

APERÇU SUR L'ÉVOLUTION
HYDROCHIMIQUE DE QUELQUES AÇUDES
DU NORDESTE BRÉSILIEN SEMI-ARIDE

par

Alain LARAQUE

Convênio ORSTOM/SUDENE

RECIFE - BRÉSIL

Juin 1988.

SOMMAIRE

	page
I. <u>PRESENTATION SUCCINCTE DU NORDESTE BRESILIEU</u>	3
La partie semi-aride du Nordeste brésilien	
II. <u>PROBLEMATIQUE DE LA GESTION DES EAUX DES AÇUDES</u>	5
III. <u>PROBLEMATIQUE HYDROCHIMIQUE</u>	5
III.1 LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DES AÇUDES	6
III.1.1 <u>Organisation de l'étude</u>	6
III.1.2 <u>Méthodologies</u>	6
III.2 ETUDE D'UN EXEMPLE	10
III.3 LES AUTRES AÇUDES ETUDIES	11
III.3.1 <u>Les projets pilotes d'irrigation</u>	11
III.3.2 <u>Les açudes salés</u>	12
III.4 PREMIERES CONSTATATIONS SUR L'HYDROCHIMIE DES AÇUDES ETUDIES	14
III.5 L'UTILISATION DE L'EAU EN IRRIGATION -CONSEILS DE GESTION	15
III.5.1 <u>Pour les açudes existants</u>	15
III.5.2 <u>Pour le dimensionnement des nouveaux açudes</u>	15
IV. <u>PERSPECTIVES D'ETUDE</u>	16
CONCLUSION	17
BIBLIOGRAPHIE	18
FIGURES ET TABLEAUX	19

RESUME

L'intérieur du Nordeste brésilien, soumis à un climat semi-aride présente plus de 60.000 petites retenues collinaires nommées "açudes" construites pour pallier la sécheresse. Ces réservoirs restent sous-utilisés.

Un programme de recherche, mené dans le cadre de la convention ORSTOM/SUDENE, vise à partir d'un modèle de simulation du fonctionnement de l'ensemble Bassin Versant, açude et périmètre irrigué (modèle POMAC), d'améliorer la gestion de l'eau des açudes par la pratique des cultures d'irrigation.

Une des préoccupations est d'éviter la salinisation des eaux constatée au fil des ans dans ces milieux "fermés" soumis à une évaporation intense durant la saison sèche.

Depuis 1987, un suivi de l'évolution mensuelle des paramètres physico-chimiques des eaux d'une dizaine d'açudes met en évidence durant l'été:

- une évolution des eaux dans la voie saline neutre;
- un risque de sodium faible par rapport au risque de salinisation;
- des facteurs de concentration variant suivant les açudes étudiés de 3 à 10.

Des premiers conseils de gestion sont proposés pour préserver la qualité des eaux retenues, ainsi que des perspectives d'étude visant à la modélisation du processus évaporitique.

INTRODUCTION

Le Nordeste brésilien semi-aride possède plusieurs milliers de petites retenues collinaires: "les açudes".

Face au peu d'études réalisées sur la qualité des eaux des açudes, à l'importance de ces derniers pour la mise en valeur des terres par l'irrigation, et à la volonté de plus en plus affirmée de vouloir développer cette région, il devenait urgent de se pencher sur cette question pour tenter de contrôler les risques de salinisation future des retenues et des zones irriguées.

Une dizaine de projets pilotes de petite irrigation à partir d'açudes, suivis depuis 1987 par la SUDENE*, l'ORSTOM* et la Coopération Française, a servi de point de départ à notre travail.

Il s'agit en étudiant à la fois les bassins d'alimentation et les retenues:

- de tenter de comprendre le fonctionnement de ces systèmes et de décrire l'évolution hydrochimique des açudes en particulier durant la saison sèche,
- de proposer des premiers conseils de gestion des eaux pour éviter leur dégradation qualitative,
- de présenter des perspectives de travail visant à prévenir les risques de salinisation.

I. PRESENTATION SUCCINCTE DU NORDESTE BRÉSILIEN (fig. 1)

La région "Nord-Est" du Brésil couvre 1.660.000 km² soit 20% du territoire brésilien et se répartit dans 9 Etats. Ce Nordeste est divisé en trois grandes zones climatiques.

La moyenne pluviométrique annuelle varie pour:

- La zone côtière ou "zona da mata" entre 1.500 et 2.000 mm.
- L'Agreste ou zone intermédiaire de collines entre 800 et 1.200 mm.
- Le Sertão, entre 400 et 800 mm, constitue la partie semi-aride du Nordeste et fait partie du "Polygone des sécheresses".

C'est sur cette région souffrant de sécheresses périodiques que portera notre étude.

LE NORDESTE BRÉSILIEN SEMI-ARIDE

Géographie:

Cette région de 950.000 km² se situe entre les parallèles 3°S et 15°S et les méridiens 36°W et 44°W.

Géologie et géomorphologie:

Il s'agit d'une alternance de petites chaînes et de plaines situées

* SUDENE = Superintendance du développement du Nordeste (organisme brésilien).

* ORSTOM = Institut français de recherche scientifique pour le développement en

entre 200 et 1.000 mètres d'altitude.

Plus de la moitié du Nordeste est constitué^e de roches cristallines (à dominance granitique) plus ou moins métamorphisées, du socle précambien. Ces zones peu perméables favorisent l'écoulement de surface, et c'est par conséquent sur celles-ci qu'est située la majeure partie des açudes.

Le reste du Nordeste est composé de formations sédimentaires du phanérozoïque, plus perméables, souvent exploitées sur le plan hydrogéologique.

Pédologie:

En règle générale les zones sédimentaires sont recouvertes de sols profonds et perméables riches en kaolinite, alors que le cristallin possède des sols peu profonds et peu perméables favorables à la construction d'açudes.

Ces derniers regroupent surtout les sols suivants: Latossols, Lithologiques, Podzoliques, Bruns non calciques et Planossols. Les Podzoliques et Planossols - mais surtout les Latossols - sont plus profonds et plus perméables.

Hydrologie:

Il n'existe que quelques rares grands fleuves (le São Francisco...) le long desquels se développent de vastes périmètres d'irrigation.

Végétation:

La végétation qui couvre le Sertão est du type xérophile (la caatinga) et est constituée d'une steppe arbustive dense et de cactées.

Climat: (fig. 2)

Une très grande irrégularité dans la distribution des pluies à l'échelle interannuelle et saisonnière, ainsi que dans leur répartition spatiale caractérise cette région.

Les pluies sont en général courtes, fortes et très localisées.

La moyenne pluviométrique annuelle varie entre 400 et 800 mm dont plus de 80 à 90% tombent durant la saison humide qui s'étale de Décembre-Janvier à Mai-Juin. La saison sèche dure donc de Mai-Juin à Décembre-Janvier.

Economie - Population

Plus de 20 millions de personnes vivent dans cette région à tradition pastorale, où l'élevage extensif de bovins prédomine.

La production agricole très faible et à bas rendement concerne surtout le maïs, le feijão (haricot du Nordeste), le coton, le riz, le manioc.

Les périodes sèches provoquent de grands préjudices sociaux et économiques à la nation, entraînant un fort exode rural.

Pour mieux résister aux sécheresses, l'homme a construit depuis le début du siècle des milliers de petites retenues collinaires (plus de 60.000) pour emmagasiner les eaux de ruissellement, pour l'alimentation du bétail et les besoins domestiques.

Ces réservoirs sont sous-utilisés, et la majeure partie de l'eau stockée, se perd par évaporation.

II. PROBLEMATIQUE DE LA GESTION DES EAUX DES AÇUDES

- Une irrigation peu coûteuse, peut être réalisée en aval de la digue, sur des périmètres allant de 1 à plus de 10 hectares, par l'intermédiaire d'un siphon.

A cette fin il faut connaître les volumes d'eau disponibles à chaque instant et savoir les calculer.

- Une formule arithmétique simple $V = K \times H^\alpha$ (Molle, 1985) permet de calculer avec une bonne précision, ces volumes à partir du niveau réel (H) de l'eau dans la retenue, obtenu d'après les lectures des échelles limnimétriques, et de deux coefficients caractéristiques de sa géométrie:

- . K, le coefficient d'ouverture à en général des valeurs situées entre 100 (açudes profonds et à faible miroir) et 10.000 (açudes peu profonds et à grande surface),

- . α , le coefficient de forme est inférieur à 3 pour des bordures concaves et supérieur à 3 pour des bordures convexes et varie habituellement entre 1,8 et 3,8.

- Les açudes étudiés ont en général des volumes variant entre 10.000 et 1.000.000 m³ pour des profondeurs allant de 2 à 10 mètres.
- Afin d'adopter une politique d'irrigation, la plus adéquate à une bonne gestion de l'açude, le modèle POMAC (Cadier, Molle, 1987) a été mis au point.

Ce modèle détermine entre autre, les doses d'irrigation et les surfaces à planter en fonction des besoins en eau des cultures, des réserves en eau de la retenue et du sol du périmètre, ainsi que des prévisions sur les pluies et les écoulements sur les bassins versants.

Ce modèle ne prend pas en compte la donnée "qualité" des eaux utilisées.

III. PROBLEMATIQUE HYDROCHIMIQUE

L'eau d'irrigation apporte aux périmètres irrigués, des sels dissous (fig. 4). Selon sa concentration en sels et les caractéristiques des sols des périmètres, des risques de salinisation sont à craindre.

Ils peuvent provoquer:

- une chute du rendement des cultures irriguées par élévation de la pression osmotique, ou par effet toxique de certains ions sur les tissus végétaux;
- une baisse de perméabilité des sols par défloculation des argiles à partir d'un certain taux de saturation de sodium échangeable.

Les périmètres affectés par ce second processus de sodification sont souvent irrécupérables.

Dans le Nordeste, l'alternance saison humide-saison sèche induit une succession des phénomènes de dilution et concentration en sels des eaux des açudes. C'est pendant la saison sèche, quand la concentration en sels dissous augmente que le besoin en eau d'irrigation est le plus pressant, mais que la réserve en eau est moindre et la salinité plus élevée.

Les problèmes de salinisation des périmètres irrigués sont essentiellement dus à la qualité des eaux utilisées. En conséquence, cette étude portera sur cette qualité et ses variations au cours de l'année.

III.1 LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DES AÇUDES

III.1.1 Organisation de l'étude

Celle-ci porte sur une vingtaine d'açudes situés dans un rayon de 200 à 1.500 kms de Récife (fig. 3) que l'on peut regrouper comme suit:

Catégories	Nombre d'açudes	Localisation par Etat (*)	Début des prélèvements
Projets pilotes d'irrigation	9	PE, PB, RN	Février 87
Açudes salinisés	4	PE	Août 87
Açudes des BVR (SUDENE/ORSTOM)	9	PB	Février 88

Actuellement seuls les açudes des projets pilotes d'irrigation possèdent des données sur un cycle hydrologique complet et feront l'objet de cette synthèse.

Nous y joindrons les premières informations obtenues sur les açudes salés.

III.1.2 Méthodologies

Chaque açude étudié est équipé de:

- 1 jeu d'échelles limnimétriques
- 1 pluviomètre ou pluviographe
- 1 hydromètre (en cours d'installation sur les projets pilotes).

Les travaux suivants ont été ou sont en cours de réalisation:

- . Bathymétrie des açudes, ou relevé topographique d'un miroir d'eau, permettant dans ce cas d'avoir des valeurs approchées de α et K induisant une erreur sur le calcul du volume peuvent atteindre 20%.
- . Etablissement d'une carte pédologique du bassin versant à petite échelle (1/20.000).
- . Echantillonnage des roches et sols du bassin versant pour détermination. Il est prévu sur ces sols, une analyse physico-chimique et une "attaque ménagée" avec HCl; celle-ci doit mettre en évidence les bases libérables et donner ainsi une idée relative du degré d'altération d'un sol par rapport à un autre.
- . Analyse aux rayons X des sels et argiles des sédiments prélevés dans les açudes asséchés.
- . Une enquête de terrain dans le but de mieux cerner l'importance des dif-

(*) Les Etats : PE = Pernambuco, PB = Paraíba, RN = Rio Grande do Norte.

férents facteurs agissant sur la qualité des eaux, et avoir une idée, subjective bien entendu, de l'évolution qualitative des eaux depuis la construction des açudes.

