcalinité dans la solution du sol, pouvant dépasser 20 me/L.
- En l'absence de lame d'eau, le sol est plus oxydant. Les minéraux alcalins précipitent et les cations bivalents sont désorbés du complexe d'échange afin de compenser leur diminution dans la solution du sol. Le milieu reste sodique.
- L'évolution de l'alcalinité montre des tendances liés aux différents traitements (présence ou non d'une lame d'eau ou d'une culture de riz). Les changements chimiques observés révèlent l'existence de processus producteurs d'alcalinité (sources) tels que l'augmentation du taux de gaz carbonique par l'activité biologique, la réduction des nitrates ; ou consommateurs d'alcalinité (puits) tels que la diffusion vers la lame d'eau des bicarbonates ou des ions sodium désorbés depuis le complexe d'échange.

Il convient de prendre en compte l'ensemble de ces processus et de quantifier plus précisément leur impact sur le bilan de l'alcalinité.

**Mots clés : alcalinité, alcalinisation, pH, Eh, pCO<sub>2</sub>, lame d'eau, riz, submersion .**

## ABSTRACT

### **Impact of Bio-Geochemical Processes on the Alkalinity Balance of Submerged soils (Case of a Sandy Soil at the “Office du Niger” – Mali)**

In the context of rice growing under flooded conditions (Office du Niger), the study of the development of alkalinity is particularly important. This study highlights the various processes involved in balance of alkalinity, especially the Geochemical processes, the phenomena of oxydoreduction and the relation to the plant.

During the experiments, soil pH and redox potential (Eh) were measured under field condition, and the partial pressures of carbon dioxide (pCO<sub>2</sub>) and oxygen were calculated on the basis of major elements activity and pH (for pCO<sub>2</sub>) and pH and Eh for (pO<sub>2</sub>).

The following observation were made:

- When flooding occurs, very low levels of redox potential (-200 to -300 mV) and high partial pressure of carbon dioxide is recorded. They are correlated with the metallic oxides reduction and the dissolution of alkaline minerals. They contribute to increase alkalinity in the soil solution by more than 20 me/L.
- Without flooding, the redox potential remains higher. The alkaline minerals precipitate and the exchangeable bivalent cations are desorbed, thereby compensating the lower concentration of minerals in soil solution. The soil remains sodic.
- These changes in alkalinity are related to the agronomic management of the field (submersion or presence of the rice). On other hand, chemical changes reveal the existence of processes producing alkalinity such as the increase of carbon dioxide rate through biological activity; or consuming alkalinity by diffusion towards floodwater of the bicarbonate ions and the sodium desorbed from the exchange complex.

It is now necessary to consider all these processes and quantify exactly their impact on the alkalinity balance.

**Key words: alkalinity, alkalization, pH, redox potential (Eh), carbon dioxide pressure, rice, submersion, flooding.**

# SOMMAIRE

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>2</b>
<b>2. RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES SUR LES PROCESSUS BIO-GEOCHIMIQUES ET LES PROCESSUS D'OXYDOREDUCTION.</b>	<b>4</b>
2.1 Equilibres entre minéraux et solution du sol	4
2.2 L'oxydoréduction.	6
2.3 La dénitrification.	6
2.4 Influence du riz sur le milieu.	7
<b>3. EXPERIMENTATIONS</b>	<b>8</b>
3.1 Matériel	8
3.2 Protocole expérimental.	8
3.3 Méthodologie analytique :	9
<b>4. RESULTATS</b>	<b>10</b>
4.1 Expérimentations en flacons fermés	10
4.2 Expérimentation en bacs de culture	11
4.2.1 Le sol	11
4.2.2 Les solutions du sol	14
<b>5. DISCUSSION</b>	<b>15</b>
5.1 Evolutions des caractéristiques chimiques en incubation.	15
5.2 Evolution des caractéristiques chimiques des sols en bacs de culture.	15
5.2.1 Niveaux d'anoxie du milieu (Eh et pO <sub>2</sub> )	15
5.2.2 La pCO <sub>2</sub>	16
5.2.3 le pH	16
5.2.4 La garniture cationique	16
5.3 Synthèse sur les bilans d'alcalinité dans les sols saturés	17
5.4 Perspectives	17
<b>6. CONCLUSION</b>	<b>19</b>

## 1. INTRODUCTION

Les sols irrigués sous des climats semi-arides ou arides sont souvent les lieux où les phénomènes de salinisation peuvent se décliner sous trois formes: la salinisation neutre, l'alcalinisation (Cheverry, 1974) et la salinisation acide (Vieillefont 1973). Les voies neutre et alcaline de la salinisation conduisent à la sodisation du sol et, à terme, à la dégradation difficilement réversible de ses propriétés physiques.

L'alcalinisation se traduit en particulier par une augmentation de l'alcalinité et du pH et une chute de la teneur en calcium de la solution du sol. Marlet (1995) a décrit l'évolution des différentes formes d'alcalinité dans un sol alcalin et sodique du Niger. Il a montré qu'une des principales sources de l'alcalinité provient de la précipitation des minéraux alcalins, en particulier la calcite, qui se produit pendant la concentration des solutions sous l'effet d'un climat aride.

Dans le contexte singulier des sols rizicoles irrigués par submersion situés à l'Office du Niger (Mali), ces sols alcalins et sodiques sont engorgés pendant la saison de culture ce qui favorise les processus de réduction. La submersion modifie considérablement le pH des sols par accroissement de la  $pCO_2$  qui est due à une faible diffusion du gaz vers l'atmosphère (Bertrand *et al*, 1993). Par ailleurs, des processus bio-géochimiques d'oxydoréduction du fer, du manganèse et du soufre ont été mis en évidence dans ces milieux et sont susceptibles d'en modifier l'alcalinité.

Enfin, l'activité métabolique azotée des plantes peut produire ou consommer de l'alcalinité selon la forme azotée absorbée: s'il s'agit d'anions (nitrates, nitrites), l'activité racinaire produit de l'alcalinité sous forme d'ions hydroxyles ; s'il s'agit de cations (ions ammonium), il se produit une acidification (Coic, 1969).

L'étude des différentes formes d'alcalinité ainsi que l'étude des mécanismes qui la produisent ou la consomment revêt une importance particulière dans le contexte des sols irrigués de l'Office du Niger (50 000 ha), périmètre situé, au Mali, dans le Delta intérieur du fleuve Niger.

Le climat est du type sahélien avec une pluviométrie d'environ 500 mm, un bilan pluie-évapotranspiration négatif, et des températures élevées (moyenne maximale de 35°C). L'irrigation est entièrement assurée depuis plus de 50 ans par les eaux du fleuve Niger à partir du barrage de Markala. Le réseau de drainage sert essentiellement à évacuer les eaux excédentaires de surface. Avec la généralisation de la riziculture, des quantités plus importantes d'eau ont été utilisées, ce qui a provoqué une élévation du niveau de la nappe de plus de 30 mètres (N'Diaye *et al*, 1990) qui est actuellement sub-affleurante.

Le risque d'alcalinisation lié à l'eau d'irrigation a été mis en évidence par N'Diaye (1987) et Vallès (1989) ce qui explique pour tous ces auteurs les évolutions constatées d'abord par Toujan (1980), et confirmées par N'Diaye (1987), Vallès (1989) et Bertrand (1991).

Les résultats obtenus dans le cadre du programme PSI/CORAF<sup>1</sup> montrent une diminution du pH *in situ*, une variation de l'alcalinité de l'horizon de surface et un impact limité de l'alcalinisation sur les rendements du riz (Marlet, 1999).

Le but de ce travail est de mettre en évidence les différents facteurs impliqués dans la balance acido-basique de ces sols dépendant, notamment, des processus géochimiques (dissolution/ précipitation des minéraux alcalins, échanges ioniques), des processus d'oxydoréductions et de l'activité biologique.

---

<sup>1</sup> PSI : Pôle Systèmes Irrigués.

CORAF : Conférence des Responsables de la Recherche Africaine.

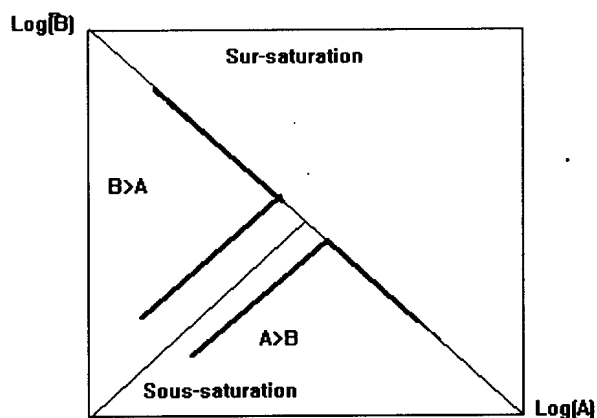
## 2. RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES SUR LES PROCESSUS BIO-GEOCHIMIQUES ET LES PROCESSUS D'OXYDOREDUCTION.

### 2.1 Equilibres entre minéraux et solution du sol

L'effet de la mise en place de l'irrigation sur les propriétés des sols a été largement étudié (Cheverry, 1974; Bertrand *et al.*, 1993; Dicko et N'Diaye, 1994). L'évolution du faciès géochimique de la solution du sol lors du processus de concentration est due à la forte évapotranspiration caractéristique des régions sahéliennes. La compréhension de ces processus implique les rappels théoriques suivants:

a) **La précipitation des minéraux:** Le processus de concentration de la solution du sol s'accompagne de la précipitation successive de minéraux, du moins soluble au plus soluble d'entre eux. Lorsque deux ions  $A^+$  et  $B^-$  sont susceptibles de se combiner pour former un minéral  $A_\alpha B_\beta$  selon la réaction :  $\alpha A^+ + \beta B^- \rightarrow A_\alpha B_\beta$ , on définit :

- le produit ionique Q de la solution par  $Q = [A]^\alpha [B]^\beta / [A_\alpha B_\beta]$  : [i] activité de l'espèce i
- le produit de solubilité par la relation  $K = [A]^\alpha [B]^\beta$



**Figure 1: Evolution de la composition chimique d'une solution en équilibre avec un minéral AB (loi du T)**

Lorsque Q est supérieur à K, la solution est sursaturée par rapport au minéral, donc celui-ci précipitera jusqu'à atteindre l'équilibre  $Q = K$ .

Lorsque la solution se concentre en présence du minéral  $A_\alpha B_\beta$ , les deux activités (molalités) ne peuvent pas augmenter en même temps puisque le produit de solubilité du minéral est constant, et l'équilibre se maintient. Si une molalité augmente, l'autre diminuera (Al-Droubi, 1976). Ce processus est connu sous le nom de **loi du T** (Tardy, 1979).



**b) L'alcalinité:** Elle se définit comme la somme algébrique des équivalents de cations conjugués de bases faibles et d'anions conjugués d'acides faibles (Bourrié, 1976). Elle s'exprime en fonction des espèces du système CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O et à température donnée, elle ne dépend que de la pression partielle du gaz carbonique et du pH.

$$\text{Alc (e/L)} = \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^- + \text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_3\text{SiO}_4^- + \dots \quad (1)$$

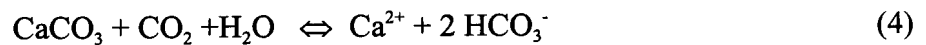
La combinaison de cette équation avec l'équation de neutralité électrique de la solution conduit à :

$$\text{Alc (e/L)} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \dots \quad (2)$$

Dans la majorité des sols, l'alcalinité est essentiellement due aux espèces carbonatées (Vallès, 1985). Lorsque le pH est compris entre 6 et 10,3, la proportion de CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> est négligeable et l'alcalinité se réduit à HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et se calcule selon l'expression (Appelo et Postma, 1996):

$$[\text{HCO}_3^-] = 10^{-7.8} \cdot \text{pCO}_2 / [\text{H}^+] \quad (3)$$

Généralement, l'alcalinité provient de la solubilisation des minéraux (carbonates et silicates),



mais aussi de la dénitrification et de la réduction des hydroxydes de fer et de manganèse, de la sulfato-réduction.

L'alcalinité, le pH et la pCO<sub>2</sub> sont liés. En connaissant deux paramètres, on peut aisément calculer le troisième (Relation N°3).

Ainsi la détermination de l'alcalinité en laboratoire par le dosage des carbonates et bicarbonates donne des valeurs différentes de l'alcalinité *in situ* à cause de la diminution de la pCO<sub>2</sub> qui peut varier de 10<sup>-1.5</sup> à 10<sup>-3.5</sup>.

**c) L'alcalinité résiduelle:** Le concept d'alcalinité résiduelle est introduit pour exprimer le contrôle de la composition des solutions d'électrolytes quand certains minéraux précipitent. La calcite est le minéral le moins soluble, donc susceptible d'être le premier à précipiter quand la solution se concentre. On parle alors d'alcalinité résiduelle calcite:

$$\text{ARC} = \text{Alc} - \text{Ca}^{++} \quad (\text{e/L}) \quad (5)$$

- Si l'alcalinité résiduelle est positive c'est à dire si Alc > Ca<sup>2+</sup>, alors la précipitation des minéraux entraîne la chute de concentration en ions Ca<sup>2+</sup> dans la solution du sol et une augmentation de l'alcalinité.

- Par contre si Alc < Ca<sup>2+</sup>, la teneur en calcium augmente et l'alcalinité diminue en même temps que le pH.

Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée a été introduit pour expliquer la composition des solutions quand plusieurs minéraux précipitent.

## 2.2 L'oxydoréduction.

Une réaction d'oxydoréduction est représentée par l'équation:



où l'échange d'électrons se produit entre un corps réducteur (donneur d'électrons) et un corps oxydant. (accepteur d'électrons). Dans les couples oxydoréducteurs, l'oxygène est l'oxydant conjugué de l'eau suivant l'équilibre redox :



Le potentiel d'oxydoréduction est l'indicateur le plus utilisé pour définir l'état oxydant ou réducteur d'un milieu. Lors de sa mesure avec une électrode composée de métal noble (Pt, Au...), la lecture doit être corrigée par rapport à la valeur de l'électrode de référence standard (210mV à 25°C). Il varie entre 600mV (conditions oxydantes) et -300mV (conditions très réductrices) pour l'ensemble des sols terrestres (Duthil, 1971). Lorsque le sol est couvert d'une lame d'eau, le milieu devient rapidement réducteur autorisant les phénomènes de réduction d'oxydes et provoquant aussi des changements sur le plan biologique. Différents auteurs (Stone et Morgan, 1984 ; Mariotti, 1992) ont mis en évidence l'importance de l'état d'aération du sol sur les processus de nitrification-dénitrification. Le potentiel d'oxydoréduction, appliqué à l'équation (6) est donné par la formule de Nernst :

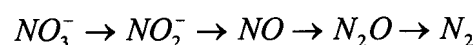
$$E_{(v)} = E_0 + \frac{0,059}{n} \log_{10} \frac{[\text{Ox}]^\alpha}{[\text{Red}]^\beta} \quad (8)$$

La valeur de Eh est donc fonction des concentrations : la diminution de Eh est en relation avec la diminution de l'oxydant [Ox] et/ou l'augmentation du réducteur [Red]. Les faibles valeurs de Eh sont causées par la disparition de l'oxygène ou d'autres paramètres qui agissent parallèlement.

## 2.3 La dénitrification.

En condition anaérobie, les nitrates vont subir des processus d'oxydoréduction et/ou des processus de dénitrification d'origine biologique:

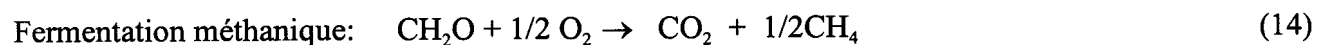
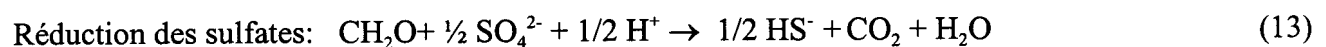
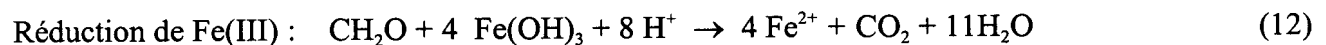
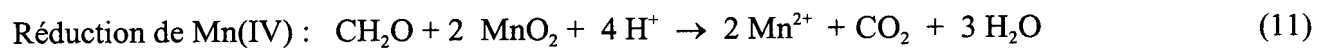
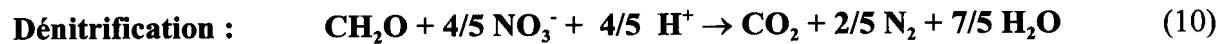
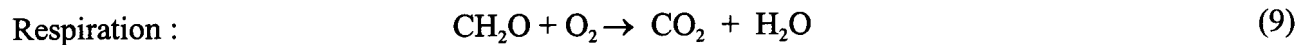
- *La dénitrification biologique* : Lorsque la pression partielle de l'oxygène devient très faible, les bactéries vont agir sur les autres composés oxydés, en particulier les nitrates (Ouar, 1994; Mc Kenney, 1995). Une succession d'étapes de réduction est réalisée par la microflore dénitrifiante pour finalement aboutir à l'azote moléculaire :



Les réductions assimilative et dissimilative des nitrates en ions ammonium sont des voies de réduction des nitrates différentes de la dénitrification (Fazzaroli *et al*, 1991). La réduction dissimilative du nitrate se produit en milieu anoxique et peut se traduire par une production

significative d'ions ammonium, en particulier si le milieu est salé (Dellal et Halitim, 1991).

- *La dénitrification chimique*: Différents auteurs ont mis en évidence l'importance de l'état d'aération du milieu sur la dénitrification. Mariotti (1986) montre que dans un aquifère souterrain, en présence de carbone organique, une suite de réactions redox se produit où les espèces oxydées sont réduites selon la séquence :



La dénitrification débute donc après la disparition de l'oxygène dissous par respiration aérobie et précède l'apparition de  $\text{Mn}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$ .

#### 2.4 Influence du riz sur le milieu.

Pour résister aux conditions asphyxiantes du milieu, le riz aquatique a la capacité de transporter de l'oxygène des parties aériennes vers les racines en modifiant la structure de celles-ci (Puard *et al*, 1989). Selon les mêmes auteurs, la nutrition azotée a une influence sur le pH du milieu: lorsque l'azote est présent uniquement sous forme ammoniacale, l'équilibre ionique est rétabli par une accélération des rejets de protons, d'où une baisse du pH. Ce phénomène est de plus faible importance avec les autres cations ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ ). L'exsudation de protons est fortement influencée par les conditions d'aération du milieu.

En Camargue, on a mesuré dans la rhizosphère des valeurs de Eh dix fois supérieures à celles d'un sol nu à la même profondeur (Puard, 1997). Ainsi en l'absence de contraintes multiples, le riz a la capacité de s'adapter aux diverses contraintes édaphiques, ce qui en fait un « mauvais indicateur » de l'état chimique du milieu.

### **3. EXPERIMENTATIONS**

#### **3.1 Matériel**

##### **Le sol:**

Le sol étudié a été prélevé à Niono (Mali) dans l'horizon superficiel (0-15 cm) du site 5g1. Il est sableux et pauvre en matière organique (inférieur à 1%). Le taux de sodium échangeable est supérieur à 21%, le  $\text{pH}_{\text{eau}}$  est alcalin ( $\text{pH} = 8.5$ ) et l'alcalinité résiduelle est positive (Tableau 1, annexe 1).

**La plante:** La variété retenue est utilisée par l'Office du Niger (BG 90-2, non photosensible, cycle moyen : 120 jours).

#### **3.2 Protocole expérimental.**

L'expérimentation consiste à suivre l'évolution de certains paramètres de nature biologique et de nature géochimique afin d'évaluer leur impact sur le bilan de l'alcalinité du milieu. Deux expérimentations ont été mises en place.

##### **a) Expérimentation en flacons fermés.**

Cette expérience a été conduite entièrement au laboratoire dans des conditions favorisant l'anoxie. Deux types de suspension de sol (rapport 1:1) ont été préparés dans des flacons de 250 ml fermés hermétiquement: 110g de terre fine + 110ml d'eau distillée et 110g de terre fine + 110ml de solution de glucose à 10g/litre.

27 échantillons (dont 23 analysés) de chaque type ont été préparés, puis soumis à une période d'incubation ( $30^{\circ}\text{C}$ ) de 0 à 8 jours. A l'issue du temps d'incubation, les flacons ont été agités, puis le Eh et le pH de la suspension mesurés dès leur l'ouverture. Finalement, la phase liquide a été séparée de la phase solide par une double centrifugation suivie d'une double filtration, d'abord sur filtre  $0,2\mu\text{m}$  puis sur filtre  $0,01\mu\text{m}$ . Les solutions clarifiées (et stériles) ont été stockées au réfrigérateur puis analysées ensemble.

##### **b) Expérimentation en bacs de culture**

Cette expérimentation a pour but de comparer différents modes de gestion du sol et de la culture. Le dispositif comporte quatre traitements notés T1 à T4.

**Tableau I: Description des traitements (oui : présence non : absence)**

Traitements	Sol	Riz	Lame d'eau	Engrais	Fumier
T1	Oui	Non	Oui	Non	Non
T2	Oui	Oui	Oui	oui	Non
T3	Oui	Oui	Oui	oui	Oui
T4	Oui	Oui	Non	oui	Non

Compte tenu de la quantité de terre disponible, il n'a pas été possible de répéter les divers traitements.

La fumure apportée est conforme aux doses préconisées pour la zone étudiée (100 kg de DAP, 50 kg de KCl, 250 kg d'urée et 20 tonnes de fumier légèrement pailleux, par hectare).

**Le dispositif :** L'expérimentation a été conduite à l'intérieur d'un phytotron avec des bacs de culture éclairés par des lampes Osram HQI-TS 200W délivrant  $600 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . La température et l'humidité relative (HR) ont été maintenues à 28°C et 65% le jour; 26°C et 80% la nuit.

Ces conditions sont suffisantes pour une croissance optimale du riz. Chaque bac était équipé d'un « tensionic », d'un thermocouple et d'une électrode redox. Une centrale d'acquisition de données a permis la mesure en continu de Eh et de la température du sol.

### 3.3 Méthodologie analytique :

Les mesures sont du même type pour les deux expérimentations :

- Le potentiel redox (Eh) est mesuré dans le sol avec des électrodes à mi – profondeur, en continu.
- Le pH du sol a été mesuré in situ chaque semaine à raison de 5 répétitions par détermination. Pour les flacons, Eh et pH sont mesurés dès leur ouverture.
- La pression partielle d'oxygène  $p\text{O}_2$  qui permet d'apprécier l'état d'anoxie, peut être calculée à partir des mesures de Eh et pH:

$$\log_{10} p\text{O}_2 = 4 \text{pH} + 4 \text{pE} + \text{pK}_d \quad (15)$$

$$\text{avec } 2\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \quad \text{pK}_d = - 83.12 \quad (16)$$

- La solution du sol et la lame d'eau superficielle ont été prélevées une fois par semaine.
- La CEC a été analysée par la méthode au chlorure de cobaltihexamine (Rémy et Orsini, 1976).
- Les éléments K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, S ont été analysés par spectrométrie d'émission Plasma ICP (Trassy et Mermet, 1984).
- Le phosphore a été analysé par colorimétrie (méthode au bleu de molybdène), ainsi que le chlore (méthode au thiocyanate mercurique),  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$  par titrimétrie (HCl 0,1 N).
- En fin d'expérimentation, la biomasse produite a été mesurée et la composition en éléments minéraux de la plante a été déterminée (Pinta, 1975).

## 4. RESULTATS

### 4.1 Expérimentations en flacons fermés

Les résultats sont consignés dans les tableaux III et IV (annexe 1).

#### a) Evolution de Eh et pH

L'évolution des conditions d'oxydoréduction dans les flacons est très rapide (figures 2 et 2b). En effet, en présence d'eau seule, le potentiel redox Eh atteint en 3 jours un palier à +40 mV; le pH baisse d'une unité puis remonte lorsque le potentiel redox est stabilisé. Lorsqu'un substrat énergétique (glucose) est ajouté au milieu, le potentiel redox chute pour atteindre la valeur de -338 mV tandis que le pH baisse très progressivement jusqu'à 4,5 (en 5 jours) puis remonte légèrement.

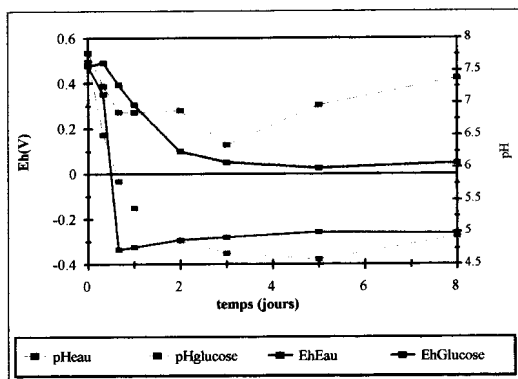


Figure 2. Evolution de pH et Eh .

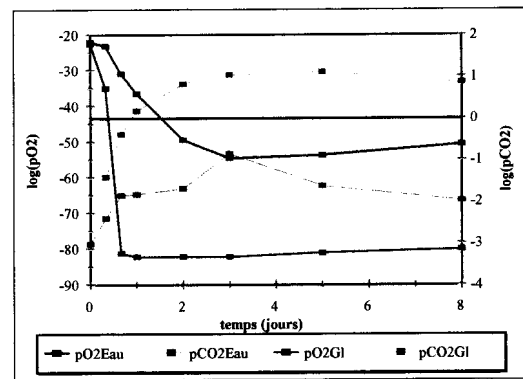


Figure 2b. Evolution de pO<sub>2</sub> et pCO<sub>2</sub> .

#### b) Evolution des teneurs en sodium des extraits

Ces modifications physico-chimiques s'accompagnent d'une évolution importante dans la composition chimique de la solution du sol (figure 3). Elles sont illustrées par l'évolution de la teneur en sodium de la solution du sol pour les deux traitements.

