

ATP MATIERE ORGANIQUE PIREN

Etude des mécanismes d'association du soufre et des métaux avec les composés organiques du sol dans les premiers stades d'humification des résidus végétaux (mangrove de Guadeloupe).

RAPPORT FINAL DU PROGRAMME SOUFRE-MATIERE ORGANIQUE (Octobre 1984)

Plan

- 1 - Introduction
- 2 - Méthodes d'analyses des formes du soufre
- 3 - Présentation générale de la séquence tourbeuse de Guadeloupe
- 4 - Le soufre dans les nappes
- 5 - Le soufre dans les végétaux. Premiers stades de décomposition
- 6 - Le soufre dans les sols
- 7 - Etude des teneurs isotopiques $\delta^{34}\text{S}$ ($\delta^{18}\text{O}$) dans les nappes, les végétaux et les sols.)
- 8 - Conclusions

C. Feller

Centre ORSTOM de Martinique
Fort-de-France
Octobre 1984

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 12079

Note : B

1 - INTRODUCTION

Le travail présenté ici concerne essentiellement l'étude du cycle du soufre dans une mangrove tourbeuse de Guadeloupe dont la géogenèse et pédogenèse ont déjà été étudiées par TURENNE (1984). Cette recherche fait suite sur le même sujet aux travaux de VIEILLEFON (1977), MARIUS (1984) et FELLER (Résultats non publiés) sur des mangroves sablo-argileuses ou argileuses du Sénégal. Toutefois l'ensemble du programme, dépassant largement le cadre de l'Action proposée à l'ATP, n'est pas terminé, mais les résultats présentés ci-dessous en constituent les données de base. Quelques résultats du Sénégal y sont inclus.

La compréhension des mécanismes régissant l'association Soufre-Matière Organique au niveau de l'écosystème Mangrove nécessite l'étude des 4 compartiments suivants (fig. 1) :

- l'atmosphère au voisinage de la plante,
- la plante,
- la solution du sol,
- le sol

L'atmosphère au voisinage de la plante est probablement un compartiment important à étudier pour une estimation des flux de soufre dans l'écosystème mangrove : libération possibles de H_2S par le sol et la plante, assimilation de S atmosphérique par la plante (fig. 4). Toutefois, cette recherche nécessiterait des moyens matériels dont nous ne disposons pas et ce compartiment n'a donc pas été caractérisé.

La plante. Très peu de travaux, à notre connaissance, concernent les teneurs et les formes du soufre dans la végétation de Mangrove. Nous avons abordé cet aspect par de nombreuses mesures de S total (St) des différents organes végétaux en distinguant pour certains les sulfates (SO_4), le "soufre-lié-à-la-matière-organique", que nous appellerons dans la suite de ce texte, pour simplification, "soufre organique" (Sorg.) et le soufre α Aminé (Sa).

La solution du sol. Sur les nappes (et extraits au $1/10^6$ de sol), en plus du bilan ionique (cations et anions majeurs), nous avons étudié les différentes formes de soufre soluble : sulfates (SO_4^{2-}) thiosulfates ($S_2O_3^{2-}$), sulfites (SO_3^{2-}) et sulfures et polysulfures (S_n^{2-}).

Le sol. ou différentes fractions organiques du sol sont caractérisés par leur teneur en soufre total (St), minéral (Smin.), "organique" (Sorg.), aminé (Sa).

Le fonctionnement de l'écosystème est abordé à trois niveaux, plus ou moins interdépendants, par l'étude :

- des premiers stades de décomposition et d'humification des résidus végétaux,
- des variations spatio-temporelles des différentes unités phyto-édaphiques puisque les séquences étudiées sont des chrono-séquences,
- des mécanismes de stockage et de transfert du soufre, entre les compartiments cités, à l'aide du marqueur isotopique naturel ^{34}S .

2 - METHODES D'ANALYSE DES FORMES DU SOUFRE, utilisées dans ce travail.

Le soufre total est dosé par voie sèche, soit au "Sulmographe" pour les échantillons du Sénégal, soit à l'"Auto-analyseur CHNSO" (Erba Mod. 1106) pour ceux de Guadeloupe.

Les sulfates solubles (SO_4^{2-}) sont dosés par gravimétrie après précipitation sous forme $BaSO_4$. Les sulfates solubles des sols sont extraits avec un rapport pondéral sol/solution de $1/10^6$. Les sulfates solubles des végétaux ont été extraits par HCl 0,01N selon RICHTER et JOHNSON (1983). Il a été vérifié dans le cas des feuilles (résultats non présentés ici) que la quasi-totalité du soufre acido-soluble dans ces conditions est sous forme de sulfates. Les sulfures (S_n^{2-}), thiosulfates ($S_2O_3^{2-}$) et sulfates (SO_3^{2-}) solubles (nappe) sont dosés sous azote avec électrode spécifique de soufre selon BOULEGUE et POPOFF (1979), sur une aliquote de 5 à 20 ml d'eau.

Le prélèvement se fait à l'aide d'une seringue médicale (50 ml), préalablement remplie d'azote, introduite dans la nappe à la profondeur désirée (0,3 à 1,0 m) grâce à un forage fait, à ce moment là, à la pelle à vase. Le prélèvement ne dure pas plus d'une minute et le contact eau-atmosphère est réduit à quelques secondes. Le dosage a lieu entre 2 et 4 heures après le prélèvement (délais de transport). Le Eh ne varie pas au cours de cette durée. Les problèmes méthodologiques ont fait l'objet d'une note interne (FELLER et PETARD, 1984) non rapportée ici.

Le soufre-lié-à-la-matière-organique* (Sorg.) est égal à la différence entre le soufre total et le soufre restant après calcination à l'air de l'échantillon à 350° pendant 24 h. Cette méthode est inspirée des travaux de VIEILLEFON et al. (1973) qui ont montré, par couplage ATD/Analyseur SO₂ et CO₂, que le soufre libéré avant 350° correspondait à une "fraction liée à la matière organique" (S org.).

Acides aminés et "soufre aminé". Les acides aminés sont dosés (laboratoire de Géologie Appliquée, M. le Pr TRICHET, Université d'Orléans), à l'aide d'un auto-analyseur, après hydrolyse HCl 6N, 24 heures, de l'échantillon. Le dosage des acides aminés soufrés (acide cystéique et méthionine-sulfone nécessite une préparation particulière (attaque HCOOH à 0° 12 heures suivie d'une attaque HCl 6N).

Les résultats sont exprimés en μ mole d'acide aminé par gramme de produit (μ M AA.g⁻¹) et aussi en mg de soufre aminé par gramme de produit (mg Sa.g⁻¹) pour les acides aminés soufrés.

Composition isotopique. $\delta^{34}\text{S}$ et $\delta^{18}\text{O}$. Les analyses ont été faites au laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique (M. FONTES) selon FILLY et al. (1975) pour le soufre et LONGINELLI et CRAIG (1967) pour l'oxygène. Etalons de référence CD et SMOW.

Le Soufre minéral total. Pour les échantillons de végétaux, sols (ou différentes fractions) de Guadeloupe, aucun dosage quantitatif des sulfures insolubles (pyrite...) n'a encore été fait. Nous disposons seulement d'une estimation semi-quantitative pour la pyrite par RX. Le soufre minéral total Smin est dosé sur les cendres des échantillons chauffés à 350° (voir S org.).

Fractionnement de la matière organique des sols et des litières.

Deux types de fractionnement sont mis en oeuvre :

- des fractionnements granulométriques
- des fractionnement chimiques

a) Les fractionnements granulométriques par tamisages visent à séparer, pour les sols minéraux habituels, les matières organiques figurées (essentiellement végétales) de tailles supérieures à 50 μ m des fractions liées (organo-minérales, humus s.s.) de tailles 0-50 μ m. Les méthodes diffèrent légèrement pour les échantillons du Sénégal (FELLER et al., 1981) et ceux de Guadeloupe (FELLER, 1979). Il faut signaler que dans le cas où le complexe organo-minéral est absent (mangrove tourbeuse de Guadeloupe) la coupure à 50 μ m sépare les matières organiques figurées (sup. à 50 μ m) d'une fraction 0-50 μ m constituée essentiellement de débris cellulaires fortement humifiés à structures peu reconnaissables.

Nous présentons dans le tableau 1 la nomenclature utilisée pour les différentes fractions de sols des deux séquences.

Les fractions ML1 et E2000 sont donc identiques

La fraction ML2 correspond en première approximation à la somme E50 + E200

Les fractions FL et E0 sont à peu près semblables sur le plan granulométrique mais différent par la morphologie : fraction organo-minérale pour le Sénégal, fraction plutôt organique et plus ou moins figurée pour la tourbe de Guadeloupe.

b) Les fractionnements chimiques sont faits par extraction au mélange pyro (0,1 M) -soudé (0,1 N). On distingue les fractions alcalino-solubles : Matières Humiques Totales (MHT) formées d'Acides Fulviques (AF) et Humiques (AH) et la fraction insoluble Humine (HU).

3 - PRESENTATION GENERALE DE LA SEQUENCE TOURBEUSE DE GUADELOUPE

L'évolution des formations de mangrove au cours du temps conduit à une organisation de la végétation et des sols en chronoséquences. Ces chronoséquences diffèrent en fonction des caractéristiques du milieu: géologie, climat, amplitude des marées (FELLER, 1981). Pour la Guadeloupe, la faiblesse des sédimentations marines et alluviales ont permis le développement d'une séquence sur matériau tourbeux. (TURENNE, 1984). On passe, en bordure du lagon, d'un milieu salé fortement réduit à un milieu peu salé et faiblement réduit en arrière mangrove. La séquence type est représentée sur la figure 2.