Depuis début 87, plus de 300 échantillons d'eau ont été analysés.

Les analyses physico-chimiques des eaux sont réalisées par le laboratoire de la SUDENE, environ un mois après le prélèvement.

Les dosages chimiques se font comme suit:

Les anions:

SO_4^{--} par turbimétrie du BaSO_4 (dosage volumétrique).

Cl^- par précipitation par l'intermédiaire de nitrate d'argent (dosage volumétrique).

HCO_3^- , CO_3^{--} titrage avec H_2SO_4 au virage de la phénolptaleine et du méthylorange.

Les cations:

Ca^{++} , Mg^{++} , par complexation avec EDTA.

Na^+ , K^+ , par photométrie de flamme.

- La précision des analyses vérifiée sur le bilan ionique est au moins de 5%.

- A partir d'octobre 87 des mesures in situ de conductivité et pH ont débuté.

. Calcul de l'état de saturation de la solution par rapport à un minéral, cas de la calcite CaCO_3

Cet état se vérifie en comparant le produit des activités

$QC = |\text{Ca}^{++}| \times |\text{CO}_3^{--}|$, au produit de solubilité de la calcite soit:

$$K_s = \frac{|\text{Ca}^{++}| |\text{CO}_3^{--}|}{|\text{CaCO}_3|} = 4,266 \cdot 10^{-9} \text{ à } 25^\circ\text{C} \text{ (HEGELSON, 1969) à l'équilibre, avec } |\text{CaCO}_3| = 1$$

K_s est une constante thermodynamique qui dépend de la température et de la pression.

si $QC = K_s$ la solution est en équilibre avec la calcite

si $QC > K_s$ la solution est sursaturée, le minéral va précipiter

si $QC < K_s$ la solution est sous-saturée, le minéral peut se dissoudre.

Le problème revient à calculer les activités $|\text{Ca}^{++}|$ et $|\text{CO}_3^{--}|$.

Les résultats d'analyse chimique donnés par le laboratoire représentent les concentrations totales de chaque élément, c'est à dire la somme des diverses formes, libres ou complexes, de l'élément.

Ainsi pour le calcium on a :

$$(\text{Ca}) \text{ total} = \underbrace{(\text{Ca}^{++})}_{\text{ion libre}} + \underbrace{(\text{CaHCO}_3^+) + (\text{CaCO}_3^0) + (\text{CaSO}_4^0) + \dots}_{\text{espèces complexes}}$$

les parenthèses désignent les molalités des différentes espèces.

Or, ce sont les quantités d'ions libres qui régissent les équilibres entre phase solide et phase liquide.

On sait que l'activité (a) et la molalité (m) d'une espèce est liée par la relation.

$$a = \gamma_a m$$

avec γ_a coefficient d'activité de l'espèce, calculé par la loi de DEBYE-HUCKEL. Dans cette expression apparaît la force ionique I de la solution étudiée,

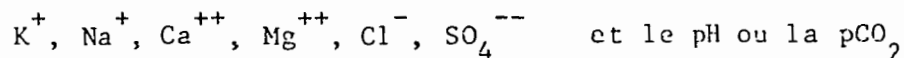
$$\text{où } I = \frac{1}{2} \sum m_i \cdot Z_i^2$$

m_i et Z_i = molalités et valences de toutes les espèces chargées.

Ces molalités m_i ne sont déterminées qu'à la suite du calcul de la distribution des espèces totales en paires d'ions et ions libres. Mais le calcul de cette distribution suppose connu les coefficients d'activité.

Ce calcul apparemment insoluble peut se résoudre par itérations convergentes à partir d'une valeur de départ arbitraire de la force ionique. C'est ce qui est réalisé par le programme ACTIVE de M. Rieu (1984) que nous utilisons. Pour une description détaillée du programme, des algorithmes utilisés se référer à Rieu (1987). Ce programme fonctionne pour des forces ioniques inférieures à 0,1 et reconstitue assez fidèlement les concentrations des principales espèces chimiques.

Les données d'entrées sont les concentrations totales délivrées par le laboratoire de :



Ne disposant pas de séries complètes de pH in situ, nous avons pris systématiquement la $pCO_2 = 10^{-3,5}$, c'est à dire la moyenne atmosphérique mondiale. Cette hypothèse de départ considère que la pCO_2 dissous de l'açude se rééquilibre constamment avec la pCO_2 atmosphérique. L'action du vent doit jouer dans ce sens. Nous supposons donc que nous sommes en système ouvert.

Calcul du Facteur de concentration

Ce calcul s'effectue durant la saison sèche quand la concentration des éléments chimiques dissous dans l'açude est due à l'évaporation. Nous utiliserons le sodium, élément conservatif, très soluble et s'appariant rarement, comme traceur de l'évolution de la salinité.

Nous avons $FC_{Na} = \frac{Na_i}{Na_D}$ (facteur de concentration calculé sur le sodium)

avec Na_i = molalité au temps i, pendant la saison sèche

Na_D = molalité de départ, soit la concentration en sodium, la plus faible de l'année, correspondant au plus haut niveau de l'açude à la fin de la saison des pluies.

théoriquement $FC_{Na} = \frac{Na_i}{Na_D} = \frac{V_D}{V_i} = FC_{vol}$ (1)

avec V_D = volume de l'açude de départ, de concentration en sodium Na_D

V_i = volume de l'açude à l'instant i de concentration en sodium Na_i

et FC_{vol} = facteur de concentration calculé sur l'évolution des volumes.

Or on a : $V_D - V_i = V_{pi} = V_{EVP_i} + V_{IRR_i} + V_{INF_i}$
 pertes totales en = évaporation + irrigation + infiltration au
 eau de l'açude fond de l'açude

Si nous n'avions que des pertes par évaporation, l'égalité (1) serait vérifiée, mais comme $V_{pi} > V_{EVP_i}$ on aura $FC_{vol} = \frac{V_D}{V_d - V_{pi}} > FC_{Na}$

Corrélation entre l'ETP et EVPb (évaporation du bac A du Weather Bureau)

Plusieurs auteurs ont établi pour le Nordeste un coefficient

$$K_e = \frac{ETP}{EVPb} \text{ compris entre } 0,5 \text{ et } 0,8.$$

Aussi face aux incertitudes liées aux estimations des volumes évaporés, et devant la méconnaissance des volumes d'irrigation et d'infiltration, nous garderons à l'esprit que FC_{Na} intègre les pertes salines dues aux eaux d'irrigation et d'infiltration.

Par conséquent FC_{Na} sera inférieur à ce qu'il aurait dû être, si les pertes en eau de l'açude n'étaient dues qu'à l'évaporation.

Nous prendrons comme exemple d'étude, l'açude P4, dont l'évolution hydrochimique est bien marquée (tableau 1).

III.2 ETUDE D'UN EXEMPLE

Les caractéristiques générales de l'açude P.4 et de son bassin versant sont résumées dans le tableau 1, et les caractéristiques physico-chimiques de son eau sont regroupées dans les tableaux n° 2a et 2b.

Au cours de l'année hydrologique (1987-88) et par conséquent sous l'influence des facteurs climatiques (pluies et ETP) nous constatons grâce aux figures 5, 6* et 7:

- 1) Une augmentation du volume d'eau de l'açude (calculé à partir du niveau de l'açude lu sur les échelles limnimétriques) jusqu'en avril 87 (saison des pluies), suivi d'une dilution des espèces chimiques dissoutes.
- 2) En mai s'amorce une concentration évaporitique simple des espèces dissoutes, accompagnée d'une augmentation de la conductivité électrique, du SAR et de l'alcalinité.
- 3) Ce phénomène est interrompu en juin par une pluie isolée, entraînant une dilution, puis reprend jusqu'en mars 88 quand reviennent les pluies.

* Nous constatons que l'année 87-88, a été marquée par l'étendue de la saison sèche (de mai-juin à février-mars 88), et par la faiblesse des précipitations avec un total pluviométrique de 367 mm.

Le facteur de concentration (FC_{Na}) a atteint 7,8 en mars 88.

L'écart entre FC_{vol} et FC_{Na} (tableau 2a) peut être du aux erreurs d'estimation du volume de l'açude, provenant de coefficients α et K approchés (ceux-ci ont été obtenus qu'à partir du relevé de deux miroirs d'eau).

D'autres phénomènes difficilement mesurables doivent entrer en compte tel que des apports souterrains plus chargés en sels, (on a d'abord $FC_{vol} < FC_{Na}$).

On remarque ensuite que $FC_{Na} < FC_{vol}$; une partie du sodium dissous doit alors être entraîné avec les infiltrations et/ou piégé dans les sédiments.

La figure 8 montre durant la saison sèche (juin-février, mars) une augmentation régulière des concentrations en Na, Cl et K. Ces éléments n'interviennent pas dans des précipitations.

En début août, on observe une diminution des concentrations en HCO_3 et Ca. C'est cependant à partir de septembre (pour $FC = 2,63$), que Ca amorce une baisse continue, alors que Mg, malgré une chute le même mois, commence à diminuer régulièrement à partir de décembre.

A partir de $FC = 2,63$ (en septembre) l'alcalinité et les teneurs en HCO_3 sont en hausse, avec une augmentation moins prononcée en fin de saison sèche. Le pH diminue légèrement vers la neutralité.

Pour les mêmes époques, la figure 9, confirme par la brusque augmentation du rapport molal Na/Ca et Na/Mg, une diminution des teneurs en Ca et Mg dissous.

Les rapports Mg/Ca et Cl/ HCO_3 , s'élevant lentement indiquent une consommation du Ca légèrement plus forte que celle du Mg, ainsi qu'une faible consommation de bicarbonates.

Nous sommes ici en système ouvert; le système est en équilibre avec une réserve infinie de gaz carbonique à pression partielle constante.

* Les concentrations en SO_4 négligeables et très irrégulières, n'ont pas été reportées sur le graphique.

La force ionique de l'eau évolue de $2,4 \cdot 10^{-3}$ à $1,1 \cdot 10^{-2}$.

L'alcalinité positive augmente avec l'évaporation.

Le diagramme d'équilibre de la calcite (fig. 10) indique pour des $FC > 1,40$ (à partir de juin-juillet) des eaux sursaturées par rapport à la calcite.

Celles-ci évoluent dans un domaine de sursaturation compris entre la droite d'équilibre KS correspondant à la solubilité de la calcite à 25°C, ($KS = 4,266 \cdot 10^{-9} = 10^{-8,37}$ - HEGELSON, 1969) et la droite $KS \times 8$ correspondant à une solubilité 8 fois supérieure, où la calcite commence à précipiter.

Enfin, les diagrammes de Piper (fig. 11) montrent des eaux plutôt alcalines très pauvres en sulfates évoluant en fin de saison sèche vers un faciès chloruré sodique, par diminution relative des teneurs en Ca, Mg et des carbonates.

Nous sommes ici plutôt en voie saline neutre.

Ce qui est en accord avec une baisse légère du pH vers la neutralité à partir de novembre.

Pour conclure, dans le diagramme de Riverside les eaux passent de la classe C1 S1 à C3 S1, c'est à dire à faible risque alcalinisant, mais à fort risque de salinisation (fig. 14).

15

Du point de vue pratique: Outre un drainage du périmètre irrigué, une augmentation des doses d'irrigation en saison sèche est nécessaire. Des cultures résistantes aux sels sont conseillées.

III.3 LES AUTRES AÇUDES ETUDIÉS

III.3.1 Les projets pilotes d'irrigation

Il s'agit des açudes: P2, P6, P8, P12, P14, P16, P17. (Tableaux 1 et 3).

Ces açudes ont des facteurs de concentration calculés sur le sodium allant de 3,2 à 8,2 en fin de saison sèche.

Les eaux commencent à se concentrer entre février et mai et FC est maximum entre décembre 87 et mars 88 suivant les açudes.

Les conductivités électriques évoluent dans les plages 75-100 μS à 500-1.000 μS -25°C. Le rapport des conductivités extrêmes sur l'année peut atteindre 5,5.

Les SAR restent faibles 0,19 à 5,5. Le rapport des SAR extrêmes avoisine 6.

Les températures de l'eau varient entre 24 et 31°C.

Les pH légèrement basiques 7 à 8, s'acidifient en fin de saison sèche et peuvent descendre jusqu'à 4,2 (cas du P14).

