Conséquences des aménagements hydroagricoles sur l'évolution des sols de certains bas-fonds à Madagascar

Jean-François VIZIER

Pédologue ORSTOM
ORSTOM, B.P. 375, Lomé, Togo

RÉSUMÉ

Dans le Moyen Ouest malgache des bas-fonds sont aménagés pour la riziculture. Sur les flancs des bas-fonds et en bas de pente, les sols sont aplanis, endigués et irrigués, tandis que les parties les plus basses sont drainées. La modification du régime hydrique des profils qui résulte de ces aménagements transforme les conditions d'évolution. Les différences observées sur les caractéristiques morphologiques et analytiques des sols aménagés par rapport à celles des sols non aménagés, peuvent être expliquées par l'étude de la dynamique actuelle des profils.

ABSTRACT

In the Middle West of Malagasy, some low lands are made suitable for rice growing purposes. The ground is levelled, diked and irrigated on the flanks of low lands and at the bottom of slopes, whereas the lowest sections are drained. The modification of profile water regime which results from these developments transforms the conditions of soil life. The differences observed on the morphological and analytic particulars of developed soils in relation to those of non developed soils can be accounted for by studying the present dynamics of profiles.

PLAN

Introduction

1. LES SOLS - OBJETS DE L'ÉTUDE
   - 1.1. Les sols de flancs de bas-fonds et de bas de pente et les modifications qu'ils présentent après aménagement.
   - 1.2. Les sols des parties basses des bas-fonds et les modifications qu'ils présentent après aménagement.
2. QUELQUES ASPECTS DE LA DYNAMIQUE ACTUELLE DES SOLS AMÉNAGÉS
   - 2.1. Modifications des conditions d'évolution des profils.
   - 2.2. Protocole expérimental.
   - 2.3. Les résultats expérimentaux.
3. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS - HYPOTHÈSES SUR L'ÉVOLUTION DES SOLS AMÉNAGÉS

Conclusion

Bibliographie

Annexe

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XVI, n° 2, 1978 : 111-129

INTRODUCTION

D'importantes superficies sont consacrées à la riziculture à Madagascar. Les sols ainsi cultivés se situent dans des cuvettes, des fonds de vallées, des plaines alluviales qui sont aménagés par l'homme. Dans ces parties basses du paysage, inondées ou fortement gorgées d'eau, l'action de l'homme vise essentiellement à drainer ces zones et à y acquérir la maîtrise de l'eau pour implanter des rizières. Mais dans de nombreux bas-fonds, les aménagements consistent à la fois à *drainer* les parties basses et à *irriguer* les sols des flancs des bas-fonds ou de bas de pente mis en terrasses.

Ces aménagements modifient le régime hydrique des sols et font apparaître de *nouvelles conditions d'évolution* qui vont transformer les profils.

Des aménagements de ce type sont réalisés dans le Moyen Ouest de Madagascar dans la sous-préfecture de Tsiroanomandidy et en particulier dans la zone de Mahasolo-Kianjasoa située à 130 km à l'Ouest de Tananarive. Cette région a bénéficié d'une importante et récente immigration. Au fur et à mesure de leur installation, les nouveaux occupants ont aménagé des bas-fonds pour y pratiquer la riziculture.

Les sols des bas-fonds de cette région se sont avérés intéressants à étudier, car ils présentent des stades de transformation différents suivant l'ancienneté de l'aménagement. Ils constituent *les objets de cette étude*, dont *le but* est de préciser l'*importance* et le *sens* des transformations subies par les sols *irrigués* ou *drainés*, pour conclure sur l'effet favorable ou défavorable de tels aménagements.

Les aménagements hydro-agricoles pratiqués dans cette région, qui se présente comme un plateau découpé par de nombreux bas-fonds formant un réseau dendritique serré, sont schématiquement représentés sur la figure 1.

Une partie de l'eau des précipitations qui s'infiltre sur le plateau ressort en tête de bas-fond, où elle est retenue dans des bassins d'irrigation (fig. 1*a* et 1*c*) et sur les flancs des bas-fonds sous forme de petites résurgences (fig. 1*b* et 1*c*). Les rizières sont implantées sur des terrasses, les sols des flancs de bas-fond et de bas de pente étant légèrement aplanis et endigués. Les rizières mises en place sur les flancs de bas-fonds sont étroites et allongées (3 à 4 m sur 10 m environ) et inondées en saison humide par l'eau qui sourd lentement à ce niveau. Celles de bas de pente sont plus grandes (15 m sur 20 environ) et, situées à un niveau inférieur au bassin d'irrigation, sont inondées pendant

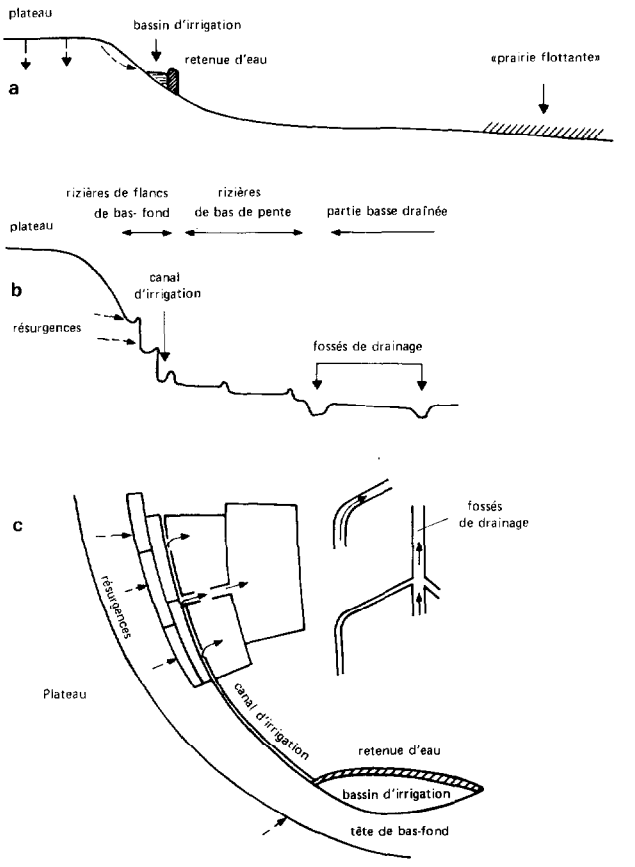


FIG. 1.

a : Coupe longitudinale d'un bas-fond ; *b :* coupe transversale d'un bas-fond aménagé ; *c :* plan d'aménagement d'un bas-fond.

la période de culture (saison des pluies), grâce à l'apport complémentaire que constitue l'eau amenée par les canaux d'irrigation venant de la retenue située en tête du bas-fond (fig. 1*b* et 1*c*).

La partie la plus basse des bas-fonds, recueille toutes les eaux ruisselées ou de résurgence. Il s'y développe une abondante végétation, où dominent les Cypéracées, qui forme un mat racinaire important et ralentit l'écoulement de l'eau vers l'aval. L'importante masse d'eau qui s'écoule subsuperficiellement arrive à décoller le mat racinaire, épais de 50 à 80 cm, du sol proprement dit, d'où l'aspect de « prairie flottante » que présente cette partie du bas-fond. Le creusement de fossés de drainage permet d'accélérer l'écoulement de l'eau vers l'aval, ce qui a pour effet de supprimer l'écoulement subsuperficiel, de « stabi-

liser » l'horizon très riche en racines, puis de récupérer les sols ainsi drainés pour la riziculture.

La démarche méthodologique adoptée pour cette étude consiste :

— à mettre en évidence les différences qui existent entre *sols équivalents* — flancs de bas-fond et de bas de pente d'une part, sols des parties basses d'autre part — *non aménagés* ou *aménagés* depuis plus ou moins longtemps.

— à essayer d'expliquer certaines de ces différences par le *comportement* de ces sols, dans les *conditions nouvelles d'évolution* qui leur sont imposées par l'homme.

Les différences entre sols aménagés et non aménagés sont mises en évidence par l'étude morphologique et analytique des profils.

L'étude du *comportement* de ces sols a été réalisée en laboratoire, sur des modèles expérimentaux auxquels on a appliqué des conditions d'évolution voisines de celles existant in situ dans les sols aménagés. L'accent sera mis sur les *pertes* que subissent ces sols en matière organique, fer, bases, en fonction du degré de leur transformation (ancienneté de l'aménagement) d'une part, de l'état d'oxydoréduction lié à la durée de saturation par l'eau d'autre part, pertes dues aux mouvements de l'eau qui simulent en laboratoire ceux existant in situ à travers les profils lorsque les rizières sont inondées pendant la période de culture.

Pour *les sols* de flancs de bas-fonds et de bas de pente *irrigués*, les résultats de ces expérimentations permettront d'expliquer certaines modifications observées dans les profils de rizières aménagées par rapport à des sols témoins non aménagés.

Pour les *sols* des parties basses des bas-fonds *drainés*, les données expérimentales acquises compléteront les informations déjà abondantes fournies par le travail de Didier de Saint Amand (1967) sur les conséquences morphologiques, chimiques et biologiques relatives au drainage de ce type de sols des dépressions à Madagascar.

