

ETUDE DE DEUX MODES D'ACCUMULATION SALINE DANS LES EAUX DE LA NAPPE PHREATIQUE
EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES DE DRAINAGE DU MILIEU.

(Rédaction et titre provisoires).

Centre ORSTOM de Fort-Lamy
Avril 1968.

C. CHEVERRY
collaboration technique
R. SAYOL

INTRODUCTION

Dans un travail récent (CHEVERRY, 1968), le rôle original de la pédogenèse dans les phénomènes de concentration des solutions salines en milieu confiné de région sub-aride (polders des rives N.E. du Lac Tchad), a été mis en évidence. La nappe phréatique, partout présente à faible profondeur, a été étudiée en tant que facteur essentiel de l'évolution actuelle de ces sols jeunes (facteur "pédogénétique")

Il paraît utile, pour étayer ce travail, de présenter de manière plus détaillée les données relatives à cette nappe phréatique, de préciser les variations, dans l'espace et dans le temps, de son degré et de son type de minéralisation.

Entre les nappes les moins minéralisées (eaux d'infiltration dont la composition est proche de celle des eaux du Lac Tchad) et les nappes les plus minéralisées, observées dans certains bas-fonds, le rapport des concentrations salines est d'environ 1 à 100. La composition chimique de la nappe varie, en fonction de sa concentration, le long de deux axes : l'un dont le terme est une eau à large dominance des ions sulfate et sodium ; l'autre dont le terme est une eau à dominance des ions bicarbonate et sodium. Ces deux "voies" de concentration des solutions salines s'expriment dans des milieux dont le degré de drainage est différent (milieux "drainés" - milieux "marécageux").

Le cadre géographique de cette étude reste les deux polders proches de la ville de Bol (superficie 15 km²), sur la rive Nord-Est du Lac Tchad, dont la description ne sera pas reprise ici. Les données sur la nappe phréatique ont été recueillies au cours de trois années d'observations (Janvier 1965 - Mars 1968).

I. METHODES DE PRELEVEMENT, DE MESURES.

Les prélèvements d'eau de la nappe furent effectués à diverses périodes de l'année : début, moitié et fin de saison sèche ; fin de saison des pluies, après lessivage d'une partie des sels accumulés dans les sols ; un sondage à la tarière ouvert pour un prélèvement n'est jamais réutilisé. Des emplacements d'environ 100 m² furent définis ; cette surface a été jugée homogène du point de vue des caractères de la nappe, et les prélèvements périodiques sont effectués sur elle, à chaque fois en des points différents.

.../...

II. Mesures de pH, de potentiel d'oxydo-réduction.

Les résultats publiés correspondent à des mesures faites soit directement sur le terrain, soit dans les quelques heures suivant le prélèvement. Dans certaines parties basses des polders en effet, les eaux non analysées immédiatement sont l'objet de phénomènes d'oxygénation, de dégagement de CO_2 , d' H_2S , qui ôtent toute valeur aux résultats obtenus ensuite. L'erreur sur la mesure d'un pH est estimée inférieure à 0,2 unité pH (pour être comparables les prélèvements doivent être effectués à peu près à la même période de la journée) ; l'erreur sur la mesure du potentiel red-ox est élevée : 50 mvolts environ, due à la difficulté d'un bon nettoyage de l'électrode de platine entre chaque mesure.

12. Mesures de conductivité.

Plus de 1500 mesures de conductivité furent effectuées, dont 700 avec un appareil de mesure Philipps PR 9500 ; l'erreur totale maximum sur une mesure est estimée inférieure à 8 %. Les valeurs obtenues sur le terrain, après simple décantation rapide des eaux sont inférieures de 5 à 10 % à celles obtenues en laboratoire, après filtration. Les résidus secs furent déterminés sur une centaine d'échantillons. La figure I présente la corrélation entre conductivité et résidu sec. Les corrélations proposées par ROCHE (1967) à partir de prélèvements d'eaux dans d'autres parties du Lac Tchad et des cuvettes côtières, sont très satisfaisantes. Pour les conductivités inférieures à 3 mmhos, la pente de la droite $RS = (L)$ est néanmoins un peu faible.

13. Déterminations sur les anions.

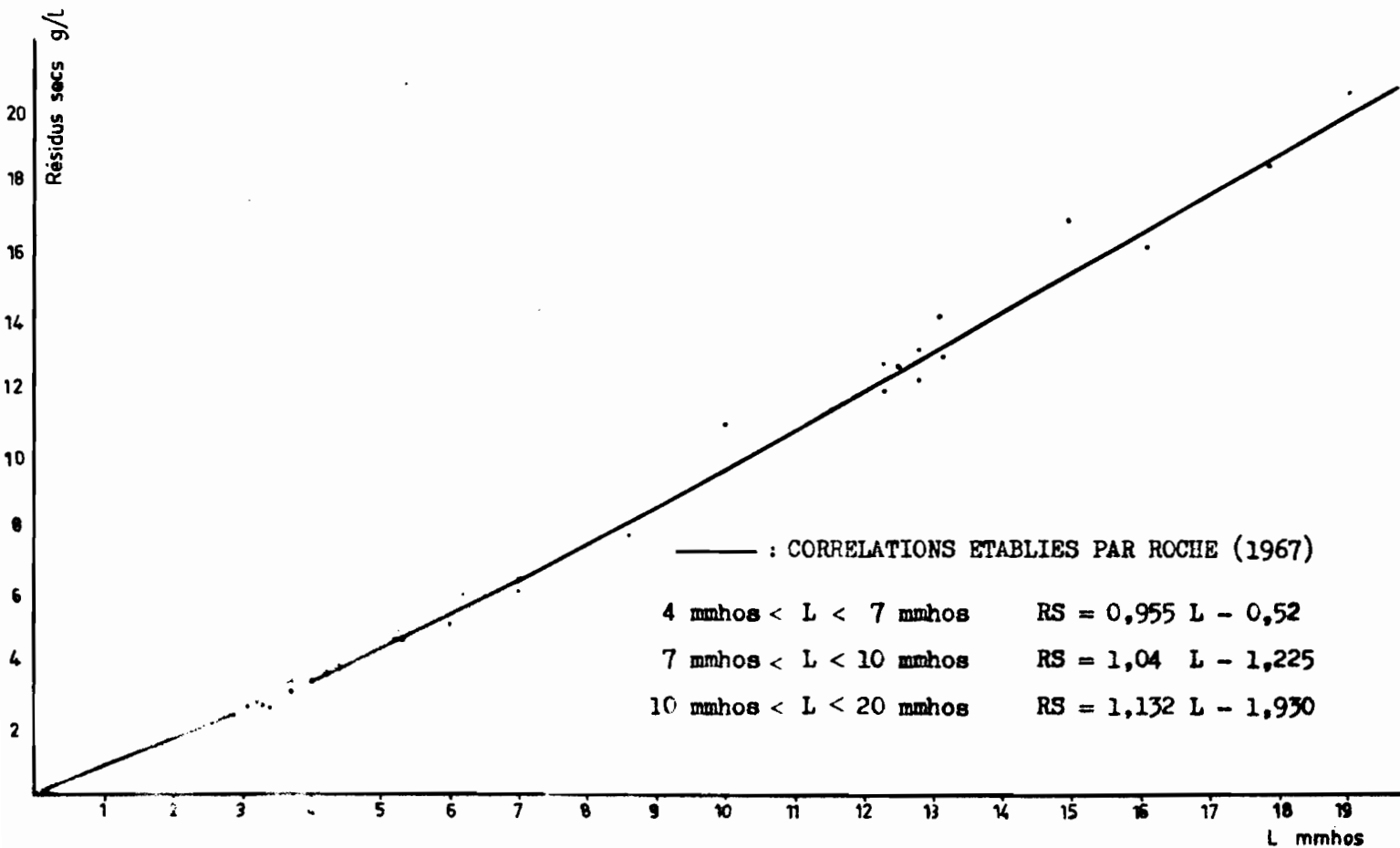
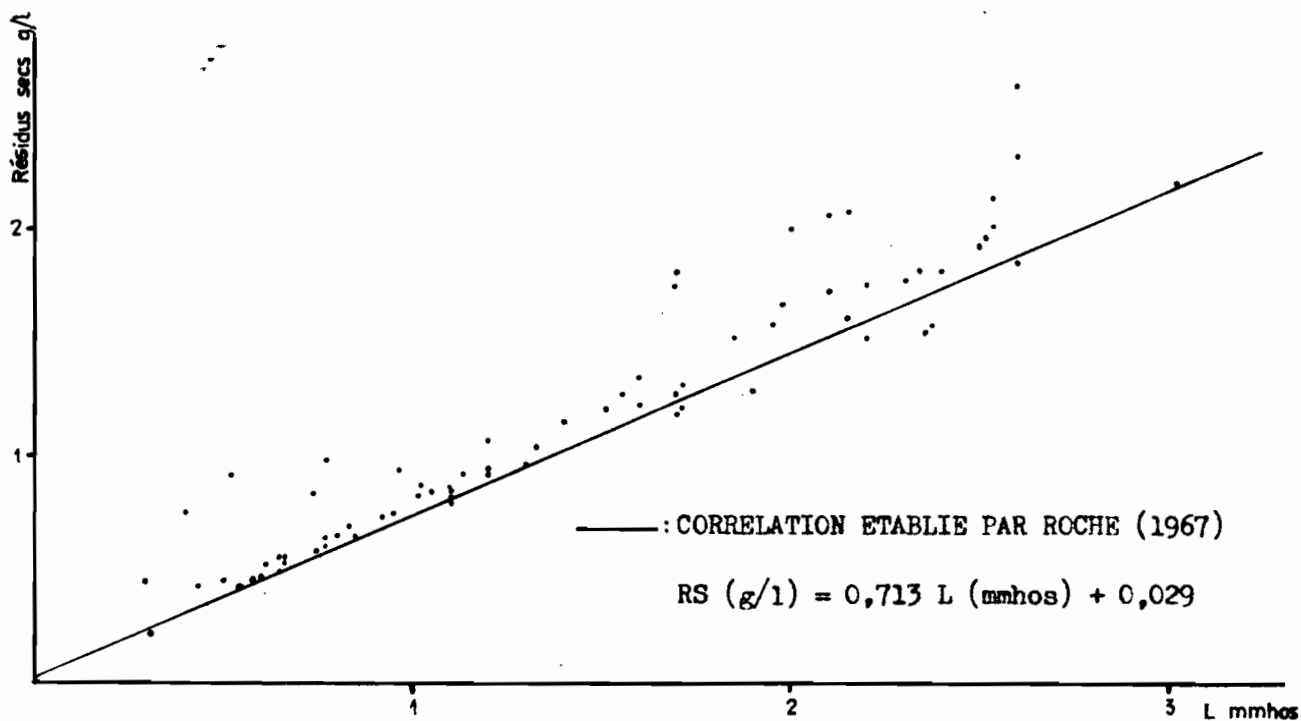
131. HCO_3^- , CO_3^{2-} . L'alcalinité totale est dosée par neutralisation avec de l'acide dilué (H_2SO_4 N/20). Depuis 1968, la détermination n'est plus visuelle (indicateurs colorés), mais potentiométrique, choisissant les valeurs suivantes de pH :

8,2 : disparition des carbonates ; - 4,5 : disparition des bicarbonates. Cette méthode permet de doser les eaux "purineuses" ; les mesures sont désormais effectuées quelques heures au plus tard après le prélèvement.

132. Chlorures. Méthode CHARPENTIER - VOLHARD.

133. Sulfates. Ils sont déterminés par gravimétrie (Ba SO_4) ; cette méthode est peu précise pour les teneurs en sulfates inférieures à 1 me/l. Par ailleurs, nos moyens analytiques actuels ne nous permettent pas la recherche et le dosage d'autres composés du soufre, tels les sulfures, le soufre naissant ...