Le matériau est essentiellement organique (70 % matière organique). Son épaisseur varie de 1,0 m (lagon) à plus de 5 m (forêt à Ptérocarpus). L'observation à la loupe binoculaire et au microscope met en évidence que la quasi-totalité de la matière organique est sous forme de tissus végétaux dont le degré d'altération et d'humification augmente quand on passe de la zone à Rhizophora à la forêt à Ptérocarpus, des fractions organiques grossières aux fractions fines (*).

Les principaux minéraux détectés dans la séquence tourbeuse sont la halite (NaCl) et la pyrite (FeS₂), celle-ci sous forme framboïdale (microscope optique). La jarosite n'est jamais observée. Des résultats semi-quantitatifs sont donnés au tableau 2.

Les autres résultats apparaissent dans le tableau 3. (**)

Le pH in situ (état frais) est voisin de la neutralité. Le séchage de l'échantillon (pH sec) n'entraîne qu'une faible baisse de pH (comparé à d'autres mangroves atlantiques) indice, soit, de faibles teneurs en sulfures, (ce qui n'est pas le cas ici, cf. parag. 4), soit, d'une neutralisation

* Dans la fraction EO inférieure à 50 µm, la matière organique "amorphe" sans structures végétales reconnaissables au microscope optique est dominante par rapport aux débris cellulaires encore visibles.

** Ces déterminations font l'objet d'une étude de variations saisonnières. Nous ne rapportons ici que les résultats des prélèvements de Décembre 1982.

des sulfates formés par Ca et Mg en accord avec la nature du complexe d'échange (TURENNE, 1984).

Le potentiel d'oxydo-réduction est fortement négatif (Eh < - 250 mV) excepté dans la forêt à Ptérocarpus où Eh est moins négatif (- 160 mV) dans les horizons de surface. Sur le terrain, on n'observe jamais dans les échantillons tourbeux, des phénomènes de réoxydation liés au soufre (S⁰, jarosite, oxydes ferriques). Ils apparaissent seulement dans les zones sur matériaux argileux.

Les teneurs en soufre total sont élevées pour toute la zone salée, elle diminuent en surface pour les zones à Cypéracées et Pterocarpus mais restent élevées en profondeur malgré l'âge du matériau (datation de 3400 BP sur bois enfouis à 80 cm dans zone à Pterocarpus, TURENNE 1984).

Les extraits 1/10e ont des pH proches de la neutralité. La conductivité est élevée dans les Unités Rh₀, Rh₁, Rh/Av et Lg/Rh mais elle diminue ensuite dans la séquence (Cy, Fo et Pt). Les horizons profonds sont en général plus salés que les horizons de surface, ils sont systématiquement plus riches en sulfates. Le rapport Cl:SO₄ qui est de 10 dans les eaux du lagon est compris entre 4 et 8 dans les unités Rh₀, Rh₁, Rh/Av et entre 1,8 et 3,7 dans les unités Cy et Pt (peu salées). Les valeurs sont toujours plus faibles en profondeur qu'en surface. Il y a donc accumulation relative de SO₄ (par rapport à Cl) dès le début de la séquence, plus forte en profondeur qu'en surface, plus forte dans le milieu réduit peu salé que dans le milieu réduit salé.

La capacité d'échange, CEC, est voisine de 100 meq.100g⁻¹ sol, ce qui correspond, compte-tenu des teneurs en carbone, à une CEC d'environ 250 meq.100 g⁻¹C.

En conclusion, il s'agit d'un milieu organique, fortement réducteur, salé et riche en soufre, ayant pu évoluer dans ces conditions depuis environ 3400 ans. C'est donc un modèle naturel particulièrement intéressant pour l'étude des interactions Soufre - Matière Organique.

4 - LE SOUFRE DANS LES NAPPES

Deux campagnes de prélèvements ont été menées (fin de saison des pluies et saison sèche) pour étudier les formes du soufre soluble : SO_4^{2-} , $S_2O_3^{2-}$, SO_3^{2-} , S_n^{2-} .

Les résultats sont portés dans le tableau 4.

On constate qu'aux deux dates de mesures toute la séquence de sols reste dans des conditions réductrices ($Eh < -200$ mV). Les sulfates sont tout de même toujours la forme dominante. Les thiosulfates et sulfites sont absents. Par contre les sulfures (ou polysulfures) solubles peuvent être en quantités relativement importantes ($0,3$ à 3 $mm.l^{-1}$) (*). Ces résultats sont du même ordre de grandeur que ceux de BOULEGUE, et al. (1982) concernant les concentrations $[H_2S] + [Sn^{2-}]$ dans le premier mètre d'un marais à *Spartina*.

Les horizons profonds sont systématiquement plus riches en sulfures que les horizons de surface et l'évolution du rapport $[SO_4^{2-}]:[Sn^{2-}]$ indique une accumulation relative élevée des sulfures par rapport au sulfate, en profondeur, dans le milieu réduit peu salé (unités Cy et Pt). Il n'existe pas de relation étroite entre $[Sn^{2-}]$ et $[SO_4^{2-}]$ ni $[Sn^{2-}]$ et Eh mais le rapport $[SO_4^{2-}]:[Sn^{2-}]$ permet de distinguer deux grands domaines géographiques : la mangrove ss. (unités Rh₀ à Rh/Lg) et "l'arrière-mangrove" (Cy à Pt).

* La précision de nos dosages ne nous a pas permis de distinguer les sulfures organiques RS^- des sulfures ou polysulfures minéraux $H_2S + Sn^{2-}$.

5 - LE SOUFRE DANS LES VEGETAUX. VARIATIONS AU COURS DES PREMIERS STADES DE DECOMPOSITION

Les premiers stades de décomposition des résidus végétaux seront étudiés dans les unités Rho et Rh₁ (Sénégal, Guadeloupe), premières zones d'accumulation de matière organique et de soufre des deux séquences(*).

5.1 Teneurs en S_t de feuilles, litières et racines de diverses espèces végétales (Guadeloupe)

Les résultats sont portés dans le tableau 6(**).

On constate que les teneurs en S_t des feuilles suivent à peu près les variations de salinité de la séquence (tableau 3) avec des teneurs élevées (*Rhizophora* et *Avicennia*), moyennes (*Laguncularia* et *Cypéracée*) et faibles (*Pterocarpus*). Les teneurs des litières et des racines souterraines sont en général plus élevées que celles des feuilles vertes.

Le soufre des litières de feuilles est constituée à 60-80 % de sulfates.

5.2 Etude des unités Rho et Rh₁ : S_t , S org., Sa dans la biomasse végétale et les résidus en voie de décomposition (Sénégal, Guadeloupe)

Dans les deux séquences, les zones à grands *Rhizophora* correspondent à l'étape initiale d'accumulation de matière organique et de soufre dans le milieu mangrove. Aussi nous étudions ici la distribution du soufre dans les différents organes végétaux de *Rhizophora Mangle* (tableau 7) et ses variations au cours des premiers stades de décomposition des feuilles et des racines (tableau 8).

* Les deux écosystèmes (Sénégal, Guadeloupe) présentent de grandes analogies en début de séquence (zones Rho et Rh₁) :

- grands *Rhizophora* en Rho et *Rhizophora* nains en Rh₁
- milieux organiques et réduits
- sursalures en Rh₁

Les différences portent sur le sédiment, tourbeux en Guadeloupe, sablo-argileux au Sénégal.

** D'autres déterminations sont en cours et doivent nous permettre d'estimer les quantités de soufre stockées dans la biomasse végétale aérienne.

On constate (tableau 7) que les Rhizophora au Sénégal (climat sec et contrasté, P = 800 mm) sont plus riches en soufre qu'en Guadeloupe (climat plus humide P = 1500 mm). Toutefois la répartition dans le végétal est à peu près identique, les organes les plus riches étant les feuilles et les racines souterraines, le soufre "organique" représentant dans ces organes environ 20 % du soufre total. Les teneurs en soufre aminé (S_a) sont faibles et pas plus importantes que dans les végétaux des milieux terrestres non salés.

Au cours de la décomposition des feuilles et des racines (Sénégal) dans les premiers centimètres du sol (tableau 8) on note :

- une accumulation relative du soufre (par rapport au carbone) quand on passe des résidus végétaux à la fraction liée FL des cinq premiers centimètres de sols, aussi bien pour les feuilles que pour les racines ;
- cette accumulation s'accompagne d'une augmentation systématique de S org. et de S_a par rapport à S_t.

Par ailleurs dans le tableau 9 nous présentons les résultats (Sénégal), en micromole d'acide aminés par gramme de carbone de l'échantillon ($\mu\text{M AA.g}^{-1}\text{C éch.}$) pour la somme des acides aminés soufrés AAS, des amino-acides dits "non protéiques" AANP (dont l'existence dans les sols est liée essentiellement à une activité microbienne importante, CASSAGRANDE et GIVEN, 1980). et des acides aminés protéiques non soufrés AAPNS :

- acides aminés soufrés (AAS) : Cystéine et Méthionine
- acides aminés "non protéiques" (AANP) : ac. muramique, α -amino butyrique, α , γ diaminopimelique, cystéique, β alanine, γ -amino butyrique, ornithine, glutamine, galactose amine.
- acides aminés protéiques non soufrés (AAPNS) : ac. aspartique, thréonine, serine, ac. glutamique, proline, glycine, alanine, valine, méthionine, alloleucine, isoleucine, leucine, tyrosine, phenylalanine, histidine, lysine, arginine.

* obtenue par la somme de chaque acide aminé dosé. Résultats détaillés non présentés ici.

On note qu'au cours des processus de décomposition, il y a augmentation de l'ensemble des formes d'acides aminés, en particulier des acides aminés non protéiques (AANP). Relativement au carbone, leur teneur est multipliée par un facteur 10 environ quand on passe des litières ou des racines à la fraction FL des 5 premiers centimètres de sol. Le facteur de concentration est encore plus élevé dans les acides humiques extraits des mêmes échantillons.

