

Séminaire international

MADAGASCAR

TANANARIVE 9-14 décembre 1991

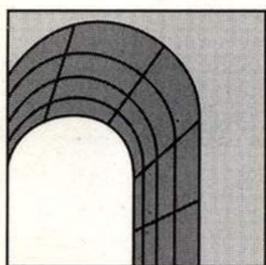
BAS-FONDS et RIZICULTURE

Fonctionnement, Agronomie, Aménagement



Structure et fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé
sur les hautes terres de Madagascar.

M. RAUNET



Ministère de la Recherche
scientifique et technologique
pour le développement



Conférence des responsables
de la recherche agronomique
africains



Agence de coopération
culturelle et technique



Centre national
de la recherche
agronomique
appliquée au
développement rural



Centre de coopération
internationale en
recherche agronomique
pour le développement



Institut français
de recherche scientifique
pour le développement
en coopération

STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT D'UN BAS-FOND RIZICULTIVE SUR LES HAUTES TERRES DE MADAGASCAR.

M. RAUNET .

CIRAD, BP 5035, Montpellier CEDEX 01 France-

Mots-clés : Bas-fond, Madagascar, hauts plateaux, riz aquatique, régimes hydrologiques, nappes phréatiques, sols, physico-chimie, fer ferreux, interdisciplinarité, spatio-séquences, diachro-séquences.

Résumé

Ont été analysés et mis en relations les fonctionnements hydrologiques, physico-chimiques et agronomiques d'un bas-fond élémentaire rizicultivé de 18 hectares encadré dans un bassin versant de 125 hectares. La communauté des riziculteurs fait partie du système étudié.

La structuration spatiale (spatio-séquences) des matériaux, des sols, des régimes des eaux, des ambiances physico-chimiques et des rendements a été mise en évidence en montrant les interactions étroites entre tous ces phénomènes.

Les chronoséquences annuelles des paramètres dynamiques (fluctuation et circulation des nappes, potentiel redox, pH, fer ferreux, conductivité électrique) ont été établies d'amont en aval. Les longues durées d'engorgement développent une activité de la flore anaérobie. Le système redox fer ferrique/fer ferreux libère du fer ferreux soluble dont une partie importante passe dans la plante, occasionnant des déséquilibres nutritionnels pour le riz en relation avec de faibles rendements.

La connaissance « intégrée » du fonctionnement de ce système a été obtenue grâce à la forte synergie d'une équipe transdisciplinaire travaillant pendant trois ans, avec traduction spatiale permanente des données obtenues, recalages d'échelles, couplages constants des différentes approches.

Le bas-fond étudié avec son fonctionnement propre a été replacé dans un contexte régional plus vaste, permettant d'en apprécier la représentativité.

I -INTRODUCTION -CONTEXTE GENERAL

Une des particularités les plus remarquables du paysage des hautes terres à socle précambrien de Madagascar (900-1800 mètres d'altitude) est leur densité impressionnante de petites vallées et plaines alluviales. Elles constituent un réseau hiérarchisé ([fig. 2](#)), profondément emboîté dans de hautes collines et plateaux à versants pentus convexes, matelassés d'un épais manteau d'altération (10 à 40 mètres d'épaisseur) coiffé d'un sol ferrallitique sans carapace ferrugineuse. Ces altérites logent un réservoir aquifère permanent alimenté par les pluies, qui affleure dans les points bas, en périphérie des vallons. Les parties amont du réseau hydrographique sont constituées d'une grande quantité de bas-fonds plats, à écoulements lents bien qu'à pentes longitudinales fortes (0,2 à 4 %), non ou peu incisés en cours d'eau, relativement larges, et dont les têtes se terminent en amphithéâtres (réseau en "bois de rennes").

Le réseau de vallées peut, en certains endroits, représenter jusqu'à 50 % de la superficie des paysages. Elles forment l'essentiel du terroir rizicole des hauts plateaux, soit 5000 km², sur un total d'environ 9000 km² ([fig.1](#)). Le reste étant formé de larges plaines de remblaiement ou de versants rectifiés en terrasses.

Les vallons sont cloisonnés en petites rizières échelonnées, de 1 à 40 ares chacune, alimentées en eau par des canaux latéraux qui recueillent les eaux de ruissellement et les eaux de la nappe phréatique. Ainsi l'eau de la rizière qui s'écoule en marches d'escalier d'amont en aval est plus ou moins contrôlée par fermeture et ouverture des diguettes.

La rizière est l'élément de base du terroir des Hauts Plateaux.

Dans le bas-fond, la gestion de l'eau et les pratiques culturales dans le micro-parcellaire, sont figées (depuis 400-500 ans ?) par des traditions socio-culturelles fortement enracinées. Il est donc difficile de prétendre changer radicalement le système de riziculture de bas-fond tel qu'il existe actuellement.

Le climat des Hauts-Plateaux est caractérisé par deux saisons bien contrastées : une saison des pluies, de novembre à mars inclus et une saison sèche et fraîche, d'avril à octobre inclus. Pour des raisons de longueur de cycle et de température une seule culture de riz est possible.

Le site d'Ambohitrakoho, lieu de l'étude présentée ici, est à 25 km au nord de Tananarive, à 1 300 mètres d'altitude ; la pluviosité moyenne annuelle est de 1 390 mm. Les données climatiques sont données ci-dessous ([fig. 3](#)).

La fig2 situe le bas-fond d'Ambohitrakoho à l'intérieur du vaste bassin du Maniandro ("bassin de Mahitsy"). Ce réseau est très représentatif de ce que l'on observe sur les Hauts-Plateaux. Les vallées sont encastrées dans une surface d'aplanissement fini-tertiaire à sols ferrallitiques rouges épais, sur gneiss et migmatites, réduite maintenant à l'état d'une multitude de "plateaux" découpés, d'altitude proche de 1300 mètres. Ces plateaux dominent d'une vingtaine de mètres le réseau de vallées, par des versants de raccordement à pentes fortes, à tendance convexe, sur sols ferrallitiques tronqués.

La surface fini-tertiaire forme de larges alvéoles ou sous-bassins, logés entre des rides résiduelles granitisées, d'orientation générale Est-Ouest, où affleurent de très nombreuses boules et lames rocheuses. Ces reliefs dominants suivent les orientations des structures d'origine métamorphisées ("racines" des chaînes plissées), rabotées par les aplanissements successifs depuis le précambrien et peu à peu mis en reliefs par altération - érosion différentielle, moins rapide que sur les gneiss et migmatites interstratifiés.

Le réseau de vallées compte trois replats étagés et chronologiques: le niveau actuel (rizicultivé) et deux niveaux anciens perchés, un **du quaternaire ancien** ("terrasse rouge"), l'autre **du quaternaire récent** ("terrasse jaune"). Ce sont les témoins des abaissements relatifs successifs du niveau de base général (drainé par la rivière Ikopa) des eaux de surface et des nappes phréatiques, conséquences de la surrection isostasique, lente mais par "à coup", des Hauts-Plateaux au fur et à mesure de leur rabotage par l'érosion.

Les vallons amont du réseau, lorsqu'ils sont emboîtés dans la surface fini-tertiaire sont des **bas-fonds mal drainés sans cours d'eau** à matériau organique plus ou moins tourbeux, superficiel ou faiblement enterré. Ils se terminent en amphithéâtres. C'est le type "Ambohitrakoho", objet de cette étude.

Les vallons situés en contrebas des rides résiduelles à pentes très fortes, sont des **bas-fonds de transit** qui canalisent des matériaux d'érosion riches en sables et graviers quartzeux. Ils sont entaillés et se terminent en pointe en amont où convergent les ravins.

En aval, ces bas-fonds qui s'anastomosent passent à des vallées argileuses plus larges et mieux drainées, ou apparaît un cours d'eau qui, lorsqu'il n'y a pas d'endiguement, peut déborder en hivernage, alimentant la vallée en alluvions fines de décantation.

Au fur et à mesure que l'on descend vers l'aval du bassin, des lentilles alluviales sableuses s'intercalent dans les remblais. Avant de rejoindre l'Ikopa, la plaine du Maniandro s'écoule plus difficilement (alluvionnement plus rapide de l'Ikopa). La plaine est alors mal drainée et montre des passées tourbeuses.

Le bas-fond d'Ambohitrakoho, représentatif d'une variété importante de bas-fonds des Hauts-Plateaux, a été étudié d'octobre 1986 à octobre 1989, dans le cadre du PIREN (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement) du CNRS¹. Elle a mis en œuvre ([fig.4](#)) des équipements et expérimentations pour les suivis hydrogéologiques, hydrologiques, physico-chimiques et agronomiques, de façon à comprendre les relations "eau -sol -riz". Ces études ont été menées grâce à une étroite synergie transdisciplinaire entre chercheurs du CIRAD², du FOFIFA³, du LRI⁴, du MIEM⁵ de l'ORSTOM⁶, de l'USTL⁷ et de l'Université d'Avignon.

Cette étude a donné lieu à une quinzaine de publications (de 1987 à 1991) et à trois rapports d'avancement (1987, 1988, 1989), indiqués en bibliographie.

L'article présenté ici reprend, résume et synthétise une partie des résultats de cette recherche, obtenus grâce aux acteurs suivants: B. BLAVOUX (Université d'Avignon), P. DE GIUDICI (LRI), L. FERRY (ORSTOM), P. GARRETA (ORSTOM), R. GAUDIN (LRI), J.C. GRILLOT (USTL), R. RABESON (FOFIFA), J.H.RAKOTONDRAJNIBE (MIEM), J. RAKOTOARISOA (FOFIFA), N.RANDRIARANISOA (MIEM), M. RAUNET (CIRAD), J.F. VIZIER (ORSTOM).

II. CONTEXTE SOCIO-RURAL DU BAS-FOND

Le bas-fond d'Ambobitrakoho de 14 hectares, rizicultivé en "Vakiambiaty" ou riz de 2ème saison (cycle 150 à 180 jours), est investi par 26 exploitants des villages d' Ambohibary et d'Angodonina dominant directement la vallée.

Chaque exploitant cultive en moyenne une dizaine de parcelles d'environ 5 ares chacune (fourchette = 1 à 25 ares), éparpillées le long du bas-fond. Celui-ci est ainsi cloisonné en 267 rizières. Le plus petit exploitant ne possède que 12 ares, le plus gros (le président du Fokontany) possède 245 ares. Les riziculteurs ont également des rizières dans d'autres bas-fonds voisins.

¹ CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique (France)

² CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (France)

³ FOFIFA : Centre National de la Recherche Agronomique appliquée au Développement Rural (Madagascar)

⁴ LRI : Laboratoire des Radio-Isotopes (Université de Tananarive)

⁵ MIEM : Ministère de l'Industrie de l'Energie et des Mines (Madagascar)

⁶ ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (France)

⁷ USTL : Université des Sciences et Techniques du Languedoc (Montpellier)

En plus des rizières, les paysans possèdent des parcelles sur collines ("tanety") et terrasses, plus grandes, où ils cultivent manioc, taro, patate douce, haricot, pois de terre, maïs et quelques fruitiers. Beaucoup sont en jachère ou en boisements d'eucalyptus (environ 13 hectares sur le bassin).

Le statut foncier des rizières est variable: propriété (achat ou héritage) pour 83% de la superficie (15 exploitants) ou métayage-fermage pour 17 % de cette superficie (11 exploitants). Les parcelles de "cultures sèches" hors bas-fond sont en propriété.

Pour la moitié, les exploitants sont des double-actifs (artisans, fonctionnaires, libéral).

Les exploitants sont des ménages d'environ 6 personnes comprenant 1,5 à 2 UTH. L'entraide est largement pratiquée (entre familles ou ménages des villages), la main d'oeuvre salariée est quelquefois utilisée. Les outils (charrues, herses, charrettes...) et force de traits ne sont la propriété que de quelques-uns. Sinon ils sont loués quand c'est possible. Mais beaucoup (plus de la moitié des exploitants) font tout à la main, le seul outil omniprésent étant "l'angady" (bêche droite).

Dans les rizières, l'itinéraire technique moyen, en partant de la fin du battage de la campagne précédente (avril), est le suivant :

- L'entretien des diguettes et des canaux :

pendant la morte saison, de juin à août.

- Le drainage des rizières :

Réalisé en août-septembre, il a pour but de faciliter le labour. Drainage et labour précoces (après la récolte) ne sont pas en usage, afin semble-t-il, d'empêcher la germination des graines de mauvaises herbes. Donc entre avril et août, l'eau des rizières s'évapore, s'infiltré peu à peu ou s'évacue lentement d'amont vers l'aval par les brèches des rizières. Les résidus de récolte et repousses sont laissés au bétail de trait. Les parcelles en eau sont occupées par des canards. Seules les quelques parcelles cultivées en contre-saison (une dizaine sur le bas-fond) sont drainées et labourées tôt en saison sèche.

- Le labour des rizières :

Il s'effectue entre juillet et novembre, surtout fin septembre. L'outil le plus courant (sur 2/3 des parcelles) est la bêche à fer droit ("angady") qui retourne bien le sol sur 15-20 cm. La charrue simple tirée par 1 ou 2 boeufs est utilisée par les plus "riches" sur les plus grandes rizières. Les grosses mottes sèchent à l'air pendant 15 jours à 1,5 mois.

Le labour est précédé par l'apport de fumier (poudrette de parc, fumier de porc ou de volaille) en quantité et fréquence très variables. 78 % des parcelles en reçoivent selon une fréquence minimale de 5 ans. 22 % n'en reçoivent plus jamais (du fait de la raréfaction du bétail ou du coût excessif du fumier). De temps en temps, sur les parcelles tourbeuses de tête du bas-fond, l'exploitant "colmate" sa rizière par des apports de terre de tanety. Depuis au moins une dizaine d'années les paysans ne peuvent plus se permettre des apports d'engrais minéraux.

- Le semis des pépinières :

Il se fait en septembre-octobre. La taille d'une pépinière est de l'ordre de 1 à 5 ares chaque paysan en possédant entre 1 et 5 parcelles. Un are de pépinière permet de repiquer 15 à 25 ares de rizières. Dans le bas-fond, il y en a 73 parcelles. En général chacun produit lui-même ses semences (variétés locales: , Rojofotsy, 1632, Tsipala, Rojomena etc).

Les pépinières sont soignées, parfaitement planées et reçoivent systématiquement du fumier. Le semis se fait en forte densité (30 à 50 kg/are) à la volée dans la boue, puis il est recouvert d'une faible hauteur d'eau. Les pépinières se situent en bordure et tête de bas-fond, à proximité des sourcins permanents. Les "ketsy" devraient être repiqués au bout d'un mois. En réalité il n'est pas rare qu'ils y restent 2 mois (et jusqu'à 3 mois en année peu pluvieuse).

