



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Travail pratique de diplôme EPFL  
Département de Génie Rural  
IATE-Pédologie

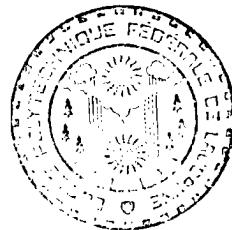
Mars 1995

---

**Alcalinisation des sols irrigués dans la moyenne  
vallée du fleuve Sénégal: diagnostique par évaluation  
du stock de carbonates.**

---

Sylvia Schiess



Pascal Boivin, ORSTOM  
Philippe de Pury, EPFL  
Jean-Claude Védy, EPFL

## Remerciements

Ce stage a pu exister et se dérouler dans de bonnes conditions grâce au concours de nombreuses personnes que je tiens à remercier.

Ces remerciements s'adressent en particulier à Pascal Boivin, chargé de recherche en pédologie à l'ORSTOM de Dakar, qui m'a encadré durant ce stage au Sénégal.

Je remercie le professeur Jean-Claude Vedy à l'EPFL pour m'avoir offert la possibilité de faire mon travail de diplôme au Sénégal, ainsi que Philippe de Pury qui s'est occupé des contacts avec l'ORSTOM de Dakar.

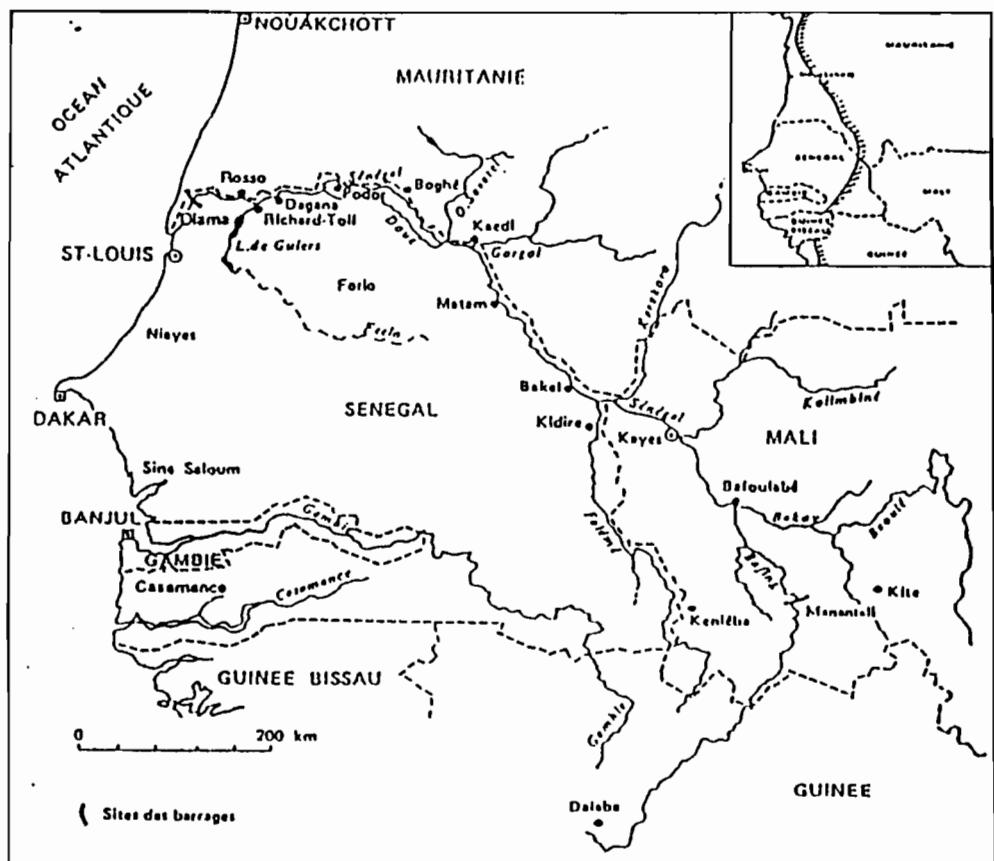
Je tiens également à remercier Balla Traore, technicien à l'ORSTOM de Dakar, pour son aide précieuse sur le terrain puis au laboratoire. Je remercie aussi Jean-Luc Maeght pour son aide et ses conseils sur le terrain.

## **Introduction**

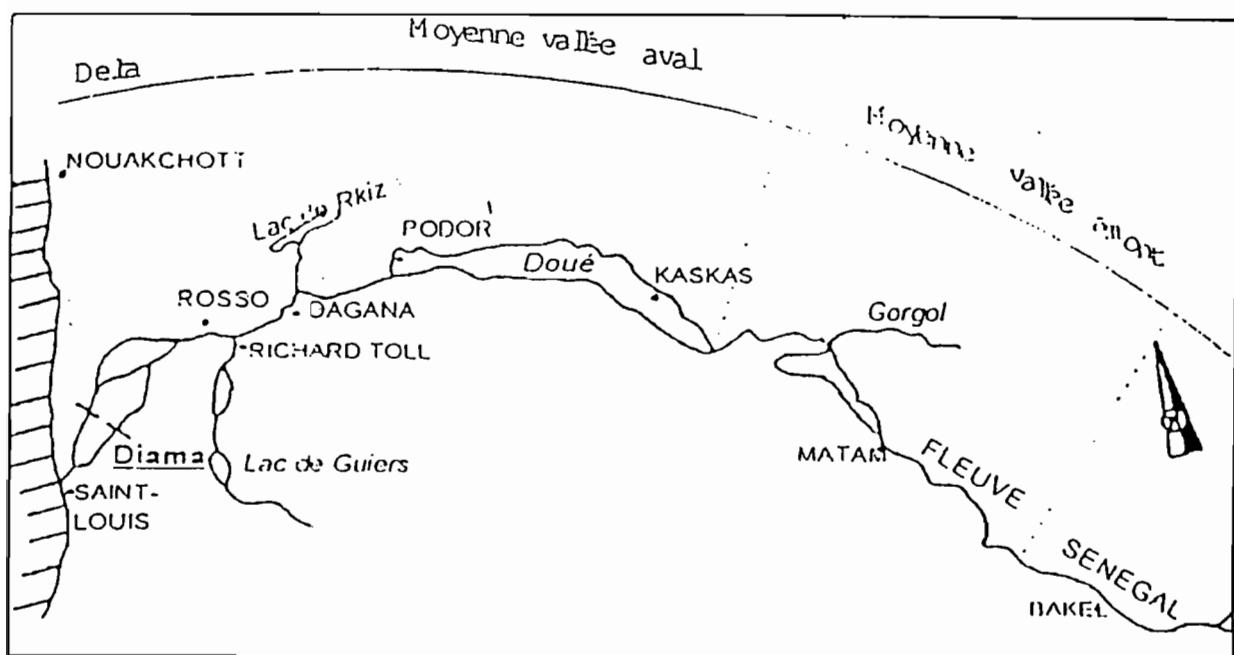
L'objectif de ce travail est de tester une méthode simple d'évaluation du stock de carbonates accumulés dans les sols irrigués de la moyenne vallée du fleuve Sénégal, puis d'envisager l'application de cette méthode comme indicateur du régime hydrique et du degré d'alcalinisation des sols irrigués.

Ce travail fait suite à celui de Charollais et Weber (1994) qui s'étaient également intéressées à la dégradation des sols par alcalinisation et sodisation de la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Depuis lors, de récents travaux effectués sur des périmètres irrigués de la région ont permis une meilleure compréhension des mécanismes affectant l'évolution de ces sols (Boivin et al, 1994). Les résultats obtenus par Charollais et Weber (1994) seront repris et discutés à la lumière des nouvelles connaissances acquises. Un nouveau bilan du degré d'alcalinisation des sols sera ensuite établi par évaluation de la quantité de carbonates stockés dans les sols cultivés.

Ce rapport fera d'abord l'objet d'un bref rappel de la problématique présentée par la culture irriguée en condition aride et des risques de dégradation encourus. Les connaissances théoriques nécessaires à la bonne compréhension des mécanismes mis en jeux seront ensuite détaillées dans le chapitre suivant. Le troisième chapitre reprendra les résultats des précédentes investigations effectuées concernant le problème de l'alcalinisation des sols dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Ce chapitre permettra de justifier la nouvelle approche du problème dont la méthodologie sera détaillée dans le chapitre 4. Finalement, les résultats seront exposés et commentés dans le dernier chapitre.



(tirée de Loyer, 1989)



(tirée de Mane et al., 1994)

Fig 1: Cartes de situation générale

## 1. Evolution des sols irrigués sous climat aride

La problématique exposée par Charollais et Weber (1994) étant toujours la même, elle ne sera que brièvement rappelée.

D'une part, l'irrigation en climat aride est caractérisée par un bilan hydrique déficitaire. L'évapo-transpiration très importante provoque la remonté des nappes peu profondes par capillarité et une forte concentration de l'eau en surface. D'autre part, le passage d'une culture pluviale à une culture irriguée implique une modification du régime hydrique et des équilibres chimiques. En effet, l'eau pluviale, non chargée en éléments minéraux, est remplacée par une grande quantité d'eau d'irrigation pouvant être au contraire très chargée. Depuis une dizaine d'année, la culture irriguée tend à remplacer la culture de décrue qui se pratiquait traditionnellement dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Outre les conséquences économiques et sociales qu'ont entraîné un tel changement, le passage d'une culture de décrue à une culture irriguée a provoqué la dégradation des sols par modification du régime hydrique et de la composition de l'eau. Il se trouve qu'une baisse des rendements a été enregistrée dans la région, et que les problèmes identifiés sur la croissance du riz pourraient être liés au processus d'alcalinisation.

Les différentes formes de dégradation des sols susceptibles d'être rencontrées dans un système cultivé sont les suivantes:

- l'hydromorphie, soit une dégradation des sols due à l'engorgement prolongé du sol.
- le tassement mécanique provoqué par le travail du sol et plus particulièrement sur sols engorgés.
- la salinisation, provoquée par une accumulation des sels solubles le long du profil. La présence de poches salines d'origine marine en profondeur, conjuguée au mouvement ascensionnel de l'eau des nappes sous l'effet de la forte demande évaporative, rendent ce processus très important dans la région. Cependant, la riziculture nécessitant la présence quasi permanente d'une lame d'eau en charge, une mince couche de sol est maintenue dessalée, permettant ainsi la croissance du riz. De ce fait, la salinité n'est probablement pas un facteur limitant important pour la culture du riz. Elle devient beaucoup plus gênante pour la culture d'oignons et de tomates qui se pratique également dans la région.
- la sodisation du complexe adsorbant: elle accompagne généralement les phénomènes de salinisation et d'alcalinisation. Elle se manifeste par le remplacement progressif des cations bivalents du complexe adsorbant par du sodium. L'augmentation du taux de saturation en sodium (ESP) du complexe d'échange peut provoquer une déflocculation des argiles avec pour conséquence une diminution de la porosité et de la stabilité structurale du sol. Le sol prend alors une consistance plastique et devient inapte à la culture.
- l'alcalinisation des sols est provoquée par une accumulation de bases faibles entraînant une hausse du pH. Ces bases faibles sont apportées par l'eau d'irrigation. La modification de la composition chimique de cette eau par évaporation est à l'origine de leur accumulation. Ce processus faisant l'objet de cette étude, il sera détaillé au chapitre suivant.

## 2. L'alcalinisation

Les conséquences auxquelles peut conduire la dégradation des sols par alcalinisation et sodisation sont parfois catastrophiques. On peut prendre pour exemple ce qui se produit actuellement dans les rizières de l'office du Niger au Mali (tiré de Bertrand et al, 1994). Après cinquante ans de cultures irriguées, des baisses de rendements importants ont été enregistrées conduisant parfois à l'abandon de terres aménagées à grands frais. Ce processus s'étant déroulé dans des conditions climatiques identiques à celles rencontrées au Sénégal, et avec une eau dont la composition chimique est proche de celle du fleuve Sénégal, il n'est pas à exclure que l'évolution engagée actuellement dans la région de Podor puisse aboutir à une situation identique.

La bonne compréhension du mécanisme régissant l'évolution alcaline des sols nécessite au préalable le rappel de quelques définitions. Après avoir exposé le mécanisme d'alcalinisation des sols et ces conséquences, la discussion portera sur les possibilités de prévision de l'évolution des sols en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation et du facteur de résistance du sol.

### 2.1 Définition de l'alcalinité

Selon Bourrié (1976), l'alcalinité se définit comme la somme des concentrations de bases faibles multipliées par leur valence, moins la concentration en proton de la solution. L'alcalinité étant généralement essentiellement carbonatée, on peut donc écrire de manière simplifiée:

$$[\text{alc}] = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}_3\text{O}^+] \quad [1]$$

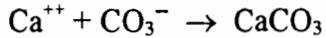
Cette quantité peut être positive, négative ou nulle et s'exprime en équivalent par litre de solution. A température donnée, l'alcalinité ne dépend que de la pression partielle de CO<sub>2</sub> et du pH.

Du point de vu analytique, l'alcalinité d'une eau se définit par la quantité d'ions H<sup>+</sup> qu'il faut ajouter à une solution jusqu'à ce que toute nouvelle diminution du pH corresponde exactement à toute nouvelle addition d'ions H<sup>+</sup> (Droubi, 1976).

Lorsque les eaux naturelles se concentrent par évaporation, les minéraux à faible solubilité comme la calcite vont successivement précipiter en entraînant une diminution de l'alcalinité et donc du pH. Mais ce scénario ne permet pas d'expliquer les fluctuations du pH observées au cours de l'évaporation. En particulier, dans de nombreux sols salés, on enregistre une forte hausse du pH en fin d'évaporation. Afin d'expliquer ces variations du pH, la notion d'alcalinité résiduelle a été définie par Van Beek et Van Breemen (1973), puis reprise et généralisé par Droubi, (1976). Elle permet de tenir compte des modifications des rapports de concentration entre les différents composés chimiques présents dans l'eau, dus à la précipitation de certains minéraux. La notion d'alcalinité résiduelle a, par la suite, été utilisée par Valles et al. (1989) pour expliquer l'évolution des sols irrigués.

## 2.2 Alcalinité résiduelle et alcalinité résiduelle généralisée

Lorsque les eaux se concentrent par évaporation, les espèces minérales en solution se concentrent également. Lorsque les phénomènes de précipitation entrent en jeu, le rapport entre les concentrations relatives des différents éléments présents dans l'eau vont se modifier. Dans le cas de l'eau du fleuve Sénégal, le premier minéral à précipiter est la calcite, selon l'équation suivante:



L'équation d'équilibre s'écrit:

$$[\text{Ca}^{++}] * [\text{CO}_3^{-}] = K_{\text{S}1} [2]$$

Pour que cette équation soit constamment respectée, toute augmentation de la concentration d'un des éléments doit se traduire par la diminution de la concentration de l'autre. Ainsi, si la concentration de  $\text{CO}_3^{-}$  est supérieure à la concentration de  $\text{Ca}^{++}$  dans la solution, on aura à partir du moment où la précipitation de la calcite commence, une augmentation relative de la concentration en  $\text{CO}_3^{-}$  par rapport à la concentration de  $\text{Ca}^{++}$ . La précipitation de la calcite se fera donc pour une teneur en  $\text{Ca}^{++}$  toujours plus faible et une teneur en  $\text{CO}_3^{-}$  de plus en plus élevée. Exprimé autrement, on peut dire que lorsqu'une eau contenant relativement plus de carbonates que de calcium se concentre, le pH va s'élever à partir du moment où la calcite précipite. Les variations du pH au cours de l'évaporation d'une eau s'expliquent donc par la différence entre l'alcalinité et la concentration en calcium, d'où l'intérêt de la notion d'alcalinité résiduelle.

Afin de décrire les variations de l'alcalinité et du pH au fur et à mesure que l'eau se concentre, Droubi (1976) a utilisé la notion d'alcalinité résiduelle et d'alcalinité résiduelle généralisée:

L'alcalinité a été définie par l'équation [1]. Lorsque la calcite précipite, on peut écrire:

$$\text{Alcalinité résiduelle calcite} = \text{Alcalinité} - 2[\text{Ca}^{++}]$$

En fonction du signe de l'alc. res. calcite, on peut prévoir l'évolution de la concentration des espèces en solution et du pH:

- si l'alc. res. calcite est négative, la concentration de la solution va accroître le déficit en carbonates et le pH va baisser.
- si, au contraire, l'alc.res. calcite est positive, l'excédent de carbonates va s'accroître et le pH augmentera.

Droubi (1976) a étendu le concept d'alcalinité résiduelle à la précipitation successive de plusieurs minéraux. C'est le concept d'alcalinité résiduelle généralisé.

Si le seuil de précipitation du gypse est atteint, on peut alors écrire:

$$\text{Alc. rés. calcite} + \text{gypse} = \text{alcalinité} - 2[\text{Ca}^{++}] + 2[\text{SO}_4^{-}]$$

On peut alors refaire le même raisonnement en fonction du signe de l'alc. res. calcite + gypse que ci-dessus.

En fonction des minéraux en présence dans la solution et de leur solubilité, on peut ainsi prévoir l'évolution successive des teneurs en ions et du pH lorsque l'eau se concentre par évaporation.

## 2.3 Les effets de l'alcalinisation sur le sol

Si on considère une parcelle irriguée dans la région de Podor, le processus d'alcalinisation se traduit de la manière suivante:

Les carbonates étant plus abondants que le calcium dans l'eau d'irrigation utilisée, la précipitation de la calcite va laisser des carbonates excédentaires en solution. Lors d'un apport d'eau supplémentaire, la concentration de  $\text{Ca}^{++}$  à laquelle se produit la précipitation de la calcite sera plus faible et la concentration en  $\text{CO}_3^{-}$  plus élevée afin de respecter la

condition d'équilibre de l'équation [2]. Le déséquilibre entre  $[Ca^{++}]$  et  $[CO_3^-]$  va donc s'accentuer. Au cours du temps, ce phénomène va s'auto-amplifier pour aboutir à une eau très alcaline et pauvre en calcium. On observera alors une hausse du pH et la sodisation du complexe d'échange.

L'effet de l'alcalinisation sur le sol peut être illustré par les observations faites dans les rizières de l'office du Niger au Mali par Bertrand et al. (1994). Après cinquante ans de cultures irrigués, l'effet de la sodisation et de l'alcalinisation se manifeste en effet de façon inquiétante: Le taux de saturation en sodium du complexe d'échange est souvent monté à plus de 15 et le pH s'est élevé généralement de plus d'une unité, avec parfois des pH supérieurs à 10. Sous l'effet du pH très élevé et du sodium fixé sur les argiles, ces dernières défloculent, ce qui se traduit par une baisse de la porosité, de la perméabilité et de la stabilité des agrégats terreux.

## 2.4 Qualité de l'eau d'irrigation

On voit donc que la composition initiale de l'eau d'irrigation va déterminer le sens de l'évolution chimique de celle-ci, et par la-même, du sol en contact avec cette eau. Une évaluation correcte de la qualité de l'eau d'irrigation nécessite une approche dynamique tenant compte de l'évolution chimique de l'eau d'irrigation par concentration ainsi que des interactions de cette eau avec le sol.

Le diagramme de classification des eaux établi par Richards (1954), repose sur la mesure de la conductivité électrique et du calcul du SAR. Il permet d'évaluer les risques salins et alcalins d'une eau, mais ne préjuge en rien de l'évolution de ces risques due à la concentration de l'eau par évaporation. En effet, certaines eaux, pourtant très peu saline, peuvent, après concentration de celle-ci, provoquer une alcalinisation importante des sols.

Afin de tenir compte de cette dynamique, Valles et al. (1989) ont proposé de se baser sur le concept de l'alcalinité résiduelle pour une meilleure évaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation. Le signe de l'alcalinité résiduelle permet en effet de prévoir qualitativement le sens de l'évolution de la qualité de l'eau. Cette méthode lui a permis d'expliquer la forte dégradation des sols de l'office du Niger au Mali par alcalinisation, alors que les eaux du Niger, très peu salées, semblaient pourtant favorables à l'irrigation. A l'opposé, le concept de l'alcalinité résiduelle généralisée lui a permis de montrer que les eaux très minéralisées de l'Oued Medjerda en Tunisie présentaient moins de risque.