1. LES SOLS — OBJETS DE L'ÉTUDE

Cette région de Mahasolo-Kianjasoa du Moyen Ouest de Madagascar, se présente comme un plateau sur lequel des sols ferrallitiques profonds se sont développés à partir de matériaux d'altération provenant d'une migmatite à biotite d'origine assez complexe (Laplaine, 1951). Ce plateau est découpé par des bas-fonds en « doigts de gant » dont les eaux s'écoulent à l'aval vers les deux grands axes de drainage de cette zone que constituent les rivières Sakay et Imanga. Les versants de raccord entre le plateau et les thalwegs encaissés sont convexes et ont une pente très forte. Sur ces versants ou flancs de bas-fond, on observe des sols ferrallitiques peu épais développés dans la zone d'altération même des sols du plateau. Ce matériau est encore riche en minéraux primaires, signe d'un rajeunissement récent qui a pu se produire tandis que le réseau hydrographique s'encaissait (Bourgeat, 1970). En bas de pente, on observe des sols plus jaunâtres formés sur des colluvions provenant à la fois des sols rouges du plateau et de leur zone d'altération mise à nue sur les versants. Ce sont ces sols qui, mis en terrasses sur les flancs des bas-fonds ou en bas de pente, sont inondés pendant la période de culture du riz, soit environ 5 mois par an, de décembre à avril.

La pente des thalwegs est assez forte en tête de bas-fond ; mais elle s'adoucit rapidement et les matériaux arrachés au plateau provoquent un colmatage de la partie aval des bas-fonds, colmatage que facilite sans doute l'importante végétation qui s'y développe. On observe dans ces parties basses, gorgées d'eau, des sols hydromorphes très organiques formés d'un horizon superficiel très riche en racines et qui est souvent décollé, par un écoulement d'eau subsuperficiel, des horizons sous-jacents qui se différencient dans les arènes d'altération des migmatites (Le Buannec, 1967). Ce sont ces sols qui sont drainés puis récupérés pour la riziculture.

Une étude succincte, portant sur une dizaine de bas-fonds, a permis de choisir quelques profils représentatifs qui ont été décrits, prélevés et analysés. Ce sont des échantillons provenant de ces profils qui ont été utilisés en laboratoire pour l'étude du comportement.

1.1. Les sols de flancs de bas-fonds et de bas de pente et les modifications qu'ils présentent après aménagement

Les sols étudiés ont été observés en août, c'est-à-dire à la fin de la saison sèche, dans deux bas-fonds voisins : Ambalahazo et Belagera-Nord.

Il s'agit des profils :

AB 1 : sol de bas de pente non aménagé du bas-fond d'Ambalahazo.

AB 2 : sol de *bas de pente aménagé*, observé dans le même bas fond et inondé en saison des pluies pendant la culture du riz depuis 10 ans, grâce à l'apport d'eau venant de la retenue située en tête de bas-fond et amenée par un canal d'irrigation. Au mois d'août, ce sol est sec en surface.

BE 4 : sol de *flanc de bas-fond* observé à Belagera-Nord, aménagé depuis 10 ans, et inondé en saison des pluies grâce aux petites résurgences qui existent à ce niveau du versant du bas-fond. En août, au moment de l'observation, ce sol est très humide dès la surface, mais pas inondé.

1.1.1. Description sommaire des profils et modifications morphologiques observées entre le sol témoin et les sols aménagés

Profil AB 1 : Bas de pente d'un versant de thalweg encaissé, couvert d'une végétation herbacée : Aristida sp., Heteropogon contortus.

0- 15 cm : Brun grisâtre foncé homogène (10 YR 3/2) ; sableux à sablo-argileux, sables quartzeux mamelonnés brillants, quelques micas ; structure polyédrique moyenne et fine nette ; poreux, peu cimenté ; fragile ; racines fines, bon enracinement ; transition distincte à :

15- 50 cm : Brun-jaune foncé homogène (10 YR 4/4) ; sablo-argileux, même type de sable qu'en surface ; structure polyédrique moyenne et fine nette ; poreux ; peu cimenté, fragile ; rares racines fines ; transition distincte à :

50-100 cm : Brun-jaunâtre clair (10 YR 6/4) avec quelques zones brun-grisâtre (10 YR 5/2), quelques taches jaune-rougeâtre (7,5 YR 7/6) ; sablo-limoneux, sables quartzeux mamelonnés à éclat brillant ; quelques petits éléments de feldspaths laiteux plus anguleux, quelques micas ; structure polyédrique moyenne et fine peu nette ; poreux ; peu cimenté ; fragile.

Ce type de sol a été fréquemment observé dans les bas-fonds de la région (Riquier, 1956). Lorsqu'on va vers la partie la plus basse du bas-fond, la nappe phréatique apparaît dans le profil ; quand elle atteint la surface du sol, la végétation change, les Cypéracées dominent et on passe rapidement aux sols organiques.

Le sol de bas de pente décrit, diffère légèrement des sols de flanc de bas fond non aménagés. En effet, ces derniers se développent non pas sur des colluvions formées d'un mélange de matériaux provenant des sols ferrallitiques du plateau et de leur zone d'altération mise à nue sur les versants, mais sur la zone d'altération elle-même. Cependant dès que ces sols de flanc de bas fonds sont aménagés, c'est-à-dire aplanis et endigués, ils se recouvrent à leur tour, sur une trentaine de centimètres environ, de colluvions provenant du plateau et ils présentent, en définitive, un aspect très semblable aux sols de bas de pente.

Profil AB 2 : Bas de pente du thalweg encaissé, aménagé en rizière ; restes de chaumes de riz.

0- 15 cm : Brun très foncé (10 YR 2/2) avec taches jaune rougeâtre (7,5 YR 6/8) localisées autour des tubes racinaires ; sablo-argileux ; sables quartzeux mamelonnés brillants ou teintés d'oxydes, quelques micas ; structure polyédrique moyenne nette ; poreux ; peu cimenté, fragile ; racines moyennes et fines ; transition distincte à :

15- 50 cm : Couleur hétérogène de gris-brun très foncé à gris-brunâtre clair (10 YR 3/2 à 10 YR 6/2), taches rouges (2,5 YR 5/8) et très petites taches noires ; même texture (mais avec plus de limon), structure et porosité que pour l'horizon superficiel ; transition distincte à :

50-100 cm : Horizon humide brun-grisâtre (2,5 Y 4,5/2) devenant plus clair à la base, présence de la nappe phréatique à 60 cm.

Profil BE 4 : Sol de flanc de bas-fond aménagé en rizière, restes de chaumes de riz ; le profil est très humide dès la surface.

0- 10 cm : Brun très foncé (10 YR-2,5/1,5 humide), sablo-argileux, sables quartzeux brillants ou teintés et quelques micas, passage distinct à :

10- 35 cm : Noir, très humide, plus compact, sablo-argileux ; passage distinct à :

35- 60 cm : Très humide, couleur hétérogène, zones grises légèrement verdâtres (5 BG 5/1) avec quelques petites taches jaune rougeâtre (7,5 YR 7/6) autour de petites racines ou dans la masse même de l'horizon dont la couleur est brun-grisâtre (2,5 Y 5/2) ; argilo-sableux mais assez forte proportion de limons, quartz et micas visibles, passage progressif à :

60-100 cm : Très humide gris (5 BG 5/1) encore quelques taches jaune-rougeâtre, sablo-argileux.

Dans ce dernier profil, il est impossible d'apprécier la structure et la porosité, étant donné la forte humidité que présente le sol même au mois d'août en fin de saison sèche. Les petites résurgences qui existent à ce niveau du bas-fond, maintiennent toute l'année une certaine humidité dans le sol.

Ces profils présentent des caracètres communs. Leur texture est sensiblement la même et on observe dans la fraction sableuse des minéraux primaires plus ou moins altérés (quartz, micas blanchis, feldspath laiteux). Ces sols sont dans leur ensemble poreux, ce qui leur assure un bon drainage interne ; ce carac-

tère est déterminant pour l'évolution future de ces profils, car inondés, ces sols vont être soumis à des mouvements d'eau verticaux importants.

Les variations morphologiques observées dans les sols aménagés par rapport au sol témoin (AB 1) sont les suivantes :

— approfondissement des horizons humifères qui passent de 15 à 40-50 cm d'épaisseur ;

— variations de couleur :

  — les horizons superficiels sont plus foncés,

  — apparition de taches jaune-rouge dans les horizons subsuperficiels,

  — éclaircissement des horizons profonds, allant jusqu'à des couleurs gris clair ;

— la structure enfin, tout en restant polyédrique, apparaît plus grossière dans le profil AB 2 que dans le témoin AB 1.

1.1.2. Différences existant entre les caractéristiques analytiques du sol témoin et celles des sols aménagés

Les résultats d'analyses effectuées sur les échantillons des profils précédemment décrits sont donnés en annexe (1).

Si on considère les horizons superficiels, dans lesquels se développe le système racinaire du riz et sur lesquels ont été effectuées les études de comportement, on constate que ces horizons ont des textures très proches les unes des autres. Les taux d'argile varient de 15,5 à 22,8 %, ceux de limons (2-50 μ) de 12,2 à 20,1 % et le rapport sables fins/sables grossiers est compris entre 0,27 et 0,37. Au delà de 70 cm de profondeur, les horizons sont plus sableux (moins de 15 % d'argile).

La densité apparente, assez faible, est comprise entre 1 et 1,3, les valeurs les plus basses étant obtenues en surface.

L'attaque triacide laisse un résidu important (plus de 50 %), résidu dans lequel la détermination minéralogique (2) révèle dans tous les cas, la présence exclusive de quartz et de feldspath. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est égal ou légèrement supérieur à 2.

L'analyse thermique différentielle et l'étude thermopondérale (3) effectuées sur la fraction 0-2 μ montrent que l'argile est kaolinitique ; on note également la présence de gibbsite dans les trois profils.

Les trois profils étudiés se différencient donc sur des matériaux qui, malgré la complexité de leur mise en place (colluvionnement), ont des caractéristiques physiques et minéralogiques voisines.

Le pH de ces sols est compris entre 5 et 5,8, les sols aménagés étant légèrement *plus acides* (5 à 5,5) que le sol témoin (5,3 à 5,8).