- La mise en boue, le hersage et le planage des rizières

15 jours à 1,5 mois après la fin du labour, on fait rentrer l'eau dans les rizières (suivant disponibilité en eau et accords entre voisins). L'imprégnation dure une semaine à 15 jours. Ensuite on procède au délitage et à la mise en boue proprement dite, soit à l'angady soit à la herse en bois tirée par 1 ou 2 boeufs. Le planage final se fait à l'angady ou à la herse retournée pointes en haut.

- Le repiquage des rizières

Suivant la pluviométrie (disponibilité en eau) le repiquage (réalisé par les femmes) s'étale entre novembre et février. Le repiquage des "ketsy" regroupés en bottillons de 20 cm de haut, ne se fait pas en lignes. n est réalisé dans 7 à 10 cm d'eau. Une semaine après, le niveau de l'eau est remonté à 1/2 à 1/3 des plants, pour le contrôle des mauvaises herbes.

- Le sarclage .

Les femmes procèdent en général à un seul sarclage manuel, le plus souvent en février. Auparavant, pour faciliter l'opération, une vidange partielle de la rizière est souvent réalisée.

- La récolte et le séchage

En année "normale", la récolte se fait en mars-avril. Elle est précédée d'une vidange complète de la rizière 1 à 2 semaines auparavant, pour accélérer la maturation et faciliter les opérations. La récolte est faite par les hommes et les femmes, qui coupent à la faucille, 10 cm au dessus du sol. Les gerbes sont mises à sécher en recouvrements partiels (écailles de poisson) dans la rizière elle-même ou sur les diguettes.

- Le transport et le battage

Le transport sur les aires de battage bien nettoyées (en bordure du bas-fond ou au village) est fait par les hommes. Battage et vannage sont ensuite réalisés par les femmes et les hommes.

La production rizicole en terme de rendements, les pratiques culturales, la gestion du bas-fond au , sens large par la communauté, subissent une "dégradation" très sensible depuis une quinzaine d'années du fait de la péjoration des conditions socio-économiques.

Les rendements actuels dépassent rarement 2 t/ha, alors que de l'avis général des habitants, surtout des anciens, ce plafond était de 4 t/ha (années du GOPR, entre 1960 et 1972). On en est à l'autosubsistance minima, sans surplus ni création de richesses, donc baisse du niveau de vie.

Les raisons en sont nombreuses et interactives :

- . Circuits économiques et crédits déficients: pas d'intrants (fumure, herbicides, semences...) et manque d'équipement (charrues, herses, houes...).
- . Elevage en disparition (de moins en moins de fumier, de traction animale).
- . Dégradation de la force de travail, due à un état sanitaire déficient (malnutrition, paludisme, bilharziose) et au coût élevé de la main d'oeuvre salariée.
- . Développement de la pluri-activité aux dépens de l'activité agricole proprement dite. Cela favorise le relâchement des liens familiaux et communautaires, avec conséquences sur la pratique de l'entraide, qui était généralisée autrefois.
- . Conséquences des facteurs précédents: abandon des techniques de riziculture améliorée mises au point avec succès par le GOPR: semis en lignes, sarclage à la houe rotative, repiquages précoces, densités de semis, lutte contre les parasites, soins des pépinières, préparation des semences, etc...

III. HYDRO-GEOMORPHOLOGIE ET GENESE DES BAS-FONDS

Le bas-fond étudié fait partie ([fig.2](#)) d'un réseau dense et encaissé de vallées et vallons à fond plats, encastrés de 20-30 mètres dans l'épais manteau d'altérites (20 mètres sous les interfluves) coiffées de sols ferrallitiques sans induration ferrugineuse -qui couvre le socle précambrien composé de roches fortement métamorphosées (migmatites, granito-gneiss).

Les sommets des interfluves -vers 1 300 m d'altitude -tangencent une surface d'aplanissement fini-tertiaire. Cette dernière forme des plateaux et langues fortement "convexisés" à l'approche des bas-fonds, à pentes générales orientées vers le réseau hydrographique actuel. D'étroits alignements rocheux de granites filoniens orientés Est-Ouest, jalonnent au ras du sol la couverture d'altération, sous forme de chicots et grosses boules. Ils forment de petits seuils rocheux resserrés lorsqu'ils traversent les bas-fonds. Ceux-ci sont généralement larges par rapport à la faible étendue des bassins qui les dominent; des constriction et élargissements successifs étroitement liés à la litho-structure du socle et à son altération différentielle caractérisent la morphologie longitudinale de leurs fonds plats ; ces derniers, systématiquement rizicultivés et cloisonnés en casiers, correspondent aux niveaux de bases locaux des nappes phréatiques qui imprègnent l'ensemble du manteau d'altération.

En bordure des **bas-fonds « fonctionnels »** ("mouillés" parla nappe affleurante), se trouvent deux terrasses étagées, l'une du quaternaire récent (dite "terrasse jaune"), l'autre du quaternaire ancien ("terrasse rouge"). La première est perchée de 2 à 3 mètres au-dessus des rizières et son talus a été généralement accentué et rectifié par les riziculteurs. La seconde, plus haute est située entre la surface fini-tertiaire et la terrasse jaune. Ces terrasses, parfois plus larges que le bas-fond fonctionnel qui s'y emboîte font aussi partie du réseau de vallées, au sens large, l'ensemble étant fortement enfoncé dans le paysage, à ruptures de pente prononcées avec les versants pentus convexes voisins.

Aux axes des vallées principales, sont greffés de multiples diverticules ou bas-fonds secondaires dont les têtes sont terminées en larges amphithéâtres.

La pente générale longitudinale du vallon est sensible et peut atteindre 4 % dans les tronçons situés les plus en amont. Elle a cependant été rectifiée par les paysans, en casiers horizontaux étagés. Transversalement, également, la topographie a été aménagée et planée. La plupart du temps, les riziculteurs ont mordu sur la terrasse récente (recoupant la nappe phréatique et élargissant ainsi la surface "utile") en transférant les déblais en surface du bas-fond.

La transition bas-fond/terrasse jaune est marquée par une frange concave de raccordement que l'on peut qualifier de petit "glacis de suffosion" à élargissement remontant. Les matériaux de

la terrasse sont déstabilisés et mobilisés par des processus de lavage et soutirage des argiles sous l'action de la nappe phréatique peu profonde dont les flux latéraux sont activés par l'enfoncement progressif du niveau de base général drainant le paysage. Le résidu sableux de lavage des altérites "flue" ensuite progressivement vers l'aval, pour s'écouler lentement en "nappe de nuage" sableuse, dans toute la section du bas-fond actuel qui s'élargit ainsi aux dépens de la digestion régressive de la terrasse.

Les processus de formation de la surface fini-tertiaire, de la "terrasse rouge" et de la "terrasse jaune", étaient comparables à ceux des bas-fonds actuels (4^e niveau de base). C'est en effet la présence d'une "nappe phréatique d'altérite" qui, lorsqu'elle est rabattue et aspirée par l'enfoncement du réseau " hydrographique aval dû à la montée isostasique des hauts-plateaux, provoque le fluage général remontant du manteau d'altération et son évacuation en nappe étalée rendue sableuse par lavage latéral. Cette dynamique s'effectue selon des axes probablement privilégiés guidés par la fracturation du socle ou bien sa lithologie et son altération différentielles.

L'absence d'axes d'écoulement concentré (cours d'eau) et de véritables alluvions, au sens habituel du terme, dans les bas-fonds plats élémentaires, s'explique par le fait que ceux-ci recourent la nappe phréatique et qu'ainsi, les matériaux qui fluent latéralement suivant une dynamique remontante d'aval vers, l'amont, ne peuvent s'évacuer qu'en nappe boueuse sableuse, mobilisée par la compétence de la tranche supérieure de cette nappe en mouvement latéral. Une accumulation organique tourbeuse puis des matériaux alluvio-colluviaux altéritiques arrachés aux versants sont venus ensuite recouvrir la nappe sableuse. Ces processus hydrologiques et morphodynamiques se déroulent évidemment à l'échelle du quaternaire et ne sont donc pas directement perceptibles à l'échelle humaine.

IV. LES MATERIAUX ET LES SOLS

IV.1. LE BAS-FOND PROPREMENT DIT ([fig.5](#), [fig.6](#))

Le sous-sol du bas-fond montre verticalement une structure fondamentale en 4 matériaux superposés assez bien typés dont seuls les 2 supérieurs vont présenter des modalités différentes d'amont en aval.

La nature, les épaisseurs et les relations mutuelles de ces matériaux et leur répartition spatiale ordonnée ([fig.5](#)) sont les résultats de la genèse "hydro-géomorphologique" du bas-fond. Ils induisent (en même temps qu'ils sont conditionnés par) des circulations des eaux assez

spécifiques, elles-mêmes en relations étroites avec les matériaux et nappes phréatiques du bassin environnant.

Ces matériaux jouent un rôle important sur les modes de gestion du bas-fond par les paysans.

De la base vers le sommet de la séquence verticale on trouve ([fig.6](#)) :

-l'arène argilo-micacée

Ce matériau constitue le substrat profond général des vallées où il apparaît vers 200-350 cm de profondeur. De teinte grise à verdâtre il est argilo-sableux, généralement riche en micas ("tany dilatra"), en feldspaths kaolinisés et autres minéraux éventuels (ferro-magnésiens) en cours d'hydrolyse. Il contient des argiles de néoformation de nature montmorillonitique. La structure originelle de la roche granito-gneissique n'est pas modifiée. Le matériau n'a donc pas été remanié mécaniquement. L'eau saturante qui semble peu mobile, assure un bain basique probablement riche en éléments minéraux dissous et en silice colloïdale en cours de diffusion vers le haut. Cette arène micacée peut avoir 50 à 150 cm d'épaisseur au-dessus de l'arène grenue grossière, libérée par la roche saine diaclasée et disloquée en boules. Le socle sain est donc beaucoup plus proche de la surface sous les bas-fonds (vers 2 à 4 mètres) que sous les interfluves (où elle est à une vingtaine de mètres).

-le sable lavé (ou "nappe de fluage")

Au-dessus du précédent et séparé par une discontinuité (localement soulignée par une "stone-line" quartzreuse), ce matériau possède 20 à 60 cm d'épaisseur ; de teinte beige à blanchâtre ("fasika fotsy"), on le trouve à partir de 150-280 cm de profondeur ; il est composé de sables grossiers quartzeux assez purs, sans traces de micas. La nappe phréatique le noie en permanence (il "coule" quand on essaie de le remonter, 1 à la tarière). C'est probablement dans ce niveau que les inféro-flux d'eau longitudinaux au bas-fond sont les plus intenses (du moins en hivernage), assurant un lavage radical des ions et des colloïdes, expliquant l'absence totale de minéraux reconnaissables (en dehors du quartz) et la faible quantité d'argile.

L'évacuation des produits d'hydrolyse de l'arène micacée pourrait s'opérer dans ce niveau en saison des pluies. La limite tranchée avec l'arène micacée en place sous-jacente, indique qu'il s'agit d'une couche déplacée latéralement. Comme exposé précédemment, il paraît représenter la couche de fluage et de transit vers l'aval (dans la nappe phréatique à mouvement latéral), des altérites évacuées lors de l'emboîtement du bas-fond actuel dans la "terrasse jaune". Pendant ce déplacement, les deux processus de fluage et de lavage sont en rétroaction positive.

-le niveau organique

Ce matériau, de teinte sombre, plus ou moins tourbeux, est général. On le trouve à partir de 40 - 100 cm de profondeur sur une épaisseur de 40 à 150 cm. Le niveau organique est souvent franchement tourbeux en tête de bas-fond, c'est-à-dire composé de petits débris végétaux (Cyperus, fougères aquatiques, Raphias?) non humifiés, très riches en eau (faisant alors partie intégrante du matériau), spongieux, léger, à faible densité apparente, instable si on y applique une pression. Cette tourbe s'avère quasiment imperméable. Les mesures de perméabilités "Darcy" ont donné des perméabilités horizontales et verticales inférieures à 10^{-9} m/s.

D'amont vers l'aval, le niveau organique ("honahona") passe progressivement de la tourbe instable au limon organique ("Foumpotra") sans débris végétaux, stable et plus lourd, en même temps qu'il s'enterre plus profondément sous le recouvrement colluvial argileux supérieur (moins de 40 cm de profondeur en amont, 60 à 100 cm à l'aval) et que son épaisseur diminue ([fig.6](#)).

Ce niveau organique argileux et non tourbeux a une perméabilité horizontale d'environ 3.10^{-6} m/s et une perméabilité de 4.10^{-4} m/s (il est anisotrope). Il est donc beaucoup plus perméable que la vraie , tourbe.

Ce remplissage organique ou organo-minéral enterré, que l'on observe systématiquement dans les vallées a une signification paléo-bioclimatique. Il témoigne d'un climat forestier humide à faible morpho-dynamique sur les versants, alimentant peu les bas-fonds en colluvio-alluvions, permettant ainsi une sédimentation organique calme sous la végétation ripicole. Les datations au carbone 14 effectuées à la base (contact avec les sables lavés) et au sommet (contact avec le remblai argilo-limoneux) du matériau organique ont donné :

.amont du bas-fond : 2600 ans au sommet, 6000 ans à la base

.aval du bas-fond : 4400 ans au sommet, 9000 ans à la base

Les différences d'ancienneté entre l'amont et l'aval s'expliquent par le fait, que le bas-fond continuait à se former et donc à "reculer" en amont (par fluage régressif des altérites mobilisées par la nappe phréatique), en même temps que l'aval se recouvrait peu à peu de matériaux argileux de transit.

L'épisode de stabilité bioclimatique paraît donc se situer entre -9000 et -2600 ans.

Les rôles, hydrologiques et chimiques, du matériau organique ne sont sans doute pas négligeables pour la riziculture. La nappe le noie en permanence. Celle-ci est souvent en charge sous le recouvrement colluvial argileux supérieur (voir ci-après), de sorte qu'il y a une pression exercée vers le haut qui pourrait être la source de composés azotés libérés lentement

par la tourbe. Il est de même envisageable (voir plus loin), qu'en saison sèche, pendant laquelle les flux latéraux ralentissent peut être au profit d'une drainance vers le haut, non seulement la tourbe mais aussi la l'arène micacée profonde "enrichisse" par diffusion, le matériau de surface support de l'enracinement du riz. Cela serait une explication satisfaisante du fait que les rizières, en l'absence totale de fertilisants, produisent encore couramment 2 T/ha, malgré plusieurs centaines d'années de riziculture aquatique ininterrompue.