Le domaine d'application de cette méthode reste cependant uniquement qualitatif. Si elle permet de prévoir le sens de l'évolution du SAR, elle ne permet pas de prévoir quelles seront les valeurs atteintes, ni de calculer la dose d'irrigation à apporter pour minimiser les risques. En effet, le sol peut avoir un certain capital de résistance face à cette évolution. Il devient donc indispensable de tenir compte des interactions sol/eau si on veut obtenir une appréciation quantitative de cette évolution.

## 2.5 Facteur de résistance des sols

Face à ce problème, les sols peuvent manifester plus ou moins de résistance. Dans un premier temps, l'excédent de carbonates peut en effet être tamponné par les ions  $Ca^{++}$  en solution (cas des sols gypseux par exemple). Puis le mécanisme peut être retardé par libération des cations bivalents présents sur le complexe d'échange. Les sols présentant un SAR faible seront donc les sols présentant la meilleure résistance.

Dans tous les cas, il ne faut pas perdre de vue qu'il ne s'agit que d'un potentiel de résistance, susceptible de s'épuiser. L'évolution vers la voie alcaline de ces sols pourra être plus ou

moins retardée en fonction de ces différents facteurs, mais elle sera inévitable à long terme si aucune mesure n'est prise.

### 3. La dégradation des sols de la région de Podor

#### 3.1 Evaluation des risques

Charolais et Weber (1994), ont montré que l'alcalinité résiduelle calcite et l'alcalinité résiduelle calcite + gypse sont positives, aussi bien pour l'eau du fleuve Sénégal que de son défluent le Doué. Les valeurs obtenues sont résumées dans le tableau ci-dessous. On peut donc en conclure que la composition chimique de l'eau d'irrigation présente un danger réel d'alcalinisation pour tous les sols irrigués de la région.

[meq/l]	moyenne pour l'eau du Fleuve Sénégal	moyenne pour l'eau du Doué
Alcalinité	0.62	0.42
Alc. res. calcite	0.28	0.11
Alc. res. calcite + gypse	0.34	0.15

L'ampleur et la rapidité de l'évolution alcaline des sols de la région de Podor va dépendre d'une part du type de sol, et d'autre part du mode de gestion de l'eau:

##### 3.1.1 Type de sol

Le type de sols va déterminer la résistance physique et chimique que celui-ci va pouvoir opposer à l'apport des carbonates excédentaires dans l'eau d'irrigation.

Dans la région étudiée, les sols font l'objet d'une nomenclature locale. Les vertisols sont appelés « hollaldés » et « faux hollaldés », et les sols peu évolués hydromorphes des « fondés ». Ces différents types de sols se distinguent par leur composition texturale (Maynard, 1960).

Les hollaldés sont des sols lourds, avec 55-60 % d'argiles. Dans ces sols, l'infiltration de l'eau en profondeur est quasi inexistante. De ce point de vue, ces sols sont idéaux pour la culture du riz. Mais l'absence de percolation implique aussi que tous les carbonates apportés par l'eau d'irrigation s'accumuleront en surface.

Les fondés sont les sols les plus filtrants, avec 30 à 40% de sables. Ces sols sont donc au premier abord moins susceptibles d'accumuler les carbonates. Il n'en demeure pas moins que ces sols restent très argileux et que l'infiltration en profondeur reste faible.

Dans certains cas, l'infiltration de l'eau peut être contrôlée par le niveau de la nappe. Dans le périmètre de Nianga par exemple, la remonté de la nappe jusqu'en surface empêche tout écoulement de l'eau.

Les sols argileux de la vallée contiennent de fortes teneurs en gypse et en calcium échangeable. Ces sols possèdent donc un bon capital de résistance face à l'alcalinisation. Mais il ne faut pas perdre de vue que l'évolution ne peut être que retardée, et que l'alcalinisation de ces sols est inéluctable.

##### 3.1.2 Mode de gestion de l'eau

Le bilan hydrique varie en fonction des différents types d'aménagement et du mode de gestion de l'eau. Afin de minimiser les risques d'alcalinisation, il faut limiter la concentration de l'eau au niveau des parcelles et donc assurer une circulation de l'eau suffisante pour entraîner les sels hors du périmètre. Les périmètres équipés de drains et de fossés de collature sont donc les mieux armés pour lutter contre ce phénomène.

Les différents types de périmètre étudiés peuvent se classer dans 4 catégories:

*-Les périmètres irrigués villageois (PIV)*

Les PIV sont des aménagements sommaires et au coût de construction peu élevé. Ils se sont développés dans la vallée depuis la fin des années 70. Généralement d'initiative villageoise, ces aménagements sont réalisés et financés par la SAED (Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta et des vallées du Sénéga et de la Falémé), avec la participation de la main d'œuvre villageoise (Tarière, 1993). La superficie des PIV est généralement comprise entre 15 et 50 ha (Hecq 1990). Ce type de périmètre se caractérise par des très petites parcelles et un mauvais entretien général provoqué par les difficultés rencontrées au moment de prendre des décisions. Les PIV subissent de ce fait de nombreuses fuites et débordements, ce qui est susceptible d'assurer un minimum de circulation de l'eau et par là même une évacuation partielle de l'excédent de carbonates.

*-Les périmètres privés*

Les périmètres privés regroupent des aménagements conçus en dehors de toutes structures administratives. Leur surface est très variable. Ce type de périmètre a généralement une origine récente. Ces périmètres sont en générale faits avec peu de moyens. Il va sans dire qu'ils ne sont dotés d'aucun système permettant l'évacuation des eaux et que le planage se fait manuellement. Cependant, ces périmètres appartenant à des privés et non pas à une collectivité, ils sont relativement mieux entretenus que les PIV. Afin d'assurer leur rentabilité, les paysans pratiquent le plus souvent deux cultures par année.

*-Les périmètres intermédiaires (IT)*

Les IT sont des aménagements intermédiaires, réalisés dans le cadre de la coopération italienne. Ces aménagements sont un compromis entre les grands aménagements (surtout développés dans le delta du fleuve Sénégal) et les PIV (Tarière, 1993). Ces aménagements ont une surface de 50 ha chacun. Ils se caractérisent par une grande digue de protection entourant les périmètres pour les protéger des inondations. A l'inverse, cette digue empêche également tout débordement ou fuite d'eau vers l'extérieur du périmètre. Vu l'absence de drainage et de collature, on peut en conclure qu'il n'y aura pas de circulation de l'eau d'irrigation. Ces périmètres ayant de plus été aménagés sur des sols très argileux, on peut supposer que l'infiltration de l'eau en profondeur doit être extrêmement faible. De ce fait, toute l'eau d'irrigation apportée va se concentrer sur place par évaporation. Le facteur de concentration de l'eau est donc théoriquement infini. Or, des mesures faites par concentration de l'eau du fleuve Sénégal dans un bac à évaporation ont montré que la précipitation de la calcite, et donc l'accumulation résiduelle des carbonates, commence à partir d'un facteur de concentration de 8. Il est donc évident que la calcite va précipiter en surface du sol au cours de la culture. De ce fait, ces périmètres sont suspectés d'évoluer le plus rapidement vers la voie alcaline.

*-Le périmètre autonome de Nianga (PAN)*

Le périmètre autonome de Nianga a une superficie de 1200 ha, aménagé en trois étapes:

- le casier pilote de 650 ha aménagé en 1975, réhabilité en 1984 et amélioré en 1989
- le casier C de 350 ha aménagé en 1984 et amélioré en 1989

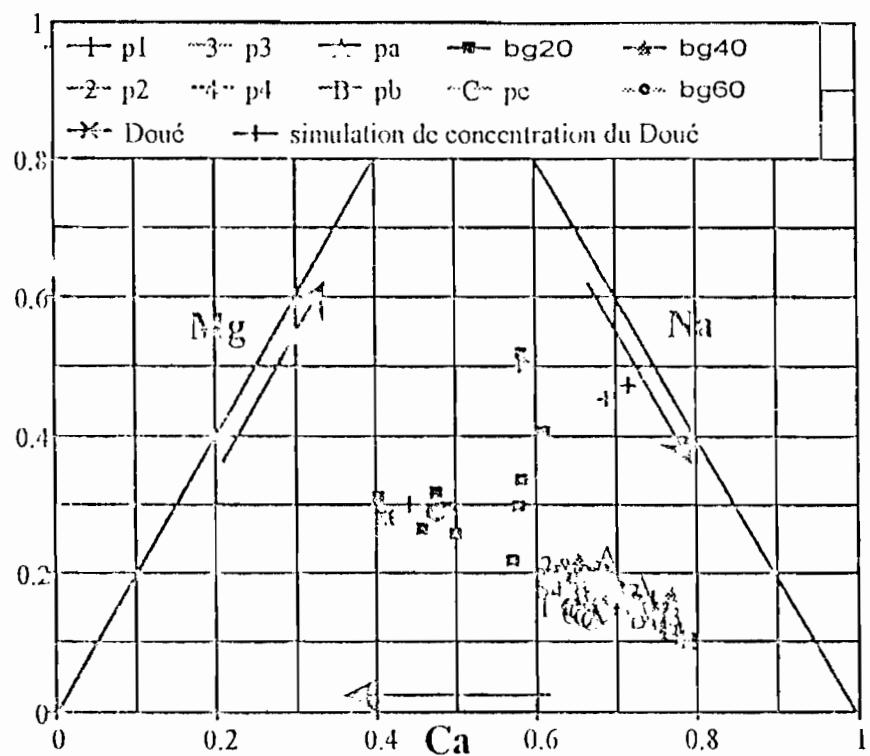


Fig 2: Diagramme de la composition cationique des eaux de la nappe et du sol . Mesures effectuées en contre-saison 1994 sur une parcelle du périmètre de Donaye II.1.

-l'extension du casier pilote de 200 ha aménagé en 1989

Dans tout le périmètre, les parcelles sont organisées en mailles hydrauliques d'une dizaine d'ha. Le périmètre de Nianga se singularise par la présence de drains et de fossés de collature, absents de la plupart des autres périmètres de la région. Bien que le fonctionnement des drains ait été annihilé par la remonté de la nappe, une bonne circulation de l'eau est assurée par les vidanges des parcelles ainsi que par les nombreux débordements et fuites à travers les diguettes. Le facteur de concentration de l'eau au cours de la culture, de l'ordre de 2.7 (Salvignol, 1993), est très faible par rapport à ce qu'on observe dans les périmètres de types IT par exemple. Il n'en demeure pas moins que le problème de l'alcalinisation reste très présent. Il ne faut en effet pas oublier qu'en fin de culture, tout apport d'eau est supprimé. Or, les nappes étant actuellement affleurantes, l'eau contenue dans le sol va alors se concentrer sur place sous l'influence de la forte demande évaporative. Dès lors, le seuil de précipitation de la calcite sera atteint et il y aura également accumulation résiduelle de carbonates.

### 3.2 Bilan des premières investigations

Plusieurs approches du phénomène d'alcalinisation des sols sont possibles. Charollais et Weber (1994) avaient choisi de s'intéresser à la caractérisation du complexe d'échange et plus particulièrement à son état de saturation en sodium (ESP), ainsi qu'à l'évolution du pH. Leurs résultats, qu'il s'agisse de l'ESP ou du pH, n'ont pas permis d'observer l'évolution attendue. En effet, comme vu précédemment, on pouvait s'attendre à une hausse du pH et de l'ESP des sols cultivés due à une évolution alcaline.

#### 3.2.1 L'ESP

La comparaison de l'ESP des sols cultivés et non cultivés n'a pas permis à Charollais et Weber (1994) de tirer une règle d'évolution des sols cultivés. En effet, le sens de l'évolution de l'ESP variait d'un périmètre à l'autre, sans que l'on puisse en expliquer la raison. En fait, il s'avère que le processus d'évolution de l'ESP peut s'expliquer par l'effet conjugué de la qualité améliorante de l'eau d'irrigation du point de vue de son SAR lorsque celle-ci n'est pas encore concentrée et de son alcalinité résiduelle positive. En effet les eaux du fleuve Sénégal et de son défluent le Doué ont un SAR bien inférieur à 1 ( $SAR = 0.49$  pour le fleuve Sénégal et  $0.35$  pour le Doué selon les analyses effectuées par Charollais et Weber, 1994), alors que le SAR de la solution des sols de la région est en général beaucoup plus élevé, tout en présentant une grande variabilité dans l'espace. Dans un premier temps, les sols irrigués vont voir éventuellement leur taux de saturation en sodium du complexe d'échange diminuer grâce à l'apport d'eau d'irrigation. En effet, l'eau du sol va se mettre en équilibre avec l'eau d'irrigation. Cette eau étant au début non ou peu concentrée, elle va pouvoir corriger plus ou moins fortement les équilibres entre le calcium, le magnésium et le sodium selon le SAR initial de l'eau du sol. Cependant, au cours de la culture, cette eau va se concentrer. Quand le seuil de précipitation de la calcite est atteint, le calcium en solution, puis le calcium du sol seront successivement bloqués sous forme de  $CaCO_3$ . L'alcalinité résiduelle calcite de l'eau d'irrigation étant positive, la concentration relative de carbonates va augmenter par rapport à la concentration en calcium. Le blocage du calcium sous forme de calcite se fera pour des concentrations de calcium en solution toujours plus faibles. La concentration relative de sodium dans la solution du sol va alors augmenter par rapport aux cations bivalents. Il y aura alors augmentation du SAR de l'eau du sol et sodisation du complexe d'échange.

Cette évolution a été illustrée par le diagramme de la fig. 2 (source JL. Maeght). Ce diagramme représente l'évolution de la balance cationique de l'eau de la nappe et des

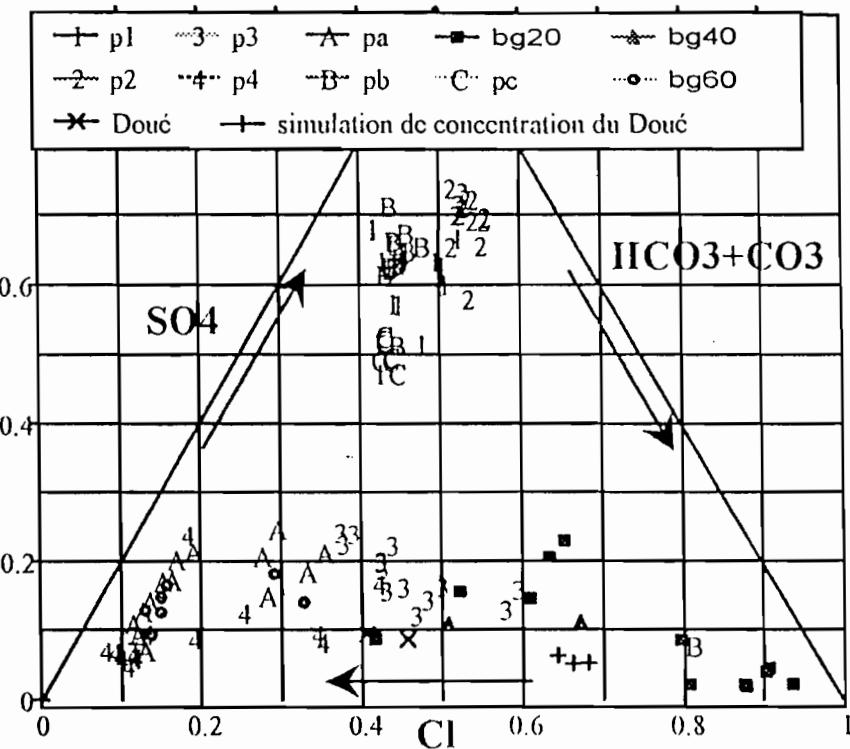


Fig 3: Diagramme de la composition anionique des eaux de la nappe et du sol . Mesures effectuées en contre-saison 1994 sur une parcelle du périmètre de Donaye IT1.

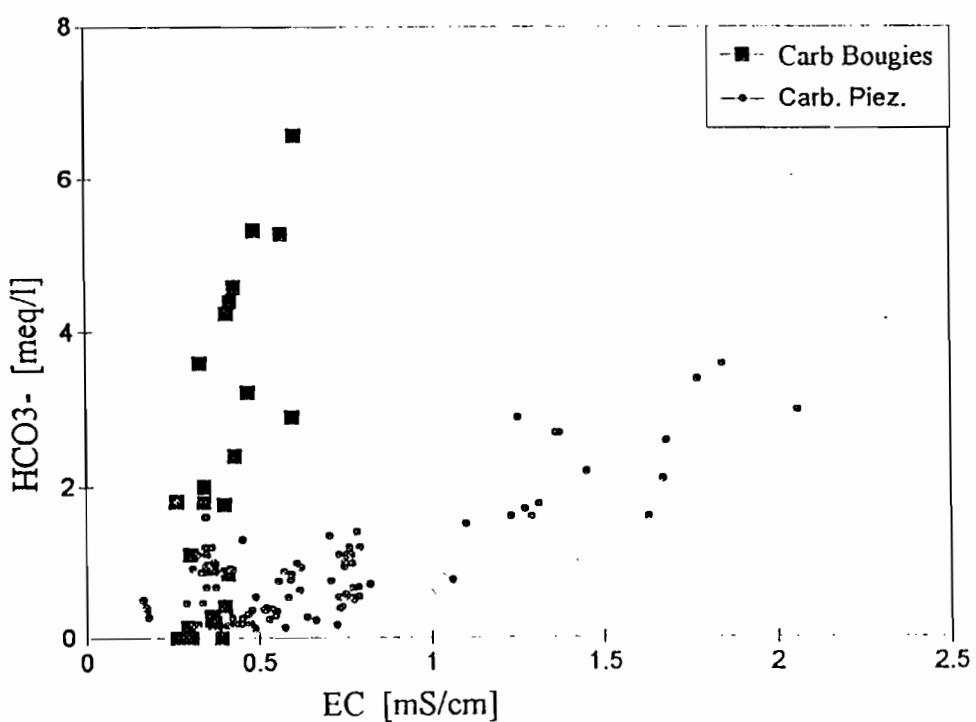


Fig 4: Graphique représentant la relation entre la concentration en carbonates et la conductivité électrique des eaux de la nappe et des bougies poreuses. Mesures faites en contre-saison 1994 sur une parcelle du périmètre de Donaye IT1.

bougies poreuses à diverses profondeurs au cours d'un cycle de culture, dans une parcelle du périmètre de Donaye IT1. On y observe un regroupement des eaux vers le pôle sodique. Seules les eaux des bougies poreuses de surface possèdent une teneur en calcium plus élevée, grâce à l'influence de l'eau d'irrigation. On voit en effet que leur composition chimique se rapproche de la composition de l'eau d'irrigation. En fin de culture, la composition de l'eau des bougies poreuses de surface évolue en s'appauvrissant en calcium. Ceci correspond au blocage du calcium par précipitation de la calcite.

Le diagramme représentant l'évolution de la balance anionique des mêmes eaux (fig. 3), atteste de l'accumulation effective des carbonates. En effet, les eaux des bougies poreuses de surface se situent dans un domaine plus carbonaté que les eaux d'apport, ce qui s'explique par une accumulation des carbonates au cours des cycles d'irrigation précédents.

Ceci nous conforte dans l'idée que le phénomène d'alcalinisation est bien réel et perceptible. On peut dès lors penser que l'évolution des équilibres chimiques du sol est la même que pour l'eau du sol avec laquelle il se trouve en équilibre. Ceci justifie le fait de reprendre le premier bilan posé par Charollais et Weber (1994), mais en s'intéressant cette fois-ci au stock de carbonates, et ce d'autant plus qu'il semblerait au premier abord que l'on puisse facilement différencier deux groupes de sols d'évolution différente sur un diagramme opposant le taux de carbonates et la conductivité électrique (fig. 4). Sur ce diagramme, les eaux du sol et de la nappe sont représentées. On remarque un groupe dont la salinité est fortement liée à la présence des carbonates. Il s'agit principalement de l'eau des bougies poreuses et des piezomètres implantés dans une parcelle du périmètre de Donaye IT1. Le deuxième groupe représente des eaux dont la salinité n'est pas ou très peu carbonatée. On retrouve dans ce groupe principalement les eaux prélevées dans les piezomètres à l'extérieur de la parcelle cultivée. Le sol étant en équilibre chimique avec l'eau du sol et de la nappe, on peut supposer que cette différenciation peut se retrouver en s'intéressant à la conductivité et à la concentration en carbonates d'extraits de sol.