Fig 1. CORRELATION ENTRE RESIDUS SECS ET CONDUCTIVITES



14. Détermination sur les cations.

Les alcalino-terreux (Ca, Mg) sont dosés par complexométrie. L'utilisation du réactif de Patton introduite au laboratoire de Fort-Lamy par M. CARMOUZE permet un meilleur dosage du calcium. Les alcalins (Na, K) sont dosés par spectrophotométrie de flamme.

15. Balance cations - anions.

La silice soluble est dosée, mais les anions nitrates, phosphates, borates, ne le sont pas. Le non-équilibre, dans beaucoup de cas, de la balance cations-anions tient à ce fait, mais surtout à la précision encore insuffisante de nos mesures, en voie d'amélioration.

II. DONNEES GENERALES SUR LA NAPPE PHREATIQUE : PROFONDEUR -
SALINITE GLOBALE - DEFINITION DE ZONES PRIVILEGIEES D'INFILTRATION, DE PAYSAGES
BIEN DRAINES, MAL DRAINES.

21. Profondeur et salinité globale de la nappe.

La dernière campagne d'étude de la nappe phréatique, en Février et Mars 1968, a porté sur 570 points d'observations, répartis sur l'ensemble des 2 polders. La carte de profondeur de la nappe au 1^{er} Mars (figure 2) montre que, par rapport à l'année 1965-66 (CHEVERRY, 1966), le niveau moyen de la nappe a baissé de 20 à 40 cm, ce qui est à mettre en relation avec la baisse de niveau du Lac Tchad durant ce temps. La toujours faible profondeur de la nappe près des barrages isolant le polder Bérim du Lac traduit l'intensité des infiltrations dans ces secteurs. L'allure de la courbe de variation annuelle du niveau de la nappe, en deux points du polder Guini, est représentée sur la figure 3. La brutalité avec laquelle ce niveau remonte après les très fortes pluies d'Août est à noter, car y correspondra un enrichissement de la nappe en sels provenant du lessivage du sol.

.../...

(conté après la page 4)
29253

Fig. 2. POLDERS DE BOL GUINI ET DE BOL BERIM
PROFONDEUR DE LA NAPPE PHREATIQUE EN MARS 1968

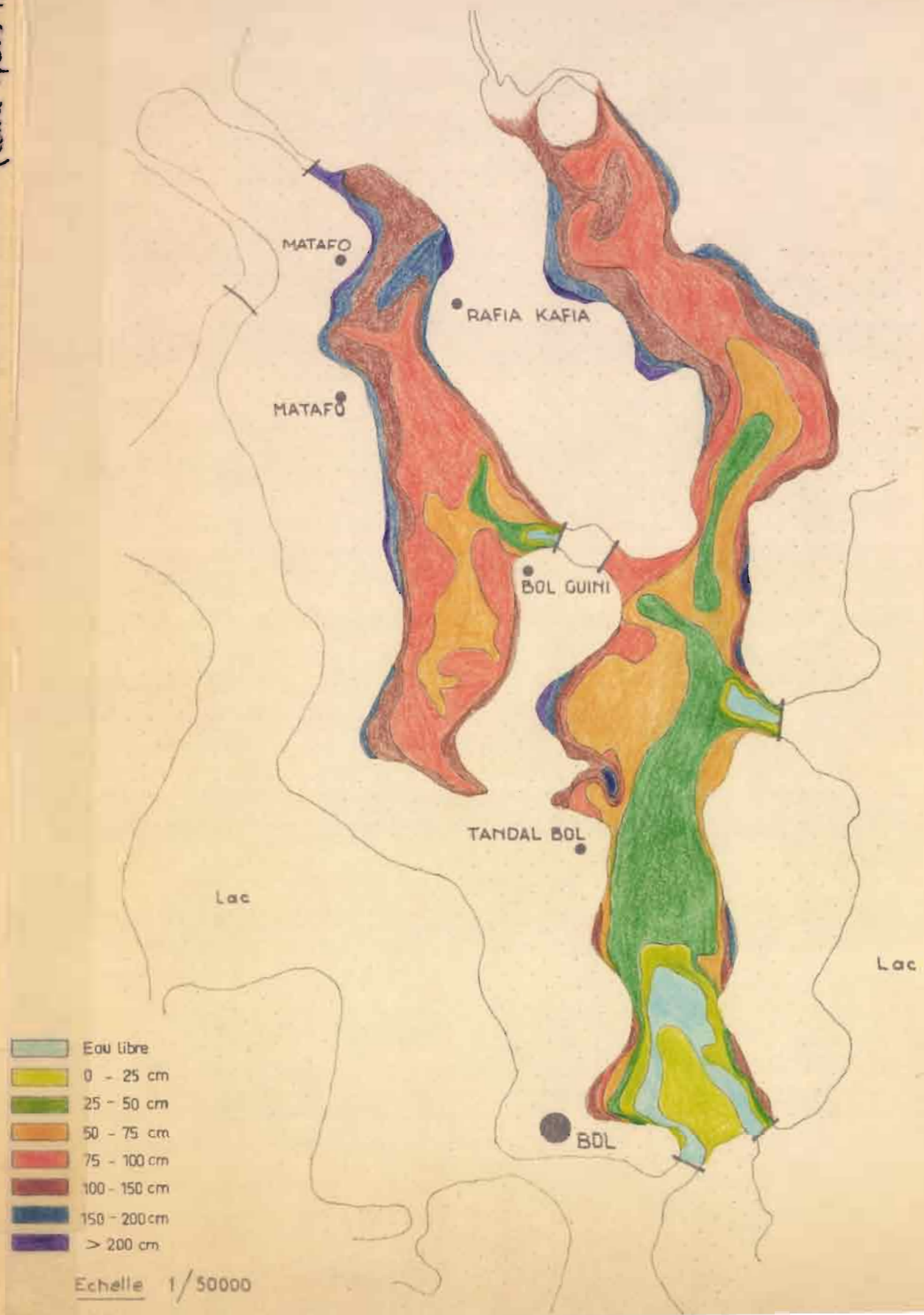
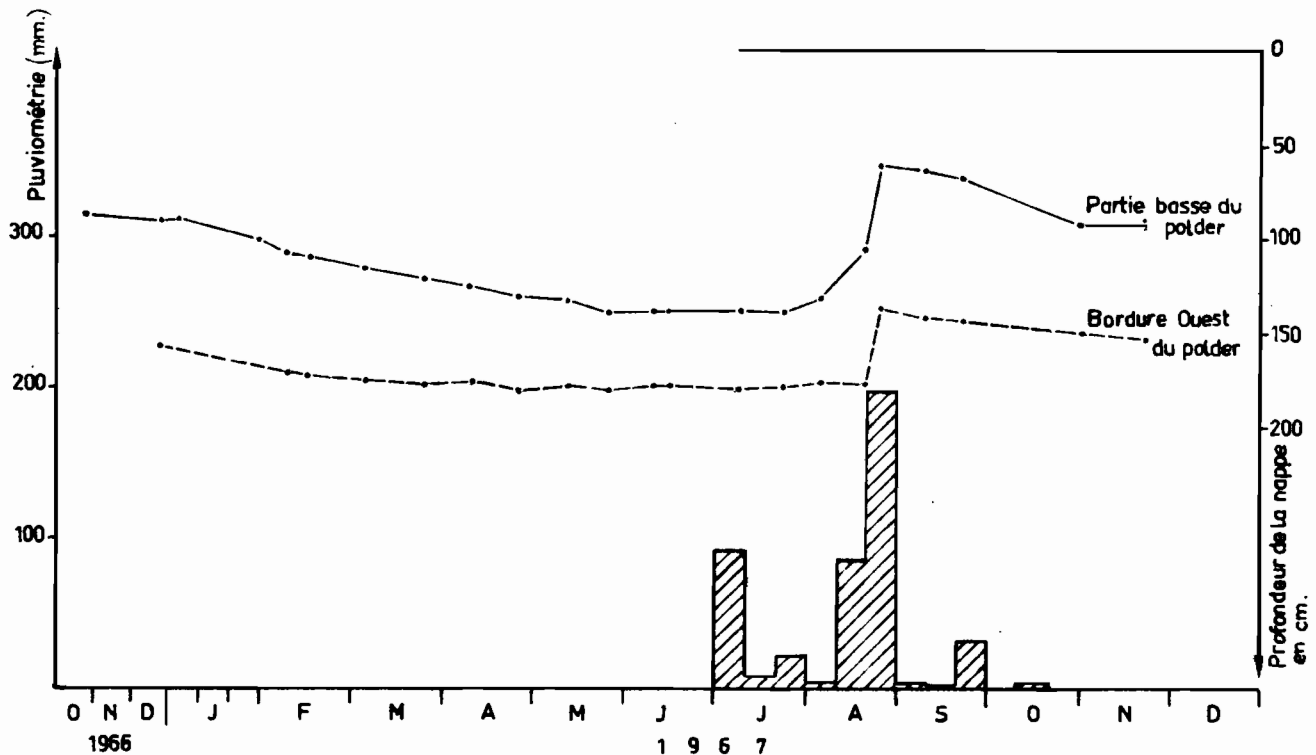


Fig 3. VARIATION DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE
EN FONCTION DE LA PLUVIOMETRIE .
1967_ POLDER GUINI CENTRE-OUEST



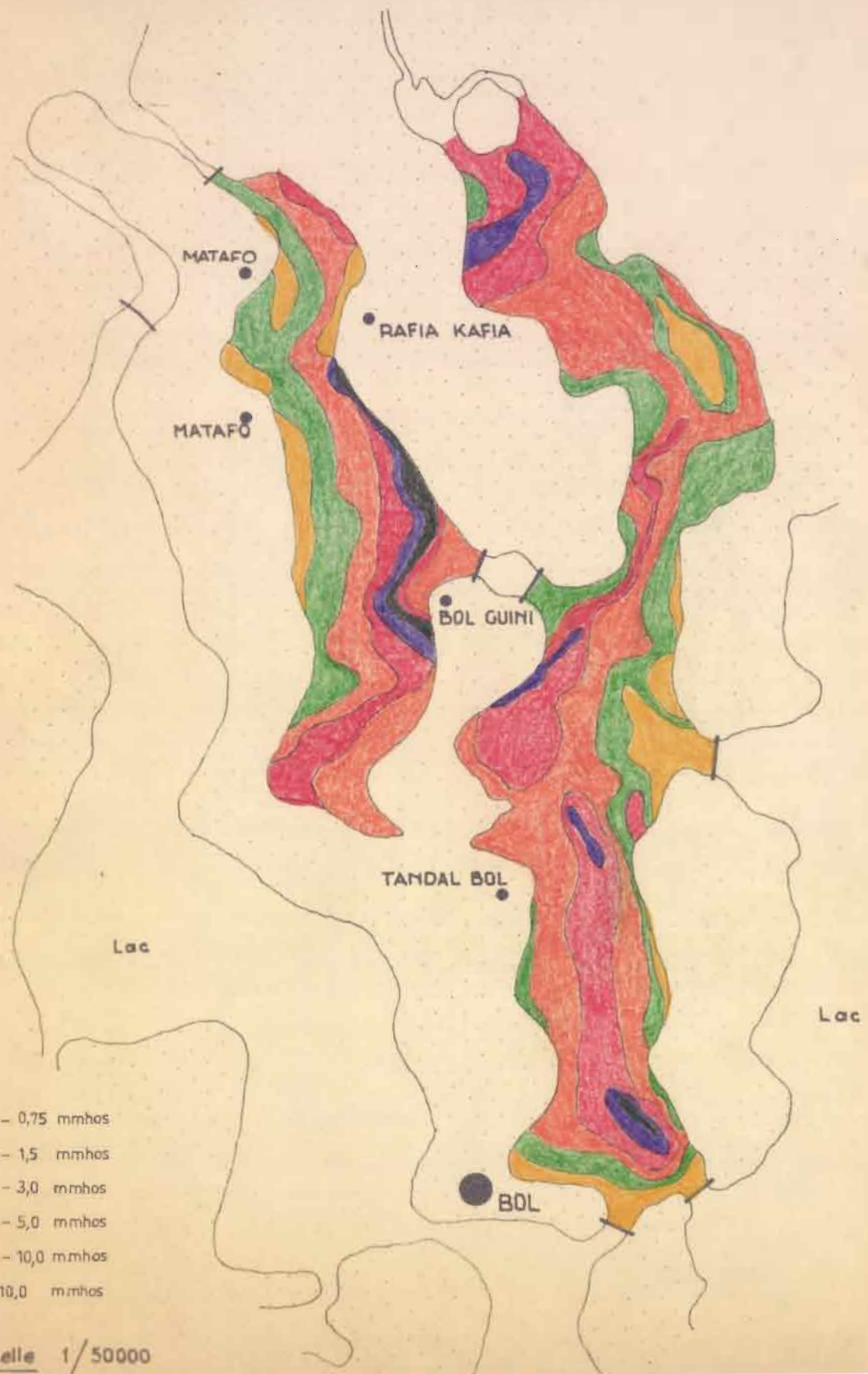
La carte de salinité (estimée par la conductivité) de la nappe en 1968 est à comparer à celle de 1965-68 :