Les principales différences analytiques constatées entre les sols aménagés et le sol témoin, concernent : la matière organique, le fer et les bases échangeables.

Les résultats d'analyses concernant *la matière organique* confirment les observations morphologiques, à savoir que les horizons humifères des sols aménagés sont plus épais et plus riches en matière organique que ceux du sol témoin.

La représentation de l'expression volumique des teneurs en carbone organique (mg C/cm^3) en fonction de la profondeur (fig. 2), permet de constater que les quantités de carbone organique sont pour un même volume de sol et sur 50 cm d'épaisseur 2,2 (AB 2) à 3,5 (BE 4) fois plus fortes dans les sols aménagés que dans le sol témoin (AB 1).

Tableau I

	Sol de bas de pente témoin		Sol de bas de pente aménagé		Sol de flanc de bas-fond aménagé	
Horizons	AB 11	AB 12	AB 21	AB 22	BE 41	BE 42
Profondeur ..	0-10	30-50	0-10	30-50	0-10	20-30
Mat. org. (%)	3,3	1,0	4,2	3,9	6,1	8,5
en C ‰ C	19,3	6,0	24,2	22,5	35,0	49,5
en C ‰ MHT ..	7,0	1,6	8,1	6,7	12,9	22,5
en C ‰ AH ...	5,4	1,1	5,2	4,1	7,1	13,4
en C ‰ AF	1,6	0,5	2,9	2,6	5,8	9,1
AF/AH	0,30	0,45	0,56	0,63	0,82	0,68
Taux d'extr. ..	36,2	26,6	33,5	29,8	36,8	45,5
N ‰	1,6	1,0	2,0	1,9	2,9	3,2
C/N	12,1	6,0	12,1	11,8	12,1	15,4

Dans les horizons superficiels (0-50 cm) des trois profils, on constate (tabl. I), que dans les sols aménagés,

(1) Analyses réalisées par les Laboratoires Communs du Centre ORSTOM de Tananarive sous la responsabilité de J.L. Thiais et J.B. Duras.

(2) Réalisée au Laboratoire de Spectrographie des S.S.C. de l'ORSTOM à Bondy.

(3) Analyses effectuées au Laboratoire des Sols du C.N.R.A. à Versailles.

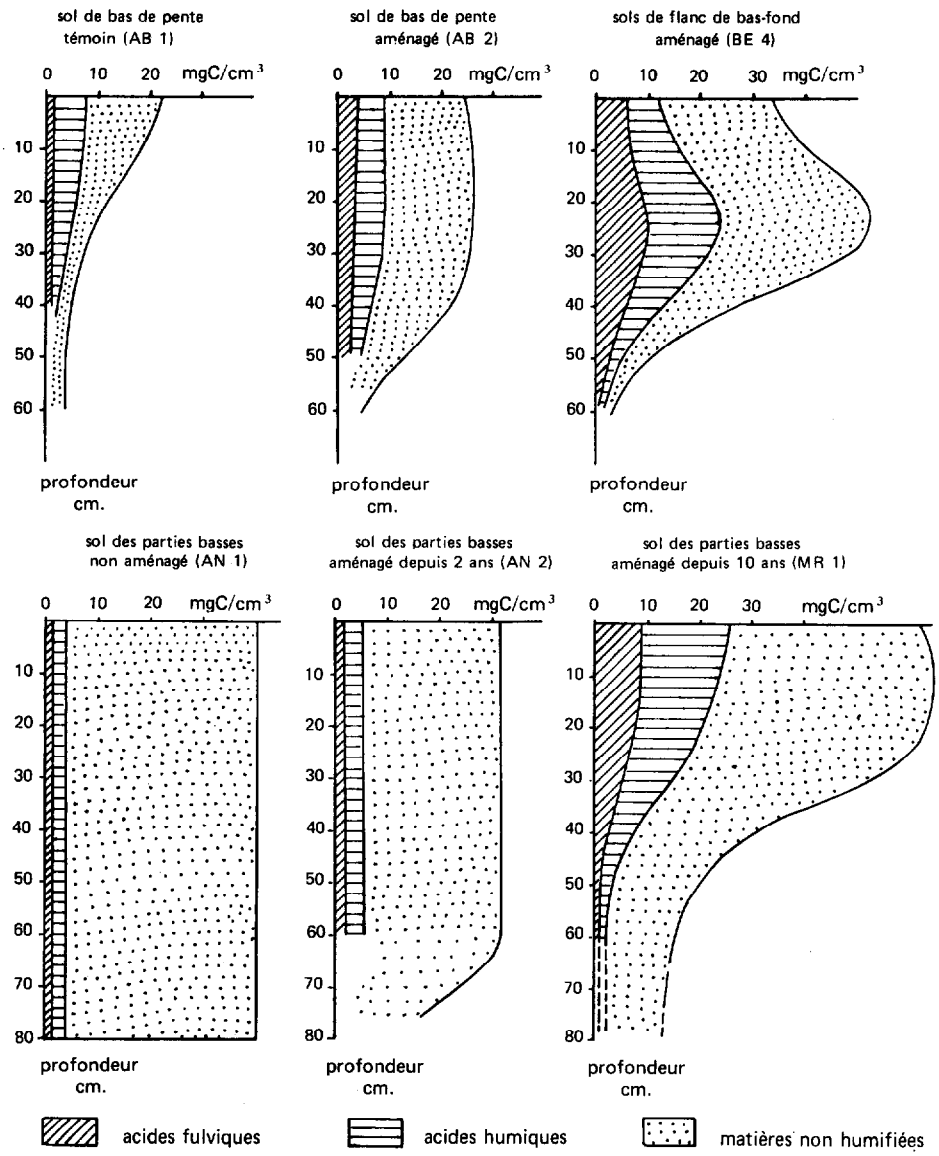


FIG. 2. — Variations des teneurs volumiques en matière organique dans les sols.

le rapport acides fulviques/acides humiques est plus fort (supérieur à 0,5) que dans le sol témoin (inférieur à 0,5). On ne note pas par ailleurs de différence significative sur le taux d'extraction des matières humifiées et sur les valeurs du rapport C/N pour les horizons de surface.

Les teneurs en *fer* dans les sols (dosées après attaque triacide et exprimées en Fe_2O_3) sont comparées d'une part aux taux d'argile et d'autre part à celui de SiO_2 obtenu par attaque triacide. La deuxième comparaison est sans doute plus intéressante à considérer que la première. En effet, la silice dosée corres-

pond vraisemblablement à toute la « silice combinée » ; il est peu probable en effet que l'on ait de forte dissolution complémentaire de minéraux primaires étant donné l'aspect morphologique que présentent les quartz (très brillants quand ils ne sont pas teintés par des substances ferrugineuses). Par ailleurs, l'eau apportée en complément aux sols aménagés, qu'elle provienne de la retenue située en tête de bas-fond et qui est dans ce cas amenée par les canaux d'irrigation (sols de bas de pente), ou qu'elle provienne directement des petites résurgences pour les sols de flancs de bas-fond, a une teneur en SiO_2 à peu près constante de 11 à 12,5 mg/l (on verra plus loin qu'il n'en est pas de même pour les quantités de fer transportées par ces mêmes eaux). Par contre les taux d'argile obtenus par l'analyse granulométrique peuvent être légèrement faussés par la présence de pseudosables qui masquent en partie de l'argile granulométrique présente dans les sols ; cette remarque s'applique surtout aux horizons profonds des profils AB 1 et AB 2 (voir en annexe dans le tableau des résultats analytiques, la comparaison de la somme $SiO_2 + Al_2O_3$ et de la teneur en argile obtenue par simple dispersion au pyrophosphate de sodium, pour les horizons situés au-dessous de 50 cm).

Sur les valeurs des rapports Fe_2O_2/argile et Fe_2O_3/SiO_2 reportés dans le tableau II, concernant les horizons superficiels des trois profils (ayant plus de 1 % de matière organique), on constate que les *sols aménagés* présentent des *teneurs en fer plus faibles* que le sol témoin, que l'on se rapporte aux taux d'argile ou de silice.

TABLEAU II

Rapport Fe_2O_3/argile (%)

Profondeur \ Profil	AB 1	AB 2	BE 4
0			
10	22,6	13,8	12,6
20			
30			10,0
40	16,4	7,4	
50			10,6

Rapport Fe_2O_3/SiO_2 (%)

Profondeur \ Profil	AB 1	AB 2	BE 4
0			
10	26,6	16,3	23,0
20			
30			18,7
40	30,7	17,0	
50			20,4

Les sols aménagés présentent des *taux de saturation du complexe absorbant plus faibles* que le sol témoin. Si dans l'horizon superficiel cet appauvrissement en bases échangeables concerne les teneurs en calcium, magnésium et potassium (tabl. III) ; sur l'ensemble des profils, la lixiviation affecte surtout le *potassium* et à un moindre titre le calcium et le magnésium.

TABLEAU III

	Ca/T	Mg/T	K/T	Taux de saturation
AB 1 (0 - 10 cm)	23,3	18,0	4,5	46,1
AB 2 (0 - 10 cm)	9,1	2,2	0,8	12,5
BE 4 (0 - 10 cm)	19,0	6,9	1,4	28,5

Les modifications qui interviennent dans les sols du bas de pente et de flanc de bas-fonds mis en terrasses et inondés pendant la période de la culture du riz concernent essentiellement :

— *la matière organique*, qui par rapport au sol témoin est *modifiée* en *quantité* (augmentation des teneurs) et en *qualité* (proportion plus forte d'acides fulviques),

— un appauvrissement en *fer* et en *bases échangeables*, qui pourrait s'expliquer par la plus grande quantité d'eau qui percole à travers ces profils artificiellement inondés, l'eau d'appoint (résurgence ou irrigation) s'ajoutant aux eaux des précipitations qui seules intéressent les sols non aménagés ; mais on verra dans l'étude du comportement, que la saturation du sol par l'eau déterminera, en particulier dans les horizons riches en matière organique, un état d'oxydoréduction de la terre qui favorisera certaines migrations.