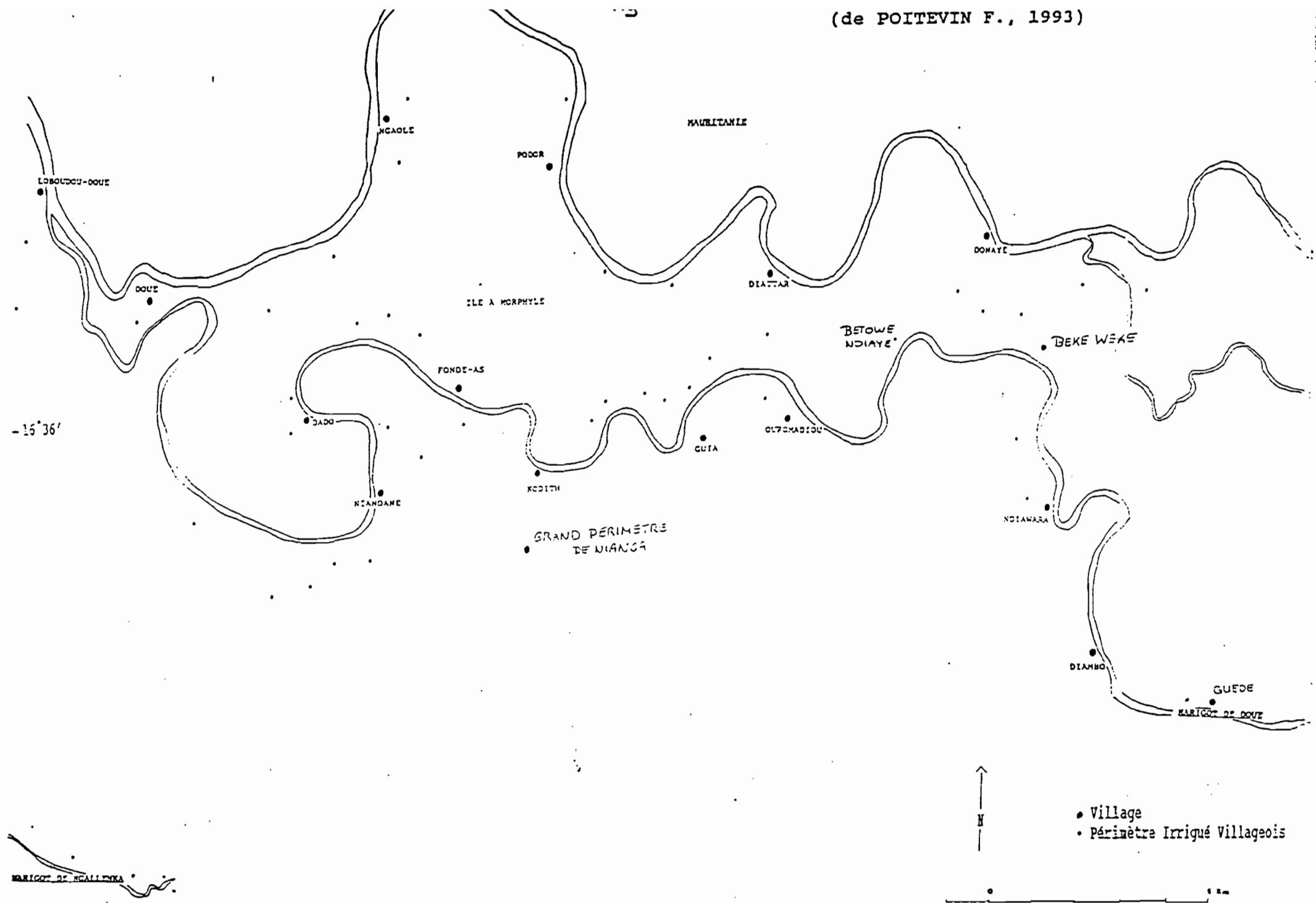
### 3.2.2 Le pH

La comparaison du pH des sols cultivés et non cultivés n'a pas permis à Charollais et Weber (1994) de conclure à une évolution de celui-ci. Depuis lors, le suivi du pH de l'eau du sol d'une parcelle cultivée pendant deux cycles de cultures a montré que celui-ci évoluait spectaculairement au cours du temps, selon le schéma suivant:

Pendant l'interculture, le pH est relativement bas ( $\text{pH} \approx 6$ ). Au cours de la culture, le pH augmente régulièrement jusqu'à atteindre des pH très alcalins (au-delà de 8). A la fin de la culture, marquée par la mise à sec de la parcelle, le pH redescend brusquement pour retrouver une valeur proche de celle de départ. Or, Charollais et Weber (1994) avaient prélevé leurs échantillons de terre sur des parcelles déjà asséchées, donc dont le pH avait déjà chuté. De ce fait, il est maintenant possible de nuancer leur conclusion. Bien que la comparaison des mesures de pH des sols cultivés et des sols non cultivés pendant l'interculture ne permette pas de conclure à une élévation du pH, on peut maintenant affirmer qu'il y a pourtant bien évolution du pH des sols cultivés. Cependant, si on veut utiliser la comparaison des pH entre sols cultivés et non cultivés, il faut s'intéresser plus particulièrement à la fin du cycle de culture, avant la mise à sec.

Afin de confirmer cette affirmation qui repose sur les observations faites sur une seule parcelle, des mesures de pH seront effectuées sur tous les points de prélèvement.

(de POITEVIN F., 1993)



## 4. Méthodologie

L'objectif de ce travail est de comprendre l'évolution des sols cultivés. En l'absence de suivi et de contrôle de l'état du sol au cours des années de culture, la solution la plus aisée pour reconstituer l'évolution de ces sols consiste à faire une étude comparative entre les sols cultivés et les sols non cultivés. Les périmètres étant le plus souvent disséminés dans le paysage et de petite taille, il existe presque toujours des sols non cultivés entourant le périmètre, susceptibles d'être représentatifs de l'état initial des sols cultivés. Afin de comprendre les diverses formes de comportement des sols en fonction de divers facteurs tels que le mode de gestion de l'eau ou le type de sol, des échantillons de sol ont été prélevés dans 27 périmètres de la région de Podor. Les résultats obtenus devraient alors permettre de comprendre le fonctionnement hydrique des différents périmètres et l'extrapolation de la méthode appliquée aux autres périmètres de la région non étudiés dans le cadre de ce travail.

### 4.1 Choix des sites

L'échantillonnage devait être représentatif des différents types de périmètre rencontrés, de l'âge de ces périmètres, de leur répartition géographique et du type de sol, les contraintes étant les suivantes:

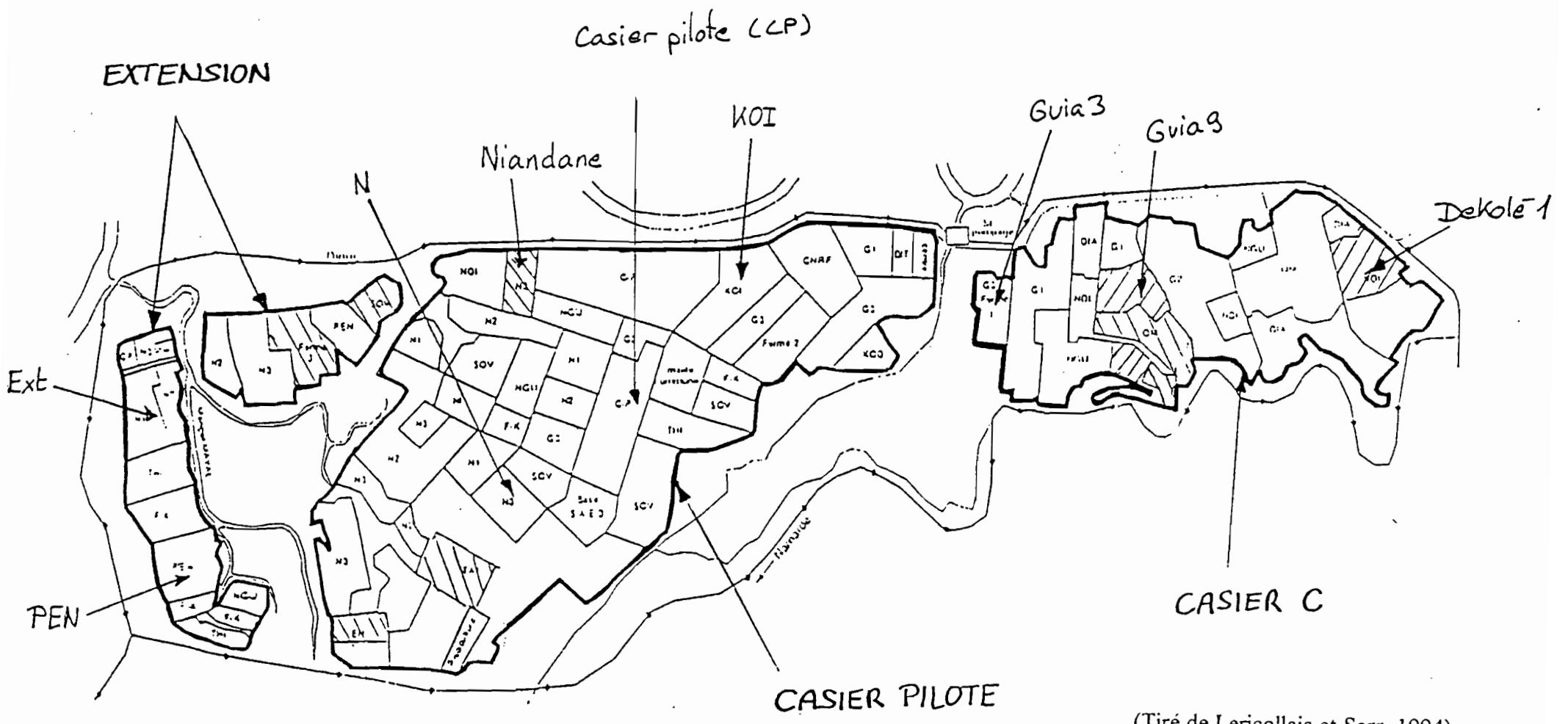
- Dans le but de réduire les paramètres pouvant influencer le régime d'accumulation des carbonates, seules les parcelles cultivées en riziculture ont été étudiées.
- Les parcelles devaient avoir été mises en culture en hivernage et être encore en eau, en raison des fluctuations du pH au cours de la culture exposées dans le paragraphe 3.2.2.
- les périmètres devaient être accessibles (problème d'inondation).

D'autre part, une attention plus particulière a été portée à différents périmètres faisant ou ayant fait auparavant l'objet d'études. Il s'agit des périmètres de Donaye It1 et It2, du périmètre privé de Betowe Ndiaye, ainsi que des mailles de Dékolé 1, de Guia 3 et 9 dans le périmètre de Nianga.

Pour pouvoir établir une comparaison entre les sols cultivés et les sols non cultivés, un nombre à peu près équivalent d'échantillons de terre a été prélevé dans les périmètres et aux alentours. Ceci implique l'hypothèse que les sols non cultivés choisis aux abords immédiats d'un périmètre aménagé soient représentatifs de l'état initial des sols irrigués. Cependant, beaucoup de terres non cultivées ont été inondées cette année suite à la vidange du barrage de Manantali au Mali. Dans la mesure du possible, les échantillons des sols non cultivés ont été prélevés sur des terres non inondées. Il conviendra donc d'être prudent dans l'interprétation des résultats, les inondations ayant pu fausser certaines valeurs.

Vu l'étendue du grand périmètre de Nianga, il n'était pas possible de trouver des sols non cultivés représentatif des mailles étudiées. Il a paru cependant intéressant de profiter des prélèvements de sols effectués dans plus de 300 fosses dans la cuvette de Nianga, ce d'autant plus qu'une analyse complète de ces sols est disponible. Dans ce but, 35 échantillons de sols ont été sélectionnés parmi ceux collectés dans ces fosses en tenant compte des critères suivants: teneur en argiles, Ca libre et échangeable, CEC, pH et EC.

La répartition géographique des périmètres choisis est représentée sur la carte de la fig 5. La liste complète des périmètres avec leurs caractéristiques est donnée dans l'annexe 1. Parmi ces périmètres, 3 sont des périmètres privés, 8 sont des PIV, 6 sont des IT et 10 font partis



(Tiré de Lericollais et Sarr, 1994)

Fig 6: Plan de répartition des mailles étudiées dans le périmètre autonome de Nianga.

du grand périmètre de Nianga. Au sein de ce périmètre, la répartition des mailles entre les différents casiers est la suivante: 5 mailles dans le casier pilote, 3 mailles dans le casier C et 2 mailles dans l'extension du casier pilote.

Dans le périmètre de Nianga, les mailles étudiées ont été choisies de façon à avoir un échantillonage représentatif de l'ensemble du périmètre. Certaines mailles, comme celles de Dékolé 1 et de Guia 9, ont été délibérément choisies en raison des problèmes d'engorgement observés dans les parcelles. Le plan de répartition des mailles choisies est présenté sur la carte de la figure 6.

#### **4.2 Nombre d'échantillons**

Le nombre d'échantillons prélevés devait être suffisamment élevé pour être représentatif de l'ensemble des différents types de périmètre rencontrés dans la région. D'autre part, il était nécessaire de pouvoir disposer d'un grand échantillon pour pouvoir traiter les résultats statistiquement. La contrainte du temps à disposition pour mener cette étude a donc été le facteur limitant.

#### **4.3 Technique de prélèvement**

Vu la quasi absence de percolation de l'eau d'irrigation vers la nappe (Salvignol 1993, Boivin et al, 1994), l'entraînement des sels solubles en profondeur doit être également très faible. D'autre part, le suivi de la composition de l'eau des bougies poreuses (voir diagramme de l'évolution de la balance cationique) a montré qu'en profondeur (40 et 60 cm), la composition de l'eau du sol ne semblait pas être affectée par l'eau d'irrigation. Ceci, ajouté à la facilité du prélèvement, justifie le choix de ne s'intéresser qu'au 20 premiers centimètres du profil.

Sur l'emplacement du prélèvement, un tube cylindrique de 30cm de diamètre était enfoncé dans les premiers cm du sol, afin de permettre l'évacuation de l'eau de surface des rizières. Cela permettait d'éviter tout lessivage du sol qui aurait entraîné une partie des carbonates au moment du prélèvement.

#### **4.4 Analyses de laboratoire**

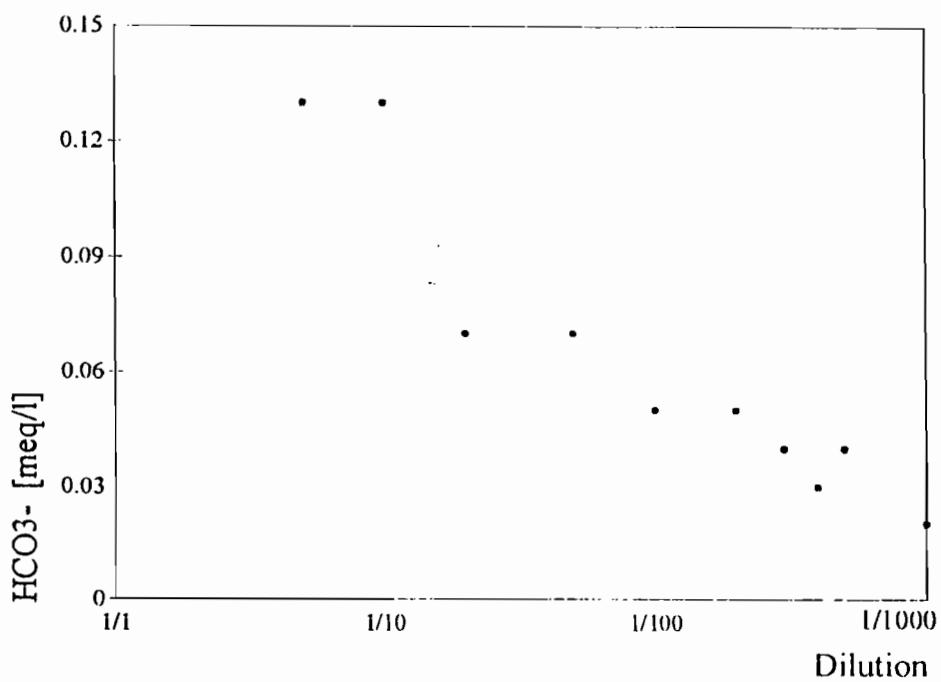
Les analyses effectuées au laboratoire sur les extraits de sols sont les suivantes:

- pH
- Electro-conductivité (EC)
- titration des carbonates

#### **4.5 Choix du protocole**

##### **4.5.1 Problématique rencontrée**

La titration des carbonates nous donne la concentration des carbonates et des bicarbonates dissous dans un extrait de sol. Pour obtenir des valeurs de concentration correspondant aux quantités effectives de carbonates présents dans le sol, ceux-ci doivent être totalement dissous dans cet extrait. Or, la calcite est un minéral peu soluble. L'équation d'équilibre établissant la relation entre les différentes formes dissoutes ou non d'un composé s'écrit :



Dilution	meq/l
1/5	0.13
1/10	0.13
1/20	0.07
1/50	0.07
1/100	0.05
1/200	0.05
1/300	0.04
1/400	0.03
1/500	0.04
1/1000	0.02

Fig 7: Concentration en carbonates dans les extraits de sol à différents taux de dilution pour l'échantillon 27 du périmètre de Donaye IT1.

$$[\text{Ca}^{++}] * [\text{CO}_3^{-}] = K_{\text{s}_1}$$

$K_{\text{s}_1}$ , le produit de solubilité de la calcite vaut  $4.95 \cdot 10^{-9} \text{ [mol}^2/\text{l}^2]$

Pour éviter de se trouver en présence de solutions saturées vis à vis de la calcite, il importe donc de choisir un taux de dilution de l'extrait de sol suffisamment élevé afin d'éviter toute sous-estimation de la teneur en carbonates du sol.

En dissolvant la calcite dans une eau pure, on pourra mettre en solution  $[\text{CO}_3^{-}] = (K_{\text{s}_1})^{1/2}$ , soit  $7.03 \cdot 10^{-5} \text{ [mol de HCO}_3^{-}/\text{l}]$ . Dans le cas de présence de gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) dans le sol, un effet d'ions communs vient s'ajouter aux équations d'équilibre. En se dissolvant, le gypse va libérer des ions  $\text{Ca}^{++}$  dans la solution, ce qui va modifier les conditions de dissolution de la calcite:

L'équation d'équilibre du gypse s'écrit:

$$[\text{Ca}^{++}] * [\text{SO}_4^{-}] = K_{\text{s}_2} = 3.73 \cdot 10^{-5} \text{ [mol}^2/\text{l}^2]$$

Le gypse étant le premier à se dissoudre, on trouvera dans la solution  $[\text{Ca}^{++}] = (K_{\text{s}_2})^{1/2}$  de calcium dissous. La concentration en calcium étant maintenue à ce niveau en cas de saturation par le gypse, on peut introduire cette relation dans l'équation d'équilibre de la calcite. On obtient alors:

$$[\text{CO}_3^{-}] = K_{\text{s}_1} / (K_{\text{s}_2})^{1/2} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ [mol/l]}$$

Ceci montre bien qu'en cas de présence de gypse, le risque de sous-estimation des carbonates est encore plus fort.

Dans le but de déterminer le taux de dilution idéal permettant la dissolution de tous les carbonates contenus dans le sol, des essais sur plusieurs taux de dilution ainsi que sur le temps d'agitation ont été effectués. Dans un deuxième temps, une vérification de la saturation vis à vis du gypse et de la calcite a été réalisée en utilisant un modèle de simulation.

#### 4.5.2 Détermination du taux d'extraction

Les différentes mesures effectuées se font sur extrait de sol. Cela implique donc le choix d'un taux de dilution. Ce taux de dilution doit être suffisamment élevé pour assurer la dissolution de tous les carbonates. D'autre part, il ne doit pas être trop grand pour que la conductivité électrique soit encore mesurable avec suffisamment de précision. Dans ce but, des essais ont été effectués sur un échantillon du périmètre de Donaye IT1, peu salé mais possédant un des taux de carbonates parmi les plus élevés.

