

QUELQUES OBSERVATIONS SUR LA DYNAMIQUE DES SELS  
ET DES ETATS DE SURFACE DANS DES SOLS DU DELTA DU SENEGAL

---

Le Delta du Sénégal occupe, entre Saint-Louis et Richard-Toll, (voir carte de situation p. 2) l'emplacement d'un erg ancien (phase ogolienne, -25 000 à - 12 000 B.P.) envahi par la mer lors de la transgression nouakchottienne (- 7 000 à - 4 200 B.P.). Le fleuve et ses défluent ont ensuite alluvionné durant le retrait progressif de la mer, et édifié sur l'emplacement du golfe marin un système de levées séparant des cuvettes de décantation, autrefois inondées lors de chaque crue du fleuve et parfois envahies par la mer en saison sèche, dans la partie aval. Un ensemble de digues et de barrages protège aujourd'hui ces cuvettes de la crue et des eaux marines. Actuellement, elles ne sont plus que localement inondées par les eaux de pluie. La lame d'eau, qui ne dépasse pas 30 cm, s'évapore et s'infiltré en 1 à 2 mois.

De l'histoire paléogéographique du Delta, il est résulté :

- la superposition dans les cuvettes d'un matériau sableux de profondeur (sables nouakchottiens) et de matériaux argileux, déposés par décantation, épais de 0,3 à 3 ou 4 mètres (Figure 2).
- l'existence d'une nappe phréatique salée, apparaissant entre 1,5 et 3 m de profondeur, chloruro-sulfatée à chloruré sodique, d'une conductivité de 4 à 80 mmhos/cm, et parfois plus.

Sous l'influence d'un climat chaud (moyenne annuelle 26°) et sec (350 mm/an de pluies, en Juillet-Août-Septembre), la dynamique de l'eau dans les profils est surtout ascendante. L'eau salée des nappes remonte par capillarité et salinise plus ou moins fortement la majorité des sols (conductivité de l'extrait 1/5 sur la couche 0-30 cm : de 0,2 à 10 mmhos/cm).

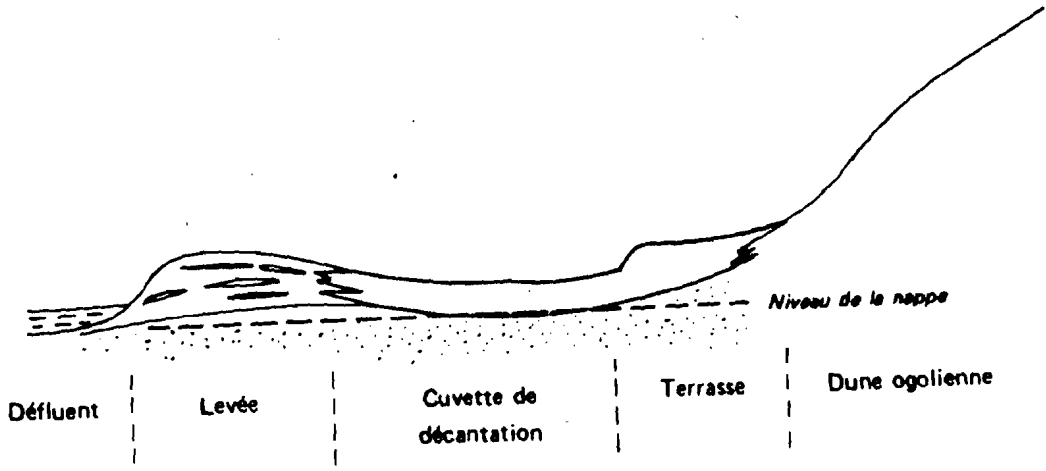
Il était donc intéressant d'analyser dans cette région la distribution des sels dans les profils selon des toposéquences. Nous avons également été amenés à observer les états de surface des sols et à tenter de les mettre en relation avec la dynamique des sels.





9/11/89  
7338

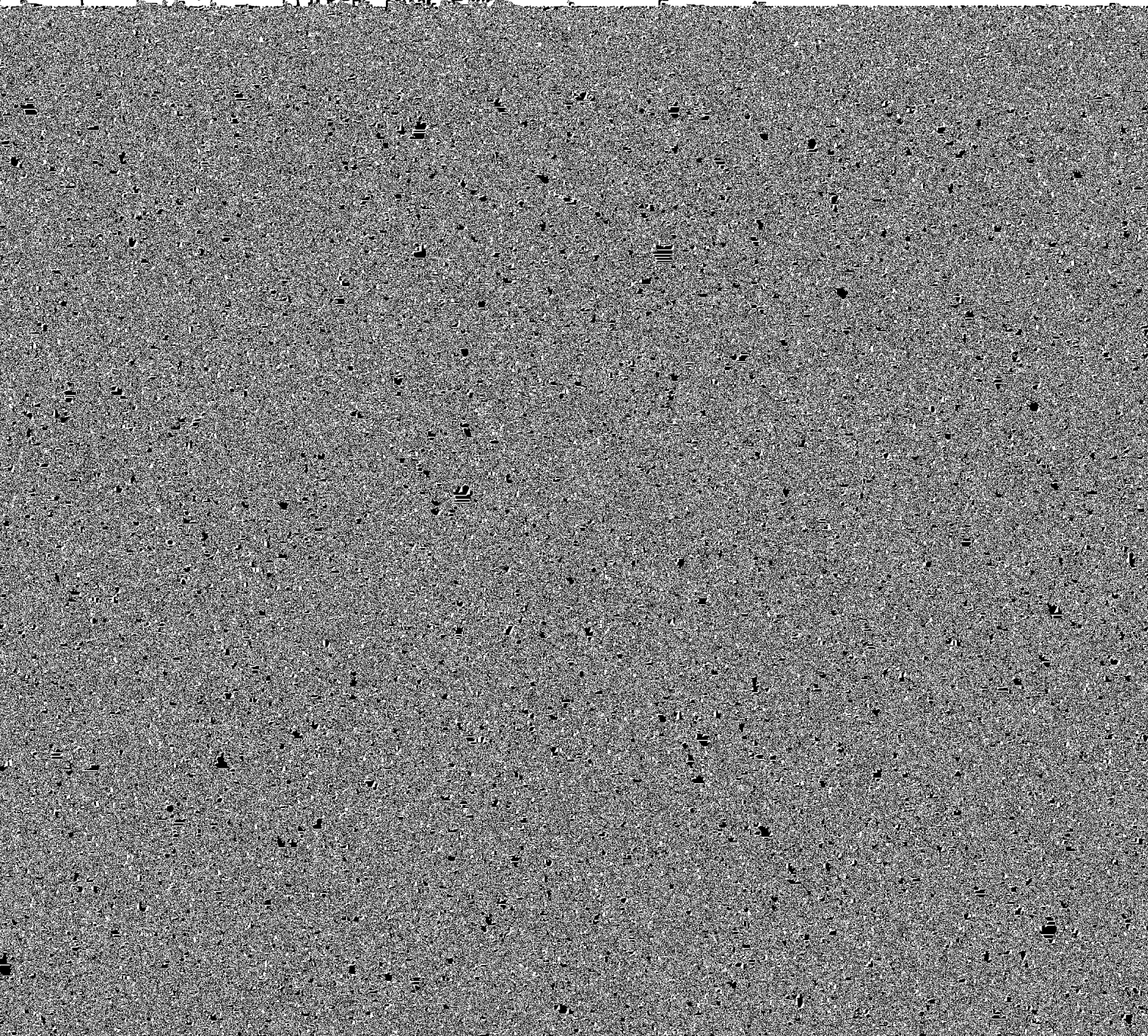
DEP-UE







-  Défluent
-  Sable nouakchattien
-  Argile
-  (Mans, sables, argiles)