-Le matériau colluvial fin de surface

Le niveau organique est enterré par une couche argileuse d'origine colluviale qui augmente d'épaisseur d'amont vers l'aval. Epaisse de moins de 40 cm et localement inexistante en tête, elle peut atteindre 1 mètre d'épaisseur au débouché dans la vallée alluviale. Ce remblai est verticalement homogène du point de vue textural. Il ne montre pas de grandes variations granulométriques dans une section donnée du bas-fond. Par contre il montre un certain gradient d'amont vers l'aval ([fig.12b](#)). Limono-argilo-sableux en tête (52 % d'argile + limon) il s'enrichit progressivement en limon et argile vers l'aval (66 % d'argile + limon).

En surface (0- 25 cm), le sol hydromorphe possède 7 à 8% de matière organique en amont et 6 à 7% en aval; cette matière organique est mal humifiée (C/N = 30 à 40). Entre 25 et 50 cm de profondeur ce taux de nature organique reste le même (6 à 7%).

Minéralogiquement le remblai est essentiellement kaolinique, avec quelques minéraux résiduels (fines paillettes de mica) et du sable quartzeux.

L 'hydromorphie confère une teinte grise en tête (pas de réoxydation en saison sèche, nappe toujours proche) et une teinte brun-grisâtre en aval (meilleure réoxydation, nappe descendant vers 80/100 cm de profondeur), où le sol se dessèche en surface. C'est ce que les paysans appellent le "tany manga" (terre "bleue"), qui constitue le sol de rizière proprement dit.

Dans les parties du bas-fond à tourbe sub-superficielle car faiblement remblayées de colluvions (diverticules de tête), les paysans sont obligés de recharger régulièrement leurs parcelles en terre argileuse prélevée sur les côtés du vallon afin de créer un support stable et relativement imperméable pour l'enracinement du riz et le contrôle d'une lame d'eau dans les rizières.

Le rôle hydrologique du recouvrement colluvial est très important. D'abord, comme indiqué ci- dessus, parce qu'il permet un **contrôle relativement bon de l'eau des rizières** qui, ainsi, est peu soumise aux fluctuations aléatoires de la nappe imprégnant les matériaux du dessous. Ensuite, parce qu'il maintient en pression par **sub-artésianisme** cette nappe phréatique du bas-fond qui circule en inféro-flux de façon relativement indépendante de la nappe d'inondation, celle-ci pouvant être "manoeuvrée" en fonction des ouvertures et fermetures des

diguettes. Il y a cependant une continuité entre ces deux flux, le matériau supérieur argileux étant probablement saturé quand les rizières sont inondées ou engorgées.

La nappe phréatique en charge peut favoriser les migrations de soluté profond (azote, cations) vers le haut et alimenter le sol de façon naturelle. Ceci reste naturellement une hypothèse de travail. Il s'avèrerait alors que, si pour l'enracinement du riz, la tourbe et l'arène profonde n'ont aucun rôle, du point de vue chimique -minéral et organique- elles en ont un non négligeable, qui, d'ailleurs, pourrait être modulé suivant la saison. Le "sol de rizière" ne serait donc pas la zone racinaire seule mais bien l'ensemble des matériaux superposés que nous venons de décrire. L'agent de liaison, support des migrations, étant représenté par la nappe phréatique et ses divers flux (latéraux comme verticaux) variables pendant l'année, en relation évidente avec la nappe générale des altérites située sous les interfluves. L'ambiance hydrochimique qui détermine en particulier le pH et le potentiel d'oxydo-réduction, donc l'abondance, la forme, l'assimilabilité ou la toxicité des éléments minéraux qui entourent le système racinaire du riz, est conditionnée par l'ensemble de l'environnement et pas seulement la nature du sol superficiel de la rizière.

IV.2. LA PLAINE ALLUVIALE

Le "flat" alluvial, large ici de 300 mètres, se distingue du bas-fond qui lui, n'est pas remblayé d'alluvions proprement dites. Ici les apports sont longitudinaux à la vallée par débordements lents et peu turbulents du cours d'eau, et non plus latéraux. D'autre part, la plaine est drainée de façon naturelle par un cours d'eau (encaissé de 2 mètres), ce qui n'est pas le cas du bas-fond.

En surface, la plaine présente une coloration brunâtre plus claire que celle du bas-fond (grisâtre). Elle est remplie d'alluvions argilo-limoneuses homogènes finement micacées qui bénéficient d'une assez bonne réoxydation durant la saison sèche (la nappe descendant jusque vers 120 cm). Ce remblai d'ennoyage alluvial (décantation fine) de 60 à 150 cm d'épaisseur repose sur un niveau enterré de limon organique de 20 à 50 cm, puis sur la semelle de sable lavé non micacé épais également de 20 à 50 cm, lui-même reposant en discontinuité sur l'arène argilo-micacée. Ces deux derniers matériaux sont exactement les mêmes que ceux décrits dans le bas-fond (voir ci-dessus), et avec lesquels ils sont en continuité latérale; ils sont noyés toute l'année par la nappe phréatique.

IV .3. LES TERRASSES ([fig.5](#), [fig.7](#))

IV.3.1. La terrasse récente (terrasse "jaune")

La terrasse représente un ancien niveau de bas-fond plus large que le bas-fond actuel qui s'y emboîte 1 à 2 mètres plus bas. Les matériaux qu'on y trouve sont assez comparables à ceux du bas-fond, sauf pour le niveau organique supérieur qui a ici disparu par minéralisation après la descente définitive de la nappe phréatique (actuellement en-dessous de 1 mètre) qui était initialement sub-affleurante.

.En surface sur environ 1 mètre d'épaisseur, se trouve un niveau gris-beige massif (sans fentes), compact, lavé en fer et en argile, limono-sableux à sables grossiers **sans mica**. C'est un ancien "gley", résultant du nuage, de l'étalement et du lavage d'altérites antérieures (suivant les processus explicités plus haut).

.A la base du niveau précédent, existe souvent une étroite « **Stone-line** » **quartzeuse**, provenant du fauchage des filons de quartz et de la descente, dans le matériau fluant gorgé par la nappe, de leurs éléments de démantèlement. Ceux-ci, par transit latéral lent de cette "couche de nuage", ont été plaqués et concentrés contre le substrat plus compact d'arène argilo-micacée qui, elle, n'a pas été déstabilisée par les flux phréatiques latéraux.

.En profondeur se trouve enfin l'arène argilo-sableuse micacée, déjà décrite, à structure lithologique conservée, à néoformation de montmorillonite.

A l'heure actuelle, la nappe phréatique ne remonte pas au-dessus de la "**Stone-line**".

Les sols, massifs et à faible réserve en eau, de la terrasse jaune sont la plupart du temps délaissés par les paysans.

IV 3.2. *Le glacis de suffosion de la terrasse récente*

Localement, la terrasse récente est "mangée" par **suffosion régressive** lobée qui provoque des affaissements dans sa partie aval, créant un "glacis ou glacis-terrasse de raccordement" reliant le niveau intact de la terrasse jaune à la vallée rizicultivée située en contrebas. A ces niveaux, les processus de "fluage- lavage" (voir ci-dessus) parachèvent le lessivage du matériau de la terrasse et le remobilisent à nouveau vers l'aval pour élargir le bas-fond fonctionnel. Ces franges concaves à suintements quasi permanents de la nappe ont des sols blanchis, sableux à limono-argilo-sableux, parfois à tourbe superficielle peu épaisse. La plupart du temps, les glacis à suffosion active ont été refaçonnés par les paysans pour l'aménagement des bas-fonds et transformés en paliers étagés à sols "remaniés" (raclage/remblaiement) souvent consacrés à l'installation des pépinières. Des cultures "sèches" (taro, manioc, haricot, patate douce, bananier ...) occupent souvent ces zones latérales que les paysans appellent "baibohos". La nappe proche, qui remonte par capillarité est intéressante. Pour la capter mieux, les paysans

sèment ou plantent dans des trous de 30 à 50 cm de profondeur. Les sols, bien qu'acides, sont riches en matière organique, toujours humides et faciles à travailler. Ils sont donc assez prisés.

Cette frange de sols hydromorphes est, le plus souvent, quadrillée de canaux qui recourent la nappe et qui la drainent vers le bas-fond, afin d'améliorer l'alimentation en eau des rizières.

IV.3.3. *La terrasse ancienne (terrasse "rouge")*

Cette terrasse présente un modelé plus dégradé et "convexisé" que celui de la terrasse récente. Elle est réduite à de simples épaulements assez hauts perchés, surtout dans la partie amont du bassin. En aval elle se déploie plus largement.

Les sols y sont très variables, en fonction du degré de troncature dans l'altérite. Si la terrasse est peu rabotée (en aval) les sols sont rouges ferrallitiques avec "stone line" possible, sans grandes différences morphologiques avec les sols de la surface fini-tertiaire. Mais il y a alors souvent des recouvrements colluviaux. Dans ces cas favorables, la terrasse ancienne est recherchée pour les cultures sèches.

Lorsque la terrasse est décapée, l'altérite argilo-sableuse compacte rosâtre ou blanchâtre à sables grossiers et cailloutis de quartz affleure (en amont). La terrasse présente une très faible valeur agricole.

IV.4. *LES INTERFLUVES (fig. 7)*

Sous la surface fini-tertiaire, la couverture d'altération, d'une vingtaine de mètre d'épaisseur au-dessus des migmatites saines fissurées, montre la séquence suivante du haut vers le bas :

- *un matériau ferrallitique rouge remanié (sur une courte distance)*

Il est homogène en couleur, granulométrie (argile à argile sableuse sans cailloux) et structure. Son épaisseur est de 1 à 3 mètres. Il repose fréquemment sur une « stone line » quartzreuse discontinue, due au fauchage, au démantèlement et à l'étalement des filons de quartz lors de la mise en place de cette couche supérieure. Si la « stone line » n'existe pas, on ne peut pas voir de différence avec le sommet du matériau autochtone inférieur, altéré de la même façon. Le matériau est composé de kaolinite de sesquioxydes de fer et d'alumine et de sables quartzeux. Sa perméabilité verticale est très élevée.

- ***un épais manteau altéritique kaolinique isovolumique (non remanié)***

Il constitue la plus grosse partie de la couverture, avec une quinzaine de mètres d'épaisseur.

Il provient de l'hydrolyse totale des migmatites, sans variations de volume ni remaniement mécanique (les filons de quartz non déplacés le traversent). Il est composé essentiellement de kaolinite, d'hydroxydes de fer et de sables quartzeux ; l'argilification kaolinique, la libération de fer (couleur rouge) et la fragmentation des quartz (sables fins et limons) sont plus marqués au sommet du matériau. Celui-ci présente donc la différenciation progressive moyenne suivante :

- au sommet, sur 1 à 3 mètres : couleur rouge, texture argileuse à argilo-sableuse, bonne structuration.
- En dessous, sur 3 à 5 mètres : couleur moins vive (rosâtre), texture argilo-sableuse à sablo-argileuse (sables plus grossiers), structure devenant plus massive.
- dans la moitié inférieure, sur 5 à 10 mètres : couleur rosâtre à blanchâtre, texture sablo-argileuse à sables grossiers et graviers quartzeux, structure massive. C'est dans cette partie que la « nappe phréatique d'altérites » fluctue pendant l'année (fluctuation d'environ 3 mètres), la base étant noyée en permanence. Cette nappe « libre » est totalement déminéralisée (conductivité inférieure à 40 $\mu\text{s}/\text{cm}$). C'est cette nappe, alimentée directement par les pluies tombant sur le bassin local, qui affleure en bordure du bas-fond (ligne de sourcins).

L'ensemble de ce matériau altéritique présente une forte perméabilité verticale ($4 \cdot 10^{-4}$ m/s) et une perméabilité horizontale plus faible (10^{-6} m/s). Son coefficient d'emmagasinement (porosité utile) est de l'ordre de 6 %. Sa transmissivité est comprise entre $2 \cdot 10^{-6}$ et $5 \cdot 10^{-5}$ m²/s.

Une autre différenciation de ce matériau altéritique, plus localisée cette fois, apparaît à l'approche du bas-fond, en bas de versant et sous le glacis de suffosion. A ces endroits ([fig. 7](#) et [fig. 8](#)) le manteau altéritique kaolinique est peu épais et correspond à la frange de fluctuation assez étroite (1 à 2 mètres) de la nappe phréatique. Il est fortement argilifié, marmorisé à grandes taches rouille (« plinthite ») ou décoloré (blanchâtre) par redistribution ou passage du fer à l'état ferreux par la nappe.

- ***une « arène » en cours d'hydrolyse, isovolumique (non remaniée)***

Il s'agit de la « roche pourrie » désagrégée, noyée en permanence par la nappe phréatique riche en éléments dissous libérés par l'hydrolyse active des minéraux encore reconnaissables. Ce matériau, d'une épaisseur de 2 à 6 mètres, se poursuit dans les fissures du socle. Sa teinte est claire (blanchâtre à l'état sec).

La partie supérieure de l'arène quartzo-felspatho-micacée est argilifiée, par néoformation de montmorillonite à partir de la silice libérée par l'hydrolyse en cours. Ce « chapeau », discontinu, de teinte olivâtre, peut avoir 2 Mètres d'épaisseur. Il a un rôle important dans le confinement de la nappe profonde (nappe « arène/socle »), maintenue semi-captive et relativement isolée de la nappe d'altérite libre du manteau altéritique supérieur. Cette nappe diffère aussi de la première par le fait qu'elle est nettement plus minéralisée (conductivité : 200 à 300 $\mu\text{s/cm}$). Contrairement à la nappe libre supérieure, la nappe « arène-socle » semble avoir un bassin d'alimentation régional beaucoup plus vaste que le petit bassin du bas-fond.

La perméabilité verticale de l'arène est de l'ordre de 4.10^{-6} m/s. Sa porosité utile est très faible (environ 0,1 %).

Les versants de raccordement convexes et escarpés qui relient la surface fini-tertiaire aux terrasses et vallées, sont généralement le lieu d'une érosion importante en glissements, arrachements, terrassettes ("pieds de vache"). Ils sont donc décapés jusqu'à l'altérite argilo-sableuse compacte. Les sols y sont damés et l'eau y ruisselle en abondance. La végétation graminéenne elle-même (*Aristida*, *Hyparrhenia*) a du mal à s'y maintenir.

V. FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ([fig.8](#), [fig.9](#), [fig.10](#))

1. LES NAPPES SOUS LES INTERFLUVES (fig.8, fig.9, fig.10)

Il existe deux aquifères permanents :

- **un aquifère libre** logé dans les altérations argilo-sablo-kaoliniques (porosité utile 6 %), qui possède une amplitude de fluctuation pendant l'année, de l'ordre de 3 mètres ([fig.9a](#)). Son niveau supérieur est situé entre 8 et 15 mètres de profondeur, sous la surface fini-tertiaire.

Cette nappe est directement alimentée par les pluies. Elle a une conductivité électrique extrêmement faible (moins de 20 $\mu\text{s/cm}$). Son bassin d'alimentation est le bassin topographique entourant la bas-fond.

La nappe libre se vidange en permanence autour et en bordure du bas-fond, où elle s'égoutte pendant toute la saison sèche (ligne de suitements et sources).

La réponse de cette nappe aux pluies est d'environ 10 jours, temps nécessaire à l'infiltration sur une dizaine de mètres, soit environ 1 mètre par jour ce qui est une valeur élevée. Ceci est en bon accord avec la perméabilité verticale mesurée (DARCY) du matériau qui est de l'ordre de 10^{-4} m/s.

- *un aquifère semi-captif*, situé sous les altérations précédentes, à partir de 12 à 18 mètres de profondeur. Elle est logée dans les arènes micacées (argilifiées au sommet) qui se prolongent en profondeur dans les fissures du socle sain.

La porosité utile de ce réservoir, très faible, est de l'ordre de 0,1 %. La conductivité électrique des eaux est comprise entre 200 et 400 $\mu\text{s/cm}$. Cette nappe, régionale, est en relation avec un bassin qui paraît très vaste. Elle est en pression sous un "chapeau" argileux montmorillonitique de 1 à 3 mètres d'épaisseur imprégnant le sommet de l'arène micacée. La pression de cette nappe fluctue pendant l'année en fonction de son alimentation plus ou moins lointaine et des temps de transit. Sa mise en charge est retardée par rapport à la "montée" de la nappe libre ([fig.9a](#)). Elle se prolonge 2 à 3 mois après la fin des pluies jusqu'à début juin, alors que la décrue de la nappe supérieure s'effectue depuis mi-mars. On observera un décalage comparable, bien que moins long, sous le bas-fond, alimenté par ces 2 nappes. Les essais de pompage et les mesures de conductivité dans la nappe libre ont montré qu'il y avait des échanges par drainance verticale entre les 2 nappes, dont les sens dépendent des pressions partielles au cours du cycle hydrologique.

2. LES NAPPES SOUS LA SURFACE DU BAS-FOND

Comme sous les interfluves, 2 nappes principales permanentes semblent exister :

- *une "nappe d'arène-socle" logée dans la "roche pourrie"* argilifiée en montmorillonite au sommet, qui constitue le "substrat" du bas-fond ;

- *une nappe logée dans la série de matériaux supérieurs* qui sont de bas en haut ([fig.9b](#)) : les sables lavés, le niveau organique plus ou moins tourbeux, le recouvrement argileux colluvial.

Quand on enfonce des piézomètres en profondeur, crépinés soit dans l'arène argilo-micacée, soit dans les sables lavés ou le matériau organique, on constate que, même lorsque la rizière est sèche, les niveaux piézométriques montent la plupart du temps au-dessus de la surface topographique. Ces nappes sont donc en pression (semi-captives). Le niveau de la nappe des arènes est généralement au-dessus de celui de la nappe "sables lavés/matériau organique". La pression de la première est donc le plus souvent supérieure à celle de la seconde. Elle est également supérieure en amont du bas-fond qu'en aval.

Pendant l'année, les suivis piézométriques réguliers ont montré que :

les pluies commençant vers début octobre, la mise en charge de la nappe supérieure débute très peu de temps après (moins d'une journée souvent) ; son maximum est atteint fin mars (le maximum pluviométrique étant fin janvier). La décrue se poursuit ensuite jusqu'à la fin septembre (étiage).

Quand à la nappe profonde (vers 2 mètres) la mise en charge débute début novembre (décalée d'environ 1 mois par rapport à la nappe supérieure), monte d'abord assez rapidement jusque vers fin février, puis lentement jusqu'à début mai donc en pleine saison sèche. Le niveau piézométrique commence à redescendre début juillet pour atteindre l'étiage seulement fin octobre. Dans toute la moitié amont du bas-fond, le niveau piézométrique de la nappe d'arène est situé au-dessus de la surface du sol toute l'année y compris en fin de saison sèche. En tête de bas-fond ce niveau est à + 20 cm en octobre et à + 30/40 cm de février à juin.

Dans l'espace maintenant, le long du bas-fond, les débuts de la décrue et débuts de mise en charge des 2 nappes présentent des décalages ([fig.9c](#)) :

. concernant le début de la décrue :

la nappe d'arène amorce sa descente vers le 15 juillet en aval et seulement un mois et demi après, début septembre, en amont. Pour la nappe supérieure, le décalage entre l'amont et l'aval va en sens inverse et est plus étroit; il est plus précoce en amont (mi-mars) qu'en aval (fin mars). Ce retard est dû au volume d'eau "égoutté" et à la durée de cet égouttage, plus grand en aval qu'en amont.

. concernant le début de la mise en charge :

la nappe d'arène commence à monter mi-novembre en aval et début janvier en amont (1 mois et demi de décalage environ). Par contre, la mise en charge de la nappe supérieure (alimentée par les pluies tombant directement sur le bassin du bas-fond) est à peu près synchrone dans tout le bas-fond. Elle suit très vite les pluies (quelques jours). Rappelons que sous les interfluves, la nappe supérieure libre monte avec un décalage de 10 à 15 jours par rapport aux pluies. C'est le temps nécessaire à l'infiltration sur environ 10 mètres. La réponse plus rapide dans le bas-fond est due, en plus de la faible profondeur de la nappe, à l'alimentation par un **ruissellement important et très rapide** sur les versants escarpés, damés et imperméables, entourant le bas-fond ([fig.5](#)).

3. LES ECOULEMENTS LONGITUDINAUX AU BAS-FOND

- Les écoulements de surface

Avant de s'étaler dans les rizières, les eaux de ruissellement et les eaux de la nappe phréatique logée sous les versants sont captées par les **drains périphériques au bas-fond** ([fig. 8](#) et [fig. 10](#)). Ces canaux " ont entre 50 à 150 cm de profondeur. Ils collectent deux arrivées d'eau:

. **les ruissellements** intenses qui dévalent les versants escarpés (20 à 40 % de pente) dominant directement le bas-fond ([fig.5](#)). Ces versants sont damés et très peu perméables. On peut considérer que le ruissellement y est de 50 à 100 % sur les versants des 2/3 amont du bassin et sur tous ceux de la rive droite.

. **la nappe phréatique libre du manteau altéritique**, sub-superficielle en bas de versant ou de terrasse ([fig.8](#), [fig.10](#)) et court-circuitée par les talus "externes" des canaux. Les paysans creusent leurs canaux dans l'argile kaolinique blanchie ou tachetée, imprégnée en permanence ou temporairement par la nappe.

Les canaux communiquent dans un sens ou dans un autre avec les casiers en fonction des besoins (remplissage des rizières ou évacuation du trop d'eau). Ces branchements sont échelonnés le long et de part et d'autre du bas-fond. Ils sont ouverts ou fermés par les riziculteurs, ainsi que les communications d'une rizière à l'autre, en fonction des besoins individuels et communautaires, ainsi que de la hiérarchie sociale. A l'exutoire du bas-fond, les débits moyens annuels ([fig.9b](#)) sont maxima en février (60 l/s) et inférieurs à 2l/s en septembre -octobre -novembre (étiage). Le maximum journalier peut atteindre 300 l/s. Lorsque toutes les rizières sont déjà en eau (à partir de fin décembre), les pics instantanés sont étroitement liés aux pics des averses, avec retard, de quelques heures. C'est alors essentiellement le ruissellement rapide sur les versants (via les canaux collecteurs) qui est en cause. Les rizières pleines n'ont alors plus de rôle amortisseur.

Pendant la mise en eau des rizières et le repiquage (novembre-décembre), les fortes averses ne se retrouvent pas rapidement aux jaugeages aval car les casiers échelonnés retiennent les écoulements.

Après la fin des pluies (avril), les écoulements sont le fait des émergences de la nappe phréatique et de la vidange progressive et lente des rizières. En saison des pluies il n'est pas possible de dissocier les apports directs par ruissellement de ceux des nappes. Leurs écoulements sont mélangés dans les canaux et les rizières.

-Les écoulements d'inféro-flux ([fig.8](#), [fig.10](#))

C'est la couche de **sables lavés** qui, bien que peu épaisse (moins de 50 cm), draine longitudinalement le maximum d'eau d'inféro-flux. Des 4 matériaux superposés du bas-fond, c'est celui qui possède la perméabilité latérale la plus élevée. Il a justement acquis ces propriétés du fait des circulations intenses d'eau et suivant une pente hydraulique très sensible (0,2% en aval, 3 à 4% en amont). Il y a une discontinuité très marquée entre l'arène micacée argilifiée profonde en place et le sable lavé qui a subi un fluage latéral. Cette limite est parfois soulignée par un placage de cailloutis de quartz filonien ("stone-line").

L'eau qui circule dans les sables lavés provient en majeure partie de l'aquifère altéritique "libre" sous les interfluves qui converge en étant canalisé sous le bas-fond.

Une fois dans les sables lavés, l'eau se trouve en pression sous les matériaux supérieurs peu perméables du bas-fond (niveau organique et colluvions argileuses). Le matériau tourbeux est noyé en permanence mais l'eau y circule peu latéralement sa perméabilité étant extrêmement faible (moins de 10^{-9} m/s). D'amont vers l'aval la perméabilité du niveau organique augmente, en même temps qu'il passe de la tourbe franche au limon organique ($K_h = 10^{-6}$ à 10^{-5} m/s).

La circulation dans les sables lavés est également alimentée en partie, à certaines périodes de l'année, par la drainance ascendante de la nappe "arène/socle" à travers le chapeau montmorillonitique qui imprègne le sommet de cette arène, et qui maintient la nappe profonde semi-captive. Enfin, le rôle de la drainance descendante de l'eau d'inondation des rizières, à travers les matériaux supérieurs n'est sans doute pas négligeable.

Sous le bas-fond, les échanges entre l'eau des sables lavés et ceux des matériaux inférieurs ou supérieurs, par drainance ascendante ou descendante, sont très difficiles à déterminer. Ils sont conditionnés par les pressions respectives (variables pendant l'année) des nappes en charge, par la pente hydraulique de ces nappes (plus fortes en amont qu'en aval), par les débits dans les sables lavés.

Des suivis de conductivité électrique et de température de l'eau des sourcins où affleure la nappe altéritique libre qui recoupe les bas de versants ont montré ([fig.9d](#)) des évolutions significatives (GRILLOT, 1990). En saison sèche (et fraîche) ces 2 variables décroissent régulièrement jusqu'à début juin où elles remontent légèrement, avant de redécroître au mois d'août. La nappe libre dont la température est liée à la température de l'air est donc "polluée" à cette époque (juin-août) par la nappe profonde semi-captive dont la température, plus tamponnée pendant l'année, est alors plus élevée. Cette drainance ascendante est confirmée pendant cette même période par une légère remontée de la conductivité électrique, la nappe profonde étant beaucoup plus minéralisée.

On peut donc supposer que cette drainance ascendante de la nappe arène-socle minéralisée se produit également sous le bas-fond en saison sèche, de juin à août. C'est l'époque où la pression de cette nappe est encore élevée alors que celle de la nappe des sables lavés est en forte décroissance. Cet effet, peut être bénéfique pour la rhizosphère du riz, est d'autant plus important que l'on se trouve en amont du bas-fond.

VI. SPATIO ET DIACHRO-SEQUENCES DANS LE BAS-FOND : SOLS, ETATS PHYSICO-CHIMIQUES ET REPONSES DU RIZ (fig.12)

Nous avons vu comment se répartissent le long du bas-fond, depuis sa "tête" jusqu'à la plaine alluviale, les matériaux et les sols, comment l'eau y circule pendant l'année.

Cela permet d'affirmer que les processus d'engorgement (nature et durée) et donc que les « ambiances » physico-chimiques et microbiologiques prévalant dans la rhizosphère du riz ne sont pas les mêmes d'amont en aval et d'en expliquer les raisons de façon satisfaisante.

Pour compléter ce diagnostic, des mesures et suivis réguliers in-situ des variables d'état pertinentes d'ordre physico-chimique ont été réalisés dans différents tronçons du bas-fond d'amont vers l'aval. Ces mesures, faites à 8 cm de profondeur dans l'horizon de la rhizosphère du riz, ont porté sur le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, la teneur en fer ferreux dans la solution du sol et la température.

Parallèlement, ont été mis en place des essais, échelonnés dans le bas-fond avec quelques traitements simples (fumier, NPK, NPK + fumier).

En plus de cela, 200 séries d'analyses de feuilles (prélevées au stade début floraison) ont été effectuées dans les rizières cultivées de façon traditionnelle et toujours échelonnées d'amont en aval.

La mise en relation de toutes ces données, leurs variations dans le temps (l'année) et l'espace (le bas-fond), nous ont permis de confirmer que la réponse de la plante était effectivement étroitement corrélée ; à l'évolution de l'ambiance physico-chimique du sol et que son "gradient de comportement" (spatio- séquence) était le même que les gradients pédo-hydrologiques et physico-chimiques. Les conditions de mise en oeuvre des protocoles d'essais, suivis et analyses ont été mentionnées par ailleurs (rapports d'avancement de l'ATP) et nous n'y reviendrons pas. Ils ont été réalisés par le FOFIFA, le LRI, et le CIRAD entre 1987 et 1989.

Tous les résultats ont été repris. Nous mentionnerons ici, non pas les "nuages de points" mais les moyennes des résultats que nous alignerons sur des courbes "lissées", en fonction du

temps et/ou référerons à leur situation dans l'espace, ceci de façon à représenter côte à côte de façon claire les sens de variations des phénomènes et leurs inter-relations.

La [figure 12](#) résume ces résultats.