Les diagrammes de Piper (fig. 12) montrent tous des eaux très pauvres en sulfates, à faciès plutôt alcalin, bicarbonaté, chloruré.

Lors de l'évaporation, l'évolution dominante est dans la voie saline neutre.

Des précipitations de calcite parfois magnésiennes, d'argiles magnésiennes et quelquefois de gypse et de halite peuvent avoir lieu.

14

Deux exceptions sont à noter (fig. 13):

- Le projet 12 qui évolue dans une voie plus bicarbonatée alcaline en fin de saison sèche.
- Le projet 14 a un faciès fortement carbonaté, calcique, déficitaire en SO_4 et Cl, qui n'évolue pratiquement pas.

Les diagrammes d'équilibre de la calcite font état de solutions sursaturées, correspondant à des solubilités du carbonate de calcium pouvant être 10 fois supérieures (fig. 14) sans qu'il y ait obligatoirement de précipitation.

12

Ceci est en accord avec des observations faites sur d'autres milieux lacustres (exemple le lac Tchad étudié par Carmouze 1976) où les précipitations de calcite ne débutent que lorsque les eaux sont fortement sursaturées, avec des solubilités du carbonate de calcium 15 à 20 fois supérieures.

Carmouze emprunte à Roques (1964) et Girou et Roques (1971) les considérations théoriques sur le processus de précipitation. Celui-ci débute par une phase de germination à partir d'un certain dépassement de la solubilité limite, du sel considéré. La période au bout de laquelle se forme le germe est d'autant plus grande que le degré de dépassement est faible.

On est alors dans un domaine instable.

Les diagrammes de Riverside montrent que les eaux restent circonscrites dans la classe S1 qui correspond à un faible risque alcalinisant (fig. 15). Par contre, elles évoluent de la classe C1 à C2 (C3 pour le P4) et présentent un certain risque de salinisation en fin de saison sèche.

Seul le projet 14 conserve des eaux dans la classe C1 S1.

Bien entendu, on ne doit pas oublier que cette salinisation des eaux aura des répercussions plus ou moins néfastes en fonction des caractéristiques des sols irrigués et de la résistance aux sels des cultures qui s'y développent.

III.3.2 Les aqudes salés

En saison sèche, ces aqudes tranchent dans le paysage par leurs dépôts évaporitiques blanchâtres de bordure.

Tout naturellement, on s'est interrogé sur leurs caractéristiques hydrochimiques pour tenter de comprendre les causes de leur état actuel.

Le peu de données de terrain actuellement disponibles, août 87-janvier 88 (tableau 1 et 3) permettent néanmoins de dégager quelques particularités de ces milieux.

- Les conductivités électriques et les SAR sont très élevés atteignant respectivement en fin de saison sèche les valeurs de 45.000 μS à 25°C et 25 pour P.68.

Ces eaux sont totalement inutilisables en irrigation (classe C5-6 S₄ du diagramme de Riverside).

Le tableau 4 représente les pourcentages ioniques de chaque aqude.

en général: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{--} > \text{HCO}_3^-$ (en meq/l).

Les sulfates et carbonates diminuent alors que le chlore augmente avec l'avancement de la saison.

Ces eaux sont alcalines: $\text{Na} + \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca}$ sauf pour P52 où Mg domine.

Les analyses aux rayons X, des efflorescences salines prélevées sur les bords des açudes signalent la présence des principaux sels suivants: gypse + calcite (P52), gypse + halite (P72), gypse (P74).

Pédologie des bassins versants

Les projets P68, P72 et P74 ont en commun des planossols. Le P52 a une pédologie homogène à base de sols podzoliques. Ce sont des sols déjà moyennement profonds pour la région (≥ 70 cm), perméables en surface avec une limitation du drainage à moins d'un mètre de profondeur.

- Ceci provoque une infiltration et un écoulement hypodermique plus lent. Par conséquent ce dernier s'enrichit en sels dissous par une durée de contact eau-sol plus grande.

Les bassins versants sont à faible relief et très étendus.

Géométrie des açudes

Ils sont peu profonds (2 à 3 mètres) sauf pour P74 (5,5 mètres) et très étendus, avec des rapports $V_{\text{max}}/S_{\text{max}}$ faibles (1 à 1,25) excepté pour P74 (1,96).

- L'enquête sur leur histoire montre que ces açudes de plus de 10 ans avaient à l'origine une eau de bonne qualité, qui était largement utilisée pour les besoins domestiques et par le bétail.

Au bout de 3 ans (P72), 15 ans (P68) et 40 ans (P74), les eaux sont devenues insalubres et ont cessées d'être utilisées.

Il est à signaler que P68 et P72 ont à leur amont sur leur bassin versant des açudes plus jeunes avec des eaux de meilleure qualité. Les mesures de conductivité électriques suivantes illustrent ces différences.

1e 10/03/88	$\left\{ \begin{array}{l} 2.800 \mu\text{S} \text{ à } 25^\circ\text{C} \\ 145 \mu\text{S} \text{ à } 25^\circ\text{C} \end{array} \right.$	pour 68	732
		pour l'açude amont âgé de 5 ans.	
1e 09/06/88	$\left\{ \begin{array}{l} 813 \mu\text{S} \text{ à } 25^\circ\text{C} \\ 142 \mu\text{S} \text{ à } 25^\circ\text{C} \end{array} \right.$	pour P72	113
		pour l'açude amont construit en 1987.	

Autres caractéristiques :

Présence de stratification verticale des eaux

Pour les açudes peu profonds P52, P68, P72, la conductivité électrique prise au fond de l'açude est légèrement supérieure à celle prise en surface.

Par contre pour P74 (profondeur > 5 m), elle est deux fois plus forte passant de 7.000 à 14.000 μS à 25°C (1e 01/06/88), sans qu'ait été

Dimensionnement de la retenue : d'après les témoignages pris sur place, ces açudes déversent peu en saison humide et seraient surdimensionnés.

Sédiments : pour ces 4 açudes, ils sont profonds (plus de 50 cm) argileux et riches en matière organique.

III.4 PREMIERES CONSTATATIONS SUR L'HYDROCHIMIE DES AÇUDES ETUDIÉS

Cette étude met en évidence la complexité des phénomènes agissant sur la qualité des eaux des açudes.

- La nature du substrat géologique et des sols qui en dérivent est à l'origine des espèces chimiques mises en solution.
- Les caractéristiques physiques de ces sols: profondeur, degré d'infiltration, de saturation, joueront sur le type d'écoulement (superficiel ou profond), et par conséquent sur l'enrichissement des eaux en sels.

Dans notre échantillonnage d'açude, ce sont les planossols sodiques et les sols podzoliques eutrophes qui salinisent le plus les eaux. Ces résultats sont en accord avec la classification des sols du Nordeste établie par Leprun (1983) en fonction de leur risque décroissant de salinisation des eaux.

- L'enrichissement des eaux en sels dissous, sera également conditionné par des caractères géomorphologiques plus globaux (relief, taille du bassin versant, végétation...).
- Une fois arrivée^s dans l'açude, les eaux se concentrent par évaporation, d'autant plus rapidement que ces derniers sont peu profonds et à géométrie aplanie.
- Plusieurs tentatives de corrélation ont été faites entre les facteurs de concentration et divers paramètres géométriques de l'açude (α , K, surface max/profondeur max,...) sans toutefois obtenir de résultats probants.

Cet échantillon d'açude est trop réduit pour permettre une telle approche statistique. Seul le rapport volume max/surface max paraît correspondre, quand il est faible, à un facteur de concentration plus élevé en saison sèche.

- Certains açudes anciens sont plus salinisés que des açudes plus "jeunes" situés sur des sols identiques dans le même bassin. On constate ainsi l'intervention plus ou moins conjointe du temps et du dimensionnement du déversoir.

Lorsque ce dernier est surdimensionné, une accumulation pluriannuelle de sels a lieu dans la retenue.

Un piégeage de "sels" par les argiles des sédiments devrait alors se réaliser.

III.5 L'UTILISATION DE L'EAU EN IRRIGATION - CONSEILS DE GESTION

III.5.1 Pour les açudes existants

L'usage de l'eau en irrigation doit être pratiqué dès le début de la saison sèche, ceci pour plusieurs raisons:

- éviter les pertes importantes dues à l'évaporation et valoriser ainsi la réserve liquide disponible;
- diminuer les risques de salinisation des açudes, par l'évacuation vers l'aval de certaines quantités de sels dissous avec les volumes utilisés;
- irriguer des périmètres plus grands.

En effet, la fraction lessivante est une fonction croissante de la salinité, et elle est d'autant plus réduite que les concentrations salines dans les eaux d'irrigation sont plus faibles, c'est à dire juste après la saison des pluies. On dispose alors d'un volume d'eau plus important pour satisfaire les seuls besoins des cultures.

III.5.2 Pour le dimensionnement des nouveaux açudes

En règle générale pour diminuer les risques de salinisation des açudes, il est conseillé de:

- éviter de surdimensionner les nouvelles retenues;
- sous-dimensionner l'évacuateur de crue pour obtenir un renouvellement plus important des eaux dans le cas d'açudes peu profonds et très étendus et surtout, en présence de planossols sodiques et de sols podzoliques eutrophes.

IV - PERSPECTIVES D'ETUDE

A court terme:

- Un plus grand échantillon d'açudes ou une étude fine de quelques cas représentatifs devrait permettre d'isoler le ou les facteurs prépondérants agissant sur la qualité des eaux.
- Nous avons vu qu'en fonction du facteur de concentration, les concentrations en éléments dissous n'augmentent pas de manière identique.

A partir de certains seuils, les teneurs en Ca et Mg diminuent par précipitation sous forme de carbonates.

Ces précipitations entraînent une augmentation du SAR.

Il est alors intéressant de prévoir l'époque de précipitation de ces sels, pour calculer un SAR plus proche de la réalité et ne pas risquer de sous estimer les doses de lessivage en irrigation.

L'usage de modèles thermodynamiques organisant les précipitations des principaux sels (calcite et gypse) apparaît être une possibilité prometteuse.

Un effort est actuellement mené dans ce sens par la mise au point du modèle SIMSAL (FORTRAN) à partir des modèles ACTIVE et SIMUL de Rieu (1983).

Il faudrait cependant tenir compte des cinétiques chimiques pour reproduire les effets de sursaturation qui apparaissent couramment dans les eaux étudiées.

- Un intérêt pratique pour orienter les politiques d'irrigation vise notamment à constituer des abaques permettant d'évaluer la salinité résultante d'un açude à fin de la saison sèche, à partir d'une conductivité de départ (celle de la fin de la saison des pluies) et des paramètres concernant la morphologie de l'açude et sa sensibilité à l'évaporation.

A plus long terme:

Des études menées dans le but de mieux cerner la réponse à l'écoulement d'un bassin versant, et sa réponse à l'enrichissement en sels dissous devraient constituer un apport considérable pour améliorer le dimensionnement des açudes en les préservant des risques de salinisation.

On pourrait alors imaginer un système d'abaques permettant de déduire la qualité des eaux d'écoulement à partir des types de sols traversés, de la configuration du bassin et de sa fonction d'écoulement.

Un travail tripartite (hydrologues, pédologues, hydrochimistes) est alors à envisager.

CONCLUSION

Les premières informations provenant de cette étude préliminaire sur la qualité des eaux des açudes montrent que:

- Ces petites retenues ont toutes des particularismes bien marqués et l'étude de l'évolution hydrochimique de leurs eaux s'avère complexe en regard des nombreux facteurs qui agissent sur celle-ci ou qui en sont à l'origine : géomorphologie et pédologie du bassin versant, âge et forme de la retenue, dimensionnement du déversoir, rôle des sédiments, du climat, etc.
- A l'alternance des saisons sèches et humides correspond une succession de phénomènes de concentration-précipitation de sels et de dissolution-dilution. En saison sèche les eaux restent dans des domaines de sursaturation par rapport à la calcite, qui peut alors précipiter. Le gypse et dans des cas extrêmes, des sels de sodium (NaCl,..) ont été reconnus dans les dépôts évaporitiques.
- Durant la saison sèche, l'évaporation des eaux se traduit surtout par une augmentation de la salinité qui aura pour conséquence une baisse des rendements culturaux par augmentation de la pression osmotique.
- Les évolutions hydrochimiques dans la voie saline neutre ne provoquent cependant pas de risques d'alcalinisation importante.
- Un usage immédiat des eaux après la saison des pluies est à préconiser pour éviter ces problèmes.

