

## Origine et répartition des sels dans la vallée du fleuve Sénégal (Sénégal-Mauritanie)

**L'article essaie d'expliquer la grande variabilité, même à faible distance, de la salinité des surfaces salées dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Un modèle est proposé associant les caractéristiques morphologiques et géochimiques des zones salées à une double origine : d'une part, la redistribution des sels par le vent, et d'autre part, la dissolution des bacs coquilliers en conditions acides.**

Abdallahi Ould  
MOHAMEDOU

Faculté des sciences et techniques  
de Nouakchott, BP 5026, Mauritanie.

Laurent BARBIÉRO

IRD-LMTG, 38, rue des Trente-Six-Ponts,  
31400 Toulouse, France.  
<barbiero@cict.fr>

Sônia FURIAN

Université de São Paulo,  
Département de géographie,  
CP 8105 CEP 05508-900,  
São-Paulo, Brésil.

Gilles CIORNEI

IRD, Centre de Hann, BP 1386, Dakar,  
Sénégal.

Raoul CARUBA

Irim, Université de Nice-Sophia  
Antipolis, Parc Valrose, France.

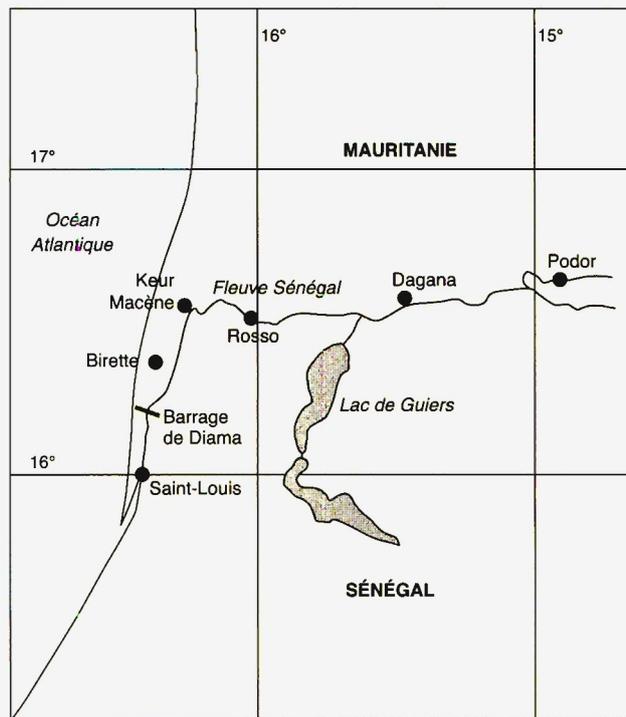
Dans les pays arides ou semi-arides, sous l'effet d'une forte salinité, dans une certaine gamme de texture des horizons superficiels et dans des conditions d'inondation périodique, on observe la formation d'une structure poudreuse à la surface du sol, provoquée par la cristallisation rapide des sels. Les particules issues de cet émiettement (50 à 150  $\mu\text{m}$ ) sont facilement transportables par le vent et, lorsque celui-ci présente une direction préférentielle, elles s'accumulent sous la forme de dunes argileuses appelées *lunettes*, *clay dunes*, *lunettes dunes* ou *bourrelets*. La texture des sédiments n'est pas, à proprement parler, argileuse mais ces formations éoliennes sont dites « argileuses » par opposition aux dunes de sable. En raison des conditions restrictives nécessaires à leur formation, la présence de ces *clay dunes* est employée pour la reconstitution de paléoenvironnements [1]. Des *clay dunes* sont actuellement en formation dans le delta du fleuve Sénégal (carte) [2-7], particulièrement dans les cuvettes salées

du Parc national du Diawling (Mauritanie) dont l'acidité est variable de place en place en fonction du développement d'une ancienne mangrove. Cette mangrove a accompagné la dernière régression marine (4 000 ans BP), et les terrains encore récemment soumis à l'influence des marées subissent actuellement une oxydation qui provoque l'expression d'une forte acidité.

Plus en amont, dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, la présence de zones salées est un obstacle à l'implantation durable d'une agriculture irriguée. Ces zones sont caractérisées par une grande variabilité dans le faciès chimique de la salinité, pouvant passer en quelques mètres, voire même en quelques décimètres sur un même profil, d'un faciès chloruré-sodique à un faciès sulfaté-sodique ou sulfaté-calcique. Des arguments morphologiques et géochimiques ont permis d'attribuer ces zones salées à d'anciennes *clay dunes* qui se seraient développées dans des conditions similaires à celles qui existent actuellement dans le delta [6].