Les paramètres physico-chimiques ont été mentionnés pour **la période significative de changement** pour la plante et le sol, qui s'étend depuis la fin de la saison sèche (à réoxydation maxima) juste avant la mise en eau (vers fin octobre), jusqu'à 50 jours après la submersion des rizières. On constate en effet que 20 à 40 jours est le temps moyen nécessaire et suffisant à la stabilisation du pH, du potentiel redox et de la teneur en fer ferreux du sol. A partir de là, les conditions d'engorgement et de réduction sont maxima jusqu'à la vidange des rizières précédant de 1 semaine à 15 jours la récolte (mars).

1. Acidité, potentiel d'oxydo-réduction-concentration en fer ferreux

-Brefrappel

Avant d'exposer et de commenter les résultats, rappelons très brièvement les processus en cause.

En régime d'engorgement, une microflore anaérobie s'installe et respire en consommant la matière organique oxydable dans le sol. Cette microflore peut être non rhizosphérique ou périracinaire et spécifiquement rhizosphérique grâce aux exudats organiques racinaires ([fig.11](#)).

L'accepteur final d'électrons fournis par la matière organique n'est plus l'oxygène, mais une substance minérale réductible tels que le fer ferrique (Fe^{+++}) ou le manganèse manganique (Mn^{+++}).

Ce processus microbien libère dans le sol des substances réduites, en particulier du fer ferreux (Fe^{++}) soluble. Ce transfert d'électrons est traduit par une grandeur appelée potentiel d'oxydo-réduction (Eh), qui est mesurable avec un appareil à électrodes. Dans les sols de rizières, il est commandé en grande partie par le couple $\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$. D'autre part, en sols acides à l'état réoxydé, le phénomène de réduction qui accompagne l'engorgement progressif et l'inondation des rizières, s'accompagne de variations de pH évoluant vers la neutralisation. Cette évolution peut s'expliquer par l'accumulation de l'ammoniaque (réduction des nitrates), la consommation d'ions H^+ dans les réactions du type : $\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3 \text{H}^+ + e \rightarrow \text{Fe}^{++} + 3 \text{H}_2\text{O}$, et

la formation de bases faibles (telles que les hydroxydes ferreux ou manganoux (PONNAMPERUMA, ; 1972; VIZIER, 1978; DE DATTA, 1981).

La mesure de la concentration en fer ferreux est très délicate (réoxydation rapide). C'est sa teneur dans la solution du sol qui est le plus spécifique pour l'absorption racinaire. Mais elle est difficile in-situ par les bougies poreuses. C'est pourquoi VIZIER (1990) propose sa mesure dans le sol saturé d'eau, donc comprenant non seulement le fer ferreux en solution mais aussi le fer ferreux adsorbé dans la phase solide ou chélaté avec des substances organiques. Cette mesure est donc un indicateur de l'état de réduction du milieu, mais pas de la faculté du fer à rentrer dans la plante.

En général les cinétiques de ces 2 concentrations ont les allures suivantes ([fig.13](#)) : le fer ferreux dans la solution du sol augmente très vite vers 10 à 40 jours après saturation. Après ce pic, il y a une décroissance plus lente puis une stabilisation. Dans le sol saturé, la teneur en fer ferreux augmente encore plus fortement jusque vers 10-30 jours puis se stabilise à cette valeur élevée.

Donc, si, globalement la teneur en fer ferreux du sol saturé ne cesse de croître, celle de la solution passe par un pic. Une telle cinétique est la conséquence de l'immobilisation progressive du fer ferreux par la phase solide du sol (adsorption, chélation, piégeages ...) le rendant progressivement moins soluble après le pic (VIZIER, 1983). Pour un sol et un régime hydrique donnés, la valeur et la date de ce pic par rapport au stade du riz sont donc importantes à connaître. Les auteurs ne s'accordent pas sur la concentration en fer dans la solution au-delà de laquelle, il y a apparition de symptômes de toxicité. TANAKA et AL, (1970) donnent une fourchette de 100 à 500 ppm.

-Exposé des résultats ([fig.12a](#))

Au moment de la submersion (en fin de saison sèche), les sols sont dans leur état maximum de réoxydation. Partout le potentiel redox Eh est à son niveau le plus haut. Celui-ci est très faible en tête de bas-fond ($Eh = -400$ à -200 mV) où il y a eu peu de réoxydation en saison sèche, alors qu'elle est élevée en aval et dans la plaine ($Eh = + 200$ à $+ 500$ mV). Pour le pH, c'est l'inverse ; il est partout à son niveau le plus bas ($pH = 6,7$ à $7,3$ en amont, $pH = 5,2$ à $5,5$ en aval). A cette période la teneur en fer ferreux du sol (ramené à son poids sec) est minima (4000 à 7500 ppm en amont, 800 à 2000 ppm en aval).

A partir de la mise en eau, le pH et la teneur en fer ferreux augmentent alors que le Eh diminue, à des vitesses rapides pendant 20 à 30 jours, avant stabilisation. Seuls les sols d'extrême amont varient peu, ne s'étant de toute façon pas réoxydés auparavant. Ce sont les sols qui avaient été les mieux réoxydés en saison sèche qui "bougent" avec les pentes les plus

fortes. Au bout de 20 à 30 jours les écarts se réduisent avec tendance à la convergence des valeurs :

-en amont : Eh = -200 à -150 mV, pH = 6,9 à 7,2,

(Fe⁺⁺) = 7000 à 7500 ppm

-en aval: Eh = -100 à -50 mV, pH = 6,9 à 7,0,

(Fe⁺⁺) = 3000 à 5000 ppm.

En position intermédiaire dans le bas-fond, les courbes de variations sont encadrées par celles des extrêmes aval et amont.

Pour référence, pour qualifier l'état de réduction d'un sol on peut se baser sur l'échelle suivante .(VIZIER et Al, 1991 ; PATRICK, 1981 ; YU TIEN REN, 1985)

.réduction faible: Eh > 200 mV et Fe⁺⁺ < 500 ppm

.réduction moyenne: 0mV < Eh < 200 mV et 500 < Fe⁺⁺
< 3500 ppm

.réduction forte: -100 mV < Eh < 0mV et 3500 < Fe⁺⁺
< 7500 ppm

.réduction très forte: Eh < -100 mV et Fe⁺⁺ > 7500 ppm

Pour la nutrition minérale du riz le Eh optimal serait compris entre + 10 et + 120 mV (PONNAMPERUMA, 1978), ce qui n'est jamais le cas pour les 2/3 du bas-fond et 5 à 10 jours seulement .. après le repiquage (période critique il est vrai) pour l'aval. En dessous de - 100 mV il faut s'attendre à des déséquilibres nutritionnels importants, en relation avec la mise en solution de fortes doses de fer ferreux, et ceci d'autant plus que ces conditions surviennent pendant la phase de repiquage et la phase végétative du riz (TANDANO, 1974), c'est à dire les 40 premiers jours. Tout le bas-fond, sauf l'extrême aval. est soumis à ces conditions en permanence ou plus de 10 jours. Les analyses foliaires (voir plus loin) confirment bien que le fer rentre en quantités toxiques dans la plante.

Transversalement au bas-fond maintenant, la concentration en fer ferreux dans le sol semble dépendre de la proximité des drains latéraux. Dans une section du tronçon central avec drain sur le côté gauche, les teneurs en fer ferreux, 40 jours après le repiquage, montrent un gradient sensible (DE GIUDICI, 1989), avec 3000 ppm près du drain et 4800 ppm au centre du vallon ([fig.14](#)). Sur ce transect, les effets d'apports de fumier (10T/ha) et de terre rouge (100 T/ha) sont également sensibles sur la teneur en fer ferreux. Il s'avère que le fumier favorise les

processus microbiens de réduction du fer et qu'au contraire la terre de colline les inhibe. L'effet du fumier s'explique par le fait que sa matière organique facilement oxydable apporte un supplément de source énergétique à la flore anaérobie ferri-réductrice augmentant ainsi la libération de fer ferreux. Ceci est connu depuis longtemps (RODRIGO et POLLARD 1962 ; HOWELER, 1973). Ce résultat paraît contradictoire avec l'effet bénéfique du fumier sur les rendements, constaté par tous les paysans. On peut avancer comme hypothèse que le fer ferreux s'insolubilise par chélation au sein des acides fulviques issus du fumier.

Quand à l'effet de la terre rouge ferrallitique, elle apporte du fer à l'état essentiellement cristallisé (hématite, goethite), très peu solubilisable par la micro-flore. C'est surtout le fer amorphe ($\text{Fe}(\text{OH})^3$) qui est facilement réductible; or, dans les sols ferrallitiques des bordures, il y en a très peu, moins de 4 % du fer total ([fig.15](#)). Cet effet a également été constaté par d'autres auteurs (Y AMANE, 1978 ; LIU ZHI-GUANG, 1985). L'apport de terre rouge en mélange avec le sol de bas-fond est d'autant plus net que ce sol est plus fortement réduit ([fig.13](#)).

- Comparaison fer ferreux en solution et fer ferreux dans le sol :

Un échantillon situé en aval du bas-fond, DE GIUDICI (1988) a été soumis en laboratoire à une saturation progressive, avec recueil des percolats (assimilés à la solution du sol), sur lesquels ont été dosées les teneurs en fer ferreux. La comparaison de cette cinétique avec celle du fer ferreux dosé dans le sol saturé (DE GIUDICI, 1989), est illustrée par les courbes de la [fig.13](#).

Dans les percolats le maximum (200 ppm) est atteint au bout de 35 jours après saturation, puis la teneur redescend lentement jusque vers 100 ppm. Dans le sol saturé l'augmentation est très forte et atteint un maximum de 4000 ppm (rapporté au sol sec) stabilisé au bout d'environ 30 jours.

2. Analyses foliaires ([fig.12d](#)) I

L'élément des feuilles présentant la meilleure corrélation avec les conditions d'engorgement est le fer. Très élevée dans la partie amont, avec 500 ppm, sa concentration diminue régulièrement jusqu'à 200 ppm dans la plaine alluviale. A titre de référence on considère souvent (TANAKA et YOSHIDA, 1970) que 300 ppm est une valeur-seuil de risque de

toxicité: on le dépasse largement dans tout le bas-fond. Il faut donc s'attendre à ce que le fer, de façon directe ou indirecte, soit un élément clé de la nutrition minérale du riz.

Les teneurs en phosphore ont également des variations significatives le long de la séquence du bas-fond. Sa variation dans les feuilles est la même que celle du fer: 0,26 % en amont, en baisse régulière jusqu'à 0,20 % pour le riz de la plaine. Ce sont des valeurs relativement élevées, le niveau critique de carence étant établi à 0,10 % à ce stade (JONES, 1982). Ces résultats sont assez surprenants. En effet, il paraissent en contradiction avec le fait que le pouvoir fixateur du sol par le phosphore et son énergie de fixation augmentent avec la durée d'engorgement (SAM et MIKKELSEN, 1986). Ceci ayant été confirmé par DE GIUDICI (1988) pour les sols du bas-fond d'Ambohitrakoho. L'absorption du phosphore semble corrélée à la rentrée du fer, peut être sous la forme de phosphate ferreux soluble. Cela va dans le sens constaté dans les essais, à savoir que la réponse du riz au phosphore est plus nette dans les parties amont (qui ne se réoxydent pas) que dans les parties aval.

Les teneurs en azote, sont sensiblement partout les mêmes dans le bas-fond, environ 2,40 %. Dans la plaine la teneur est légèrement supérieure (2,50 %). Ces valeurs sont faibles (seuil critique: 2,50 %). Les -essais en rizières ont montré en effet que l'azote était mal utilisé dans les bas-fonds dont les sols se réoxydent mal.

Le **potassium**, peu variable dans les feuilles paniculaires (avec 1,20 %), est partout peu élevé (le seuil de carence à ce stade est de 1,5 %. JONES, 1982). Les paysans ne restituent pas les pailles, ce qui accentue la carence. Les essais paraissent montrer que la potasse apportée est mieux utilisée en aval qu'en amont. On sait par ailleurs (TROLLDENIER, 1981) que la carence en potasse a un rôle synergique sur la rentrée de fer ferreux dans la plante. La déficience en potassium accroît l'exudation racinaire organique, ce qui augmente l'activité de la microflore réductrice du fer au contact des racines.

Concernant le **magnésium**, sa teneur dans les feuilles est liée significativement à la spatio-séquence : de 0,050 % en tête, elle augmente régulièrement jusqu'à 0,090 % dans la plaine. Ces valeurs sont nettement en dessous du niveau critique admis (0,10%). Il y a donc partout une forte carence en magnésium.

Le **calcium** suit la même variation (0,40 % en amont, 0,33 % en plaine). Les valeurs, bizarrement, sont nettement supérieures au minimum requis (0,15 % dans les pailles).

La teneur en **silicium** (7 à 10% partout) ne signale pas de carence.

Concernant le **zinc** les essais ont montré que le riz répondait à l'apport de zinc en tête de bas-fond. JONES (1982) situe le seuil de carence dans les feuilles entre 10 et 20 ppm. Ici on est pas trop éloigné puisque les teneurs dans les feuilles sont partout autour de 19 ppm.

3. *Les rendements du riz* ([fig.12c](#))

La fig.12c indique les moyennes des rendements obtenus (toutes variétés confondues) sur toutes les parcelles d'expérimentation suivies par le FOFIFA, le long du bas-fond entre 1986 et 1989.

Les rendements actuels en riziculture traditionnelle ont été estimés assez empiriquement d'après les informations des exploitants et les multiples observations visuelles. Ces rendements paraissent plafonner , à 2 T/ha avec un gradient sensible de l'amont (1,4 T/ha) à l'aval (2 t/ha).

Cette séquence de rendements intègre les conditions intrinsèques de milieu, mais aussi les pratiques culturales (travail du sol, dates de repiquage, sarclage ...) et la gestion de l'eau, deux aspects qui sont également conditionnés par le milieu.

En essais "contrôlés", dans les conditions de réalisation du FOFIFA, les rendements ne dépassent pas 4 T/ha dans le bas-fond proprement dit (4 à 5 T/ha dans la plaine).

En règle générale, quelque soit la forme d'azote et de son époque d'apport, cet élément "marque" peu sauf en plaine. Le phosphore a une efficacité significative jusque dans les zones les plus engorgées. La potasse est mieux utilisée en aval qu'en amont. Enfin, le zinc n'a marqué (légèrement) qu'en amont. La dolomie a généralement très peu d'effets.

