

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 :

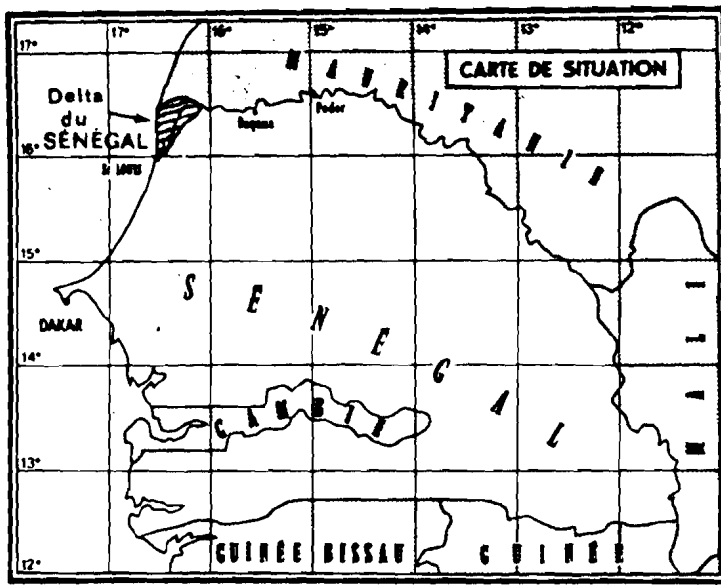
- la superposition dans les cuvettes d'un matériau sableux de profondeur (sables nouakchottiens) et de matériaux argileux, déposés par décantation, épais de 0,3 à 3 ou 4 mètres (Figure 2).
- l'existence d'une nappe phréatique salée, apparaissant entre 1,5 et 3 m de profondeur, chloruro-sulfatée à chloruré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

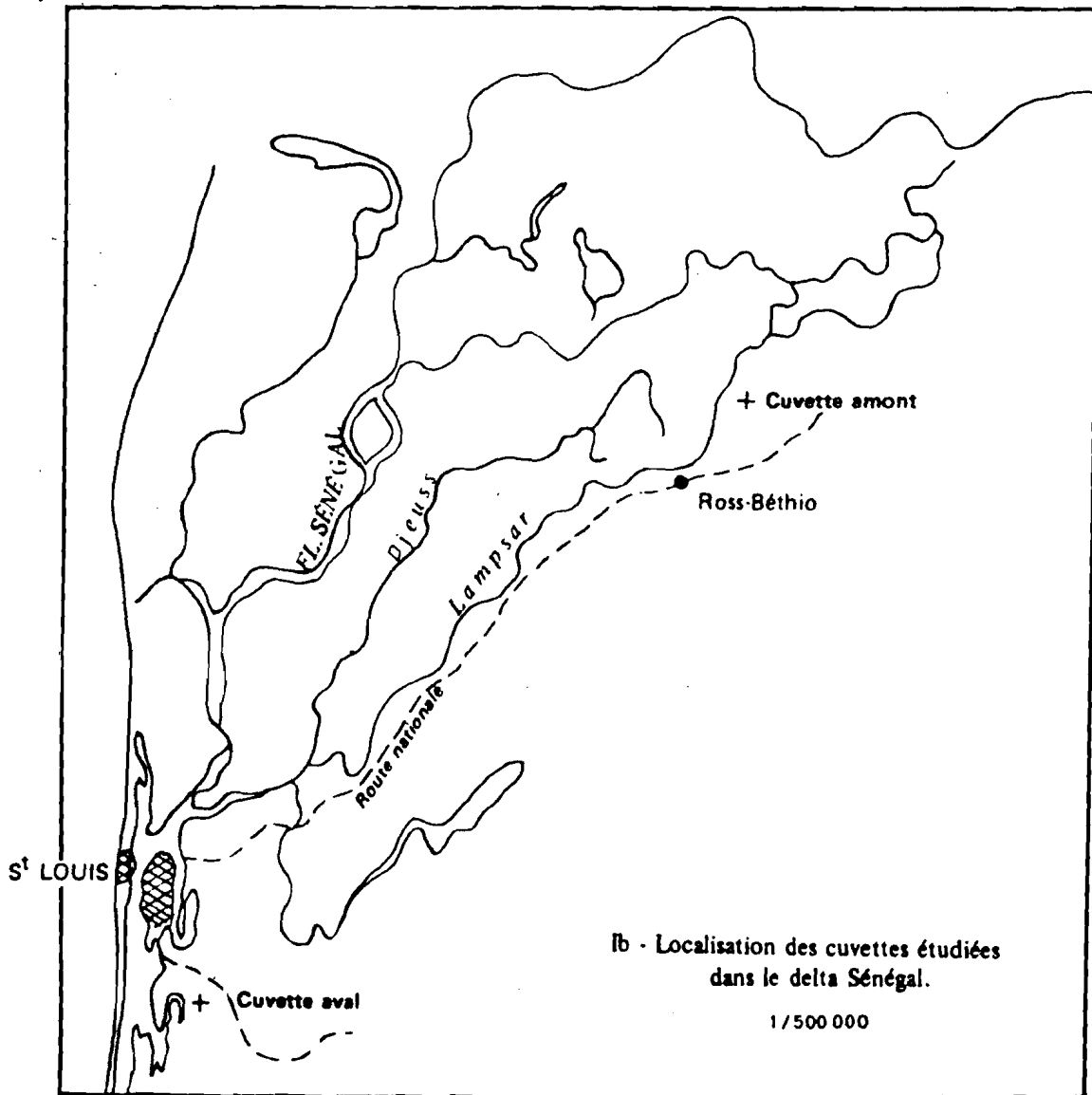
Il était donc intéressant d'analyser dans cette région la distribution des sels dans les profils selon des toposéquences. Nous avons également été amenés à observer les états de surface des sols et à tenter de les mettre en relation avec la dynamique des sels.

9/11/89
7338

DEP-UE



1a - Situation générale 1/8 900 000



1b - Localisation des cuvettes étudiées dans le delta Sénégal.

1/500 000

Fig. 1 - Cartes de situation.