## Références

1. Bowler JM. Clay dunes : their occurrence, formation and environmental significance. *Earth-Science Rev* 1973 ; 9 : 315-38.
2. Maynard J. Les sols du pseudo-delta du Sénégal. Mission d'aménagement du Sénégal. Dakar, centre de Hann. *Bulletin ORSTOM* 1952 ; 5 ; 58 p.
3. Tricart J. Influence des sols salés sur la déflation éolienne en basse Mauritanie et dans le delta du Sénégal. *Rev Geom Dyn* 1954 ; 5 : 124-32.
4. Mougenot B. *Étude pédologique de la cuvette de N'Tiagar (Partie Nord), delta du fleuve Sénégal*. Centre ORSTOM de Dakar-Hann, rapport de recherches, 1982 ; 55 p.
5. Mougenot B. *Caractérisation et évolution des états de surface des sols en relation avec la dynamique saisonnière des sels dans le delta du Sénégal. Méthodologie et résultats partiels de la campagne 1982/1983*. Centre ORSTOM de Dakar-Hann, rapport de recherches, 1983 ; 55 p.
6. Barbiéro L, Ould Mohamedou A, Caruba R. Influence de la maturation des sols de mangrove sur la déflation éolienne et la formation de dunes argileuses dans le delta du fleuve Sénégal. *CR Acad Sci, Paris* 1998 ; 327 (série IIa) : 115-20.
7. Ould Mohamedou A, Aventurier A, Barbiéro L, Caruba R, Valles V. Geochemistry of clay dunes and associated pan in the Senegal delta (Mauritania). *Arid Soil Res Rehabil* 1999 ; 13 : 265-80.
8. Vallès V, De Cockeborne AM. Élaboration d'un logiciel de géochimie appliqué à l'étude de la qualité des eaux. *Colloque « Altération et restauration de la qualité des eaux continentales »*, Port Leucate, 1<sup>er</sup> et 2 octobre 1992 ; 27-30.
9. Ould Mohamedou A. *Évolution pédogénétique des sols de mangrove de la vallée du fleuve Sénégal et phénomènes associés*. Rapport de Stage Post-Doctoral, Aupelf-Uref, 2000 ; 37 p.
10. Laperrousaz C. *Influence de la variabilité du faciès chimique sur la conductivité électromagnétique*. Mémoire ENSA Rennes, 1999 ; 25 p.
11. Samba Diene R. *Riziculture et dégradation des sols en vallée du fleuve Sénégal : analyse comparée des fonctionnements hydro-salins des sols du delta et de la moyenne vallée en simple et double riziculture*. Thèse Doc Ing. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 1998 ; 165 p.



Carte. Localisation de la zone d'étude.

Le but de ce travail est de comparer la séquence de précipitation des sels entre deux cuvettes dont la solution du sol est acide et neutre, traduisant respectivement une forte et faible influence de la mangrove par le passé, et de vérifier si ces conditions plus ou moins acides peuvent expliquer une grande variabilité dans le faciès chimique des zones d'accumulation des sels.

## Matériel et méthode

Les travaux ont été réalisés sur deux cuvettes correspondant à deux extrêmes dans la gamme d'acidité des sols dans cette petite région. Le premier site est localisé au nord du village de Birette (acide), dans un secteur encore récemment sous l'influence des marées, et le second à proximité du village de Keur Macène (neutre), en dehors du passage de la mangrove (carte).

Vingt échantillons ont été prélevés à la tarière sur chaque site en recherchant une certaine gamme de salinité. La solution a été extraite au laboratoire par centrifugation de pâtes saturées. Le pH et l'alcalinité ont été mesurés juste après cette centrifugation. Na, K, Ca, Mg et SO<sub>4</sub> ont été mesurés par spectrométrie

d'émission (ICP). Les chlorures ont été mesurés par colorimétrie automatique au thiocyanate mercurique à 480 nm. L'alcalinité a été mesurée par titration à HCl.

Les précipitations salines dans les sols ont été observées à partir de fosses et de sondages à la tarière sur le site de Birette et sur le bord d'un canal en construction à Keur Macène.

Des efflorescences salines ont été prélevées sur les cuvettes pour observations au MEB (XL20 Philips ; 15 kv), identification et analyse à la microsonde (eXL energy dispersive X-ray system).

Les équilibres minéraux-solutions sont fondés sur le calcul des activités des ions dissous, estimées à partir de l'analyse grâce au modèle d'association ionique « Aqua » [8].