#### 4.5.3 Détermination du temps d'agitation

Le temps d'agitation des échantillons a aussi fait l'objet d'un choix. En effet, la durée d'agitation devait être suffisamment longue pour permettre aux carbonates de se dissoudre. D'un autre côté, ce temps d'agitation devait être minimisé afin de réduire le temps nécessaire pour la conduite des analyses.

#### 4.5.4 Résultats

Les résultats des essais de dilution sont donnés dans la figure 7.

Les extraits 1/5 et 1/10 sont manifestement saturé vis à vis de la calcite, la concentration en  $\text{HCO}_3^-$  ne variant pas. A partir de l'extrait 1/20, on observe une diminution progressive de la concentration en bicarbonates, marquant probablement la fin de la saturation vis à vis de la calcite. Cependant, par prudence, l'extrait 1/50 a finalement été retenu. En comparant avec la solubilité théorique des carbonates, on vérifie bien qu'on se trouve en-dessous du seuil de saturation qui se trouve à 0.14 [meq de  $\text{HCO}_3^-/\text{l}$ ].

Quant au temps d'agitation, les essais ont montré qu'au-delà de deux heures d'agitation, les quantités supplémentaires de carbonate extraits étaient négligeables voir nulles.

#### 4.5.5 Vérification de la saturation de l'extrait de sol vis à vis du gypse et de la calcite dans le cas des sols de la cuvette de Nianga.

Les résultats de quelques tests effectués à l'aide du logiciel SOPREX sur des sols de la cuvette de Nianga contenant beaucoup de gypse et de calcite figurent en annexe 2. Il ressort de ce sondage que pour des extraits 1/5, la saturation vis à vis du gypse et de la calcite n'est jamais atteinte. Avec des extraits 1/50, la marge de sécurité vis à vis de la saturation est donc largement suffisante dans le cas de ces sols-là. Les valeurs de concentration de bicarbonates obtenus ne sont donc pas biaisées par un contrôle de la dissolution dû à la saturation de l'extrait vis à vis du gypse ou de la calcite.

### 4.6 Qualité des résultats

La titration des carbonates est effectuée sur un potentiographe traçant la courbe de la dérivée première du pH. La courbe présente deux pics, correspondant à la neutralisation successive des carbonates et des bicarbonates. Le volume d'acide ajouté nécessaire à la neutralisation des carbonates et des bicarbonates est lu par estimation du « sommet » du pic. Cette technique donne des résultats fiables, et la répétition des mesures donne des résultats concordants. La précision de la lecture est de l'ordre de 0.002 ml d'acide ajouté.

Les dilutions ont été effectuées avec de l'eau déminéralisée, contenant en moyenne 0.08 meq/l de bicarbonates. Cette quantité a été soustraite des mesures sur les extraits de sol. Cependant, pour une plus grande fiabilité des mesures, il aurait fallu mesurer systématiquement la teneur en carbonates d'un « blanc » pour chaque nouvelle série de dilution, la teneur en  $\text{HCO}_3^-$  pouvant quelque peu varier au cours du temps.

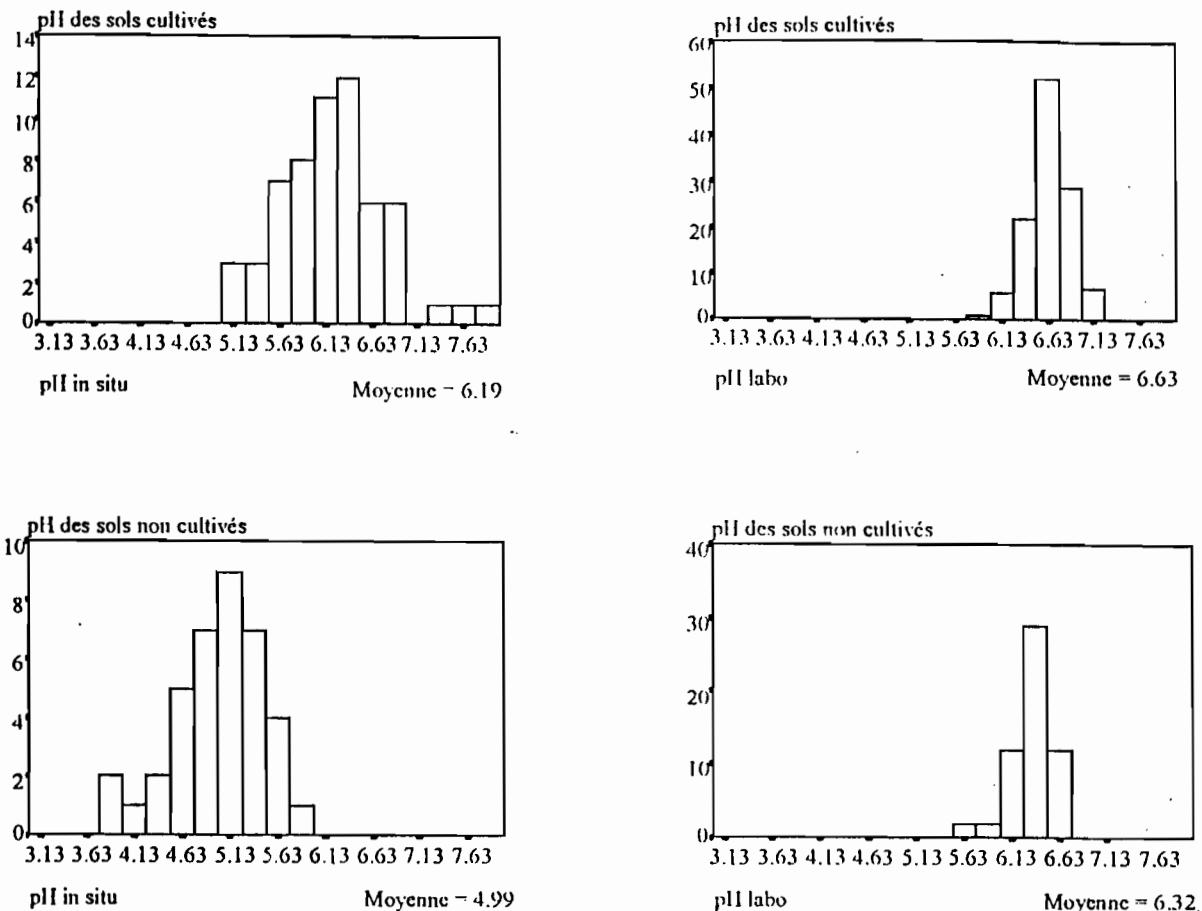


Fig 8: Histogrammes des valeurs de pH des sols cultivés et des sols non cultivés, mesurés in situ ainsi qu'au laboratoire sur extrait 1/50.

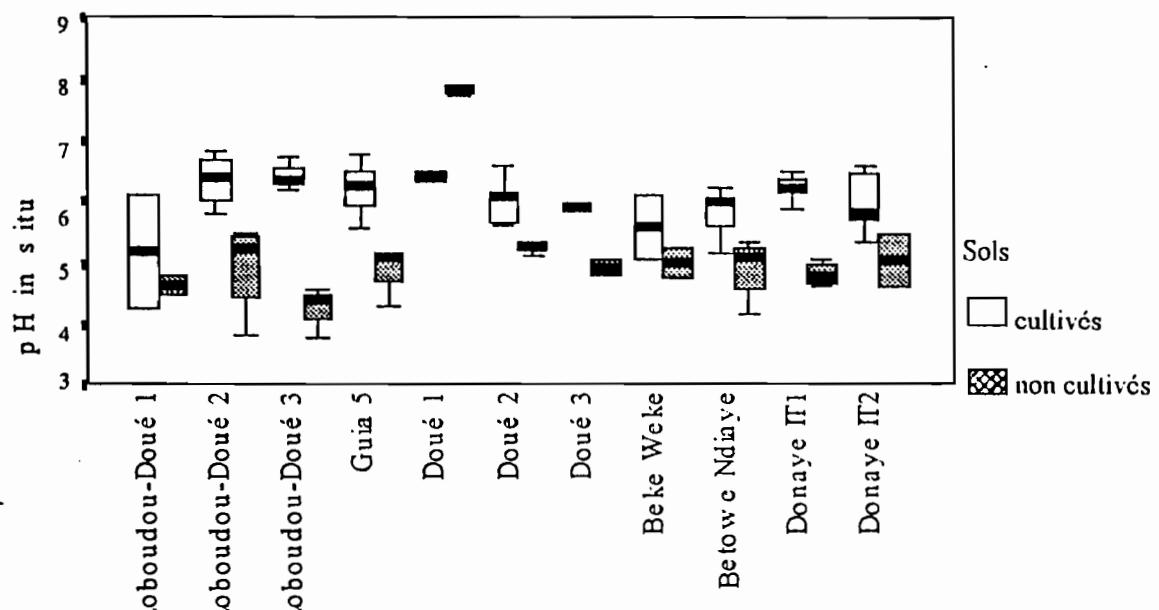


Fig 9: Boxplot représentant en parallèle les valeurs de pH in situ des sols cultivés et des sols non cultivés en fonction des périmètres.

## 5. Résultats

Les résultats des analyses figurent dans le tableau de l'annexe 3.

### 5.1 Le pH

Aussi bien les mesures effectuées sur le terrain que sur extrait de sol au laboratoire permettent d'observer une différence significative entre le pH des sols cultivés et des sols non cultivés (fig 8). Les mesures du pH in situ montre une élévation du pH de plus d'une unité en moyenne. Cette différence est cependant moins nette pour le pH labo où la différence n'est que de 0.3 unités pH. En reprenant ces observations périmètres par périmètres, on retrouve les mêmes relations (fig 9). Seul le périmètre de Doué 2 se trouve dans une situation inverse, mais les mesures de pH effectuées à cet endroit sont très douteuses pour des raisons de mauvais fonctionnement du pH-mètre. Ces mesures n'ont de ce fait pas été retenues pour la suite du travail.

Si on observe une opposition nette entre le pH des sols cultivés et non cultivés, il existe cependant une forte dispersion des valeurs de pH dans les deux catégories. Au niveau des périmètres également, on observe une grande hétérogénéité des valeurs mesurées.

La mesure du pH nous permet donc de discerner une évolution des sols cultivés, marqué par une tendance générale à la hausse du pH. Cependant, le pH seul ne peut pas être considéré comme un paramètre indicateur du degré d'alcalinisation. En effet, trop de facteurs plus ou moins connus, autre que l'accumulation des carbonates, entrent en jeu expliquant les différentes variations du pH.

Beaucoup de points restent à élucider, comme la variation du pH au cours d'un cycle de culture, les écarts du pH entre le sol et la solution du sol et la différence entre les mesures de pH des bougies poreuses in situ et au laboratoire.

On constate en effet que le pH du sol est toujours inférieur au pH de l'eau du sol, prélevée dans les bougies poreuses. On constate également une forte élévation du pH de la solution du sol en quelques heures après son prélèvement (voir courbe de suivi du pH des bougies poreuses après prélèvement en annexe 4). Cette élévation du pH trouve peut-être son explication par le jeu des équilibres avec la pression partielle de CO<sub>2</sub> atmosphérique:

La pression partielle de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère du sol est très élevée, pouvant varier d'un milieu à l'autre entre 10-3.5 atm et 10-1 atm, voir même plus (Bourrié, 1976). Pour prélever l'eau du sol, une dépression est créée dans les bougies poreuses qui peut provoquer un premier dégazage. Une fois en contact avec l'atmosphère libre, l'eau va se mettre en équilibre avec la pCO<sub>2</sub> ambiante, inférieure à celle de l'atmosphère du sol. Reste à savoir si la seule différence de pCO<sub>2</sub> permet d'expliquer l'élévation du pH.

La variation du pH au cours d'un cycle de culture n'a pas encore pu être expliquée de façon satisfaisante. Lors de la mise en eau, des sels de bases faibles sont dissous, ce qui pourrait expliquer la hausse du pH. Mais dans ce cas, cette élévation du pH devrait déjà s'observer en début de culture et non pas seulement à la fin. Il se pourrait que la dissolution de ces bases faibles soit bloquée dans la première phase de la culture, mais la raison reste à trouver! Un autre facteur permettant d'expliquer les variations du pH serait les phénomènes d'oxydo-reduction, mais une fois de plus, les connaissances actuelles ne permettent pas d'en estimer l'effet réel sur le pH.

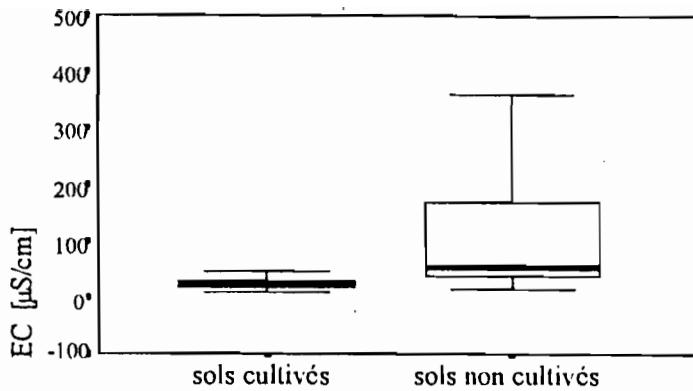


Fig 10: Boxplot représentant la conductivité électrique des sols cultivés et des sols non cultivés. La conductivité est mesurée sur extrait 1/50.

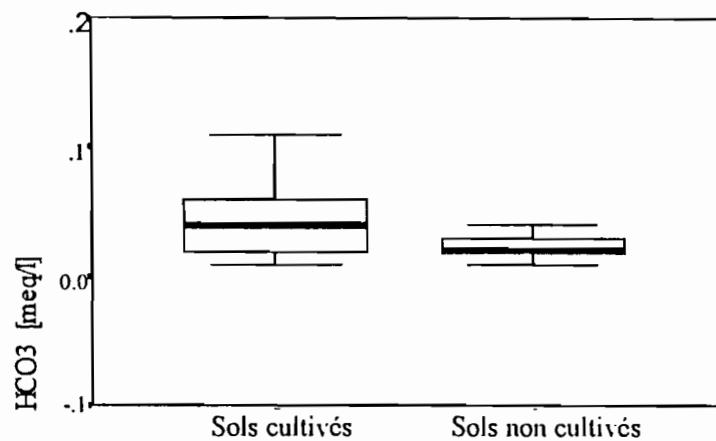


Fig 11: Boxplot représentant la concentration en carbonates des sols cultivés et des sols non cultivés. La concentration en carbonates est mesurée sur extrait 1/50.

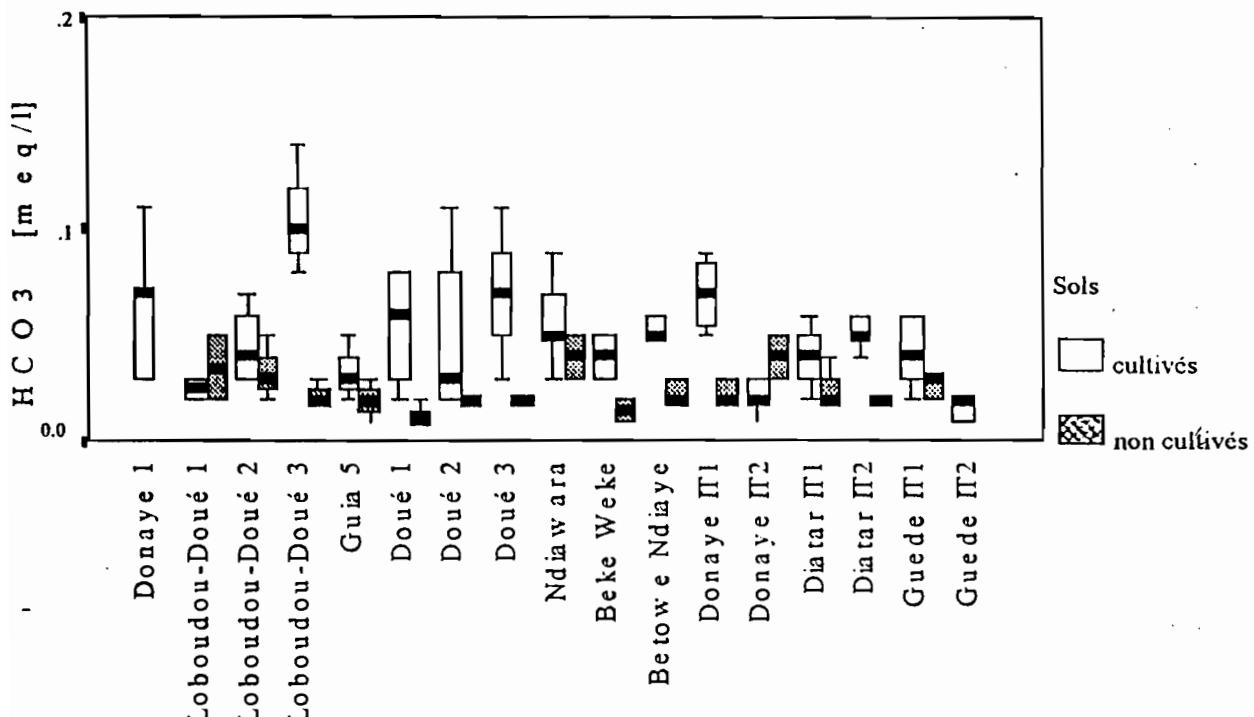


Fig 12: Ce graphique représente, pour les périmètres de type PIV, privé et lt. la concentration en carbonates des sols cultivés en parallèle avec la concentration en carbonates des sols non cultivés. Les mesures sont faites sur des extraits 1/50.

Les mesures de pH sont donc à prendre avec circonspection. Les inconnues régissant les variations du pH sont trop nombreuses et encore trop méconnues pour pouvoir utiliser cette mesure comme un indicateur fiable de l'évolution des sols. Mais, de part sa simplicité de mesure, il reste un outil complémentaire appréciable.

## 5.2 La conductivité électrique

Le diagramme de la fig 10 représente la conductivité électrique des sols cultivés et des sols non cultivés. On remarque que les sols cultivés sont tous regroupés et possèdent une faible salinité. Ceci paraît normal, ces sols étant soumis à un lessivage des horizons de surface par l'eau d'irrigation. La salinité des sols non cultivés est au contraire beaucoup plus variable et peut atteindre des valeurs assez élevées (plusieurs centaines de  $\mu\text{S}/\text{cm}$  sur extrait 1/50 de sol).

## 5.3 Les carbonates

Remarque préliminaire: Pour des raisons de facilité de lecture, le terme général de carbonate a été utilisé pour désigner toutes les formes que celui-ci peut prendre dans le sol et dans les extraits de sol.

Dans les extraits de sols analysés, seul des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) ont été trouvés. Leur présence est quasi systématique, même dans les sols non cultivés. En effet, la plupart des sols ont été régulièrement inondés par les crues du fleuve. Il paraît donc normal de retrouver aussi des carbonates dans les sols non cultivés, et plus particulièrement dans les points bas où l'eau se concentre.

De manière générale, on peut constater que la quantité de carbonates est plus élevée dans les rizières que dans les sols non cultivés (fig 11). En comparant la teneur en carbonates entre les sols cultivés et les sols non cultivés périmètre par périmètre, on arrive à la même constatation, exception faite de Loboudou-Doué 1 (fig. 12). Le cas de ce périmètre sera commenté plus longuement dans un prochain paragraphe. Ceci nous permet de conclure qu'il y a bien accumulation de carbonates dans les rizières.

La quantité de carbonates accumulée dans les rizières est assez variable selon les périmètres. En moyenne, on note une augmentation de 0.02 [meq/l] sur extrait 1/50, soit 6.1 [mg de  $\text{HCO}_3^-$ /100g de sol], entre les sols cultivés et les sols non cultivés. Dans certains périmètres, cette différence est encore plus nette. Cette valeur moyenne ne doit pas faire oublier que cette différence est dans certain cas beaucoup plus importante. Le périmètre de Loboudou-Doué 3 représente le cas extrême avec une élévation de 0.1 meq/l sur extrait 1/50 de la teneur en bicarbonates entre les sols cultivés et non cultivés, soit 30.5 [mg de  $\text{HCO}_3^-$ /100g de sol].