Ces variations des différentes formes d'acides aminés sont en accord avec les résultats de CASSAGRANDE et GIVEN (1980) qui ont étudié la distribution des acides aminés dans une mangrove tourbeuse de Floride (Everglades).

6 - LE SOUFRE DANS LES SOLS (Guadeloupe, Sénégal)

6-1 Le soufre dans le sol total

La distribution de S soluble (S-SO₄) et S insoluble (S org + S min. *) est présentée sur les figures 3a et b pour deux séquences tourbeuses de Guadeloupe.

S-SO₄ représente environ 10 - 20 % du soufre total. Les teneurs en valeurs absolues diminuent de la mangrove (Rho, Rh₁) à l'arrière-mangrove (Cy et Pt).

A l'exception de la zone à Pterocarpus, S insoluble est égal à environ 20 % pour les horizons de surface et à 30-40 % pour les horizons de profondeur. La diminution des teneurs totales en soufre pour la zone à Pterocarpus est due à celle du soufre insoluble.

Par contre, les horizons intermédiaires 30-50 cm des unités Rho et Rh₁ sont caractérisés par des teneurs élevées en S insoluble, environ 50 %.

(*) S min. insoluble est selon les analyses RX exclusivement sous formes de sulfures insolubles.

Afin de préciser la nature de S insoluble nous avons dosé dans 4 échantillons M100 - M101 (Rho) et M126-128 (Pt) S org. et S min. insoluble sur le sol total et sur différentes fractions granulométriques (*). Les résultats sont portés sur la figure 3c pour le sol total et dans le tableau 10 pour les différentes fractions.

On note (fig.3c) que dans Rho les différences de S insoluble entre surface et profondeur sont dues essentiellement à S org., plus élevé en profondeur (**). Sous Ptérocarpus, l'horizon de surface est très appauvri en S org. (qui ne représente plus que 23 % de S ins.) alors qu'en profondeur S org. représente encore 32 % de S insoluble. En valeurs absolues ($\text{mgS.g}^{-1}\text{sol}$) et par comparaison avec Rho, il y a donc eu sous Ptérocarpus une diminution à la fois de S org. et S min. ins., la diminution de S org. étant plus élevée que celle de S min. ins.

6-2 Le soufre dans les fractions granulométriques (Guadeloupe)

Le caractère de plus en plus humifié des fractions lorsqu'on passe des fractions grossières aux fractions fines est bien marqué par les variations du rapport C : N, des taux de cendres et des teneurs en Matières humiques totales MHT.

Le rapport C : N est supérieur à 20 pour les fractions F 2000 et F. 200 (échantillons M 100 - 101 - 102 - 103 - 128) et inférieur à 20 pour F. 50 et F. 0. Les rapports C : N sont plus faibles pour l'horizon de surface sous Ptérocarpus qui évolue dans des conditions de réduction et de salinité plus faibles.

Les teneurs en C_{MHT} (pyro-soude) sont plus élevées dans les fractions fines que grossières et plus élevées dans la zone à Ptérocarpus que dans la zone à Rhizophora.

* Après lavage à l'eau

** Ce résultat reste toutefois à contrôler

Les variations des teneurs en cendres indiquent une accumulation d'éléments minéraux dans les fractions fines en accord, soit avec une décomposition plus importante des résidus végétaux (accumulation relative), soit avec une accumulation absolue. Cette accumulation ne correspond pas à du soufre puisque les teneurs en soufre des cendres mg S.g^{-1} diminuent des fractions grossières aux fractions fines. Une analyse minérale des cendres est nécessaire.

Les variations du rapport C : S_t confirment l'accumulation relative de soufre en profondeur pour tous les échantillons. Par contre, pour un même échantillon les variations entre fractions paraissent plus aléatoires. On observe une tendance (M 126 excepté) à de faibles valeurs dans F. 2001 qui augmentent ensuite pour F. 2002, F. 200 et F. 50 et rediminuent dans F. 0. Il est difficile actuellement d'interpréter ces variations. Les rapports C : S (HU) sont identiques à ceux des fractions totales et les variations de S_{MHT} sont faibles, aussi bien entre les fractions qu'entre les échantillons.

La part relative de S org. à S_t ne montre pas des variations très nettes. On constatera simplement que :

- les valeurs les plus faibles sont obtenues pour les fractions fines 0-50 μm .
- les teneurs de l'échantillon M 126 sont les plus faibles
- l'horizon profond sous Ptérocarpus (M 128) a des teneurs plus faibles que les horizons de surface ou de profondeur sous Rhizophora.

6-3 Le soufre dans les acides aminés

Les résultats ont déjà été commentés pour le soufre aminé au paragraphe 4, à partir des résultats du tableau 9, sur échantillons du Sénégal.

Pour la Guadeloupe, nous ne disposons de résultats que sur les acides aminés totaux (tableau 9) d'acides humiques de sols. On constate que les teneurs de AAT (Rho) sont du même ordre de grandeur que l'échantillon correspondant du Sénégal (FL racine 0-5). On notera aussi la diminution de AAT quand on passe de Rho à Cy et Pt.

En conclusion, le passage de la mangrove à l'arrière-mangrove s'accompagne d'une diminution du soufre total due à celles de toutes les formes du soufre : S-SO₄, Sorg., S aminé, S min. insoluble. Toutefois, les variations ne sont pas identiques pour les différentes formes de soufre puisqu'on observe un enrichissement relatif en S min. ins. particulièrement important pour l'horizon de surface sous Ptérocarpus, plus faible pour l'horizon de profondeur. L'étude des fractions granulométriques montre que le degré d'humification et la teneur en cendres varient en sens inverse de la taille des fractions, mais à l'exception de l'horizon de profondeur sous Ptérocarpus (M 128), les proportions S org. / S min. ins. ou S^{MHT/S_{HU}} varient peu entre les fractions d'un même échantillon. Par contre, pour M 128 on note une très nette augmentation de S min. ins. quand on passe des fractions grossières aux fractions fines.

7 - ETUDE DES TENEURS ISOTOPIQUES δ³⁴S (et δ¹⁸O) DANS LES VEGETAUX, LES NAPPES ET LES SOLS

7-1 Quelques "données" bibliographiques

Nous avons représenté sur la fig. 4 un schéma théorique et simplifié du cycle du soufre dans un système sol-plante, en essayant de préciser grâce à des données dispersées de la littérature, les différences des teneurs isotopiques entre les principaux compartiments du système (*).

Compte-tenu des milieux très différents étudiés, tous les résultats sont exprimés par le facteur de fractionnement isotopique ε_{ps} = δ_p - δ_s tel que :

δ_s = δ³⁴S du compartiment de départ : le substrat s

δ_p = δ³⁴S du compartiment d'arrivée : le produit p

la "réaction" étant s → p

ε > 0 signifie que le produit est enrichi en ³⁴S par rapport au substrat
 ε < 0 " " " " " appauvri en ³⁴S par rapport au substrat

a) Au niveau de la plante

La nutrition soufrée de la plante se fait soit par les feuilles avec SO₂ (ou SO₄) atmosphérique soit par les racines à partir de SO₄ de la solution du sol. Dans tous les cas ε semble être relativement faible, 0 à + 4 % avec SO₂, 0 à -8 % avec SO₄-sol. A l'intérieur même des organes aériens on n'observe pas de fractionnement isotopique entre SO₄²⁻ et S org., ε = -1 à -2 % (KROUSE et al. 1984 b).

En général ³⁴S atm. est identique à ³⁴S-SO₄ marin sauf dans les régions où des émissions de soufre à teneur ³⁴S différentes de S marin sont importantes (régions volcaniques, industrielles ou à sources sulfureuses) (STOUT et al. 1975). Dans ces cas là, des variations spatiales et altitudinales (du sol à la cime des arbres) importantes peuvent être notées pour S atm. (KROUSE et al. 1984 a et b). Il peut donc en résulter des différences de marquage des organes végétaux selon leur position (feuilles hautes-feuilles basses, parties aériennes-souterraines).

Les pertes de soufre par la plante (sous forme H₂S) peuvent être importantes (GRUNDON, 1980) avec un fractionnement isotopique élevé ε = -15 %.

b) A l'interface sol-atmosphère

Les phénomènes d'adsorption de SO₄ atm. sur le sol peuvent conduire à un fractionnement isotopique élevé, -10 à -20 % (KUSAKABE et al. 1976).

L'émission de S gazeux du sol se fait aussi avec un fractionnement qui peut être important, + 20 % (KROUSE et al., 1984 b) la différence entre les compartiments H₂S et SO₂ étant de -30 %. Cet effet risque d'être non négligeable en situation de mangrove mais nous n'avons malheureusement aucune donnée à ce sujet.

c) A l'interface sol/sédiment-eau

Les facteurs de fractionnement entre S-plante, S-litière et S-sol sont en général faibles (STOUT et al. 1975, KUSAKABE et al. 1976).

La minéralisation de S org.-sol en S²⁻ et SO₄²⁻ s'accompagne d'un faible fractionnement isotopique (KUSAKABE et al. 1976) mais par contre la sulfato-réduction microbienne paraît être l'étape la plus fractionnante du cycle du soufre, ε ≈ -40 % (3, 12, 17, 19, 21, 24), les sulfures formés étant très appauvris en ³⁴S. Selon l'importance du réservoir de SO₄²⁻ les effets seront variables sur ³⁴SO₄ restant :

- pour un réservoir infini (ou très grand), ε = 0. Il n'y a pas de fractionnement mesurable entre SO₄ initial et SO₄ restant

(*) Les données sur les plantes sont beaucoup moins nombreuses que celles sur les sols, nappes et sédiments. Les transformations microbiennes du soufre étant les plus étudiées.