- l'existence, dans le polder Guini, d'un gradient hydraulique de la nappe dans le sens W-E est nette. Les eaux d'infiltration, venant plus ou moins directement du Lac, arrivent sur la bordure Ouest du polder et sont drainées (ainsi que les sels dissous) vers l'Est du polder. Le même gradient s'observe, quoiqu'avec une amplitude moindre, dans le polder Bérin, vers les parties basses, centrales de ce polder.

no 29253

Fig 4 - POLDERS DE BOL GUINI ET DE BOL BERIM
SALINITE DE LA NAPPE PHREATIQUE EN MARS 1968

(carte apres le stage 2)



- 0 - 0,75 mmhos
- 0,75 - 1,5 mmhos
- 1,5 - 3,0 mmhos
- 3,0 - 5,0 mmhos
- 5,0 - 10,0 mmhos
- > 10,0 mmhos

Echelle 1/50000

- mais un autre phénomène, déjà suggéré par l'examen de la carte de 1965-66, se confirme. Là où les deux polders constituent un front commun (ensemble du polder Guini, Nord et Centre du polder Bérin), ils ont tendance à former un système unique. Les zones d'infiltration privilégiées sont notées sur la bordure Ouest du polder Guini et Est du polder Bérin ; une partie des sels est drainée vers le Centre et le Nord du système commun et probablement pour une part sous la dune sableuse centrale. (Ces données, leurs conséquences sur le bilan de la salinité des polders seront précisées dans une publication ultérieure).

Les axes des polders le long desquels ont été particulièrement étudiées les variations progressives de composition chimique de la nappe ont été choisis en fonction des données de cette carte, et surtout de celles de 1965-66.

22. Paysages "drainés" - Paysages "marécageux".

Ces deux adjectifs sont employés parce qu'imaginés et commodes. Il faut préciser ce qu'ils recouvrent dans notre esprit.

221. Paysages "drainés" *

Ce sont les secteurs des polders où la nappe phréatique, pendant au moins une période de l'année, est à plus de 30 cm de profondeur. Les sels sont soumis à un cycle annuel : ils remontent et s'accumulent dans les sols en saison sèche; sont redissous et lessivés, du moins partiellement, en saison des pluies.

Dans les mécanismes de remontée capillaire en saison sèche, de lessivage partiel en saison des pluies, le sol joue alors un grand rôle, de par les caractères propres du matériau originel (texture, teneur en matière organique plus ou moins bien décomposée) mais aussi et peut-être surtout par les caractères qu'il a acquis pédologiquement (structuration, aération, et leurs conséquences sur le régime hydrique, le milieu biologique).

Il s'avère par ailleurs, mais c'est indépendant du caractère précédent, que la nappe phréatique présente, dans ce type de paysage, un gradient hydraulique. Par ailleurs, la nappe évolue, dans sa zone de battement, dans un matériau à très forte perméabilité latérale.

Pour recouvrir cet ensemble de propriétés, le terme de "paysage drainé" a été choisi parce qu'imaginé et commode, quoique trop précis. La majeure partie du polder Guini, la partie Nord du polder Bérin sont des paysages "drainés".

222. Paysages "marécageux".

Ce sont des secteurs des polders où la nappe phréatique reste toute l'année très peu profonde, subaffleurante ou même libre ; ceci par suite de la forte intensité des infiltrations, compensant les pertes par évaporation et par fuite latérale. La circulation latérale de l'eau est d'ailleurs réduite (ces paysages correspondent à des parties basses des polders) superficielle ou subsuperficielle. Une masse de roseaux très dense s'est implantée (Typha australis, Phragmites communis, Cyperus papyrus) et une litière spongieuse, de 3 à 30 cm d'épaisseur, recouvre des matériaux de consistance vaseuse. Les eaux croupissent dans ce paysage.

Les mécanismes régissant les modalités de l'accumulation saline dans la nappe sont dans ce cas liés à l'action de facteurs externes aux paysages (intensité des infiltrations) ou secondaires (développement de la végétation), et aux caractères propres des matériaux superficiels. Ceux-ci sont des vases, de la semi-tourbe, dont l'épaisseur atteint 60 cm. Leur perméabilité latérale est faible. Par contre, les caractères acquis par le "sol", en supposant que l'on puisse parler de sol, sont réduits et sans grande incidence.

La partie Sud du polder Bérin est un paysage marécageux.

III. CONCENTRATION DES EAUX DE LA NAPPE EN PAYSAGE DRAINE.

31. Les eaux d'infiltration.

Les eaux d'infiltration, arrivant au niveau des polders sur la bordure Ouest de Guini ou Nord-Est de Bérin sont caractérisées par : (TABLEAU I) * :

- une conductivité inférieure à 0,6 mmho ; un pH légèrement au dessus de la neutralité (entre 7,0 et 7,5) ; un potentiel red-ox nettement positif (+ 400 mVolts).
- une très forte dominance, parmi les anions, des bicarbonates ; le rapport HCO_3/SO_4 (toutes les valeurs ioniques étant exprimées en milliéquivalents par litre) est supérieur à 4.
- une dominance moindre des alcalino-terreux sur les alcalins ; le rapport Na/Ca étant généralement compris entre 0,5 et 1,0.

Ces caractéristiques chimiques des eaux d'infiltration les rapprochent donc des eaux du Lac, en notant toutefois, par rapport à ces dernières, une proportion plus forte des alcalino-terreux.

* Les tableaux de résultats analytiques sont présentés en annexe.

32. Les premières étapes de la conductivité de la nappe en paysage drainé et aéré (conductivité comprise entre 0,6 et 5 mmhos).

321. Prélèvements effectués en fin de saison sèche.

Le long d'axes des polders correspondant à un gradient de la nappe (Guini E.W., Bérim W.E.), on observe en saison sèche une modification des caractères chimiques de la nappe :

- la proportion relative du calcium par rapport au sodium diminue. Dans une première étape (0,6 L 1,5 mmhos), et lorsque la nappe est en contact, dans sa zone de battement, avec un niveau du sol très riche en CaCO_3 (25 % ou plus ; carbonatation ancienne), cette diminution est faible (lignes 4 et 5 du TABLEAU II : le rapport Na/Ca reste inférieur à 1) ; la diminution est plus rapide lorsque ce niveau est absent (figure 5). Dans une deuxième étape (1,5 L 5 mmhos), le rapport Na/Ca devient, dans tous les cas, supérieur à 2 (entre 2 et 4) (TABLEAU III). Le rapport Ca/Mg est en général proche de 2.

- les teneurs en sulfates et en bicarbonates augmentent simultanément, mais le rapport HCO_3/SO_4 , très élevé dans les eaux d'infiltration, diminue d'abord lentement, puis plus rapidement pour une conductivité supérieure à 1,5 mmho (2^e étape) ; il reste néanmoins supérieur à 1.

- le pH de ces eaux est légèrement inférieur à celui des eaux d'infiltration, entre 6,5 et 7,2 ; le potentiel red-ox encore positif, mais les valeurs (200 à 300 mv) inférieures à celles relatives aux eaux d'infiltration.

322. Influence du lessivage des sels du sol en saison des pluies.

Dans ces paysages, la nappe n'est pas très profonde (moins de 150 cm) ; la nature argileuse du sol, l'aridité du climat favorisent les phénomènes de remontée capillaire. En saison des pluies, en particulier lorsque les pluies sont très violentes, comme en Août 1967 (figure 2), les sels du sol sont lessivés, la nappe se sale. La figure 6a met nettement en évidence ce phénomène (polder Guini) :

- durant la 2^e partie de la saison sèche (Mars à Juin), la salinité de la nappe varie peu. Une étude précédente (CHEVERRY, 1965) a montré que la partie supérieure du sol est alors "mulchée" : formation d'un niveau du sol, en surface, très sec, ralentissant l'évaporation, bloquant la remontée capillaire.

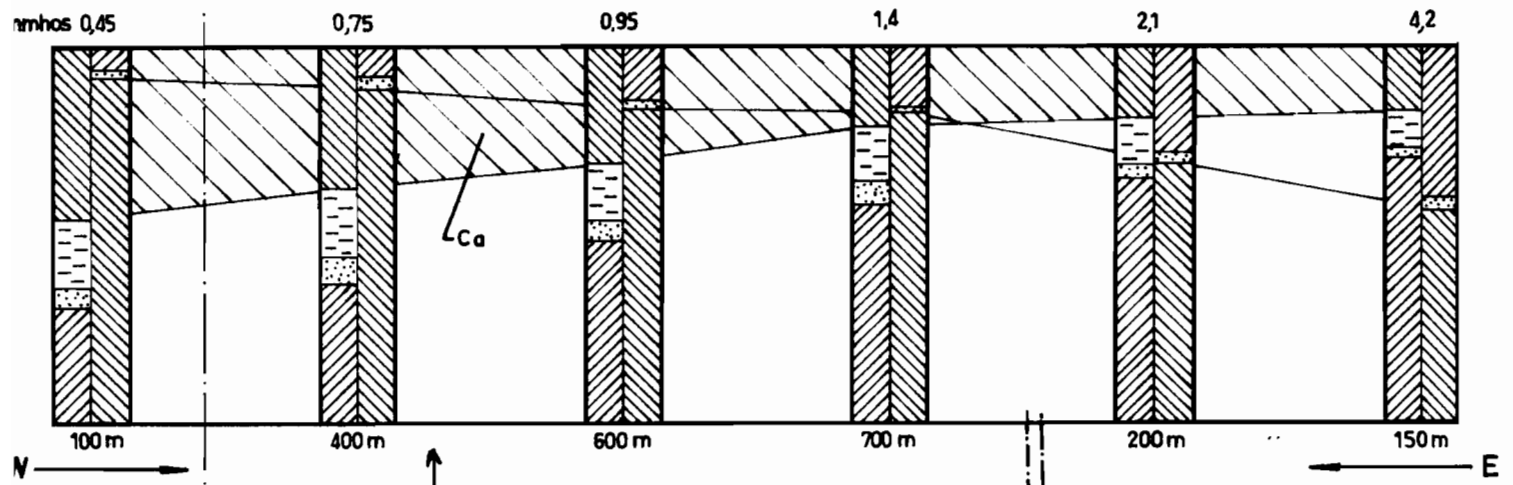
- en saison des pluies, après une série de très fortes pluies (Août 1967), les sels du sol sont lessivés. La salinité de la nappe, du moins celle de sa tranche supérieure (celle prélevée), augmente fortement, double. Cette augmentation est moins marquée en bordure Ouest (nappe plus profonde, faiblement minéralisée).

- en Novembre, deux mois après la fin des pluies, la nappe a déjà reperdu une partie de ses sels au bénéfice du sol.