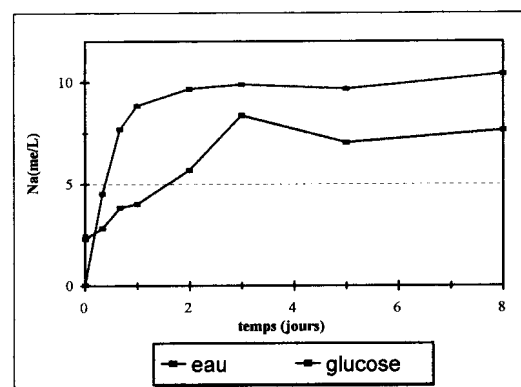


Figure 3: Evolution de la teneur en Na

### c) Evolution de l'alcalinité

L'alcalinité de la solution du sol, calculée à partir de la balance ionique, augmente dans les deux cas : pour le traitement eau, elle atteint 8 me/L au bout de 8 jours ; dans le cas de la suspension sol-glucose, l'augmentation est très rapide et plus forte que dans le cas précédent.

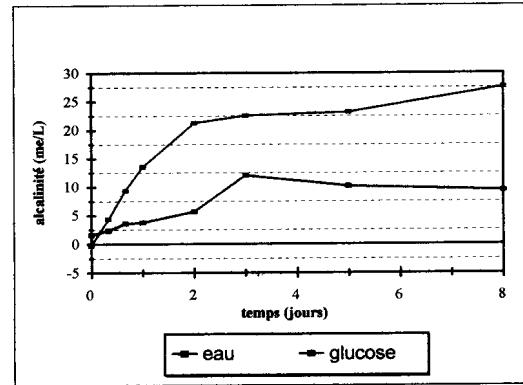


Figure 4. Evolution de l'alcalinité (flacons)

## 4.2 Expérimentation en bacs de culture

### 4.2.1 Le sol

#### a) Evolution de la composition du complexe d'échange (tableau II)

Tableau II. Analyse du complexe d'échange (meq/100g).

	Etat Initial	T1 Final	T2 Final	T3 Final	T4 Final
CEC	4,76	5,15	4.86	5.50	5.33
Ca <sup>++</sup>	2.37	2.73	2.71	2.93	2.86
Mg <sup>++</sup>	0.61	0.76	0.72	0.68	0.68
K <sup>+</sup>	0.07	0.06	0.07	0.27	0.07
Na <sup>+</sup>	1.04	0.79	0.82	0.69	1.29
Al <sup>+++</sup>	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
Mn <sup>++</sup>	0.01	0.02	0.04	0.02	0.01
T.S.	0,86	0,85	0,9	0,83	0,92

La CEC, mesurée dans les mêmes conditions opératoires, augmente de 5 à 15%, par rapport au sol initial. Pour s'affranchir des variations de la CEC, l'étude de l'évolution des quantités absolues de cations fixés sur le complexe d'échange sera privilégiée.

Pour l'ensemble des traitements, le sol se charge en calcium tandis que, pour les trois sols couverts par la lame d'eau, la quantité de sodium adsorbée diminue ; pour T4, la quantité de sodium adsorbée augmente de plus de 20 %.

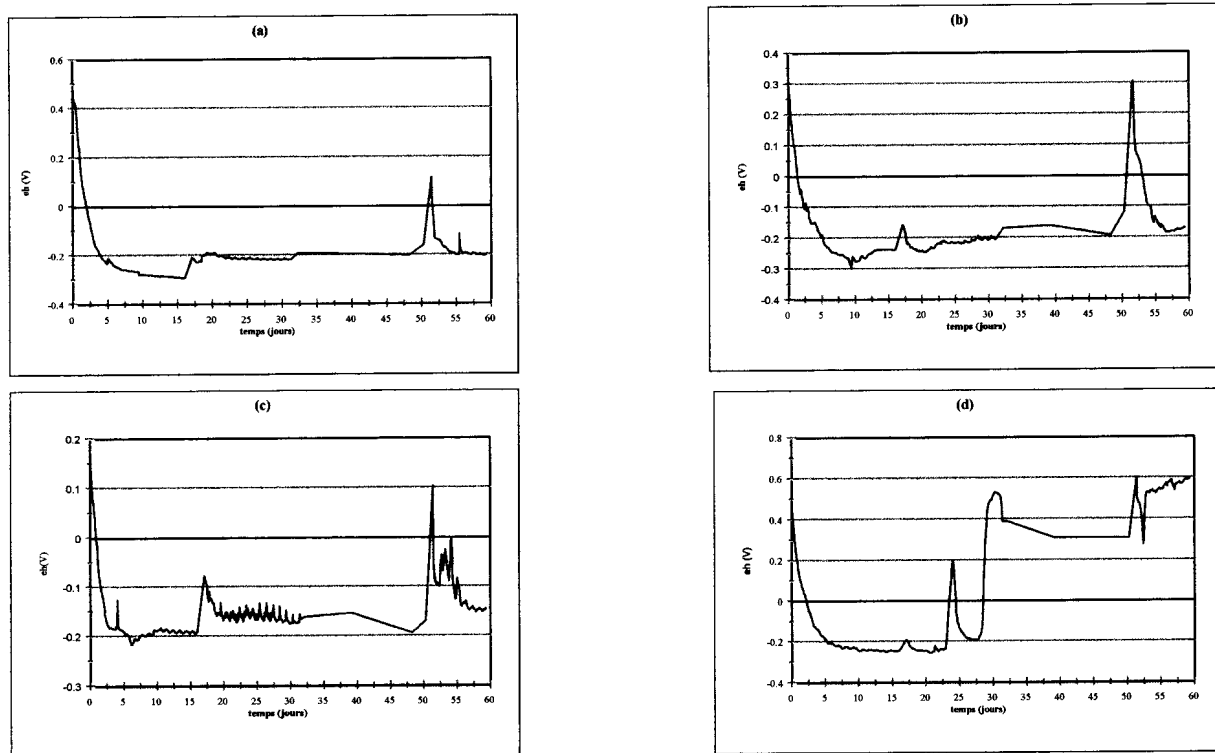
L'effet de leur adsorption ou désorption sur les quantités présentes en solution sera à considérer lors de l'analyse de l'évolution chimique de la solution. A titre d'exemple, pour un sol de densité 1.6 et d'humidité volumique à saturation de 40 %, l'adsorption d'une quantité de 1 me/100g (10me/Kg) d'un cation sur le complexe équivaut à un retrait de  $10/(0.40/1.6) = 40$  me/kg de solution soit 40 me/L de cations dans la solution.

Le faible taux de saturation du complexe pourrait s'expliquer par le non dosage d'un cation pourtant présent (ammonium).

### b) Evolution du potentiel d'oxydoréduction

Environ 950 valeurs de potentiels redox ont été enregistrées. Les données manquantes ont été remplacées par les valeurs des mesures hebdomadaires (tableau VIII, annexe 1).

Une baisse très rapide du potentiel redox est intervenue après la mise en eau (figures 5), puis se stabilise au bout de cinq à sept jours, autour de -200 à -300 mV. Après un assec (à 1300 h-54jours), le Eh remonte, mais baisse aussi vite dès qu'un apport d'eau est effectué. Les traitements avec plante (T2 et T3) présentent des Eh supérieurs à celui de T1 (sol seul). Le milieu est resté beaucoup plus oxydant pour le traitement T4 après une désaturation du sol (800 h-33jours).



**Figure 5 : Evolution du potentiel d'oxydoréduction**

a) T1( sol + lame d'eau) b) T2 (T1 + riz + engrais ) c) T3 (T2 + fumier) d) T4 (T2 moins l'eau)



### c) Evolution du pH

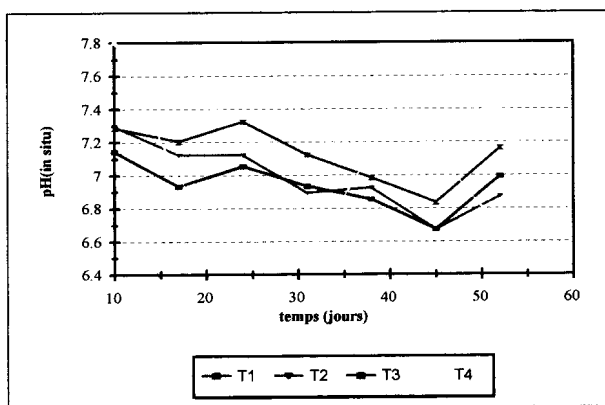


Figure 6. Evolution du pH

### d) Evolution de la pression partielle d'oxygène

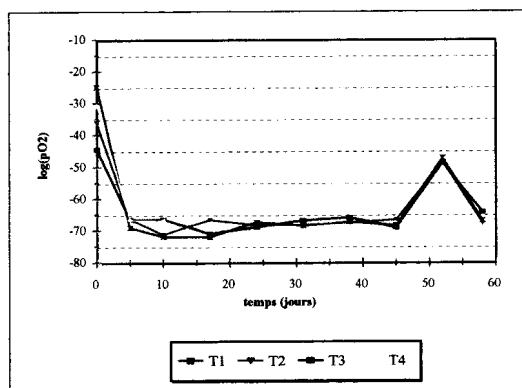


Figure 7 : Evolution de la pO<sub>2</sub>

### e) Evolution de la pCO<sub>2</sub>

Elle a été calculée à l'aide du modèle AQUA (Vallès, 1983) en fonction de l'alcalinité et du pH *in situ*.

Elle augmente dans les bacs avec lame d'eau dans l'ordre : T3>T2>T1, jusqu'à des valeurs proches de 10<sup>-1</sup> atm., mais reste très variable pour le T4

On peut observer que pour T1, T2, et T3 le pH baisse de 0,5 unité dans une gamme de valeurs proches de la neutralité, compatible avec la culture de riz. Si les traitements ont des évolutions similaires, ils se différencient par contre par la valeur absolue du pH. Le traitement T4 montre des variations très fortes de pH au cours de l'expérience.

La pO<sub>2</sub> indique l'état d'anoxie du milieu ; elle est calculée en fonction de Eh et pH (équation 15).

Après une semaine de submersion, les valeurs atteignent des niveaux très faibles pour les traitements avec lame d'eau (10<sup>-70</sup> atm) et beaucoup plus élevées pour T4.

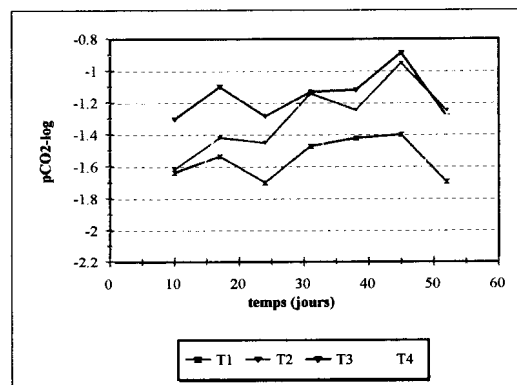


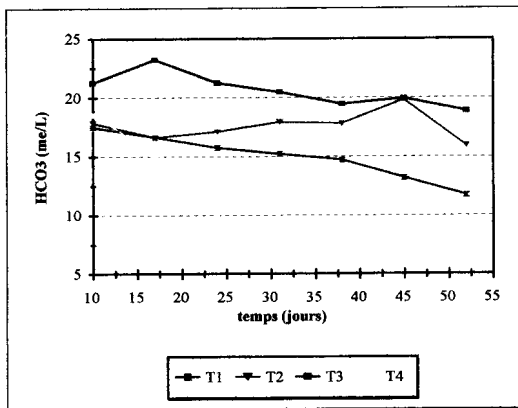
Figure 8: Evolution de la pCO<sub>2</sub>.

#### 4.2.2 Les solutions du sol

Rappelons que, compte tenu des faibles volumes prélevés (7 ml), les résultats de la détermination de l'alcalinité par titration peuvent être entachés d'erreurs. De plus, tous les ions métalliques n'ont pas pu être dosés alors qu'ils peuvent être présents en quantités non négligeables. L'analyse des paramètres chimiques tiendra compte de cette considération.

Le sodium et l'anion bicarbonate constituent les ions dominants des solutions du sol et de la lame d'eau. (80% et plus, en moyenne, de la garniture cationique ou anionique (figures 1 et 2 annexe 2)

##### a) L'alcalinité



L'alcalinité baisse régulièrement pour les traitements T1 et T3 puis très fortement pour le sol non submergé (T4). L'évolution est inverse dans le cas du traitement T2.

Figure 9 : Evolution de l'alcalinité dans les bacs

##### b) Saturation des solutions en calcite et argiles magnésiennes

Les minéraux classiquement pris en compte dans ce type de milieu sont la calcite et la sépiolite. Les diagrammes de saturation ont été tracés à partir des activités des ions - figures 3 et 4 annexe 2.

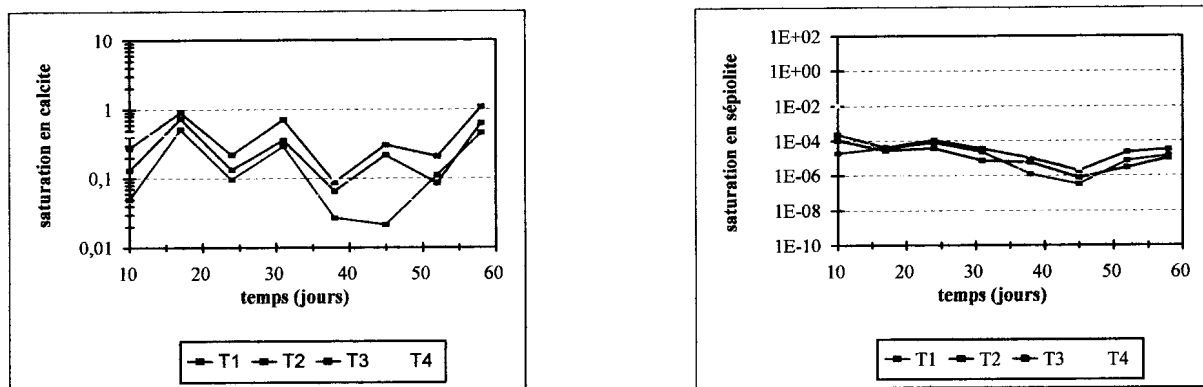


Figure 10 : indices de saturation calcite et sépiolite

La saturation en minéraux (calcite et argiles magnésiennes) diminue progressivement dans les solutions et tendent à disparaître après quelques semaines de mises en eau et d'anoxie. Ces minéraux ont la même évolution pour le T4 en relation avec les différents apports d'eau.