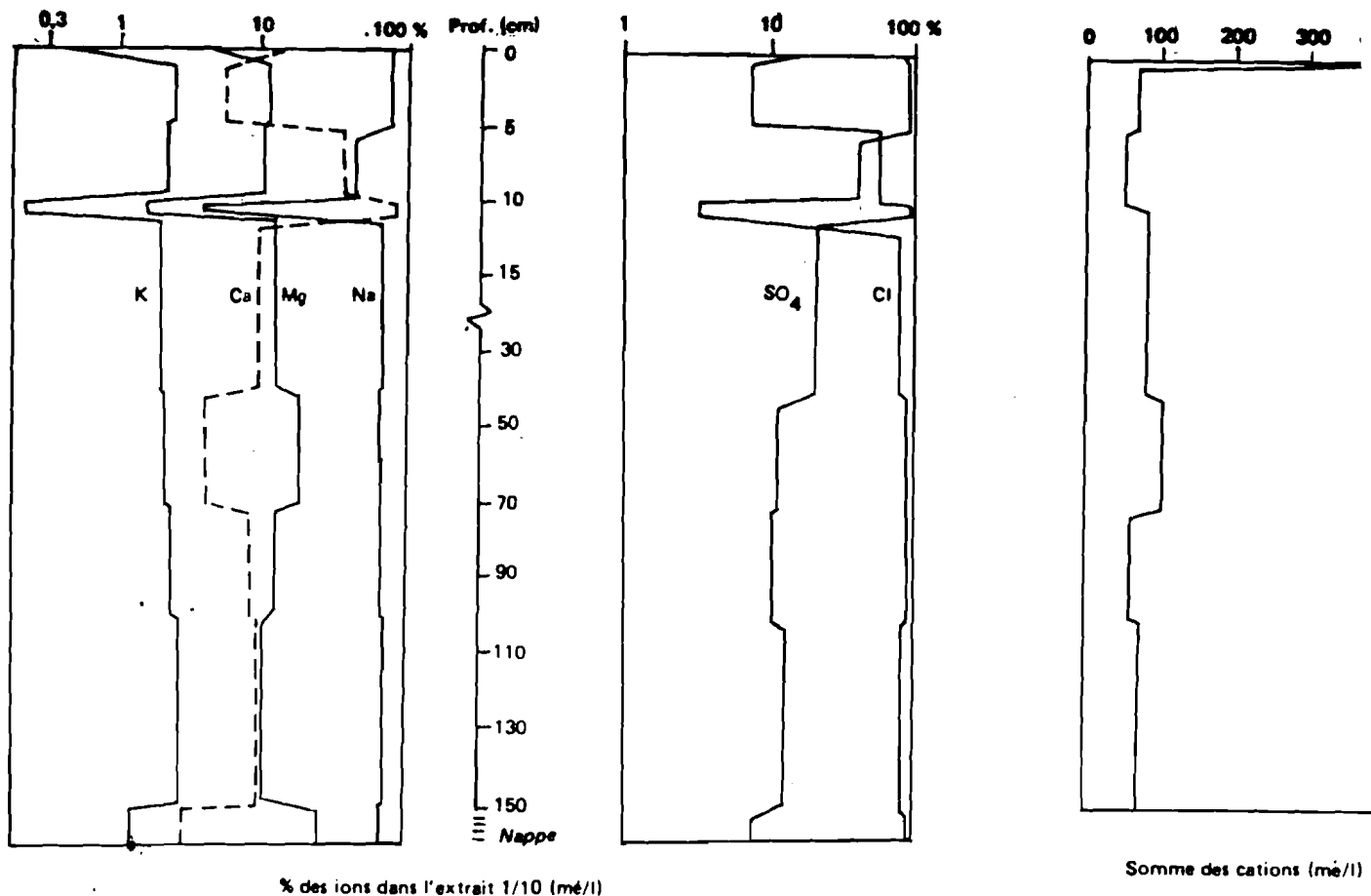




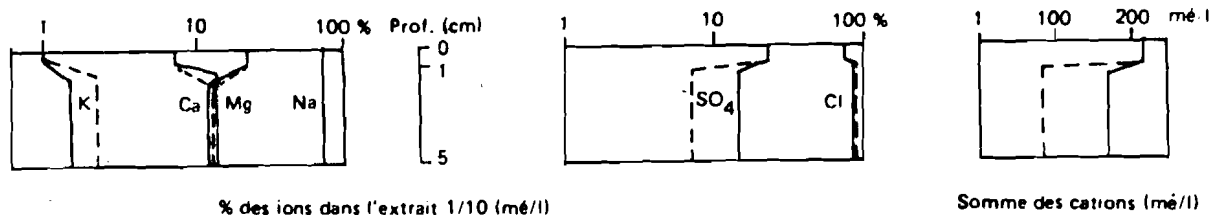
1 - Deux toposéquences de profils salins