Fig 5. CONCENTRATION DE LA NAPPE EN PAYSAGE DRAINE ET AERE

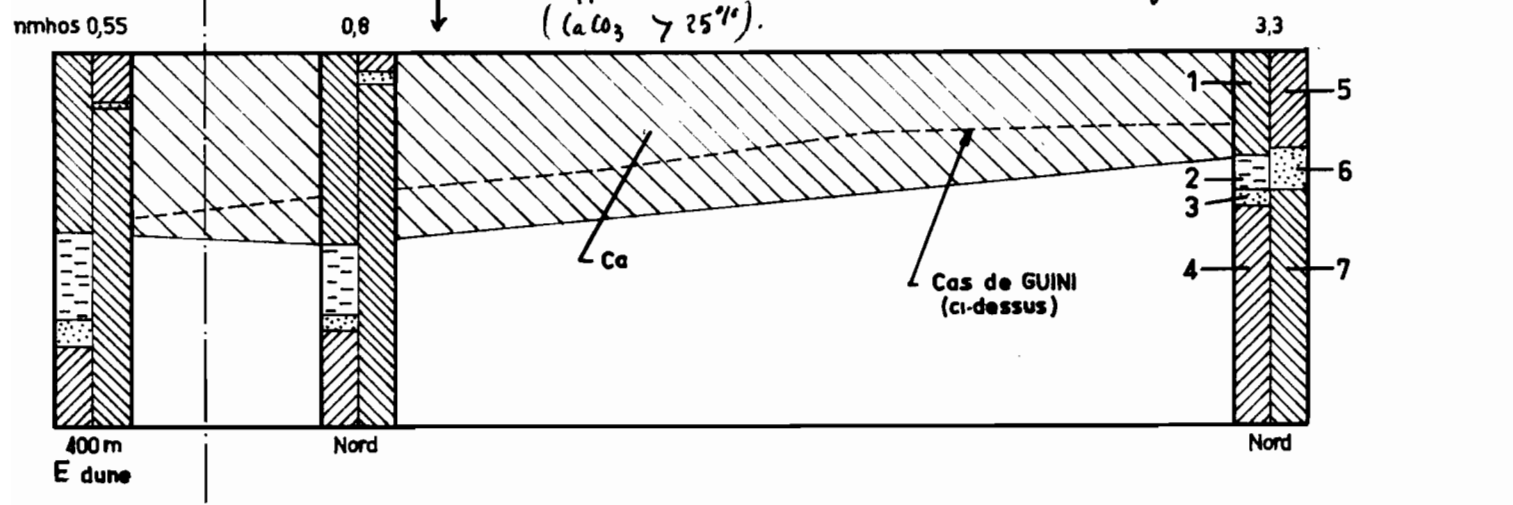
PREMIERES ETAPES DE LA CONCENTRATION

GUINI -



SECTEURS D'INFILTRATION

BERIM -



- | | | | | | | | | |
|---|--|----|---|--|-----------------|---|--|------------------|
| 1 | | Ca | 4 | | Na | 7 | | HCO ₃ |
| 2 | | Mg | 5 | | SO ₄ | | | |
| 3 | | K | 6 | | Cl | | | |

Les divers ions sont ici exprimés en % de la somme des ions de même signe.

Ce lessivage de saison des pluies, en provoquant une augmentation du degré de minéralisation de la nappe, entraîne une profonde modification de la proportion relative des ions (figures 6b et 6c) ; on note :

- une très forte augmentation de la proportion des sulfates par rapport aux bicarbonates (le rapport HCO_3/SO_4 devient inférieur à 1, pour une conductivité supérieure à 2 mmhos)
- une augmentation des teneurs en calcium et en sodium, la valeur du rapport Na/Ca diminuant.

Les valeurs relatives au mois de Novembre 1967, alors que le mécanisme de remontée des sels a déjà repris, confirment l'allure du phénomène.

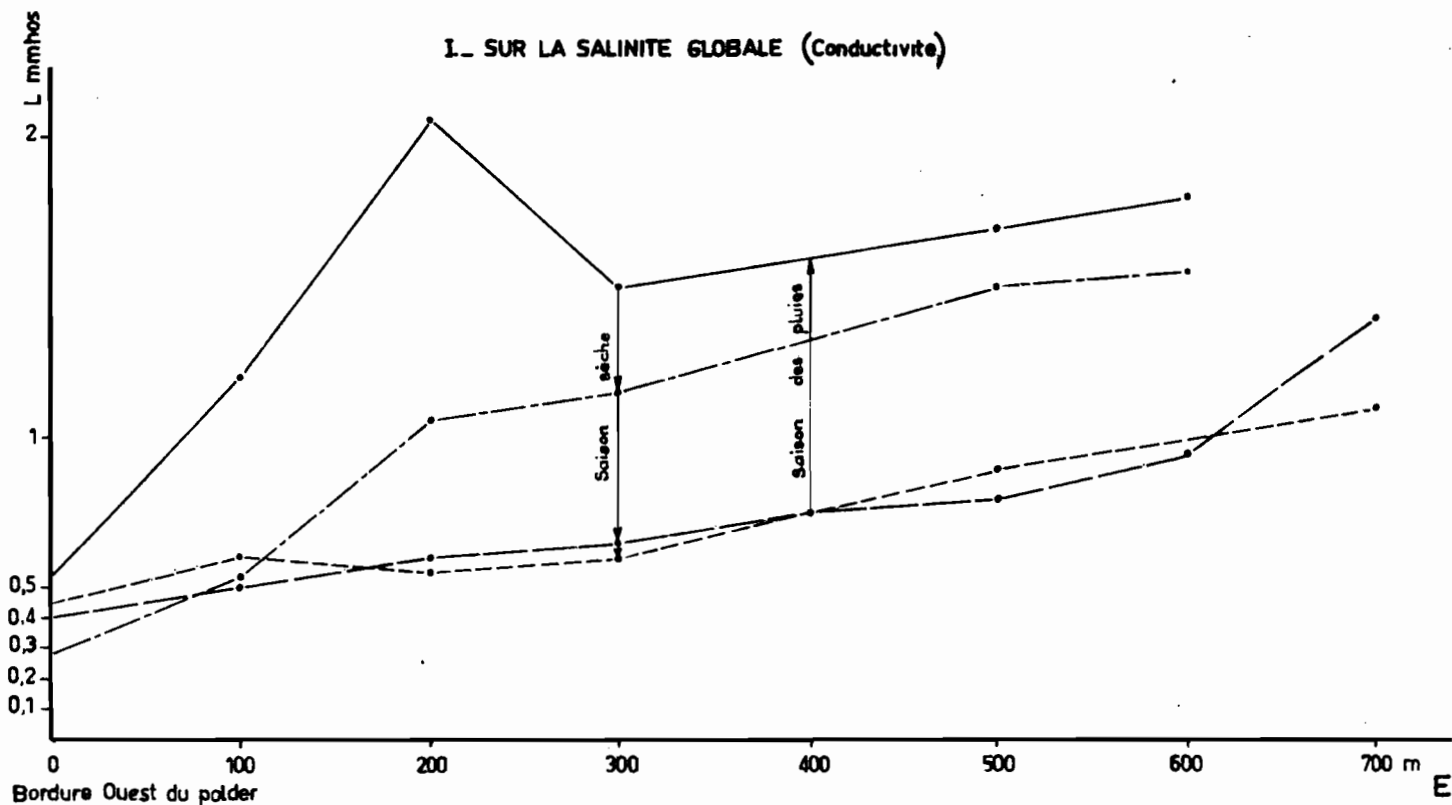
323. Conclusion : les mécanismes en jeu dans ces premières étapes de la concentration de la nappe en "paysage drainé et aéré".

Dans ces paysages, ce sont avant tout des mécanismes pédogénétiques, liés aux conséquences de l'aération, de la structuration du sol sur les modalités de la remontée capillaire de la réhumectation en saison des pluies qui règlent les variations de salinité de la nappe. Le sulfate de sodium s'accumule en surface du sol ; de bicarbonate de calcium précipite subsuperficiellement. En saison des pluies, la température élevée de l'eau permet la redissolution et le lessivage de ce sulfate de sodium, ceci lorsque la pluviométrie a dépassé une certaine valeur-limite (fixée vers 150 mm : CHEVERRY, 1965) ; l'enrichissement marqué de la nappe en calcium traduit un lessivage du bicarbonate de calcium, mais aussi probablement une certaine redissolution du CaCO_3 .

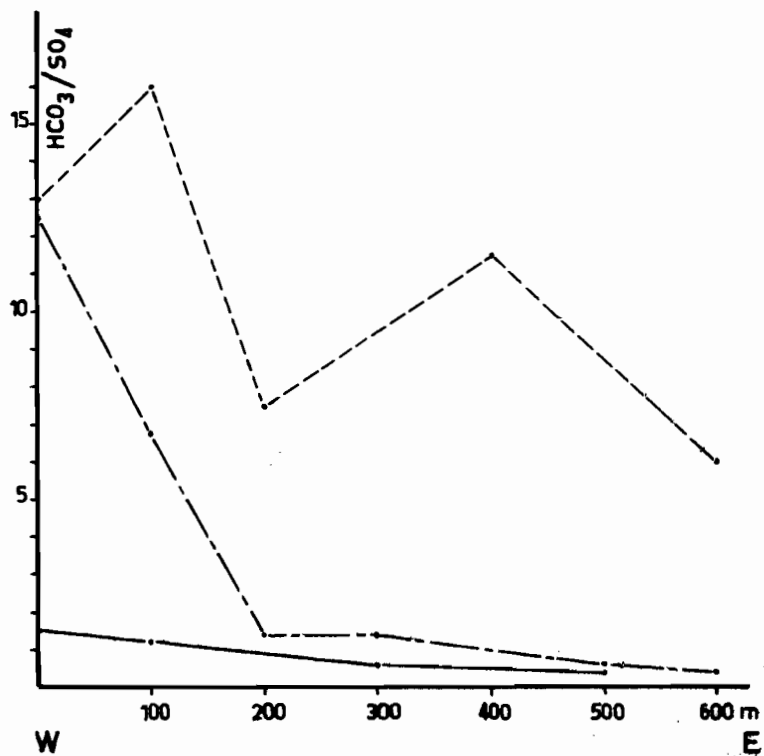
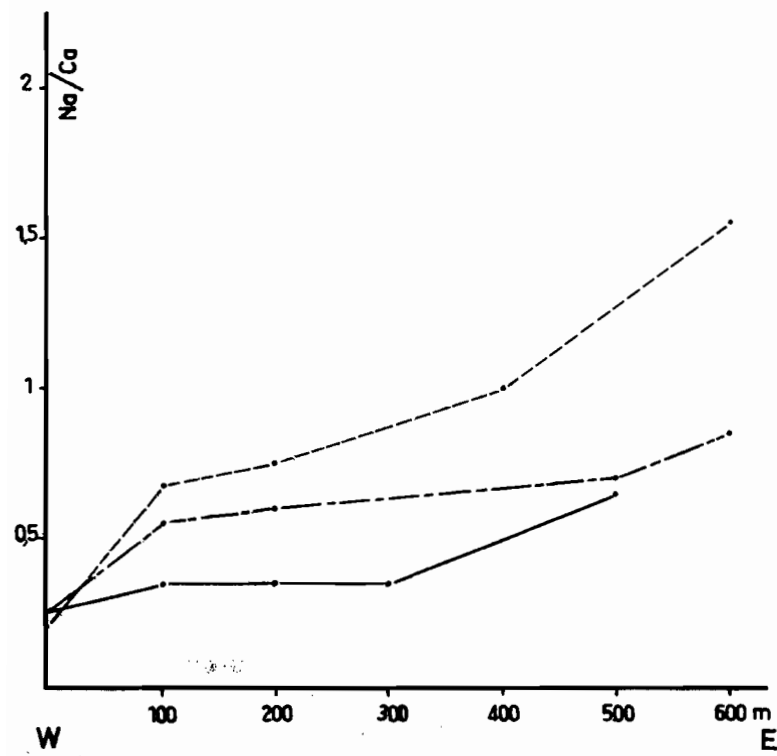
Les résultats sont encore trop peu nombreux et, surtout, la méthode d'investigation insuffisamment précise (difficulté de travailler sur une unité de volume sol-nappe définie) pour préciser cette interprétation et tenter un bilan des mouvements des divers ions au cours de l'année.