## **5. DISCUSSION**

L'analyse sera effectuée séquentiellement : dans un premier temps, l'expérience en flacons fermés sur des suspensions de sols permettra d'identifier les mécanismes qui interviennent lors de la mise en contact du sol avec l'eau dans un milieu clos; dans un deuxième temps, l'expérimentation en bacs, plus proche des conditions de terrain, permettra d'évaluer les phénomènes d'échanges entre le sol et la lame d'eau puis d'étudier l'influence de la plante et de la submersion sur ces derniers.

### **5.1 Evolutions des caractéristiques chimiques en incubation.**

En milieu fermé, des conditions réductrices sont atteintes d'autant plus rapidement qu'une source énergétique est présente. Dans tous les cas, cette réduction entraîne une évolution très marquée de la composition chimique par l'augmentation des teneurs en Na, Ca, Mg et des métaux (Fe et Mn).

Les quantités importantes de sodium mises en solution sont issues des processus d'échanges. En effet, en présence de fortes teneurs en  $\text{CO}_2$ , les minéraux alcalins libèrent d'importantes quantités de cations divalents (Ca, Mg) qui se fixent sur le complexe d'échange, puis provoquent la désorption du sodium dont la concentration augmente dans la solution.

Dans ces conditions, l'alcalinité est non seulement produite par dissolution des minéraux, mais aussi, par la réduction des oxydes métalliques rendue possible à ces forts niveaux de réduction atteints dans les flacons (-400 mV).

Dans le cas de l'apport de glucose, le pH atteint des valeurs allant de 4,5 à 5,0. Cette gamme de pH correspond au pK des nombreux acides organiques simples (acides lactique, malique, butyrique, etc.) fréquemment engendrés par les processus fermentaires lors d'apports de composés sucrés. Il est donc probable que de tels composés se soient produits lors de l'incubation. Ces composés peuvent participer aux processus de solubilisation des minéraux par complexolyse (Ouar, 1994, Bouisson, 1997, De Cockborne *et al*, 1997)

### **5.2 Evolution des caractéristiques chimiques des sols en bacs de culture.**

#### **5.2.1 Niveaux d'anoxie du milieu (Eh et pO<sub>2</sub>)**

En milieu naturel, l'apport d'eau sur le sol induit des conditions réductrices fortes, mais seulement au bout de 8 jours de submersion. La pO<sub>2</sub> est alors très faible ( $10^{-70}$  atm). Les conditions thermodynamiques propices à la dénitrification sont atteintes et dépassées : le manganèse et le fer sont réduits et la sulfato-réduction est thermodynamiquement possible (figures 5 à 10 annexe 2). Ce n'est qu'en l'absence d'une lame d'eau que le sol est en mesure de s'oxyder (T4).

Le potentiel redox varie peu en fonction des traitements où une lame d'eau est présente. Néanmoins sous une culture de riz (T2, T3) le sol se réoxyde plus facilement grâce au transfert de l'oxygène de l'air vers les racines à travers les lacunes aérifères. Le Eh reste tout de même très faible, mais nettement plus élevé qu'en l'absence de riz. Cette réoxygénation qui, en principe, ne concerne que la rhizosphère (Puard *et al.*, 1989 ; Puard, 1997), semble se généraliser à l'ensemble de l'horizon racinaire compte tenu de la nature de l'enracinement du riz. L'apport de matière organique (T3) accélère la réduction en début de submersion.

### **5.2.2 La pCO<sub>2</sub>**

La production de gaz carbonique est essentiellement due à la respiration racinaire et à l'activité des micro-organismes en aérobie. On remarque que la pO<sub>2</sub> diminue très rapidement en présence d'une lame d'eau (T1, T2 et T3); la pCO<sub>2</sub> augmente simultanément et progressivement en relation avec la faible diffusion du CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère, fortement ralentie par la lame d'eau. Ainsi, la pCO<sub>2</sub> et la présence simultanée de la culture du riz favorisent significativement la solubilisation des minéraux et augmentent l'alcalinité de la solution. En l'absence d'une lame d'eau, les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère sont facilités, d'où une baisse de la pCO<sub>2</sub> (T4).

### **5.2.3 le pH**

Les variations du pH résultent de l'évolution de différents paramètres du sol submergé sous culture :

- l'augmentation progressive de la pCO<sub>2</sub>, sous l'effet de la respiration et de la minéralisation de la matière organique, suffit à faire baisser le pH, mais dans le cas d'une nutrition ammoniacale, cette diminution est favorisée par l'exsudation racinaire de protons;
- les processus redox sont gouvernés par les équilibres entre formes réduites et oxydées du manganèse, du fer et des sulfates qui se placent à des pH voisins de 7. Sous le contrôle de ces phénomènes, le pH est maintenu à des valeurs proches de la neutralité. Cette tendance a été observée au cours de l'étude des changements physico-chimiques des sols submergés (Ponamperuma, 1972) ;

### **5.2.4 La garniture cationique**

Les faibles quantités de cations divalents en solution (tableaux V et VI annexe 1), résultent d'un bilan entre la production de ces cations par dissolution de la calcite et d'argile magnésienne et leur consommation par fixation sur le complexe d'échange. L'évolution des indices de saturation calcite et sépiolite met en évidence cette dissolution dans le temps. Ces minéraux présents en début d'expérimentation tendent à disparaître progressivement. L'adsorption du calcium et du magnésium provoque la mise en solution du sodium que l'on observe pour tous les traitements.

### **5.3 Synthèse sur les bilans d'alcalinité dans les sols saturés**

L'alcalinité est une variable chimique résultante de l'ensemble des processus qui ont été abordés et qui interviennent de façon variable au cours de la mise en submersion et en culture.

L'incubation en flacons fermés a permis de mettre en évidence que les conditions d'augmentation de l'alcalinité sont réunies : niveau élevé de la réduction, diminution de la  $pO_2$ , augmentation de la  $pCO_2$  et par conséquent réduction des métaux et dissolution des minéraux. Or, l'analyse des bacs fait apparaître une diminution de l'alcalinité de 1 à quelques dizaines de me/L (figure 9, page 14) démontrant ainsi l'existence de phénomènes consommateurs d'alcalinité comme la diffusion, l'activité racinaire et la modification des caractéristiques de la matrice solide :

- 1) la diffusion vers la lame d'eau: le flux des éléments vers la lame d'eau n'a pas été quantifié mais l'utilisation d'une eau désionisée engendre un gradient très important entre la solution du sol et la lame d'eau. Des études parallèles (Condom, 1999) ont montré que l'appauvrissement de la solution du sol dans ces conditions pouvait atteindre plusieurs me/L.
- 2) le bilan minéral à l'interface entre la racine et la solution du sol : dans le cadre d'une nutrition azotée, la plante contribue à neutraliser de l'alcalinité dans la solution par la production de protons (T2, T3).
- 3) la fixation supplémentaire de cations: la CEC augmente au cours de l'expérimentation et provoque une baisse de l'alcalinité du milieu. Cet effet est d'autant plus sensible que la variation de CEC est forte (T4),

### **5.4 Perspectives**

Ces résultats sont conformes à ceux obtenus sur le terrain à Niono, sur le même site (Condom, 1999) mais les niveaux de réduction observés en bacs sont beaucoup plus forts, vraisemblablement dus aux conditions d'expérimentation (milieu confiné) qui ne permettent pas un écoulement comme c'est le cas sur le terrain, même si la fraction de drainage est très faible (1/230 des apports d'eau). Un certain nombre de recommandations seront donc effectuées pour être testées dans le cadre des actions de recherche en cours.

#### **a) Désodisation sous lame**

Après deux mois de submersion et par rapport au sol initial, les quantités de sodium échangeables sur les argiles ont diminué considérablement en présence de lame d'eau tandis qu'elles sont restées aussi élevées et le pH inchangé en l'absence de lame d'eau.

## **b) Pratique de "flushing"**

L'évolution des CE (tableaux VI et VII annexe 1) permet de distinguer deux périodes intervenant pendant la concentration de la lame d'eau :

- une concentration immédiate lors de la mise en contact de l'eau avec le sol saturé: ainsi l'eau est concentrée d'un facteur 5 ( $CE=0.2 \text{ meq/l}$ ) ;
- une concentration plus lente par diffusion des éléments du sol vers la lame d'eau: un facteur 4 de concentration peut être atteint en deux mois.

Cette situation traduit l'intérêt d'effectuer des lavages successifs de la rizière après le labour et assez longtemps avant le repiquage. Cette pratique est bien connue à l'Office du Niger pour préparer la mise en boue, mais l'eau est rarement renouvelée et la vidange pose quelques problèmes organisationnels sur certaines parcelles.

## 6. CONCLUSION

L'alcalinisation des sols de l'Office du Niger a été mise en évidence par de nombreuses études. Cette évolution a été liée à la qualité de l'eau d'irrigation dont l'alcalinité résiduelle est positive.

Depuis le début des « réaménagements »<sup>2</sup>, en 1984, des quantités d'eau plus importantes sont apportées sur les parcelles qui ont permis de maintenir une lame d'eau permanente dans les rizières. Dans ces conditions d'anoxie, l'augmentation de la  $p\text{CO}_2$  influence directement le pH du sol *in situ* qui diminue. Ce point est particulièrement important car les rendements du riz ne sont affectés que si le pH atteint ou dépasse 7,5 au moment de l'initiation paniculaire (Dicko, 1996). L'augmentation de la  $p\text{CO}_2$  provoque également la solubilisation des minéraux alcalins calciques et magnésiens dont le calcium et le magnésium sont ensuite adsorbés partiellement sur le complexe d'échange. Il en résulte une importante désorption de sodium. Quand l'anoxie persiste, la chaîne des processus de réduction se poursuit et provoque la transformation des oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse vers des formes réduites. Dans ce type de sol, ces phénomènes consommateurs de protons produisent de l'alcalinité.

L'utilisation d'une eau très peu concentrée crée un gradient vers la lame d'eau et favorise la diffusion des ions dans le même sens. Il en résulte une diffusion du sodium et une diffusion de l'alcalinité susceptibles d'être évacués du milieu.

Enfin, dans les conditions de riziculture de cette zone, d'autres processus bio-géochimiques et de transferts d'éléments influencent le bilan de l'alcalinité dans l'horizon de surface. Ces processus jouent sans doute un rôle plus important pour le court terme (saisonnier) que la concentration de l'eau d'irrigation ou celle de la nappe subaffleurante qui est habituellement invoquée. On distingue d'une part, les processus « sources d'alcalinité » qui sont l'augmentation du taux du gaz carbonique par l'activité biologique ou le métabolisme de l'azote par réduction des oxydes de manganèse et de fer, d'autre part, les processus « puits d'alcalinité » qui sont la réduction des sulfates, la diffusion vers la lame d'eau des ions bicarbonates et des ions sodium désorbés du complexe d'échange ou la variation probable de la CEC, le bilan minéral à l'interface entre la racine et la solution du sol.

Il convient maintenant, pour des études futures, de prendre en compte l'ensemble de ces processus très spécifiques aux sols submergés et de quantifier précisément leur impact sur les phénomènes d'alcalinisation au cours de la saison entière tandis que le sol est sous submersion ou pendant la période d'assèchement entre deux cultures de riz.

---

<sup>2</sup> Réhabilitation du réseau d'irrigation et de drainage, et planage de la majorité des parcelles.

## **BIBLIOGRAPHIE :**

Al Droubi, A. 1976. Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Sciences géologiques, mémoire 46: 177 p., Univ.Louis Pasteur, Strasbourg.

Appelo, C.A.J. et Postma, 1996. Geochemistry, groundwater and pollution. A.A.Baalkema/ Rotterdam/ Brookfield, Netherlands, 536 p.

Bertrand, R. 1991. Alcalinisation et sodisation des sols. In: Keita B., Kounkandi B., Dioni L., éd. Etude morphopédologique du Kala inférieur. Rapport IER: 75 p., 6 cartes, annexes: 300 p.

Bertrand, R., Keita B., N'Diaye M.K. 1993. La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sud-sahariennes (cas de l'Office du Niger). Cahiers de l'agriculture 2, 3: 18-29.

Bourrié, G. 1976. Relation entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO<sub>2</sub> dans les eaux naturelles. Soil Sci., 3: 141-159.

Cheverry, J.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 de Doctorat es Science, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Coic, Y., Lesaint C., Grandjean M. 1969. Determination of physiological alkalisation and its variation according to plant species agronomic importance. Comptes Rendus des Séances de l'académie d'Agriculture de France. 55,4: 291-297.