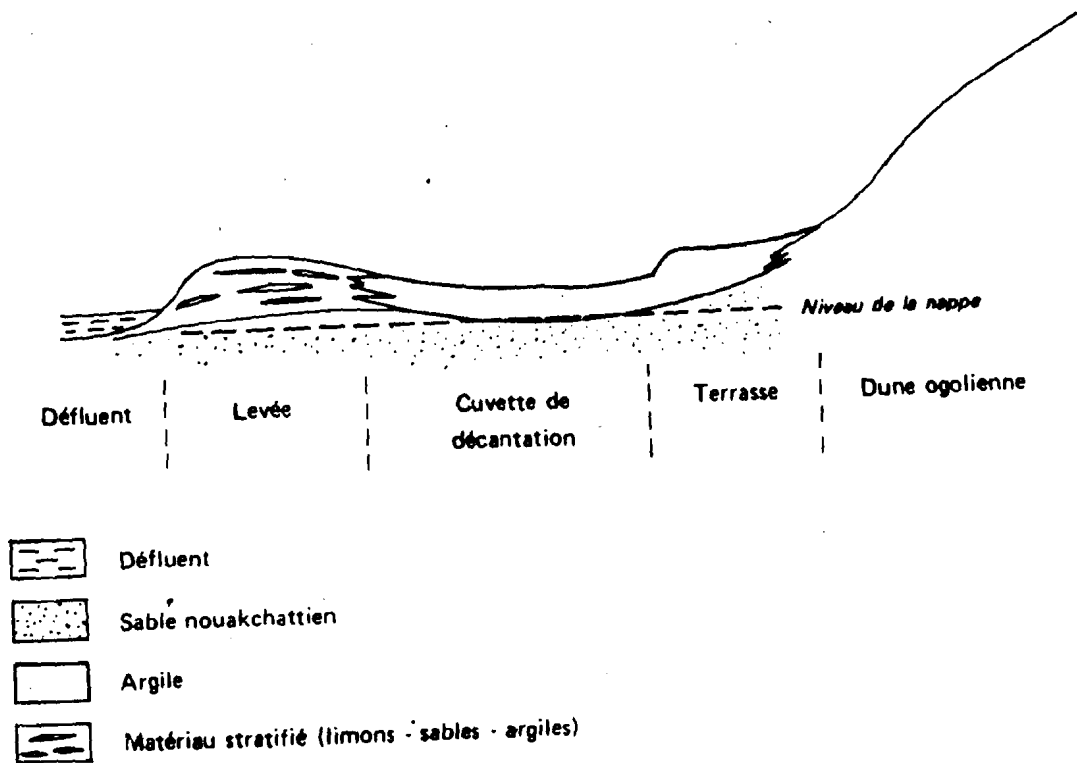


Fig. 2 - Coupe géomorphologique simplifiée d'une cuvette.

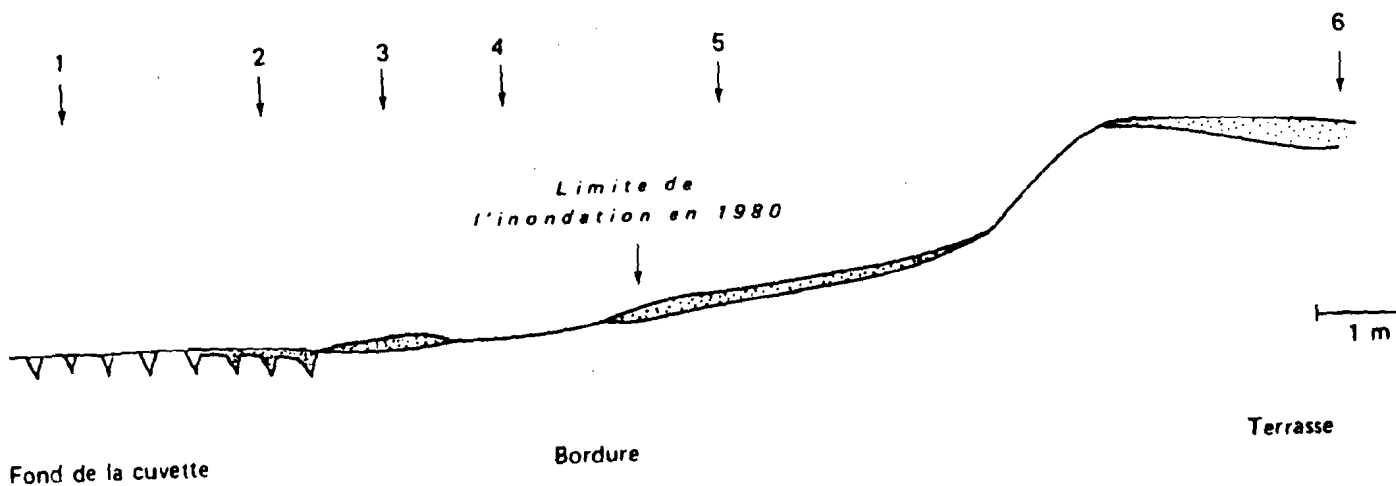


Fig. 3 - Toposéquence de la cuvette «Saint-Louis»
Emplacement des observations (Échelle verticale exagérée).

1 - Deux toposéquences de profils salins

1.1. Méthodologie

Des prélèvements à la tarière ont été effectués sur 6 emplacements formant 2 toposéquences, jusqu'à la nappe phréatique. Les sels ont été analysés sur extrait 1/10 des échantillons sèches et broyés.

Na, K, Ca, Mg, Cl, HCO_3^- ont été dosés. Les bicarbonates étaient partout en très faible proportion ($< 0,5\%$).

Les cations échangeables ont été négligés lors des analyses. Ceci pourrait être un inconvénient lorsque l'on veut comparer les pourcentages des différents cations dans des horizons de texture variable, puisque les proportions des cations adsorbés ne sont pas les mêmes qu'en solution. En fait, Ca et Mg sont à peu près également adsorbés par les argiles, et toute variation importante de leurs proportions respectives en solution ne peut donc être attribuée à des réactions d'échange.

Les figures 4 à 7 donnent en fonction de la profondeur la salure totale (somme des cations) et les pourcentages des différents ions dans l'extrait 1/10, calculés à partir des mé/l ($\sum \text{cations} = 100\%$).