D'ores et déjà, on peut constater que sur le plan

de la classification de ces sols, on passe, après 10 années de riziculture dans des sols aménagés :

— d'un sol ferrallitique moyennement désaturé pénévolué, pour le sol de flanc de bas-fond, ou d'un sol peu évolué non climatique d'apport colluvial formé sur un matériau ayant subi une évolution ferrallitique, pour le sol de bas de pente, à des sols hydromorphes peu humifères.

1.2. Les sols des parties basses des bas-fonds et les modifications qu'ils présentent après aménagement

Les sols étudiés ont également été observés en août dans deux bas-fonds voisins : Antsapanimahazo et Morafeno.

Il s'agit des profils :

AN 1 : sol de la partie basse *non aménagée* du bas-fond d'Antsapanimahazo.

AN 2 : sol du même bas-fond, situé à proximité d'un fossé de drainage ; ce début d'aménagement a *deux ans.*

MR 1 : sol du bas-fond de Morafeno ; ce bas-fond qui faisait partie de la station de l'I.E.M.V.T. de Kianjasoa a été aménagé à partir de 1963, donc *dix ans* avant cette étude.

1.2.1. Description sommaire des profils et modifications morphologiques observées entre le sol témoin et les sols aménagés

Profil AN 1 : Il s'agit d'une « prairie flottante », c'est-à-dire d'un mat racinaire de 80 cm d'épaisseur environ, flottant sur une couche d'eau et pouvant céder sous les pas d'un homme. Sous la végétation dense de Cypéracées, l'aspect est homogène, la matière organique est très peu décomposée et se présente sous forme de fibres brun-rouge.
Ce type de sol peut occuper des zones assez vastes dans la partie aval des bas-fonds de cette région.

Profil AN 2 : Située à proximité d'un fossé de drainage, cette ancienne « prairie flottante » s'est « stabilisée » ; il n'y a plus d'écoulement subsuperficiel d'eau entre l'horizon homogène très organique de 60 cm d'épaisseur environ et le matériau sablo-argileux formant le fond du thalweg. Gorgé d'eau, ce sol est de couleur noire, on reconnait encore des éléments organiques fibreux. Ce matériau a une consistance malléable mais est peu collant ; le toucher onctueux révèle la présence de fortes quantités de limons.

Profil MR 1 : Aménagé depuis 10 ans, ce sol s'est « stabilisé » après quatre années de drainage. Utilisé comme pâturage pendant sept ans il est, depuis, aménagé pour la riziculture. En août le profil est sec, mais le sol est naturellement inondé pendant la saison des pluies par les eaux de ruissellement qui sont simplement retenues par de petites diguettes.

0-40 cm : Noir homogène ; argilo-limoneux ; très bien structuré, polyèdres subanguleux de 1 à 2 cm, poreux ; peu fragile ; transition nette à :

40-80 cm : Gris-verdâtre (5 BG 5/1), frais, quelques taches brun-jaunâtre clair (2,5 Y 6/4) ; sablo-limono-argileux, on observe quelques micas et des quartz dans la fraction sableuse grossière ; structure massive ; peu poreux.

Les observations morphologiques faites sur le sol non aménagé et sur les sols drainés, corroborent les conclusions données par Didier de Saint Amand (1967), sur les variations dues au drainage dans ces profils. Il faut cependant noter que dans le Moyen Ouest de Madagascar, contrairement à ce qui est pratiqué aux abords du lac Alaotra, le brûlage des « tourbes » n'est pas fréquemment réalisé au cours de l'aménagement.

Les variations morphologiques observées dans les sols drainés par rapport au sol non aménagé sont les suivantes :

— diminution de l'épaisseur des horizons organiques, par tassement du sol ; ce phénomène présente quelques inconvénients pour l'aménagement, car il faut recreuser les fossés de drainage au fur et à mesure que le tassement se produit et il faut modifier la topographie du périmètre drainé, par un léger applanissement, avant la culture.

— une augmentation relative de la fraction minérale bien mélangée à la fraction organique après disparition progressive des débris végétaux et des fibres qui dominent dans le sol non aménagé.

— l'apparition d'une structure polyédrique très nette, lorsque le sol n'est plus constamment gorgé d'eau et en particulier (MR 1) lorsque la dessication est forte et prolongée ; on verra au cours de l'étude du comportement de ces sols que la réhumectation de ces agrégats est assez lente et que les volumes des vides entre les agrégats restent assez importants même quand le sol est saturé par l'eau, d'où la possibilité d'une bonne circulation de l'eau dans les horizons superficiels.

1.2.2. Différences existant entre les caractéristiques analytiques du sol témoin et celles des sols aménagés

Les résultats d'analyses effectuées sur les échantillons prélevés dans les profils AN 1, AN 2 et MR 1, sont donnés en annexe.

La texture de ces sols est beaucoup plus fine que celle des sols de flancs de bas-fonds et de bas de pente. Les taux d'argile et de limons (2-50 μ) sont respectivement compris entre 40 et 50 % et 20 et 30 %.

Au tassement des horizons humifères dans les sols drainés, correspond une augmentation de la densité apparente. Celle-ci est de l'ordre de 0,25 dans le profil AN 2 drainé depuis 2 ans et de 0,55 dans le profil MR 1 aménagé depuis 10 ans.

Si on compare les teneurs pondérales en matière organique des horizons superficiels des sols aménagés par rapport à celle du sol témoin (tabl. IV), on constate que le drainage provoque une chute rapide des teneurs en matière organique totale dès les premières années (AN 11 et AN 21). Mais si on tient compte du tassement du sol et que l'on considère les teneurs volumiques, c'est-à-dire le poids de matière organique pour un volume de sol donné, on remarque que sur les 80 premiers centimètres des profils, la baisse des teneurs en matière organique dans les sols aménagés n'est, par rapport au sol témoin, que de 15 à 30 % (voir fig. 2). Ce type d'aménagement provoque une augmentation du taux d'extraction des matières humifiées et une baisse du rapport C/N. Enfin le rapport acides fulviques/acides humiques reste compris entre 0,54 et 0,59 pour les trois profils (voir tabl. IV); on constate qu'il est du même ordre de grandeur que dans des sols de bas de pente ou de flancs de bas-fonds aménagés.

Tableau IV

	« Prairie flottante »	Sol drainé depuis 2 ans	Sol drainé et aménagé depuis 10 ans
Horizons	AN 11	AN 21	MR 11
Profondeur	0 - 15	0 - 15	0 - 10
Mat. org. (%) ..	35,4	21,8	21,3
en C °/₀₀ C	205	126	123
en C °/₀₀ MHT ...	19,0	22,0	46,5
en C °/₀₀ AH	12,3	14,3	29,2
en C °/₀₀ AF	6,7	7,7	17,3
AF/AH	0,55	0,54	0,59
Taux d'extr.	9,3	17,5	37,8
N °/₀₀	11,1	8,7	9,0
C/N	18,5	14,5	13,7

On observe une baisse de la capacité d'échange dans les sols aménagés, qui est à relier à celle des taux de matière organique, puisque les teneurs en argile d'une part sont très voisines dans les trois profils et que d'autre part l'argile est de type kaolinitique. Le taux de saturation du complexe est faible (moins de 20 %) et s'abaisse à 10 % dans le sol le plus anciennement drainé.

Les teneurs en fer, rapportées au taux d'argile sont voisines dans les profils AN 1 et AN 2 (Fe_2O_3/argile étant compris entre 9 et 10,2 %); par contre elles sont plus fortes dans le profil MR 1. Les eaux d'ennoyage du sol de cette rizière, proviennent en partie de celles qui ont percolé à travers les profils de flancs de bas-fonds et de bas de pente irrigués. Ces eaux sont riches en fer, troubles et provoquent un dépôt rouge-jaune en surface. Ce fait a été observé dans de nombreuses rizières et signalé par Didier de Saint Amand (1967).

Les modifications qui interviennent dans les sols des parties basses des bas-fonds drainés concernent essentiellement :

— *la matière organique* qui, par rapport au sol témoin non aménagé, est modifiée en *quantité* (baisse des teneurs) et en *qualité* (proportion plus forte de matières humifiées); ces variations ont des incidences sur d'autres caractéristiques des sols, telle que la capacité d'échange.

— *la densité apparente* qui augmente dans les sols drainés, confirmant le *tassement* des horizons humifères qui y a été observé. On insistera sur le fait que ce tassement n'affecte pas les possibilités de drainage interne de ces sols, puisque simultanément, la structure qui se développe dans les profils les plus anciennement aménagés, est très stable et laisse des vides importants entre les agrégats.

Du point de vue classification des sols, on passe rapidement d'un sol témoin hydromorphe organique à tourbe fibreuse à un sol à tourbe semi fibreuse puis après 10 années d'aménagement à des sols hydromorphes moyennement organiques, à hydromorphie totale mais temporaire en surface.

2. QUELQUES ASPECTS DE LA DYNAMIQUE ACTUELLE DES SOLS AMÉNAGÉS

L'étude comparée des caractéristiques morphologiques et analytiques des sols irrigués ou drainés et des sols témoins non aménagés étant faite, on va

essayer d'expliquer certaines modifications observées dans les profils par l'étude de la dynamique actuelle des sols ou plus précisément par celle du *comportement* des profils dans les *nouvelles conditions d'évolution* résultant des aménagements.