- pour un réservoir limité, il y a enrichissement de SO_4 restant en isotope lourd, δ variant de 0 à + 20 ‰ (PIERRE et FONTES, 1979). Ceci est d'autant mieux observé qu'il y a élimination de S^{2-} formé (dégagement H_2S ou précipitation sulfures métalliques). Des mesures simultanées de $\delta^{18}O$ sont souvent nécessaires pour préciser les processus mis en jeu.

Le fractionnement isotopique par l'oxydation chimique des sulfures est faible, mais il peut être parfois important par oxydation microbienne, $\delta = -8$ à -30 ‰ (STOUT et al. 1975). L'immobilisation de S^{2-} en S org. n'induit qu'un faible fractionnement isotopique (STOUT et al. 1975).

Enfin, la cristallisation des sulfates solubles est peu fractionnante.

De cet aperçu bibliographique nous retiendrons que :

- l'assimilation de S par la plante se fait avec de faibles fractionnements isotopiques mais que des différences de teneurs isotopiques peuvent exister le long d'une colonne d'air si des émissions gazeuses de S existent dans le milieu,
- les étapes les plus fractionnantes au niveau du sol sont la sulfato-réduction et la sulfo-oxydation microbiennes. Dans le cas de réservoirs limités ou d'élimination du système du produit formé la teneur isotopique du substrat résiduel peut varier fortement.

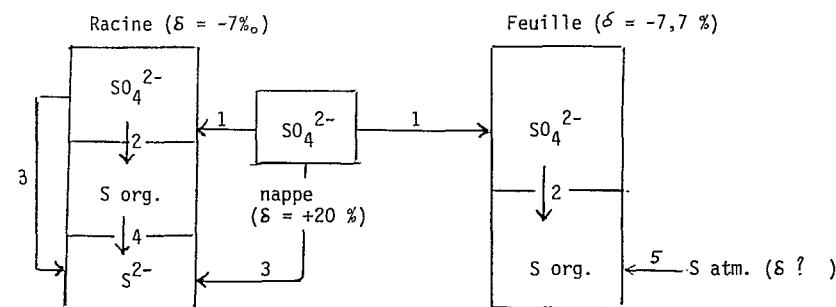
7-2 Résultats (Sénégal, Guadeloupe)

Les résultats sont portés dans le tableau 11.

Les sulfates de la nappe ont des δ identiques (+ 20,1 ‰) à ceux de l'eau de mer et du lagon (+20,7 ‰). Par rapport à ces valeurs un fractionnement très important apparaît déjà dans les racines vivantes $\delta = -7$ ‰ (6,6 et $\pm 7,9$) et les litières de feuilles (*) $\delta = -7,7$ ‰.

Des mesures de $\delta^{34}S$ sont en cours sur les fractions solubles et insolubles des feuilles et des racines pour préciser l'étape fractionnante du processus :

* Les dosages ^{34}S sur feuilles fraîches n'ont pas été réussis et seront repris.



En effet selon la littérature les étapes 1, 2, 4 et 5 sont peu fractionnantes. Or, dans le cas des feuilles de *Rhizophora* le facteur de fractionnement mesuré est très élevé, d'environ -28 ‰. Plusieurs hypothèses peuvent être envisagées selon que la source de soufre est la solution du sol ou l'atmosphère :

a) La source est la solution du sol

- l'étape 1 est fractionnante (en accord avec la littérature). Ceci implique probablement une étape intermédiaire, soit microbienne, soit enzymatique (à l'intérieur du végétal), de sulfato-réduction très fractionnante ($\delta \approx -30$ ‰) suivie d'une sulfo-oxydation (non fractionnante). Dans ce cas SO_4 -feuille et S org.-feuille ont des δ à peu près identiques à -7 ‰.

- l'étape 1 n'est pas fractionnante (en accord avec la littérature) mais l'étape 2 est fractionnante (en désaccord avec la littérature). Les sulfates de la feuille représentent 70 % du soufre total. Un calcul rapide permet alors de calculer dans cette hypothèse que δ S org. serait égal à -70 ‰ si δ SO_4 reste à $+20$ ‰.

b) Une des sources de S feuille est S atmosphérique

L'étape 5 est considérée comme peu fractionnante mais par contre il n'est pas impensable, vu les conditions particulières du milieu mangrove (émission de H_2S du sol), que l'atmosphère au voisinage des feuilles ait un $\delta^{34}S$ plus faible (voir négatif) que l'atmosphère "normale". Nous n'avons malheureusement pas les moyens de faire cette mesure et nous recherchons des données dans la littérature à ce sujet. Cette hypothèse impliquerait aussi des valeurs δ extrêmement négatives pour S org. puisqu'il est presque certain que SO_4 -feuille vient de la nappe. La participation de S atm. à S feuille est donc possible, mais probablement faible quant à ses effets sur δ S feuille.

Pour les racines le raisonnement est identique avec la solution du sol comme seule source de soufre. Les compartiments à étudier sont SO_4^{2-} , S^{2-} et S org.

Quelque soit l'explication du processus, arrivent au sol sous forme de litières et de racines dès les premiers centimètres de sols et dès les premiers mètres de la séquence des résidus végétaux riches en soufre (1 à 3 % selon le milieu), appauvris en ^{34}S , correspondant à un fractionnement isotopique (SO_4 marin \rightarrow S plante) d'environ -27 %, impliquant probablement, au cours de l'assimilation de S par la plante, une étape sulfato-réductrice.

Le passage des résidus frais (racines vivantes, litières de feuilles) aux résidus végétaux plus ou moins décomposés du sol ainsi qu'à la fraction liée du sol (FL) s'accompagne d'une diminution supplémentaire de ^{34}S jusqu'à des valeurs comprises entre -14 et -24%. Toutefois, il n'y a pas de variations interprétables en fonction du degré d'humification de la matière organique :

- au Sénégal, la fraction liée FL et l'humine correspondante ont un δ identique,

- en Guadeloupe, l'humification qui va croissante des fractions F-200 à F-50 et F-0 ne s'accompagne pas d'une variation significative des valeurs de $\delta^{34}S$.

Zone à Ptérocarpus : Milieu réducteur neutre peu salé.

Les valeurs $\delta^{34}S$ et $\delta^{18}O$ des sulfates de la nappe sous Ptérocarpus sont respectivement de +40,6 % et +18,5 %, c'est-à-dire fortement enrichis en isotopes lourds par rapport aux eaux du lagon (+20,7 et +7,50 %). Ceci s'interprète (PIERRE et FONTES, 1979) par une réduction partielle d'origine bactérienne des sulfates de la nappe avec pertes par volatilisation (H_2S) ou précipitation (S^{2-} métalliques) des sulfures formés. La nappe sous Ptérocarpus apparaît donc comme un "réservoir limité" et n'est plus renouvelée de façon importante par SO_4 -marin. Ceci est en accord avec la diminution des concentrations en sulfates et l'augmentation du rapport Cl : SO_4 de la nappe et des extraits 1/10e de sol.

Le sédiment organique total (non lavé) en profondeur (2,5 - 3,0 m) à une valeur $\delta^{34}S$ de +1,1 %. Cette valeur est en accord avec un mélange de sulfates solubles à $\delta^{34}S$ égal à +40 % (nappes) et de soufre insoluble (S org + S min.) ins. à $\delta^{34}S$ égal à -15 % (identique à S ins., unité Rho). Vérifications en cours.

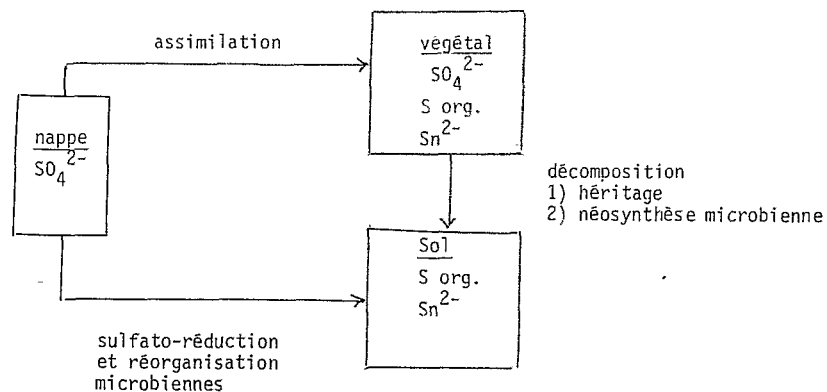
8 - CONCLUSIONS

La chronoséquence de mangrove étudiée en Guadeloupe est tourbeuse. Elle s'est développée en 3400 ans et s'est différenciée en deux domaines (fig.2) : l'un réduit neutre et salé (mangrove à Rhizophora, Avicennia et Laguncularia, l'autre réduit neutre et peu salé (marais à fougères et cypéracées et forêt dense humide à Ptérocarpus). Les potentiels l'oxydo-réduction E_h sont en général inférieurs à -200 mV sauf pour les 20 premiers centimètres de sol sous Ptérocarpus où ils peuvent être compris entre 0 et -200 mV. A l'exception de cethorizon (Pt surface) les teneurs en soufre total du sédiment sont élevées, comprises entre 20 et 60 % sur toute la séquence et d'environ 15 à 50 % pour le soufre insoluble (S org. + S min.) ins. si l'on déduit les sulfates solubles.

Sous quelles formes s'est accumulé et se maintient le soufre dans ce matériau ? Quels sont les mécanismes en jeu ?

Le principal mécanisme habituellement retenu concernant l'accumulation de soufre dans les milieux salés réducteurs est la sulfato-réduction microbienne conduisant à la formation de sulfures et de soufre organique comme produits du métabolisme microbien, la matière organique du sol servant essentiellement de source énergétique. Il est vrai que de nombreuses expériences "in-vitro" et les fractionnements isotopiques mesurés "in situ" entre les sulfates de la source et le soufre du sédiment sont en accord avec cette interprétation.