1.1. Méthodologie

Des prélèvements à la tarière ont été effectués sur 6 emplacements formant 2

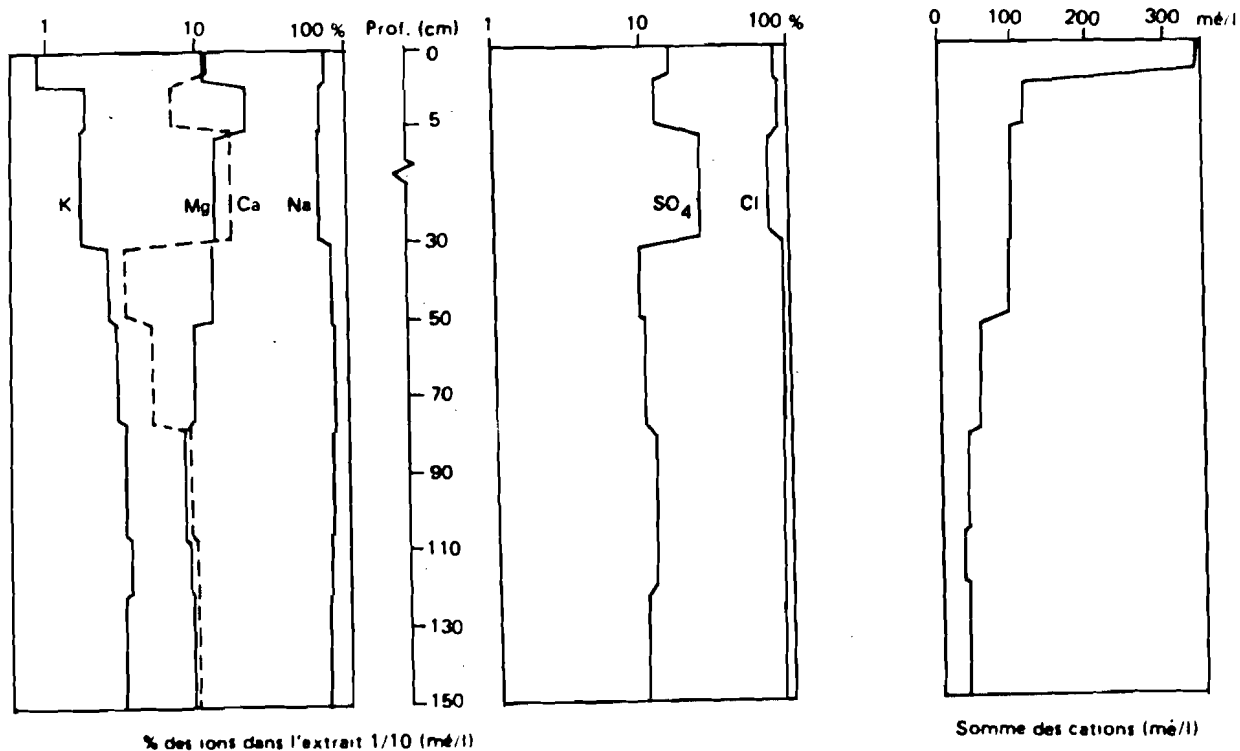


SAINT-LOUIS - SITE 1



SAINT-LOUIS - SITE 2

--- prismes  
 ——— agrégats fins



SAINT-LOUIS - SITE 3

Fig. 1. Analyses des extraits 1/10 - Pourcentages des différents ions et salinité totale

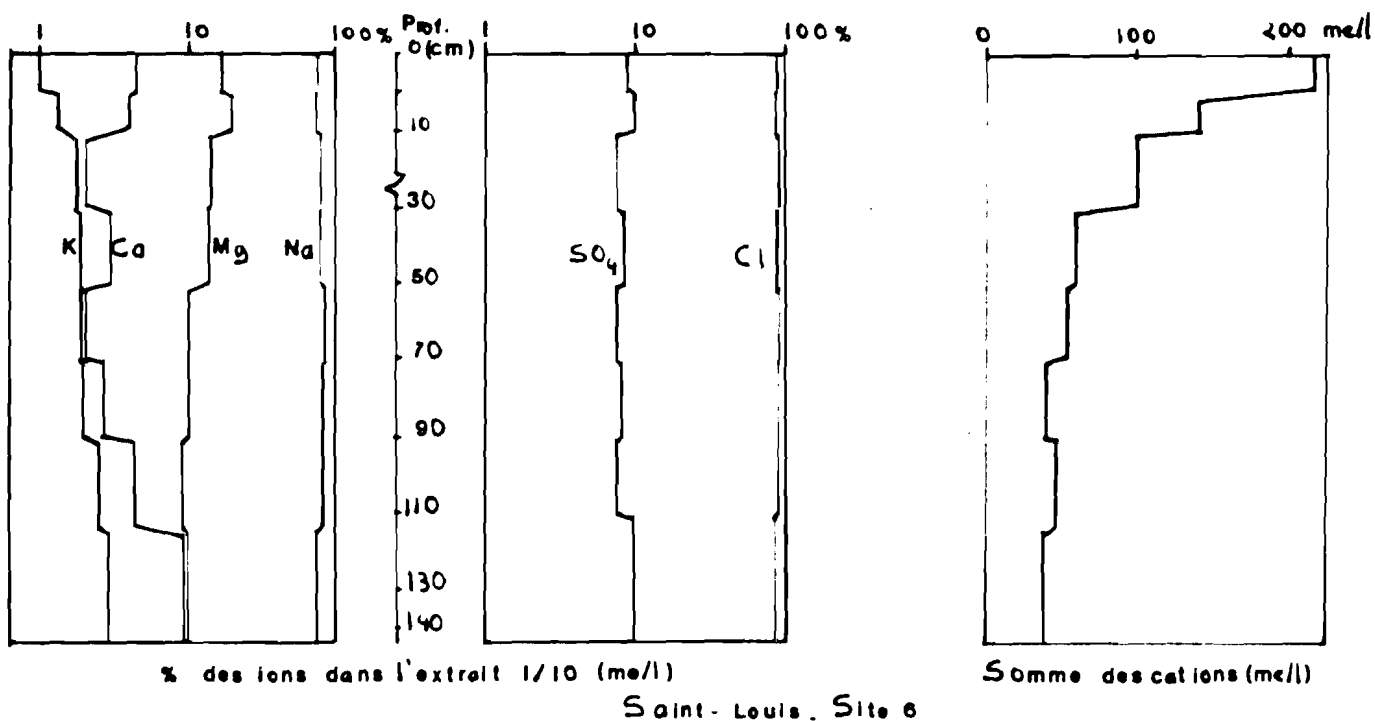
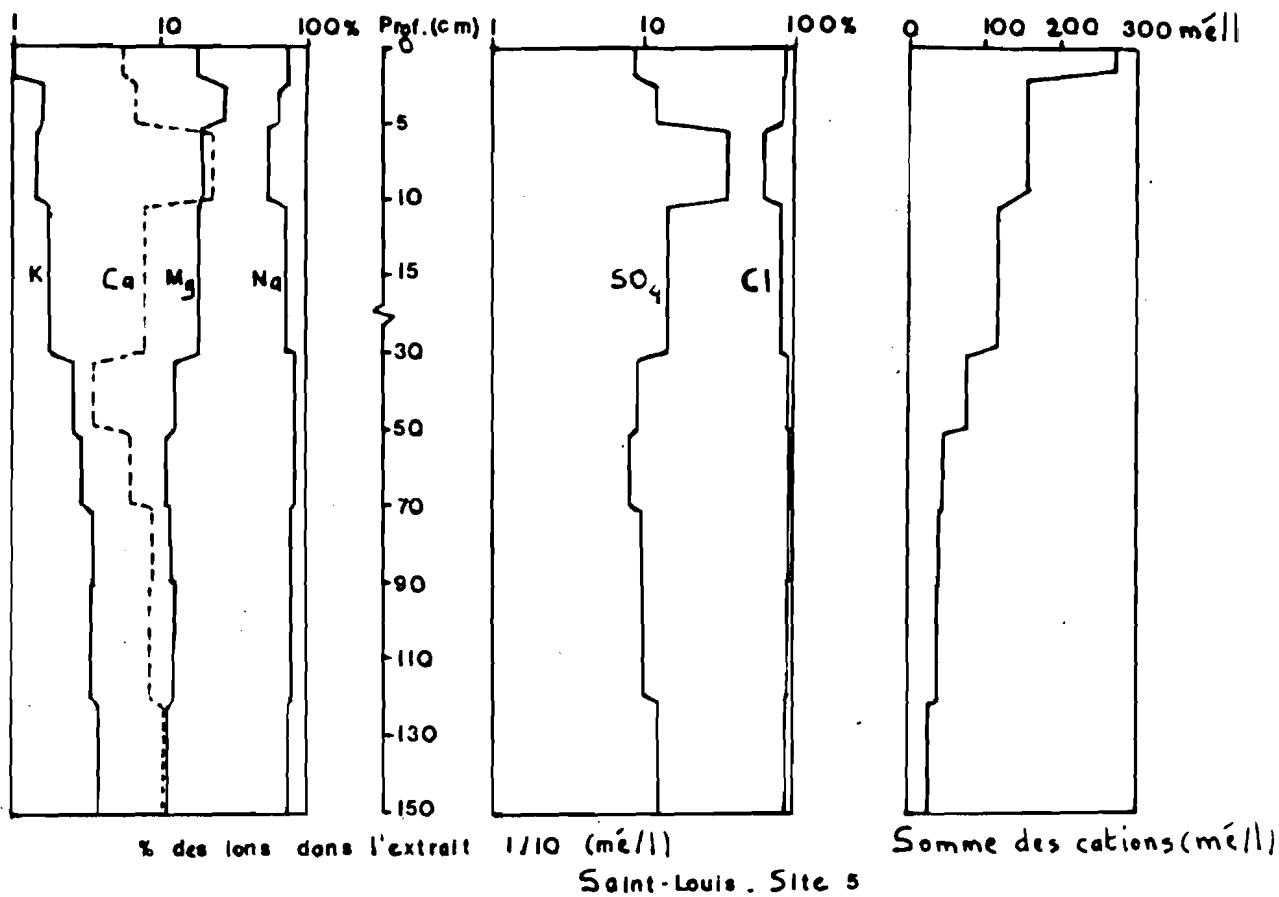
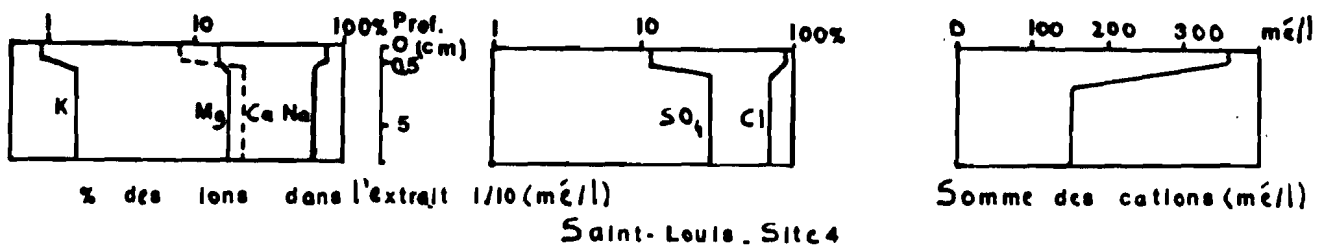