Cette étude menée en laboratoire sur des *modèles expérimentaux*, ayant pour objets des échantillons prélevés dans les différents sols, est *un essai de schématisation de la dynamique actuelle des profils.*

Avant de présenter les résultats obtenus au cours de ces expérimentations, on précisera quelles modifications subissent les conditions d'évolution des profils du fait des aménagements et on exposera succinctement le protocole expérimental qui a été adopté.

2.1. Modifications des conditions d'évolution des profils

Les modifications des conditions d'évolution des profils concernent essentiellement le *régime hydrique* des sols, la végétation naturelle (graminées ou cypéracées) étant remplacée par le riz cultivé. Les études de comportement réalisées ne tiennent compte que des modifications du régime hydrique et font abstraction du faible rôle que peut avoir le remplacement de la végétation naturelle par la culture du riz (1).

a) Avant les aménagements *les sols de flancs de bas-fonds ou de bas de pente* (profil AB 1) ont à la fois un bon drainage *interne* et *externe.* Leur régime hydrique est en étroite relation avec l'intensité et la fréquence des précipitations.

Le climat de la région de Mahasolo-Kianjasoa est marqué par l'alternance d'une saison chaude et pluvieuse qui dure 7 mois (d'octobre à avril) et d'une saison fraiche et sèche de 5 mois (mai à septembre).

A Tsiroanomandidy, ville dans laquelle se situe la station météorologique la plus proche de la zone étudiée, la moyenne annuelle des précipitations est de 1 655,2 mm :

— dont 1 596 mm pendant la saison des pluies (2), tandis que la température moyenne mensuelle varie, durant cette même période, de 23 °C à 23,9 °C ;

— et 59,2 mm seulement répartis sur les 5 mois de la saison sèche, les températures moyennes mensuelles étant comprises entre 19 °C et 21,9 °C.

TABLEAU V

Moyennes mensuelles des précipitations et de la température pour la station de Tsiroanomandidy (Données du Service National Météorologique)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P (mm) ...	384,6	329,9	276,8	80,3	11,8	5,4	6,1	11,2	24,7	69	157,9	297,9
T (°C)	23,8	23,7	23,6	23,0	21,2	19,3	19,0	20,1	21,9	23,7	23,9	24,0

Pendant la saison sèche, le déficit hydrique cumulé (ETP-P, Eldin, 1971) est supérieur à 200 mm (Cornet, 1974). Dans ces conditions, les sols bien drainés de bas de pente et de flancs de bas-fonds passent annuellement d'un stade humide (mais non saturé, étant donné le bon drainage) à un stade sec, le dessèchement intervenant à partir du mois de mai.

Les aménagements, par l'applanissement du sol, la mise en terrasse et l'endiguement, visent à annuler le *drainage externe.* Pour les sols de flancs de bas-fonds (BE 4), ces aménagements suppriment le ruissellement des eaux des résurgences situées à ce niveau du versant. Ces eaux, riches en fer (15,4 mg/l de Fe_2O_3) s'ajoutent à celles des précipitations et suffisent à assurer la *saturation* du profil et l'inondation de la rizière pendant les cinq mois de culture (décembre à avril). On notera que ces sols, sans être saturés, restent humides pendant la saison sèche (voir paragr. 1.1.1). Pour les sols de bas de pente (AB 2), c'est l'apport complémentaire des eaux d'irrigation amenées

(1) Influence sur le potentiel d'oxydoréduction de la terre, plus élevé dans un sol cultivé en riz que dans un sol sans culture (Ghosh et Coll. 1974). Cette influence doit être plus nette au milieu du cycle du riz, lorsque la rhizosphère oxydante atteint son maximum de développement (Tadano, 1974).

(2) A Kianjasoa, on observe plus de 20 jours de pluie pour chacun des quatre mois suivants : décembre, janvier, février et mars (Tercinier, 1951).

par les canaux (peu riches en fer 2,9 mg/l de Fe_2O_3), qui assure la *saturation* des sols et l'inondation de la rizière.

Le drainage interne des sols aménagés restant bon, le régime hydrique de ces profils se caractérise par :

— une période de cinq mois de saturation du sol avec des mouvements d'eau verticaux,

— et une période de dessèchement plus ou moins accentué des profils, pendant les mois de mai à septembre.

b) Avant les aménagements, *les sols des parties basses des bas-fonds* (AN 1) sont gorgés d'eau. Le drainage externe est faible, car malgré la pente non négligeable des thalwegs, les écoulements d'eau sont ralentis par l'abondante végétation qui provoque un colmatage de la partie aval des bas-fonds.

Le creusement de fossés de drainage améliore cet écoulement et peu à peu apparaît, au cours de la saison sèche, une période de dessèchement des horizons superficiels des profils (AN 2 et MR 1) qui va s'accroître avec l'ancienneté de l'aménagement. La structure très stable qui se développe dans ces sols (voir paragr. 1.2.1) assure un bon drainage interne, même pendant la période de saturation des sols par l'eau.

On a donc un régime hydrique qui se caractérise par :

— une période de saturation de la terre avec possibilités de mouvements d'eau verticaux dans les horizons superficiels,

— et une période de dessèchement des profils plus ou moins accentué suivant l'ancienneté de l'aménagement, pendant la saison sèche.

On remarque que les *sols aménagés*, qu'ils soient de flanc de bas-fonds, de bas de pente ou des parties les plus basses, finissent par avoir un *régime hydrique identique.*

2.2. Le protocole expérimental

Le protocole expérimental adopté, analogue à celui qui avait été suivi pour l'étude du rôle des mouvements de l'eau sur la dynamique du fer en fonction de l'état d'oxydoréduction de la terre dans des sols d'une séquence du Tchad (Vizier, 1974), a été décrit et analysé par ailleurs (Vizier, 1977). Il consiste à suivre, sur des échantillons provenant des horizons humifères des sols étudiés mis en colonne, les variations du potentiel d'oxydoréduction de la terre et du pH, de la conductivité, des teneurs en fer, en carbone organique et en bases de l'eau qui s'écoule périodiquement à travers le sol saturé et cela en fonction du temps de saturation.

Ces expériences sont réalisées sur 200 cm^3 de terre tassée de manière à reproduire la densité apparente du sol en place. La terre mise en colonne est saturée par addition d'eau distillée, le niveau de l'eau étant amené à 12 cm au-dessus de la surface de la terre. On recueille, tous les cinq jours, environ 75 cm^3 d'eau et on rétablit immédiatement le niveau de l'eau dans la colonne.

Ces conditions expérimentales simulent un régime hydrique global moyen pour des sols de rizières et on peut raisonnablement penser que les résultats expérimentaux obtenus permettent valablement de conduire à la formulation d'hypothèses sur l'évolution que subissent les sols par suite des aménagements hydroagricoles qui sont pratiqués dans les bas-fonds étudiés.

2.3. Les résultats expérimentaux

On ne reviendra pas, dans cette note, sur l'*allure des phénomènes* observés au cours des expérimentations et en particulier sur les variations du potentiel d'oxydoréduction du pH et des pertes en fer et en carbone organique des différents échantillons en fonction du temps de saturation (Vizier, 1977).

On rappellera cependant que les phénomènes de réduction qui se produisent dans la terre saturée d'eau s'accompagnent d'une baisse de E_h, d'une augmentation du pH. On observe une stabilisation des valeurs de E_h et de pH après une durée de saturation variable suivant les sols. Les quantités de fer et de carbone organique perdues par les échantillons à chaque percolation, augmentent puis diminuent.

La quantité mais aussi la qualité des substances organiques présentes dans le sol interviennent sur la vitesse d'évolution des phénomènes de réduction du fer. Ces phénomènes de réduction permettent la mobilisation du fer sous forme de complexe organo-ferreux ou sous d'autres formes et cet élément est en partie entraîné hors de la colonne, reconstitution en laboratoire de l'entraînement du fer réduit hors de l'horizon concerné par les mouvements d'eau qui se produisent dans le profil.

Les résultats obtenus permettent de faire *un bilan des pertes* en carbone organique, en fer et en bases subies par les échantillons de sol mis en colonne. Ces pertes diminuant au-delà d'un certain temps de

saturation et devenant faibles et relativement constantes en fin d'expérience (75e jour), le bilan des pertes subies en 75 jours par chaque échantillon met en évidence les différences de comportement des différents sols étudiés.

On considérera successivement, les pertes en carbone organique, puis celles en fer et en bases et enfin la perte de matière subie par les échantillons, grâce à la pesée du résidu obtenu après la mise à sec (à l'étuve à 105 °C) d'une aliquote du percolat recueilli en bas de colonne.

Le dosage du carbone organique (par la méthode Walkley et Black) sur une aliquote du percolat, permet, connaissant le volume recueilli, de calculer la quantité de carbone perdue par la terre à chaque opération de percolation.

a) La somme des *pertes en carbone* est comparée aux quantités de carbone organique total contenues dans la terre des colonnes.

TABLEAU VI

Sol	Echantillon	Matière organique totales C °/oo	Matières humifiées totales C °/oo	C exporté / C terre colonne °/oo
Sol de bas de pente - témoin	AB 11	19,3	7,0	16,9 (*)
Sol de bas de pente aménagé	AB 21	24,2	8,1	11,4 (*)
Sol de flanc de bas-fond aménagé	BE 41	35,0	12,9	18,7 (*)
Sol des parties basses - témoin	AN 11	205	19	2,4
Sol des parties basses aménagé	MR 11	123	46,5	19,8 (*)

(*) Valeur moyenne des deux séries d'expériences réalisées.