## 5.4 Relation entre la conductivité électrique et la concentration en carbonates

Dans le paragraphe 3.2.1, la relation entre la conductivité électrique et la concentration en carbonates de l'eau de la nappe et des bougies poreuses a été illustrée par la fig 4. Ce graphique permet de distinguer deux catégories de solution du sol ayant des évolutions différentes. On est en droit de penser que ces deux groupes doivent également ressortir au niveau du sol.

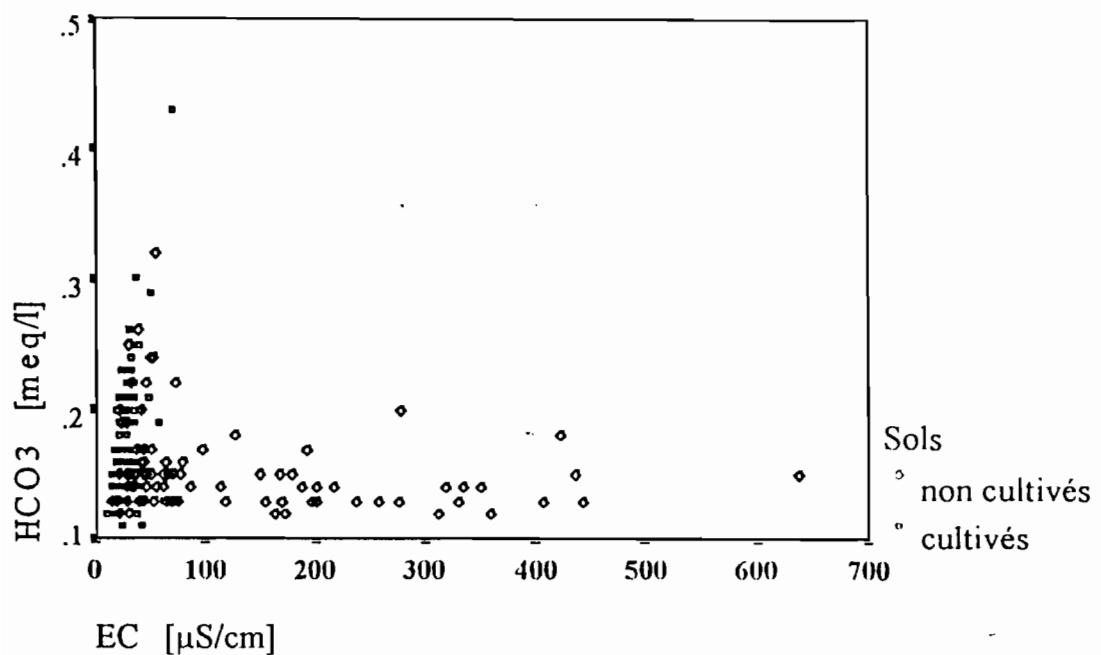


Fig 13: Graphique représentant la relation entre la concentration en carbonates et la conductivité électrique de l'ensemble des échantillons de sol prélevé dans la région de Podor. La concentration en carbonates et la conductivité électrique sont mesurées sur extrait 1/50.

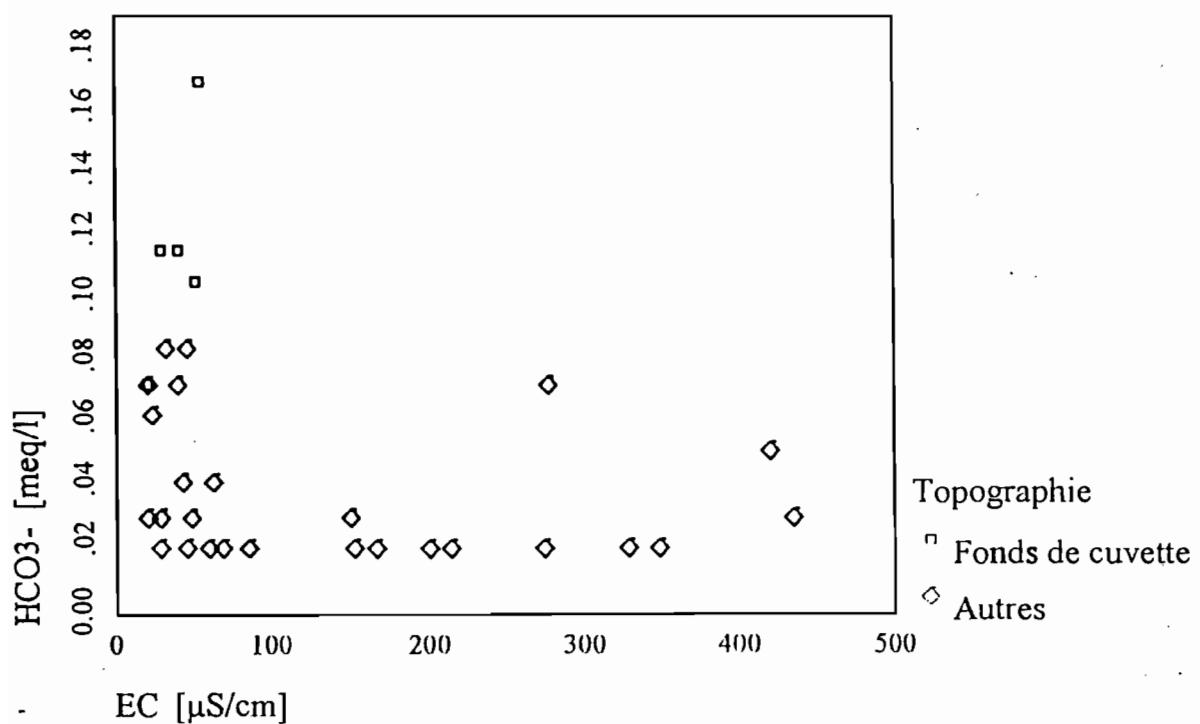


Fig 14: Graphique représentant la relation entre la concentration en carbonates et la conductivité électrique des sols non cultivés de la cuvette de Nianga. La concentration en carbonates et la conductivité électrique sont mesurées sur extrait 1/50.

Le diagramme de la figure 13 illustre la relation entre la salinité des sols et leur teneur en carbonates sur extrait 1/50. On retrouve effectivement deux groupes de sol possédant chacun une relation linéaire différente entre les deux variables:

Un premier groupe est formé de sols dont la salinité est peu carbonatée. Dans ce groupe, on retrouve la quasi totalité des sols non cultivés.

Le deuxième groupe possède une salinité fortement liée à la concentration en carbonates: Ce sont principalement les sols cultivés, ainsi que quelques sols non cultivés.

Ce diagramme illustre parfaitement l'influence de l'irrigation sur l'évolution des sols: les sols soumis à l'irrigation voient tout d'abord leur salinité diminuer par effet de dilution et par lessivage du sol. Mais de part sa composition chimique, l'eau d'irrigation va peu à peu modifier les rapports entre les différents anions présents dans le sol. En l'occurrence, ces sols évoluent tous vers une salinité carbonatée.

Les sols non cultivés inclus dans ce groupe représentent certainement des sols se trouvant dans des points bas où l'eau du fleuve a pu s'accumuler au cours des crues. Dans le but de confirmer cette hypothèse, cette relation entre la concentration en carbonates et la conductivité électrique a été appliquée aux sols non cultivés de la cuvette de Nianga. Grâce à l'analyse complète de ces sols à disposition, une étude de corrélation entre la concentration en carbonates et les autres variables disponibles a pu être effectuée.

Le diagramme de la fig. 14 représente la relation entre la concentration en carbonates et la conductivité électrique des sols de la cuvette de Nianga. Les deux groupes de sols d'évolution différenciée se retrouvent à nouveau.

Comme pour le cas des sols non cultivés cités ci-dessus, les sols à évolution vers une salinité carbonatée doivent correspondre à des sols de point bas où l'eau des crues du fleuve ou des débordements de périmètres a pu se concentrer. Cette hypothèse se trouve confirmée par les relations que l'on tire du test de corrélation entre les carbonates et les divers paramètres disponibles. On trouve en effet une corrélation positive entre la concentration de carbonates et le pourcentage d'argile contenu dans les sols. Or, les sols les plus argileux sont toujours des sols de points bas où il y a écoulement préférentiel de l'eau. D'autre part, la corrélation est négative avec tous les anions et cations à l'exception de SO<sub>4</sub>. On trouve donc des carbonates principalement dans des milieux très dilués.

Le diagramme représentant la relation entre la concentration en carbonates et la conductivité électrique trouve son intérêt par la possibilité qu'il offre de distinguer les sols dont les hautes teneurs en carbonates sont liées à la salinité du sol et qui de ce fait ne présentent donc pas forcément une évolution vers le pôle carbonaté. La mesure conjointe de la conductivité électrique et de la concentration en carbonates est donc toute à fait pertinente si on cherche à identifier une évolution alcaline des sols.

## **5.5 Recherche d'un lien entre la quantité de carbonates accumulée et le fonctionnement hydrique des périmètres.**

Dans le paragraphe 3.1.1, les différents facteurs pouvant influencer le comportement du sol face au processus d'alcalinisation ont été discutés. Le but de ce paragraphe est de vérifier si ces paramètres peuvent être mis en évidence pour expliquer le taux d'accumulation des carbonates dans les différents périmètres.

### **5.5.1 type de périmètre**

La fig 16 présente les concentrations de bicarbonates trouvées dans les extraits de sols en fonction du type de périmètre. Une légère différenciation se manifeste entre les différents types de périmètres, le PAN ayant comme on s'y attendait le moins accumulé de carbonates.

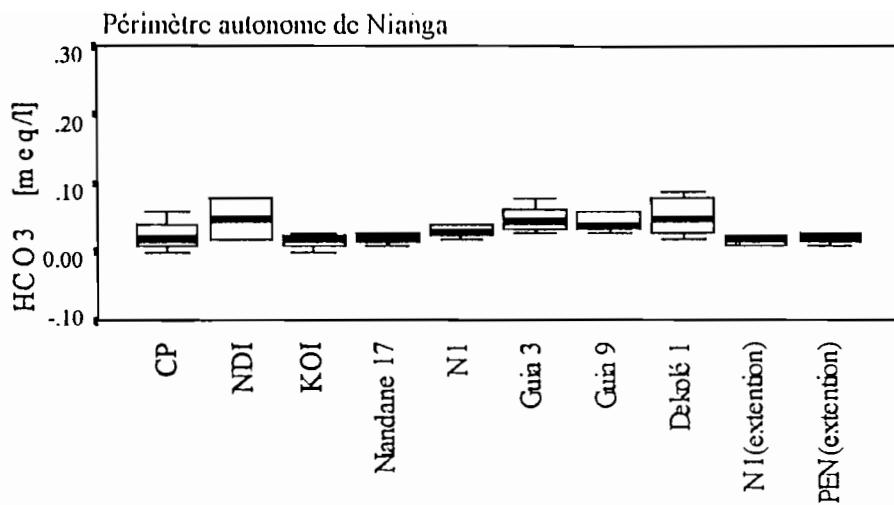


Fig 15: Boxplot représentant la répartition des concentrations en carbonates dans les différentes mailles du périmètre de Nianga.

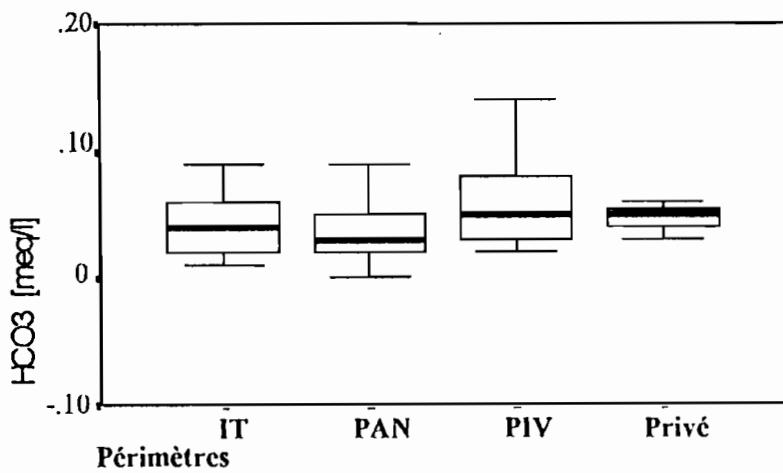


Fig 16: Boxplot représentant la répartition des concentrations en carbonates en fonction du type de périmètre.

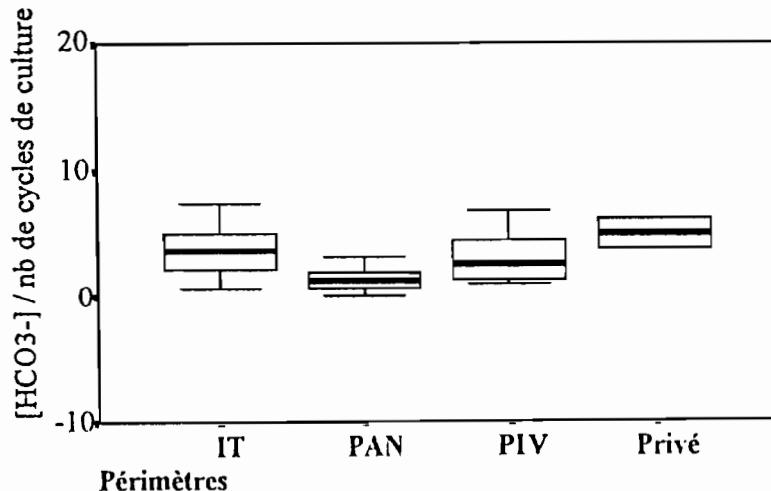


Fig 17: Sur ce diagramme, la concentration en carbonate a été divisée par le nombre de cycle de culture effectué dans les périmètres. Le boxplot représente la répartition de ce rapport en fonction du type de périmètre.

Dans le périmètre de Nianga, la majeure partie des mailles étudiées ont une teneur en bicarbonates assez faible comparativement aux autres périmètres. Le périmètre de Nianga est aussi le seul à être équipé de drains et de fossés de colatures. Même si le fonctionnement des drains est quasiment nul, la circulation de l'eau est tout de même assurée, d'une part au travers de la vidange des parcelles lors des mises à sec, et d'autre part, par les nombreux débordements et fuites à travers les digues (Salvignol 1994). Les endroits à concentration de carbonates les plus élevées correspondent à des parcelles possédant des problèmes d'engorgement liés à l'impossibilité de vidanger les parcelles (fig15). C'est notamment le cas des mailles de Dekolé 1 et de Guia 9, où ces problèmes ont été identifiés par Barreteau (1994).

### 5.5.2 nombre de cycles de culture pratiqués

Il est évident que la quantité de carbonates accumulée dans les sols va être fonction de la quantité d'eau apportée, ou en d'autres termes, du nombre de cycles de culture pratiqués. Dans le diagramme de la fig 17, les concentrations de carbonates ont été divisées par le nombre de cultures pratiqués. Les différents types de périmètre se distinguent beaucoup plus nettement que sur la fig 16. Il y a donc bel et bien un comportement propre à chaque groupe face à l'accumulation des carbonates. D'autre part, les valeurs pour chaque type de périmètre sont bien regroupées. Ceci nous conforte dans l'idée de la possibilité de prévoir le régime d'accumulation des carbonates en fonction du type de périmètre.

Ce diagramme suggère que le rythme d'accumulation des carbonates est fonction du régime hydrique des parcelles. Les périmètres permettant l'évacuation des eaux vers l'extérieur, que ce soit par débordements, fuites ou aménagements fonctionnels comme les PIV ou le PAN, sont logiquement les périmètres où l'évolution alcaline est la plus lente. Il existe donc une relation entre la quantité de carbonates accumulés à chaque cycle de culture et le facteur de concentration de l'eau dans la parcelle. Cependant, ce paramètre ne permet pas d'expliquer l'hétérogénéité des valeurs enregistrées entre certains PIV en particulier. D'autre part, de grandes différences peuvent être notées à l'intérieur d'un même périmètre. Ces questions seront discutés dans les paragraphes suivants.

### 5.5.3 Type de sols

En fonction de sa texture, le sol sera plus ou moins filtrant. Comme la percolation de l'eau vers la nappe est pratiquement nulle pour la plupart des sols, ce facteur influencera essentiellement la répartition des carbonates dans le profil.

Les échantillons de terre de quelques périmètres ont été classés en quatre catégories en fonction de leur texture: la catégorie 1 représente le sol le plus sableux. Celui-ci correspond au sol « fondé », avec un taux de sable de 40% environ. La catégorie 4 représente les sols les plus argileux avec des taux d'argile de plus de 60%. Des graphiques représentants le stock de carbonates en fonction de la texture ont été représentés pour quatre périmètres ou ensemble de périmètres (fig 18). Ces graphiques permettent d'expliquer les différences observées à l'échelle d'un périmètre. En effet, on remarque que les parcelles ayant accumulé le plus de carbonates sont toujours les plus argileuses, donc les moins filtrantes. En particulier, ces graphiques permettent de comprendre le comportement surprenant du périmètre de Lodoudou-Doué 1. Le sol de ce périmètre est particulièrement sableux, ce qui permet l'infiltration de l'eau d'irrigation et l'entraînement des carbonates. Cependant, il faut garder à l'esprit que si ceux-ci sont ainsi éliminés de l'horizon de surface, il ne serait pas surprenant de les retrouver simplement plus bas dans le profil, ou déplacés dans le paysage. Si, de cette manière, le problème au niveau des premiers centimètres peut paraître résolu, il réapparaîtra certainement ailleurs. Les conséquences seront certainement moins graves du

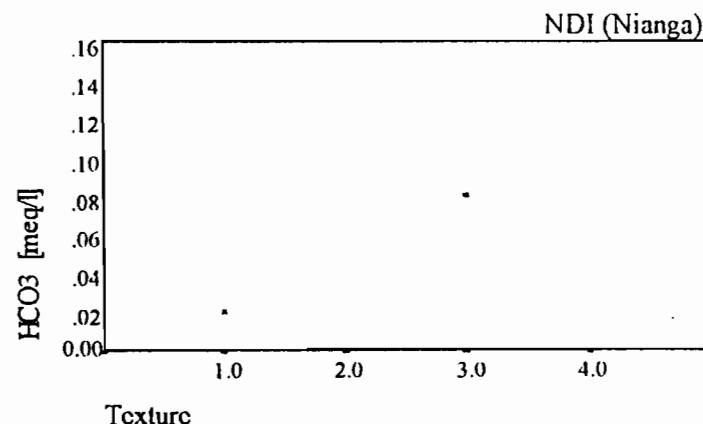
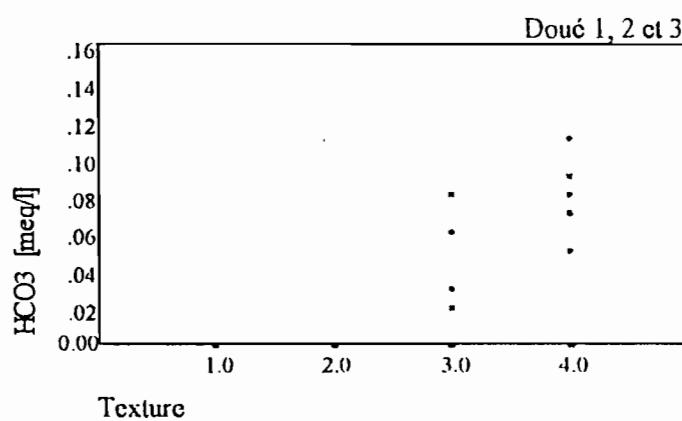
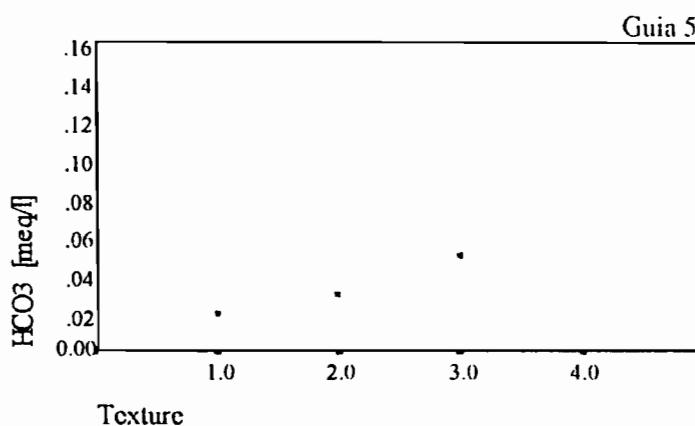
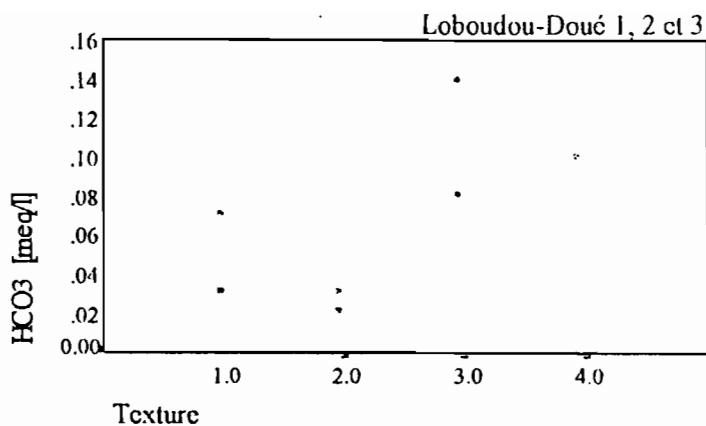


Fig 18: Concentration en carbonates des sols en fonction de la texture pour 4 périmètres ou ensembles de périmètre étudiés. Sur l'échelle de la texture, la catégorie 1 représente le sol le plus sableux (environ 40% de sable). La catégorie 4 représente le sol le plus argileux (environ 60% d'argile).

moment qu'il ne s'agit plus de sols cultivés, mais il n'en demeure pas moins que le potentiel des terres cultivables pourra se trouver considérablement réduit. On est en droit de se demander si la concentration relativement élevée de carbonates trouvés dans les sols non cultivés avoisinants n'est pas justement le signe d'une migration des carbonates du périmètre vers ces sols.