Dans tous les cas un drainage des périmètres irrigués est indispensable.

BIBLIOGRAPHIE

- BERNARDINO, J. de C.; MILLO, J.L. (1984). Dados climatológicos básicos do Nordeste. MINTER. SUDENE, Recife. 56 p.
- CADIER, E.; DOHERTY, M.J.; MOLLE, F.; NASCIMENTO, S.R. (1987). POMAC: Um sistema automatizado de simulação de pequeno perímetro de irrigação alimentado por açude. SUDENE. Recife. 13 p.
- CARMOUZE, J.P. (1976). La régulation hydrogéochimique du Lac Tchad. Travaux et documents de l'ORSTOM, n° 58. 418 p.
- GRIFFIN, R.A. et JURINAK, J.J. (1973). Estimation of activity coefficients from the electrical conductivity of natural aquatic systems and soils extracts. Soil Sci, 116, 1º p. 26-30.
- HEGERSON, H.C. (1969). Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. Amer. J. Sc, 267, p. 724-804.
- LEPRUN, J.C. (1983). Relatório de fim de convênio de manejo e conservação do solo do Nordeste brasileiro. Primeira avaliação da qualidade das águas superficiais no Nordeste. Convênio SUDENE/ORSTOM. Recife. p. 91-141.
- MOLLE, F. (1985). Potentialités des açudes du Nordeste brésilien pour un usage en irrigation. Rapport ENGREF. Montpellier. 142 p.
- MONTOROI J.P.; RIEU, M. (1987). Calcul des activités ioniques dans une solution aqueuse. Programme Active pour IBM-PC et compatibles. Cahiers ORSTOM, série pédologie, vol. XXIII, n° 2, 1987. FRISSN 00297229.
- PIOGER, R. (1964). Ressources en eau du Nord-Est du Brésil. Les eaux pluviales. Hydrologie et géométrie comparées des réservoirs du Nord.Est. FAO. Epta Programmê. SUDENE. Recife. 185 p.
- RIEU, M. (1983). Simulation numérique des flux hydriques et prédiction de la salinité dans les sols. H.S. ORSTOM, ISBN 2-7099-0684-8. 161 p.
- U.S. Salinity Laboratory Staff. (1969). Diagnosis and improvement of Saline and alkali soils. Agriculture Handbook n° 60. L.A. Richards, Editor. 169 p.

FIGURES ET TABLEAUX

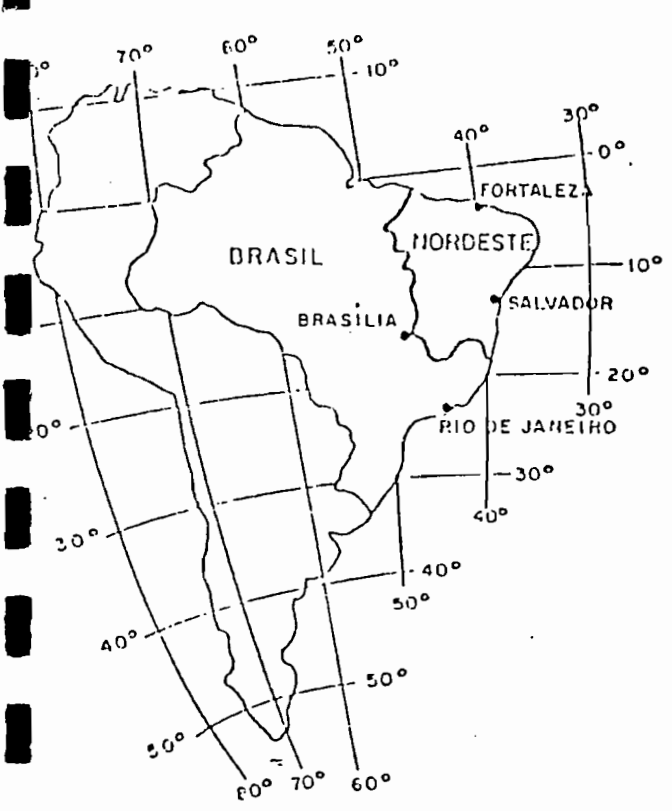


Fig 1. Carte de situation

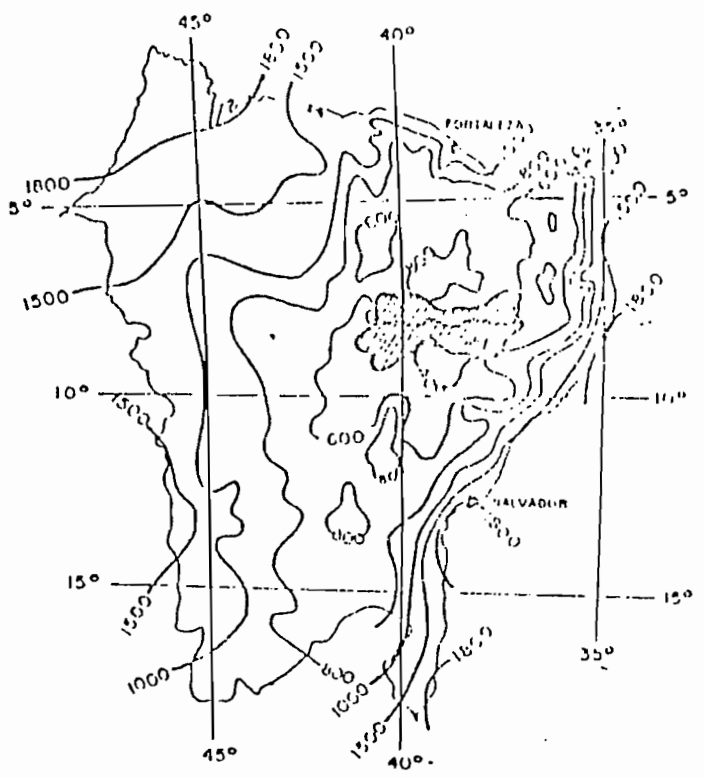


Fig 2. Nordeste- Isohyètes (1912-1983)

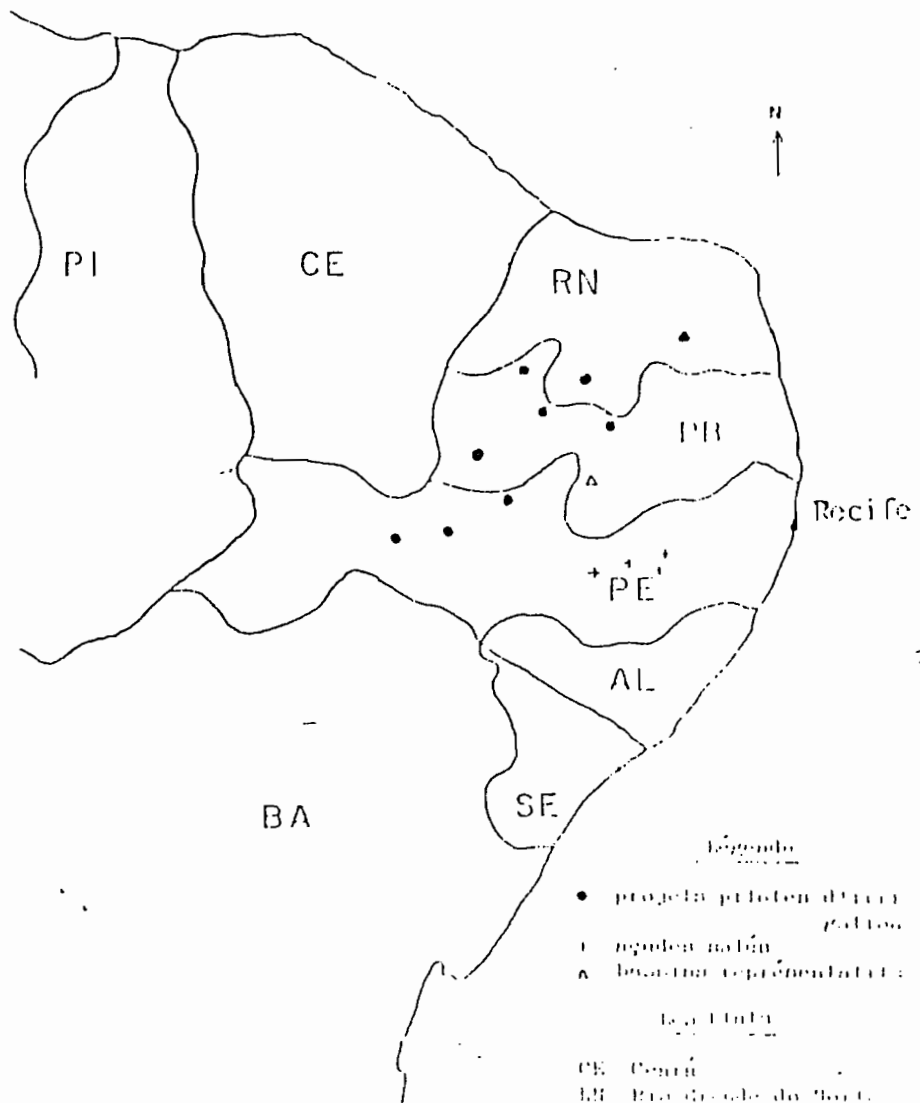


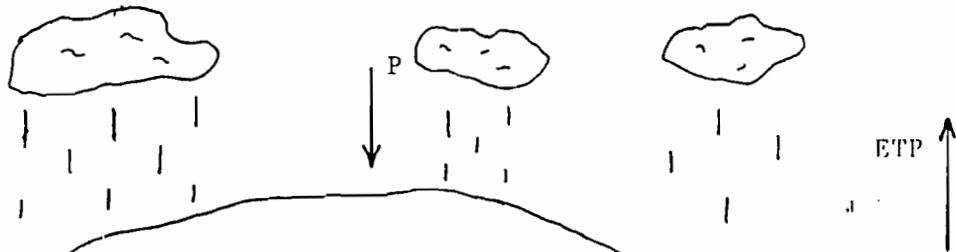
Fig 3.
Localisation des
sites étudiés

● projeto piloto de
 água potável
 ○ nascentes naturais
 ▲ localidade representativa

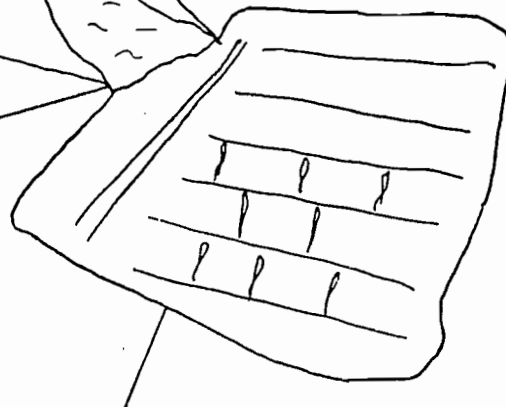
Escala 1:100.000
 CE - Ceará
 PB - Paraíba do Norte

à 100 km

BASSIN D'ALIMENTATION
dissolution et transport des sels

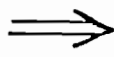


ACUDE
saison sèche : concentration et précipitation
saison humide : dissolution et transport vers le périmètre irrigué



PERIMÈTRE IRRIGUÉ
- cultures : variation de la pression osmotique dans les tissus végétaux
- sols : concentration des sels et réactions d'échange avec le complexe adsorbant des sols

Conséquences :
(en l'absence de lessivage et drainage)



- cultures : chute de la production
- sols : dégradation et stérilisation des sols