Il semble, toutefois, que dans les mangroves, à côté de ce rôle direct des micro-organismes on puisse envisager la végétation comme une source non négligeable de soufre pour le sédiment, le "soufre végétal" subissant un certain nombre de transformations au cours des processus de décomposition "in situ". Le schéma ci-dessous résume l'ensemble des mécanismes invoqués.



En effet, dès la zone à Rhizophora (Rho et Rh₁) en bordure des eaux marines :

- les teneurs en soufre total des feuilles et des racines vivantes sont déjà élevées (5 à 10 ‰) et peuvent atteindre des valeurs plus fortes lors de périodes de sécheresse (ex. des mangroves du Sénégal en climat plus sec),

- les teneurs isotopiques δ³⁴S des végétaux étudiés montrent qu'un fractionnement important a lieu entre les sulfates de la nappe (δ³⁴S = + 20‰) et le soufre végétal (feuille ou racine, δ³⁴S ≈ -7 ‰) sans que l'on puisse préciser actuellement (étude en cours) à quel niveau s'opère le fractionnement (SO₄ nappe → SO₄ végétal ou SO₄ végétal → S org. végétal). Les valeurs δ obtenues, -7 ‰, sont déjà proches de celles du soufre insoluble (S org. + S²⁻) ins. du sédiment à δ³⁴S ≈ -14 à -17 ‰. Il est d'ailleurs possible que le soufre organique végétal ait déjà des valeurs δ plus faibles que -7 ‰.

- au cours des premiers stades de décomposition des résidus végétaux dans les litières ou la couche superficielle du sol (0-5 cm), l'augmentation relative du soufre total par rapport au carbone s'accompagne de celles du soufre organique, en particulier du soufre aminé, des acides aminés dits "non protéiques" (qui reflètent la participation de résidus microbiens à la matière organique

du sol, CASSAGRANDE et GIVEN 1980), et de la diminution des valeurs δ³⁴S qui sont comprises entre -14 et -23 ‰ pour des résidus végétaux à divers degrés de décomposition et le complexe organo-minéral du sol

En ce qui concerne le rôle de la végétation dans le cycle du soufre de l'écosystème mangrove on distingue donc 2 étapes :

a) assimilation et concentration du soufre dans la plante à partir des sulfates de la nappe, avec fort fractionnement isotopique (d'environ -30‰), et synthèse de soufre organique,

b) concentration supplémentaire du soufre au cours de la décomposition des résidus végétaux avec augmentation des teneurs en soufre organique, en particulier aminé, sous l'action d'une activité microbienne importante comme le confirme l'apparition d'acides aminés non protéiques. Le fractionnement isotopique supplémentaire observé au cours de cette étape (d'environ -10 ‰) peut être attribué à un mécanisme par héritage (disparition de formes du soufre végétal à δ³⁴S supérieurs à -7‰) ou à d'autres processus (fractionnements isotopiques sous action microbienne, adsorption etc...).

La répartition du soufre dans la séquence montre que :

- le soufre soluble (SO₄²⁻ + Sn²⁻) représente une part relativement peu importante (10 à 20 %) du soufre total.

Cette forme de soufre est sujette à variations saisonnières.

Malgré des Eh fortement négatifs (Eh < -200 mV) les sulfates dominent sur les sulfures mais on n'observe ni sulfites ni thiosulfates. De la surface vers la profondeur et de la mangrove s.s. vers la forêt à Ptérocarpus on note une diminution des teneurs absolues en sulfates avec augmentation relative des sulfures par rapport aux sulfates, et des sulfates par rapport aux chlorures. Ceci va dans le sens d'une alimentation limitée des nappes en amont par les sulfates marins, de pertes de soufre (lessivage ou voie gazeuse) et d'une fourniture de sulfates par le sédiment à la nappe (minéralisation probablement de

S org.). Les valeurs $\delta^{34}\text{S}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des sulfates solubles (+ 40 ‰ et + 18,5 ‰) nettement plus élevées que celles du lagon (+ 20 ‰ et + 7,5 ‰) confirment que la nappe sous *Ptérocarpus* fonctionne comme un réservoir limité en sulfates avec une activité microbienne sulfato-réductrice importante (PIERRE et FONTES, 1979).

- les teneurs en soufre insoluble (S org. + S min.) ins. plus élevées en profondeur qu'en surface diminuent nettement dans la zone à *Ptérocarpus*. Cette diminution porte sur les deux formes de soufre mais est plus importante pour S org., en particulier dans l'horizon de surface. Les fractions granulométriques les plus fines (0-50 μm), qui sont les plus humifiées, apparaissent en général plus riches en S min. que les autres fractions. Les matières humiques totales MHT et l'humine HU contiennent respectivement 20 et 80 % du soufre insoluble. On n'observe pas de variations nettes de ces proportions selon le degré d'humification des fractions granulométriques, les rapports C : S_t des fractions totales et de l'humine correspondante étant d'ailleurs semblables. Hormis, donc, pour la fraction fine la plus humifiée (0-50 μm) la répartition du soufre dans les fractions grossières (sup. à 50 μm) n'est pas corrélée avec leur degré de décomposition. La teneur isotopique $\delta^{34}\text{S}$, égal à + 1 ‰, du soufre total d'un échantillon de profondeur dans la zone à *Ptérocarpus* pourrait être en accord avec un mélange de soufre insoluble à $\delta^{34}\text{S} = - 8$ ‰ (donc proche de S ins. mangrove à *Rhizophora*) et de sulfates solubles à $\delta^{34}\text{S} = + 40$ ‰ (nappe sous *Ptérocarpus*)*.

Cette étude sur les deux séquences (Sénégal et Guadeloupe) doit se poursuivre hors du cadre de l'ATP-MO-PIREN par une caractérisation isotopique plus fine des principaux compartiments soufrés de l'écosystème (végétations sols et nappes, fractions solubles et insolubles, organiques et minérales) et une recherche plus poussée sur la nature du soufre organique.

* Vérifications en cours

REFERENCES

- 1 - BOULEGUE (J.) et POPOFF - 1979 - Nouvelles méthodes de détermination des principales espèces ioniques du soufre dans les eaux naturelles. *Journal Fr. Hydrologie* 10 (2), 83-90.
- 2 - BOULEGUE (J.), LORD (C.J.) et CHURCH (T.M.) - 1982 - Sulfur speciation and associated trace metals (Fe, Cu) in the pore waters of great Marsh, Delaware. *Geochim. Cosmochim. Acta* 46, 453-464.
- 3 - BURTON (H.R.) et BARKER (R.J.) - 1980 - Sulfur chemistry in an antarctic meromictic lake. In "Sulfur in Australia" J.R. Freney and A.J. Nicholson Eds. *Austr. Acad. Sci., Canberra*, pp. 96-99.
- 4 - CASSAGRANDE (D.J.) et GIVEN (P.H.) - 1980 - Geochemistry of amino acids in some Florida peat accumulations - II - Amino acid distributions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 44, 1493-1507.
- 5 - FELLER (C.) - 1979 - Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 17, 339-346.
- 6 - FELLER (C.) - 1981 - Compte-rendu de la mission effectuée en Guadeloupe dans le cadre de l'Action DGRST "La mangrove et sa zone côtière". *Rapp. mult. ORSTOM-Martinique*, 6 p.
- 7 - FELLER (C.) et PETARD (J.) - 1984 - Formes du soufre soluble dans les nappes de la mangrove de Guadeloupe (séquence tourbeuse). *Rapp. mult. ORSTOM - Martinique*, 5 p.
- 8 - FELLER (C.), CHEVAL (M.) et GANRY (F.) - 1981 - Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agrosystème tropical. I. Influence d'une fertilisation azotée (urée) et d'un amendement organique (compost) sur la répartition du carbone et de l'azote dans différents compartiments d'un sol sableux. *L'agron. Trop.* 26 (1), 9-17.
- 9 - FILLY (A.), LE TOLLE (R.) et PUSSET (M.) - 1975 - L'analyse isotopique du soufre : problèmes techniques. *Analisis* 3 (4), 197-200.
- 10 - GRUNDON (N.J.) - 1980 - Volatile losses of sulfur from intact plants. In "Sulfur in Australia" (op. cit.), pp. 20-23.
- 11 - KROUSE (H.R.), LEGGE (A.H.) et BROWN (H.M.) - 1984 - Sulphur gas emissions in the boreal forest : the West Whitecourt Case study. V - Stable sulphur isotopes. *Water, Air and Soil Pollution*, 22, 321-347.