## Résultats

Sur les deux sites, la gamme de concentration est similaire. Les forces ioniques évoluent de 0,088 à 2,96, c'est-à-dire dans un rapport de 1/34. Les résultats sont présentés sur des diagrammes de concentrations, avec un facteur de concentration des solutions en abscisse (FC) établi en fonction de la teneur en

ions chlorure, et la molalité des ions majeurs en ordonnée, en milliéquivalents par litre (figure 1).

La fraction argileuse est composée d'un mélange de kaolinite, smectite et minéraux interstratifiés illite-smectite [9]. Les proportions sont similaires sur les deux sites mais la cuvette de Birette présente des sols beaucoup plus sableux.

Les conditions neutre ou acide apparaissent clairement sur chacun des sites. À Birette, le pH avoisine 5,5 contre 7 à Keur Macène, et l'alcalinité y est environ 40 fois inférieure. Des différences sont également détectées dans la composition en ions majeurs. Dans les conditions acides, les teneurs en sulfates et en potassium sont plus élevées, de même que les teneurs en calcium et magnésium pour les faibles facteurs de concentration. À partir de FC = 5 ( $\log(\text{FC}) = 0,7$ ), les teneurs en magnésium sont équivalentes sur les deux sites ; en revanche, au-delà de cette valeur de FC, les teneurs en calcium sont nettement inférieures en conditions acides. Les teneurs en sodium sont équivalentes pour les FC faibles, puis deviennent légèrement supérieures en condition acide pour les FC plus forts.

### Équilibre sels/solution

Dans les conditions neutres, les solutions sont à l'équilibre avec la calcite (figure 2A). De nombreux nodules calcaires sont observés dans les sols, de même que quelques coquillages. Dans la solution du sol, les teneurs en calcium sont plus élevées que l'alcalinité : ainsi, au cours de la concentration, les molalités en calcium augmentent alors que l'alcalinité est maintenue à un niveau plus bas, en accord avec l'alcalinité résiduelle calcite négative ( $\text{Alc.} - \text{Ca} < 0$  en eq/l).

L'équilibre avec le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) est atteint pour un facteur de concentration voisin de 6,3 ( $\log(\text{FC}) = 0,8$ ), à partir duquel on observe un contrôle simultané du calcium et des sulfates. Lors de ce contrôle, la molalité en sulfates continue de croître au cours de la concentration alors que la molalité en calcium diminue, en accord avec l'alcalinité résiduelle calcite + gypse ( $\text{Alc.} - \text{Ca} + \text{SO}_4$  en eq/l) positive. Pour les forts facteurs de concentration, on observe que la diminution des teneurs en calcium provoque une remontée de l'alcalinité car les solutions sont également à l'équilibre avec la calcite.