Fig. 5 Analyse des extraits 1/10. Pourcentages des différents ions. Salinité totale



- Les ions  $\text{Na}^+$ , avec 70 %, et  $\text{Cl}^-$ , avec 85 à 90 % des mé/l, dominent parmi les ions en solution. Cette dominance est plus forte sur la terrasse (Site 6 :  $\text{Na}/\text{Ca} = 26$ ,  $\text{Na}/\text{Mg} = 7$ ,  $\text{Cl}/\text{SO}_4 = 11$ ) qu'au fond de la cuvette (Site 1 :  $\text{Na}/\text{Ca} = 11$ ,  $\text{Na}/\text{Mg} = 6$ ,  $\text{Cl}/\text{SO}_4 = 8$ ). Les sels les plus solubles ( $\text{NaCl}$ ) migrent vers les parties hautes du paysage (terrasse ou levée dans la vallée du Lampsar, cf. LE BRUSQ, 1980) plus vite que les sels peu solubles ( $\text{CaSO}_4$ ), lors des migrations ascendantes des solutions.

Notons que dans l'eau de mer, les rapports entre ions sont :  $\text{Na}/\text{Ca} = 22$ ,  $\text{Na}/\text{Mg} = 4,4$ ,  $\text{Cl}/\text{SO}_4 = 9,7$ , soit des valeurs voisines de celles ci-dessus; une baisse des teneurs relatives en magnésium apparaît cependant dans les extraits de sols.

- Les pourcentages d'ions  $\text{Ca}$  et  $\text{SO}_4$  présentent un maximum entre 5 et 10 cm de profondeur. Sur le site 1, on trouve à 10 cm une nappe discontinue de cristaux de gypse à la base des structures prismatiques de surface (cf. 2.1.). L'accumulation relative du gypse se fait donc près de la surface du sol. On remarque que sur le site 6 cette accumulation relative ne s'observe pas.

- Le magnésium présente une abondance relative plus forte vers 2,5 - 5 cm. Dans une autre cuvette (ROSS-BETHIO) le magnésium a même été trouvé plus abondant que le Sodium à ce niveau.

- Le pourcentage du potassium augmente progressivement de la surface vers la profondeur. Ce pourcentage est en fait corrélé avec le terrain

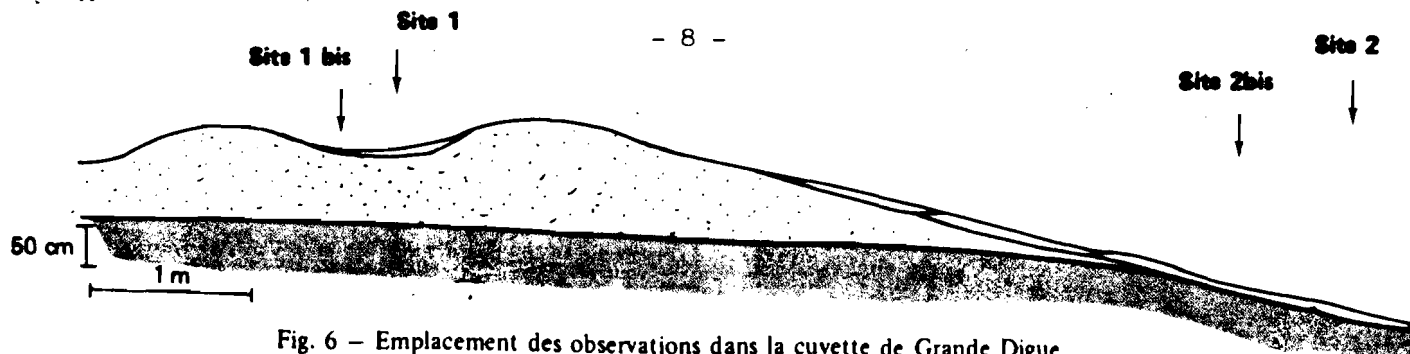


Fig. 6 – Emplacement des observations dans la cuvette de Grande Digue.  
 Site 3bis à 30 m au sud du Site 2