De Cockborne A.M., Vallès V., Bourlet M., Sevenier G., Cabibel B., Bruckler L., 1997. Environmental Consequences of the Land Application of Apples Withdraw from Production on Chemical properties of Sandy Alluvial Soil. International Conference "treatment of Solid Waste and Wastewaters", Narbone (France) 28-29 April 1997. (Bay FREST and INRA Editors)

Dicko M.K. et N'Diaye M.K. 1994. Effet de l'alcalinisation et de la sodisation des sols sur la production rizicole à l'Office du Niger. Rapport des volets salinisation du laboratoire SEP. IER, Mali. 15 p.

Duthil, J., 1973. Eléments d'écologie et d'agronomie (tome III). J.B. Baillièrè ed., 654 p.

Fassel, V.A. 1978. Quantitative elemental analysis by plasma emission spectrometry, Sciences, 202,

Fazzaroli, E., Germon J.C., 1991. Dissimilative nitrate reduction to ammonium in different soils in waterlogged conditions. Developments in Geochemistry Diversity of Environmental Biochemistry. Elsevier Amsterdam, 537 p.

Marlet, S. 1995. Alcalinisation des sols dans la vallée du fleuve Niger (Niger). Modélisation des processus physico-chimiques et évolution des sols sous irrigation. Thèse Doc., 200p.

Marlet, S. et N'Diaye M.K. 1998. Evolution temporelle et variabilité spatiale des indicateurs de la dégradation des sols par alcalinisation et sodisation à l'Office du Niger. Synthèse des travaux du PSI-CORAF. IER Mali . 51p.



Mc Kenny, S. W., Wang, C.F., Drury, W. I., Findlay, 1995. Denitrification, immobilisation, and mineralisation in nitrate limited and non-limited residue-amended soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59: 118-124.

Ouar, S., 1994. Etude des mécanismes chimiques liés à la dénitrification dans un sédiment de la vallée de la Vistrenque. (Gard). D.E.A., Univ. d'Aix-Marseille. 51 p.

Pinta, M. 1975. Méthode de référence pour la détermination des éléments minéraux dans les végétaux, *Analisis* 3, 6: 345-353.

Puard, M., Couchat Ph., Lasceve G. 1989. Etude des mécanismes d'adaptation du riz (*Oryza sativa* L.) aux contraintes du milieu. I Effets de la nutrition azotée sur la consommation d'oxygène par les racines et l'évolution de l'acidité. *Agro.Trop.* 44, 3: 173-177.

Puard, M., 1997. Synthèse des travaux réalisés au CFR, par la physiologie, entre 1990 et 1994 sur les milieux réducteurs. UR/FPV CIRAD-CA et CFR, janv. 97, 9p.

Orsini, L., Rémy, J.C., 1976. Utilisation du chlorure de cobaltihexamine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange cationique et des bases échangeables des sols. *Sci. du sol*, AFES 4: 269-271.

Sposito, G., 1994. *Chemical equilibria and kinetics in soils*. Oxford University Press, U.S.A., 267 p.

Tardy, Y. et Gac J.Y., 1978. Contrôle de la composition chimique des solutions par la précipitation des minéraux dans les sols. In: *Bul. de L'Association. française pour l'étude du sol.* 2: 107-122.

Toujan, M., 1980. Evolution des sols irrigués à l' Office du Niger - Rapport 320546 R23 et R29 Sogreah ingénieurs conseils, Grenoble, France.

Trassy, C., Mermet, J.M. 1984. *Les applications analytiques des plasmas*. Lavoisier. Paris. 327p.

Vallès, V., Bertrand R., Bourgeat F., N'Diaye M.K.; 1989. Concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques. Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l'Ouest du Medjerdah. *L'agronomie tropicale*, 44- 3, 157-163.

Vallès, V., De Cockborne A.M., 1992. Elaboration d'un logiciel de géochimie appliqué à l'étude de la qualité des eaux. Colloque " Altération et restauration de la qualité des eaux continentales ", Port-Leucate, 1-2 oct., 27-30.

Vieillefon, J., Chantret, F., Trichet, J. 1973. Caractérisation des formes du soufre dans les sols de mangrove : mise en évidence d'une fraction liée à la matière organique, *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris.* 19: 2629-2632.

ANNEXE 1  
TABLEAUX

**Tableau I : analyse de sol en conditions oxydées**

	<b>Sol</b>				
<b>DESIGN</b>	<b>Initial</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>
<b>GRANULOMETRIE</b>					
ARGILES	10,00				
LIMONS FINS	2,90				
LIMONS GROSSIERS	15,30				
SABLES FINS	52,30				
SABLES GROSSIERS	19,50				
<b>MATIERE ORGANIQUE</b>					
MATIERE ORGANIQUE	0,79	0,71	0,78	1,10	0,78
CARBONE ORGANIQUE	0,46	0,41	0,45	0,64	0,45
AZOTE TOTAL	0,37	0,33	0,38	0,47	0,38
C/N	12,43	12,42	11,84	13,62	11,84
<b>PHOSPHORE ASSIMILABLE</b>					
Phosphore Bray 2	13,05	13,58	18,86	21,67	16,93
Phosphore Olsen	4,78	11,84	7,00	7,95	6,82
<b>PH</b>					
	8,60	7,95	7,85	7,90	8,50

**Tableau II: Analyse de sol, extrait 1:1**

ECH/E LEM	Meq/l								μS/cm		
	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	HCO3	pH	CE	somme C+	somme A-
Sol initial	0,05	0,02	0,03	3,48	0,29	0,31	3,17	7,73	361,00	3,58	3,77
T1	0,11	0,02	0,06	3,40	0,32	0,33	2,84	7,34	253,00	3,59	3,49
T2	0,12	0,15	0,05	2,37	0,46	0,22	2,00	7,22	277,00	2,68	2,68
T3	0,29	0,12	0,21	3,80	0,63	0,49	2,93	7,35	420,00	4,41	4,05
T4	0,09	0,03	0,03	4,43	0,73	0,11	2,90	7,91	458,00	4,57	3,73
<b>ECH/E LEM</b>											
	Si	Mn	Fe	Al							
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L							
initial	2,85	0,00	0,30	0,54							
T1	5,55	0,00	0,84	2,16							
T2	46,45	0,09	12,53	27,87							
T3	1,92	0,03	0,05	0,13							
T4	1,08	0,01	0,00	0,01							

**Tableau III : Analyse extraits 1:1 incubation en flacons fermés (sol-eau distillée)**

Ref	Durée (heure)	pHsusp	Ehsusp	rH	Cl meq	SO <sub>4</sub> meq	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	Fe	Ca meq	Mg meq	K meq	Na meq	Mn meq
Eau	0	7,7	269	12,21	0,152	0,258	0,445	0,003	0,008	0,045	0,011	0,007	2,278	0,000
1	0	7,83	258	12,16	0,141	0,261	0,541	0,003	0,013	0,042	0,009	0,007	2,277	0,000
2	8	7,24	257	11,55	0,141	0,297	0,195	0,001	0,008	0,040	0,009	0,017	2,743	0,000
2	8	7,29	253	11,53	0,135	0,302	0,213	0,001	0,009	0,061	0,016	0,011	2,797	0,000
2	8	7,21	327	12,70	0,146	0,303	0,223	0,003	0,007	0,047	0,011	0,015	2,829	0,000
3	16	6,46	165	9,23	0,152	0,334	0,008	0,001	0,026	0,069	0,027	0,023	3,972	0,001
3	16	7,07	189	10,24	0,135	0,321	0,049	0,006	0,020	0,069	0,027	0,019	3,705	0,001
3	16	7,02	190	10,21	0,141	0,323	0,037	0,003	0,010	0,070	0,023	0,021	3,755	0,001
4	24	6,85	-6	6,75	0,209	0,322	0,018	0,001	0,003	0,075	0,023	0,030	4,017	0,001
4	24	6,83	161	9,53	0,130	0,322	0,020	0,007	0,006	0,024	0,007	0,018	3,927	0,000
4	24	6,85	124	8,93	0,130	0,280	0,014	0,001	0,001	0,054	0,023	0,018	4,069	0,000
5	48	6,91	-121	4,88	0,146	0,297	0,013	0,020	0,002	0,176	0,073	0,038	5,687	0,002
5	478	6,85	-106	5,07	0,135	0,289	0,012	0,043	0,001	0,196	0,078	0,035	5,701	0,005
5	48	6,86	-112	4,98	0,124	0,291	0,013	0,043	0,001	0,189	0,075	0,034	5,567	0,006
6	72	6,36	-156	3,74	0,113	0,095	0,011	0,049	0,000	2,410	1,000	0,081	8,320	0,116
6	72	6,36	-166	3,57	0,107	0,105	0,012	0,049	0,000	2,426	1,010	0,079	8,397	0,150
6	72	6,31	-166	3,52	0,113	0,106	0,012	0,045	0,000	2,531	1,043	0,084	8,347	0,157
7	120	6,94	-185	3,84	0,124	0,165	0,011	0,091	0,001	0,709	0,301	0,063	6,918	0,049
7	120	6,99	-196	3,70	0,113	0,144	0,010	0,117	0,001	0,757	0,324	0,066	7,117	0,036
7	120	6,94	-183	3,87	0,107	0,155	0,011	0,093	0,000	0,519	0,256	0,061	6,992	0,011
8	192	7,34	-158	4,69	0,124	0,071	0,011	0,145	0,001	1,059	0,458	0,076	7,603	0,043
8	192	7,38	-157	4,75	0,107	0,077	0,011	0,150	0,000	1,051	0,452	0,071	7,514	0,052
8	192	7,39	-179	4,39	0,118	0,076	0,011	0,150	0,000	1,214	0,521	0,076	7,748	0,059

Tableau IV : Analyse extraits 1:1 incubation en flacons fermés suite (sol-solution glucose 10g/l)

	Ref	Durée (heure)	pHsusp	Ehsusp mV*	rH	Cl meq	SO <sub>4</sub> meq	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	Fe	Ca meq	Mg meq	K meq	Na meq	Mn meq
Glucose	1	0	7,55	262	11,95	0,158	0,200			0,001	0,004	0,000	0,002	0,000	0,000
	1	0	7,67	270	12,20	0,175	0,213			0,064	0,025	0,011	0,009	0,000	0,000
	2	8	7,65	259	12,00	0,180	0,209			0,001	0,022	0,000	0,005	0,000	0,000
	2	8	6,48	138	8,80	0,135	0,256			0,000	0,044	0,003	0,008	4,487	0,000
	2	8	6,49	138	8,81	0,180	0,250			0,000	0,081	0,021	0,008	4,430	0,000
	3	16	6,51	135	8,78	0,152	0,240			0,002	0,122	0,033	0,009	4,561	0,001
	3	16	5,85	-551	-3,39	0,141	0,214			0,073	1,158	0,469	0,033	7,630	0,043
	3	16	5,77	-547	-3,41	0,130	0,214			0,063	1,283	0,519	0,033	7,713	0,082
	4	24	5,71	-548	-3,48	0,141	0,215			0,079	1,247	0,500	0,034	7,652	0,087
	4	24	5,37	-537	-3,64	0,124	0,241			0,094	3,506	1,349	0,051	8,878	0,296
	4	24	5,37	-537	-3,64	0,124	0,252			0,182	2,951	1,220	0,053	8,743	0,207
	5	48	5,34	-539	-3,70	0,124	0,252			0,124	3,200	1,277	0,052	8,835	0,252
	5	48	4,88	-504	-3,58	0,135	0,360			2,093	6,926	2,556	0,082	9,509	0,631
	5	48	4,85	-508	-3,67	0,203	0,360			2,010	6,701	2,514	0,078	9,370	0,588
	6	72	4,84	-506	-3,65	0,135	0,367			1,803	6,856	2,550	0,077	10,043	0,589
	6	72	4,69	-492	-3,57	0,146	0,363			1,912	7,337	2,710	0,095	9,774	0,659
	6	72	4,66	-497	-3,68	0,163	0,390			2,084	7,802	2,859	0,100	9,904	0,694
	7	120	4,64	-492	-3,62	0,152	0,380			1,761	7,612	2,820	0,101	9,909	0,682
	7	120	4,59	-467	-3,25	0,180	0,496			2,723	9,968	3,537	0,120	10,300	0,888
	7	120	4,55	-469	-3,32	0,163	0,467			2,466	9,438	3,399	0,111	10,170	0,854
	8	192	4,56	-473	-3,38	0,175	0,488			1,631	9,524	3,443	0,117	10,170	0,864
	8	192	4,9	-471	-3,00	0,225	0,550			1,887	11,185	3,957	0,133	10,296	1,026
	8	192	4,91	-483	-3,19	0,231	0,568			1,645	10,965	3,920	0,123	10,026	0,995
	8	192	4,97	-474	-2,98	0,163	0,555			1,253	11,301	4,055	0,135	10,822	1,027