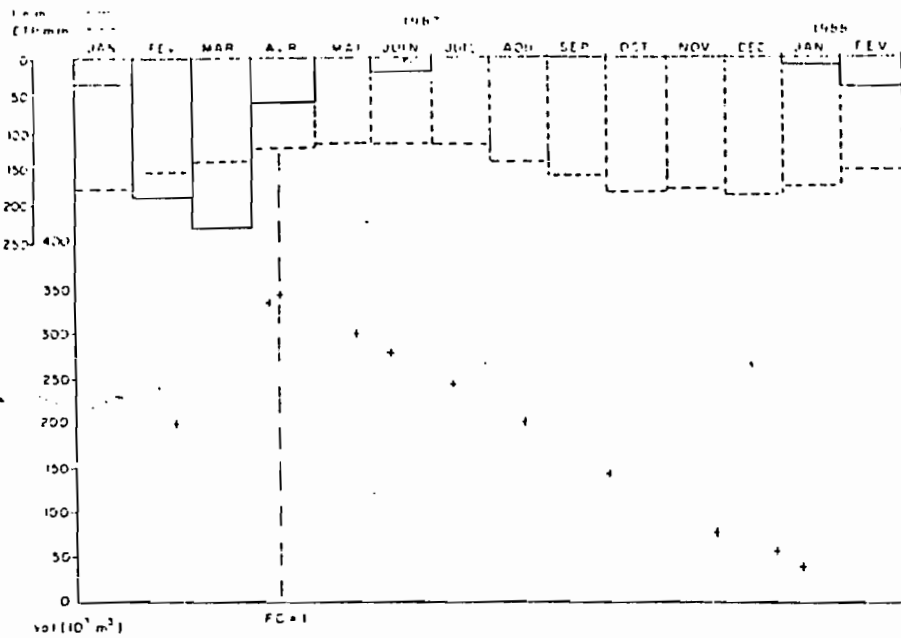


Fig 5. Pluies, ETP et évolution du volume de l'acide P4 durant l'année hydrologique 1987-88

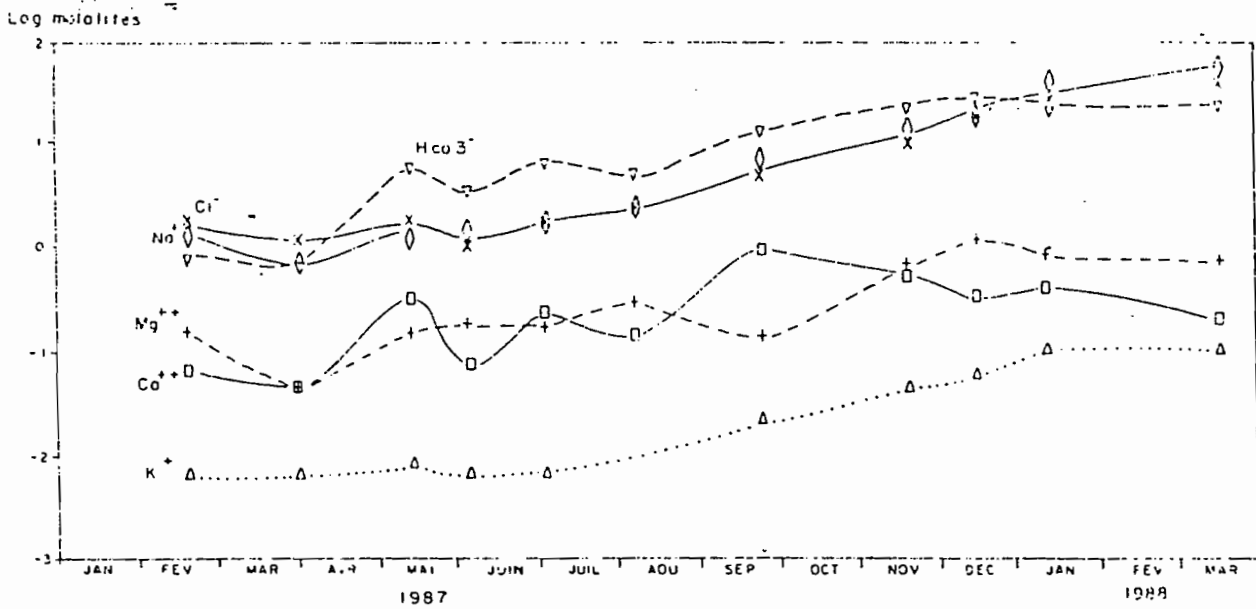
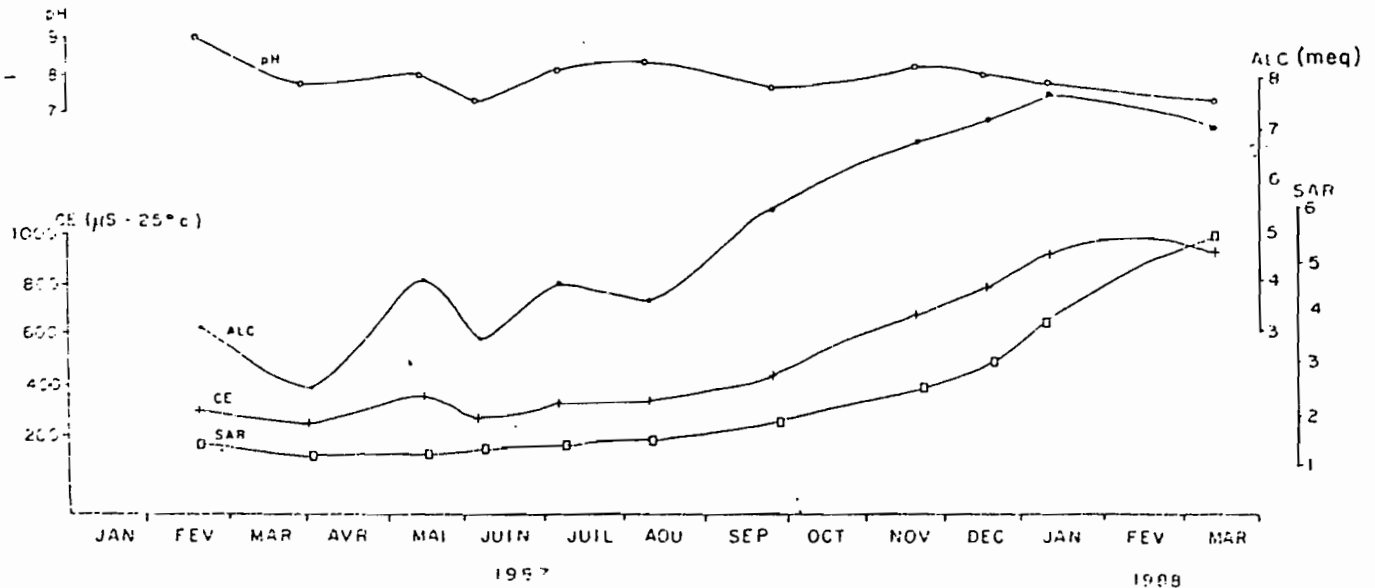


Fig 6. Evolution de la composition chimique des eaux de l'acide P4 de février 1987 à mars 1988



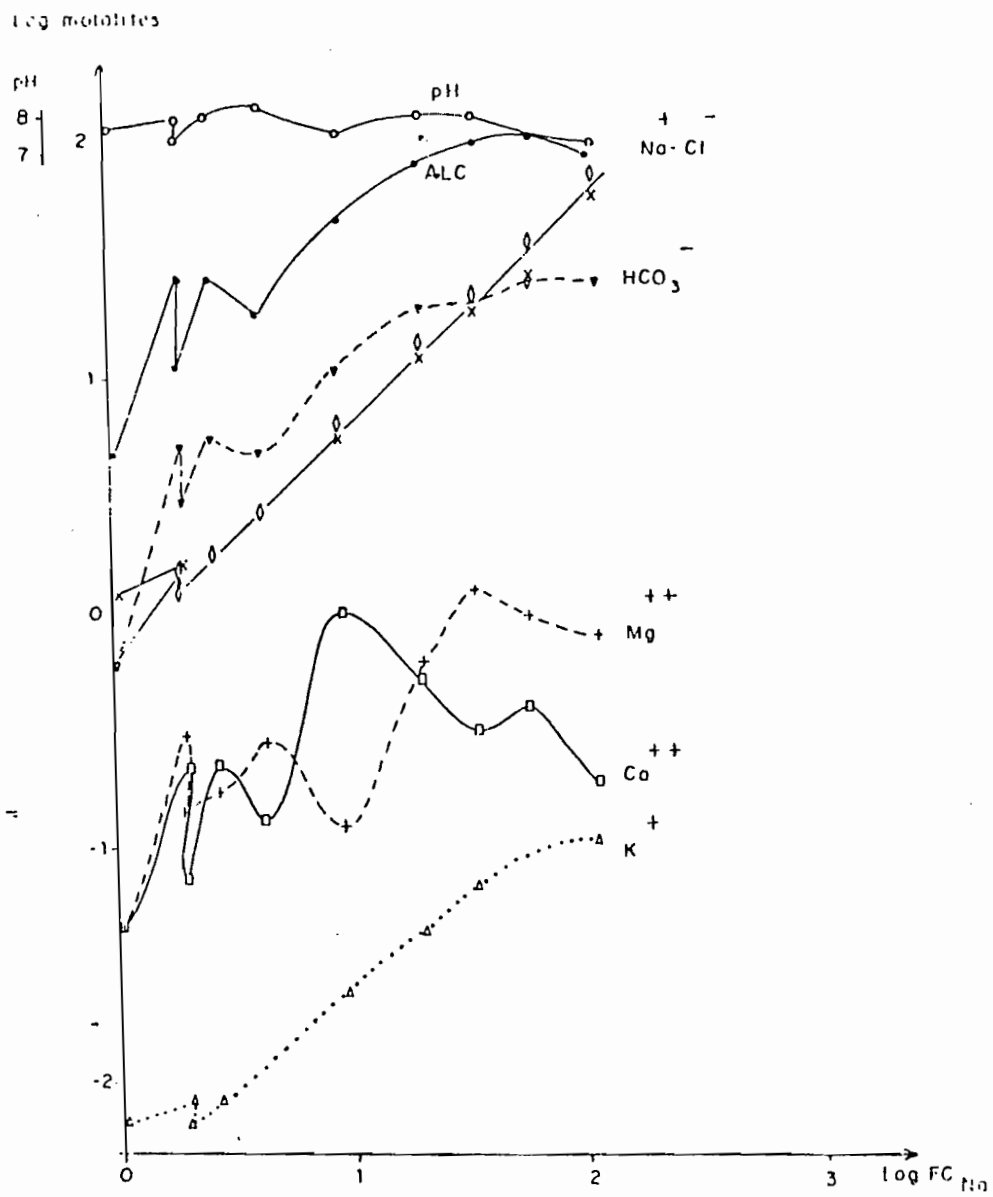
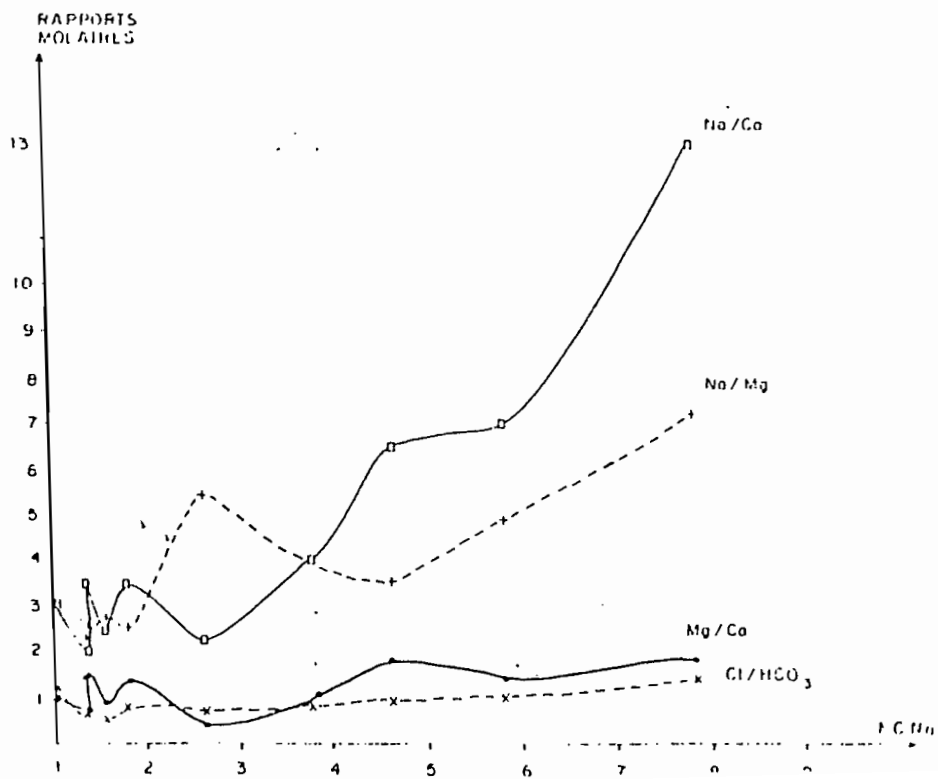