Enfin, il faut noter que dans tous les cas l'apport de fumier est efficace, d'autant mieux que le sol est plus hydromorphe. Ainsi, 5 T /ha de poudrette de parc (fumier + terre) augmentent les rendements de près de 30 % en amont, de 20 % au centre et de 5 à 10 % en aval. L'efficacité du fumier en rizière est reconnue depuis très longtemps par les paysans. Ils en amènent le plus souvent qu'ils le peuvent (tous les ans à tous les 5 ans en général). La composition du fumier traditionnel (C/N = 20) est la suivante (ARRIVETS, 1980) : N = 6,4 kg/T ; P₂O₅ = 2,8 kg/T; K₂O = 9,6 kg/T; CaO = 3,6 kg/T; MgO = 2,4 kg/T ...

Ces apports minéraux, à raison de 1 fois tous les 2 ans en moyenne, sont faibles. Le rôle bénéfique du fumier est donc d'un autre ordre que strictement fertilisant. pourrait favoriser l'immobilisation du fer ferreux par chélation dans les acides fulviques. !

L'apport par hectare de 60 unités N + 90 unités P₂O₅ + 45 unités K₂O + 5 Tonnes de poudrette par rapport à cette même poudrette seule, augmente les rendements de 82 % en amont de 67% en aval et de 53 % dans la plaine.

I VII. CONCLUSIONS

Le riz, dans un bas-fond mal drainé de ce type, pousse mal, pour des raisons d'absorption minérale déséquilibrée, entraînant un dysfonctionnement physiologique.

Tous les indicateurs (Eh, fer ferreux du sol, fer total des feuilles) signalent l'absorption précoce d'un excès de fer ferreux, celui-ci étant disponible en trop forte quantité dans la solution du sol. Mais le rôle du fer est indissociable des interactions Fe/N/K/P /Mg. La rentrée du fer dans la plante paraît être surtout importante pendant les 40 premiers jours après repiquage (phase de tallage) et plus spécialement durant les 20 premiers jours; c'est en effet la période pendant laquelle les plants détériorés par l'arrachage, hors des pépinières, sont stressés et exposés plus particulièrement à l'absorption du fer ferreux dont la teneur dans la solution du sol est, justement à cette même époque, en pleine augmentation vers son "pic" (20^e au 40^e jour après la mise en eau).

L'importance de ces phénomènes dépend de la durée et de l'efficacité de la réoxydation du sol pendant la saison sèche qui précède la mise en eau. Les faits sont de plus en plus contraignants d'aval vers l'amont du bas-fond. Nous avons vu pourquoi; avec la meilleure connaissance que nous avons maintenant du milieu -ses sols, son fonctionnement hydrologique, l'évolution annuelle de son ambiance physico- chimique -il nous est possible de tracer quelques axes de recherche appliquée mieux "ciblés", entre autres :

- restitution des pailles de riz, pour diminuer la carence potassique (toujours liée à l'entrée excessive de fer dans la plante).
- vidange et labour précoces des rizières après la récolte pour favoriser la réoxydation du sol,
- essais d'implantation de légumineuses fourragères,
- amélioration du réseau de drainage/irrigation pour mieux faire circuler l'eau dans les rizières (oxygénation et élimination des substances toxiques),
- soin des pépinières afin d'obtenir des plants sains résistant mieux au stress du repiquage donc à l'entrée du fer,
- utilisation de super granules d'urée enfouis, pour améliorer la nutrition azotée et limiter les pertes d'azote,

-essais d'immobilisation du fer ferreux par des apports de soufre (précipitation) ou des substances organiques (complexation) tels fumier et composts,

-repiquage précoce après la mise en eau (pour éviter le pic de fer pendant au moins 20 jours).

Il faut cependant rappeler que les successions de pratiques des riziculteurs des hauts-plateaux, quand elles sont réalisées dans de bonnes conditions, sont déjà adaptées autant que possible à ces contraintes de milieu. Les variétés locales de riz également. Ces riziculteurs ont 400 ans d'expérience dans les bas-fonds. D'autre part, le bas-fond est un milieu physique dont la mise en valeur implique, plus que celle des "tanety", une gestion communautaire, avec assez peu de marge de manoeuvre individuelle. L'ensemble de ces pratiques forment un système cohérent, même lorsque certaines, prises séparément, aux yeux de l'agronome ou du "scientifique", peuvent sembler mauvaises ou améliorables. Avant de proposer des changements, il faudra toujours s'interroger si ces changements sont compatibles avec le maintien du système, sans le remettre en cause totalement, sous peine d'être inapplicables. Si une proposition de changement ponctuel n'apporte pas des avantages très sensibles, le système traditionnel opposera donc une résistance à cette intégration, et d'autant plus s'il implique des remises en causes en cascades. Enfin, un certain nombre de contraintes socio-culturelles et de tabous ("fady"), souvent inconnues du "chercheur", s'opposent aussi aux ." changements.

A titre d'exemple, la vidange des rizières et le labour précoce après la récolte s'ils ont des effets sensibles sur l'état d'oxydo-réduction du sol au repiquage, entraîneront en revanche une prolifération des adventices qui peuvent neutraliser l'effet bénéfique du changement introduit. Celui-ci devra donc s'accompagner d'une modification de l'itinéraire technique avec introduction du repiquage en ligne et du sarclage à la houe rotative exigeant des temps de travaux et des équipements supplémentaires.

La restitution au champs des pailles de riz, recommandable en soi pour la nutrition potassique, va rompre la filière "fumier" traditionnelle ; or l'apport de fumier étant reconnu par les paysans eux-mêmes comme indispensable, va être ralenti, puisque qu'ils n'ont pas les moyens d'en acheter. Donc la proposition apparemment simple « restitution des pailles », peut être globalement néfaste aux rendements, si l'ensemble du système n'est pas revu.

De la même façon, la "valorisation" de la contre saison, les changements de dates de repiquage, des circulations d'eau différentes dans les rizières, ne peuvent être proposées aux riziculteurs sans qu'on examine avec eux les "réaménagements" de leur système actuel dans son ensemble.

BIBLIOGRAPHIE

ARRIVETS (J). RAZOANDRAMONJY (J.B.) - 1980 : Expérimentation 1974-1979 sur la fumure du riz dans la province de Tananarive. CENRADERU. 1980. 36 pages.

ARTHAUD (F.). GRILLOT (J.C.). RAUNET (M.) – 1989 : Contrôle néotectonique des directions de drainage sur les hauts-plateaux de Madagascar. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 308, série II pp. 527-530. 1989.

ARTHAUD (F.). GRILLOT (J.C.). RAUNET (M.) – 1989 : Mise en évidence d'une néotectonique en distension N-S à Madagascar (hauts-plateaux). C.R. Acad. Sci. Paris. T. 309. Pp. 125-128, 1989.

ARTHAUD (F.). GRILLOT (J.C.). RAUNET (M.) – 1990 : La tectonique cassante récente à Madagascar et son incidence sur les écoulements. Journal of Canadian Earth Sci. Vol. 27, 1990, pp. 1394-1407.

DE DATTA (S.K.) – 1981 : Principles and practices of rice production – New York, John Wiley and Sons, 618 pp.

DE GIUDICI (P.) – 1988 : Etude préliminaire de la mobilisation du fer en sol de bas-fond et ses incidences sur l'absorption du phosphore. In : « Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes-terres de Madagascar ». Rapport d'avancement, juin 1988. Montpellier CIRAD, pp. 55-76.

DE GIUDICI (P.) – 1989 : Caractérisation physico-chimique de l'état d'hydromorphie des sols de bas-fond d'Ambohitrakoho pendant le cycle du riz. In : « Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes-terres de Madagascar ». Rapport d'avancement, juin 1989. Montpellier CIRAD, pp. 49-74.

FERRY (L.), GARRETA (P.), RAZAFINDRAZAKA (J.) – 1988 : Hydrologie (Campagne 1987-1988) du bas-fond d'Ambohitrakoho. In : « Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes-terres de Madagascar ». Rapport d'avancement, juin 1988. Montpellier, CIRAD, pp. 291-306.

FERRY (L.), GARRETA (P.) – 1989 : Hydrologie (Campagne 1987-1988) du bas-fond d'Ambohitrakoho. In : « Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes-terres de Madagascar ». Rapport d'avancement, juin 1989. Montpellier, CIRAD, pp. 105-127.

GAUDIN (R.) – 1988 : L'ammoniac NH_3 , une clé pour comprendre l'efficacité des super granules d'urée en riziculture irriguée. *L'Agr. Trop.* 43 (1) : 30-36 – 1988.

GAUDIN (R.) – 1989 : De l'absorption de l'azote ammoniacal sous sa forme moléculaire NH_3 , à la sonde de fertilité : implication physiologique et intérêt agronomique. In : « Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes-terres de Madagascar ». Rapport d'avancement Juniacal 1989, Montpellier. CIRAD. Pp. 77-97.

GAUDIN (R.) – 1991 : Un dispositif enterré pour caractériser l'alimentation ammoniacal du riz irrigué. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 313, Série III. Pp. 221-225. 1991.

GRILLOT (J.C.) – 1989 : Analyse de l'estimation des débits souterrains en domaine altéritique (hauts-plateaux de Madagascar). *J. Afr. Earth. Sci.* Vol 8, n° 1. pp. 51-55. 1989.

GRILLOT (J.C.) – 1990 : Caractéristiques d'émergences en milieu altéritique d'altitude : leur apport arènes-socle (hauts-plateaux de Madagascar) *C.R. Acad. Sci. Paris*. T. 311 Série II. pp. 227-232. 1990.

GRILLOT (J.C.) – 1990 : Caractéristiques d'émergences en milieu altéritique d'altitude : leur apport à la compréhension de l'aquifère bi-couche arènes-socle (hauts-plateaux de Madagascar) *C.R. Acad. Sci. Paris*. T. 311. Série II. pp. 227-232. 1990.

GRILLOT (J.C.) – 1991 : Régime des eaux souterraines en milieu cristallin altéré : un exemple en zone intertropicale humide d'altitude (Madagascar). A paraître dans *J. Hydrological Sciences*.

GRILLOT (J.C.) – 1991 : Fonctionnement hydrologique des unités d'interfluves et de bas-fonds tourbeux : un exemple en zone de socle altéré (Madagascar). A paraître dans *J. of hydrol.* 1991.

GRILLOT (J.C.), RAUNET (M.) – 1988 : Aquifères d'arènes granitiques sous recouvrement argilolimoneux et organique (hauts-plateaux cristallophylliens, Madagascar). *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 306, série II, pp. 611-614.

GRILLOT (J.C.), FERRY (L.) – 1990 : Approche des échanges surface-souterrain en milieu cristallin altéré aquifère. *Cah. ORSTOM. Hydrol. Continent*, vol 5, n° 1, 1990, pp. 3-12.

GRILLOT (J.C.). BLAVOUX (B.). RAKOTONDRAINIBE (J.H.). RAUNET (M.). RANDRIANARISOA (N.) – 1987 : A propos des aquifères d'altérites sur les hauts-plateaux cristallophyliens de Madagascar. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 305, série II, pp. 1471-1476. 1987.

GRILLOT (J.C.). RAUNET (M.). FERRY (L.) – 1989 : Comportement piézométrique des nappes d'altérites en zone intertropicale humide d'altitude (hauts-plateaux de Madagascar). Journal of Hydrology. 120 (1990) pp. 271-282.

GRILLOT (J.C.). BLAVOUX (B.). RAKOTONDRAINIBE (J.H.). RAUNET (M.) – 1990 : Dynamique en hautes eaux des aquifères d'altérites sur les hauts-plateaux cristallophyliens de Madagascar. Journal of African Earth Sci. Pergamon Press England, vol. 9 n° 3-4, pp. 599-607, 1989.

GRILLOT (J.C.). BLAVOUX (B.). RAUNET (M.) – 1990 : Recharge des aquifères de socle en zone intertropicale d'altitude. Géodynamica Acta. Paris. 1990, 4-4, pp. 227-235.

GRILLOT (J.C.). DE ENDOLENKO (D.). DUSSARRAT (B.) – 1991 : Perméabilités de matériaux reposant sur socle cristallin : un exemple en zone intertropicale. C.R. Acad. Sci. Paris, tome 313, Série II, p. 959-964.

HOWELER (R.H.) – 1973 : Iron induced orange disease of rice in relation to physico-chemical changes in a flooded oxisol. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 37, pp. 898-903.

JONES (U.S.). KAYTAL (J.C.). MAMARIL (C.P.). PARK (C.S.) – 1982 : Wetland rice nutrient deficiencies other than nitrogen. In : « Soils and rice ». IRRI. 1992, pp. 327-380.

LIU ZHI-GUANG – 1985 : Oxydo-réduction potential. In : « Physical chemistry of paddy soils ». Science Press. Beijing Springer Verlag, Berlin, pp. 1-26.

PITAVY (C.). RATOVO (A.). RAVOANGLIARISOA (M.) – 1989 : Enquête en milieu paysan dans un bas-fond rizicole des hauts-plateaux de Madagascar. In : « Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes-terres de Madagascar ». Rapport d'avancement, juin 1989, Montpellier, CIRAD, pp. 31-45.

PONNAMPERUMA (F.N.) – 1972 : The chemistry of submerged soils in relation to the growth and yield of rice. Ph. D. Thesis. Cornell University 1972, 414 pages.

PONNAMPERUMA (F.N.) – 1978 / Electro-chemical changes in submerged soils and the growth of rice. In : « Soils and rice » IRRI Los Banos, Philippines, pp. 421-441.

PUARD (M.). COUCHAT (P.). LASCEVE (G.) – 1989 : Etude des mécanismes physiologiques d'adaptation du riz (oryza sativa L.) aux contraintes du milieu – I. Modification anatomique des racines. – II. Effets de la nutrition azotée sur la consommation d'oxygène par les racines et l'évolution de l'acidité. L'Agr. Trop. 44 (3) : 165-177.

RAKOTOARISOA (J.). PITAVY (C.) – 1988 : Expérimentations agronomiques dans le bas-fond d'Ambohitrakoho. Campagne 1987/1988. In : « Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes-terres de Madagascar ». Rapport d'avancement, juin 1988, Montpellier, CIRAD, pp. 19-27.

RAUNET (M.) – 1984 : Les potentialités agricoles des bas-fonds en régions intertropicales – L'exemple de la culture du blé de contre-saison à Madagascar. L'Agr. Trop. 1984, 39-2, pp. 121-135.

RAUNET (M.) – 1985 : Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar. Géomorphologie, géochimie, pédologie, hydrologie, Z Géomorph. N.F., suppl. Bd 52, mars 1985, pp. 25-52.

RAUNET (M.) – 1985 : Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative. L'Agr. Trop. 1985, pp. 181-201.