Les pertes de carbone sont importantes puisqu'elles représentent dans la plupart des cas, 1 à 2 % de la quantité totale de carbone organique contenu dans la terre. Il n'y a pas de relation entre la quantité relative de carbone exporté et les teneurs en matière organique. Par contre on remarque (tabl. VII) que les pertes relatives de carbone sont d'autant plus importantes que la matière organique de la terre est plus humifiée (taux d'extraction des matières humifiées plus fort).

TABLEAU VII

Echantillon	AN 11	AB 21	AB 11	BE 41	MR 11
Taux d'extraction des matières humifiées (%)	9,3	33,5	36,3	36,9	37,8
C exporté / C de la terre de la colonne (°/oo)	2,4	11,4	16,9	18,7	19,8

b) Les *pertes en fer* (1) *et en bases* exprimées en milliéquivalents par litre de solution recueillie sont données dans le tableau VIII et représentées sur la figure 3. La *concentration en bases* dans l'eau qui s'écoule à travers la terre est d'autant plus forte que le sol est mieux pourvu en bases (taux de saturation V % plus élevé) ; elle est plus forte que la concentration en fer pour le sol de bas de pente-témoin (AB 1) mais plus faible dans tous les autres profils (AB 2, BE 4, AN 2 et MR 1) déjà assez fortement désaturés (V < 30 %).

TABLEAU VIII

Sol	Echantillon	Taux de saturation en base (V %)	Bases exportées (me/l)	Fer exporté (me/l)
Sol de bas de pente témoin	AB 11	46,1	3,36	1,88
Sol de bas de pente aménagé	AB 21	12,5	0,60	1,08
Sol de flanc de bas-fond aménagé	BE 41	29,3	2,14	4,28
Sol des parties basses témoin	AN 11	17,8	—	0,62
Sol des parties basses - début aménagement	AN 21	19,3	0,94	2,08
Sol des parties basses - aménagé ..	BE 41	8,3	0,77	8,02

Les bases représentent les éléments dominants de la phase migrante dans le sol de bas de pente témoin, tandis que le fer prédomine dans les eaux traversant les profils aménagés. On a déjà noté, dans une étude

(1) Le fer qui migre est essentiellement sous forme ferreuse (Vizier, 1974).

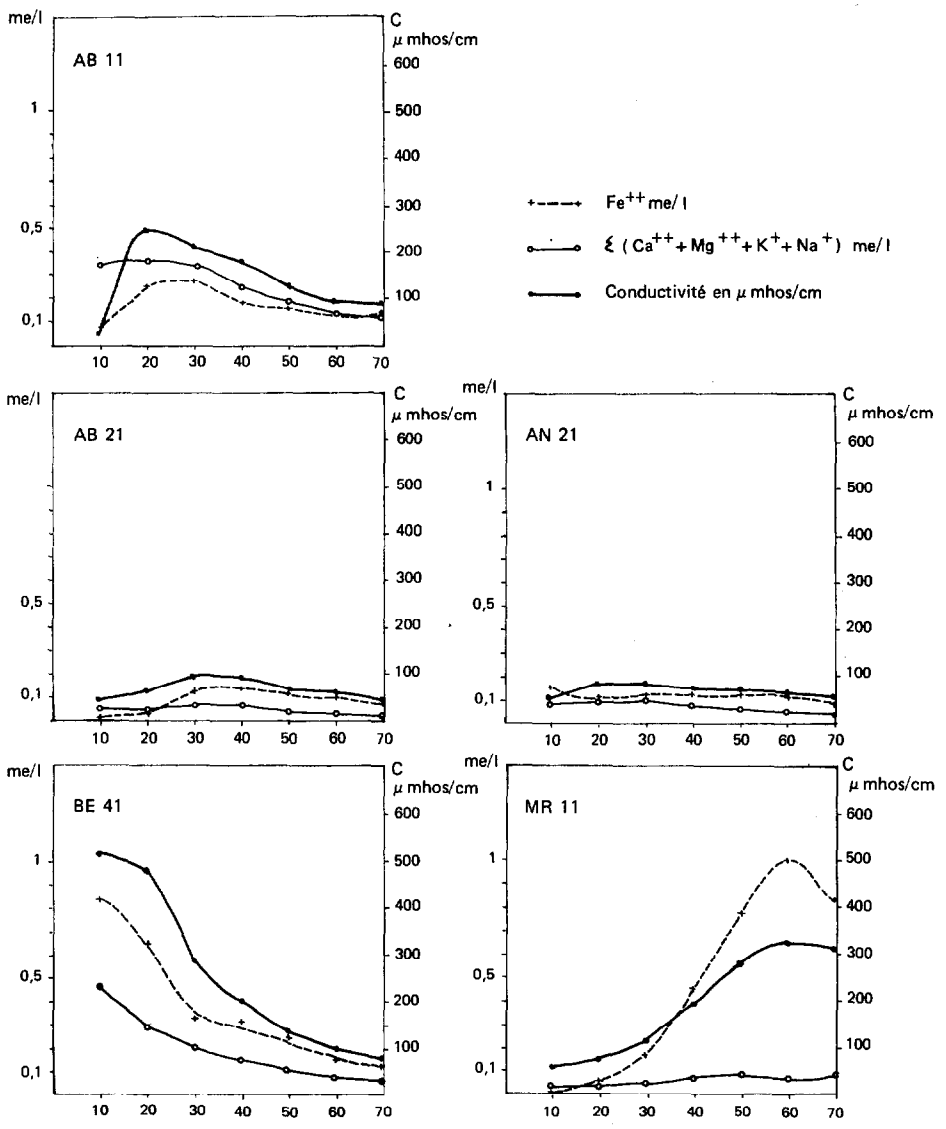


FIG. 3. — Pertes en fer, en bases et conductivité du percolat en fonction du temps de saturation.

antérieure (Vizier, 1977), qu'il existe une relation entre les concentrations en fer et les valeurs de la conductivité et que le coefficient de corrélation positif et plus élevé pour les sols aménagés, démontre la part de plus en plus prépondérante que prend le fer dans la phase migrante dans les sols qui évoluent depuis plus longtemps dans les nouvelles conditions résultant des aménagements hydroagricoles.

Les pertes de fer sont importantes; elles représentent 1,8 à 2,5 % (AB 1 et AN 1) du fer total (1) contenu dans la terre des colonnes pour les sols-témoins et 5 % pour les sols les plus anciennement aménagés (BE 4 et MR 1).

(1) Fer total dosé après attaque HC 1 à chaud.

c) Les substances entraînées par l'eau percolant à travers la terre saturée correspondent à *une perte de matière* pour le sol de la colonne. La pesée des résidus obtenus permet de calculer cette perte pendant les 75 jours d'expérience.

La perte de matière représente 0,3 à 0,55 % du poids total de terre pour les sols de bas de pente ou de flanc de bas-fond (AB 1, AB 2 et BE 4) et 1 à 3 % pour les sols des parties basses des bas-fonds (AN 2 et MR 1). Connaissant les poids totaux de fer et de carbone organique exportés pour chaque échantillon, on peut calculer les teneurs moyennes en carbone et en fer des pertes de matière. On constate (tabl. IX) que les matières exportées ont des teneurs en fer et en carbone plus fortes que la terre des colonnes. Si les pertes de carbone organique sont compensées par l'apport que constituent les résidus de récolte, celles de fer ne le sont pas ou insuffisamment pour les sols de bas de pente et de flanc de bas-fond inondés, d'où l'appauvrissement en fer constaté.

TABLEAU IX

		AB 11	AB 21	BE 41	AN 21	MR 11
Perte en matière par rapport au sol de la colonne (%)		0,43	0,30	0,55	3,02	1,08
Teneurs des matières exportés en	Fe °/₀₀	123	105	177	58	161
	C °/₀₀	128	160	155	138	213
Teneurs de la terre de la colonne en	Fe °/₀₀	25,2	17,5	17,8	24,5	73,4
	C °/₀₀	19,3	24,2	35	126	123

La pesée du résidu permet de déceler également un phénomène particulier pour l'échantillon AN 21, provenant d'un sol des parties basses des bas-fonds en début d'aménagement.

On observe, en effet, de fortes pertes de matière au 5e et 25e jour de saturation. Mais ces deux fortes exportations de matière ne correspondent pas à des valeurs élevées de la conductivité (voir fig. 4) et les teneurs en fer et en carbone des résidus obtenus dans chaque cas sont voisines de celles de la terre de la colonne. Les substances exportées ne sont donc pas en solution mais vraisemblablement en suspension et pourraient résulter d'une légère *dispersion* de la terre.

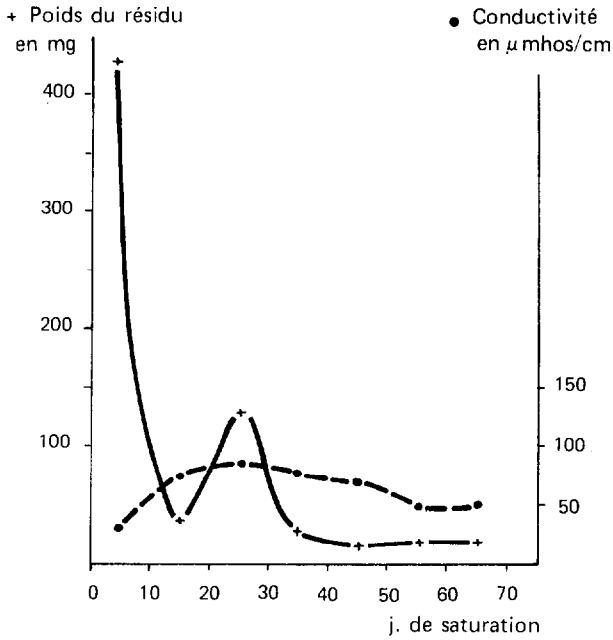


FIG. 4. — Pertes en matière et valeurs de la conductivité en fonction de la durée de saturation pour l'échantillon *AN*21.

3. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS - HYPOTHÈSES SUR L'ÉVOLUTION DES SOLS AMÉNAGÉS

Les quantités de carbone organique entraînées par l'eau sont importantes. Dans les *sols de flancs de bas-fonds et de bas de pente* qui ont un taux d'extraction des matières humifiées peu différent, ces pertes, en 75 jours, représentent 1 à 2 % de la quantité totale de carbone organique contenue dans la terre. Le renouvellement de la matière organique par apport, par les résidus de récolte, sera rapide et les substances apportés vont évoluer dans des conditions sensiblement différentes dans les sols aménagés par rapport au sol témoin, du fait de la saturation des profils par l'eau pendant 5 mois par an. L'acidité du sol, légèrement accrue par la perte en bases, ne favorise pas la polymérisation des matières humifiées (Mangenot, Jacquin, 1960), d'où la proportion plus forte d'acides fulviques observée dans les sols aménagés. Enfin, la prospection d'une épaisseur de sol plus grande par le riz cultivé que par les graminées du sol témoin, conduit à l'augmentation de l'épaisseur des horizons humifères (voir fig. 2).

Dans *les sols des parties basses drainées*, une part représentant 15 à 30 % de la matière organique disparaît rapidement. Mais l'évolution essentielle est l'humification des substances organiques, presqu'inexistante dans le sol témoin (AN 1 « prairie flottante »), qui se développe dans les sols aménagés avec l'apparition d'une période de non saturation par l'eau, résultant du drainage de ces parties basses des bas-fonds.

Les fortes *pertes en bases* dans les sols les mieux pourvus (sol-témoin) montrent que les nouvelles conditions d'évolution résultant des aménagements hydroagricoles provoquent la rapide désaturation des profils.

Quant *aux pertes en fer*, elles peuvent expliquer l'appauvrissement en fer des sols aménagés dans la mesure où ces pertes ne sont pas en partie ou totalement compensées par des apports (eau des résurgences riches en fer : sol de flanc de bas-fond : BE 4, ou eau d'ennoyage des rizières des parties basses des bas-fonds : MR 1). Il faut noter que ces pertes en fer très importantes sont favorisées par le régime hydrique des sols aménagés et en particulier par la forte circulation de l'eau dans les profils qui en déplaçant les substances inhibitrices hydrosolubles présentes dans les sols riches en matière organique facilement décomposable, augmente l'activité microbienne et accélère la formation de fer ferreux (Kobo et Coll., 1973).

Les importantes pertes de matières observées dans les sols étudiés sont favorisées par le bon drainage interne des profils. Il faut cependant noter que ce drainage interne peut être peu à peu réduit.

En effet une partie des substances provenant des horizons humifères et qui migrent sous forme soluble ou pseudosoluble peut s'immobiliser dans les horizons profonds par suite de la différence de l'état d'oxydoréduction existant entre les horizons de surface humifères et les horizons profonds (Vizier, 1971). Cette immobilisation peut provoquer un *colmatage* des pores en profondeur et limiter le drainage vertical.

Par ailleurs, les liaisons entre les particules de sol qui sont assurées par les hydroxydes de fer tendent à disparaître lors de la saturation des sols, par suite de la réduction du fer (Sato et Kawaguchi, 1971) et de la migration d'une partie de cet élément. Il peut en résulter la disparition d'une structure stable, la *prise en masse* de certains horizons lorsqu'ils sont saturés et par conséquent une limitation du drainage interne des sols. C'est sans doute cette diminution des liaisons entre les particules du sol assurées par les hydroxydes de fer qui est à l'origine de la légère dispersion constatée dans l'échantillon AN 21.

La réduction de la perméabilité du sol représente une évolution favorable pour les profils, car elle tend à limiter les pertes en bases et en fer par drainage.

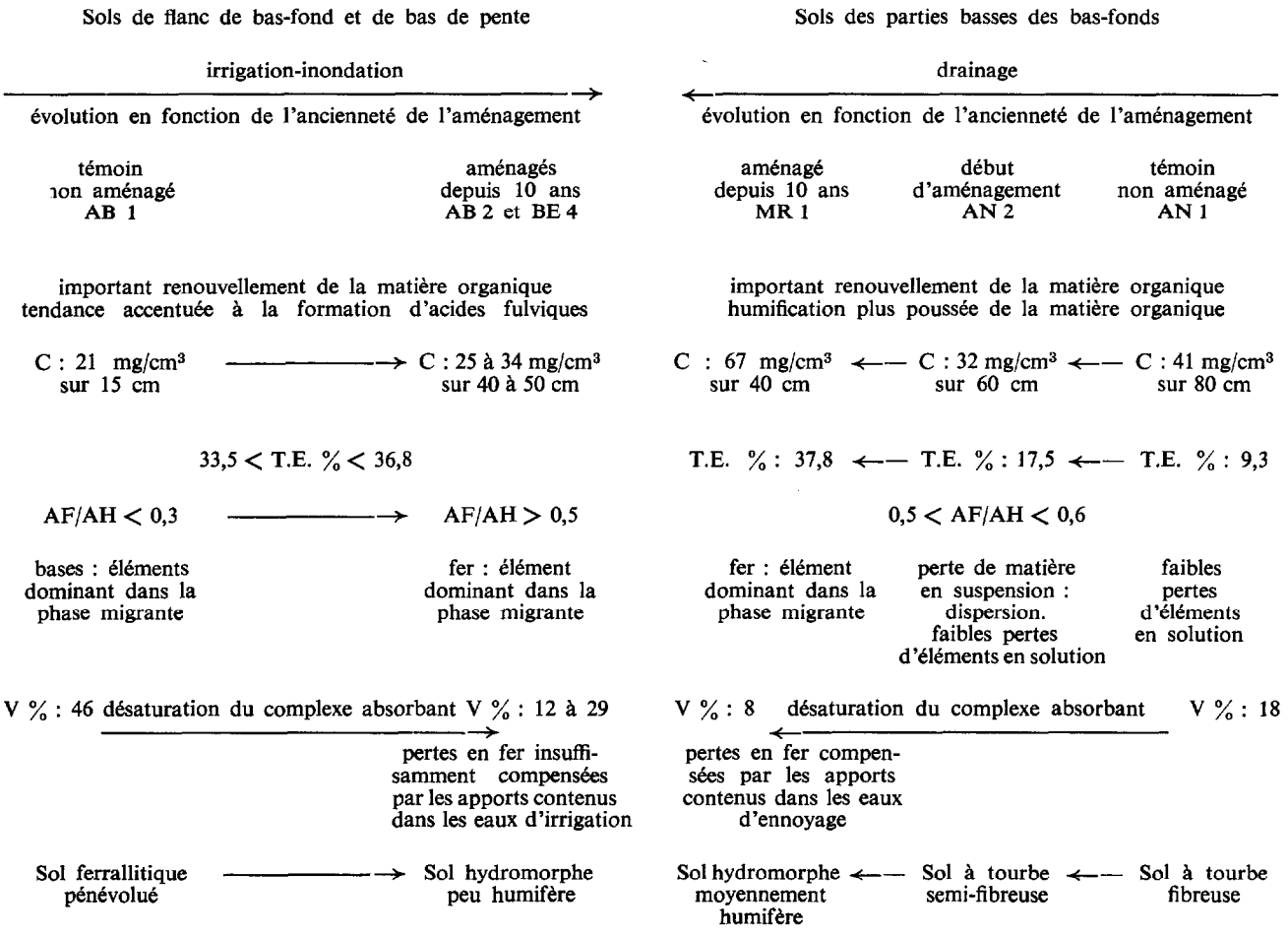
Le premier processus de limitation du drainage interne des sols peut se produire dans les sols des parties basses des bas-fonds, en raison des quantités importantes de fer qui migrent, quantités qui sont d'ailleurs compensées par des apports (cas du profil MR 1) et de la porosité déjà faible des horizons profonds (voir paragr. 1.2.1.). Le rapport Fe_2O_3/ argile atteint, à 40 cm de profondeur, la valeur de 24,7 %, qui est très sensiblement supérieure à celle que l'on observe dans les sols de bas de pente ou de flancs du bas-fond par exemple (voir tabl. II) et témoigne d'une accumulation de fer dans cet horizon.

Le deuxième processus de limitation du drainage interne semble pouvoir se produire dans les sols de bas de pente (AB 2) et de flancs de bas-fond aménagés (BE 4), où en raison de l'appauvrissement en fer des horizons superficiels et subsuperficiels on a une tendance à la prise en masse du sol lorsqu'il est saturé par l'eau. Ce phénomène a été très net pour l'horizon BE 42 (20-40 cm) pour lequel il a été très difficile d'obtenir un écoulement régulier et suffisant de l'eau en bas des colonnes, lors de l'expérimentation.

Les pertes importantes subies par les horizons humifères des sols aménagés tendent à modifier pour différentes raisons le drainage interne des sols. Les aménagements hydroagricoles conduisent donc à une évolution des profils qui s'effectue dans un sens favorable pour la riziculture. En effet, lorsqu'après un certain nombre d'années, les sols, par suite d'un drainage limité, retiennent les substances qu'ils contiennent, il est possible d'apporter des compléments de substances nutritives pour les plantes sous forme d'engrais, sans que ces apports risquent d'être éliminés rapidement.

L'ensemble des phénomènes observés permettent de schématiser l'évolution des sols aménagés. On remarque que l'on tend à avoir *une convergence* des caractères morphologiques et analytiques des sols aménagés qu'ils soient inondés (bas de pente ou flanc de bas-fond) ou drainés (parties basses des bas-fonds) et cela sans doute en raison du régime hydrique identique qui est le leur par suite des aménagements pratiqués.