#### 5.5.4 Variabilité des valeurs

A l'intérieur d'un périmètre, la dispersion des valeurs rencontrées peut être assez importante. Ceci se remarque plus particulièrement dans les périmètres de Doué 1, 2 et 3, et de façon plus générale dans tous les périmètres de type PIV. Ceci s'explique par l'irrégularité de la topographie de ces périmètres et par l'absence de planage des parcelles. A l'opposé, les périmètres de type IT et le périmètre de Nianga ont une variabilité de la concentration en carbonates plus faible, grâce à une topographie plus régulière des parcelles.

Dans les PIV, les parcelles les plus basses d'un périmètre sont susceptibles d'accumuler le plus de carbonates. En effet, ces parcelles peuvent collecter les eaux des parcelles avoisinantes par fuite à travers des digues ou par débordement et de ce fait accumuler d'avantage de carbonates.

A l'échelle d'une parcelle, il est possible que les points hauts, soumis à une demande évaporative plus forte, accumulent d'avantage de carbonates. Ce scénario reste cependant hypothétique et demande à être vérifié.

### 5.6 Evaluation du bilan hydrique des parcelles

Dans ce paragraphe, on va chercher une relation permettant d'appréhender le bilan hydrique d'une parcelle en fonction du stock de carbonates et du nombre de cycle de culture pratiqué. Afin de ce faire une idée du degré de concentration de l'eau d'irrigation dans le sol, un calcul simple reposant sur la comparaison du stock de carbonates accumulé dans les sols et de la quantité de carbonates apportés à chaque irrigation a été effectué. En faisant le rapport entre ces deux valeurs, on obtient le nombre de cycle de culture qu'il a fallu pour apporter ce stock de carbonates. Cette valeur pourra être mise en relation avec le nombre réel de cycle de culture pratiqué sur les parcelles dans le but de discerner les différents comportements hydriques des périmètres. Un exemple de calcul détaillé pour le périmètre de Donaye IT1 ainsi que l'ensemble des résultats sont donnés en annexe 5. Ces résultats montrent que le nombre théorique de campagne nécessaire pour apporter le stock de carbonates trouvé dans les sols varie entre 0.6 et 4.6 campagnes de culture. Le rapport entre ce nombre de campagne théorique et le nombre de campagne réel est très faible, les plus hautes valeurs étant de l'ordre de 0.25.

Le calcul effectué se base sur l'hypothèse que seul les 20 premiers centimètres du profil ont accumulé des carbonates. Or, il est clair que le stock de carbonates ne se limite pas à l'horizon superficiel, ce qui conduit à une sous-estimation de celui-ci. D'autre part, les carbonates contenus dans l'eau d'irrigation vont pour une part s'accumuler le long du profil pédologique en fonction du régime d'infiltration de l'eau dans le sol, et pour une autre part, être évacués à l'extérieur de la parcelle en fonction des vidanges, fuites, débordements ou percolation vers la nappe. Il en ressort que la quantité effective de carbonates laissé par m<sup>3</sup> d'eau est surestimée. Ceci explique que le nombre de cycle de culture théorique calculé soit très faible par rapport au nombre de cultures réellement pratiquées.

Dans le but d'évaluer l'importance de cette sous-estimation, un profil de la répartition des carbonates sur un parcelle du périmètre de Donaye IT1 a été effectué.

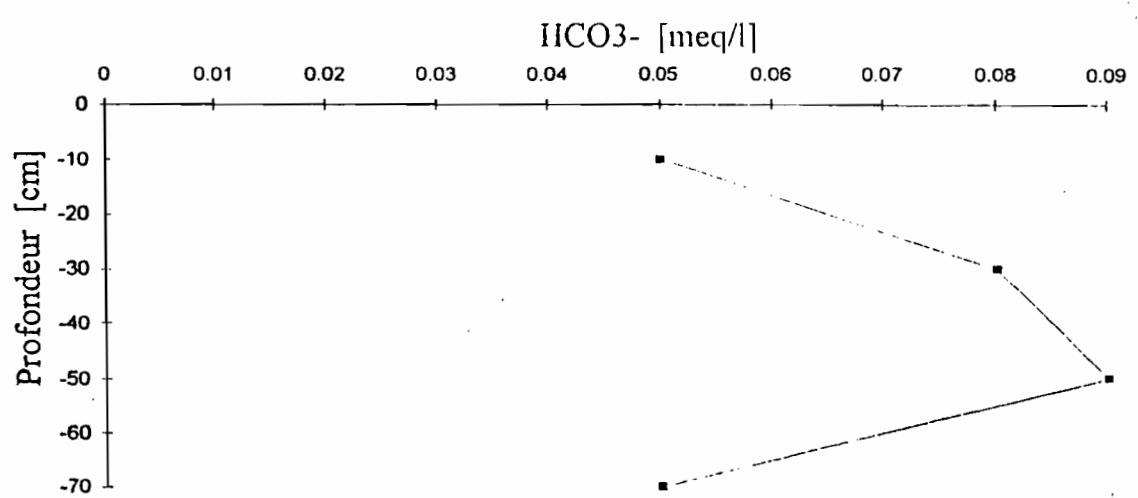


Fig 19: Profil de répartition des carbonates dans les 80 premiers cm du sol dans le périmètre de Donaye IT 1.

Sur la parcelle en question, des prélèvements de sol ont été effectués sur les 80 premiers centimètres du profil au cours de la contre-saison 1994. Dans le but d'obtenir une idée de la répartition des carbonates en profondeur, une titration des carbonates selon le même protocole que précédemment a été effectuée. Les résultats sont illustrés par le profil de la fig 19. On constate que seuls 20% des carbonates se sont accumulés dans les 20 premiers centimètres de sol. De façon inattendue, les carbonates présents dans les horizons 20-40 cm et 40-60 cm contiennent une concentration en carbonates plus élevée qu'en surface. En effet, l'eau des bougies posées sur la même parcelle possérait la concentration en carbonates la plus élevée en surface. Cela signifie peut être qu'il existe un lessivage des carbonates vers les profondeurs lors de la première mise en eau au moment où les fissures sont ouvertes dans le sol.

Le calcul effectué pour le périmètre de Donaye IT1 a été repris et corrigé en fonction de ces résultats. On obtient finalement un stock de carbonates accumulés dans les 80 premiers centimètres de sol qui représente 7.5 cycles de culture. Or, la parcelle en question a fait en réalité l'objet de 10 cycles de culture. Sur cette base, on peut conclure que 75% de l'eau d'irrigation s'est accumulée dans cette portion du sol. Bien que l'on puisse aisément supposer qu'une partie des carbonates doivent se trouver plus en profondeur, ce résultat semble tout de même contredire la supposition faite au départ que l'infiltration dans les périmètres de type IT est nulle et que la totalité de l'eau se concentre dans le premier mètre de sol. Il n'en demeure pas moins que l'accumulation des carbonates reste très importante.

Ce calcul a également été repris pour une parcelle de la maille de Guia 3 dans le périmètre de Nianga, en reprenant l'hypothèse que les carbonates trouvés en surface représentent 20% des carbonates accumulés dans le profil. Ceci se justifie par le fait que les sols de Donaye sont des sols particulièrement lourds dans lesquels l'infiltration est des plus réduite. On peut alors supposer que la part de carbonates accumulés dans les 20 premiers centimètres de sol des autres périmètres doit être en général plutôt inférieure à celle mesurée dans une parcelle du périmètre de Donaye IT1.

Dans le cas de Guia 3, le stock de carbonates représente 4 cycles de culture alors que le nombre effectif de culture est estimé à 22. Ceci laisse supposer qu'à chaque irrigation, 18% de l'eau se concentre au niveau de la parcelle. Ce résultat confirme l'hypothèse que la concentration des eaux dans le périmètre de Nianga est beaucoup plus faible que dans les périmètres de type IT par exemple.

La connaissance du profil d'accumulation des carbonates permet, par le biais du calcul effectué ci-dessus, de se faire une bonne idée du bilan hydrique d'une parcelle. Cette méthode a de plus l'avantage d'être rapide et peu coûteuse. La difficulté la plus importante provient de la difficulté de retrouver l'historique des parcelles afin de connaître le nombre exact de cultures pratiquées.

## Conclusion

Les résultats de ces investigations ont permis de montrer qu'il y a bien une évolution des sols cultivés. Cette évolution se manifeste par une élévation du pH ainsi qu'une accumulation de carbonates dans les sols cultivés. Tous les sols irrigués subissent la même évolution. Celle-ci est cependant plus ou moins marquée en fonction en fonction de l'âge du périmètre, du régime hydrique et du type de sol, mais aucun périmètre n'est épargné. Même les périmètres équipés de drains, comme le périmètre de Nianga, se dégradent. En effet, le drainage, peut-être efficace pendant la période culturale, ne peut pas empêcher la concentration de l'eau dans le sol pendant l'inter-culture. Le facteur de concentration, maintenu en dessous du seuil de précipitation de la calcite pendant la culture, va alors fortement s'accroître et va ainsi provoquer l'alcalinisation des sols par les mécanismes décrits dans ce rapport. D'autres facteurs non étudiés comme le type de culture interviennent probablement aussi dans le rythme d'évolution des sols.

La quantification des carbonates accumulés dans les sols cultivés a permis de montrer une évolution de ces sols par alcalinisation. Il serait alors intéressant de connaître la corrélation existante entre le degré d'alcalinisation et la dégradation du potentiel agronomique des sols irrigués. En effet, le phénomène d'alcalinisation est gênant, dans la mesure où il affecte la productivité du sol. Des baisses de rendement ont certes été observées par les agriculteurs de la région, mais il n'est pas possible actuellement de préciser la part de responsabilité du phénomène d'alcalinisation. En effet, beaucoup d'autres facteurs peuvent être à l'origine de ces baisses de rendements. Il n'en demeure pas moins que l'accumulation des carbonates provoquant la hausse du pH va à plus ou moins long terme affecter la fertilité des sols. Des pH trop alcalins vont en effet provoquer des carences et toxicités ioniques pouvant entraver la croissance des plantes.

Les résultats ont montré que tous les sols cultivés suivaient à des degrés divers la voie de l'alcalinisation. Si ces résultats nous ont permis de se faire une idée de la vitesse d'évolution de ces sols, il n'est pourtant pas possible de prévoir à partir de quand cette évolution entrera sérieusement la fertilité du sol.

Face à cette évolution, il reste à trouver un moyen de lutte simple et efficace, compatible avec les techniques de cultures et les moyens financiers des paysans sénégalais. Les différences de comportement des différents types de périmètre face à l'alcalinisation montrent que certains aménagements permettent de ralentir cette évolution. En effet, les aménagements permettant une bonne circulation de l'eau présentent la plus faible évolution. Cela implique, si on veut pouvoir contrôler la gestion de l'eau, que des drainages et des fossés de collature soient mis en place. Pour éviter de déplacer le problème sur d'autres sols, il importe alors d'assurer l'acheminement des eaux de drainage afin de les rejeter dans le fleuve.

## Bibliographie

- BARRETEAU O. (1994) Des pratiques de gestion à la consommation d'eau d'un périmètre irrigué. Le cas du périmètre de Nianga au Sénégal. Mémoire de DEA CIRAD-ORSTOM.
- BERTRAND R., N'DIAYE K.M., KEITA B. (1994) L'alcalinisation/sodisation, un danger pour les périmètres irrigués sahéliens. Sécheresse 1994;5:161-171
- BOIVIN P., MAEGHT JL., POUSSIN JC., SERRES T. (1994) Bilan hydro-salin et évolution géochimique des sols en rizière irriguée. Campagne de contre-saison 1994. Rappot d'avancement des travaux, expérimentations ORSTOM-FED dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, région de Nianga-Podor.
- BOURRIE G. (1976) Relations entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO<sub>2</sub> dans les eaux naturelles.
- CHAROLLAIS M. et WEBER V. (1994) Evolution des sols irrigués dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Sodisation/alcalinisation. Travail pratique de diplôme EPFL, ORSTOM Dakar, 45 p. et annexes
- DROUBI (AL-) A. (1976) Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse université Louis Pasteur Strasbourg, Ed. CNRS, 175 p.
- HECQ J. et DUGAUQUIER F. (1990) Périmètre irrigué villageois de Guia au Sénégal. In « Périmètres irrigués villageois en Afrique sahélienne ». Centre de technique de coopération agricole et rurale, Wageningen, 26p.
- LERICOLLAIS A. et SARR A. (1995) Histoires de périmètres. In « Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée dans la moyenne vallée du Sénégal ». ORSTOM, coll. Colloques et séminaires. (à paraître).
- LOYER (1989) J.-T., Dégradation saline des sols induite par l'irrigation en domaine sahélien. In « Le risque en agriculture », ORSTOM, p531-540
- MANE L., BOIVIN P. et SEGUIS L. (1995) Etats de surface des sols non cultivés dans la cuvette de Nianga: description, radiométrie de terrain et imagerie SPOT. In « Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée dans la moyenne vallée du Sénégal ». ORSTOM, coll. Colloques et séminaires. (à paraître).
- MAYMARD J. (1960) Etudes pédologiques dans la vallée alluviale du Sénégal. MAS, Div. agronomique, bull. 122, 38p. multigr.
- POITEVIN DE F. (1993) Etude d'impact des techniques culturales sur aménagements hydro-agricoles dans la région de Podor (Sénégal). Mémoire de quatrième année de l'ESAP, multigr. ORSTOM Dakar, 53 p. et annexes.
- RICHARD L.A. (1954) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA-Agriculture handbook, n°60, 160p.
- SALVIGNOL C. (1993) Gestion de l'eau en riziculture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Essai de bilan hydrique et salin. Mémoire de fin d'études ESITPA, 34 p. et annexes
- TARRIERE C. (1995) Les groupements de producteurs, village de Donaye. In « Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée dans la moyenne vallée du Sénégal ». ORSTOM, coll. Colloques et séminaires. (à paraître).
- VALLES V., BERTRAND R., BOURGEAT F., NDIAYE M. (1989) Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques. Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l'oued Medjerdah (Tunisie). L'agronomie tropicale 1989, 44-3, p.157-163
- VAN BEEK C. et VAN BREEMEN N. (1973) The alcalinity of alkali soils. Journal of soil science, vol 24, No 1, 1973

# Annexes

Annexe 1: liste et caractéristiques des périmètres étudiés.

Annexe 2: Résultats des vérifications de la saturation de 5 extraits de sol vis à vis du gypse et de la calcite à l'aide du logiciel SOPREX.

Annexe 3: Résultats des analyses.

Annexe 4: Evolution du pH des bougies poreuses à Donaye IT1

Annexe 5: Evaluation du bilan hydrique des parcelles; Exemple de calcul et résultats.

## Liste des périmètres étudiés

Périmètres	Type	Age
Diatar IT1	IT	1987
Diatar IT2	IT	1987
Donaye IT1	IT	1986
Donaye IT2	IT	1987
Guedé IT1	IT	1989
Guedé IT2	IT	1989
Dékolé 1	PAN, casier C	1984
Guia 3	PAN, casier C	1984
Guia 9	PAN, casier C	1984
Casier pilote	PAN, casier pilote	1974
KOI	PAN, casier pilote	1974
N	PAN, casier pilote	1974
NDI	PAN, casier pilote	1974
Niandane	PAN, casier pilote	1974
Ext, PEN	PAN, extention	1989
Ext, PEN	PAN, extention	1989
Donaye 1	PIV	1979
Doué 1	PIV	1986
Doué 2	PIV	1986
Doué 3	PIV	1987
Guia 5	PIV	1985
Loboudou-Doué 1	PIV	1984
Loboudou-Doué 2	PIV	1984
Loboudou-Doué 3	PIV	1984
Beke Weke	Privé	1990
Betowe Ndiaye	Privé	1991
Ndiawara	Privé	?