• Les valeurs de Eh doivent être majorées de 210 mV

Tableau V : Analyse de la solution du sol

	pH sol	Ca meq/l	Mg meq/l	K meq/l	Na meq/l	N-NH4 meq/l	Cl meq/l	SO4 meq/l	N-NO3 meq/l	HCO3 meq/l	CE (µS)	pH solution	% HCO3	% Na	Si (mg/l)
T115-Fév	7,28	0,13	0,45	0,21	16,90	0,19	0,60	0,11	0,01	17,40	1460,00	8,10	96,03	94,52	6,70
22-Fév	7,20	1,58	0,95	0,34	16,03	0,29	0,71	0,06	0,00	16,54	1375,00	8,10	95,55	83,53	5,84
01-Mar	7,32	0,24	0,77	0,41	15,50	0,24	0,71	0,11	0,00	15,68	1564,00	8,03	95,03	90,33	4,38
08-Mar	7,12	1,11	1,03	0,51	14,74	0,26	0,00	0,12	0,00	15,12	1482,00	7,57	99,21	83,51	4,31
15-Mar	6,98	0,16	0,44	0,72	13,47	0,21	0,92	0,08	0,02	14,63	1521,00	7,92	93,45	89,76	6,15
22-Mar	6,83	0,21	0,40	0,16	10,26	0,16	0,61	0,07	0,01	13,12	1172,00	7,47	94,99	91,70	1,92
29-Mar	7,16	0,51	0,44	0,18	10,48	0,20	0,53	0,07	0,09	11,68	1819,00	7,41	94,49	88,68	1,96
04-Avr	7,17	1,80	0,62	0,20	11,41	0,17	0,29	0,07	0,00		1018,00	7,74			
T215-Fév	7,29	0,32	1,05	0,29	18,00	0,22	1,08	0,14	0,01	17,78	1570,00	8,00	93,53	90,54	7,16
22-Fév	7,12	2,61	1,19	0,26	16,94	0,17	0,95	0,08	0,01	16,54	1442,00	7,75	94,08	80,02	6,14
01-Mar	7,12	0,49	1,35	0,62	16,97	0,11	1,07	0,14	0,00	17,04	1784,00	7,83	93,37	86,85	4,05
08-Mar	6,89	1,99	1,79	0,59	18,13	0,07	0,00	0,18	0,00	17,86	1882,00	7,47	99,00	80,33	3,81
15-Mar	6,92	0,38	1,33	0,48	17,61	0,02	1,19	0,08	0,00	17,74	1955,00	7,52	93,33	88,89	4,75
22-Mar	6,67	2,10	1,57	0,15	18,05	0,04	0,99	0,11	0,01	19,78	1972,00	7,10	94,65	82,42	4,08
29-Mar	6,87	0,59	1,16	0,55	15,08	0,15	1,03	0,07	0,01	15,86	1660,00	7,15	93,48	86,01	0,85
04-Avr	6,95	3,45	1,56	0,20	14,74	0,23	0,91	0,11	0,00		1431,00	7,39			

**Tableau VI : Analyse de la solution du sol (suite)**

T315- Fév	7,14	0,79	3,61	1,13	29,37	1,51	6,47	0,41	0,02	21,20	3140,00	7,86	75,44	80,66	8,12
22-Fév	6,93	4,28	3,94	1,13	24,41	1,64	5,54	0,20	0,01	23,16	2780,00	7,66	80,11	68,95	7,30
01-Mar	7,05	0,85	3,47	1,05	21,97	1,32	3,67	0,29	0,00	21,20	2880,00	7,55	84,26	76,66	4,21
08-Mar	6,93	3,51	3,59	1,01	22,54	0,52	4,53	0,36	0,00	20,42	2700,00	7,34	80,70	72,31	3,91
15-Mar	6,85	0,56	2,60	1,01	21,86	0,08	4,38	0,27	0,00	19,40	2660,00	7,39	80,64	83,70	4,52
22-Mar	6,67	2,77	2,67	0,77	22,36	0,04	3,70	0,33	0,00	19,88	2590,00	7,15	83,15	78,19	3,73
29-Mar	6,99	1,00	2,02	0,68	19,08	0,02	2,52	0,23	0,00	18,82	2180,00	7,07	87,23	83,66	0,80
04-Avr	7,00	4,74	2,37	0,77	17,59	0,09	2,36	0,26	0,00		1777,00	7,33			
T415- Fév	7,80	0,34	1,11	0,27	19,27	0,22	1,19	0,17	0,01	18,54	1670,00	8,02	93,12	90,85	6,59
22-Fév	6,98	2,09	0,98	0,18	15,38	0,09	0,65	0,05	0,02	15,16	1267,00	7,69	95,47	82,16	5,35
01-Mar	6,48	0,92	0,81	0,44	10,36	0,52	1,12	0,14	0,01	9,78	1072,00	7,94	88,51	79,39	3,76
08-Mar	6,50	0,61	0,30	0,20	7,51	0,07	2,25	0,29	0,04	6,02	750,00	7,42	70,00	86,42	3,78
15-Mar	7,14	0,70	0,66	0,49	7,65	0,05	2,37	0,23	0,04	6,50	788,00	7,88	71,11	80,02	4,97
22-Mar	7,14	0,50	0,26	0,10	8,35	0,01	2,17	0,14	0,08	6,84		7,79	74,16	90,50	4,59
29-Mar	6,67	0,54	0,39	0,20	10,28	0,04	2,01	0,07	0,01	8,56	970,00	7,60	80,33	89,85	1,91

**Tableau VII : analyse de la lame d'eau**

ECH/EL EM	Nø	Ca me/L	Mg me/L	K me/L	Na me/L	N-NH4 me/L	Cl me/L	SO4 me/L	N-NO3 me/L	CO3 me/L	HCO3 me/L	pH	CE µS	Si mg/L	Carbonat es	%Na	
T1																	
	01-Mar	1,00	0,40	0,33	0,08	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	4,34	7,92	501,00	51,1**	98,97	84,58	
	08-Mar	2,00	0,10	0,16	0,06	0,02	0,77	0,07	0,01	0,00	6,34	8,11	675,00	60,287**	88,20	95,12	
	15-Mar	3,00	0,11	0,16	0,06	0,01	0,85	0,07	0,00	0,60	6,42	8,81	738,00	61,934**	80,82	95,42	
	22-Mar	4,00	0,24	0,24	0,05	0,02	0,46	0,02	0,00	0,00	2,04	7,00	242,00	3,36	80,86	81,24	
T2																	
	01-Mar	1,00	0,38	0,20	0,05	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	2,16	7,26	275,00	15,539**	98,43	78,12	
	08-Mar	2,00	0,27	0,20	0,01	0,00	0,59	0,05	0,00	0,00	2,70	7,18	309,00	10,055**	80,99	84,12	
	15-Mar	3,00	0,41	0,19	0,02	0,00	0,44	0,02	0,00	0,00	2,40	7,06	308,00	7,873**	83,78	80,10	
	22-Mar	4,00	0,47	0,15	0,06	1,77	0,35	0,01	0,00	0,00	3,88	7,99	431,00	1,56	91,70	44,26	
T3																	
	01-Mar	1,00	1,23	0,52	0,11	0,04	0,00	0,05	0,00	0,00	4,72	7,67	556,00	0,93	98,94	67,80	
	08-Mar	2,00	1,18	0,38	0,02	0,00	0,74	0,06	0,00	0,00	4,66	7,56	527,00	0,95	85,35	70,53	
	15-Mar	3,00	0,70	0,17	0,02	0,00	0,14	0,03	0,01	0,00	3,22	7,04	310,00	2,12	94,81	72,20	
	22-Mar	4,00	0,65	0,14	0,09	1,16	0,21	0,02	0,00	0,00	3,32	7,87	355,00	0,68	93,51	45,74	

\*\* les résultats n'ont pu être confirmés par mabque de solution



**Tableau VIII : mesures continues de la temperature et du Eh (moyenne par jour)**

Dates	TempT1	TempT2	TempT3	TempT4	EhT1	EhT2	EhT3	EhT4
05-fév	27,64	27,53	27,47	26,52	0,437	0,245	0,120	0,391
06-fév	27,68	27,75	27,66	26,54	0,223	0,081	-0,006	0,174
07-fév	27,68	27,86	27,77	26,57	0,000	-0,061	-0,129	0,028
08-fév	27,45	27,70	27,61	26,54	-0,130	-0,118	-0,181	-0,084
09-fév	27,51	27,80	27,71	26,48	-0,198	-0,157	-0,180	-0,147
10-fév	27,64	28,07	27,98	26,42	-0,224	-0,196	-0,191	-0,189
11-fév	27,81	28,15	28,06	26,60	-0,241	-0,233	-0,207	-0,212
12-fév	27,65	27,97	27,88	26,50	-0,257	-0,249	-0,207	-0,224
13-fév	27,63	27,86	27,77	26,57	-0,263	-0,256	-0,199	-0,230
14-fév	27,75	28,06	27,97	26,78	-0,266	-0,275	-0,197	-0,233
15-fév	28,43	28,27	28,19	27,29	-0,280	-0,270	-0,189	-0,240
16-fév	28,05	28,13	28,05	26,82	-0,281	-0,271	-0,188	-0,244
17-fév	28,04	28,02	27,94	26,70	-0,284	-0,262	-0,189	-0,244
18-fév	27,96	28,01	27,92	26,60	-0,286	-0,247	-0,191	-0,245
19-fév	27,84	27,91	27,82	26,46	-0,288	-0,240	-0,192	-0,249
20-fév	27,92	28,07	27,99	26,67	-0,291	-0,239	-0,192	-0,249
21-fév	27,97	28,12	28,04	26,68	-0,294	-0,240	-0,193	-0,248
22-fév	27,56	27,64	27,53	26,18	-0,223	-0,194	-0,107	-0,220
23-fév	27,93	28,11	28,01	26,65	-0,211	-0,234	-0,142	-0,244
24-fév	27,86	27,98	27,88	26,45	-0,193	-0,244	-0,156	-0,248
25-fév	27,85	28,12	28,02	26,55	-0,199	-0,244	-0,160	-0,254
26-fév	28,09	28,25	28,14	26,80	-0,207	-0,234	-0,162	-0,243
27-fév	28,11	28,24	28,14	26,91	-0,213	-0,220	-0,160	-0,238
28-fév	27,94	28,11	28,00	26,99	-0,215	-0,216	-0,155	0,021
01-mar	27,76	28,07	27,96	26,70	-0,216	-0,218	-0,159	-0,018
02-mar	27,64	27,92	27,82	26,54	-0,216	-0,218	-0,160	-0,166
03-mar	27,61	27,89	27,79	26,57	-0,217	-0,216	-0,158	-0,190
04-mar	27,70	27,99	27,89	26,82	-0,218	-0,211	-0,161	-0,191
05-mar	27,83	28,12	28,02	27,29	-0,219	-0,205	-0,166	0,053
06-mar	27,71	27,99	27,89	27,02	-0,219	-0,205	-0,170	0,474
07-mar	27,60	27,79	27,69	26,86	-0,219	-0,203	-0,172	0,523
08-mar	26,77	27,09	26,98	25,74	-0,218	-0,200	-0,170	0,476
15-mar	Panne de la centrale d'acquisition				-0,189	-0,161	-0,170	0,326
28-mar	26,75	26,76	26,69	26,59	-0,043	0,220	-0,066	0,485
29-mar	26,63	26,90	26,84	26,21	-0,145	0,050	-0,077	0,415
30-mar	27,19	27,17	27,11	26,35	-0,176	-0,058	-0,056	0,529
31-mar	27,21	27,22	27,15	26,61	-0,196	-0,126	-0,080	0,533
01-avr	27,53	27,54	27,47	27,03	-0,190	-0,159	-0,119	0,553
02-avr	27,75	27,81	27,74	27,03	-0,198	-0,180	-0,140	0,572
03-avr	27,80	27,87	27,81	27,07	-0,200	-0,183	-0,147	0,565
04-avr	27,86	27,91	27,85	27,51	-0,203	-0,177	-0,149	0,580
05-avr	26,52	26,94	26,88	26,05	-0,204	-0,173	-0,148	0,591