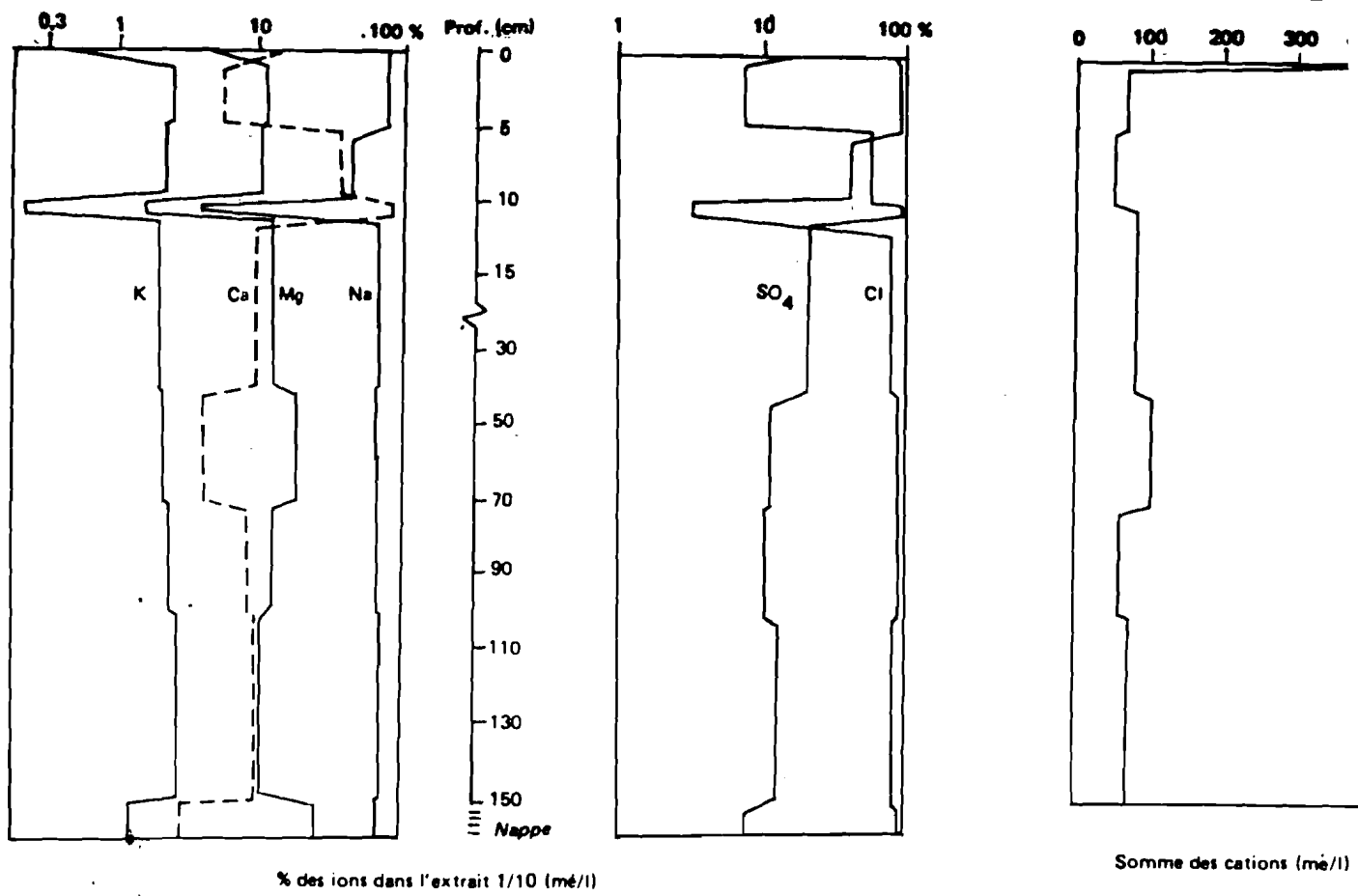
Les pourcentages ont été reportés sur une échelle logarithmique, afin de mieux faire ressortir les variations relatives des pourcentages d'ions minoritaires (K, Ca, Mg, SO_4) d'un horizon à l'autre.

1.2. Cuvette aval (Saint-Louis)

Cette cuvette, située près de Saint-Louis s'ouvrait au sud-est sur une zone de mangrove actuelle envahie par l'eau de mer en saison sèche, dont elle est séparée aujourd'hui par une digue. L'eau de mer y pénétrait donc jusqu'à une date récente. Les sols sont très argileux (60 % d'argiles).

La toposéquence va du fond de la cuvette jusqu'à une terrasse surélevée de 60 cm par rapport au fond de la cuvette. En 1980, les eaux de pluies recouvraient les sites 1 à 4 (Figure 3) en fin Septembre. Fin Octobre, l'eau de surface avait disparu. Les prélèvements ont été effectués fin Novembre. La nappe était alors à 1,5 m du fond de la cuvette. Sur les figures 4 et 5, on constate les faits suivants :

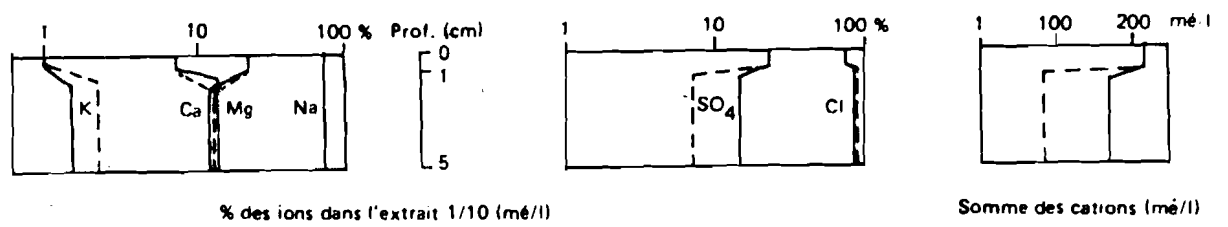
- Dans chaque profil, la salinité est à peu près constante en profondeur, puis augmente fortement en surface. L'accumulation des sels en surface est d'autant plus forte que le site est à une cote élevée. Ceci est lié à la durée de submersion par les eaux de pluies (nulle très probablement au site 6 depuis au moins plusieurs décennies).



% des ions dans l'extrait 1/10 (mē/l)

Somme des cations (mē/l)

SAINT-LOUIS - SITE 1

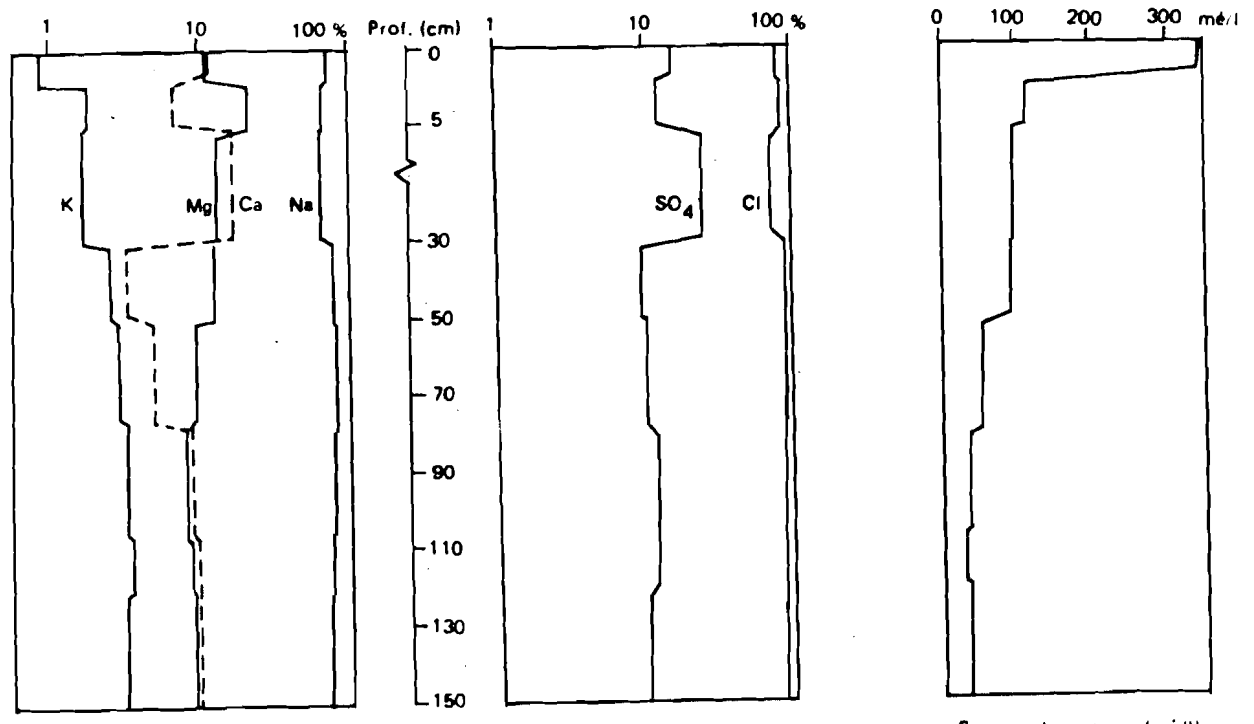


% des ions dans l'extrait 1/10 (mē/l)

