

10^{ème} congrès international de la science
du sol. Moscou. 1974.

PEDOGENESE ET TRANSFORMATIONS DES COMPOSES DU SOUFRE DANS DEUX
SOLS TROPICAUX EN VOIE DE DIFFERENCIATION
(milieu fluvio-marin, milieu continental)

J.Vieillefon et C.Cheverry

Office de la Recherche Scientifique et Technique. Outre-Mer
France

Introduction

Les sols des mangroves de la Casamance (Sénégal), terres gagnées sur des vases fluvio-marines en bordure de l'Atlantique, et les "polders" du lac Tchad, terres gagnées sur des sédiments lacustres, au centre de l'Afrique, sont deux types de sols tropicaux en voie de formation.

Les matériaux ont été déposés sous l'eau et l'arrêt de cette submersion provoque le développement d'une activité biologique intense, d'une végétation abondante, consommatrice d'oxygène au niveau de son enracinement. La première phase de la pédogénèse se traduit ainsi par la réduction des composés du soufre et par leur association au fer.

Lorsque le degré d'engorgement du sol diminue, une phase de réoxydation intervient qui tend à reséparer ou à réimmobiliser sous d'autres formes ces éléments et à accélérer le processus de minéralisation de la matière organique. La vitesse du phénomène et sa résultante sont différentes selon les caractères du matériau (présence ou absence d'une réserve carbonatée-calcique susceptible de neutraliser l'acidité développée par l'oxydation des sulfures). Le caractère aride du climat, saisonnier au Sénégal, général au Tchad, induit alors des phénomènes de salinisation dont les modalités sont réglées par l'organisation pédologique acquise par le sol lors de la phase précédente.

Malgré l'opposition entre les caractères géochimiques de ces deux milieux, l'un "marin", à dominance des chlorures, l'autre "continental" à dominance des bicarbonates et carbonates, on note

158

une certaine convergence du devenir du soufre dans les deux cas, que l'on se propose de préciser.

Exemple des mangroves tropicales

Sur les côtes atlantiques du Sénégal, en Casamance, dans le vaste golfe comblé à la suite de la dernière grande transgression du Quaternaire (environ 5000 BP), des dépôts fluvio-marins d'origine continentale ont été colonisés par une végétation adaptée et dense de palétuviers: la mangrove. Les constituants principaux des dépôts sont: quartz, kaolinite et oxydes de fer.

Par suite du pouvoir réducteur de la matière organique, des bactéries sulfato-réductrices se développent dans le sédiment et provoquent l'accumulation de sulfures de fer, principalement sous forme de pyrite, au voisinage des débris organiques et des racines.

Dans un stade ultérieur, la morphologie engendrée par la progression de la sédimentation induit des changements du régime hydrique: la submersion par les marées s'atténue, l'amplitude des variations de niveau et de salinité de la nappe phréatique augmente, ce qui a pour effet de provoquer une zonation de la végétation. Aux Rhizophora, responsables des fortes accumulations de sulfures dans la phase précédente, succèdent des Avicennia, résistant mieux à la salure mais produisant moins de matière organique et tendant ainsi à diminuer le caractère réducteur du milieu. (c.II).

La baisse du niveau moyen de la nappe et l'aération qui en résulte favorisent un début de structuration du sol et la diminution progressive de la teneur en eau et en matière organique du sédiment. Un début de réoxydation affecte les sulfures, l'acidification débute en surface et progresse lentement en profondeur (d.II).

A partir d'un seuil (A.II), qui correspond sur le terrain à la limite atteinte par les marées de vives eaux, le régime de submersion change. De bi-quotidien à bi-mensuel dans la mangrove, il devient annuel dans le "tanne", dépression intérieure située en arrière de la mangrove. Au tanne nu, couvert d'efflorescences salines en saison sèche peut succéder une maigre végétation d'haloxytes. Les palétuviers ont disparu sous l'influence de la salure et de l'acidité mais leurs traces sont décelées en profon-

O. R. S. I. O. M.

Collection de Référence

n° 8604

159

Pedo

- E. B. V. 1977

deur. Deshydratation et déflation éolienne concourent au creusement de la cuvette du tanne et permettent ainsi la prolongation de la submersion en saison des pluies, donc un lessivage partiel des sels. L'installation alors possible des halophytes freine la déflation (A.III).