- 12 - KROUSE (H.R.) et VAN EVERDINGEN (R.O.) - 1984 - $\delta^{34}\text{S}$ variations in vegetation and soil exposed to intense biogenic sulphide emissions near Paige Mountain, N.W.T., Canada. *Water, Air and Soil Pollution*, 23, 61-67.
- 13 - KUSAKABE (H.), RAFTER (T.A.), STOUT (J.D.) et COLLIE (T.W.) - 1976 - Sulphur isotopic variations in nature. 12 - Isotopic ratios of sulphur extracted from some plants, soils and related materials. *N.Z. Journal of Science* 19, 433-440.
- 14 - LONGINELLI (A.) et CRAIG (H.) - 1967 - Oxygen 18 variations in sulfate ions in sea water and saline lakes. *Science*, 156, 56-59.
- 15 - MARIUS (C.) - 1984 - Contribution à l'étude des mangroves du Sénégal et de la Gambie. *Ecologie, pédologie, géochimie. Mise en valeur et aménagement*. Thèse Doct. Etat, Univ. Strasbourg, ORSTOM Paris, 309 p.
- 16 - NISSEMBAUM (A.) et KAPLAN (I.R.) - 1972 - Chemical and isotopic evidence for the *in situ* origin of marine humic substances. *Limn. and Oceano.*, 17 (4), 570-582.
- 17 - NISSEMBAUM (A.) et KAPLAN (I.R.) - 1976 - Sulfur and carbon isotopic evidence for biogeochemical processes in the Dead Sea ecosystem. In "Environmental biogeochemistry. Vol. 1" J.O. Nriagu Ed., Ann. Arbor Science Pub., pp. 309-325.
- 18 - NICHOLAS (D.J.D.) - 1980 - Cycling of sulfur through the soil-plant system. In "Sulfur in Australia" (Op. cit.), pp. 194-203.
- 19 - PIERRE (C.) et FONTES (J.Ch.) - 1979 - Oxygène 18, carbone 13, deutérium et soufre 34 : marqueurs géochimiques de la diagenèse et du paléomilieu évaporitiques du Messinien de la Méditerranée. *Bull. Mus. Natn. Hist. nat. Paris*, n° sér., 1, sect. C n° 1, 3-18.
- 20 - RICHTER (D.D.) et JOHNSON (D.W.) - 1983 - Determination of inorganic sulfate in foliage with barium chloranilate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 522-525.
- 21 - SKYRING (G.W.) et CHAMBERS (L.A.) - 1980 - Sulfate reduction in intertidal sediments. In "Sulfur in Australia" (Op. Cit.), pp. 88-97.
- 22 - SMITH (J.W.) - 1980 - Origin, distribution and isotopic composition of sulfur in coals. In "Sulfur in Australia" (Op. Cit.), pp. 114-117.
- 23 - STOUT (J.D.), RAFTER (A.) and TROUGHTON (J.H.) - 1975 - The possible significance of isotopic ratios in palaeoecology. *Quaternary studies*, R.P. Suggate et M.M. Cresswell Eds., pp. 279-286.

- 24 - TRUDINGER (P.A.) - 1982 - Geological significance of sulphur oxidoreduction by bacteria. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 298, 563-581.
- 25 - TURENNE (J.F.) - 1984 - La mangrove de Guadeloupe. Action Concertée DGRST. "La mangrove de sa zone côtière". *Rapp. final.mult.*, ORSTOM Martinique, 45 p.
- 26 - VIEILLEFON (J.) - 1977 - Les sols de mangroves et des tannes de Basse-Casamance (Sénégal). *Mém. ORSTOM n° 83*, ORSTOM Paris, 291 p.
- 27 - VIEILLEFON (J.), CHANTRET (F.) et TRICHET (J.) - 1973 - Caractérisation des formes du soufre dans les sols de mangrove. Mise en évidence d'une fraction liée à la matière organique. *C.R. Ac. Sc. Paris*, sér. D, 276, 2629-2632.

Fig. 1 : Compartiments à étudier pour l'étude du cycle du Soufre dans l'écosystème mangrove

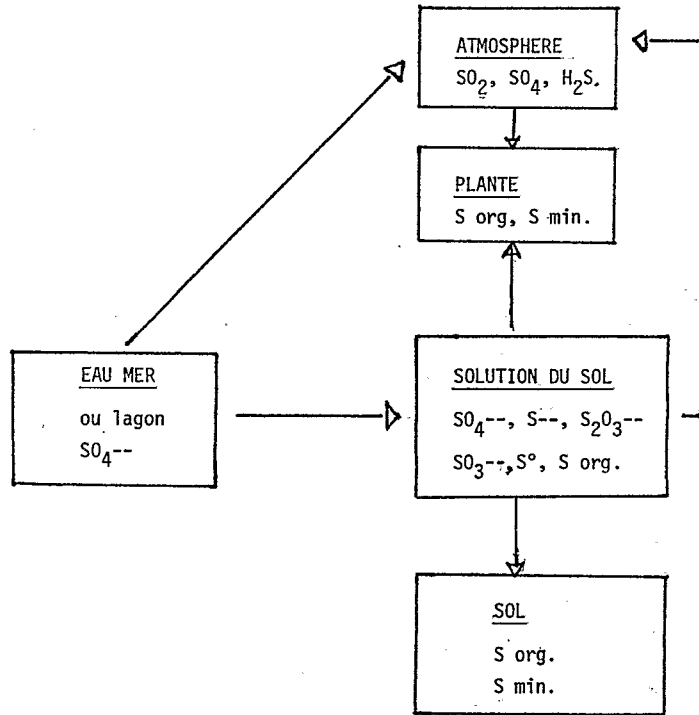


Fig. 2 : Schéma de la séquence de Guadeloupe

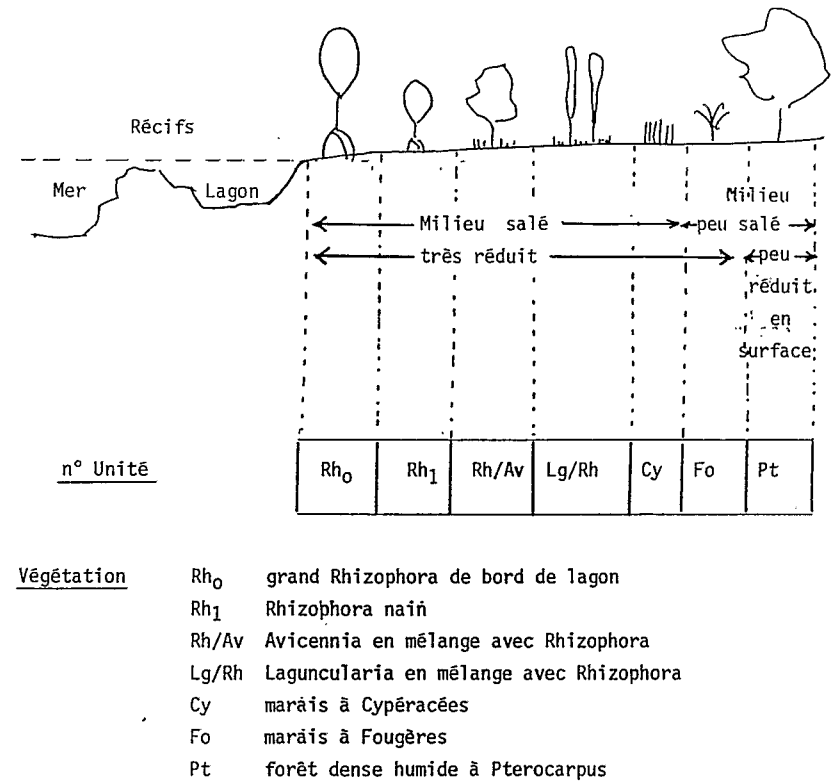


Fig. 3 - Répartition de S-SO₄ soluble et Sinsoluble (Sorg + Smin) ins.

dans 2 séquences tourbeuses de Guadeloupe.

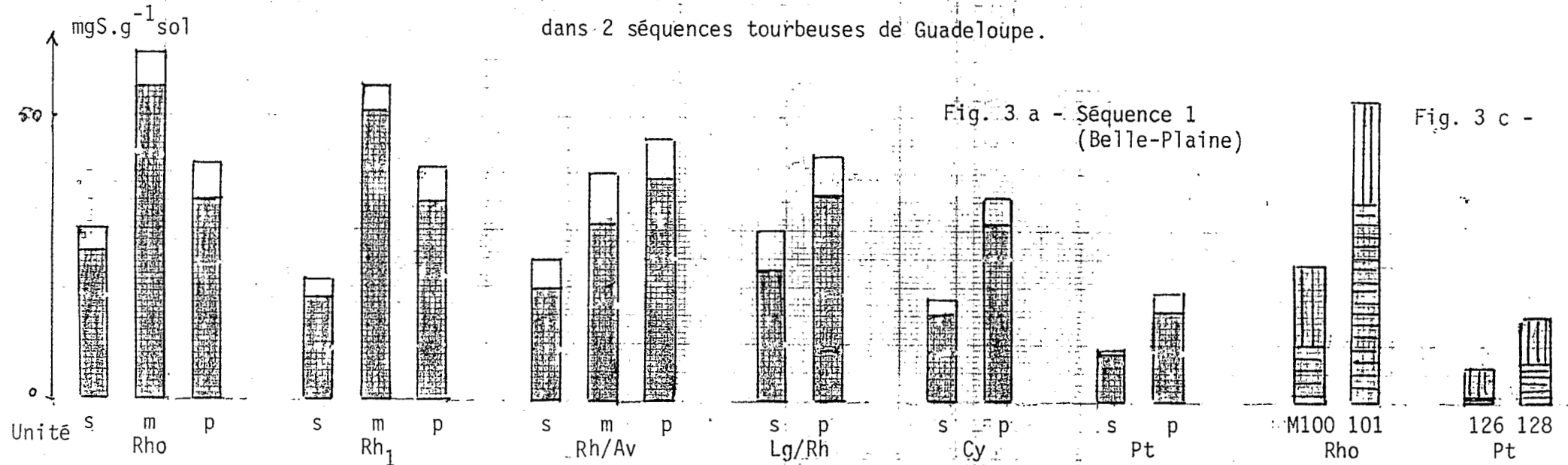
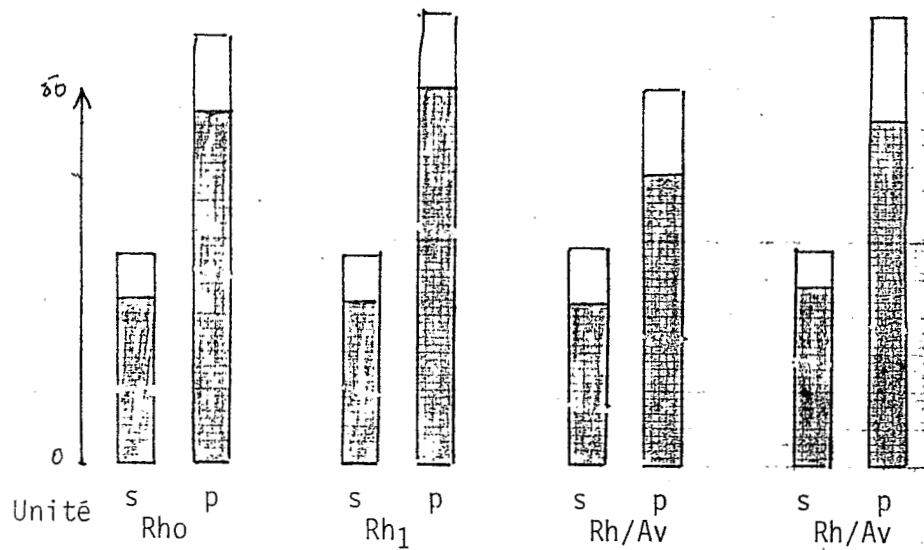