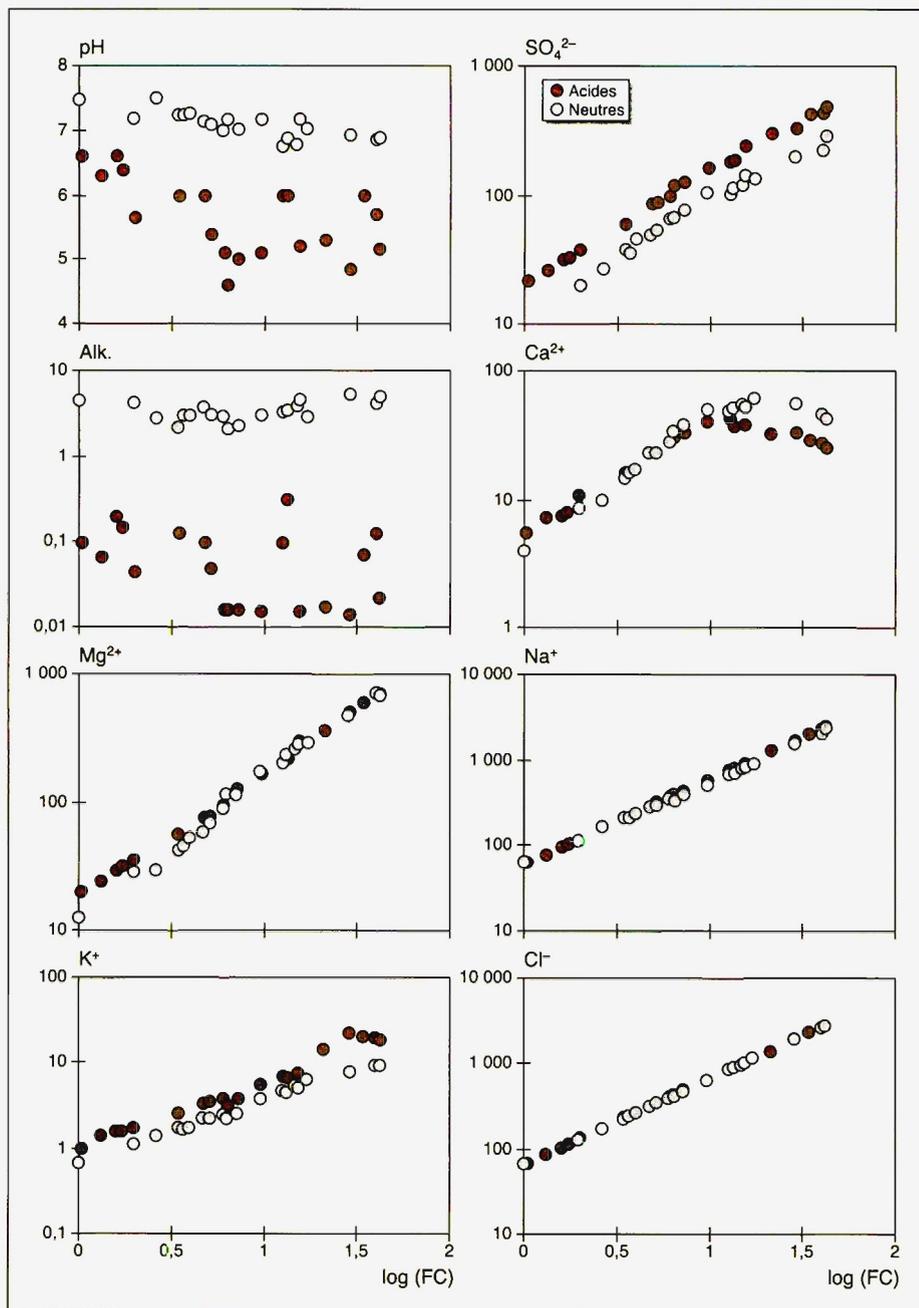


Figure 1. Diagramme de concentration des ions majeurs dans les cuvettes acides et neutres (molalités en meq/l).

Dans les conditions acides de la cuvette de Birette, les solutions sont nettement sous-saturées par rapport à la calcite (figure 2B) et l'on observe une dissolution de deux bancs coquilliers (vers 60 et 80 cm de profondeur) vers le cœur de la cuvette. Ces bancs coquilliers sont remplacés par des horizons à gros nodules de gypse de 2 à 4 cm, en quantité variable en fonction des proportions de calcite initiale.

Dans la zone de prélèvement, située hors

des bancs coquilliers, les molalités en calcium et sulfate augmentent proportionnellement au facteur de concentration jusqu'à une valeur de FC = 4 ( $\log(\text{FC}) = 0,6$ ) : la saturation par rapport au gypse est alors atteinte pour une concentration moindre que dans le cas précédent. La molalité en sulfates continue de croître au cours de la concentration alors que la molalité en calcium diminue, en accord avec l'alcalinité résiduelle gypse ( $\text{SO}_4 - \text{Ca}$  en eq/l) positive.