Fig 8. Evolution des molalités, du pH et de l'alcalinité en fonction du facteur de concentration FC_{Na}



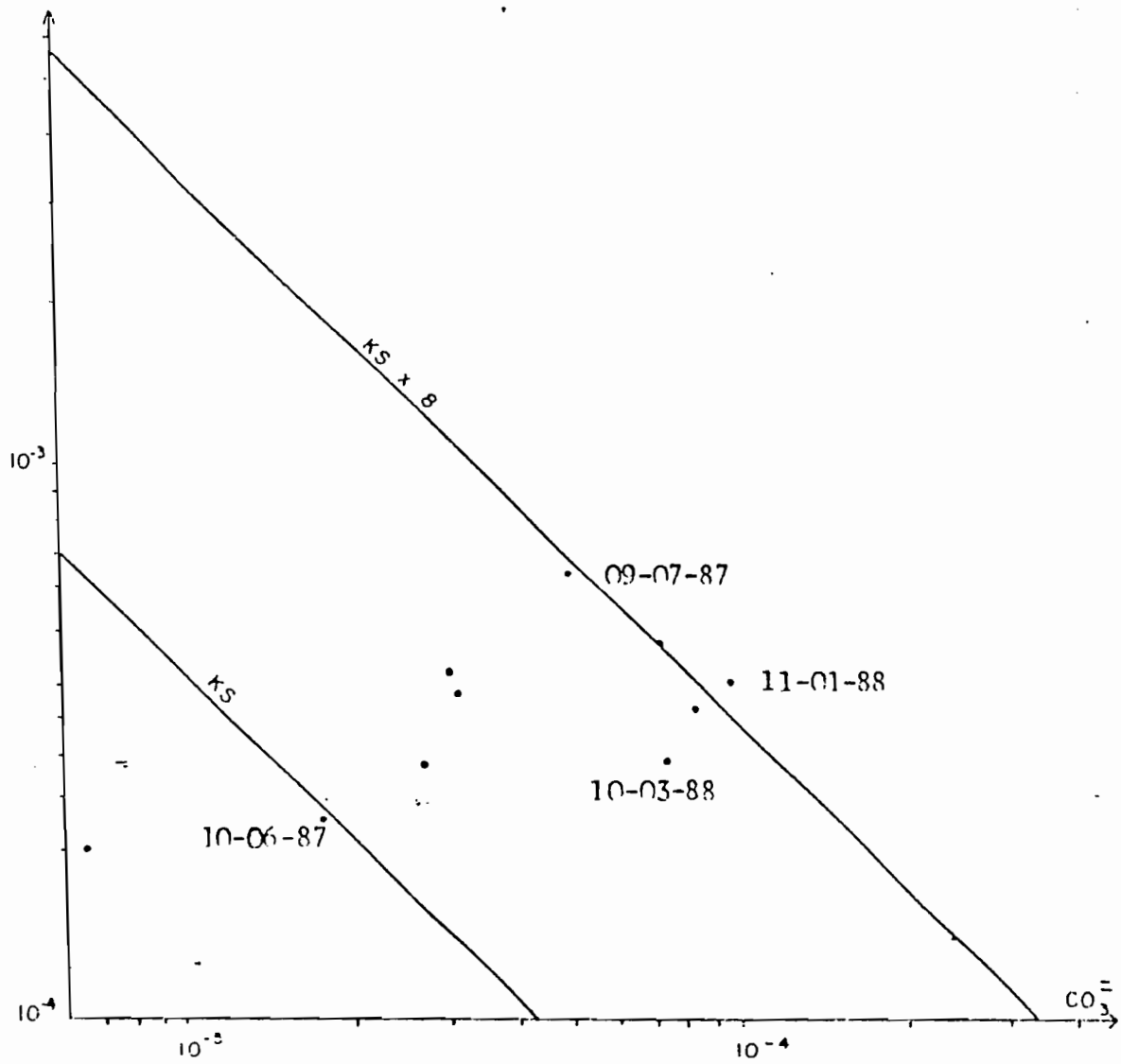
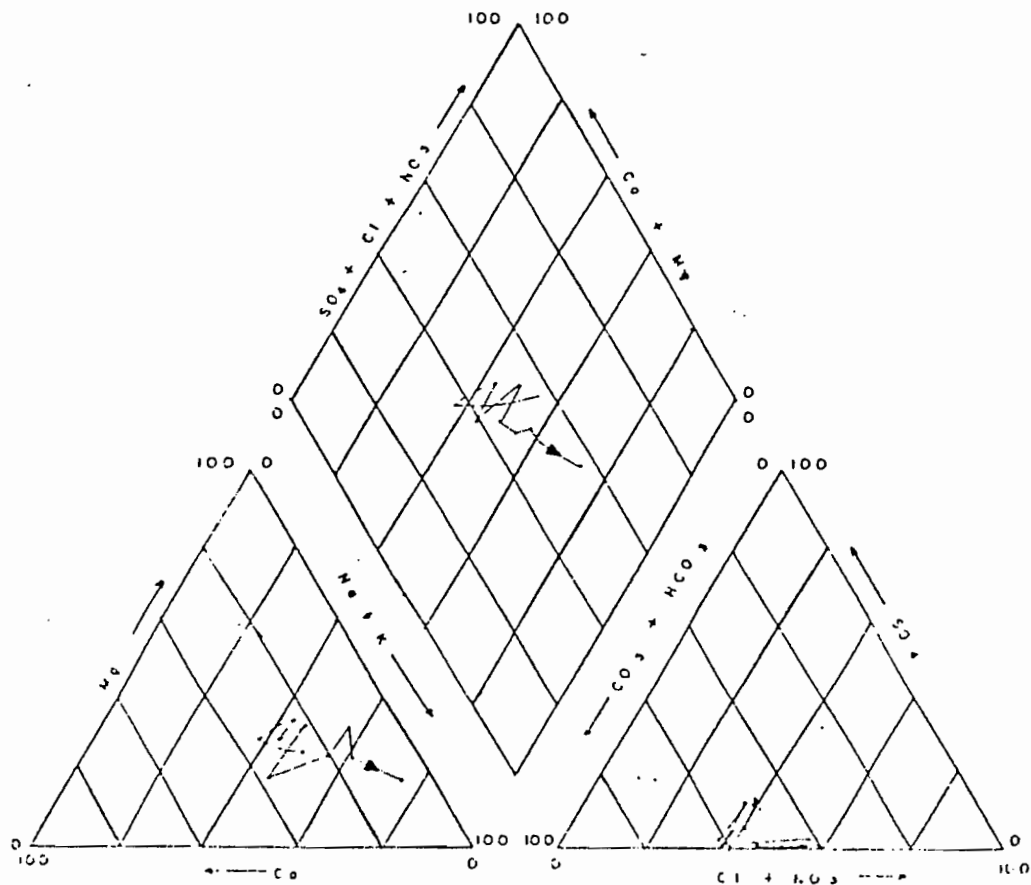
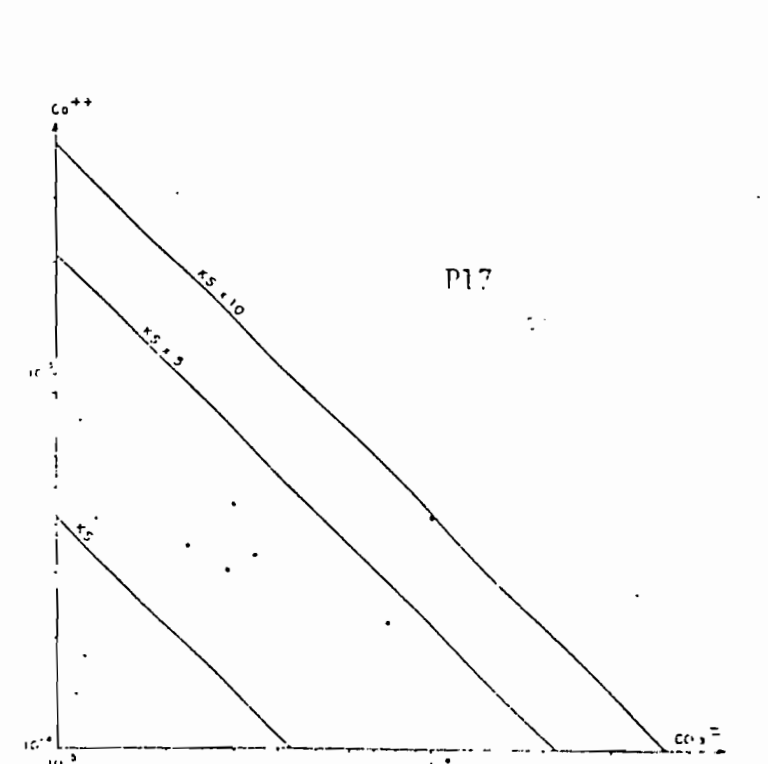
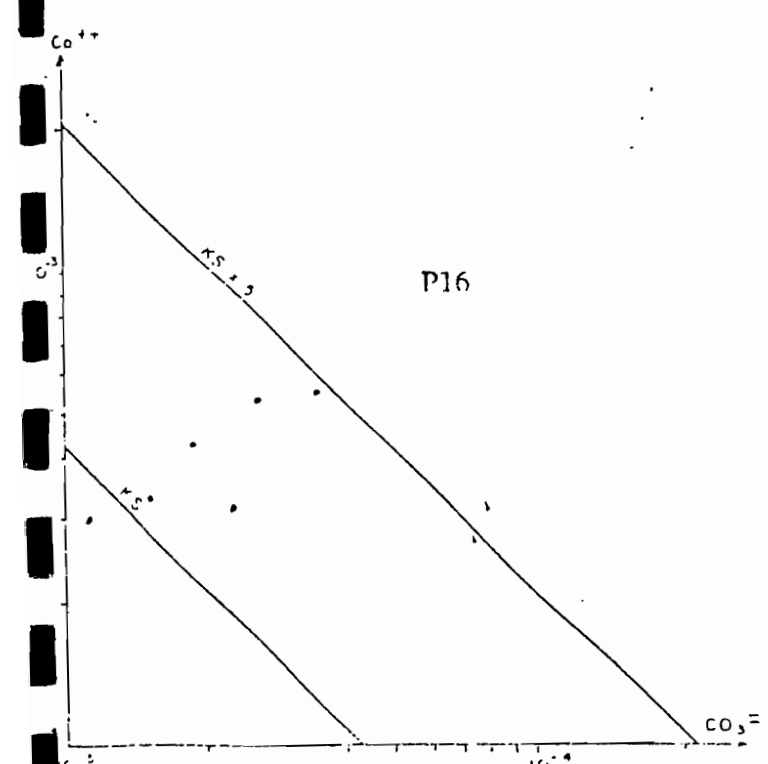
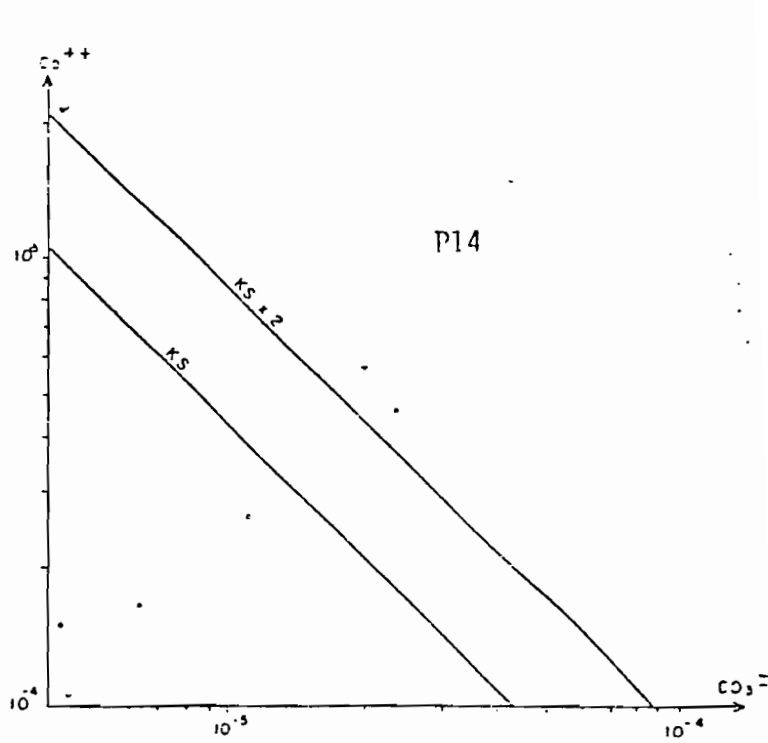
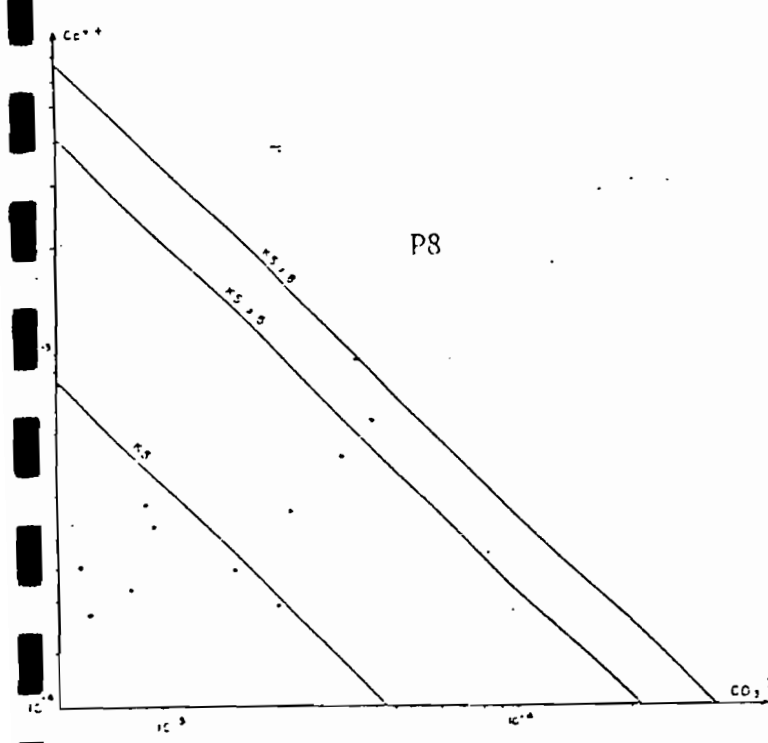
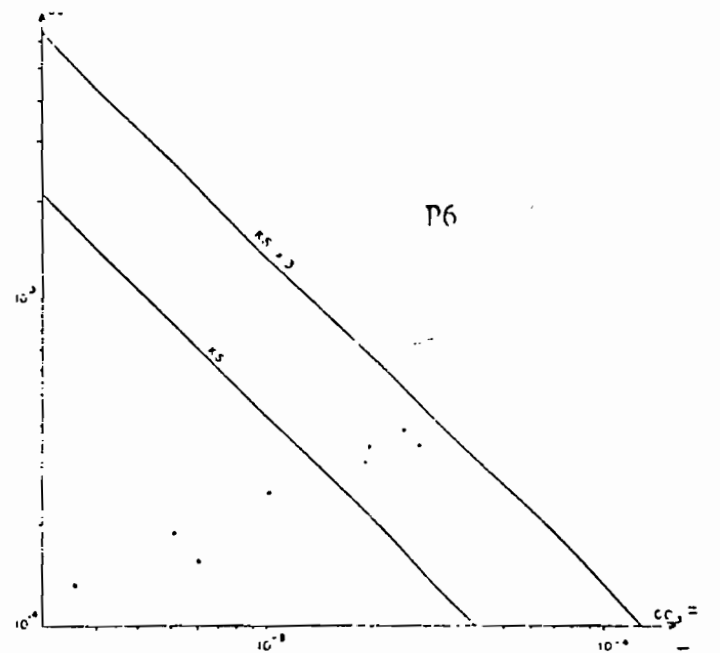
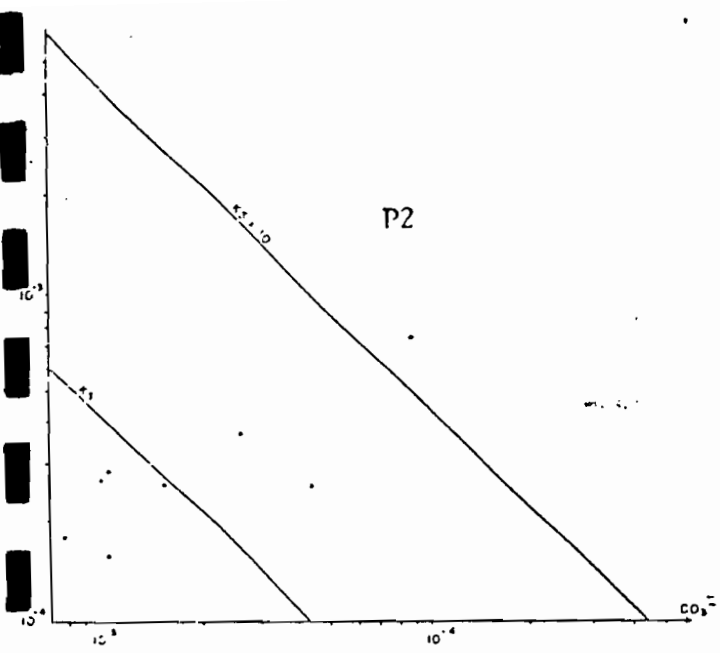