La présence dans le sol de niveaux très carbonatés (carbonatation ancienne, antérieure à la dernière phase sédimentaire) semble aller dans le sens d'un enrichissement relatif de la nappe en calcium et fournirait une explication à la richesse des eaux d'infiltration en calcium, par rapport aux eaux du Lac.

Fig.6. INFLUENCE DE LA SAISON DES PLUIES
SUR LES CARACTERES DE LA NAPPE PHREATIQUE



II. SUR LA COMPOSITION IONIQUE



... les concentrations sont exprimées en mg/l

33. Dernières étapes de la concentration de la nappe en paysage drainé.

Ces étapes ne sont observées que dans la partie Est du polder Guini ; en position basse, la concentration de la nappe est brutale ; sur 100 m, la conductivité passe de 2,5 à 20 mmhos. Dans sa zone de battement, la nappe est alors en contact :

- avec un niveau de carbonatation ancienne (30 cm d'épaisseur)
- avec un niveau enrichi en matière organique (2 à 10 cm d'épaisseur).

Ces matériaux particuliers, liés à la position topographique, ont une faible perméabilité intrinsèque. Mais leur épaisseur est réduite et le paysage lui-même reste "drainé" : la nappe est à plus de 25 cm de profondeur ; le gradient hydraulique W.E. de la nappe atteint et dépasse cette zone, comme le montre la répartition de la salinité de la nappe (figure 4).

331. Prélèvements en saison sèche.

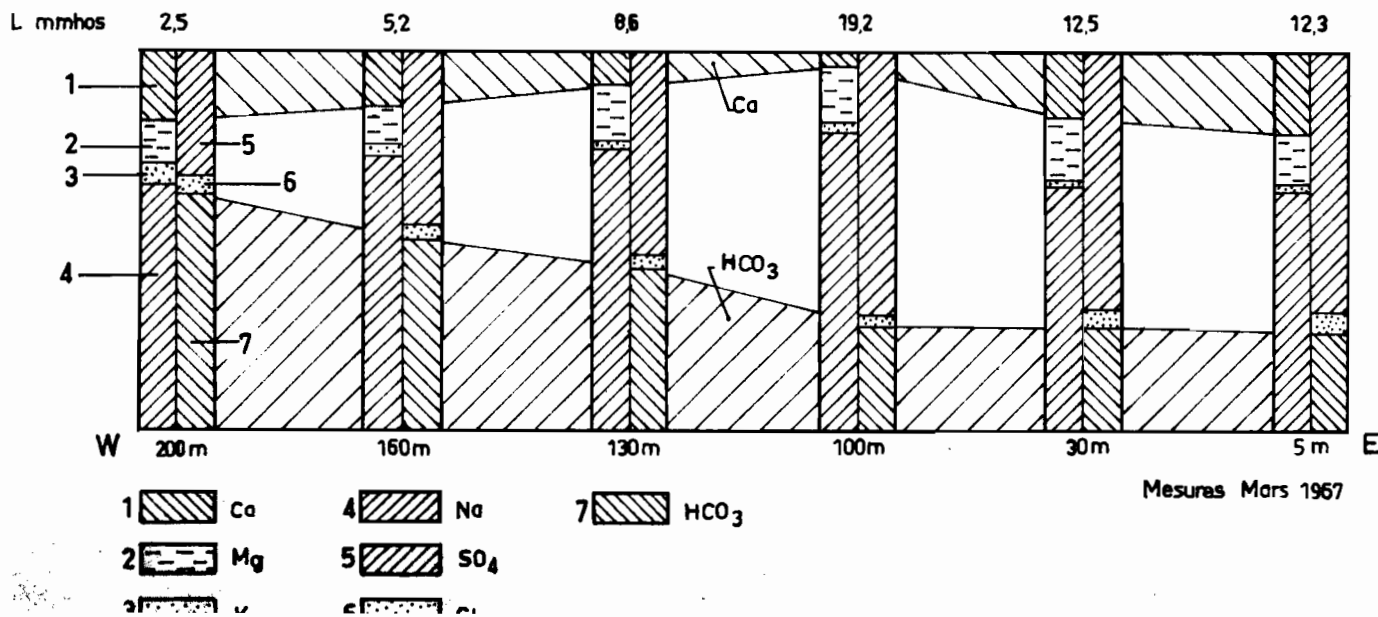
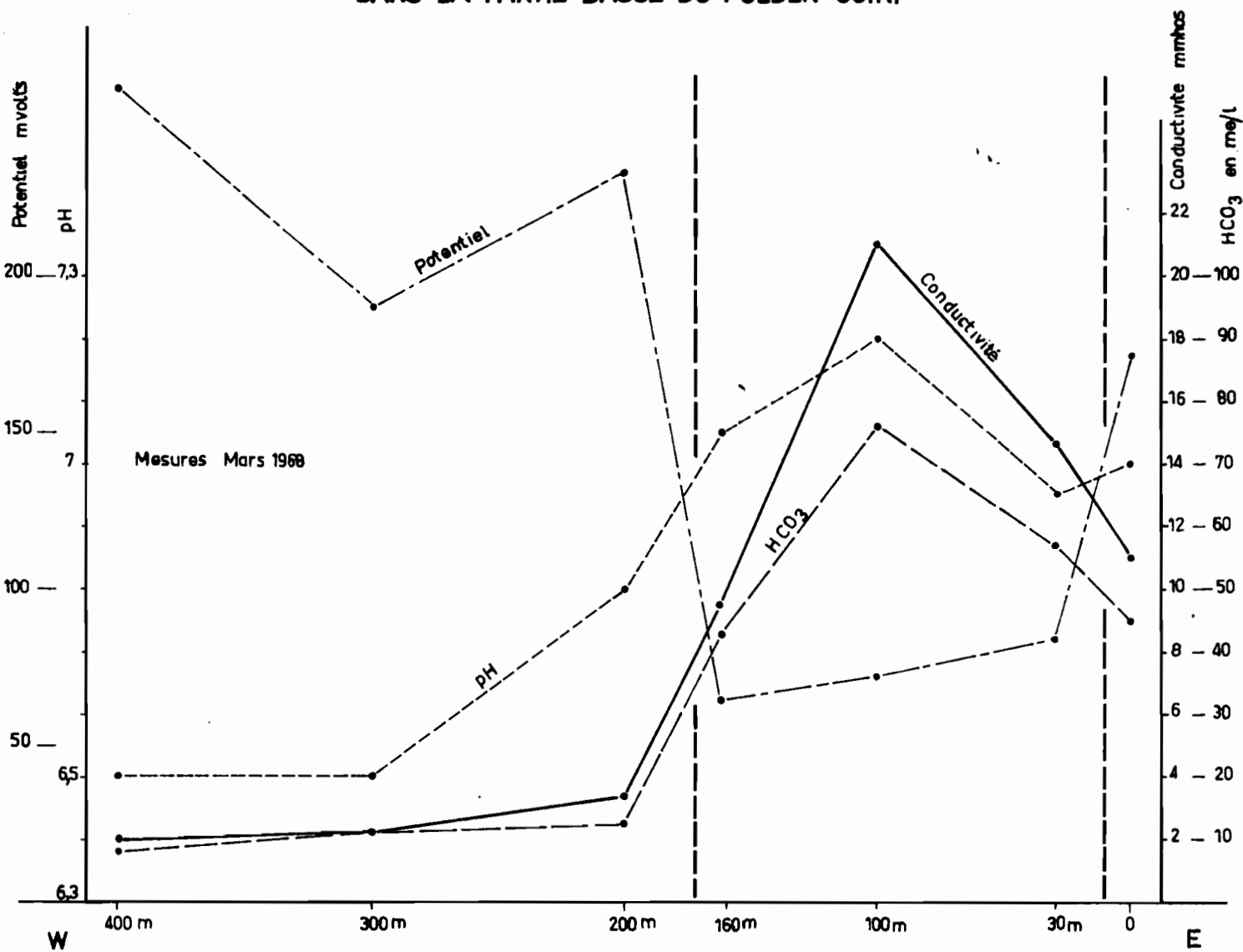
Une série de mesures et d'observations, effectuées sur le terrain en Mars 1968, mettent en évidence les modifications physico-chimiques que subit la nappe dans ces bas-fonds (figure 7) :

- les valeurs du potentiel d'oxydo-réduction de l'eau, supérieures à 200 mvolts dans les parties des polders précédemment évoquées, deviennent inférieures à 100 mvolts.
- le pH augmente significativement, passant de 6,5 à 7,2.
- la forte augmentation de la conductivité traduit notamment l'augmentation de la teneur en bicarbonates.
- dans la zone de battement de la nappe, on observe sur le sol des taches sombres qui correspondent à des sulfures (sur les débris végétaux également).

L'étude chimique de la nappe (Mars, Juin 1967) (tous les composés solubles du soufre apparaissent, après oxydation, à l'état de sulfates) montre :

- une augmentation de la proportion relative du sodium parmi les cations (80 % de la somme des cations), une forte diminution de celle du calcium alors que celle du magnésium reste constante ou augmente légèrement.
- une augmentation de la proportion des sulfates, malgré les teneurs élevées en bicarbonates ; la proportion des chlorures reste faible.

Fig 7. CONCENTRATION DE LA NAPPE
DANS LA PARTIE BASSE DU POLDER GUINI



332. Prélèvements en saison des pluies ou après la saison des pluies (Novembre 1967).

L'influence de la saison des pluies sur ces nappes fortement minéralisées est moins marquée, pour ce qui est des variations de la répartition des ions, qu'elle ne l'était sur les nappes moins salées. Ceci en raison des fortes valeurs ioniques des divers ions en saison sèche (TABLEAU IV).

333. Conclusion : les mécanismes en jeu dans ces dernières étapes de la concentration de la nappe.

Les modifications physico-chimiques que subit la nappe dans ces bas-fonds tiennent à :

- la forte concentration de la nappe
- au degré d'engorgement, marqué, du sol, à la présence à faible profondeur de matière organique peu décomposée (production de CO₂, réduction partielle des sulfates) (CHEVERRY, 1968).

C'est dire que les facteurs pédogénétiques jouent encore ici un grand rôle dans la régulation des caractères chimiques de la nappe, en particulier parce qu'ils déterminent le degré d'engorgement du milieu et ses variations. Mais, contrairement au cas précédent décrit (323), des facteurs liés aux caractères des matériaux eux-mêmes (richesse en matière organique, faible perméabilité de certains d'entre eux) deviennent également déterminants.

En ce sens, les mécanismes observés dans ces bas-fonds, en paysage malgré tout drainé, constituent un amalgame des mécanismes propres aux paysages très bien drainés (323) et de ceux propres aux paysages mal drainés (chapitre IV).

34. Synthèse des phénomènes d'accumulation de sels dissous dans les eaux de la nappe phréatique en paysage drainé.

Cette synthèse sera tentée en suivant les variations des divers ions en fonction de la concentration de la nappe, exprimée par la conductivité, ou par la somme des ions de même signe. Les résultats utilisés ne sont plus seulement ceux relatifs à des prélèvements répartis sur certains axes privilégiés des polders, mais à des prélèvements répartis sur l'ensemble des deux polders, dans des paysages "drainés".

.../...