Somme des cations (mē/l)

SAINT-LOUIS - SITE 2

----- prismes
 ————— agrégats fins



% des ions dans l'extrait 1/10 (mē/l)

Somme des cations (mē/l)

SAINT-LOUIS - SITE 3

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

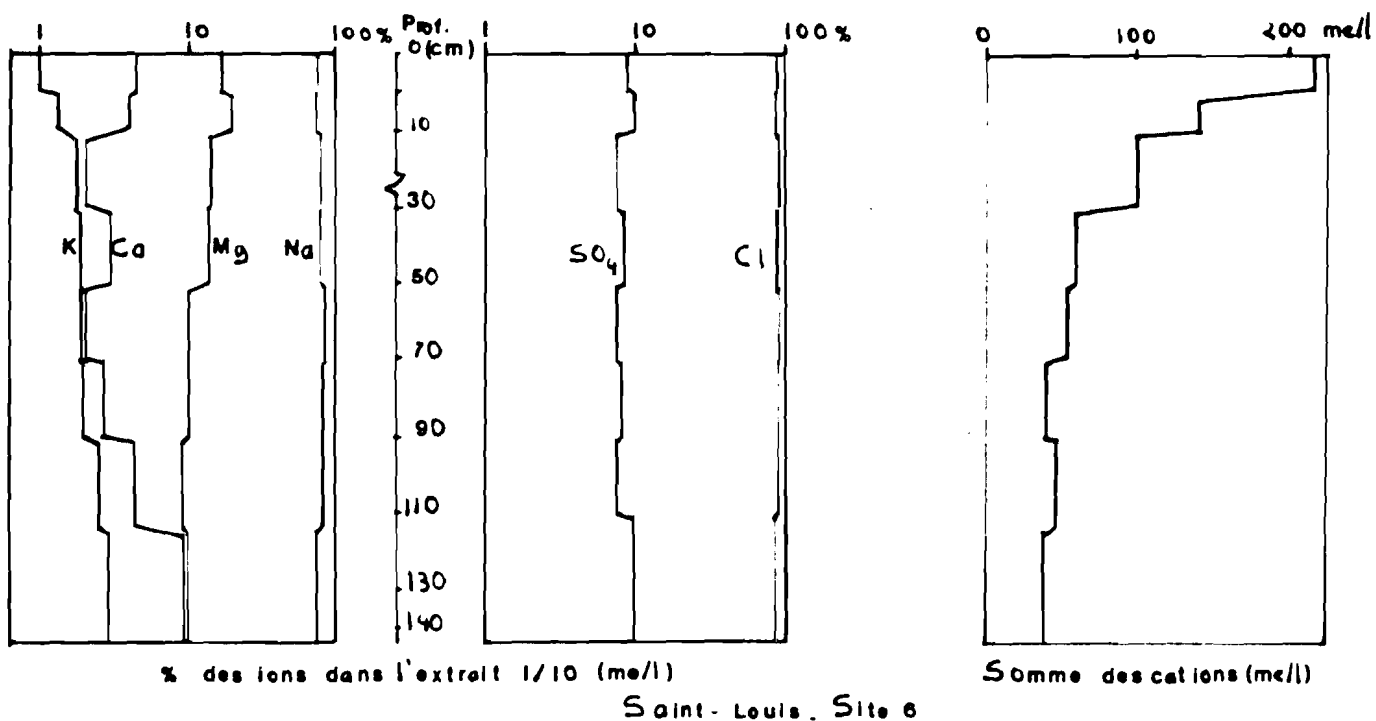
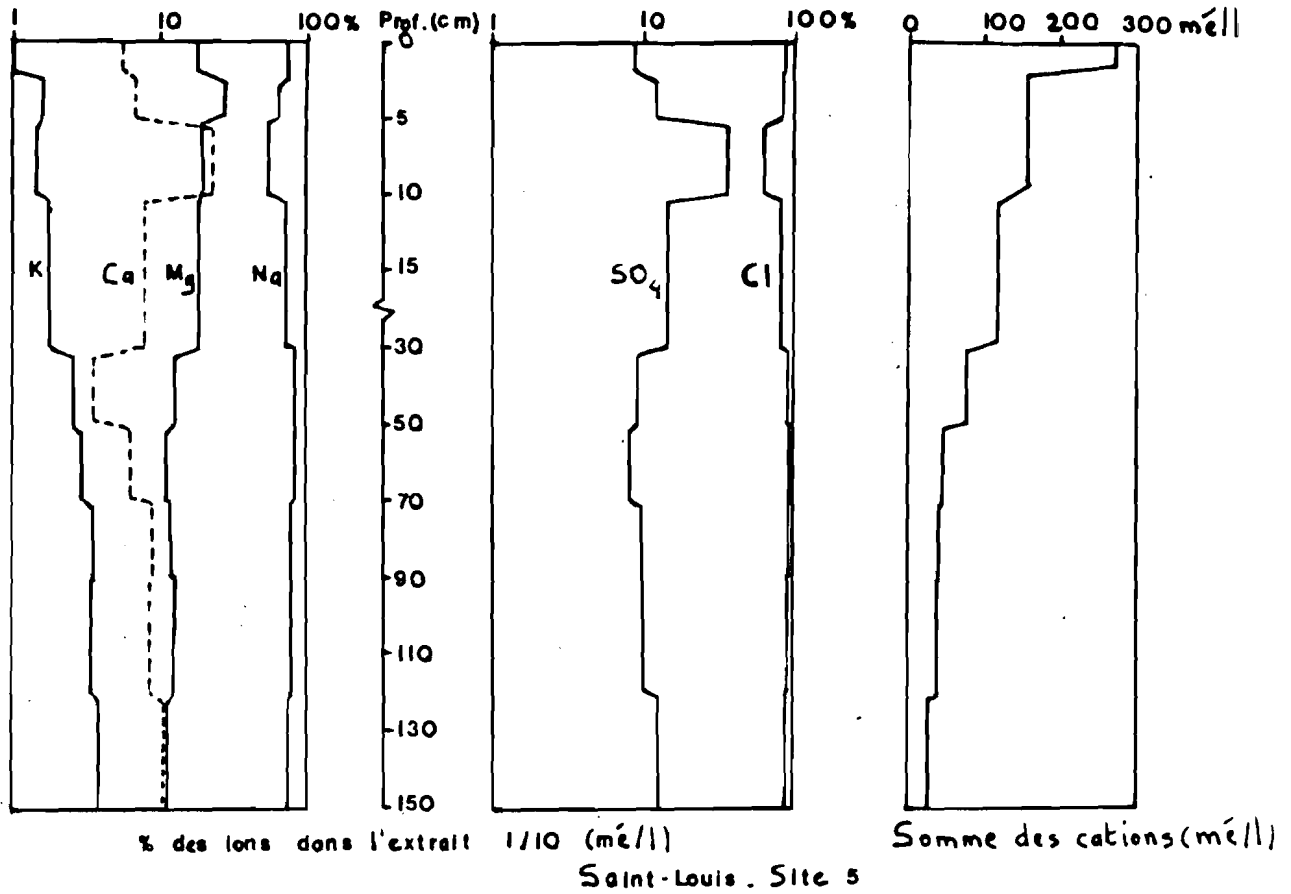
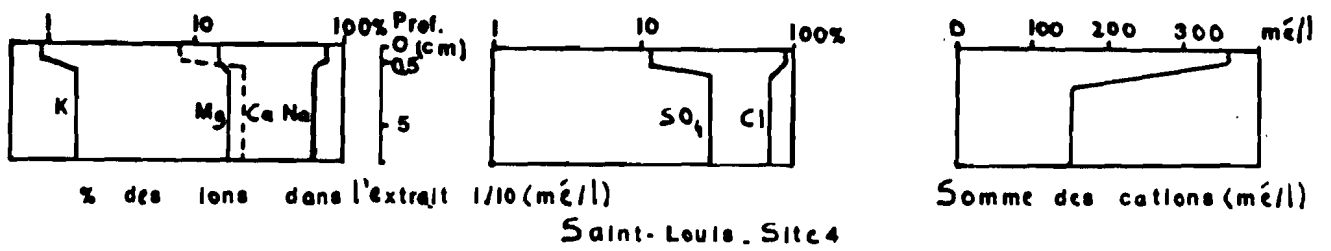