Fig 10. Situation des eaux de l'acide P4 dans le diagramme d'équilibre de la calcite





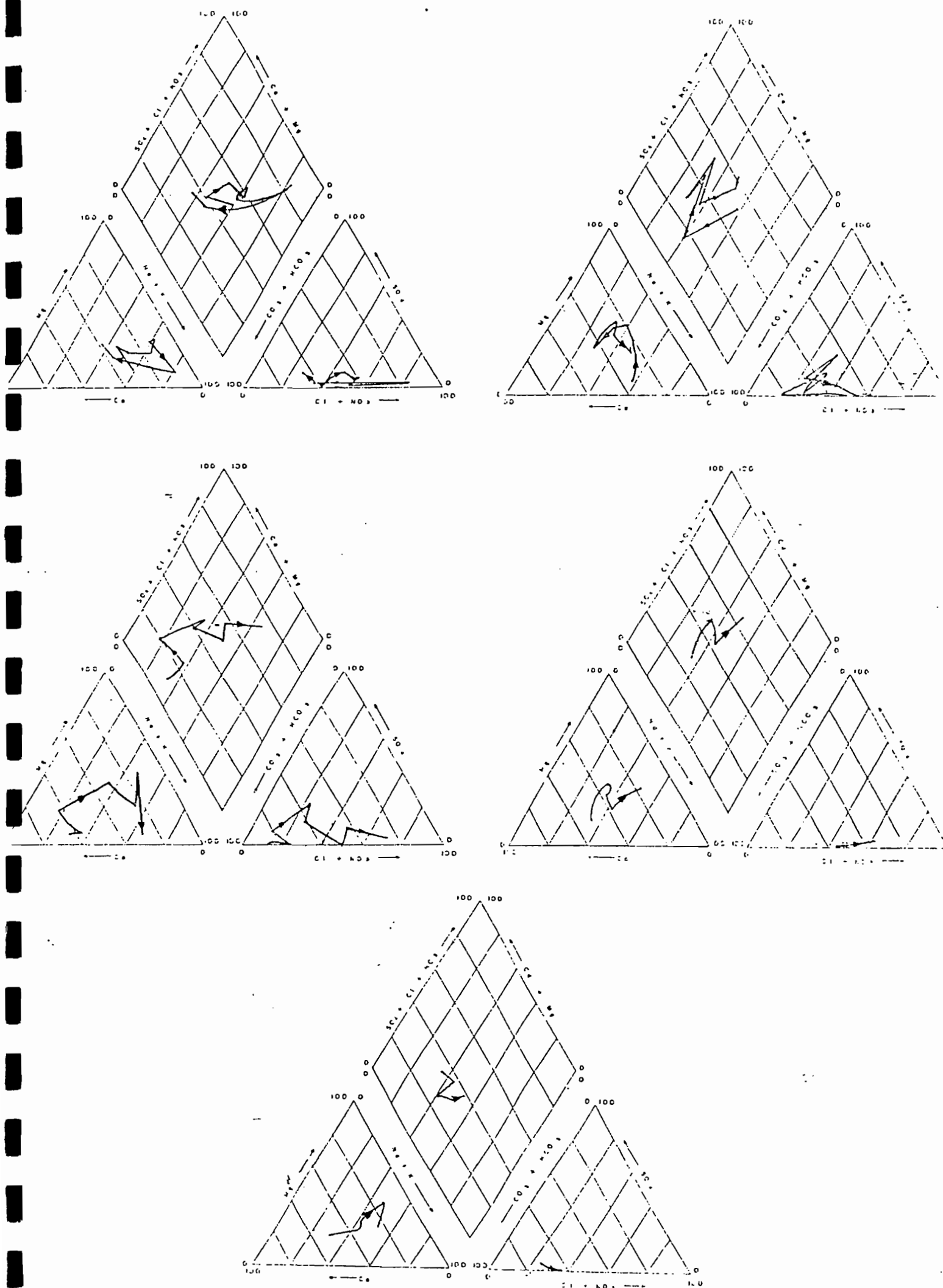


Fig 13. Evolution des faciès chimiques des eaux des acides : P2, P6, P8, P16, P17