ANNEXE 2  
FIGURES

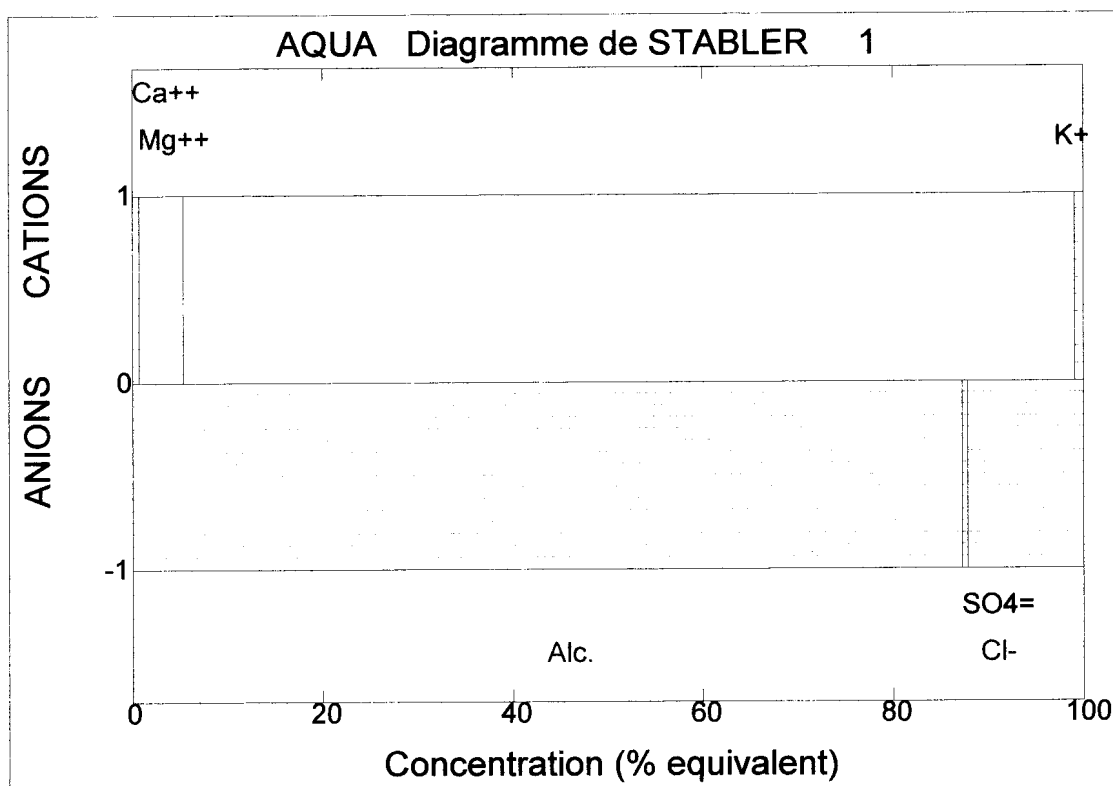


Figure 1 : Composition chimique de la solution du sol

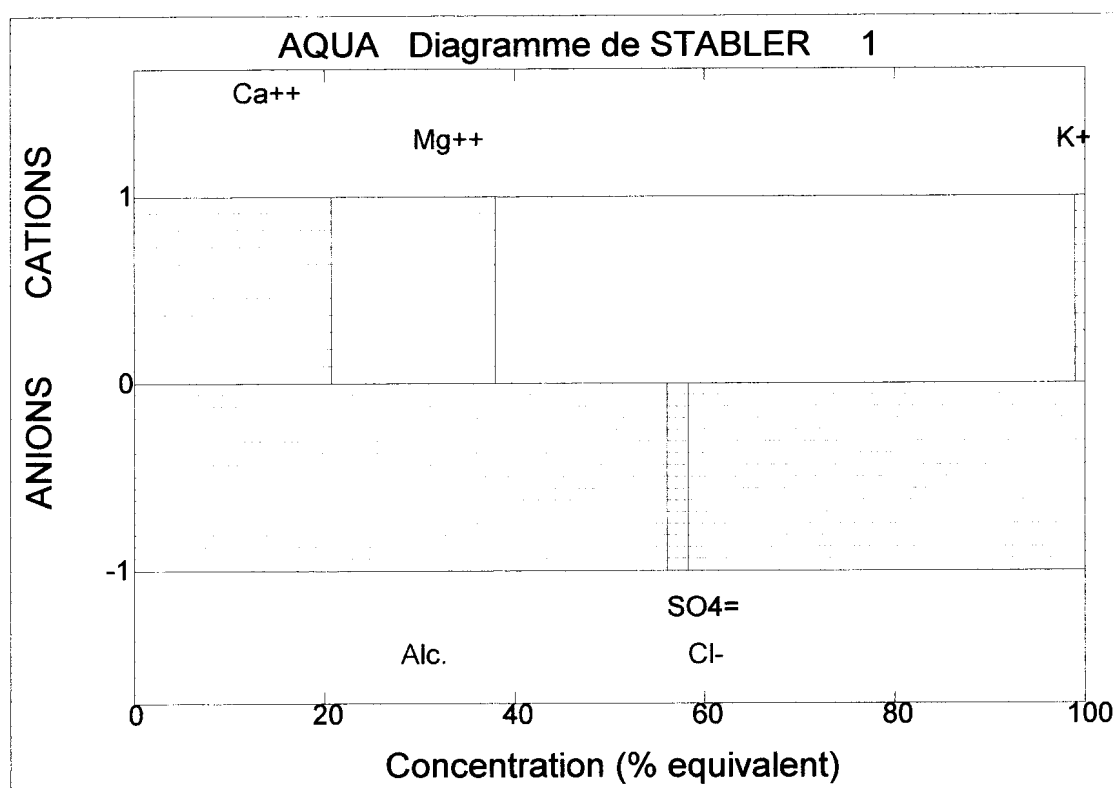


Figure 2 : Composition chimique de la lame d'eau

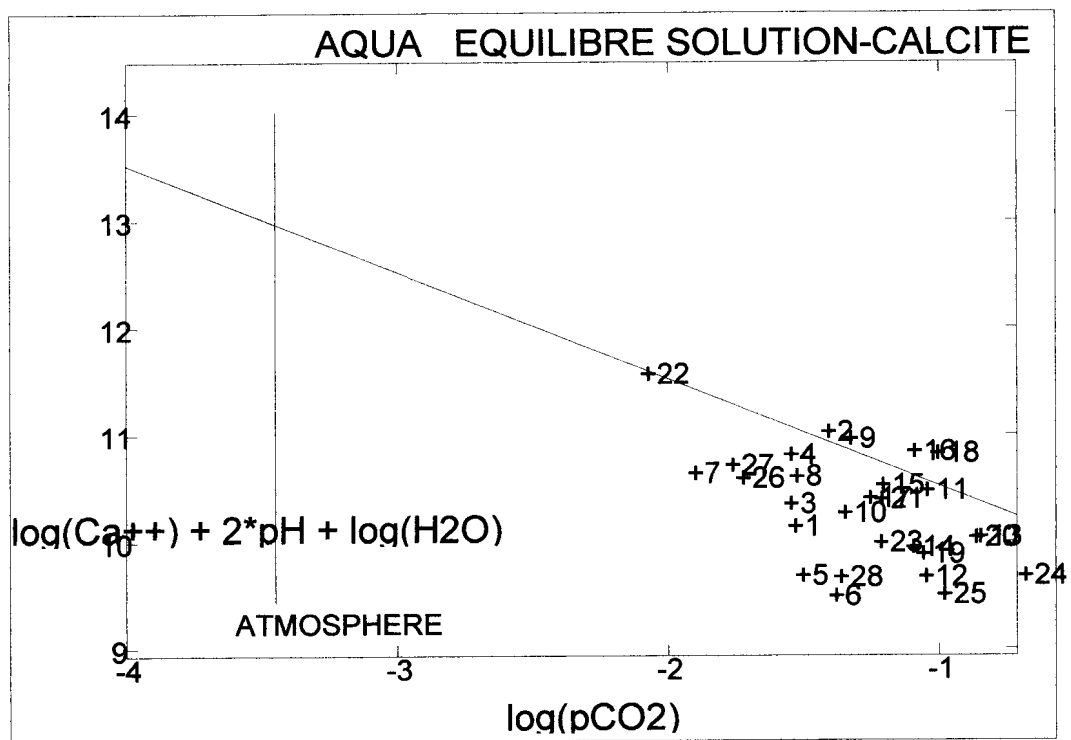


Figure 3 : diagramme de saturation calcite (solution du sol)

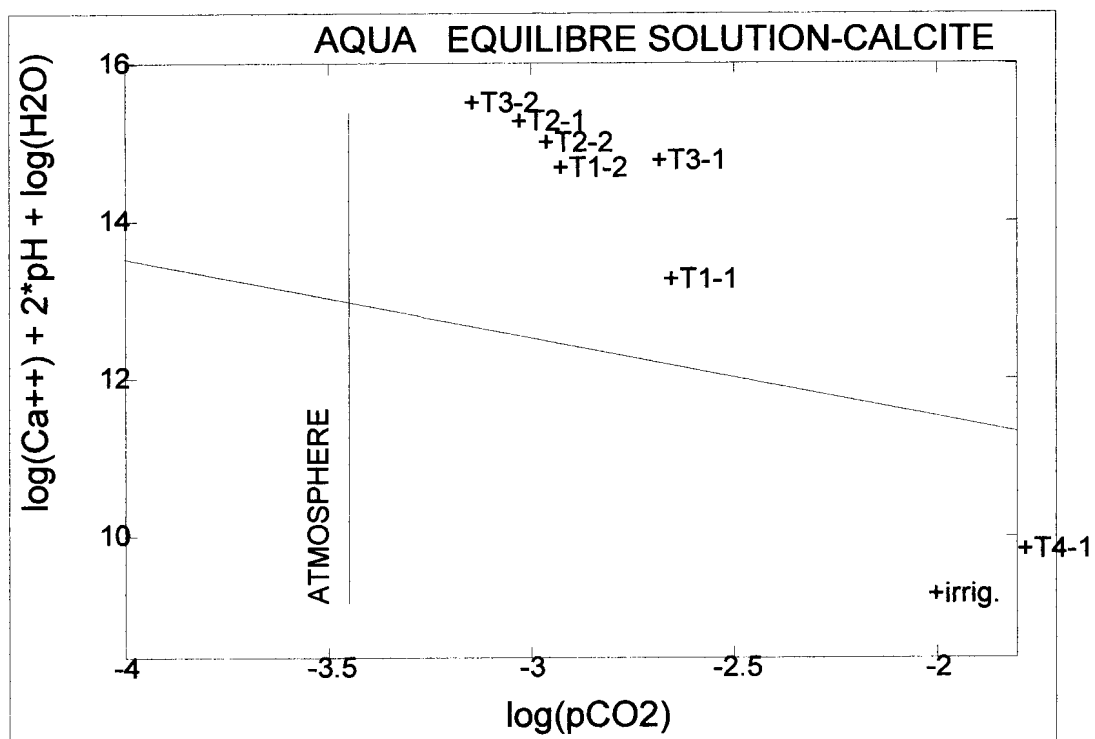


Figure 4 : Diagramme de saturation calcite (lame d'eau)

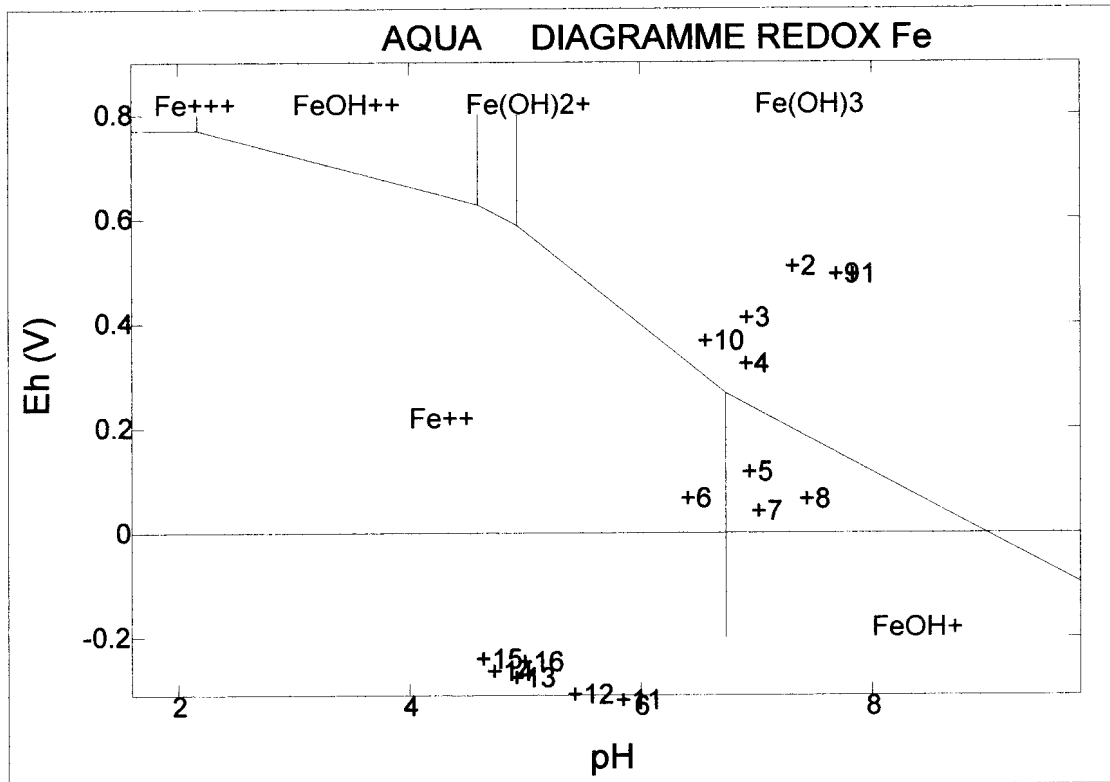


Figure 5 : Diagramme redox du fer (flacons fermés)