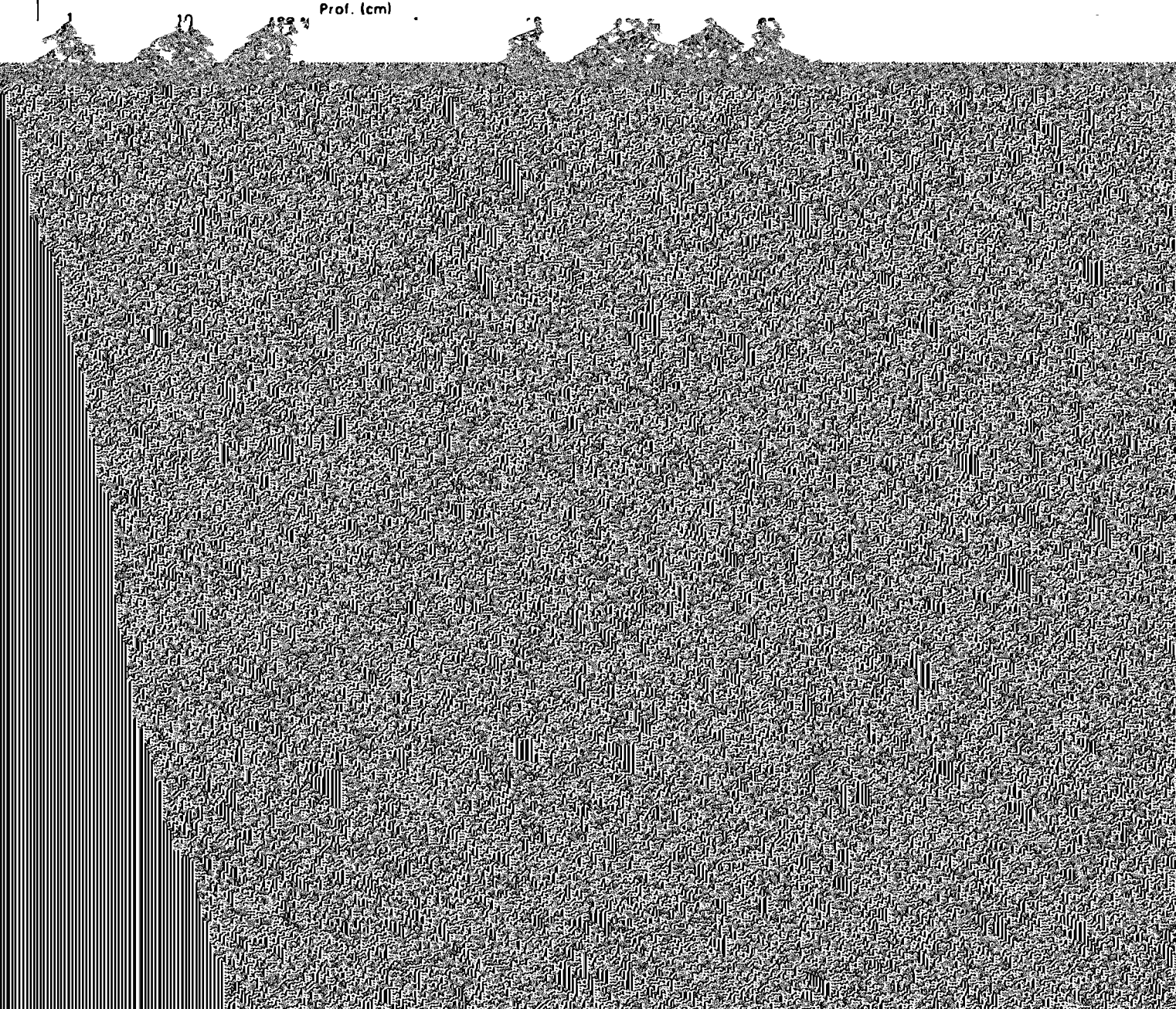
Matériau limonosableux



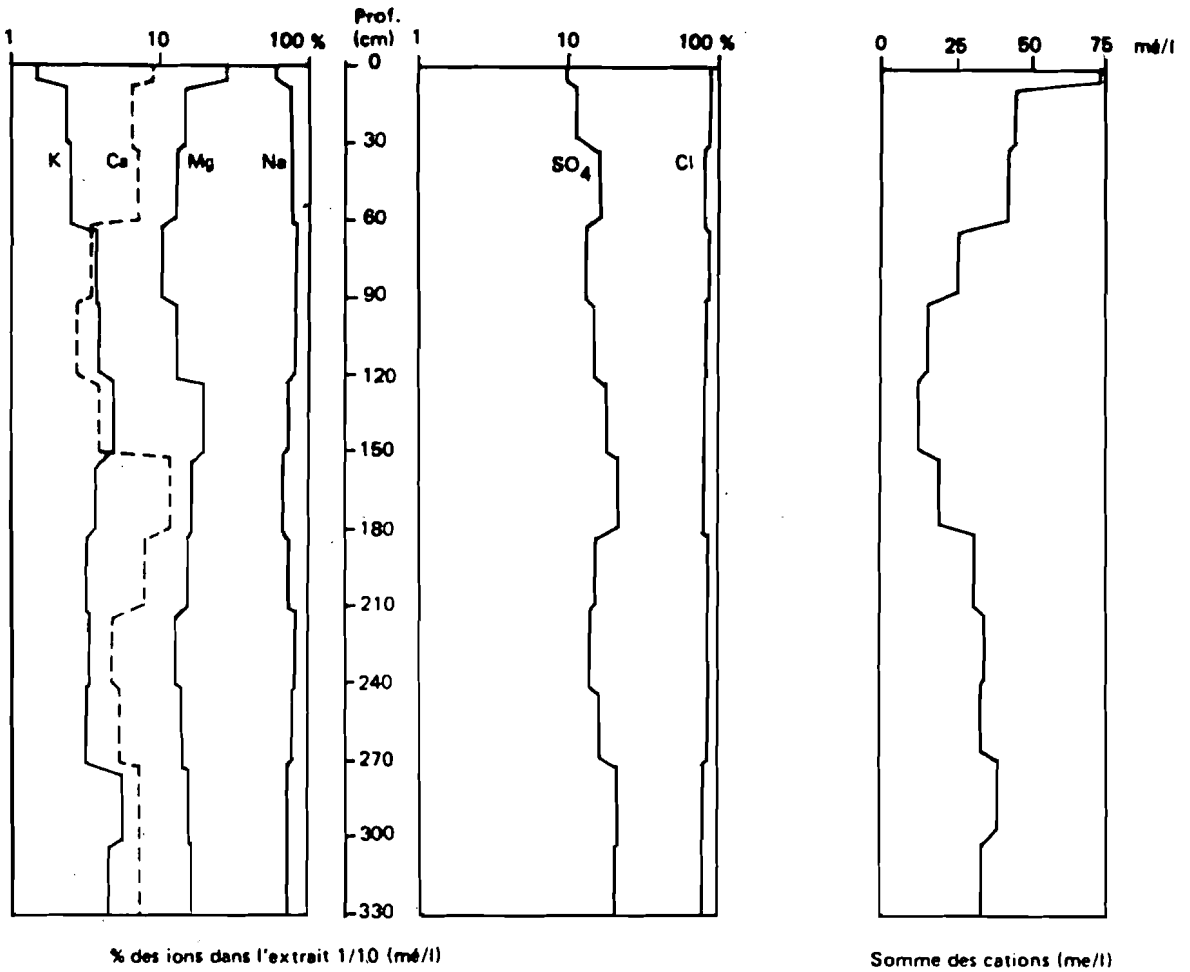
Matériau argileux



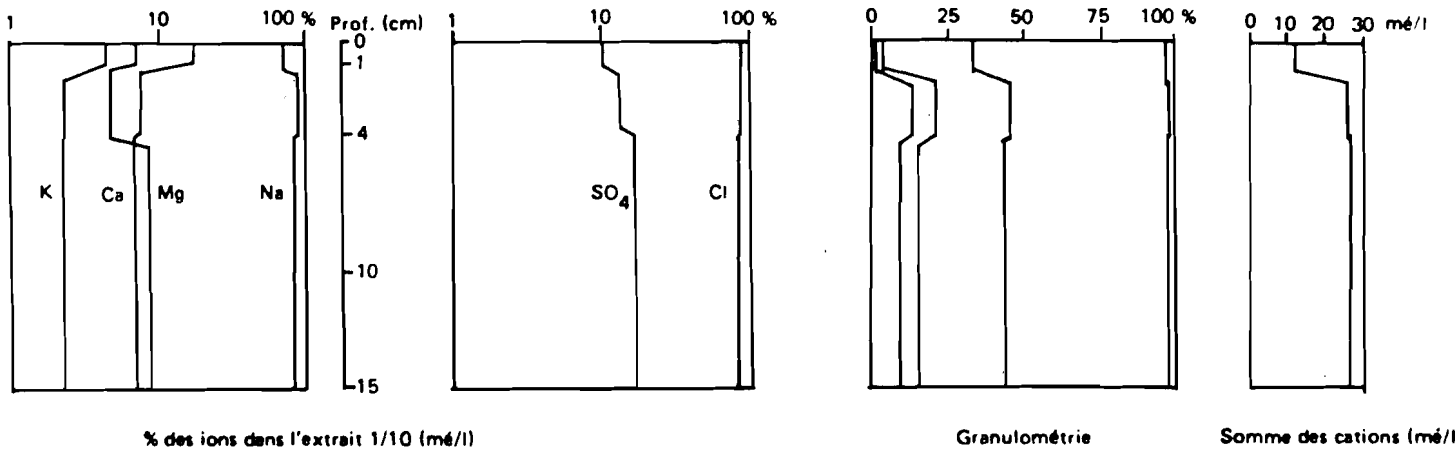
Dépôt superficiel limono sableux





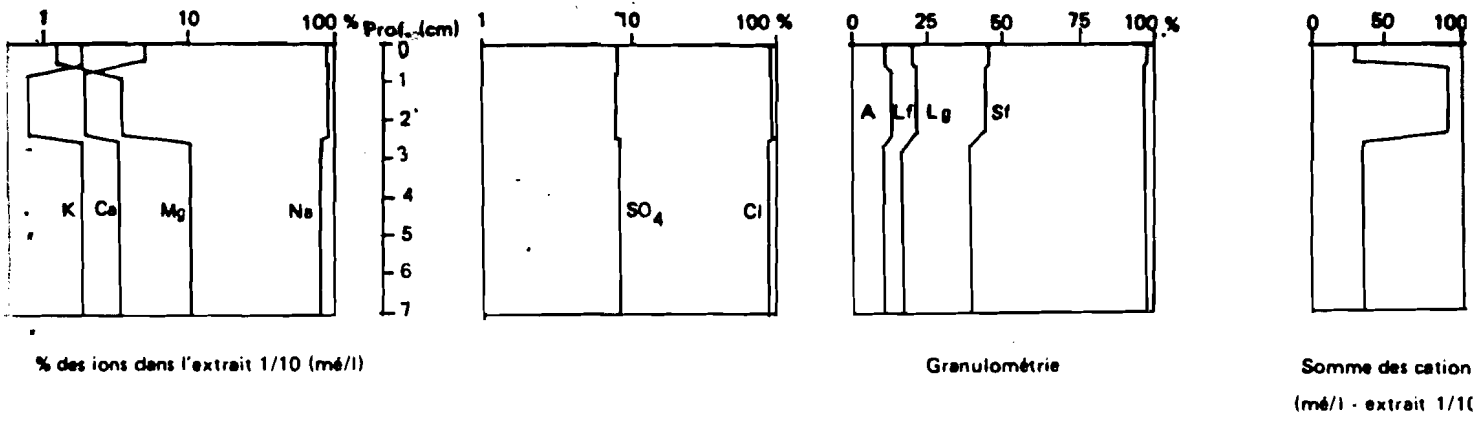


Grande-Digue - Site 2

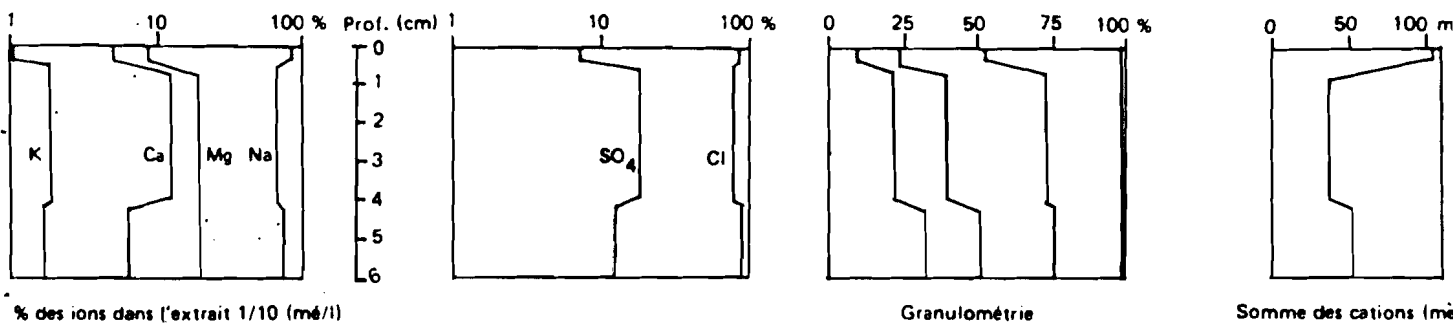


Grande-Digue - Site 1bis

Fig. 8 - Analyse des extraits 1/10 - Pourcentages des différents ions, granulométrie et salinité totale.



Grande Digue - Site 2bis




Grande Digue - Site 3bis

Fig. 9 - Analyse des extraits 1/10 - Pourcentages des différents ions, granulométrie et salinité totale.