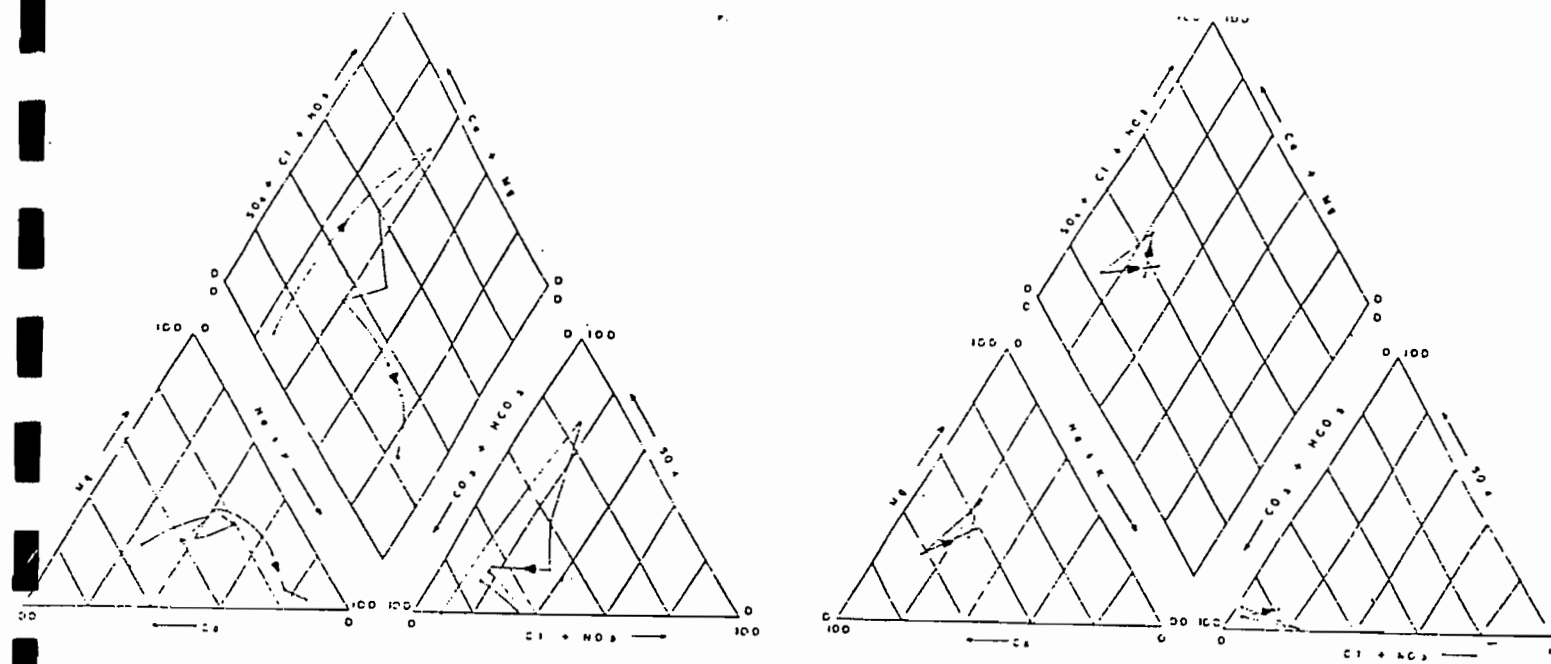


Fig 14. Evolution des faciès chimiques des eaux des acudes : P12,P14

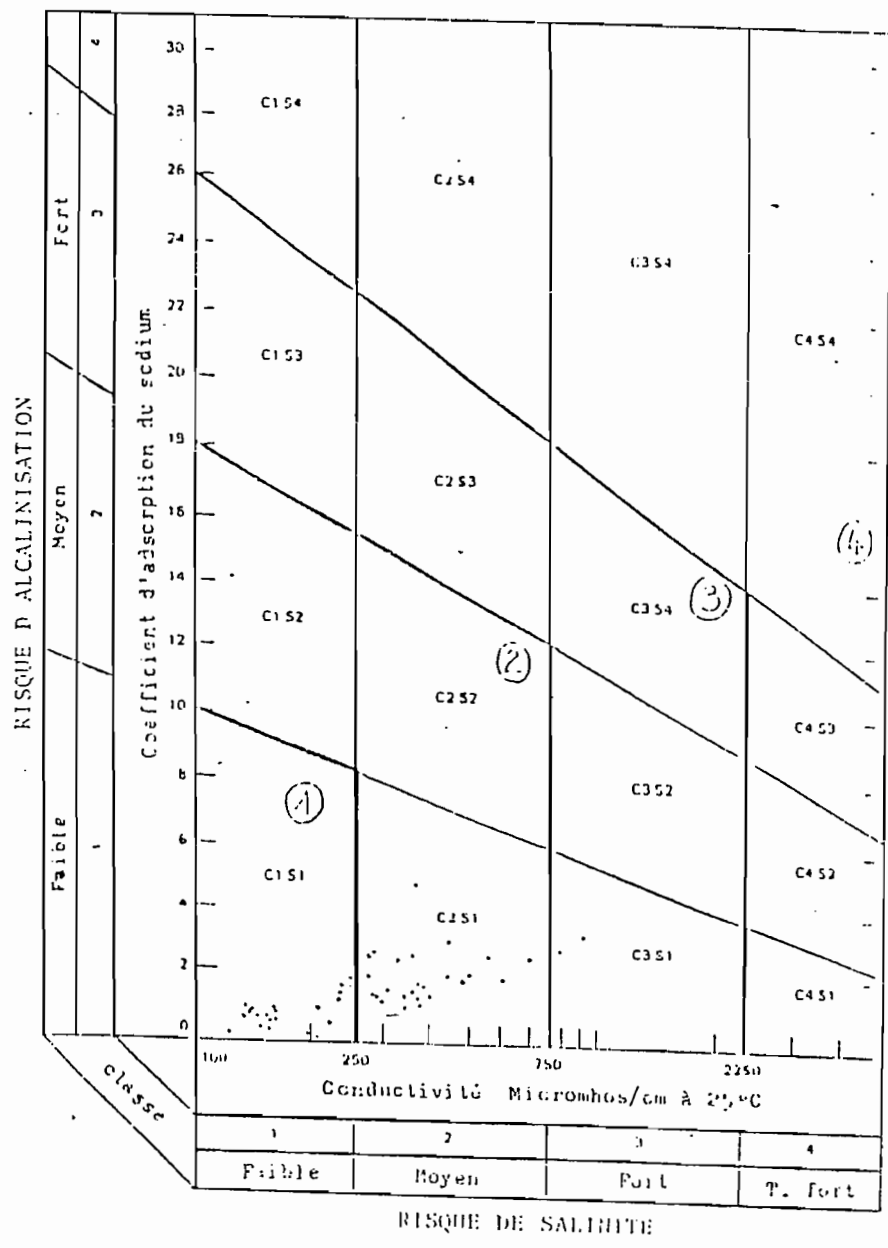


Fig 15. Classification des eaux pour l'irrigation dans le diagramme de Riverside pour les acudes : P2,P4,P6,P8,P12,P11,P16,P17
 Les points correspondent aux prélèvements de février 1987 à mars 1988

Projet	Profondeur max (m)	Volume max (m ³)	Surface max (m ²)	Vol. max / Surf. max (m)	L	K	Age (ans)	Surface BV (ha)	Pédologie du bassin versant	
										acide
Projets piéces d'irrigation	P2	4,52	128000	96.000	1,33	3,4	740	8	234,8	Sols podzoliques eutro- phes + regossols.
	P4	4,5	447240	254.400	1,76	2,56	9513	61	257,8	Affleurements granitiques Bruns non calciques + alluvions
	P6	3,22	68000	35.700	1,9	2,55	1132	10	340	Sols lithologiques eutro- phes + affleurements
	P8	3,8	27000	12.520	2,23	2,27	1327	8	40,8	Sols lithologiques + pod- zoliques eutrophes
	P12	3,63	14600	10.600	1,38	2,79	400	10	58,8	Lithologiques + regossols
	P14	7,1	111200	58.600	1,9	3,74	73	7	?	Bruns non calciques + regossols.
	P16	?	?	130.000	?	?	?	?	329,6	?
	P17	?	?	100.000	?	?	?	?	422,4	?
Acides saies	P52	< 2	?	10.000	?	?	?	?	?	Podzoliques eutrophes
	P68	2,48	109400	87.300	1,25	1,97	18.278	> 30	très grande	Planossols sodiques + Regossols
	P72	3,01	9653	9.455	1,02	2,95	374	12	?	Planossols sodiques + BIC + lithologiques + re- gossols + affleurements
	P74	5,4	30572	15.548	1,96	2,7	322	> 80	?	Planossols sodiques + Bruns non calciques

Tableau 1 - Caractéristiques géomorphologiques des acides étudiés

DATE	CATIONS			ANIONS		
	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO4	HCO3 + CO3
21.02.87	22.68	31.25	46.05	46.74	0.54	52.70
04.04.87	26.19	26.18	47.62	56.88	0.66	42.45
19.05.87	35.93	26.38	37.68	38.79	0.00	61.20
10.06.87	22.60	33.93	43.46	35.15	9.44	55.39
09.07.87	31.06	27.53	41.40	37.87	0.24	61.87
13.08.87	21.83	30.17	47.99	38.14	10.82	51.03
30.09.87	38.57	15.44	45.97	40.83	5.04	54.11
26.11.87	23.78	24.52	51.68	44.77	0.22	55.00
23.12.87	15.97	28.78	55.23	49.07	0.00	50.92
11.01.88	16.24	23.36	60.39	50.85	0.00	49.07
10.03.88	10.37	18.70	70.91	59.37	0.00	40.62

tableau 2b. Les pourcentages ioniques en cations et anions de l'acide P4

Volume (l)	CE (µS-25°C)	RAS ⁽¹⁾	Classe	pH	ALC ⁽²⁾	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	CO ⁽³⁾	I ⁽⁴⁾	Na/Ca	Na/Mg	Mg/Ca	Cl/HCO3	[Ca] ⁵	[CO3] ⁵	Ca/Na	Fe _{vol}	Fe _{Na}	Fe _{vol/Fe_{Na}}					
						meq/l																							
13,95	255.71	1.55	C2S1	9.00	3.96	0.319	0.446	1.173	0.122	1.279	0.007	1.159	2.735	3.741	3.678	2.866	1.377	1.992	--	--	--	--	--	--					
13,97	238.10	1.15	C1S1	7.84	1.92	0.259	0.259	0.826	0.117	1.070	0.006	0.000	1.913	2.457	3.146	3.191	1.001	1.338	2.053	0.968	0.28	1	1	1					
14,00	333.33	1.11	C2S1	8.00	4.14	0.598	0.439	1.130	0.125	1.267	0.000	2.000	3.312	4.338	1.829	2.570	0.753	0.634	4.295	3.048	3.04	1,17	1,37	0,85					
15,53	263.16	1.25	C2S1	7.28	2.86	0.319	0.479	1.113	0.115	1.014	0.136	1.600	2.871	3.792	3.487	2.320	1.503	0.634	2.341	1,8	0,937	1,23	1,35	0,91					
15,50	312.50	1.29	C2S1	8.10	4.08	0.528	0.469	1.257	0.122	1.395	0.064	2.119	3.432	4.416	2.434	2.743	0.887	0.611	3.781	3,151	2,79	1,4	1,56	0,90					
16,00	322.58	1.47	C2S1	8.31	3.54	0.419	0.579	1.469	0.375	1.463	0.207	1.579	3.840	5.126	3.508	2.534	1.393	0.799	8.914	2,749	1,88	1,73	1,78	0,93					
16,68	434.78	1.84	C3S1	7.54	5.33	0.997	0.400	2.173	0.204	2.112	0.130	2.000	5.174	6.701	2.179	5.435	0.401	0.755	6.546	5,068	7,77	2,4	2,63	0,91					
17,55	666.67	2.47	C2S1	8.10	6.66	0.773	0.798	3.093	0.266	2.957	0.007	3.639	6.560	8.136	4.004	3.878	1.032	0.813	4.854	7,407	8,43	4,43	3,75	1,18					
16,82	769,23	2.95	C3S1	8.03	7.19	0.598	1.079	3.826	0.314	3.662	0.000	3.500	7.507	9.158	6.293	3.543	1.804	0.964	3.636	8,334	7,14	6,05	4,63	1,3					
18,84	909.09	3.69	C3S1	7.60	7.60	0.688	0.991	4.782	0.337	4.225	0.003	4.000	8.424	10.079	6.949	4.822	1.440	1.036	4.066	9,945	9,48	8	5,79	1,38					
	909.09	5.44	C3S1	7.20	7.03	0.498	0.990	6.434	0.383	5.845	0.115	4.000	9,631	10.899	12.900	7.150	1.904	1.461	2.958	7,379	5,12	?	7,79	?					

tableau 2a. caractéristiques physico-chimiques de l'acide P4 au cours de l'année hydrologique 1987-88

Remarques concernant le tableau 2a.

- (1) SAR = $Na/\sqrt{1/2(Ca+Mg)}$ avec Na, Mg, Ca en meq/l
- (2) l'alcalinité : ALC = $Na+K+2(Ca+Mg)-Cl-2SO4$ est calculée à partir des meq/l
- (3) la charge ionique : $Co = (anions + cations)/2$, exprimée en meq/l
- (4) la force ionique I est obtenue à partir de la conductivité électrique CE (en µS a 25°C) par la formule de Griffin et Jurinack (1973) : $I = 0,0127*CE - 0,0003$
- (5) activités ioniques de Ca et CO3 calculées par le modèle Active (Rieu, 1987)

	Nº açude	FC _{Na}	CE min	CE max	$\frac{CE_{max}}{CE_{min}}$	RAS min	RAS max	$\frac{RAS_{max}}{RAS_{min}}$	Classe Riverside min	Classe Riverside max
Projets pilotes d'irrigation	P2	5,91	232	625	2,7	1,25	2,82	2,25	C1S1	C2S1
	P4	7,79	238	909	3,82	1,11	5,44	4,9	C2S1	C3S1
	P6	5,06	100	370,4	3,7	0,53	1,55	2,92	C1S1	C2S1
	P8	8,18	77	416	5,4	0,42	2,51	5,97	C0S1	C2S1
	P12	5,5	108,7	384,6	3,54	0,54	4,89	9	C1S1	C2S1
	P14	4,48	76,9	200	2,6	0,19	0,35	1,84	C0S1	C1S1
	P16	3,24	250	476	1,9	0,83	2,07	2,49	C1S1	C2S1
	P17	3,58	243	526	2,16	0,88	2,3	2,61	C1S1	C2S1
Açudes salés	P52*	?	?	18.500	?	?	13,67	?	?	C6S4
	P68*	?	?	45.450	?	?	23,46	?	?	> C6,S4
	P72*	?	?	15.384	?	?	16,49	?	?	C6S4
	P74*	?	?	12.200	?	?	12,07	?	?	C6S4

tableau 3. Facteurs de concentration, conductivités électriques et SAR extrêmes durant l'année hydrologique 1987-88 de l'ensemble des açudes étudiés

*note : les données de P52, P68, P72, P74 ne concernent que la fin de la saison sèche 1987