A cette phase de l'évolution correspond une intense oxydation des pyrites qui aboutit à la formation de jarosite (sulfate de fer et de potassium ou de sodium) en quantités certes importantes mais qui ne représentent qu'une fraction de la pyrite oxydée. C'est là un second type de blocage partiel du soufre et du fer. Malgré l'absence d'élément neutralisant (calcaire), l'acidification ne se développe que lentement et le pH reste voisin de 4 dans la solution du sol, grâce au lessivage des solutions acides par les pluies et à l'influence tampon de la jarosite. Un équilibre s'établit entre l'action acidifiante (oxydation des sulfures) et l'action du régime hydrique (D.III).

Finalement, une fois le stock de soufre oxydable presque épuisé et l'action des marées disparue, les précipitations et la submersion temporaire provoquent dans ces sols structurés et aérés un lessivage des sels et l'hydrolyse de la jarosite. Le fer libéré précipite en partie à l'état d'hydroxydes en perpétuant l'emplacement des racines de palétuviers sous forme de gaines racinaires. Le développement de la structuration s'accompagne d'une évolution des minéraux argileux qui s'enrichissent apparemment en minéraux gonflants tandis qu'une certaine alcalinisation semble attestée par des migrations de matières organiques le long des faces structurales.

Tant dans ses propriétés morphologiques, physico-chimiques que minéralogiques, la pédogénèse des sols de mangroves est donc principalement gouvernée par les transformations des composés du soufre. Ceux-ci passent successivement d'une phase soluble provenant de l'eau de mer à des phases solides réduites (pyrite), puis oxydées (jarosite) avant de rejoindre la nappe. (schéma synthétique, bas de page n°6).

Exemple des polders du lac Tchad

Ces polders sont des bras du lac isolés de ce dernier par des barrages. Les sédiments sont argileux (montmorillonites) et humifères. La présence à faible profondeur d'une nappe phréatique, le

caractère fortement évaporatoire du climat favorisent les phénomènes de remontée capillaire dans les sols récemment exondés. Les sels dominants sont des carbonates mais les composés du soufre jouent également un grand rôle dans l'équilibre salin des polders. Leur origine est double; soufre organique accumulé dans le sédiment lacustre et sulfates apportés au niveau du polder par la nappe phréatique et provenant de la dissolution d'évaporites fossiles.

Dans une première phase, les vases sont colonisées par des roseaux (Cyperales, Papyrus, Typhales) et l'on observe, lorsque le plan d'eau stagne à très faible profondeur, la réduction des sulfates. Les sulfures se concentrent préférentiellement dans la rhizosphère. Les sels qui s'accumulent en surface du sol sont d'abord des calcites, très légèrement magnésiennes (2 à 5%). Le carbonate de sodium ne s'accumule que lorsque le complexe adsorbant du sol a perdu presque tout son calcium échangeable. Une partie de la matière organique du sédiment est extraite par diffusion de matière organique dépolymérisée autour de nucléi de lignine incomplètement transformée. Les argiles ne sont pas attaquées mais la stabilité structurale du sol est réduite.

Suivant la vitesse avec laquelle s'abaisse le plan d'eau, deux voies s'ouvrent. Si l'abaissement est rapide, le sol se structure, finement en surface, plus grossièrement en profondeur. Le sol s'aère, l'oxygène pénètre jusqu'à la nappe. Les sulfures se réoxydent et l'acide sulfurique libéré est neutralisé par les carbonates du sol, ce qui entraîne une élimination progressive du carbonate de sodium et localement l'apparition de gypse et même de jarosite. Le sel dominant reste le sulfate de sodium.

Ainsi, entre 1964 et 1971 la baisse du plan d'eau a été de deux mètres et a provoqué une désalinisation et une désalcalinisation des horizons supérieurs. Ce fait apparaît paradoxal en considérant la profondeur encore faible de la nappe, moins de trois mètres, l'aridité du climat, la nature argileuse du sol, facteurs favorables en principe à une remontée capillaire de débit réduit mais régulière et jouant sur une grande hauteur. L'explication apparaît en s'attachant aux propriétés structurales acquises par le sol, qui favorisent en saison sèche un "mulching" et des phénomènes de diffusion et qui augmentent l'efficacité des pluies sur le lessivage des sels.