Site 1 : zone d'accumulation éolienne actuelle. avec quelques petites dunes de



### 2.1.1. Formation de structures prismatiques superficielles

Lorsque le fond de la cuvette s'exonde, un réseau hexagonal de fentes de dessiccation se développe, alors que le matériau est encore très humide et plastique. Simultanément, des efflorescences blanchâtres, formées de très fins cristaux de gypse apparaissent au sommet et sur les faces des prismes délimités par les fentes\* . Progressivement, ces efflorescences s'enrichissent en sels plus solubles (chlorures de sodium et de magnésium), et constituent finalement une croûte de sels grisâtre, de 1 à 2 mm d'épaisseur, adhérent au matériau sous-jacent. La dessiccation se poursuivant, les fentes atteignent 10 cm de profondeur. Une nappe de cristaux de gypse se développe à la base des prismes. En dessous, la structure est polyédrique peu développée sur 5 cm, puis massive. Vers le bord de la cuvette, (Site 2), les bords et le sommet des prismes se résolvent progressivement en quelques semaines, en agrégats fins (0,5 - 2 mm) disjoints, qui constituent une structure poudreuse. Ces agrégats sont plus salés, plus riches en  $SO_4$ , Ca, et K que l'intérieur des prismes . La croûte de sel superficielle, restée intacte, n'est plus adhérente au prisme.

### 2.1.2. Formation de structures poudreuses.

Sur le site 3 la formation des prismes n'est qu'amorcée. Une structure poudreuse superficielle se développe progressivement sur 2 cm. La croûte de sel superficielle est très mince ou absente. Les agrégats de surface sont très fins (0,5 mm), mais de plus en plus grossier vers la profondeur (4-5 mm). Sur le site 4, l'apparition de structure poudreuse s'est faite différemment. Une croûte de sels en plaques translucides, cassantes, épaisses de 1 à 2 mm, s'est constituée après l'exondation. Cette croûte est moins riche en Ca, Mg,  $SO_4$ , que la zone sous-jacente, contrairement aux croûtes des sites 1, 2, 3 (sauf pour Mg). La distribution des sels s'est donc effectuée différemment. En outre, la croûte a ici protégé le sol contre une dessiccation rapide ; après 4 mois de saison sèche l'humidité pondérale de la couche 0-5 cm était de 21 %, au lieu de 5 % au site 1. La structure du sol restait massive, le matériau était plastique. L'hypothèse de transferts latéraux d'humidité venant de la terrasse a pu être éliminée par l'observation des mêmes phénomènes sur des buttes isolées en fond de cuvette, où aucun apport latéral d'eau n'était possible. En outre, nous avons observé l'apparition, sur 10 cm autour de traces de nos pas, en 1 mois, de structures prismatiques et d'efflorescences blanchâtres : la perturbation apportée (rupture de la croûte saline, fissuration du matériau ? ) avait modifié le type d'évolution de surface.

---

\* Sur photos aériennes, les zones à efflorescences apparaissent en clair, même sur matériau sombre (argiles gris-noir).



La structure poudreuse apparaît sur le site 4 par une transition brutale : le premier centimètre de sol acquiert cette structure en augmentant fortement de volume (figure 11). La transition structure massive - structure poudreuse progresse selon un front net mais digité des sites 3 et 5 vers le site 4 (fig.12).

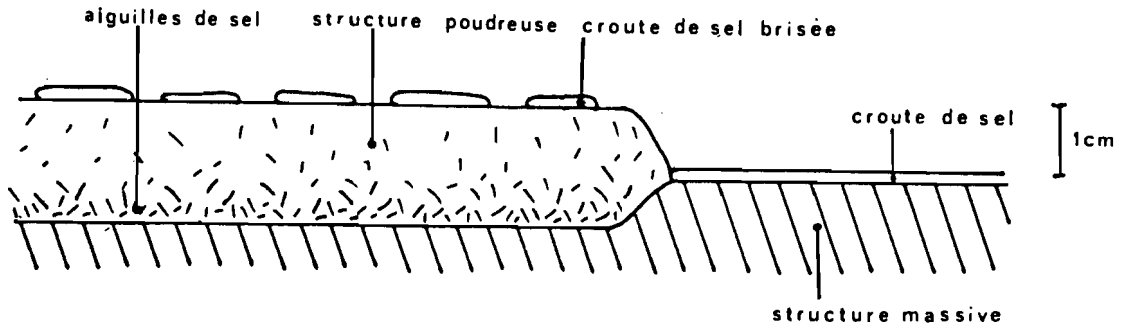


Figure 11 : Passage de la structure massive à la structure poudreuse.

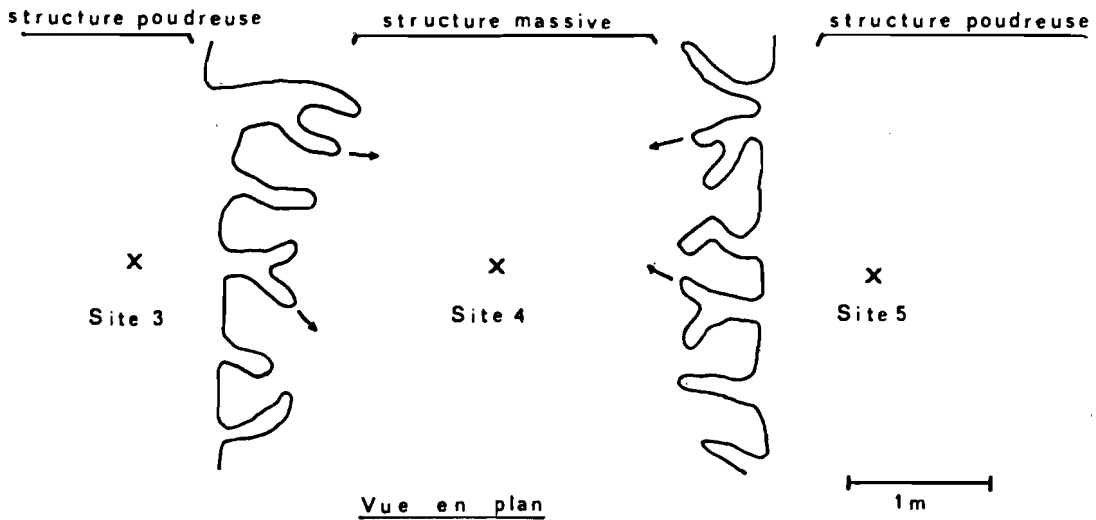


Figure 12 : Transition structure massive - structure poudreuse superficielle.

Il semble que par la suite, l'épaisseur de la couche à structure poudreuse augmente lentement, et sans doute par un mécanisme différent.

Lorsque la structure poudreuse se constitue brutalement, les agrégats sont tous à peu près de même taille (1 mm), contrairement à ce que l'on observe au site 3

L'accumulation superficielle des sels est plus importante dans le cas des structures poudreuses que dans le cas des structures prismatiques : il semble que dans ce dernier cas, la dessiccation rapide du matériau arrête rapidement la migration des sels.