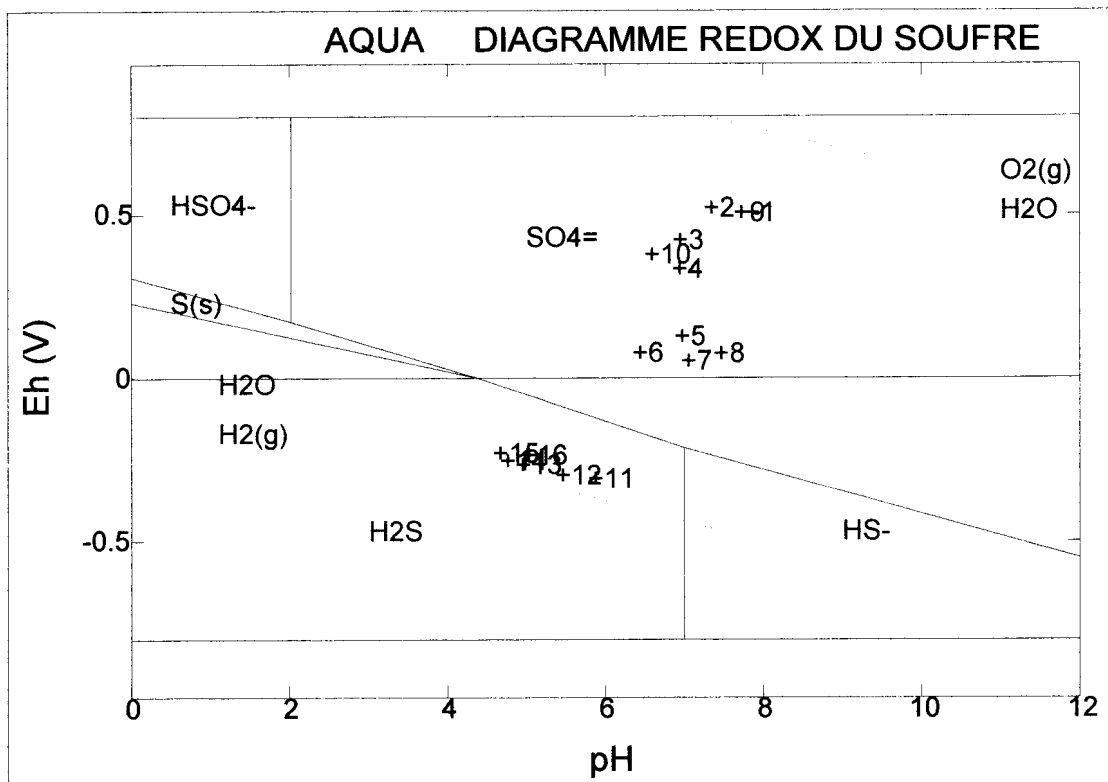


Figure 6 : Diagramme redox du soufre (flacons fermés)

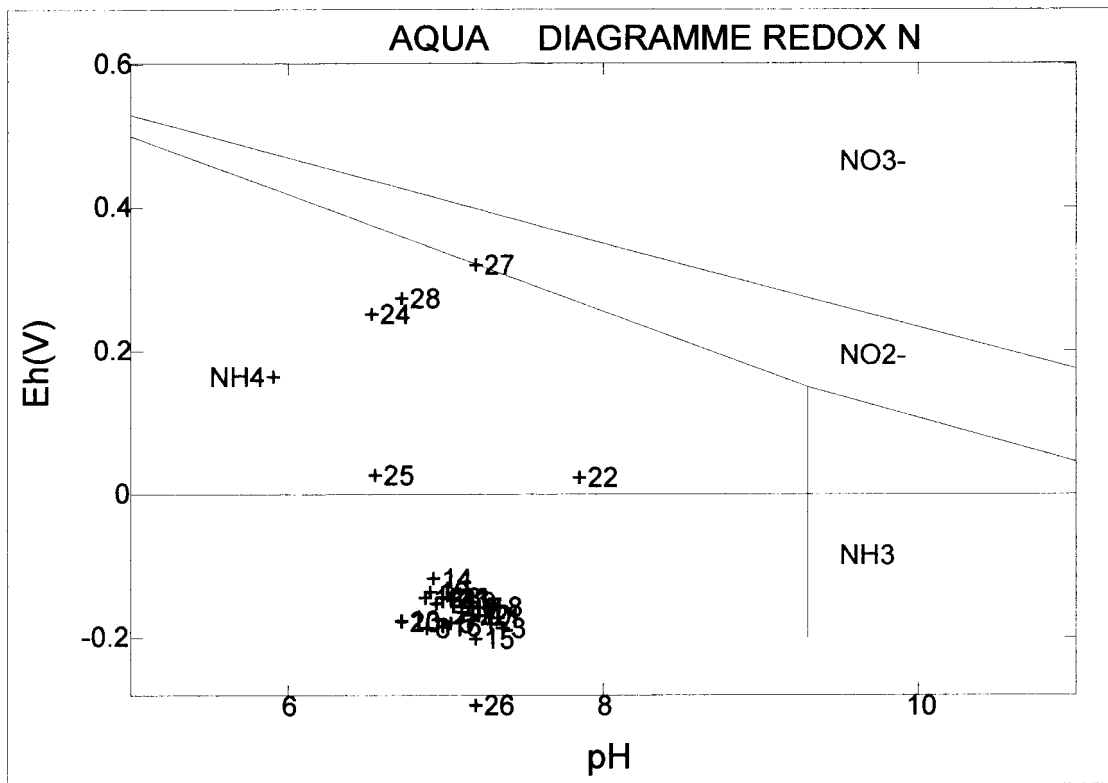


Figure 7 : Diagramme de réduction du nitrate (solution du sol)

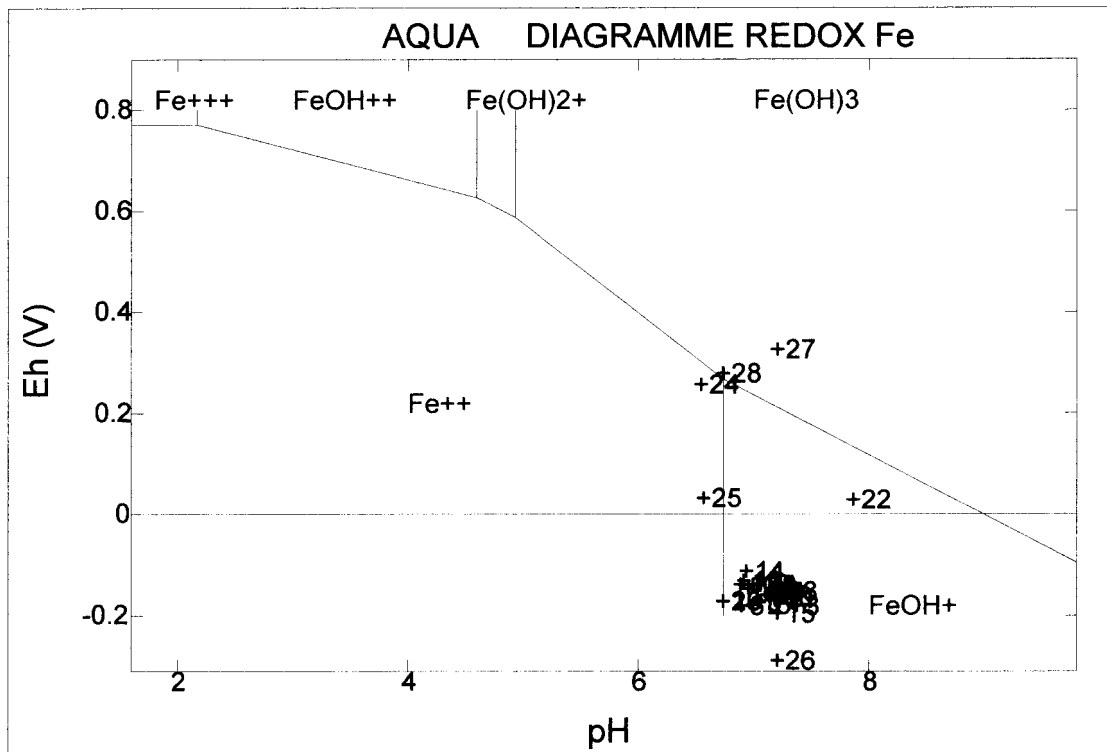


Figure 8 : Diagramme de réduction du fer (solution du sol)

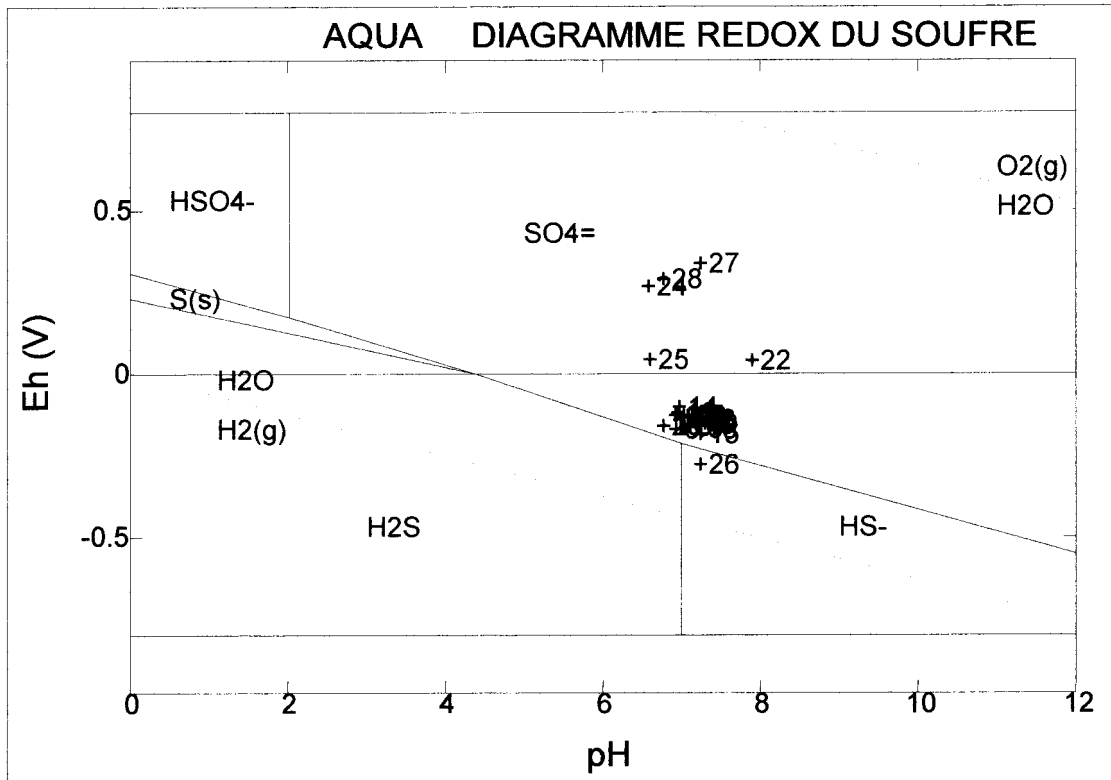


Figure 9: Diagramme de réduction du soufre (solution du sol)

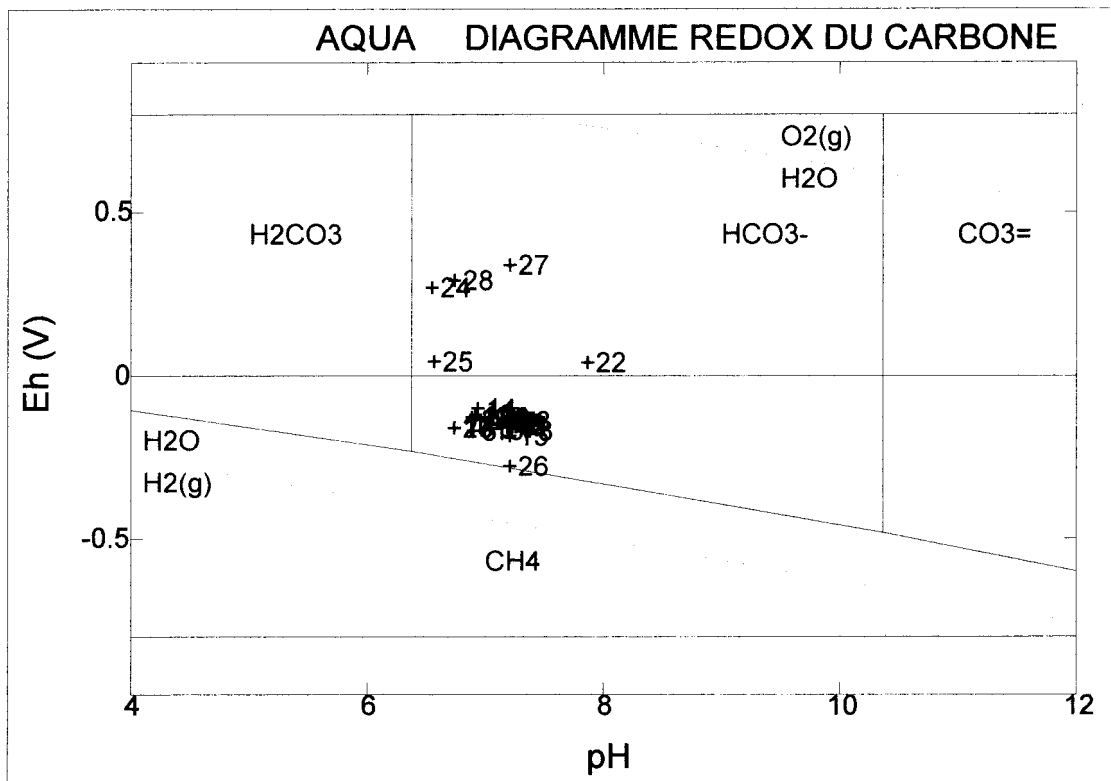


Figure 10 : Diagramme de réduction du carbone (solution du sol)