Fig. 3 b - Séquence 2 (sans unité Pt)

(canal Perrin)



LEGENDE

s = horizon 0-20 cm
 m = horizon 30-50 cm
 p = horizon 60-80 cm





-  S org.
-  S min. insoluble
-  S org. + S min. ins. (non différenciés)
-  S-SO₄ soluble

Fig. 4.- Fractionnement de ^{34}S (ϵ_{ps}) dans un système sol-plante théorique selon les données de la littérature, $\epsilon_{\text{ps}}\text{‰} = \delta\text{‰}_p - \delta\text{‰}_s$ pour la réaction substrat $s \longrightarrow$ produit p

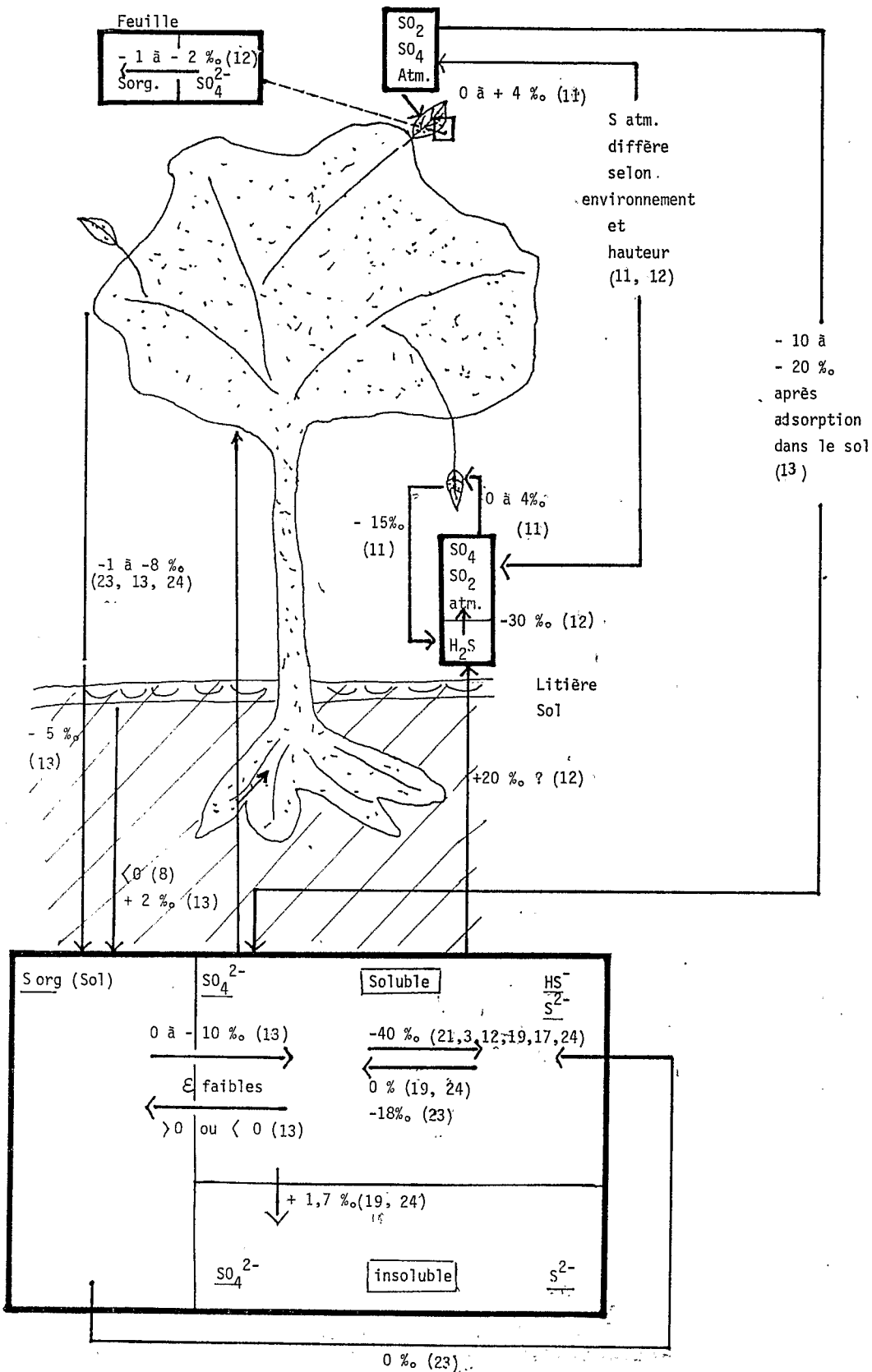


Tableau 1 - Symboles et caractéristiques des fractions granulométriques

Séquence	Taille des fractions (µm)	Symboles	Nature	C : N
Sénégal (*)	sup. à 2000	ML1	Résidus végétaux (en général peu humifiés)	80 à 120
	≈ 100-2000	ML2	Résidus végétaux à divers degrés d'humification	40 à 80
	≈ 0-100	FL	"Fraction liée": résidus végétaux très humifiés + complexe organo-minéral	20 à 30
Guadeloupe (**)	sup. à 2000	F-2001	Débris végétaux très grossiers	sup. à 40
		F-2002	Racines fines et fibres	"
	200-2000	F-200	Résidus végétaux fins à divers degrés d'humification	20 à 40
	50-200	F-50		15 à 20
	0-50	F-0	Débris organiques non identifiables, très humifiés	13 à 20

(*) Fractionnement selon FELLER et al. (1981). Méthode qui n'est plus utilisée actuellement par l'auteur.

(**) Fractionnement selon FELLER 1979. Méthode actuellement utilisée.

Tableau 2 - Minéralogie de la séquence tourbeuse (Guadeloupe)

Unité	Echantillon n°	Profondeur cm	Pyrite		Halite
			RX	microscopie(*)	
Rho	M100	0 - 30	-	ε	+++
	101	60 - 80	+	+	+++
Rh1	102	0 - 30	+	+	+++
	103	60 - 80	+	+	+++
Rh/Av	104	0 - 30	+	n.o.	+++
Lg/Rh	108	60 - 80	+	n.o.	+++
Lg	110	60 - 80	+	n.o.	+
	218	0 - 20	+	n.o.	+
Cy	220	60 - 80	+	n.o.	+
	126	0 - 30	-	ε	-
Pt	127	60 - 80	+	+	+
	128	150 - 200	+	n.p.	-

Abréviations : n.o. = non observé, + = un peu, +++ = beaucoup
 (*) observation sur fractions granulométriques de tailles supérieures à 50 µm

Tableau 4 - Caractéristiques des eaux de nappe de la mangrove de Guadeloupe

a) Prélèvements du 08/11/1983 (fin saison des pluies)

b) Prélèvements du 27/03/1984 (saison sèche qui n'est pas sèche en 1984).

Situation	Profondeur (cm)	Salinité		pH	Eh mV		[S ²⁻] (mM.l ⁻¹)			[SO ₄ ²⁻] (mM.l ⁻¹)		[S ₂ O ₃ ²⁻] et [SO ₃ ²⁻]	[SO ₄ ²⁻] : [Sn ²⁻]	
		a	b		a	a	b	a	b	E ⁰ (S ₂ -)b mv	a	b	(**)	a
Eau Lagon	0 - 20	35		7,2	+140		0			25,2		tr		
	40 - 50		33	7,6	+170		0	0		25,7	25,9	tr		
	80 - 100	38												
Rho	0 - 20	40	37	6,5	-190	-250	0,6	1,0	-200	33,4	22,8	0	56	23
	80 - 100	38	38	6,7	-300	-360	1,3	1,0	-160	22,0	22,0	0		22
Rh1	0 - 20	44	48	6,2	-231	-240	0,3	1,7	-190	32,0	35,8	0	107	21
	80 - 100	50	50	6,6	-350	-355	2,7	2,2	-160	38,0	25,5	0	14	16
Rh/Lg	0 - 20	48	46	6,9	-320	-350	0,3	0,9	-190	36,9	28,7	0	123	32
	80 - 100	62	44	6,7	-310	-360	1,4	2,4	-160	38,8	27,9	0	28	12
Cy	0 - 20	32	20	6,6	-340	-380	0,9	1,9	-190	9,6		0	11	
	80 - 100	35	22	6,8	-345	-380	1,7	2,0	-180	11,0	7,25	0	6,5	3,7
Pt	0 - 20	(*)	12			-260		0,1	-240		3,9			39
	80 - 100	12	16	6,6	-380	-350	1,4	0,6	-220	1,4	3,95	0	10	6,6

(*) Pas de nappe en surface à cette date (**) pour les deux prélèvements a et b.

Tableau 5 - Abréviations utilisées dans les tableaux 6, 7, 8, 9 et 11.