Fig. 5 Analyse des extraits 1/10. Pourcentages des différents ions. Salinité totale

- Les ions Na^+ , avec 70 %, et Cl^- , avec 85 à 90 % des mé/l, dominent parmi les ions en solution. Cette dominance est plus forte sur la terrasse (Site 6 : $\text{Na}/\text{Ca} = 2,6$, $\text{Na}/\text{Mg} = 7$, $\text{Cl}/\text{SO}_4 = 11$) 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 (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 (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 Ca et 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 la teneur totale en sels : $\% (\text{K}) = 3,38 - 0,0106 (\sum \text{cations})$, $r = 0,84$.
- Le pourcentage du calcium augmente dans les horizons profonds contenant des débris de coquilles. Le pH de ces horizons (sur extrait 1/10 6,6 à 6,9) est supérieur à celui des horizons dépourvus de coquilles (6,3 à 6,5).

Il apparaît donc que dans ces sols argileux, la concentration des solutions du sol par évaporation se produit près de la surface, à moins de 30 cm de profondeur. Le gypse précipite alors, vers 5-10 cm de profondeur tandis que les sels très solubles restent en solution. Un second niveau de précipitation du gypse apparaît à la surface du sol sur les sites 1, 2 et 3.

Les variations les plus importantes des proportions des différents ions ont donc lieu à proximité de la surface. C'est aussi la zone où les matériaux se structurent selon diverses modalités que nous décrirons au paragraphe 2.

1.3. Cuvette amont (Grande Digue)

Cette cuvette se situe à environ 40 km de la mer aujourd'hui. Les dernières invasions d'eau de mer y remontent donc à une période plus ancienne que dans la cuvette 'Saint-Louis'.

Deux sondages à 3,3 m et deux prélèvements fins en surface, ont été effectués : (Figure 8).

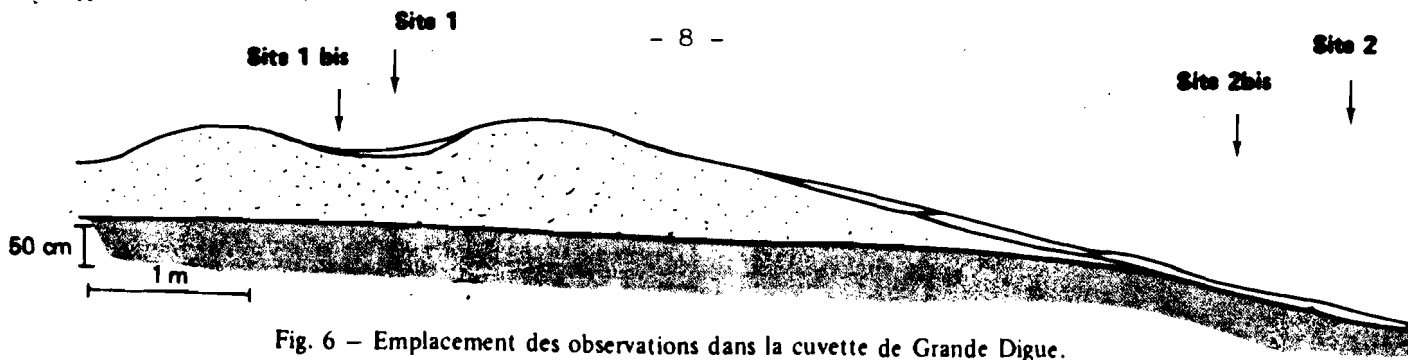


Fig. 6 - Emplacement des observations dans la cuvette de Grande Digue.
Site 3bis à 30 m au sud du Site 2