### 2.1.3. Conclusion

Il semble donc que structuration du matériau et migration des sels soient ici liés. CHEVERRY (1976) avait déjà noté l'importance de la structuration du matériau sur l'évolution de la salure des sols. Mais alors que dans le cas étudié par lui, la nature chimique des sels était variable (voie saline neutre chloruro-sulfatée, voie alcaline à carbonate), ici on n'observe pas de variation chimique importante dans le type de salure. Un horizon où la sulfato-réduction paraît intense (coloration noire des sulfures de fer et odeur de vase) apparaît bien vers 1 à 2 cm de profondeur, mais il est présent partout avant la structuration du matériau, et ne paraît pas influencer notablement sur la composition des sels (pas d'apparition de carbonates).

CHEVERRY avait noté l'importance des premières phases du dessèchement dans l'évolution du sol, et nous avons fait la même observation. Il semble que ce soit le gradient d'humidité des couches superficielles qui entraîne, soit l'apparition d'une structure prismatique (gradient fort) soit l'apparition d'une structure massive, devenant ultérieurement poudreuse. Il resterait à préciser les interactions complexes entre les processus de dessiccation-migration des sels-structuration du matériau. Il semble en tous cas qu'il soit difficile d'appliquer à ces sols des modèles simples de transfert de l'eau et des sels, commandés uniquement par l'évaporation potentielle et la perméabilité du matériau.

### 2.2. Cuvette amont (Grande Digue)

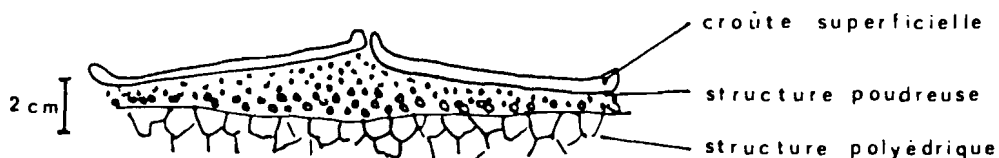
Les horizons superficiels observés dans cette cuvette sont de granulométrie variable avec la profondeur, contrairement au cas de la cuvette Saint-Louis. Ceci est lié aux transports de matière par le vent et les eaux (cf. page 11).

- Sur le site 1bis, une croûte superficielle de 1 cm, déposée par les eaux ruisselant sur les dunettes, est très pauvre en argile (1%), le matériau sous-jacent, apporté par le vent en saison sèche, contient 10% d'argile (figure 8). La croûte superficielle a une structure lamellaire. A la base de chaque lamelle on observe de nombreuses vésicules de 0,2 à 1 mm de diamètre. En profondeur, la structure est polyédrique peu développée à massive. On voit sur la figure 8 que la teneur en sel de la croûte de surface est inférieure à celle de la profondeur. Les remontées capillaires ont probablement été arrêtées par la discontinuité granulométrique à la base de la croûte. On



constate en outre un enrichissement relatif de la surface en Calcium et un appauvrissement en sulfate. Le pourcentage de Mg diminue dans la couche 1-4 cm

- Sur le site 2bis, la teneur en argile est plus constante, la teneur en sables fins augmente en profondeur (0 - 2,5 cm : 51 %, 2 - 7 cm : 57 %). On peut noter que la croûte superficielle 0-0,5 cm est plus riche en argile (11 %) qu'au site 1bis : Le dépôt s'est effectué dans l'ordre des tailles décroissantes des particules en fonction de la distance au lieu de départ. La structure de la croûte de surface est lamellaire, comme au site 1bis. Par contre, la couche 0,5-2,5 cm a acquis une structure poudreuse, postérieurement au dépôt de la croûte de surface. On observe en effet que la croûte a été soulevée déformée, par l'augmentation de volume de la couche sous-jacente. Localement, la croûte est brisée en plaques polygonales à bords recourbés (cf. schéma ci-dessus).



Ici, la structure poudreuse est du type à agrégats de tailles croissantes en profondeur.

La figure 9 montre que l'accumulation des sels s'est faite dans le niveau à structure poudreuse, mais n'a pas atteint la surface.

On observe une diminution du pourcentage de Mg en surface, tandis que celui du Calcium passe par un minimum dans la couche 0,5-2,5 cm. Le pourcentage du Sulfate est à peu près constant : les variations relatives des pourcentages de Ca et Mg ne sont donc pas dus à des précipitations de sulfates.

- Sur le site 3bis, situé au fond de la cuvette, la teneur en argile passe de 11 % en surface (croûte déposée par l'eau) à 31 % en profondeur. La croûte de surface, épaisse de 3 à 4 cm a le même aspect qu'au site 2bis. Elle recouvre également une couche à structure poudreuse. Bien que les structures du matériau soient les mêmes, la distribution des sels est différente par rapport au site 2bis : L'accumulation des sels s'est faite en surface. La distribution du Calcium et du Sulfate est probablement commandée par la précipitation de gypse : les pourcentages de ces 2 ions varient parallèlement. On note la décroissance du pourcentage de Mg en surface.

Il est probable que les différences des distributions des sels aux sites 2 et 3bis tiennent à des histoires hydriques différentes : le site 3bis a été submergé durant quelques jours, alors que sur le site 2bis, l'eau a simplement ruisselé.

### 2.3. Conclusions :

La distribution des sels et la structuration dans des matériaux stratifiés paraît donc obéir à des lois plus complexes que dans le cas de matériaux homogènes. On peut ne pas observer de concentration superficielle des sels (Site 1 bis) lorsque le matériau superficiel est très pauvre en argile, avoir une concentration en surface (Sites 1 et 3bis), avec des pourcentages d'argile faible (10 %), ou une concentration de sub-surface (Site 2bis) sur un matériau peu argileux (5 %) et non stratifié.

Ici aussi, l'histoire hydrique du matériau semble jouer un rôle important dans l'évolution structurale et chimique du matériau.

3 - Conclusion générale : Complexité des interactions entre les mécanismes de dessiccation - Structuration - Migration des sels.

Une modélisation simple des remontées de sels et d'eau lors de la dessiccation des profils serait la suivante :

- Un flux ascendant d'eau traverse le matériau et s'évapore en surface. Le flux

- On doit donc introduire le concept de gradient (d'humidité, de concentration) étroitement lié au concept de vitesse (ou de flux) : vitesse d'évaporation et gradient d'humidité dans le sol sont liés.
- L'évolution du matériau est un processus historique : chaque étape dépend de la précédente, et des bifurcations sont possibles en fonction des valeurs de paramètres-seuils : L'évolution de l'argile peut se faire soit vers la structure prismatique, soit vers la structure poudreuse, en fonction de certains paramètres à préciser.

Ces concepts sont empruntés à l'étude de la thermodynamique des processus irréversibles non linéaires. Ils ont été utilisés avec profit en physique, chimie et biologie. Il devrait en être de même pour l'étude des sols salés.