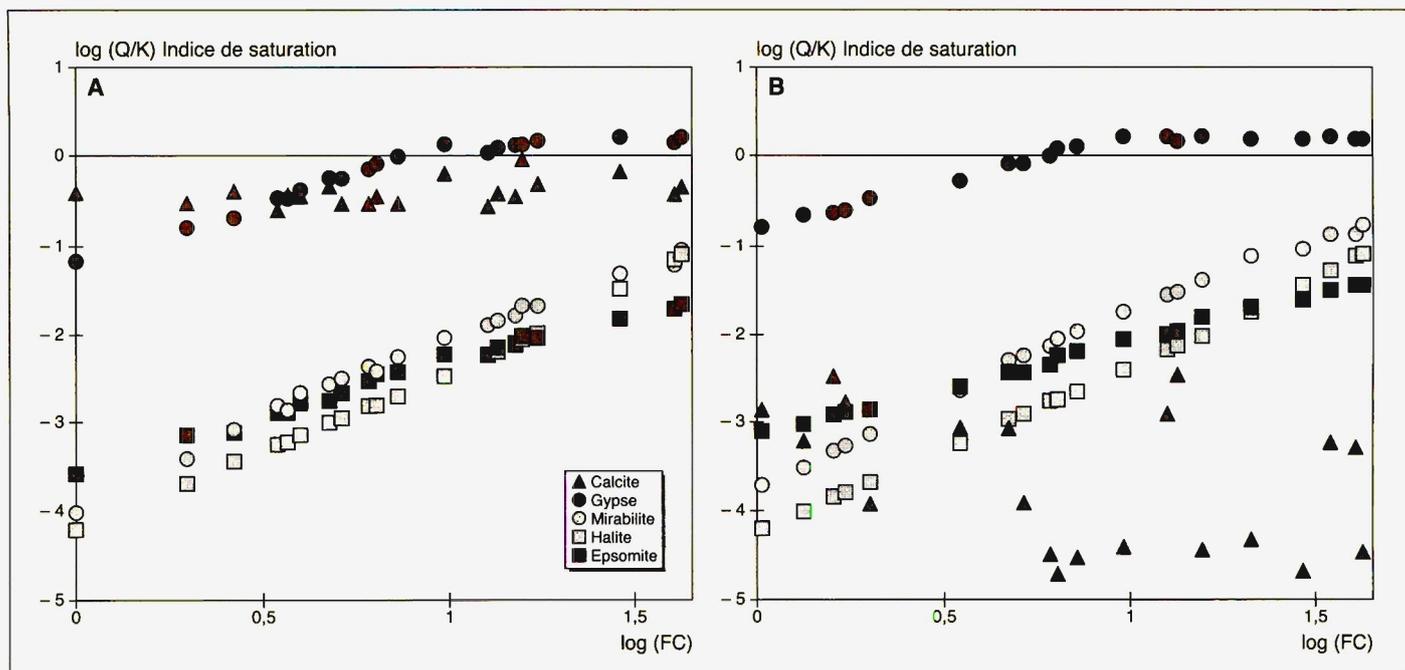


Figure 2. Diagramme de résidu - calcite, gypse, mirabilite, halite, epsomite. A : cuvette neutre ; B : cuvette acide.

## Comportement des cations

À Birette, magnésium et sodium augmentent proportionnellement à la concentration. À Keur Macène, les teneurs en sodium subissent un contrôle progressif de FC = 3,2 à 10 ( $\log(\text{FC}) = 0,5 \text{ à } 1$ ). Dans la même gamme de FC, on observe que calcium et magnésium augmentent plus rapidement que le facteur de concentration. Enfin, sur les deux sites, le potassium augmente régulièrement mais moins rapidement que le facteur de concentration, indiquant qu'une partie du potassium quitte la solution.

## Minéralogie des efflorescences

L'échantillonnage des efflorescences prélevées sur chacune des cuvettes confirme le comportement des ions au long de la concentration (tableau). En milieu neutre, la calcite n'est pas décelée dans les efflorescences qui sont composées uniquement de gypse et de halite. Dans les conditions acides, elles sont composées de gypse, de halite, et présentent des traces de thénardite. Secondairement, des efflorescences rouilles sont détectées, dont l'analyse à la microsonde révèle une composition

de fer, magnésium et chlorure. Une recherche spécifique serait nécessaire pour éclaircir la nature minéralogique de ces efflorescences rouilles.

## Discussion

Les plus fortes teneurs en sulfates et potassium en milieu acide doivent être attribuées à l'accumulation de la pyrite ( $\text{FeS}_{2(s)}$ ) dans les racines des palétuviers puis à l'oxydation partielle de ces sulfures en jarosite ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{6(s)}$ ) dans un milieu hydrologiquement ouvert et, enfin, à l'oxydation de la jarosite en oxydes de fer dans un milieu hydrologiquement fermé.

## Échanges ioniques

À Keur Macène, le comportement des cations entre les  $\log(\text{FC})$  0,5 et 1 doit être attribué à une désorption de calcium et magnésium et à une adsorption de sodium sur le complexe d'échange au cours de la concentration. Sur les deux sites, le contrôle progressif du potassium tout au long de la concentration correspond à une fixation sur le complexe d'échange. Cela est décelé même sur le site de Birette malgré la texture sableuse dans la zone de prélèvement.