Par contre, si l'abaissement du plan d'eau est très lent, la première phase de réduction des composés du soufre se prolonge et les effets dégradants de l'accumulation de carbonates alcalins sur les propriétés physiques du sol s'accroissent. Lorsque le sol se déshydrate, le réseau de fentes de retrait est à maille large et les sulfures ne se réoxydent pas en profondeur. Le sol continue à fonctionner en régime exudatif, accumulant en surface du Na_2CO_3 mais aussi des silicates sodiques (Maglione, G. 1970), car les argiles sont attaquées. En saison des pluies, le sol s'imperméabilise et les eaux météoriques n'ont qu'une action lessivante réduite.

Ainsi, alors que le lac Tchad filtrait les éléments reçus de l'amont, bloquant le soufre à l'état organique dans le sédiment humifère, la pédogénèse dans les polders libère ce soufre dont le devenir est très différent suivant l'histoire des sols: sulfates dans un cas, sulfures métalliques (monosulfures) dans l'autre. Or cette histoire se déroule en quelques années (schéma synthétique, page n° 6).

Interpretation

Dans les deux cas exposés ci-dessus, la pédogénèse débute par la colonisation des vases par les végétaux (mangroves ou roseaux). La réduction des composés du soufre, l'accumulation des sulfures de fer (monosulfures dans les polders: troïlite, pyrite dans les mangroves) se développent. Dans le cas de minéralisation du soufre organique, l'analogie avec le cycle de l'azote est classique (Starkey, 1966): la phase de réduction (sulfures) correspond à l'ammonification).

Cette soustraction des sulfates facilite l'action des autres sels en présence. Dans le cas des chlorures (mangroves) cela ne modifie pas à long terme les propriétés du milieu car ce sont des sels neutres. Par contre, les carbonates alcalins des polders continentaux modifient les propriétés du matériau originel (matière organique, propriétés physiques).

Lors de la phase de réoxydation consécutive à l'aération du milieu, l'évolution des composés du soufre est orientée d'une part suivant l'organisation acquise par le sol lors de la phase précédente (structure plus ou moins dégradée) d'autre part suivant la nature du matériau originel. Si le milieu n'est pas tamponné par une réserve carbonatée calcique suffisante (cas des

Schema synthétique des transformations des composés du soufre dans les deux milieux étudiés

Les étapes.	Milieu fluviomarin: les mangroves	Milieu continental: les polders du lac Tchad	
	I.	II.	
Sédimentation. Matériau originel submergé.	Sulfates de l'eau de mer.	-Soufre à l'état organique du sédiment. -Sulfates arrivant au polder par la nappe.	
Lame d'eau peu épaisse ou nappe phréatique très peu profonde. <u>Phase de réduction liée à la végétation.</u>	Pyrite FeS_2 .	Monosulfures.	
Nappe phréatique peu ou moyennement profonde. <u>Phase d'oxydation liée à l'aération des profils:</u> I et II a/ non oxydation liée à la dégradation de la structure II b/	Acidification du sol. . jarosite . sulfures non encore oxydés.	Neutralisation du sol. . sulfate de sodium . gypse	Alcalinisation du sol. . monosulfures bloqués en profondeur
Abaissement marqué du niveau de la nappe. <u>Phase de lessivage partiel des sels, liée à l'action des eaux météoriques: I et II a/</u> non lessivage: II b/.	. jarosite, puis hydrolyse. $\text{Fe}(\text{OH})_3$. sulfate de sodium lessivé avant le gypse. . reste: gypse, traces de jarosite; $\text{Fe}(\text{OH})_3$. monosulfures bloqués en profondeur.
	II a/: abaissement rapide du niveau de la nappe phréatique. II b/: abaissement lent de ce même niveau.		

mangroves), la pH devient franchement acide et les composés du soufre sont alors réimmobilisés à l'état peu soluble (jarosite).