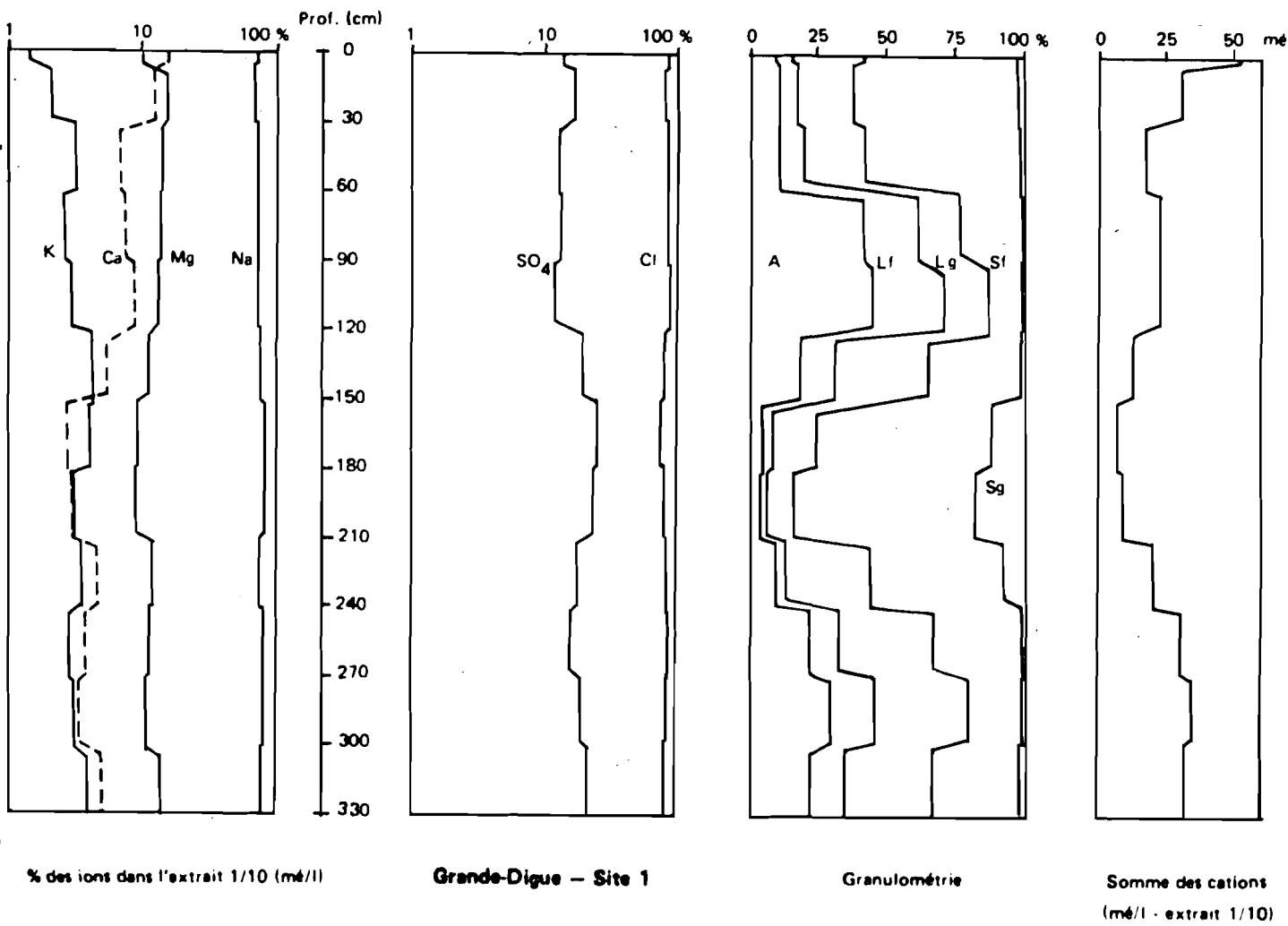
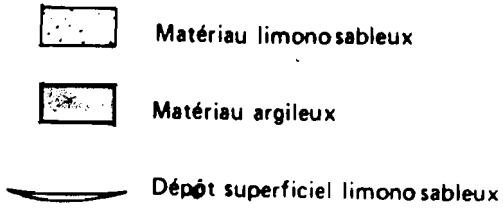
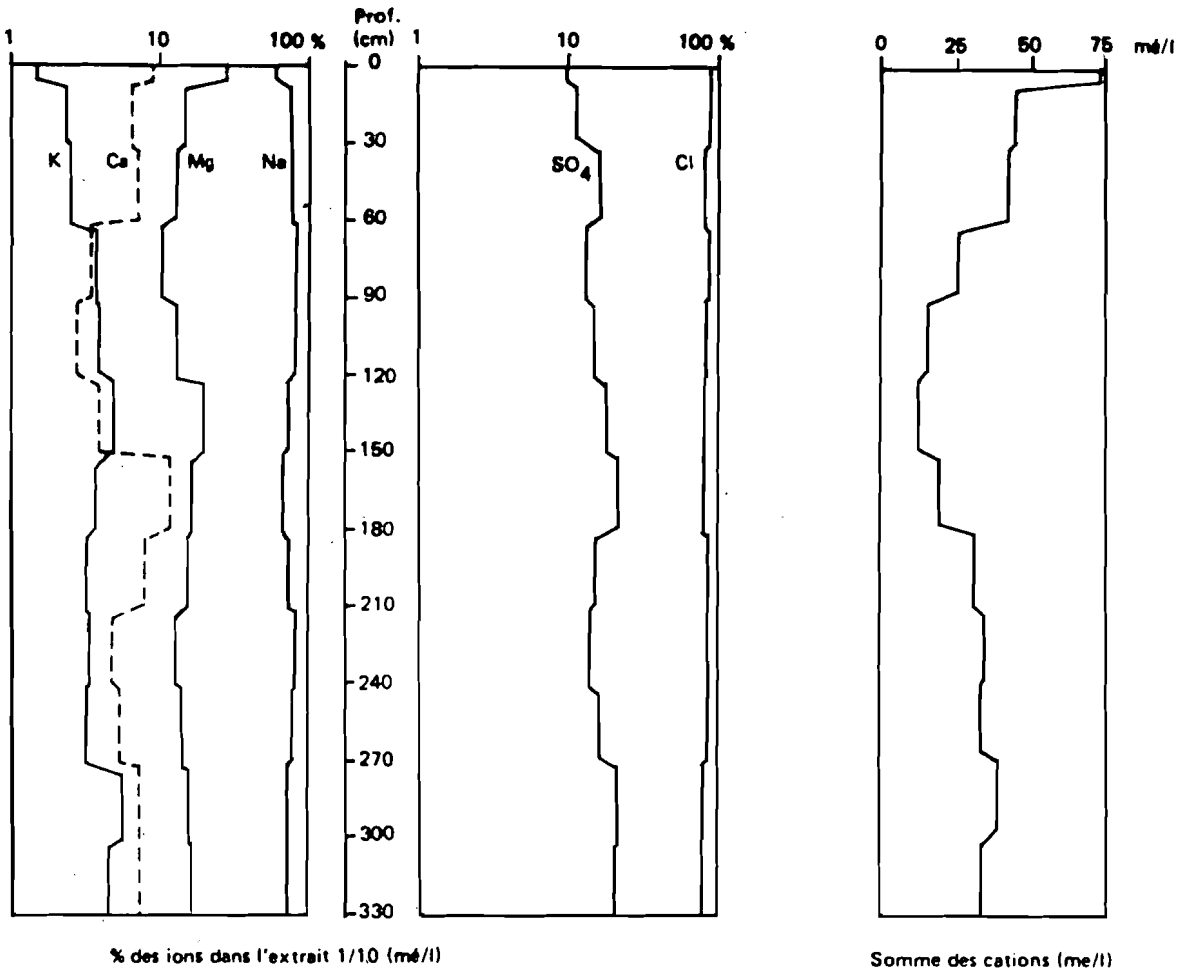
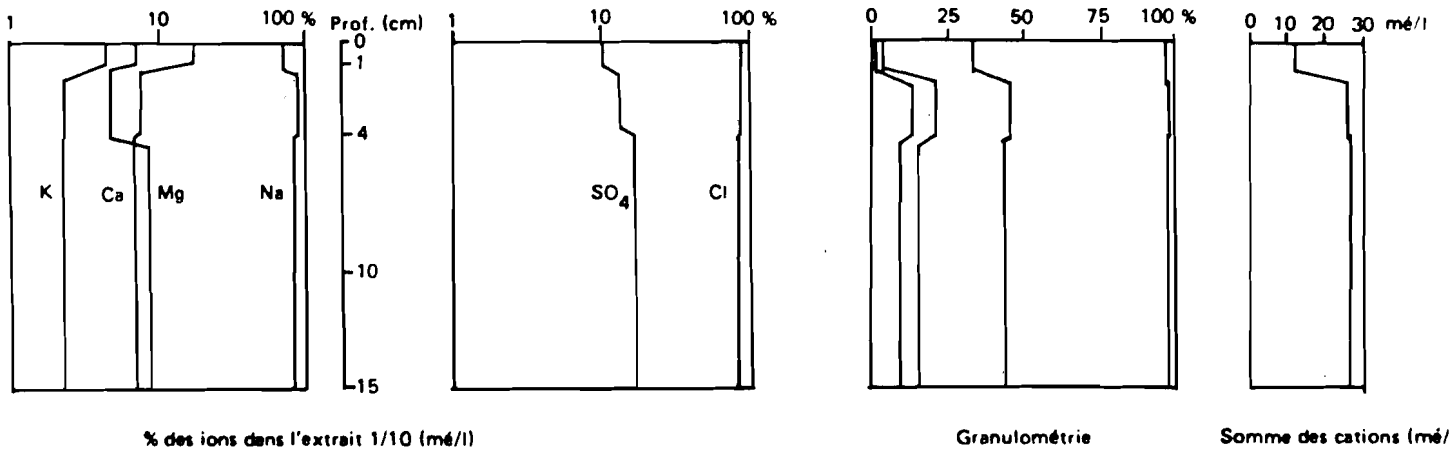