## Séquences de précipitation des sels

Les fortes teneurs en sulfates provoquent une saturation vis-à-vis du gypse pour un

Tableau. Minéralogie des sels dans les sols et les efflorescences					
Types de sel	Acide		Neutre		Efflor.
	Sol	Efflor.	Sol	Efflor.	
Calcite	-	-	+++	-	-
Gypse	+++	+++	+++	+++	+++
Thénardite/Mirabilite	-	traces	-	-	-
Halite	+	+++	+	+++	+++
Efflor. rouilles « Fe, Cl, Mg »	-	+	-	-	-

facteur de concentration moindre dans les conditions acides (figure 2). Les équilibres par rapport aux sulfates de sodium (thénardite,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; mirabilite  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) et à la halite ( $\text{NaCl}$ ) sont atteints simultanément. Les sulfates de sodium sont donc susceptibles de précipiter mais localement et en faible quantité. Dans les conditions neutres, au contraire, l'équilibre avec la halite est atteint avant que l'équilibre avec les sulfates de sodium ne le soit. La précipitation de la halite provoque une consommation des ions sodium qui retarde la formation des sulfates de sodium. Dans les deux cas, l'équilibre vis-à-vis du sulfate de magnésium (epsomite,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ne sera atteint que tardivement. Il existe donc des différences dans l'ordre et la nature des précipitations salines entre les deux environnements.

Cependant, ces différences sont minimes dans les efflorescences et portent essentiellement sur la présence de traces de sulfates de sodium en milieu acide. Ainsi, à l'exception de ces traces, les *clay dunes* seront alimentées par les mêmes sels, quel que soit le développement des conditions acides dans les sols. On ne peut donc pas attribuer la variabilité dans le faciès chimique observée dans les anciennes *clay dunes* de la moyenne vallée à une alimentation en sels différente selon des conditions plus ou moins acides des cuvettes au moment de la déflation éolienne.

On pourrait envisager une alimentation des *clay dunes* essentiellement sous la forme de gypse au début de la saison sèche, alors que la solution du sol dans les cuvettes est moins concentrée, et une alimentation plus chargée en halite en fin de saison sèche, au maximum de la concentration. Cependant, nous avons constaté que les chlorures se forment dès le début de la saison sèche de sorte qu'une variabilité saisonnière ne peut expliquer une alimentation avec des sels de nature différente.

### Reconstitution de l'origine et de la répartition des sels

Les observations réalisées sur la cuvette de Birette permettent cependant de proposer un schéma d'évolution expliquant la variabilité chimique observée dans les zones salées de la moyenne vallée (figure 3). Ce schéma met en jeu une double origine des sels avec, d'une part, un stock principalement constitué

de gypse et de halite issu de la concentration des solutions, transporté et accumulé par le vent et, d'autre part, un stock principalement constitué de gypse, formé dans le sol sous les conditions acides à partir de la dissolution des bancs coquilliers.

Le stade 1 correspond à la période d'accumulation de pyrite dans les racines des palétuviers dans la zone soumise aux battements des marées. Les

bancs de coquillages sont présents dans les sédiments. Avec la régression marine (stade 2), seuls certains marigots sont en eau et encore occupés par une végétation de mangrove. L'abaissement du niveau de la nappe provoque l'oxydation de la pyrite accumulée et l'expression d'une forte acidité. Les bancs coquilliers se dissolvent et sont remplacés par des horizons gypseux. La nappe présente à faible profondeur est soumise à l'évapo-