Dans un milieu continental au contraire, la réoxydation neutralise au moins partiellement les accumulations précédentes de carbonates de sodium avec apparition localement de gypse. Ce passage du calcium, recédemment à l'état de calcite, sous forme plus soluble modifie le rapport alcalins/alcalino-terreux dans les solutions du sol et provoque une désalcalinisation.

Certaines des combinaisons oxydées du soufre: gypse des polders jarosite des mangroves, étant parmi les sels les moins solubles du milieu seront les dernières touchées si les conditions (action des eaux météoriques, drainage) deviennent favorables à un lessivage partiel des sels. Ainsi, la pédogénèse qui a eu tendance, dans une première étape, à réduire le rôle des composés du soufre par rapport aux sels régionalement dominants (chlorures ou sulfates) a au contraire tendance à privilégier ensuite leur influence en les laissant en dernier lieu parmi les sels les plus actifs au contact du sol et de son complexe adsorbant.

Le fer, associé au soufre dans la phase réduite est libéré et participe à l'état d'hydroxydes à une stabilisation des structures (gainés racinaires, enrobage d'éléments structuraux).

Mais si la phase initiale d'engorgement se prolonge, la réoxydation des sulfures est freinée, l'acidité persiste dans les sols de mangroves et l'alcalinisation se développe dans les sols de polders. Au lieu d'être libérés dans le circuit géochimique superficiel à l'état de sulfates solubles, les composés du soufre sont piégés en profondeur à l'état de sulfures.

B i b l i o g r a p h i e

- Cheverry, C. *Science du Sol*, 2, 33-53, 1968.
Cheverry, C. *Agrokémia és Talajtan*, tom. 18, supplementum, 238-242, 1969.
Maglione G. *Bull. Carte géol. Als. Lorr.*, 23, 3-4, 177-189, 1970.
Starkey R.L. *Soil Science*, vol. 101, 4, 297-306, 1966.
Van Breemen N. *Soil forming processes in acid sulphate soils*. Comm. Sympo. on acid sulphate soils. Wageningen, 1972.
Vieillefon J. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. IX, 2, 241-270, 1971.
Vieillefon J. *Sur quelques transformations sédimentologiques et minéralogiques dans les sols sulfatés acides du Sénégal*. Comm. Sympo. on acid sulphate soils. Wageningen, 1972.

Résumé

Les premières phases de la différenciation de sols sur alluvions récentes, d'origine soit fluvio-marine (mangroves du Sénégal), soit continentale (bordures du lac Tchad) ont été comparées. Des analogies apparaissent quant aux relations entre la pédogénèse débutante et les transformations des composés du soufre. La pédogénèse diminue dans une première phase, en les immobilisant à l'état de sulfures, le rôle des composés du soufre par rapport aux sels régionalement dominants (soit chlorures, soit carbonates). Mais inversement, lors des phases de réoxydation, puis de lessivage partiel des sels, les sulfates jouent un rôle décisif dans l'évolution des sols.

Summary

The first stages of soil differentiation on recent alluvium, either of fluvial and marine ("mangroves" of the Sénégal country) or of continental (shores of lake Chad) origin have been compared. Analogies appear with regard to relations between incipient pedogenesis and sulphur compounds transformations. Pedogenesis reduces in a first stage, fixing them as sulphides, the part of sulphur compounds in comparison with that of regionally principal salts (either chlorides or carbonates). But on the contrary, during the stages of reoxydation, followed by partial leaching of salts, sulphates play a leading part in the evolution of the soils.

Zusammenfassung

Es werden die ersten Stufen der Bodenunterscheidung bei frischen Ablagerungen verglichen, die entweder Fluss-Seebildungen ("mangroves" von Sénégal) oder Erdbildungen (Rand von Tchadsee) angehören. Ähnlichkeiten werden zwischen der ersten Bodenentstehung und den Veränderungen der Schwefelverbindungen beobachtet. Es wurden mehrere Stadien in der Bodenentstehung beobachtet: 1) die Bodenentstehung macht die Schwefelverbindungen in Gestalt Schwefelür unbeweglich; 2) die Bodenentstehung vermindert nämlich die Schwefelverbindungsrolle im Vergleich zu der Rolle der Salze (Chlorid oder Salzkohlensäure), die in grosser

Menge in diesen Gebieten vorhanden sind; 3) Während eines Oxydierungsprozesses und während der nach folgenden Salzauswaschung spielen die Salzschwefelsäuren in der Bodenentwicklung die entscheidende Rolle.