RAUNET (M.) – 1989 : Les terroirs rizicoles des hautes terres de Madagascar : environnements physiques et aménagements. L'Agr. Trop. 1989, 44-2, pp. -ç-_-.

RAUNET (M.) – 1989 : Approche systémique appliquée à la cartographie du paysage. 1^{er} séminaire franco-africain de pédologie tropicale SOLTROP. 89. Lomé 6-12 Fév. 1989. Edition de l'ORSTOM. Collections colloques et séminaires – Paris 1989, pp. 143-177.

RAUNET (M.) – 1989 : Enseignements méthodologiques d'une opération de recherche interdisciplinaire à Madagascar : l'étude du fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé – « Agronomie et ressources naturelle en régions tropicales » - Montpellier, 12-15 septembre 1989. Editeur IRAT, Montpellier 1990, pp. 83-104.

RODRIGO (D.M.). POLLARD (A.G.) – 1962 : Chemistry of waterlogged soils. – I. Changes in oxydo-reduction potentiels of two soils on submergence ; influence of pH and organic matter. J. Sci. Food Agric. 13 (1) pp. 43-48.

SAH (R.N.). MIKKELSEN (D.S.) – 1986 : Transformation of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 50, pp. 62-67.

TANAKA (A.), YOSHIDA (S.) – 1970 : Nutritional disorders of the rice plant in ASIA. IRRI, Tech. Bull. 10.

TANDANO (T.) - 1974 : Iron nutrition of the rice plant. 5 variations in susceptibility to iron toxicity during growth. Soil Sci. And Plant Nutr. 21 : 303.

TROLLDENER (G.) - 1980 : Iron toxicity in rice plants and nitrogenase activity in the rhizosphere as related to potassium application. In : « Proc. Symp. on paddy soils ». Springer verlag, Berlin : 375-380.

VIZIER (J.F.) – 1969 : Choix et mise au point d'une méthode de dosage du fer ferreux applicable aux sols hydromorphes minéraux. Cah. ORSTOM. Sér. Pédol., VII : 435-445.

VIZIER (J.F.) – 1978 : Etude de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Etude expérimentale sur des sols de rizière de Madagascar. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. XVI, 1 : 23-41.

VIZIER (J.F.) – 1987 : Analyse des mécanismes d'adsorption et de désorption du fer ferreux dans les milieux saturés. Cah. ORSTOM. Sér. Pédol. Vol. XXIII, n° 3. 1987 : 157-167.

VIZIER (J.F.) – 1988 : Le fer indicateur de l'hydromorphie. Etude de sa dynamique dans les sols subissant un excès d'eau. Bull. du GFHN, n° 23, 1988, pp. 25-38.

VIZIER (J.F.) – 1990 : Etude du fonctionnement des milieux saturés d'eau – Une démarche physico-chimique. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. XXV, n° 4, 1989 : 431-442.

VIZIER (J.F.), PUARD (M.) – 1989 : Influence de la fertilisation sur le comportement du riz pluvial en milieu inondé. L'Agro. Trop. 44 (4) – 1989 : 313-320.

VIZIER (J.F.), DE GIUDICI (P.), RAUNET (M.) – 1990 : Etude physico-chimique des sols de rizières d'un bas-fond sur les hautes-terres de Madagascar. Conséquences pour la riziculture. Agro. Trop. ; vol. 45, 3, 1990. Pp. 171-178.

YAMANE – 1978 : Electro-chemical changes in rice soils. In IRRI « Soils and rice » - Los Banos Philippines, pp. 381-397.

YU TIAN-REN – 1985 : Physical chemistry of paddy soils. Science Press Beijing. Springer Verlag ; Berlin Heidelberg New-York – 217 p.

MADAGASCAR = 592000 Km²

Total riziculture repiquée = 13000 Km²

HAUTS-PLATEAUX RIZICULTIVÉS = 85000 Km²

Riziculture repiquée = 9000 Km²

dont :

Bas-fonds et petites vallées

6000 Km²

HAUTS-PLATEAUX
RIZICULTIVÉS

1000-1800 m.
d'altitude

Tananarive

0 100 200 300 KM.

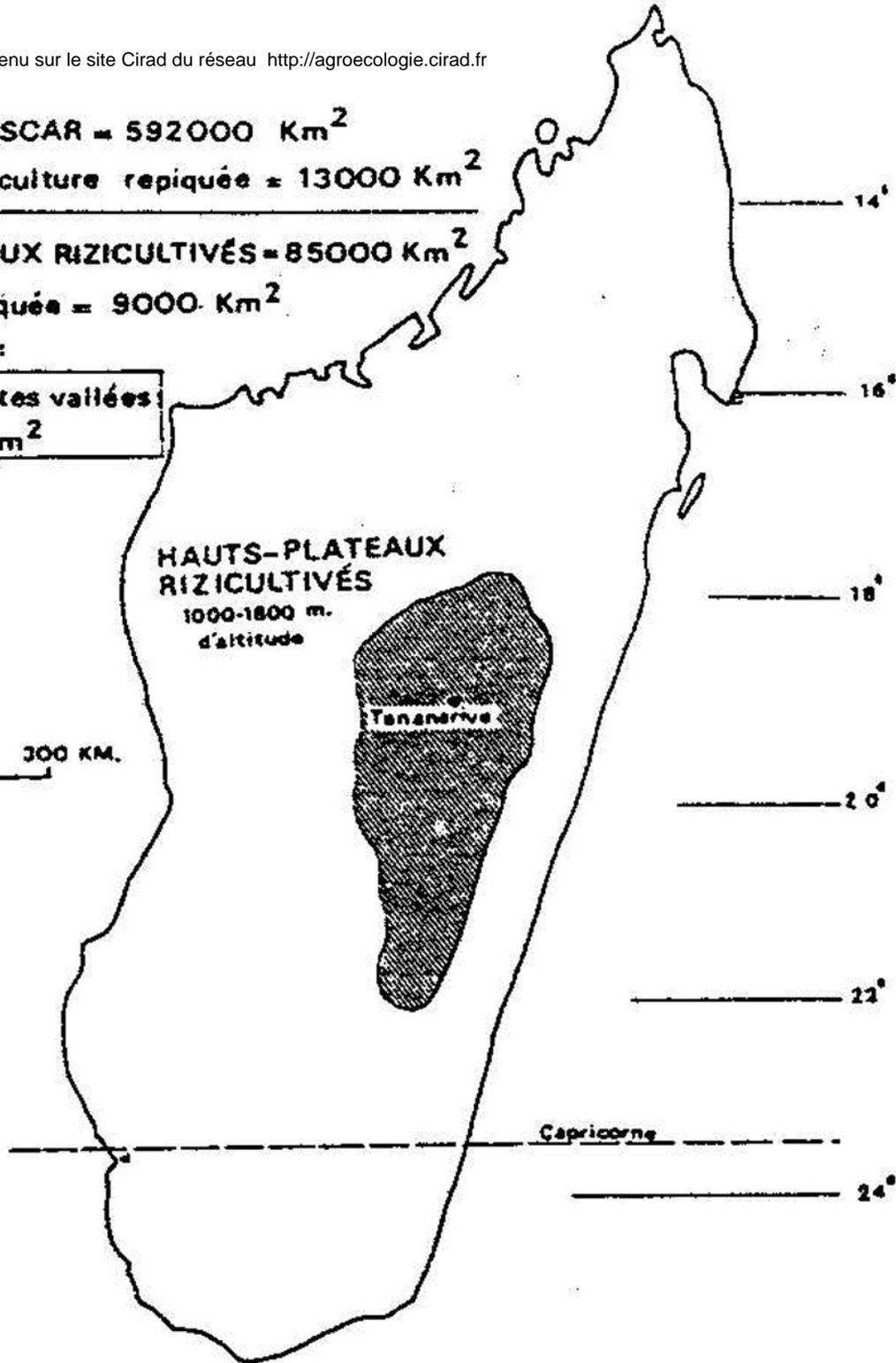
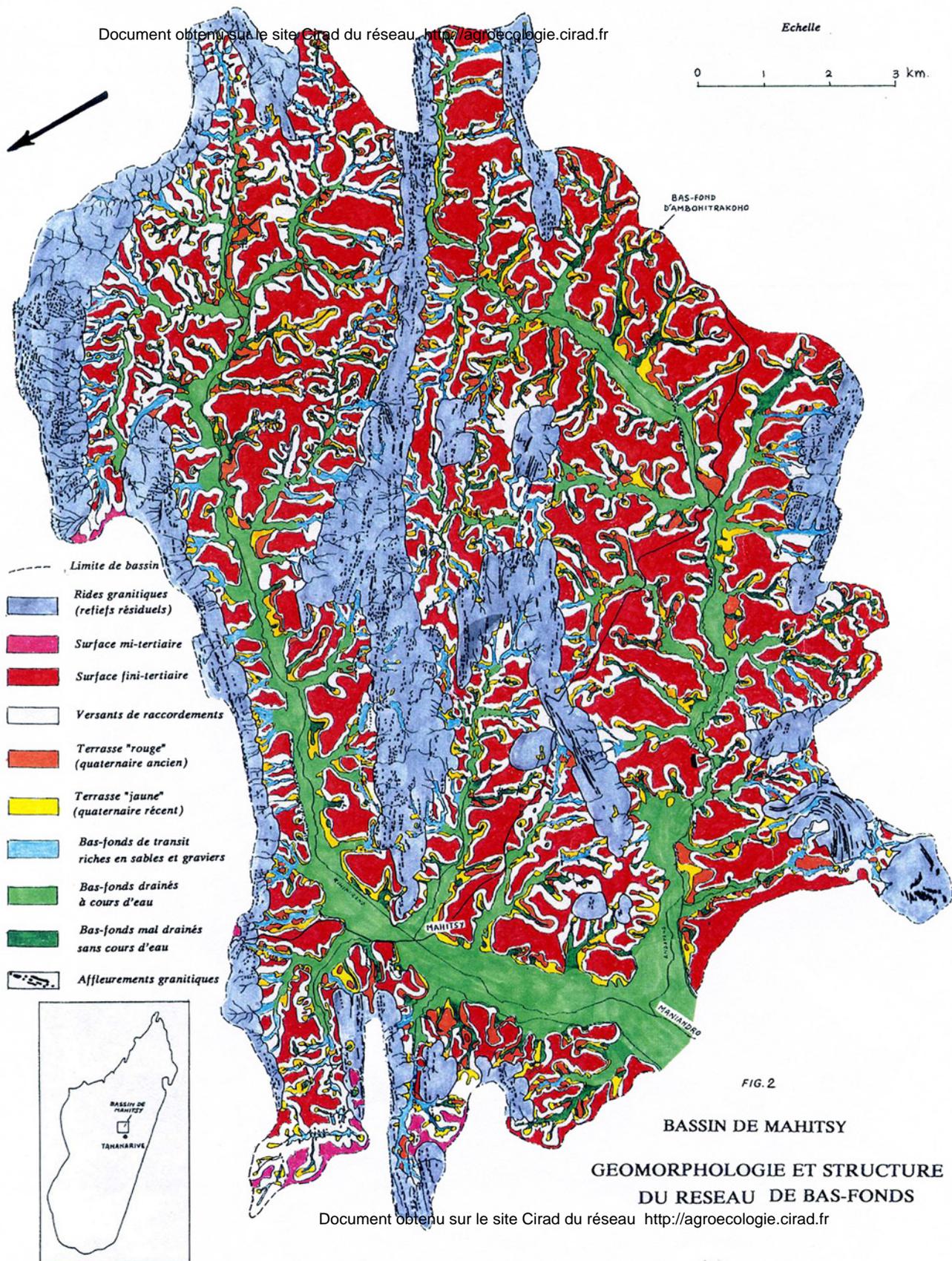


FIG. 1 IMPORTANCE DE LA RIZICULTURE DE BAS FONDS D'ALTITUDE A MADAGASCAR



N



- Limite de bassin
- Rides granitiques (reliefs résiduels)
- Surface mi-tertiaire
- Surface fini-tertiaire
- Versants de raccordements
- Terrasse "rouge" (quaternaire ancien)
- Terrasse "jaune" (quaternaire récent)
- Bas-fonds de transit riches en sables et graviers
- Bas-fonds drainés à cours d'eau
- Bas-fonds mal drainés sans cours d'eau
- Affleurements granitiques