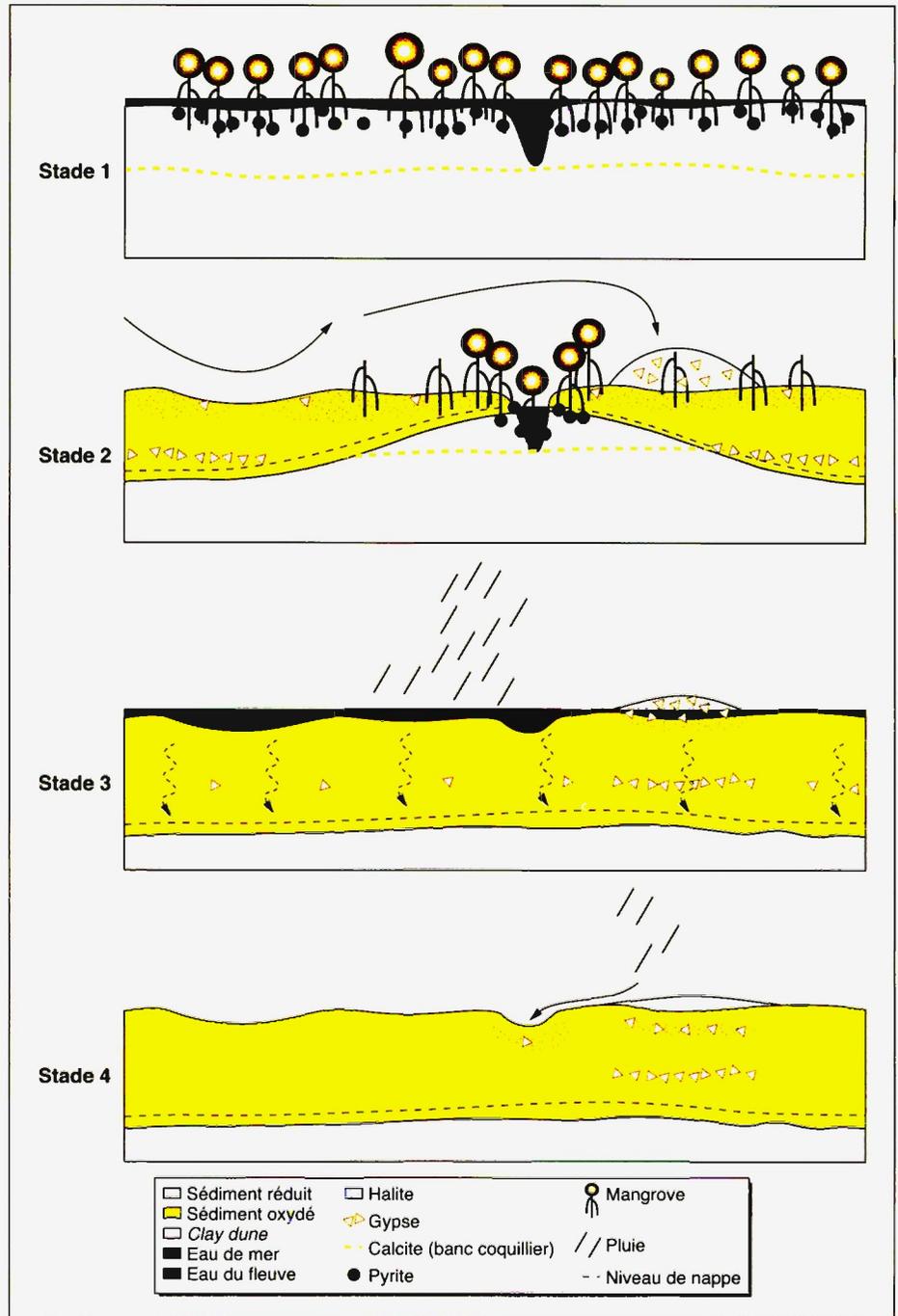


Figure 3. Reconstitution de l'origine et de la distribution des sels dans le paysage.

ration, et la cristallisation rapide des sels en surface provoque la formation d'une structure poudreuse, vulnérable à la déflation éolienne. Les particules arrachées par le vent, riches en gypse et en halite, s'accumulent derrière les obstacles pour former des *clay dunes*. Ces deux premiers stades sont actuellement observables dans le delta du Sénégal.

Au stade suivant (stade 3), la nappe est encore descendue et n'est plus soumise à l'évaporation. Les pluies d'hivernage et les débordements saisonniers du fleuve contribuent à une désalinisation globale de l'environnement. Les zones occupées par les *clay dunes* correspondent à un surplus local de sel. Les solutions percolant à travers les sols demeurent plus longtemps à l'équilibre vis-à-vis du gypse, sans évoluer en position de sous-saturation, et restent non agressive vis-à-vis du stock de gypse présent en profondeur. Celui-ci se maintient et ce n'est qu'après une désalinisation plus avancée que le stock va commencer à se dissoudre et imposer son faciès chimique à la solution du sol (stade 4). L'ancienne *clay dune* est désalinisée et son sel migre en sub-surface vers 30 à 40 cm. Les zones salées ne sont plus décelables depuis la surface du sol. On observe parallèlement une salinisation secondaire des zones basses à proximité de ces anciennes *clay dunes*, et notamment dans le lit des anciens marigots. Ce schéma permet d'expliquer un faciès chimique actuellement plutôt chloruré sodique vers 30 à 40 cm de profondeur, puis franchement sulfaté calcique vers 60 à 80 cm [10]. Ce point recoupe également les conclusions tirées par Samba Diene [11] sur un autre site de la basse vallée du Sénégal, et qui avait attribué la présence de gypse à une accumulation indépendante de la concentration des solutions par évaporation.