DISTRIBUTION OF SPECIES		SOLUTION CHARACTERISTICS	
mol/L	Activity	pH	
K	1.800E-04	1.493E-04	2.509
Na	1.116E-02	9.258E-03	3.162E-03
Ca	3.729E-03	1.764E-03	2.500
CaHCO3	6.261E-10	5.193E-10	4.301E-02
Mg	5.520E-03	2.611E-03	9.986E-01
MgHCO3	3.953E-10	3.279E-10	-6.186E-04
H	3.738E-03	3.100E-03	3.695E+00
OH	3.890E-12	3.226E-12	3.671E+00
Cl	3.322E-02	2.755E-02	4.426E+00
SO4	1.783E-04	8.436E-05	8.710E-09
CO3	5.160E-16	2.441E-16	4.305E-19
HCO3	1.906E-08	1.581E-08	1.410E-05
H2CO3	1.129E-04	1.096E-04	1.488E-07
CaCO3	7.028E-17	6.823E-17	-3.740E-03
CaSO4	3.129E-05	3.038E-05	-1.126E-02
MgCO3	1.649E-15	1.601E-15	-2.121E-06
MgSO4	4.037E-05	3.919E-05	3.410
NaCl	1.162E-04	8.447E-05	2.953
Na2SO4	1.871E-08	1.817E-08	-1.999E+03
DISTRIBUTION OF MATTER IN THE ACTUAL SYSTEM			

Solut. or Prec.(mol/L)	Adsorbed(meq/100g)	Mass of matter(g)
K	1.800E-04	7.038E-04
Na	1.128E-02	2.594E-02
Ca	3.760E-03	1.508E-02
Mg	5.560E-03	1.351E-02
Cl	3.334E-02	1.184E-01
SO4	2.500E-04	2.400E-03
Ca,MgCO3c	0.000E+00	0.000E+00
CaSO4c	0.000E+00	0.000E+00
Total Adsorbed	0.000	5.082E-18
Total (K+Na+Ca+Mg+Cl+SO4) solut. + prec. + ads.		1.760E-01
Total (H2CO3+HCO3+CO3) solut. + prec.		7.003E-04
Total Soil		1.000E-07
Total Water		1.000E+02
Mole fraction of Mg in Mg-Calcite : 0.00000		

Reference : n18

Concentration index : 1.000

Distribution of species mol/L		Solutions characteristics	
	Activity	pH	2.662
K	1.000E-04	8.562E-05	2.662
Na	1.861E-02	1.593E-02	3.162E-03
Ca	1.476E-04	7.934E-05	2.500
CaHCO3	3.886E-11	3.327E-11	2.635E-02
Mg	3.358E-04	1.805E-04	9.991E-01
MgHCO3	3.770E-11	3.228E-11	-3.790E-04
H	2.542E-03	2.176E-03	2.455E+01
OH	5.366E-12	4.595E-12	2.676E+01
Cl	1.491E-02	1.277E-02	3.126E+01
SO4	3.652E-03	1.963E-03	8.710E-09
CO3	9.212E-16	4.952E-16	3.929E-20
HCO3	2.630E-08	2.252E-08	1.410E-05
H2CO3	1.116E-04	1.096E-04	1.558E-07
CaCO3	6.340E-18	6.226E-18	-2.540E-03
CaSO4	3.238E-05	3.180E-05	-2.900E-03
MgCO3	2.287E-16	2.246E-16	1.898E-06
MgSO4	6.420E-05	6.304E-05	2.099
NaCl	8.844E-05	6.736E-05	1.818
Na2SO4	1.275E-06	1.252E-06	-1.224E+03

Distribution of matter in the actual system

Solut. or Prec.(mol/L)	Adsorbed(meq/100g)	Mass of matter(g)
K	1.000E-04	3.910E-04
Na	1.870E-02	4.301E-02
Ca	1.800E-04	7.218E-04
Mg	4.000E-04	9.720E-04
Cl	1.500E-02	5.325E-02
SO4	3.750E-03	3.600E-02
Ca,MgCO3c	0.000E+00	0.000E+00
CaSO4c	0.000E+00	0.000E+00
Total Adsorbed	0.000	5.303E-18
Total (K+Na+Ca+Mg+Cl+SO4) solut. + prec. + ads.		1.343E-01
Total (H2CO3+HCO3+CO3) solut. + prec.		6.924E-04
Total Soil		1.000E-07
Total Water		1.000E+02
Mole fraction of Mg in Mg-Calcite : 0.00000		

Reference : n23

Concentration index : 1.000

Distribution of Species		Solution Characteristics	
	mol/L	Activity	
K	4.000E-05	3.385E-05	pH 7.553
Na	1.355E-02	1.146E-02	PCO2 (atm.) 3.162E-03
Ca	1.133E-03	5.810E-04	-log(PCO2) 2.500
CaHCO3	2.238E-05	1.893E-05	Ionic Strength (mol/L) 3.179E-02
Mg	2.269E-03	1.164E-03	Water Activity 9.989E-01
MgHCO3	1.911E-05	1.617E-05	log Water Activity -4.573E-04
H	3.309E-08	2.800E-08	SAR tot. conc. (mol/L) <sup>1/2</sup> 6.183E+00
OH	4.220E-07	3.571E-07	SAR free ion conc. 7.344E+00
Cl	2.449E-03	2.073E-03	SAR free ion activ. 8.679E+00
SO4	7.952E-03	4.077E-03	Kps Calcite 8.710E-09
CO3	5.834E-06	2.991E-06	Q (Ca).(CO3) 1.738E-09
HCO3	2.068E-03	1.750E-03	Kps Gypsum 1.410E-05
H2CO3	1.121E-04	1.096E-04	Q (Ca).(SO4) 2.369E-06
CaCO3	2.815E-07	2.754E-07	Alcalinity (molc./L) 2.140E-03
CaSO4	4.943E-04	4.836E-04	Resid. Alc. Cal. (molc./L) -1.160E-03
MgCO3	8.938E-06	8.745E-06	Charge Balance (molc./L) -1.157E-07
MgSO4	8.628E-04	8.441E-04	EC (G.J.)(dS/m) 2.527
NaCl	1.053E-05	7.868E-06	EC (M.B.)(dS/m) 2.189
Na2SO4	1.376E-06	1.346E-06	Osmotic Pot. (cm H2O) -1.477E+03

Distribution of Matter in the Actual System

Solut. or Prec.(mol/L)	Adsorbed(meq/100g)	Mass of matter(g)
K	4.000E-05	1.564E-04
Na	1.356E-02	3.119E-02
Ca	1.650E-03	6.617E-03
Mg	3.160E-03	7.679E-03
Cl	2.460E-03	8.733E-03
SO4	9.310E-03	8.938E-02
Ca,MgCO3c	0.000E+00	0.000E+00
CaSO4c	0.000E+00	0.000E+00
Total Adsorbed	0.000	5.051E-18
Total (K+Na+Ca+Mg+Cl+SO4) solut. + prec. + ads.		1.437E-01
Total (H2CO3+HCO3+CO3) solut. + prec.		1.365E-02
Total Soil		1.000E-07
Total Water		1.000E+02
Mole fraction of Mg in Mg-Calcite : 0.00000		

Reference : n128

Concentration index : 1.000

bbb DISTRIBUTION OF SPECIES bbb      bbb SOLUTION CHARACTERISTICS bbb			
	mol/L	Activity	
K	6.600E-04	5.662E-04	pH
Na	8.871E-03	7.610E-03	PCO2 (atm.)
Ca	1.279E-03	6.928E-04	-log(PCO2)
CaHCO3	1.658E-09	1.422E-09	Ionic Strength (mol/L)
Mg	3.504E-03	1.897E-03	Water Activity
MgHCO3	1.936E-09	1.661E-09	log Water Activity
H	5.183E-04	4.446E-04	SAR tot. conc. (mol/L) <sup>1/2</sup>
OH	2.622E-11	2.249E-11	SAR free ion conc.
Cl	1.729E-02	1.483E-02	SAR free ion activ.
SO4	1.163E-03	6.297E-04	Kps Calcite
CO3	2.191E-14	1.187E-14	Q (Ca).(CO3)
HCO3	1.285E-07	1.102E-07	Kps Gypsum
H2CO3	1.116E-04	1.096E-04	Q (Ca).(SO4)
CaCO3	1.326E-15	1.303E-15	Alcalinity (molc./L)
CaSO4	9.065E-05	8.907E-05	Resid. Alc. Cal. (molc./L)
MgCO3	5.757E-14	5.656E-14	Charge Balance (molc./L)
MgSO4	2.164E-04	2.126E-04	EC (G.J.)(dS/m)
NaCl	4.892E-05	3.738E-05	EC (M.B.)(dS/m)
Na2SO4	9.325E-08	9.162E-08	Osmotic Pot. (cm H2O)

bbb DISTRIBUTION OF MATTER IN THE ACTUAL SYSTEM bbb

Solut. or Prec.(mol/L)	Adsorbed(meq/100g)	Mass of matter(g)
K	6.600E-04	2.581E-03
Na	8.920E-03	2.052E-02
Ca	1.370E-03	5.494E-03
Mg	3.720E-03	9.040E-03
Cl	1.734E-02	6.156E-02
SO4	1.470E-03	1.411E-02
Ca,MgCO3c	0.000E+00	0.000E+00
CaSO4c	0.000E+00	0.000E+00
Total Adsorbed	0.000	4.911E-18
Total (K+Na+Ca+Mg+Cl+SO4) solut. + prec. + ads.		1.133E-01
Total (H2CO3+HCO3+CO3) solut. + prec.		6.926E-04
Total Soil		1.000E-07
Total Water		1.000E+02
Mole fraction of Mg in Mg-Calcite : 0.00000		

Reference : n131

Concentration index : 1.000

Distribution of species			Solution characteristics
	mol/L	Activity	
K	8.000E-05	7.598E-05	pH
Na	4.799E-04	4.558E-04	PCO2 (atm.)
Ca	2.755E-04	2.242E-04	-log(PCO2)
CaHCO3	3.395E-06	3.224E-06	Ionic Strength (mol/L)
Mg	2.476E-04	2.014E-04	Water Activity
MgHCO3	1.301E-06	1.236E-06	log Water Activity
H	6.680E-08	6.345E-08	SAR tot. conc. (mol/L) <sup>1/2</sup>
OH	1.660E-07	1.576E-07	SAR free ion conc.
Cl	7.399E-04	7.027E-04	SAR free ion activ.
SO4	2.813E-05	2.288E-05	Kps Calcite
CO3	7.163E-07	5.827E-07	Q (Ca).(CO3)
HCO3	8.133E-04	7.724E-04	Kps Gypsum
H2CO3	1.098E-04	1.096E-04	Q (Ca).(SO4)
CaCO3	2.073E-08	2.070E-08	Alcalinity (molc./L)
CaSO4	1.049E-06	1.047E-06	Resid. Alc. Cal. (molc./L)
MgCO3	2.953E-07	2.949E-07	Charge Balance (molc./L)
MgSO4	8.214E-07	8.202E-07	EC (G.J.)(dS/m)
NaCl	1.117E-07	1.060E-07	EC (M.B.)(dS/m)
Na2SO4	1.196E-11	1.194E-11	Osmotic Pot. (cm H2O)

## Distribution of matter in the actual system

Solut. or Prec.(mol/L)	Adsorbed(meq/100g)	Mass of matter(g)
K	8.000E-05	3.128E-04
Na	4.800E-04	1.104E-03
Ca	2.800E-04	1.123E-03
Mg	2.500E-04	6.075E-04
Cl	7.400E-04	2.627E-03
SO4	3.000E-05	2.880E-04
Ca,MgCO3c	0.000E+00	0.000E+00
CaSO4c	0.000E+00	0.000E+00
Total Adsorbed	0.000	5.176E-18
Total (K+Na+Ca+Mg+Cl+SO4) solut. + prec. + ads.		6.062E-03
Total (H2CO3+HCO3+CO3) solut. + prec.		5.677E-03
Total Soil		1.000E-07
Total Water		1.000E+02
Mole fraction of Mg in Mg-Calcite : 0.00000		

Reference : n166

Concentration index : 1.000

## Résultats des analyses

Périmètre	No ech.	Sol	pH labo	pH in situ	EC [µS/cm]	HCO3-[meq/l]
Guia 5	1	cultivé	6.73	6.30	18.67	0.03
Guia 5	2	cultivé	6.78	5.60	18.92	0.05
Guia 5	3	cultivé	6.54	6.82	21.00	0.02
Guia 5	4	non cultivé	6.35	4.35	31.10	0.01
Guia 5	5	non cultivé	6.44	5.20	33.00	0.02
Guia 5	6	non cultivé	6.60	5.10	50.90	0.03
Loboudou Doué 1	7	cultivé	6.23	4.30	14.88	0.02
Loboudou Doué 1	8	cultivé	6.81	6.15	18.30	0.03
Loboudou Doué 1	13	non cultivé	6.26	4.50	51.20	0.05
Loboudou Doué 1	14	non cultivé	6.27	4.82	258.00	0.02
Loboudou Doué 2	9	cultivé	6.57	6.87	17.65	0.03
Loboudou Doué 2	10	cultivé	6.94	6.54	18.90	0.07
Loboudou Doué 2	11	cultivé	6.83	6.33	24.10	0.03
Loboudou Doué 2	12	cultivé	6.55	5.80	22.20	0.05
Loboudou Doué 2	15	non cultivé	6.02	3.83	444.00	0.02
Loboudou Doué 2	16	non cultivé	6.39	5.40	47.40	0.03
Loboudou Doué 2	17	non cultivé	6.42	5.51	37.80	0.05
Loboudou Doué 2	18	non cultivé	6.34	5.08	71.50	0.03
Loboudou Doué 3	19	cultivé	7.12	6.40	32.40	0.10
Loboudou Doué 3	20	cultivé	7.17	6.78	51.20	0.14
Loboudou Doué 3	21	cultivé	7.17	6.22	26.10	0.08
Loboudou Doué 3	22	non cultivé	6.05	3.80	407.00	0.02
Loboudou Doué 3	23	non cultivé	6.17	4.43	188.00	0.02
Loboudou Doué 3	24	non cultivé	6.12	4.60	638.00	0.03
Donaye It1	25	cultivé	6.76	6.15	24.10	0.09
Donaye It1	26	cultivé	6.60	5.91	21.10	0.05
Donaye It1	27	cultivé	6.51	6.21	28.60	0.05
Donaye It1	28	cultivé	6.48	6.54	24.30	0.07
Donaye It1	29	cultivé	6.70	6.30	35.10	0.08
Donaye It1	30	cultivé	6.60	6.24	25.50	0.06
Donaye It1	31	non cultivé	6.74	6.47	36.30	0.14
Donaye It1	32	non cultivé	6.45	4.89	18.60	0.02
Donaye It1	33	non cultivé	6.44		20.30	0.02
Donaye It1	34	non cultivé	6.55	5.10	36.50	0.03
Donaye It1	35	non cultivé	6.35	4.71	21.60	0.03
Donaye It1	36	non cultivé	5.54	4.65	15.81	0.02
Beke-Weke	37	cultivé	6.51	6.14	20.80	0.03
Beke-Weke	38	cultivé	6.44	5.10	27.90	0.05
Beke-Weke	39	non cultivé	6.30	5.28	21.40	0.01
Beke-Weke	40	non cultivé	6.30	4.79	19.20	0.02
Donaye 1	41	cultivé	6.93	6.50	25.20	0.07
Donaye 1	42	cultivé	6.62	6.40	30.50	0.11
Donaye 1	120	cultivé	6.70		34.30	0.07
Donaye 1	121	cultivé	6.68		17.41	0.03
Donaye 1	122	cultivé	6.71		19.80	0.03
Guia 3	45	cultivé	6.68	6.75	47.60	0.08
Guia 3	46	cultivé	6.47	6.86	23.30	0.03
Guia 3	47	cultivé	6.79	6.31	21.70	0.04
Guia 3	48	cultivé	6.56	5.91	26.50	0.05
CP	49	cultivé	6.84	5.20	56.60	0.06
CP	50	cultivé	6.67	5.35	15.80	0.02
CP	51	cultivé	5.90	5.21	42.10	0.00
CP	52	cultivé	6.47	5.29	23.70	0.02
NDI	53	cultivé	6.54	6.02	20.00	0.02
NDI	54	cultivé	6.53	6.34	35.60	0.08
Doué 1	55	cultivé	6.00	6.21	21.00	0.08
Doué 1	56	cultivé	7.13	6.54	33.00	0.06

## Résultats des analyses

Périmètre	No ech.	Sol	pH labo	pH in situ	EC [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	HCO <sub>3</sub> - [meq/l]
Doué 1	57	cultivé	6.46	6.78	28.70	0.08
Doué 1	58	cultivé	6.61	6.45	16.08	0.03
Doué 1	59	cultivé	6.36	6.43	18.90	0.02
Doué 1	60	non cultivé	6.15	7.93	198.00	0.02
Doué 1	61	non cultivé	6.31	7.86	361.00	0.01
Doué 1	62	non cultivé	5.85	7.77	312.00	0.01
Doué 2	63	cultivé	6.88	5.62	26.00	0.03
Doué 2	64	cultivé	6.62	6.12	17.21	0.02
Doué 2	65	cultivé	6.65	5.70	22.60	0.02
Doué 2	66	cultivé	6.80	6.61	35.60	0.11
Doué 2	67	cultivé	6.60	6.11	32.80	0.08
Doué 2	68	non cultivé	6.16	5.29	55.20	0.02
Doué 2	69	non cultivé	6.57	5.14	118.40	0.02
Doué 2	70	non cultivé	6.37	5.37	44.90	0.02
Doué 2	71	non cultivé	6.53	5.59	52.30	0.02
Doué 2	72	non cultivé	6.63	5.27	127.70	0.05
Doué 3	73	cultivé	6.89	5.94	35.60	0.07
Doué 3	74	cultivé	7.08	5.92	27.60	0.09
Doué 3	75	cultivé	6.66	5.70	36.30	0.03
Doué 3	76	cultivé	7.10	5.90	38.90	0.11
Doué 3	77	cultivé	6.74	5.97	21.40	0.05
Doué 3	78	non cultivé	5.70	4.92	335.00	0.02
Doué 3	79	non cultivé	6.07	6.98	320.00	0.02
Doué 3	80	non cultivé	6.07	4.84	173.80	0.01
Doué 3	81	non cultivé	6.62	5.10	98.80	0.05
Doué 3	82	non cultivé	6.14	4.84	238.00	0.02
NDiawara	83	cultivé	6.95		20.60	0.05
NDiawara	84	cultivé	6.75		39.00	0.05
NDiawara	85	cultivé	6.85		39.50	0.07
NDiawara	86	cultivé	6.65		33.20	0.09
NDiawara	87	cultivé	6.65		14.51	0.03
NDiawara	88	non cultivé	6.33		193.50	0.05
NDiawara	89	non cultivé	6.31		77.10	0.03
NDiawara	90	non cultivé	6.66		71.00	0.03
NDiawara	91	non cultivé	6.48		44.90	0.05
NDiawara	92	non cultivé	6.33		42.20	0.04
Dekolé 1	93	cultivé	6.65		15.07	0.02
Dekolé 1	94	cultivé	6.08		24.80	0.09
Dekolé 1	95	cultivé	6.10		25.50	0.09
Dekolé 1	96	cultivé	6.75		18.78	0.03
Dekolé 1	97	cultivé	6.74		28.50	0.07
Dekolé 1	98	cultivé	6.64		22.30	0.05
Dekolé 1	99	cultivé	6.42		16.17	0.03
Diatar It1	100	cultivé	6.80		20.80	0.04
Diatar It1	101	cultivé	6.65		16.22	0.03
Diatar It1	102	cultivé	6.62		20.80	0.06
Diatar It1	103	cultivé	6.62		18.20	0.02
Diatar It1	104	cultivé	6.77		18.01	0.05
Diatar It1	105	non cultivé	6.50	5.90	41.40	0.02
Diatar It1	106	non cultivé	6.40	4.93	79.20	0.04
Diatar It1	107	non cultivé	6.40	5.65	64.80	0.02
Diatar It1	108	non cultivé	6.54	5.43	53.20	0.02
Diatar It1	109	non cultivé	6.61	5.20	66.40	0.03
Diatar It2	110	cultivé	6.84		22.70	0.09
Diatar It2	111	cultivé	6.87		28.90	0.06
Diatar It2	112	cultivé	6.72		23.60	0.05
Diatar It2	113	cultivé	6.93		20.20	0.04