Fig. 7 - Analyse des extraits 1/10 - Pourcentages des différents ions, granulométrie et salinité totale.

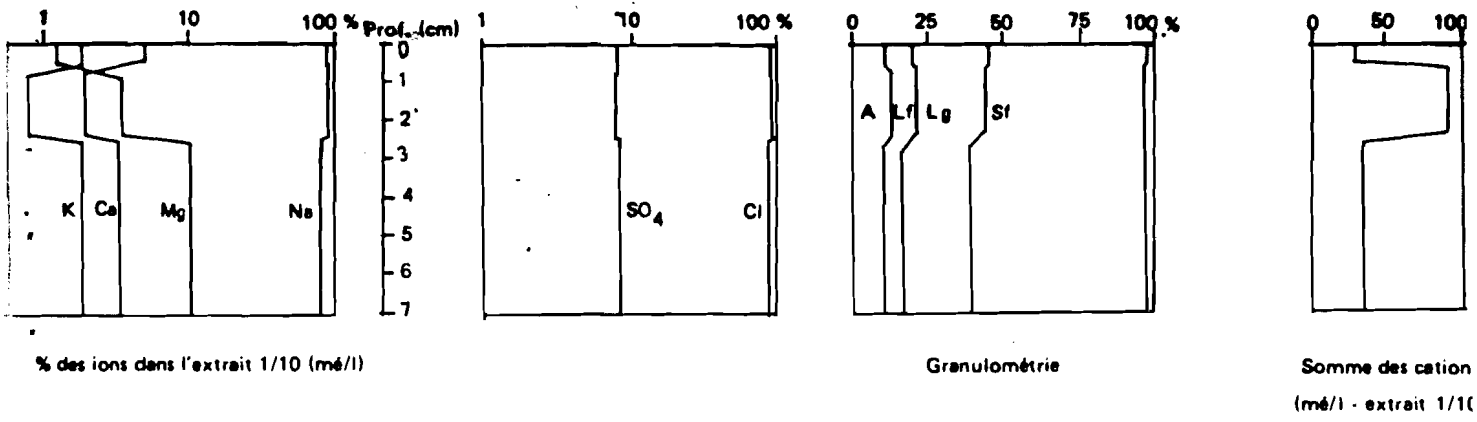


Grande-Digue - Site 2

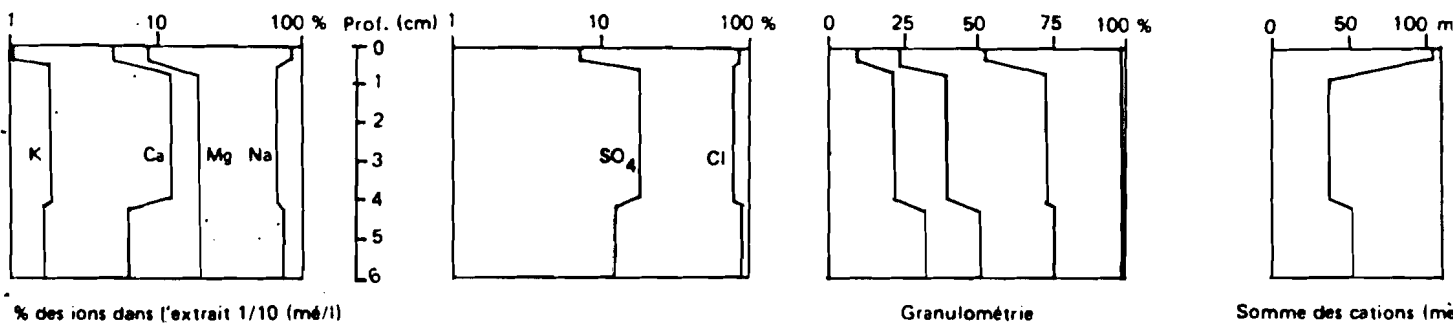


Grande-Digue - Site 1bis

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 0,5 à 1 m de hauteur, aux formes arrondies. Le matériau est limono-sableux sur 60 cm (apports éoliens) puis argileux.

Site 2 : Bordure de cuvette. Sous une croûte superficielle limono-sableuse déposée par les eaux ayant ruisselé de la zone d'accumulation éolienne, le matériau est argileux. Lors du prélèvement (Novembre 80), la croûte superficielle était en grande partie érodée par les grains de sable transportés par le vent.

Sur les figures 7, 8 et 9 sont reportés les résultats des analyses :

- L'accumulation des sels est limitée à une couche de 2 à 5 cm en surface.
- En profondeur, les niveaux sableux (Site 1 : 150-210 cm, Site 2 : 90-150 cm) ont une teneur en sels plus faible. Ceci s'explique par la capacité de rétention pour l'eau plus faible de ces niveaux. On constate aussi une baisse du pourcentage de Calcium dans ces horizons. Sur le site 1, le minimum pour Ca correspond à un pourcentage maximum pour SO_4 (150 - 180 cm) . Il ne semble donc pas que ce soit la précipitation de gypse qui contrôle la distribution de Ca dans ce cas. Par contre, sur le site 2, les pourcentages de Ca et SO_4 varient parallèlement en profondeur.
- Les rapports entre ions (Site 1 : $Na/Ca = 16$, $Na/Mg = 6,4$, $Cl/SO_4 = 5$, Site 2 : $Na/Ca = 15$, $Na/Mg = 5,3$, $Cl/SO_4 = 5,1$) sont peu différents de ceux de la cuvette Saint-Louis, avec cependant une dominance moins accentuée du chlore par rapport aux sulfates. Le pourcentage de Potassium (2,6 %) est en moyenne plus élevé que dans la cuvette Saint-Louis (1,4 %).
Ces deux différences avec la cuvette 'Saint-Louis' sont probablement imputables à une salure moyenne plus faible ici (50 mé/l) qu'à Saint-Louis (175 mé/l - extrait 1/10). Nous avons observé, lors d'une étude sur les nappes phréatiques du Delta (LE BRUSQ, J.-Y., LOYER, J.-Y., 1980) que les pourcentages des ions K^+ et SO_4 diminuent lorsque la salure augmente.