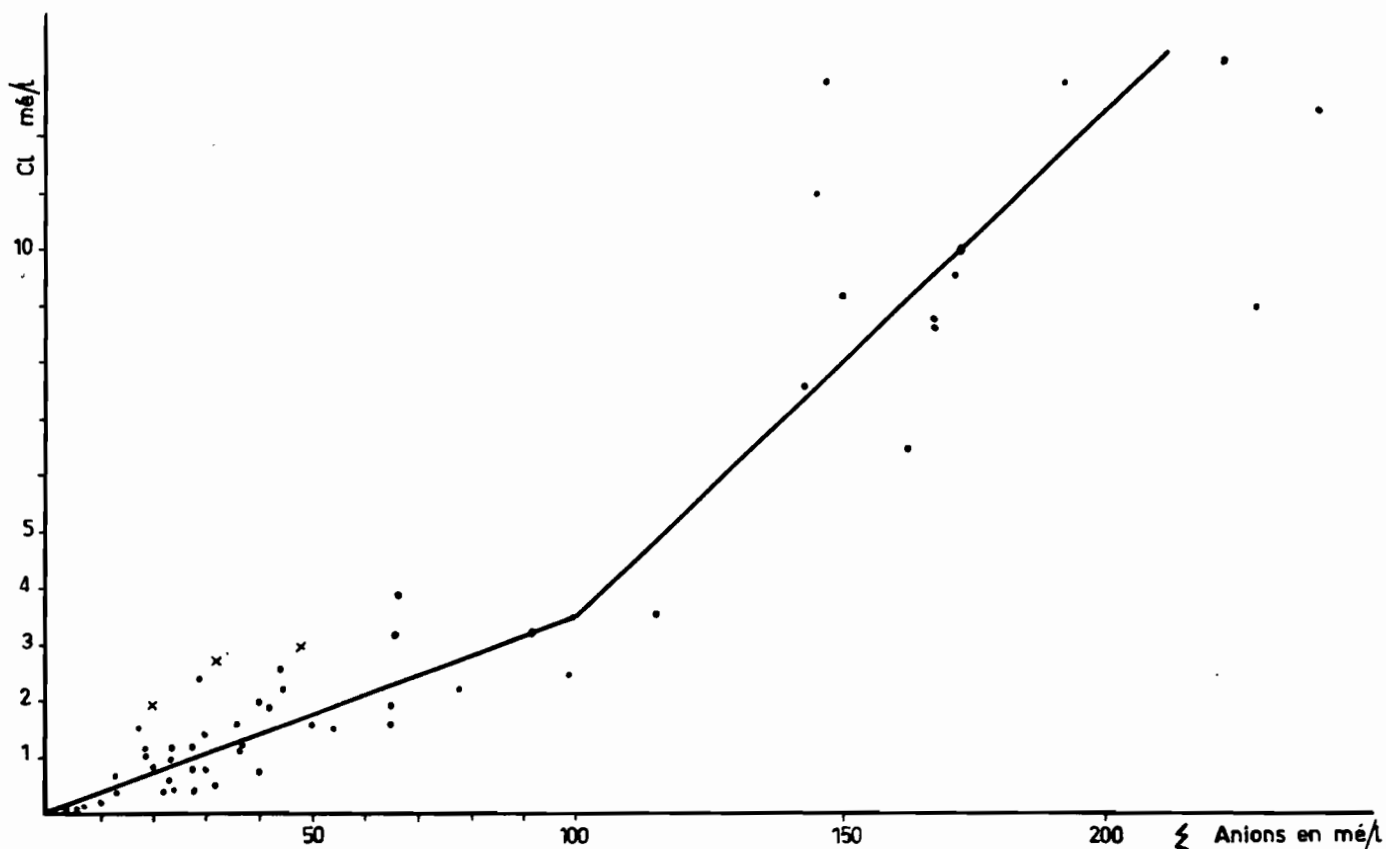
341. Les chlorures.

Cet anion est très faiblement représenté. Sa teneur croît en même temps que la concentration de la nappe. La courbe chlorures (me/l) = / (somme des anions en me/l) est constituée de 2 droites (figure 8) :

- une droite de pente très faiblement (0,035) pour les conductivités inférieures à 10 mmhos.
- une droite de pente plus forte (0,09) pour les conductivités comprises entre 10 et 20 mmhos.

Les chlorures, dans la gamme de nappes étudiée, ne représentent donc jamais plus de 10 % de la somme des anions.

Fig 8 - VARIATIONS DE LA TENEUR DE L'ION CHLORE DANS LES EAUX EN FONCTION DE LA CONCENTRATION



342. Les bicarbonates.

En paysage drainé, les mesures du pH de l'eau ont toujours donné des valeurs inférieures à 8,2, ce qui explique l'absence de carbonates. La corrélation $\text{HCO}_3^- \text{ me/l} = (\text{conductivité, mmhos})$ s'exprime par une courbe se décomposant en 3 droites :(figure 9) :

- pour les conductivités inférieures à 1 mmho, la pente de la droite est très forte : 9 *
- pour des conductivités comprises entre 1 et 3 mmhos, cette pente est de 6
- enfin, pour les conductivités élevées, cette pente n'est plus que de 3.

Après la saison des pluies, les teneurs en bicarbonates, à conductivité égale, sont nettement plus faibles. La courbe $\text{HCO}_3^- = (L)$ est assez différente de celles couramment présentées (KOVDA, 1964), où les bicarbonates, pour des conductivités supérieures à 10 mmhos, ne tiennent plus qu'une place réduite. Cette différence est due à l'importance des phénomènes "générateurs de CO_2 " (SCHOELLER,) dans certaines parties basses des polders.

343. Les sulfates.

Les sulfates sont très peu représentés dans les eaux du Lac. La méthode gravimétrique est insuffisamment fine pour mettre en évidence leur présence, pourtant extrêmement probable. Dans les eaux d'infiltration, les teneurs sont comprises entre 0,1 et 0,5 me/l. La concentration en sulfates croît de plus en plus rapidement avec la conductivité (figure 9). Rappelons que, dans les points bas, les méthodes analytiques actuelles ne nous permettent pas d'étudier sous quelle forme sont les composés solubles du soufre. Dans ces zones, on observe à la surface d'une nappe ouverte à l'air libre depuis quelques jours une pellicule irisée (sulfures solubles peut-être) et des punctuations solides jaunâtres (soufre naissant probablement).

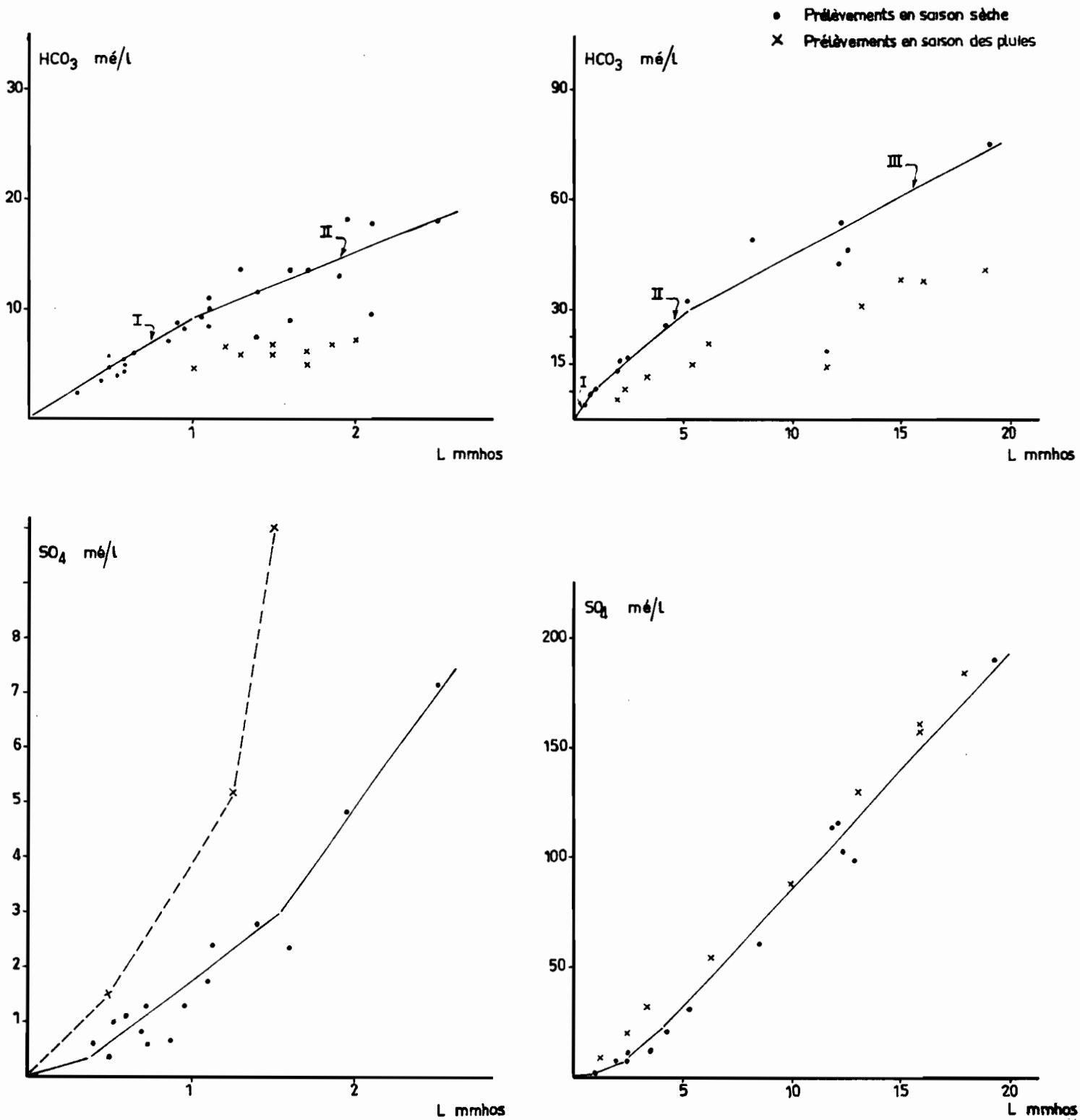
344. Les cations.

La concentration des eaux de la nappe se traduit par une diminution de la proportion relative du calcium parmi les cations. C'est là une conséquence normale du processus de précipitation du carbonate de calcium dans les sols.

* Suivant les figures, l'échelle des abscisses correspond soit à la conductivité de la nappe (mmhos), soit à la somme des ions de même signe (me/l). Il existe entre ces deux grandeurs une relation : Somme des ions de même signe (en me/l) = 10 x L (mmhos). Pour des conductivités supérieures à 10 mmhos, cette relation est moins exacte ; la somme des ions est alors supérieure à 10 L. Une pente $\text{HCO}_3^- (\text{me/l}) = 9 L (\text{mmhos})$ exprime donc que les bicarbonates représentent près de 90 % des anions.

Fig 9 - RELATIONS ENTRE CONCENTRATION DE LA NAPPE
ET TENEURS EN ANIONS HCO_3 — SO_4

— Paysages drainés —



Deux points particuliers méritent d'être signalés :

- dans certains points bas du polder Guini (Fig. 7, 100 m E. dune), la proportion du calcium est particulièrement faible et le rapport Ca/Mg, ailleurs voisin de 2, devient inférieur à l'unité.

Ceci est mis en relation avec une certaine alcalisation de la nappe, une alcalisation plus marquée du sol (pH 8,9), une forte précipitation, "chimique", de CaCO_3 :

- en extrême bordure Est du polder Guini par contre, les teneurs en calcium, en égard de la conductivité de la nappe, sont élevées. Dans le sol, on note la présence de sulfate de calcium (gypse) ; le même phénomène est observé dans certaines parties Nord du polder, sans que le mécanisme en soit compris.

355. Représentations graphiques.

Les diagrammes de HILL - PIPER, de SCHOELLER - BERKALOFF sont des instruments de travail commodes pour résumer graphiquement les grands traits de cette évolution des caractères chimiques de la nappe lorsqu'elle se concentre.

Les deux représentations figurent en annexe (Fig. 11 et 12).

IV. CONCENTRATION DES EAUX DE LA NAPPE EN PAYSAGE MAL DRAINE.

41. Mode de concentration "alcalin".

Un tel paysage s'observe dans la partie Sud du polder Bérin. Les eaux de la nappe, libres ou subaffleurantes, stagnent au contact d'une litière assez épaisse. Une végétation dense de roseaux est implantée. Les matériaux superficiels du "sol" ont une très faible perméabilité et en certains points, un niveau semi-tourbeux atteint 70 cm d'épaisseur.

.../...