Резюме

Проводится сравнение первых стадий дифференциации почв (сформированных на современном аллювии) как речного и морского (мангровых почв Сенегала), так и континентального происхождения (почвы берегов озера Чад). Выявлена аналогия в отношении связи начального почвообразования с превращениями соединений серы. На первой стадии почвообразования происходит восстановление серы и ее закрепление в виде сульфидов, что уменьшает роль соединений серы по сравнению с другими солями, преобладающими в почвах этих районов (хлориды или карбонаты). В последующие стадии повторного окисления и частичного выщелачивания солей сульфаты приобретают ведущую роль в развитии почв.

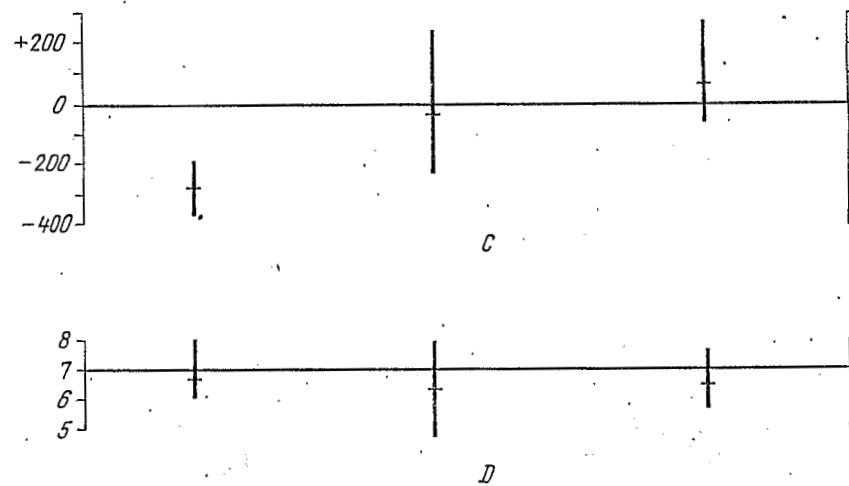
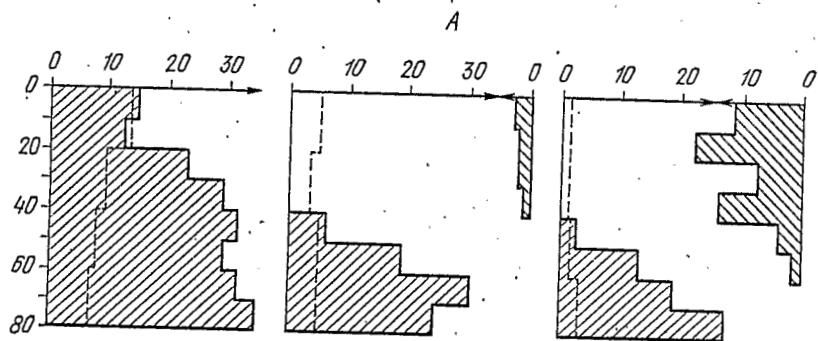
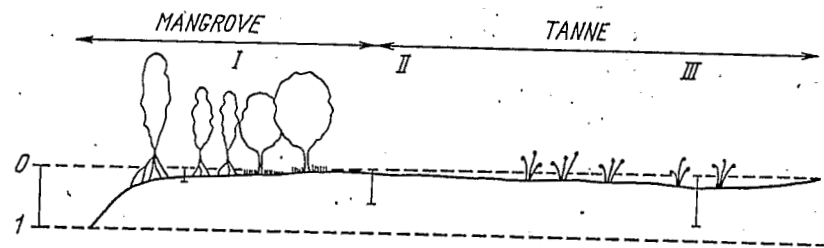


Fig. 1. Evolution de quelques caractéristiques dans la séquence mangrove - tanne

- A - morphologie et amplitude de variation de niveau de la nappe
- B - pyrite // and jarosite // et matière organique en C %;
- C - EH millivolt (à 20 cms de profondeur) moyenne et amplitude variation
- D - pH (à 20 cms de profondeur)