Aujourd'hui, seules les zones correspondant à d'anciennes *clay dunes* sont en

core salées. En raison des vents de N-NE dominants, il s'agit très souvent de la rive sud des anciens marigots dont les lits sont encore décelables sur les photographies aériennes. Depuis la mise en service des barrages de régulation du Sénégal, la mise en irrigation provoque une remobilisation et une remontée des sels par capillarité vers la surface.

## Conclusion

Des travaux précédents ont montré que les zones salées de la moyenne vallée correspondent à d'anciennes accumulations éoliennes (*clay dunes*) de sels d'origine marine. Même si elles modifient la séquence de précipitation, les conditions plus ou moins acides qui règnent dans les cuvettes au moment de la déflation éolienne ne changent pas la nature des sels qui alimentent les *clay dunes*. La variabilité chimique observée dans les zones salées ne peut donc pas être attribuée à des conditions plus ou moins acides dans les cuvettes de départ des sédiments salés. En revanche, la dissolution des bancs coquilliers dans les conditions acides suivie de leur transformation en horizons gypseux fournit une seconde source de sels qui concorde avec les caractéristiques des zones salées situées plus en amont. Ce second stock de sel a été longtemps protégé de la dissolution par les eaux douces (débordement du fleuve et pluies d'hivernage) par le stock de sel de la *clay dune*. Le jeu entre ces deux stocks de sel explique à la fois la localisation, la morphologie et la géochimie des zones salées dans la moyenne vallée du Sénégal. Ces zones salées correspondent donc à un héritage du passé ; elles restent très localisées et doivent être délimitées avant un aménagement hydro-agricole, afin d'éviter la remobilisation des sels et la dégradation de certaines parcelles ■

## Résumé

Dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal, des surfaces salées sont caractérisées par une grande variabilité, à faible distance, dans le faciès chimique de la salinité. Des arguments morphologiques et géochimiques permettent d'associer la présence de ces surfaces salées à d'anciennes *clay dunes* développées dans des conditions environnementales similaires à celles qui règnent actuellement dans le delta, où la formation des *clay dunes* est active. Ces dunes sont alimentées par déflation éolienne sur des cuvettes salées mais plus ou moins acides en fonction du développement d'une ancienne mangrove. Le but de cette étude est de vérifier si les conditions plus ou moins acides des cuvettes peuvent modifier la séquence de précipitation des sels, expliquant ainsi la variabilité de faciès chimique de la salinité dans les anciennes *clay dunes*.

L'étude de deux cuvettes, l'une acide, l'autre neutre, confirme une différence dans la séquence de précipitation des sels. Dans les conditions neutres, la séquence est : calcite > gypse > halite alors que, dans l'environnement acide imposé par une ancienne mangrove, elle devient : gypse > thénardite > halite. Ces différences ne suffisent pas à expliquer la variabilité dans le faciès chimique observé dans la moyenne vallée. En revanche, une double origine des sels, d'une part, redistribués par le vent et, d'autre part, issus de la dissolution de bancs coquilliers en conditions acides permet de proposer un modèle expliquant les caractéristiques morphologiques et géochimiques des zones salées.

*Sujets : Sols, pédologie, dégradation, désertification.*

## Summary

In the middle valley of the Senegal river, saline areas exhibit a large variability in the chemical profile of salinity, over a small distance. Morphological and geochemical considerations allow us to attribute these saline areas to former clay dunes. They developed under similar environmental conditions to those observed today in the delta, where clay dunes formation is still under way. These clay dunes are the result of aeolian deflation on saline pans, more or less acid, depending on the development of a former mangrove vegetation.

Two contrasted pans (neutral and acid) are studied in order to characterise the main geochemical features and the salt precipitation sequence. In the acid environment, the salt precipitation sequence is the following: gypsum > thenardite > halite. By contrast, in the neutral pan, the salt precipitation sequence is calcite > gypsum > halite. This difference in the salt precipitation sequence is not sufficient to explain the morphological and geochemical features of saline areas located upstream in the middle valley. Two origins for salt accumulation are proposed: one is aeolian deflation, and the other, the dissolution of shells banks under acid conditions.

## ERRATUM

Nous reproduisons à nouveau la carte 2 de l'article de Sandrine Petit et Mohamed Sambourou Diallo, *L'introduction du fourrage ligneux dans les parcours du bétail en zone soudanienne. Déterminants écologiques ou raisons sociales ?*, paru dans *Sécheresse* n° 3, juillet-août-septembre 2001, p. 141-7.