Dans ce paysage, on observe un gradient de concentration croissante de la nappe (Fig. 4), dans une gamme allant de 0,2 à 6 mmhos. Les modifications des caractères physico-chimiques de la nappe lorsqu'elle se concentre sont très différentes de celles décrites dans le cas des paysages drainés (mode de concentration qualifié d' "alcalin ") :

- les eaux ont un potentiel d'oxydo-réduction faiblement positif et, localement, négatif. Leur pH est légèrement basique, toujours supérieur à 7, parfois à 8 (traces de carbonates)
- la teneur en bicarbonates augmente proportionnellement à la concentration globale en anions ; la pente de la droite $\text{HCO}_3 \text{ me/l} =$ (Somme des anions) est constante et forte : 0,9 (Fig. 10).

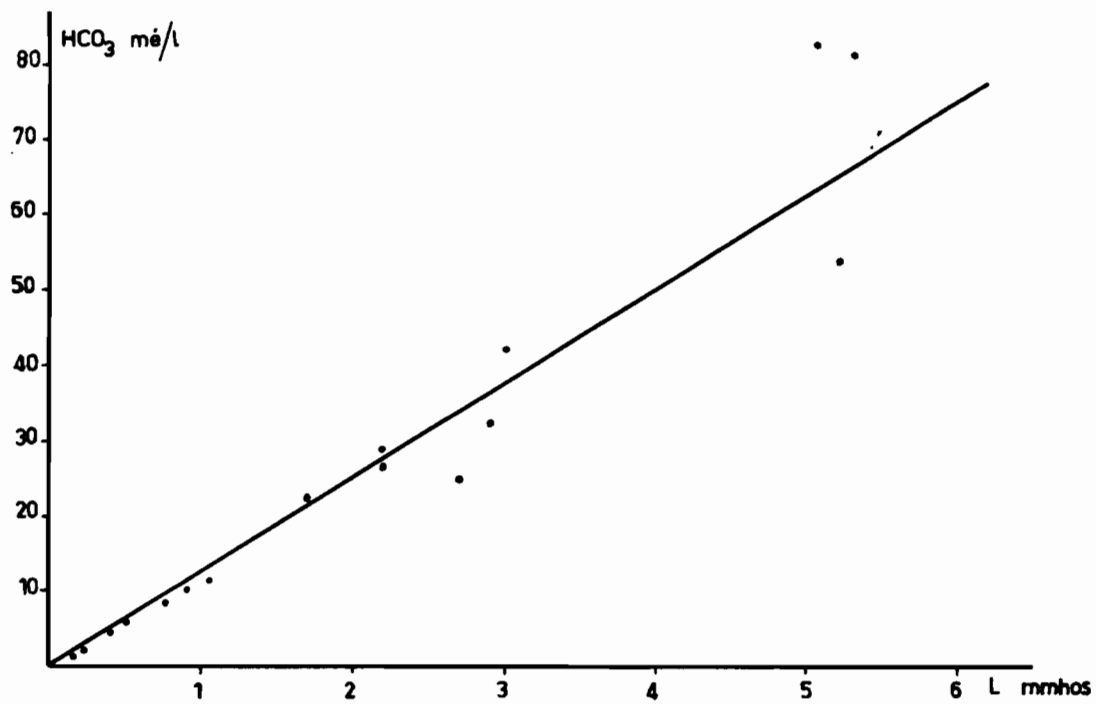
Dans ces eaux et pour des salinités globales comparables, les bicarbonates sont donc beaucoup plus représentés que dans le cas des paysages drainés :

- localement, on observe dans le sol des taches de sulfures.

Le tableau ci-dessous, présente les résultats d'une série de mesures effectuées en Mars 1968, à Bol même, illustrant ces caractères particuliers.

Localisation - état de la nappe - végétation	Conducti - vité mmhos	pH	Potentiel red-ox	$\text{HCO}_3 \text{ me/l}$
-En contre-bas, côté polder, du barrage ; nappe d'eau libre de 20 cm d'épaisseur ; végétation type prairie.	0,23	6,9	+ 455	2,1
-100 m Nord du barrage ; petite plate- forme cultivée en canne à sucre ; nappe à 30 cm de profondeur.	0,40	6,7	+ 440	4,5
-Ruisseau d'eaux d'infiltration, à 250 m au Nord du polder ; eau courante.	0,74	7,4	+ 420	8,6
-300 m au Nord du barrage ; nappe sta- gnante, à 15 cm de profondeur, sous une litière de débris végétaux ; végétation dense de roseaux.	0,89	7,25	+ 115	10,1

Fig 10 - VARIATIONS DE LA TENEUR DE LA NAPPE EN HCO_3
EN PAYSAGE MAL DRAINE (BERIM-SUD)



Prélèvements de Mars 1968

Le long d'une autre séquence :

	Conducti - vité mmhos	pH	Potentiel red-ox	HCO ₃ me/1
- Prairie ; nappe à 14 cm ; taches de sulfures dans le sol.	2,7	7,15	+ 30	25,2
- Végétation dense de roseaux ; nappe à 25cm ; taches de salant noir sur la surface du sol, là où elle est dénudée.	5,2	7,5	- 35	54
- Nappe d'eau libre de 15 cm d'épaisseur ; végétation de roseaux ; litière.	1,7	8,0	- 85	22,6
- Nappe stagnante ; litière très dense.	5,1	7,8	- 5	85

Du point de vue des cations (tableau VI - Analyses effectuées à Fort-Lamy), ces eaux sont caractérisées par la très nette dominance du sodium sur le calcium, même pour des faibles conductivités.

Le rapport Ca/Mg est proche de la valeur 2. Parmi les anions, la dominance des bicarbonates est encore nettement accentuée dans les points où sont observés des phénomènes de réduction des sulfates (taches de sulfures dans le sol, odeur de H₂S) (TABLEAU VI).

42. Les mécanismes en jeu (se reporter au).

La dynamique de cette évolution suppose, pour que les conditions marécageuses soient entretenues, l'action de facteurs "externes" (permettant une intensité suffisante des infiltrations) ; la litière, autre élément typique de ce milieu favorable aux phénomènes "générateurs de CO₂", est un facteur secondaire. Par contre l'action de facteurs proprement pédogénétiques est réduite par le fait qu'il n'y a pas de véritable "sol".

Ce mode d'évolution "alcalin" de la nappe apparaît donc comme lié à un milieu particulier. Une étude est en cours, dans la partie centrale du polder Bérin, pour voir comment évolue la nappe (et les sols) lorsqu'il y a par suite d'un abaissement du plan d'eau, assèchement et "drainage" du paysage.

V. CONCLUSION

(Rédaction provisoire qui sera reprise en cas de publication de cette note).

Deux milieux, drainé et marécageux, deux modes de concentration des eaux de la nappe ont été décrits (sommairement pour la voie "alcaline" en milieu marécageux). Cette distinction permet l'approche de plusieurs problèmes :

- la voie "alcaline" apparaît comme liée à des conditions particulières et dans ce sens "transitoire". Comment cette voie, si elle rejoint ultérieurement, par suite d'un certain assèchement du milieu, la voie des milieux drainés, aura-t-elle marqué de son empreinte, irréversible ou non, les matériaux, le sol lui-même et ainsi en quelque sorte prédéterminé la pédogenèse ultérieure ?

- la présence, en certaines positions topographiques, de niveaux fortement carbonatés (carbonatation ancienne) est, elle aussi, une condition particulière. Quel rôle joue-t-elle sur la nature chimique des nappes, leur évolution ultérieure ?

C'est pour aborder ces problèmes que cette distinction entre deux milieux a été tentée. En fait elle est trop brutale pour traduire la réalité ; elle rend par ailleurs délicate la caractérisation de milieux "intermédiaires" (bordure Est du polder Guini par exemple, 333). Le mécanisme à l'échelle d'un polder (de ses parties hautes vers les parties basses) est probablement unique.

Cette distinction est donc à considérer comme un outil de travail.

DIAGRAMME
D'ANALYSE D'EAU

Par M. V. HOFFER
R. S. HENKALOFF

LEGENDE

Figure	no	Réa sec mg/l	ρ ohms/cm	ds	pH
/Bordure Ouest					
3 m	1	-			8,0
200 m	2	0,47			7,6
600 m	3	0,74			7,7
700 m	4	1,15			7,7
800 m	5	1,53			7,9
900 m	6	3,22			7,9
/Bordure Est					
160 m	7				
130 m	8				
100 m	9				

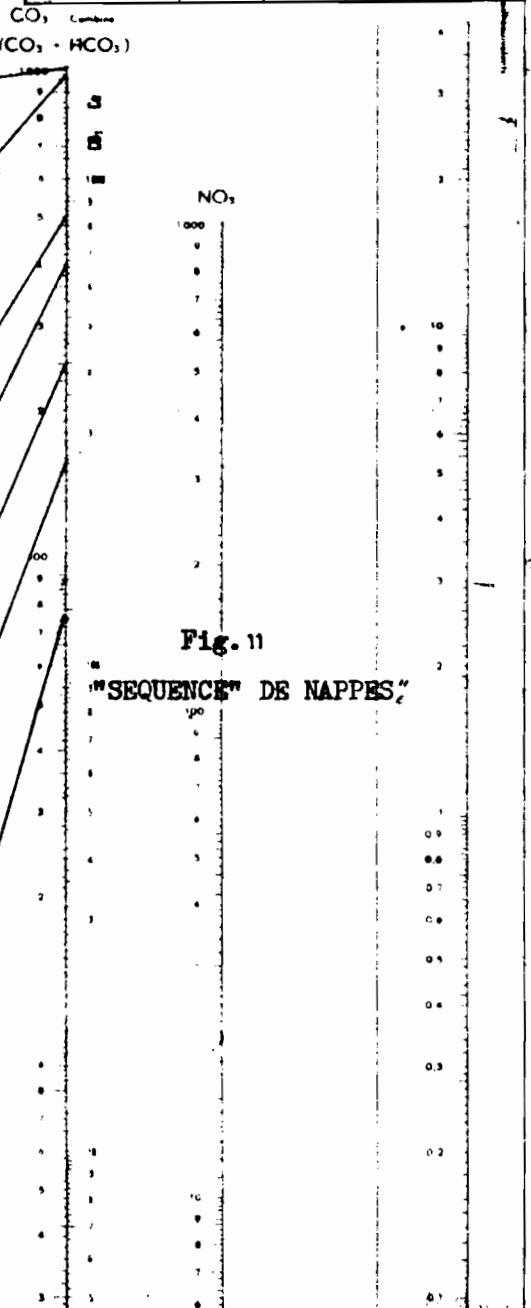
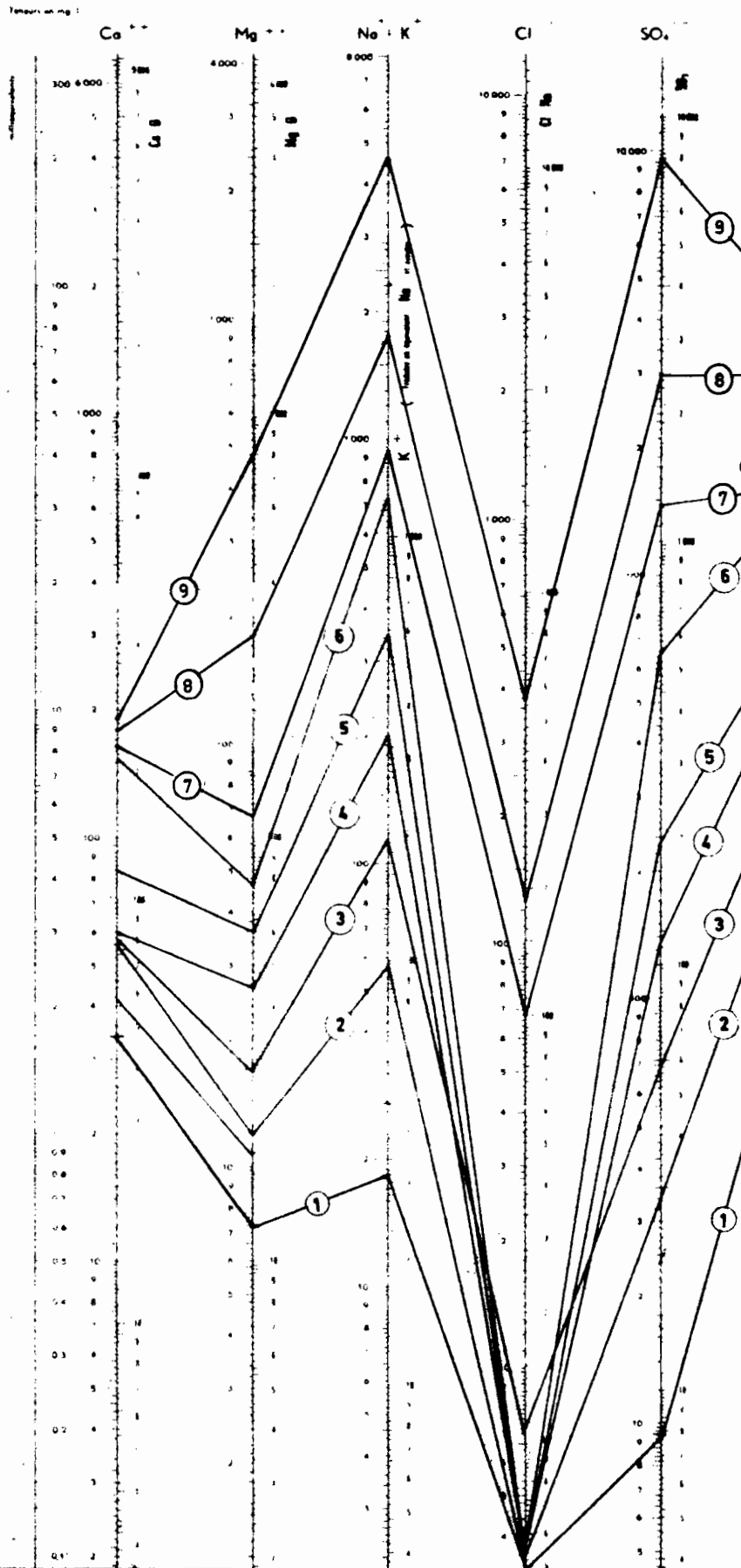