Le type de salure et la distribution des sels dans les profils ne semblent donc pas très différents à Grande Digue et à Saint-Louis.

II - Etats de surface et distribution des sels

2.1. Cuvette Aval (Saint-Louis)

Nous avons observé l'évolution des états de surface sur la toposéquence décrite au 1.1., lors du dessèchement des sols après la saison des pluies (Octobre à Décembre 1980). Plusieurs chronoséquences ont été distinguées :

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).

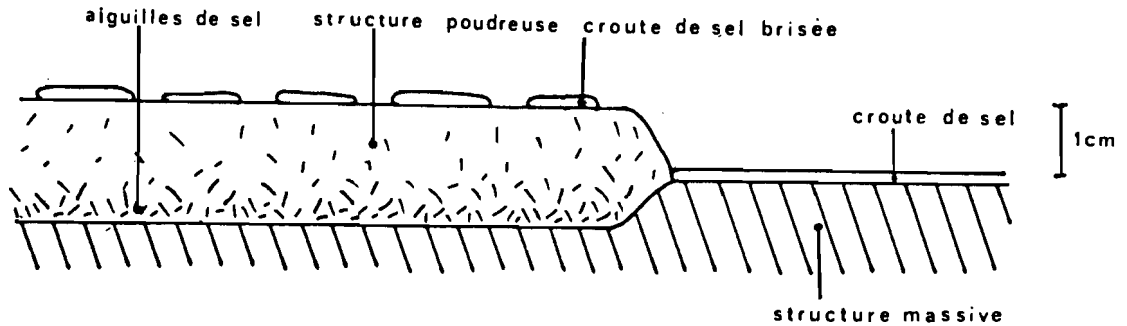


Figure 11 : Passage de la structure massive à la structure poudreuse.

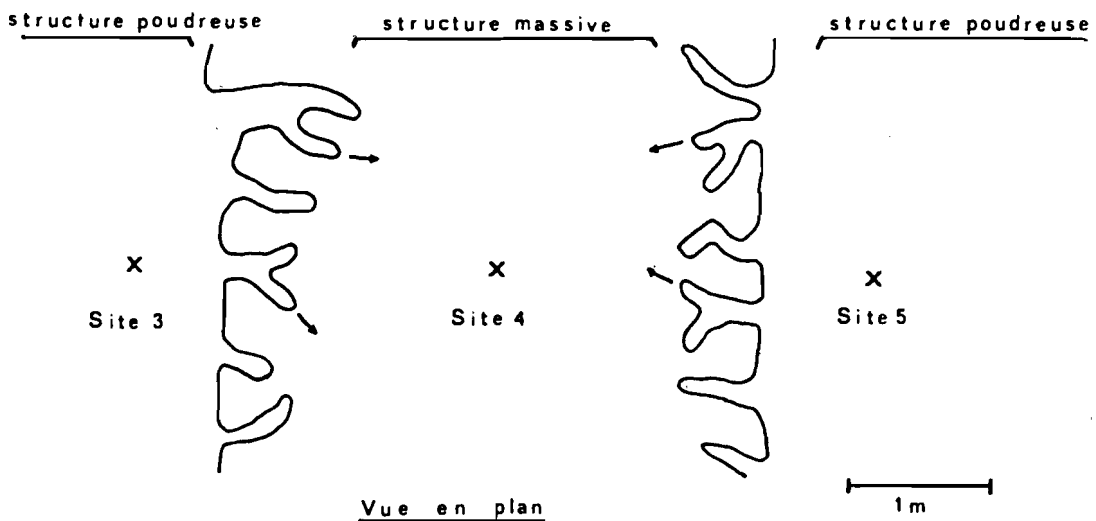


Figure 12 : Transition structure massive - structure poudreuse superficielle.

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 (tailles croissant de la surface vers la profondeur).

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.

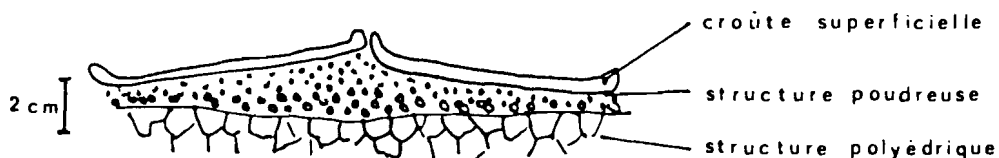
2.2. Cuvette amont (Grande Digue)

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 sera limité soit par la demande évaporative (évaporation potentielle) soit par la perméabilité du matériau.
Dans les 2 cas, les sels précipitent tous en surface. Nous avons vu qu'en fait, lors des premières phases de la dessiccation, le gypse formait préférentiellement les dépôts de surface (efflorescences blanches) puis dans certains cas, la croûte de sels formée limitait l'évaporation.
- On peut aussi supposer que l'eau s'évapore à partir d'une couche superficielle du sol, mettons les 10 premiers centimètres. On assisterait alors à une précipitation fractionnée des sels, d'abord le gypse, puis les sels plus solubles que l'on retrouverai en surface. C'est partiellement ce que l'on observe sur le site 1 à Saint-Louis, mais seulement comme une seconde étape de l'évolution du profil, la première étape étant du premier type exposé. Le passage de la 1ère à la 2ème étape suppose une structuration du matériau en prismes, qui n'apparaît pas toujours.

Il semble donc qu'une meilleure modélisation de la dynamique des sels dans les profils en voie de dessèchement suppose que l'on réponde aux questions suivantes

- Quel est le facteur limitant de l'évaporation à partir du sol ?
- Quelles sont les formes de la précipitation des sels (efflorescences, croûtes continues...), en fonction de quelles conditions (vitesse de dessèchement, perméabilité du matériau...) et quelle est l'influence de ces précipitations sur l'évaporation ?
- Dans quelles conditions la structuration du matériau suit-elle telle ou telle voie (structures prismatique, poudreuse...) et quels sont les effets de cette structuration sur l'évolution ultérieure du profil hydrique et sur la distribution des sels.

Une recherche expérimentale s'impose donc pour tenter de répondre à ces questions. Cette expérimentation devrait, selon nous, mettre en évidence les concepts suivants :

- La cinétique des processus doit être prise en compte, pas seulement sur le plan quantitatif, mais aussi qualitatif : un sol qui se dessèche rapidement n'évoluera pas selon la même voie qu'un sol se desséchant lentement.

- 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.