Schéma de l'évolution des sols aménagés



CONCLUSION

Les aménagements hydroagricoles pratiqués dans les bas-fonds du Moyen Ouest de Madagascar, modifient le régime hydrique des profils et déterminent une évolution particulière des sols qui se traduit par des modifications des quantités et de la qualité des substances organiques et la redistribution du fer et des bases dans le sol. Les fortes pertes de matière constatées dans les horizons humifères peuvent, pour différentes raisons, aboutir à une détérioration du drainage interne des profils et conduire à la formation de sols favorables à la riziculture.

Manuscrit reçu au Service des Publications de l'ORSTOM le 30 mars 1978

BIBLIOGRAPHIE

BOURGEAT (F.), 1970. — Contribution à l'étude des sols sur socle ancien à Madagascar. Type de différenciation et interprétation chronologique au cours du quaternaire. *Mém.* ORSTOM, Paris, 335 p., 5 pl. photogr.

CORNET (A.), 1974. — Essai de cartographie bioclimatique à Madagascar. *Notice explicative* n° 55, ORSTOM, Paris, 28 p., annexe, 1 carte h.t.

DIDIER DE SAINT AMAND (R.), 1967. — Dynamique des sols hydromorphes organiques malgaches en relation avec la riziculture, IRAT, Paris, 195 p.

ELDIN (M.), 1971. — Le climat. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mém. ORSTOM*, Paris, n° 50 : 73-108.

GHOSH (S.N.), KAR (A.K.) et DHUA (S.P.), 1974. — Influence of growing rice plant on redox potential and pH changes in flooded soils. *Technology*, 11, (4) : 425-428.

KOBO (K.), TAKAI (Y.), WADA (H.) et KAWAGA (H.), 1973. — Effects of percolation on the chemical and biological condition of waterlogged paddy soils - 2 - Iron transformation. *Soil Sci. and Plant Nutr.* 20 : 323-333.

LAPLAINE (L.), 1951. — Etude géologique des feuilles de Tsiroanomandidy. Soavinandrina. Travaux du Bureau Géologique. Tananarive, n° 20.

LE BUANNEC (B.), 1967. — Etude pédologique d'un périmètre de la Sakay. ORSTOM, Tananarive, 197 p. *multigr.*

MANGENOT (F.) et JACQUIN (F.), 1960. — Produits d'humidification des sciures. Quelques caractéristiques physiques et chimiques. *Plant and Soil*, vol. 13 : 291-296

RIQUIER (J.), 1956. — Notice sur la carte d'utilisation des sols à 1/20 000 d'Ankadinondry-Babetville. ORSTOM, Tananarive, 27 p. *multigr.*, 1 carte h.t.

SATO (M.) et KAWAGUCHI (K.), 1971. — Flocculating tendency of paddy soils. *Soil Sci. and Plant Nutr.* 18, p. 125.

TADANO (T.), 1974. — Iron nutrition of the rice plant. 5. Variation in suceptibility to iron toxicity during growth. *Soil Sci. and Plant Nutr.* 21, p. 303.

TERCINIER (G.), 1951. — Rapport sur une prospection pédologique dans la région de la moyenne Sakay. *Mémoire IRSM*, série D, t. III, fasc. 2 : 285-292.

VIZIER (J.F.), 1971. — Etude de l'état d'oxydoréduction du sol et de ses conséquences sur la dynamique du fer dans les sols hydromorphes. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IX, n° 4 : 373-397.

VIZIER (J.F.), 1974. — Contribution à l'étude des phénomènes d'hydromorphie. Recherche de relations morphogénétiques existant dans un type de séquence de sols hydromorphes peu humifères au Tchad. 2e partie : Dynamique de l'eau et du fer dans les sols de la séquence. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XII, n° 3/4 : 211-266.

VIZIER (J.F.), 1977. — Etude de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Etude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar. ORSTOM, 26 p. *multigr.*

ANNEXE

Résultats analytiques des sols de flancs de bas-fonds et de bas de pente

Echantillons	AB 11	AB 12	AB 13	AB 21	AB 22	AB 23	BE 41	BE 42	BE 43	BE 44
Profondeur	0-10	30-50	50-70	0-10	30-50	50-70	0-10	20-30	40-60	80-100
Argile	15,9	15,5	9,7	18,1	22,8	3,8	20,1	22,4	32,8	15,3
Limons	12,2	12,5	12,9	13,6	14,4	8,0	16,5	20,1	23,2	11,9
Sables fins	17,5	16,1	13,7	15,6	12,6	23,3	12,2	11,2	16,1	21,9
— grossiers	47,9	50,8	60,2	49,6	46,0	61,1	45,2	35,3	23,9	48,0
Matière org. (%)	3,3	1,0	0,7	4,2	3,9	0,5	6,1	8,5	1,1	0,5
C °/₀₀ C	19,3	6,0	3,9	24,2	22,5	2,6	35,0	49,5	6,3	2,8
C °/₀₀ Mat. hum.	7,0	1,6	—	8,1	6,7	—	12,9	22,5	—	—
C °/₀₀ Ac fulv.	1,6	0,5	—	2,9	2,6	—	5,8	9,1	—	—
C °/₀₀ Ac. hum.	5,4	1,1	—	5,2	4,1	—	7,1	13,4	—	—
N °/₀₀	1,6	1,0	0,6	2,0	1,9	0,3	2,9	3,2	0,7	0,3
C/N	12,1	6,0	6,5	12,1	11,8	8,7	12,1	15,4	9,0	9,3
pH eau	5,6	5,3	5,8	5,0	5,0	5,5	5,5	5,3	5,1	5,3
pH KCl	4,5	4,4	4,7	4,1	4,0	4,4	4,1	4,0	3,8	4,0
Bases échangeables mé/100 g										
Ca	2,19	0,94	1,31	0,94	1,06	0,41	2,03	2,19	2,03	1,34
Mg	1,70	0,38	0,56	0,23	0,26	0,12	0,74	1,62	3,65	2,43
K	0,42	0,15	0,10	0,08	0,08	0,03	0,15	0,10	0,15	0,13
Na	0,02	0,04	0,04	0,04	0,02	0,04	0,11	0,11	0,11	0,10
S	4,43	1,51	2,01	1,29	1,42	0,60	3,03	4,02	5,94	4,0
T	9,40	5,54	5,18	10,34	9,40	2,60	10,70	13,64	16,54	4,70
V (%)	46,1	27,3	38,8	12,5	15,1	23,1	28,3	29,5	35,9	85,1
Triacides										
Perte au feu	10,15	4,70	7,28	12,27	7,81	4,47	9,92	12,25	7,68	3,22
résidu	62,95	72,08	47,95	54,45	69,63	79,38	66,15	62,75	54,10	77,65
SiO_2	13,50	8,30	19,20	15,30	10,0	7,0	11,0	12,0	17,10	9,00
Al_2O_3	8,50	7,40	15,60	12,20	8,25	5,75	7,70	8,30	12,50	6,20
SiO_2/Al_2O_3	2,7	1,9	2,1	2,1	2,1	2,1	2,4	2,5	2,3	2,5
Fer	3,60	2,55	5,20	2,50	1,70	1,50	2,55	2,25	3,50	1,90
Titane	0,60	0,40	0,72	0,80	0,50	0,45	0,60	0,67	0,90	0,45
CaO	0,52	0,25	0,29	0,28	1,08	0,35	0,38	0,49	0,32	0,21
MgO	0,91	0,61	1,53	0,57	0,33	0,57	0,30	0,24	0,84	0,74
K_2O	0,96	0,77	2,14	0,52	0,34	0,70	0,26	0,22	0,75	0,82
Na_2O	0,09	0,09	0,17	0,11	0,11	0,12	0,12	0,14	0,15	0,13
Total	101,78	97,12	100,13	98,98	99,76	100,34	98,96	99,29	97,86	100,30

Résultats analytiques des sols de la partie basse des bas-fonds

Echantillons	AN 11	AN 21	MR 11	MR 12
Profondeur	0-15	0-15	0-10	40-60
Argile	49,0	38,9	45,8	18,6
Limons	18,8	23,5	29,7	29,4
Sables fins	0,7	4,1	2,0	23,4
— grossiers	1,3	15,8	1,2	24,3
Matières org. (%)	35,4	21,8	21,3	2,8
C °/₀₀ C	205	126	123	16
C °/₀₀ Mat. hum.	19,0	22,0	46,5	2,63
C °/₀₀ Ac. fulv.	6,7	7,7	17,3	0,92
C °/₀₀ Ac. hum.	12,3	14,3	29,2	1,71
N °/₀₀	11,1	8,7	9,0	0,8
C/N	18,5	14,5	13,7	20
pH eau	5,1	5,3	4,3	4,4
pH KCl	3,9	3,9	3,8	3,5
Bases échangeables mé/100 g				
Ca	2,34	1,06	1,72	0,66
Mg	2,80	1,43	0,39	0,19
K	0,57	0,53	0,28	0,10
Na	0,65	0,87	0,05	0,05
S	6,36	3,89	2,44	1,00
T	35,80	20,12	29,32	8,22
V (%)	17,8	19,3	8,3	12,2
Triacides				
Perte au feu	41,55	26,62	30,22	10,75
Résidu	11,37	31,11	14,25	27,50
SiO_2	21,50	23,00	23,50	28,00
Al_2O_3	15,00	12,20	17,00	23,00
Fer	5,00	3,5	10,50	4,60
Titane	0,92	0,73	0,98	1,02
CaO	0,35	0,21	0,31	4,03
MgO	0,56	0,24	0,47	1,52
K_2O	0,51	0,24	0,59	2,10
Ma_2O	0,18	0,22	0,13	0,13