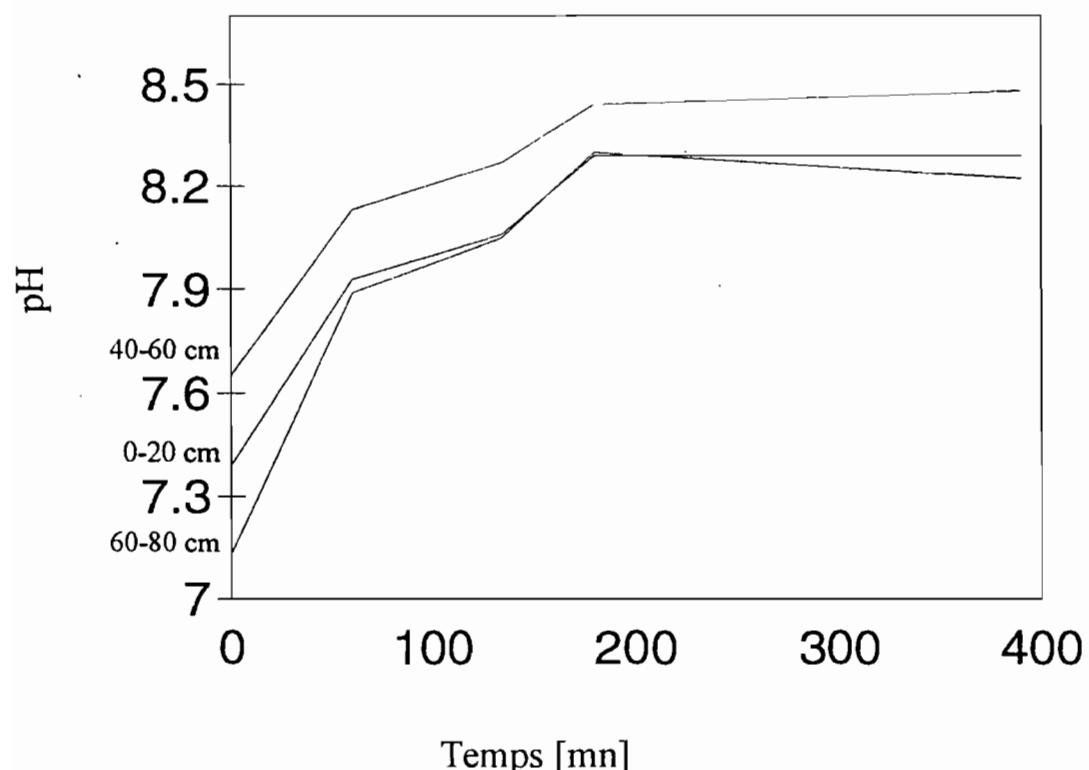
## Résultats des analyses

Périmètre	No ech.	Sol	pH labo	pH in situ	EC [ $\mu\text{S/cm}$ ]	HCO <sub>3</sub> - [meq/l]
Diatar It2	114	cultivé	6.54		21.90	0.05
Diatar It2	115	non cultivé	6.43		168.80	0.03
Diatar It2	116	non cultivé	6.01		164.70	0.01
Diatar It2	117	non cultivé	5.98		114.70	0.02
Diatar It2	118	non cultivé	6.00		71.10	0.02
Diatar It2	119	non cultivé	6.44		40.40	0.02
Guia 9	123	cultivé	6.56		20.60	0.04
Guia 9	124	cultivé	6.81		30.60	0.09
Guia 9	125	cultivé	6.67		28.50	0.04
Guia 9	126	cultivé	6.60		23.80	0.04
Guia 9	127	cultivé	6.71		17.45	0.04
Guia 9	128	cultivé	6.55		17.50	0.03
Guia 9	129	cultivé	6.74		32.90	0.09
Guia 9	130	cultivé	6.78		1930.00	0.06
Guia 9	131	cultivé	6.48		2270.00	0.05
KOI	132	cultivé	6.45		16.19	0.03
KOI	133	cultivé	6.41		24.90	0.02
KOI	134	cultivé	6.55		14.61	0.01
KOI	135	cultivé	6.26		23.10	0.00
KOI	136	cultivé	6.31		19.35	0.02
Niandane	137	cultivé	6.33		10.90	0.01
Niandane	138	cultivé	6.83		14.36	0.02
Niandane	139	cultivé	6.64		24.10	0.03
Niandane	140	cultivé	6.67		14.25	0.02
Niandane	141	cultivé	6.20		65.50	0.03
N	142	cultivé	6.59		30.50	0.04
N	143	cultivé	6.38		18.70	0.03
N	144	cultivé	6.89		33.90	0.04
N	145	cultivé	6.58		24.70	0.02
N	146	cultivé	6.58		25.00	0.03
Ext	147	cultivé	6.49	7.80	37.50	0.01
Ext	148	cultivé	7.06		27.40	0.11
Ext	149	cultivé	6.58		14.54	0.01
Ext	150	cultivé	6.94		19.80	0.02
Ext	151	cultivé	6.51		15.44	0.02
PEN	152	cultivé	6.50	7.50	15.38	0.02
PEN	153	cultivé	6.85		20.90	0.03
PEN	154	cultivé	6.57		40.80	0.02
PEN	155	cultivé	6.25		18.61	0.01
PEN	156	cultivé	6.33		46.50	0.05
Guedé It1	157	cultivé	6.47	6.70	23.70	0.03
Guedé It1	158	cultivé	6.75		22.60	0.04
Guedé It1	159	cultivé	7.07		70.20	0.24
Guedé It1	160	cultivé	6.85		35.30	0.06
Guedé It1	161	cultivé	6.70		15.48	0.02
Guedé It2	162	cultivé	6.49	7.30	17.33	0.01
Guedé It2	163	cultivé	6.72		21.50	0.04
Guedé It2	164	cultivé	6.48		33.80	0.02
Guedé It2	165	cultivé	6.75		25.80	0.02
Guedé It2	166	cultivé	6.25		15.69	0.01
Guedé It1	167	non cultivé	6.40		76.20	0.02
Guedé It1	168	non cultivé	6.12		33.50	0.02
Guedé It1	169	non cultivé	6.50		35.80	0.03
Guedé It1	170	non cultivé	6.44		61.40	0.03
Guedé It1	171	non cultivé	6.49		74.10	0.08
Betowe Ndiaye	I1	cultivé	6.74	6.01	31.50	0.05
Betowe Ndiaye	I2	cultivé	6.90	5.63	24.00	0.08

## Résultats des analyses

Périmètre	No ech.	Sol	pH labo	pH in situ	EC [ $\mu\text{S/cm}$ ]	HCO <sub>3</sub> - [meq/l]
Betowe Ndiaye	I3	cultivé	6.56	6.04	21.10	0.05
Betowe Ndiaye	I4	cultivé	6.75	6.26	26.70	0.06
Betowe Ndiaye	I5	cultivé	6.44	5.21	19.42	0.01
Betowe Ndiaye	I11	non cultivé	6.42	5.17	202.00	0.02
Betowe Ndiaye	I12	non cultivé	6.39	5.06	179.20	0.03
Betowe Ndiaye	I13	non cultivé	6.44	4.18	28.50	0.02
Betowe Ndiaye	I14	non cultivé	6.58	5.36	43.30	0.03
Betowe Ndiaye	I20	non cultivé	6.47		50.80	0.03
Donaye It2	43	cultivé	6.45	6.51	62.60	0.02
Donaye It2	44	cultivé	6.55	5.76	14.85	0.01
Donaye It2	I6	cultivé	6.58	5.83	14.78	0.01
Donaye It2	I7	cultivé	6.86	5.61	29.20	0.02
Donaye It2	I8	cultivé	6.74	5.74	19.02	0.05
Donaye It2	I9	cultivé	6.78	6.48	21.70	0.06
Donaye It2	I10	cultivé	6.50	6.65	19.51	0.03
Donaye It2	I16	cultivé	6.68	6.40	19.42	0.03
Donaye It2	I17	cultivé	6.10	5.36	44.50	0.02
Donaye It2	I18	non cultivé	6.46	4.65	34.40	0.02
Donaye It2	I19	non cultivé	6.68	5.50	50.00	0.05
Nianga	N 18-10	non cultivé	6.40	.	437.00	0.03
Nianga	N 23-10	non cultivé	6.18	.	330.00	0.02
Nianga	N 32-15	non cultivé	6.99	.	23.00	0.06
Nianga	N 47-10	non cultivé	6.83	.	29.30	0.03
Nianga	N 58-10	non cultivé	6.38	.	61.50	0.02
Nianga	N 59-10	non cultivé	6.44	.	153.80	0.02
Nianga	N 63-10	non cultivé	6.90	.	20.40	0.03
Nianga	N 65-10	non cultivé	6.90	.	27.40	0.06
Nianga	N 73-10	non cultivé	6.88	.	54.60	0.16
Nianga	N 100-10	non cultivé	6.93	.	22.00	0.07
Nianga	N 106-20	non cultivé	6.40	.	28.50	0.02
Nianga	N 110-10	non cultivé	6.55	.	423.00	0.05
Nianga	N 112-10	non cultivé	6.52	.	68.40	0.02
Nianga	N 117-30	non cultivé	6.44	.	44.00	0.04
Nianga	N 128-10	non cultivé	6.74	.	279.00	0.07
Nianga	N 121-20	non cultivé	6.48	.	276.00	0.02
Nianga	N 144-10	non cultivé	6.38	.	203.00	0.02
Nianga	N 147-10	non cultivé	6.50	.	45.70	0.02
Nianga	N 166-20	non cultivé	6.71	.	50.80	0.03
Nianga	N 175-10	non cultivé	6.82	.	63.40	0.04
Nianga	N 191-10	non cultivé	6.89	.	43.30	0.04
Nianga	N 202-10	non cultivé	6.81	.	40.10	0.11
Nianga	N 232-10	non cultivé	6.40	.	151.10	0.03
Nianga	N 255-10	non cultivé	6.72	.	22.40	0.07
Nianga	NT 12-10	non cultivé	6.67	.	29.80	0.03
Nianga	NT 14-20	non cultivé	6.97	.	46.30	0.08
Nianga	NT 27-20	non cultivé	6.50	.	352.00	0.02
Nianga	NT 30-10	non cultivé	6.63	.	86.60	0.02
Nianga	NT 32-10	non cultivé	6.90	.	51.50	0.10
Nianga	NT 33-20	non cultivé	6.65	.	217.00	0.02
Nianga	NT 43-10	non cultivé	6.86	.	41.90	0.07
Nianga	NT 44-10	non cultivé	6.63	.	32.30	0.08
Nianga	NT 60-10	non cultivé	6.32	.	170.20	0.02
Nianga	NT 67-10	non cultivé	6.69	.	29.70	0.11
Nianga	NT 70-10	non cultivé	6.83	.	53.70	0.10

**Evolution du pH des bougies poreuses au cours du temps.**  
**Mesures effectuées sur l'eau des bougies poreuses du périmètre de Donaye IT1 à trois profondeurs.**  
25-11-94.



## Evaluation du bilan hydrique des parcelles

### Détail de calcul illustré avec l'échantillon No 25 de Donaye IT1

#### **Calcul du stock de carbonates présent dans les vingt premiers centimètres du profil.**

Hypothèse: Le stock de HCO<sub>3</sub>- est réparti uniformément sur les seuls 20 premiers centimètres du sol.

Donaye IT1 ech. No 27 : HCO<sub>3</sub>- = 0.09 [meq/l]

Sachant que cette concentration correspond à un extrait contenant 5g de sol pour 250ml d'eau déminéralisée, on peut calculer la quantité de HCO<sub>3</sub>- par gramme de sol:

$$\text{HCO}_3^- \text{ [meq/250ml]} = \text{HCO}_3^- \text{ [meq/l]} / 4 = \text{HCO}_3^- \text{ [meq/5g de sol]}$$

$$\text{HCO}_3^- \text{ [meq/1g de sol]} = \text{HCO}_3^- \text{ [meq/l]} / (4 * 5)$$

Densité du sol:  $\rho = 1.5 * 10^6 \text{ [g/m}^3\text{]}$

$$\text{HCO}_3^- \text{ [meq/m}^3\text{ de sol]} = \rho * \text{HCO}_3^- \text{ [meq/l]} / 20$$

Si on ne considère que le stock de HCO<sub>3</sub>- dans les 20 premiers cm:

$$\text{Stock de HCO}_3^- \text{ [meq/m}^2\text{]} = 0.2 * \rho * \text{HCO}_3^- \text{ [meq/l]} / 20$$

Pour Donaye IT1 No 27, le stock de HCO<sub>3</sub>- vaut 1350 [meq/m<sup>2</sup>]

#### **Quantité de HCO<sub>3</sub>- apportée par l'eau d'irrigation**

Hypothèse: Tous les carbonates apportés par l'eau d'irrigation s'accumulent dans les 20 premiers centimètres du profil.

La culture du riz nécessite entre 1.7 et 2.0 [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>] d'eau par campagne. Selon les résultats de l'analyse de l'eau du Doué (voir ci-dessous), celle-ci contient 0.45 [meq/l] de HCO<sub>3</sub>- . Chaque nouvelle campagne apporte donc 900 [meq/m<sup>2</sup>] de HCO<sub>3</sub>-.

#### ANALYSES D'EAU

DOSSIER N° :2370

AB :242208

DEMANDEUR :BOIVIN/ILOU

REF.Dossier:D52

	Référence échantillon	pH	EC mS20°C	Cl méq/l	SO <sub>4</sub> méq/l	HCO <sub>3</sub> méq/l	CO <sub>3</sub> mg/l	NO <sub>3</sub> mg/l	NO <sub>2</sub> mg/l	PO <sub>4</sub> mg/l	Ca méq/l	Mg méq/l	Na méq/l	K méq/l	Somme anions	Somme cations
1	D52	6.80	0.058	0.13	0.02	0.45	0.00	0.18	0.00	0.02	0.25	0.21	0.10	0.03	0.6	0.6

#### **Nombre de campagne théorique**

Le nombre de campagne théorique représente le nombre de campagne qu'il aurait suffi pour atteindre le stock de HCO<sub>3</sub>- calculé si les conditions des hypothèses énoncées ci-dessus étaient respectées.

Nb de campagne théorique = Stock de HCO<sub>3</sub>- [meq/m<sup>2</sup>] / 900 [meq/m<sup>2</sup>] de HCO<sub>3</sub>- apportés par l'eau d'irrigation.

En reprenant le cas de Donaye IT1 No 27, on trouve 1.5 campagnes.

## Evaluation du bilan hydrique des parcelles (résultats)

Périmètre	No	année	HCO3-[meq/l]	nb campagnes effectuées	nb de cycles nécess.	Rapport
Guia 5	1	1985	0.03	20	0.59	0.03
Guia 5	2	1985	0.05	20	0.98	0.05
Guia 5	3	1985	0.02	20	0.39	0.02
LD 1	7	1984	0.02	22	0.39	0.02
LD 1	8	1984	0.03	22	0.59	0.03
LD 2	9	1984	0.03	22	0.59	0.03
LD 2	10	1984	0.07	22	1.37	0.06
LD 2	11	1984	0.03	22	0.59	0.03
LD 2	12	1984	0.05	22	0.98	0.04
LD 3	19	1984	0.10	22	1.96	0.09
LD 3	20	1984	0.14	22	2.75	0.12
LD 3	21	1984	0.08	22	1.57	0.07
Donaye It1	25	1986	0.09	13.5	1.76	0.13
Donaye It1	26	1986	0.05	13.5	0.98	0.07
Donaye It1	27	1986	0.05	13.5	0.98	0.07
Donaye It1	28	1986	0.07	13.5	1.37	0.10
Donaye It1	29	1986	0.08	13.5	1.57	0.12
Donaye It1	30	1986	0.06	13.5	1.18	0.09
Beke-Weke	37	1990	0.03	8	0.59	0.07
Beke-Weke	38	1990	0.05	8	0.98	0.12
Donaye 1	41	1979	0.07	30	1.37	0.05
Donaye 1	42	1979	0.11	30	2.16	0.07
Donaye It2	43	1987	0.02	12	0.39	0.03
Donaye It2	44	1987	0.01	12	0.20	0.02
Guia 3	45	1984	0.08	22	1.57	0.07
Guia 3	46	1984	0.03	22	0.59	0.03
Guia 3	47	1984	0.04	22	0.78	0.04
Guia 3	48	1984	0.05	22	0.98	0.04
CP	49	1975	0.06	40	1.18	0.03
CP	50	1975	0.02	40	0.39	0.01
CP	51	1975	0.00	40	0.00	0.00
CP	52	1975	0.02	40	0.39	0.01
NDI	53	1975	0.02	40	0.39	0.01
NDI	54	1975	0.08	40	1.57	0.04
Doué 1	55	1986	0.08	18	1.57	0.09
Doué 1	56	1986	0.06	18	1.18	0.07
Doué 1	57	1986	0.08	18	1.57	0.09
Doué 1	58	1986	0.03	18	0.59	0.03
Doué 1	59	1986	0.02	18	0.39	0.02
Doué 2	63	1986	0.03	18	0.59	0.03
Doué 2	64	1986	0.02	18	0.39	0.02
Doué 2	65	1986	0.02	18	0.39	0.02
Doué 2	66	1986	0.11	18	2.16	0.12
Doué 2	67	1986	0.08	18	1.57	0.09
Doué 3	73	1987	0.07	16	1.37	0.09
Doué 3	74	1987	0.09	16	1.76	0.11
Doué 3	75	1987	0.03	16	0.59	0.04
Doué 3	76	1987	0.11	16	2.16	0.13
Doué 3	77	1987	0.05	16	0.98	0.06
Dekolé 1	93	1984	0.02	22	0.39	0.02
Dekolé 1	94	1984	0.09	22	1.76	0.08
Dekolé 1	95	1984	0.09	22	1.76	0.08
Dekolé 1	96	1984	0.03	22	0.59	0.03
Dekolé 1	97	1984	0.07	22	1.37	0.06

## Evaluation du bilan hydrique des parcelles (résultats)

Périmètre	No	année	HCO3- [meq/l]	nb campagnes effectuées	nb de cycles nécess.	Rapport
Dekolé 1	98	1984	0.05	22	0.98	0.04
Dekolé 1	99	1984	0.03	22	0.59	0.03
Diatar It1	100	1987	0.04	12	0.78	0.07
Diatar It1	101	1987	0.03	12	0.59	0.05
Diatar It1	102	1987	0.06	12	1.18	0.10
Diatar It1	103	1987	0.02	12	0.39	0.03
Diatar It1	104	1987	0.05	12	0.98	0.08
Diatar It2	110	1987	0.09	12	1.76	0.15
Diatar It2	111	1987	0.06	12	1.18	0.10
Diatar It2	112	1987	0.05	12	0.98	0.08
Diatar It2	113	1987	0.04	12	0.78	0.07
Diatar It2	114	1987	0.05	12	0.98	0.08
Donaye 1	120	1979	0.07	30	1.37	0.05
Donaye 1	121	1979	0.03	30	0.59	0.02
Donaye 1	122	1979	0.03	30	0.59	0.02
Guia 9	123	1984	0.04	22	0.78	0.04
Guia 9	124	1984	0.09	22	1.76	0.08
Guia 9	125	1984	0.04	22	0.78	0.04
Guia 9	126	1984	0.04	22	0.78	0.04
Guia 9	127	1984	0.04	22	0.78	0.04
Guia 9	128	1984	0.03	22	0.59	0.03
Guia 9	129	1984	0.09	22	1.76	0.08
Guia 9	130	1984	0.06	22	1.18	0.05
Guia 9	131	1984	0.05	22	0.98	0.04
CNRF	132	1974	0.03	42	0.59	0.01
CNRF	133	1974	0.02	42	0.39	0.01
CNRF	134	1974	0.01	42	0.20	0.00
CNRF	135	1974	0.00	42	0.00	0.00
CNRF	136	1974	0.02	42	0.39	0.01
Niandane	137	1974	0.01	42	0.20	0.00
Niandane	138	1974	0.02	42	0.39	0.01
Niandane	139	1974	0.03	42	0.59	0.01
Niandane	140	1974	0.02	42	0.39	0.01
Niandane	141	1974	0.03	42	0.59	0.01
N	142	1974	0.04	42	0.78	0.02
N	143	1974	0.03	42	0.59	0.01
N	144	1974	0.04	42	0.78	0.02
N	145	1974	0.02	42	0.39	0.01
N	146	1974	0.03	42	0.59	0.01
Ext	147	1989	0.01	12	0.20	0.02
Ext	148	1989	0.11	12	2.16	0.18
Ext	149	1989	0.01	12	0.20	0.02
Ext	150	1989	0.02	12	0.39	0.03
Ext	151	1989	0.02	12	0.39	0.03
PEN	152	1989	0.02	12	0.39	0.03
PEN	153	1989	0.03	12	0.59	0.05
PEN	154	1989	0.02	12	0.39	0.03
PEN	155	1989	0.01	12	0.20	0.02
PEN	156	1989	0.05	12	0.98	0.08
Guedé It1	157	1989	0.03	9	0.59	0.07
Guedé It1	158	1989	0.04	9	0.78	0.09
Guedé It1	159	1989	0.24	9	4.71	0.52
Guedé It1	160	1989	0.06	9	1.18	0.13
Guedé It1	161	1989	0.02	9	0.39	0.04
Guedé It2	162	1989	0.01	9	0.20	0.02

## Evaluation du bilan hydrique des parcelles (résultats)

Périmètre	No	année	HCO3-[meq/l]	nb campagnes effectuées	nb de cycles nécess.	Rapport
Guedé It2	163	1989	0.04	9	0.78	0.09
Guedé It2	164	1989	0.02	9	0.39	0.04
Guedé It2	165	1989	0.02	9	0.39	0.04
Guedé It2	166	1989	0.01	9	0.20	0.02
Betowe Ndiaye	1001	1991	0.05	16	0.98	0.06
Betowe Ndiaye	1002	1991	0.08	16	1.57	0.10
Betowe Ndiaye	1003	1991	0.05	16	0.98	0.06
Betowe Ndiaye	1004	1991	0.06	16	1.18	0.07
Betowe Ndiaye	1005	1991	0.01	16	0.20	0.01
Donaye It2	1006	1987	0.01	12	0.20	0.02
Donaye It2	1007	1987	0.02	12	0.39	0.03
Donaye It2	1008	1987	0.05	12	0.98	0.08
Donaye It2	1009	1987	0.06	12	1.18	0.10
Donaye It2	1010	1987	0.03	12	0.59	0.05
Donaye It2	1016	1987	0.03	12	0.59	0.05
Donaye It2	1017	1987	0.02	12	0.39	0.03