Fig. 11
"SEQUENCE" DE NAPPES

- TABLEAU I -

COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX D'INFILTRATION

Localisation du prélèvement	Date	L mmhos	R.S. g/l	Ca me	Mg me	K me	Na me	S ⁺ me	HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ⁻ me	SO ₄ me	Cl me	S ⁻ me
Guini- Bas de dune Ouest	11/67	0,29		1,7	0,6	0,4	0,4	3,1	2,6	0,2	0,1	2,9
Guini - Station Matafo	7/66	0,45		1,7	1	0,2	1,7	4,6	4,2	0,4	0,3	4,9
Guini - 100 m E. dune	3/67	0,5	0,45	2,5	1,0	0,3	1,7	5,5	4,9	0,3	0,1	5,3
Bérim - 400 m W. dune	6/67	0,55	0,43	2,7	1,4	0,4	1,3	5,8	4,3	0,8	-	5,1
Bérim - 600 m W. dune	6/67	0,60	0,46	3,0	1,2	0,4	1,6	6,2	4,6	1,1	-	5,7

- TABLEAU II -

VARIATIONS DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE
dans les premières étapes de sa concentration en paysage
drainé.

A. 0,6 Conductivité 1,5 mmhos

1^o) Dans sa zone de battement, la nappe n'est pas en contact avec un niveau du sol très carbonaté
(CaCO₃ 25 %)

Localisation	Date	L mmhos	R.S. g/l	Ca me/l	Mg me/l	K me/l	Na me/l	S ⁺ me/l	HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ⁻ me/l	SO ₄ me/l	Cl me/l	S ⁻ me/l
Guini - 400 m E. dune	3/67	0,75	0,58	2,9	1,4	0,7	2,9	7,9	6,9	0,6	0,2	7,7
Guini - 600 m E. dune	3/67	0,95	0,74	2,9	1,4	0,5	4,5	9,3	8,2	1,4	0,2	9,8
Guini - 700 m E. dune	3/67	1,4	1,15	3,0	2,2	0,6	8,2	14,0	13,1	2,8	0,1	16,0
Bérim - 450 m W. dune	3/67	0,85	0,68	3,4	1,6	0,6	3,5	9,1	7,2	0,7	0,2	8,1
Bérim - 600 m W. dune	3/67	1,3	0,96	5,3	2,2	0,7	5,8	14,0	14,6	0,8	0,2	15,6

- TABLEAU II (suite) -

2°) Dans sa zone de battement, la nappe est en contact avec un niveau du sol très carbonaté
(CaCO₃ 25 %)

- Sols avec un niveau très carbonaté (CaCO₃ supérieur à 25 %) à faible profondeur : (le rapport Ca/Na dans l'eau de la nappe reste supérieur à 1).

			L	Ca	Mg	K	Na	S ⁺	HCO ₃	SO ₄	Cl	S ⁻
Bérim Nord	H1	1966	0,85	4,6	2,0	0,5	1,8	8,9	7,0	1,2	0,6	8,8
Bérim Nord	H3	1966	0,8	4,6	2,1	0,5	1,9	9,1	7,9	0,3	0,3	8,5

- TABLEAU III -

B. 1,5 Conductivité 5 mmhos

Localisation	Date	L mmhos	R.S. g/l	Ca me/l	Mg me/l	K me/l	Na me/l	S ⁺ me/l	HCO ₃ me/l	SO ₄ me/l	Cl me/l	S ⁻ me/l
Guini - 800 m E. dune	3/67	1,95	1,55	4,2	3,0	0,9	14,1	22,2	16,7	4,8	0,1	21,6
Guini - 900 m E. dune	3/67	3,65	3,22	7,7	3,9	1,6	29,5	42,7	31,9	13,4	0,1	45,4
Guini - 200 m W. dune	6/67	2,1	1,73	4,3	2,9	0,7	14,5	22,4	15,9	7,2	0,5	23,6
Guini - 150 m W. dune	6/67	4,2	3,59	8,2	4,6	1,0	32,4	46,2	27,9	20,7	1,6	50,2
Bérim Centre	1966	1,9		4,3	1,8	1,2	13,5	20,8	12,8	5	2,5	20,3
Bérim Nord	1966	3,3		11,5	3,7	1,4	24,5	41,1	24,7	10,2	3,7	38,6
Bérim Sud	1966	2,1		5,1	3,2	1,1	14	23,4	18,2	7,0	1,0	26,2

- TABLEAU IV -

VARIATIONS DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE

Dans les premières étapes de sa concentration en paysage drainé - Résultats relatifs à la saison des pluies.

Localisation	Date	L mmhos	R.S. g/l	Ca me/l	Mg me/l	K me/l	Na me/l	S ⁺ me/l	HCO ₃ me/l	SO ₄ me/l	Cl me/l	S ⁻ me/l
Guini - 100 m E. dune	8/67	1,2		7,7	2,3	1,1	2,7	13,8	7,0	5,2	0,1	12,3
Guini - 200 m E. dune	"	2,1		14,2	4	0,5	4,7	23,4	3,9	15,3	0,2	19,4
Guini - 300 m E. dune	"	1,5		10,7	2,6	0,5	3,6	17,4	5,9	10,5	0,2	16,6
Guini - 500 m E. dune	"	1,7		9	3	0,6	5,9	18,5	4,1	10,9	0,3	15,3
Bérim Nord - H1 (niveau carbonaté)	"	1,8		11,6	4,3	0,9	4,8	21,6	11,4	8,7	0,9	21
Bérim Nord	"	3,2		13	4,2	0,8	19	37	11,5	17,6	2,7	31,8
Bérim Nord	"	1,9		3,6	2,2	1,5	12,2	19,4	7,1	10,1	1,9	19,1

- TABLEAU V -

COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE LA NAPPE DONT LA CONDUCTIVITE EST SUPERIEURE A 5 MMHOS, EN PAYSAGE DRAINE.

(distances exprimées en mètres par rapport à la bordure Est du polder Guini)

A. Prélèvements de saison sèche.

Emplacement Prélèvement	Date	Prof ^r cm	L mmhos	R.S. g/l	SO ₄ me/l	HCO ₃ me/l	Cl me/l	S ⁻ me/l	Ca me/l	Mg me/l	K me/l	Na me/l	S ⁺ me/l
200 m		69	2,5	1,93	9,7	18,2	1,3	29,2	4,9	3,1	1	17	26
160 m		51	5,2	4,5	30,2	32,7	1,9	64,8	8,2	5,6	1,4	38,2	53,4
130 m	Mai		8,6	7,6	61,5	49,6	3,5	114,6	9,1	14,6	2,2	73	99
100 m	1967	50	19,2	20,3	191,4	74,5	10,6	276,5	9,6	39,9	6,3	188	243,8
30 m	Juin	98	12,5	12,4	115,7	45,8	9,6	171,1	27,2	24,7	2,1	98,0	152
5 m	1967	120	12,3		116	42	8,8	166,8	34,4	23,5	1,6	94,4	153,9

- TABLEAU V (suite) -

B. Prélèvements aux mêmes emplacements après la saison des pluies (Novembre 1967).

	Date	Prof ^r cm	L mmhos	R.S. g/l	SO ₄ me/l	HCO ₃ me/l	Cl me/l	S ⁻ me/l	Ca me/l	Mg me/l	K me/l	Na me/l	S ⁺ me/l
200 m	11/67	53	5,3	4,8	46,5	16,6	1,6	64,7	15,8	6,6	1,3	37	60,7
160 m	"	34	10,2		87	47,2	11	145,2	27,8	16,7	7	81	125,5
130 m	"	37	13,2	12,6	130	49,2	13	192,2	22,7	22,5	4,2	118	167,4
60 m	"	28	17,9	18,3	186	49,2	12,5	248,7	29,4	31	6	161	227,4
30 m	"	74	15	16,6	161	48,5	13,4	222,9	37,9	25,4	2,3	134	199,6
5 m	"	94	13,1	13,9	101,5	32	13	146,5	28,5	21,4	2	116	167,9

- TABLEAU VI -

CARACTERES CHIMIQUES DE LA NAPPE, EN FONCTION DE SA CONCENTRATION, EN MILIEU MAL DRAINE.

Localisation	Date	L mmhos	R.S. g/l	Ca me/l	Mg me/l	K me/l	Na me/l	S ⁺ me/l	HCO ₃ + CO ₃ me/l	SO ₄ me/l	Cl me/l	S ⁻ me/l
--------------	------	------------	-------------	------------	------------	-----------	------------	------------------------	---	-------------------------	------------	------------------------

Bordure du polder.

8 m dune	11/67	1,7	1,35	2,6	0,9	0,9	11,9	16,3	9,6	7,2	1,7	18,5
65 m dune	10/66	1,1		0,8	0,4	0,3	8,7	10,2	6,2	2,3	1,9	10,4
100 m dune	11/67	1,7	1,2	2,2	1,2	0,6	12,4	16,4	9,7	6,9	1,5	18,1

Points bas - Réduction biologique des sulfates.

150 m dune	3/67	1,7	1,18	1,3	0,7	0,2	14,6	16,8	16,7	0,9	1,1	18,7
idem	11/67	2,4	1,55	2,3	0,6	0,4	20	23,4	22	4,2	1,2	27,4
250 m dune	11/67	6,0	5	3,2	1,7	1,2	58	64,1	49,6	13	3,9	66,5
300 m dune	11/67	2,4	1,6	2,5	1,4	0,3	19,7	23,9	26	2,4	0,4	28,8

Nappe d'eau libre.

400 m dune	11/67	2,35	1,8	3,8	0,5	0,9	19	24,2	3,5	22,6	0,3	26,4
------------	-------	------	-----	-----	-----	-----	----	------	-----	------	-----	------