Abréviation	Signification
fv	feuille verte
fs	feuille sèche (litière)
fmd	feuille moyenne décomposée
ftd	feuille très décomposée
FL-feuille (0-5)	horizon 0-5 cm sous litière de feuille, fraction liée (FL)
ra	rameau
b	branche
t	tronc
rga	grosse racine aérienne
rgd	grosse racine décomposée
rs	racine souterraine
rgs	grosse racine souterraine
rms	racine moyenne souterraine
rfs	racine fine souterraine
rft	racine fine très décomposée
FL-racine (0-5)	horizon (0-5 cm) dans mat racinaire, fraction liée (FL)
FL (0-5) HU	humine de la fraction liée (FL)
F. 200	fraction granulométrique 200-2000 μm
F. 50	" " 50- 200 μm
F. 0	" " 0- 50 μm

Tableau 6 -

Teneurs en S_t de feuilles, litières et racines (et en SO_4 des litières)

Séquence tourbeuse de Guadeloupe.

Résultats en $\text{mg } S_t \cdot \text{g}^{-1} \text{ech.}$ (et en $SO_4 \% S_t$ pour les litières).

Unité	Végétal	Echantillon	n°	S_t	$S-SO_4$ (% S_t)
Rh ₀	Rhizophora	fv	M 697	5,59	63
		fs	36	10,5	
		rgs	935	6,30	
Rh ₁	Rhizophora	fv	636	8,54	
		fs	40	15,1	
Rh ₁	Avicennia	fv	638	21,6	61
		fs	46	26,5	
Lg/Av	Laguncularia	fv	630	3,88	76
		fs	48	13,6	
Cy	Cyperacée	fv	215	3,94	
		rs	217	10,1	
Pt	Ptérocarpus	fs	922	1,57	

Légende : Voir tableau 5.

Tableau 7 - Teneurs en C, S_t, S org. et S_a de *Rhizophora mangle* dans les unités Rh₀ et Rh₁
(Sénégal, Guadeloupe)
Résultats en mg.g⁻¹ échantillon

Echan- tillons	Unités												
	Rh ₀						Rh ₁						
	C	S _t	$\frac{St}{C} \times 1000$	S org.	S _a	$\frac{S \text{ org.}}{St} \times 100$	S _a	$\frac{S_a}{St} \times 100$	C	S _t	$\frac{St}{C} \times 1000$	S org.	$\frac{S \text{ org.}}{St} \times 100$
Sénégal													
fv	483	20,9	45	4,8	0,37	23	1,8	453	20,7	46	6,2	30	
fa	448	9,7	22	3,1	0,19	32	2,0	427	12,2	29	4,0	33	
b	502	6,2	12	3,1		51		449	8,8	20	2,8	131	
t	476	4,7	10	2,7	0,15	57	3,2	442	9,3	21	3,1	34	
rm _s								340	33,5	99	7,2	22	
rg _a	443	25,0	56	3,5	0,10	14	0,4						
Guadeloupe													
fv		4,70											
ra		0,74											
b		tr.											
t		tr.											
rg _a		0,79											
rf _s		6,30											

Légende : Voir tableau 5

Tableau 8 - Teneurs en C, S_t, S org. et S_a de résidus végétaux
partiellement humifiés et de l'horizon superficiel (0-5 cm) (Sénégal)
Résultats en mg.g⁻¹ éch.

Echan- tillon	Unité												
	Rh ₀						Rh ₁						
	C	S _t	$\frac{St}{C} \times 1000$	S org.	S _a	$\frac{S \text{ org.}}{St} \times 100$	S _a	$\frac{S_a}{St} \times 100$	C	S _t	$\frac{St}{C} \times 1000$	S org.	$\frac{S \text{ org.}}{St} \times 100$
fs	466	24,3	52	2,3	0,15	9	0,62						
fmd	420	14,6	35	1,9	0,48	13	3,29						
ftd	358	16,5	46	5,7	0,45	35	2,72						
FL-feuille (0-5)	56,9	6,5	114	4,6	0,14	71	2,15						
rga	443	25,0	56	3,6	0,19	14	0,76						
rgd	374	39,1	105	10,5		27							
rms								340	33,5	99	7,2	22	
rfs	334	34,4	103	5,4	0,13	16	0,38	316	62,1	197	14,7	24	
rft	353	24,6	70	10,9	0,57	45	2,32	264	50,5	191	25,5	50	
FL-racine (0-5)	85,3	10,9	117	4,7		47		46,9	12,1	258	6,5	54	

Légende : voir tableau 5

Tableau 11 - Valeurs $\delta^{34}\text{S}$ de végétaux, sols et nappes
(Sénégal, Guadeloupe)

n°	Echantillons	Pays	Unité	$\delta^{34}\text{S} \text{ ‰}$	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$
<u>Végétaux</u>					
M 935	fmd	Sénégal	Rho	- 7,65	
	rm		Rh ₁	- 7,9	
	rtd		Rho	-23,9	
	rgs	Guadeloupe	Rho	- 6,6	
<u>Eaux (nappes...)</u>					
M 941	Sol total (0-20)	Guadeloupe	Rho	- 12,0	
			Pt	+ 1,1	
			" "(250 - 300)		
	FL(0-5)	Sénégal	Rh ₁	- 17,0	
	FL(0-5)HU			- 17,6	
M 941	F. 200	Guadeloupe	Rho	- 17,4	
			"	- 13,8	
			"	- 16,7	
<u>Sols et fractions</u>					

• Légende : voir tableau 5

Tableau 9 -

Teneurs en acides aminés totaux (AAT), soufrés (AAS),
"non protéiques", (AAMP) et protéiques non soufrés (AAPPNS)
d'organes végétaux, de litières et de sols (0 - 5 ou 0 - 10 cm).

Résultats en $\mu\text{M} \cdot \text{g}^{-1}$ éch. et en $\mu\text{M} \cdot \text{g}^{-1} \text{C}$ éch.

Echantillons	C%	AAT		AAS		AAMP		AAPPNS	
		$\mu\text{M} \cdot \text{g}^{-1}$	$\mu\text{M} \cdot \text{gC}^{-1}$	$\mu\text{M} \cdot \text{g}^{-1}$	$\mu\text{M} \cdot \text{gC}^{-1}$	$\mu\text{M} \cdot \text{g}^{-1}$	$\mu\text{M} \cdot \text{gC}^{-1}$	$\mu\text{M} \cdot \text{g}^{-1}$	$\mu\text{M} \cdot \text{gC}^{-1}$
<u>Décomposition (Sénégal, Rho)</u>									
fv	463	585	1263	11,6	25,1	8,8	19,0	571	1233
fs	466	263	564	4,6	9,9	5,4	11,6	256	549
fmd	420	503	1209	15,0	35,7	17,8	42,4	484	1152
ftd	358	536	1497	14,2	39,7	19,6	54,7	510	1425
FL-feuille (0-5)	56,9	136	2390	4,4	77,3	6,8	119	127,2	2236
<u>Décomposition (Sénégal, Rho)</u>									
<u>racines</u>									
rga	443	183	413	3,2	7,2	4,2	9,5	178	402
rfs	334	269	805	4,0	11,0	7,0	21,0	261	781
rftd	353	527	1493	17,8	50,4	24,0	68,0	497	1408
FL-racine (0-5)	85,3	171	2005	7,4	86,8	10,8	127	158	1852
<u>Acides humiques (Sénégal, Rho)</u>									
fid	496	1144	2306	39,0	78,6	54,4	110	1074	2165
Sol total (0-10)	475	968	2038	33,7	70,9	45,8	96,4	910	1916
FL-racine (0-5)	459	1481	3227	49,1	107,0	74,2	162	1389	3026
<u>Acides humiques (guadeloupe)</u>									
Rho sol	476	1745	3667						
Cy sol	440	1168	2654						
Pt sol	322	895	2780						

Légende voir tableau 5

Tableau 10 - Caractéristiques des fractions granulométriques

Unité et (profondeur)	Ech. n°	Fraction ou { fraction	C : N	C : S _t	Cendres 350°		S org.	S min.	S _{MHT}	S _{HU}	C _{MHT}	C _{HU}	C _{HU} : S _{HU}	
					mg.g ⁻¹ fract	mgS.g ⁻¹ cendres								mgS.g ⁻¹ S fract.(ou ≤ fract.)
Rho (0-20)	M 100	{ fraction		16,0			429	571						
		F-2001		18,5			447**	553						
		2002	32,0		13,8	192	68,3	447	553					
		200	32,1		13,8	172	77,7	447	553					
		50	19,7		14,4	402	39,4	528	472					
	(60-80)	M 101	{ fraction		12,3			400	600					
			F-2001		7,5			391	609					
			2002	38,3		9,5		648**	352					
			200	31,1		7,8	226	95,6	608**	392				
			50	19,2		6,1	217	60,8	608	392				
Rh1 (0-20)	M 102	{ fraction		10,5										
		F-2001	37,4		14,3									
		2002	30,5		15,1			210	790	110		16,5		
		200	29,5		13,4			210	790	440*		15,7		
		50	19,2		12,8			240	760	250		15,0		
	(60-80)	M 103	F-2001	32,9		5,6								
			2002	44,2		9,2								
			200	36,4		8,7			180	820	100		8,5	
			50	23,4		8,7			180	820	160		10,4	
			0	20,7		8,4			190	810	150		9,5	
Pt (0-20)	M 126	{ fraction		174			227**	773						
		F-2001	25,6		105	230	16,3	147**	853					
		2002	22,7		77	188	21,7	147	853					
		200	14,0		71	198	21,1	258	742					
		50	13,7		68	240	19,7	284	716					
	(150-200)	M 128	{ fraction		18,6			317**	683					
			F-2001	29,6		22,9	120	101,8	435**	565				
			2002	28,9		19,9	188	79,1	435	565	180	820	200	20,7
			200	20,3		27,5	224	54,6	378	622				
			50	17,0		17,7	352	51,6	470	530				

(*) Résultat à contrôler :

(**) non dosé, estimé pour calculer la somme des fractions.