FIG. 2

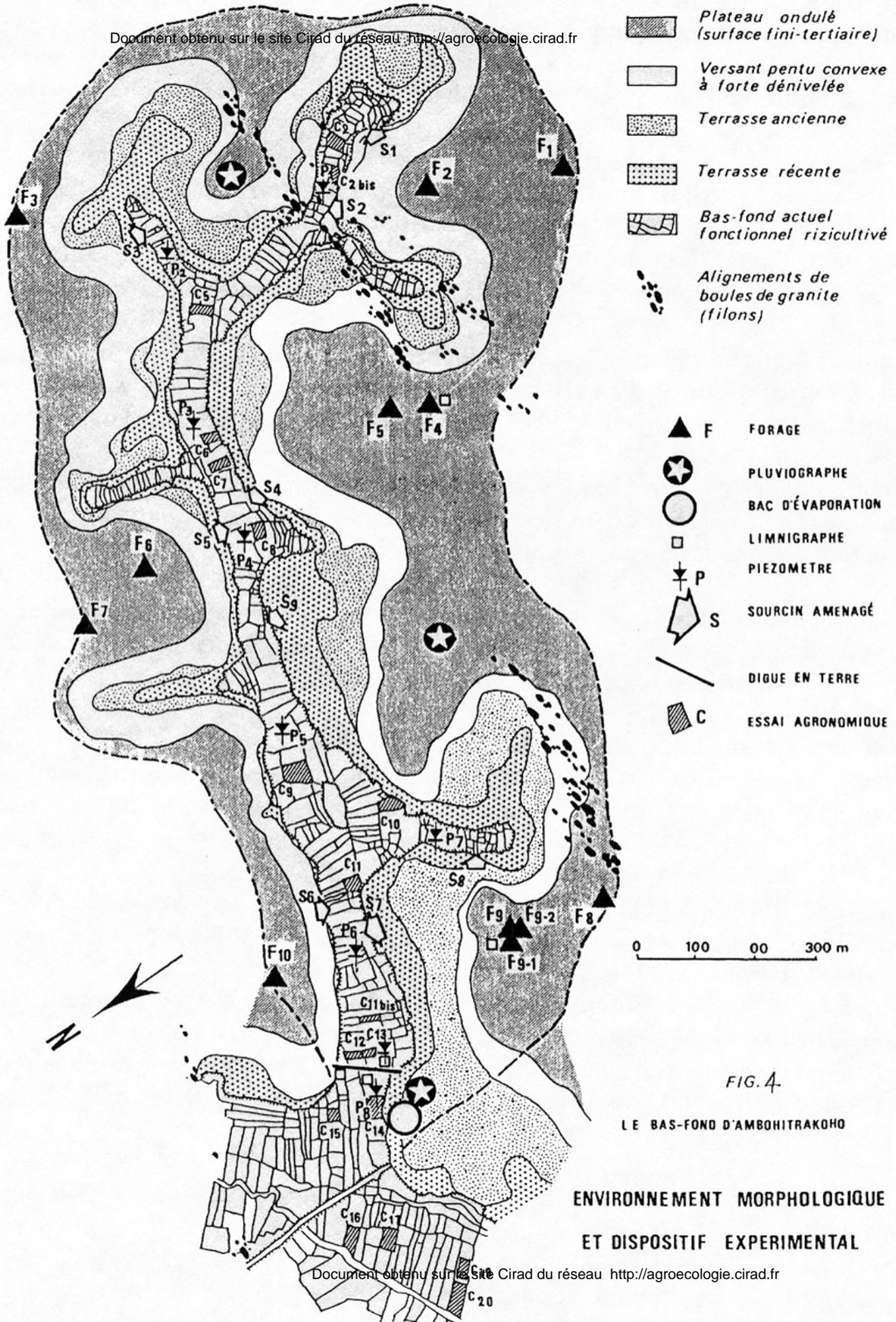
BASSIN DE MAHITSY

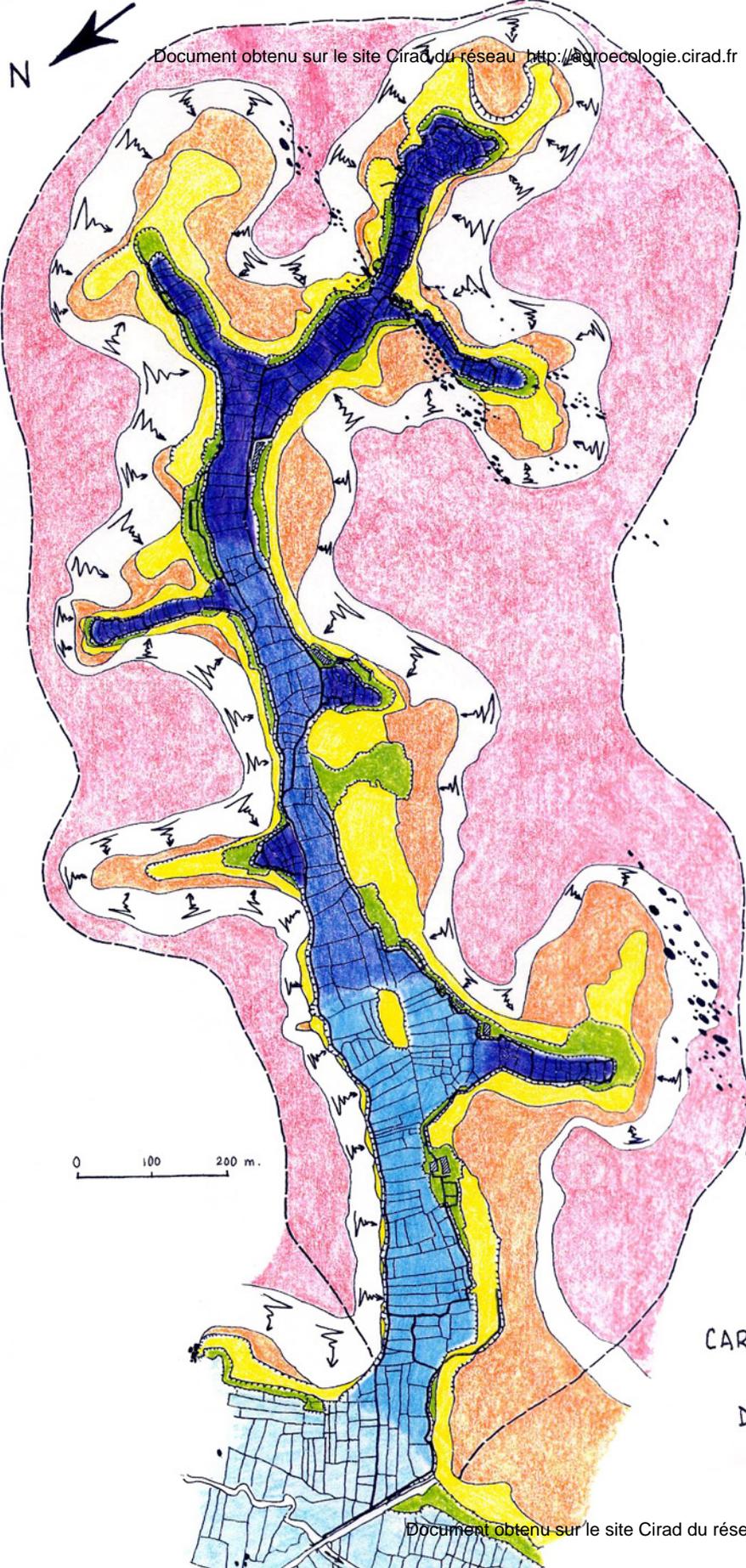
GEOMORPHOLOGIE ET STRUCTURE
DU RESEAU DE BAS-FONDS

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
PLUIES (mm)	Moyenne	255	187	264	43	8	9	17	13	16	47	170	366	1393
	Maximum	41	35	43	4	1	1	1	64	113	152	362	504	
	Minimum	58	54	102	4	1	0	1	1	0	0	61	252	
	Max. 24 H	84	89	134	67	19	32	29	33	33	69	91	105	134
HUMIDITE RELATIVE (%)	Moyenne	82	81	83	80	78	79	78	76	73	71	75	81	78
	7 H	89	90	91	90	94	94	94	92	87	85	86	87	90
	12 H	62	63	64	58	56	57	56	52	46	42	50	57	55
	17 H	72	69	71	64	62	66	63	58	54	50	59	68	63
BROUILLARDS (nombre de jours)		0,5	0,8	0,8	5,0	6,3	7,0	8,0	7,8	4,8	4,5	1,8	1,5	49
DUREE REELLE DU JOUR (heures)		12,76	12,08	11,98	11,46	11,01	10,77	10,87	11,25	12,76	12,26	12,62	12,92	11,89
INSOLATION (heures)		200	168	216	218	224	204	205	229	239	259	233	206	2611
RAYONNEMENT GLOBAL (Watt/heure) (6 ans)		18241	17422	16508	15094	13880	12112	12791	15182	17267	17090	17151	16503	
RADIATION SOLAIRE AU SOL (Cal/cm ²)		5100	4650	5160	4500	3950	3750	4000	5250	6000	7600	7250	6800	
TEMPERATURE (°C)	Max. abs.	31,1	31,6	30,5	29,7	27,5	25,8	25,2	26,0	29,0	31,1	31,8	32,0	
	Moy. max.	26,2	26,3	25,5	24,8	22,7	20,8	20,1	20,9	23,0	25,8	26,6	26,8	24,1
	Moyenne	21,4	21,4	20,9	19,7	17,2	15,2	14,5	14,9	16,5	18,8	20,5	21,2	18,5
	Moy. min.	16,6	16,2	16,2	14,5	11,6	9,5	8,8	8,8	10,0	11,7	14,3	16,0	12,9
	Min. abs.	11,5	11,0	11,0	9,1	4,8	1,0	-0,5	0	1,5	5,2	9,5	11,2	
VENTS AU SOL (%)	Calmes	9	9	8	11	8	10	8	5	5	5	3	10	7
	(inf. 5 km/h	72	69	72	67	73	67	61	49	50	72	82	76	68
	25 - 50 km/h	19	20	20	22	19	23	30	46	43	23	15	14	25
	plus 50 km/h	0	2	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0
	Direction dominante	E	E	E	SE	E	SE	SE	SE	SE	E	E	E	E/SE
ETP (mm/j)	PENMAN	4,1	3,6	3,6	2,9	2,3	1,8	1,9	2,4	3,2	4,1	4,1	4,1	3,2
	TURC	4,3	4,3	4,2	3,9	3,3	2,7	2,7	3,3	4,2	4,9	4,4	4,2	3,9
	THORNTHWAITE	2,4	2,3	2,3	2,2	2,1	1,9	1,9	2,4	2,9	3,1	2,9	2,7	2,4
EVAPORATION PICHE		3,1	2,7	2,7	2,9	3,0	2,7	2,7	3,3	3,9	4,8	4,2	3,1	3,3

FIG.3

DONNEES CLIMATIQUES MENSUELLES DE L'AEROPORT D'IVATO
(6 km du Bas-Fond d'Ambohitrakoho)

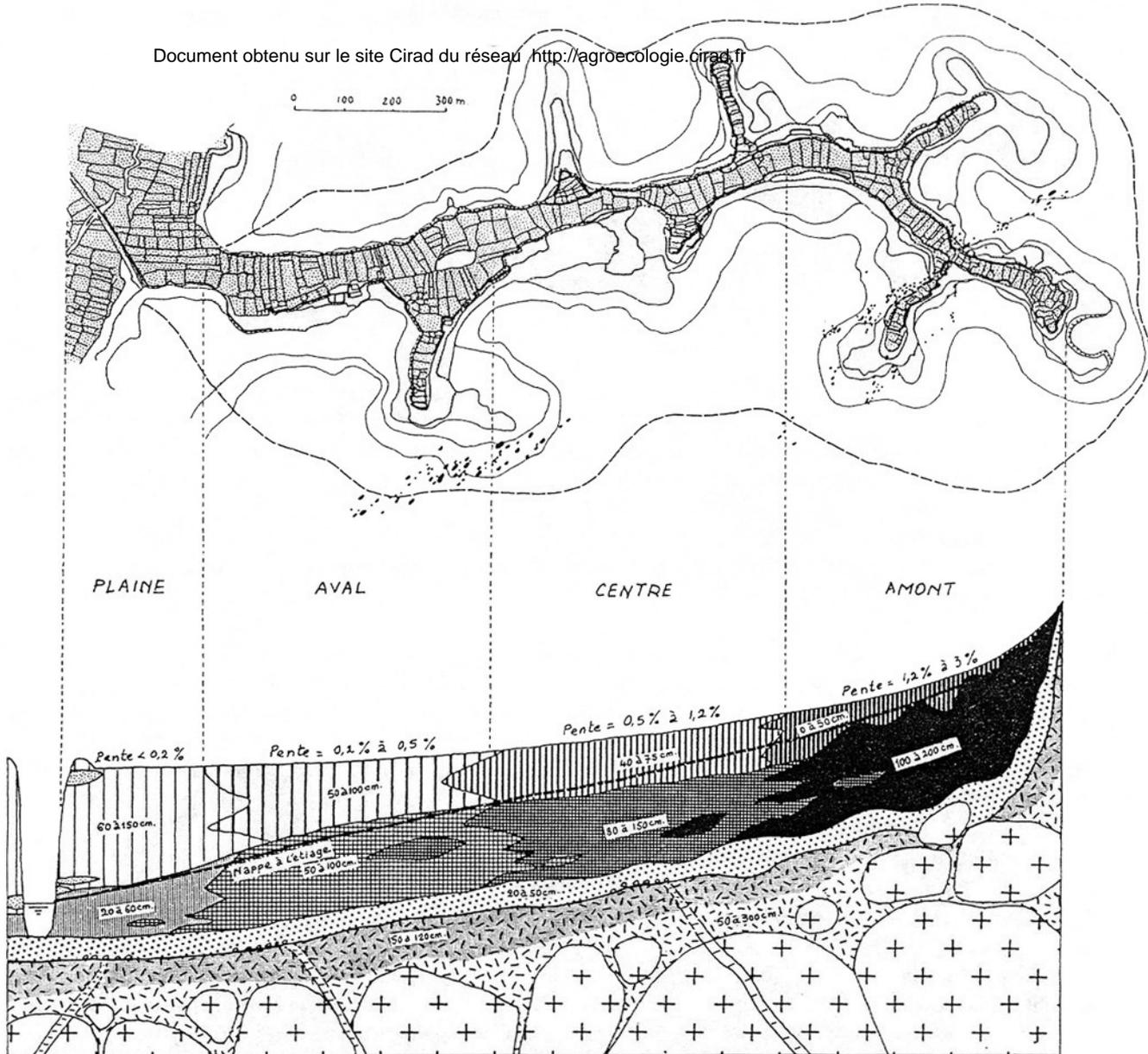




-  **SURFACE FINI-TERTIAIRE**
Plateau à larges ondulations
Sols ferrallitiques rouges
très filtrants.
-  **VERSANT PENTU CONVEXE**
Abitrites argilo-sableuses
décapées, peu filtrantes.
-  **TERRASSE QUATERNAIRE ANCIENNE**
Sols ferrallitiques rougeâtres argi-
leux à argilo-sableux, souvent col-
luvionnés.
-  **TERRASSE QUATERNAIRE RECENTE**
Paléosol hydromorphe argilo-sableux,
compact, à "stone line", gris-jaunâtre
sur arène argilo-micaçée en place.
-  **FRANGE DE "SUFFOSION-FLUAGE"**
Aval de la terrasse récente déprimée à
sol hydromorphe sableux à argilo-
sableux, grisâtre. Nappe, proche de la surface
(Nom local = "baiboho").
-  **TETE DE BAS-FOND**
Colluvions argileuses grisâtres sur tourbe
épaisse, souvent sub-affleurante. Nappe
à moins de 50 cm. en saison sèche.
Pente longitudinale = 1,2 % à 3 %.
-  **TRONCON MOYEN DU BAS-FOND**
Colluvions argileuses grisâtres sur limon
organique semi-tourbeux. Nappe entre
50 et 80 cm. de profondeur en saison sèche.
Pente longitudinale = 0,5 % à 1,2 %.
-  **TRONCON AVAL DU BAS-FOND**
Colluvions argileuses brun-grisâtre sur
limon organique peu tourbeux. Nappe entre
80 et 100 cm. de profondeur en saison sèche.
Pente longitudinale = 0,2 % à 0,5 %.
-  **VALLEE ALLUVIALE A COURS D'EAU**
Alluvions argileuses homogènes (décanta-
tion peu turbulente) de 80 à 150 cm.
d'épaisseur, reposant sur niveau argilo-
organique non tourbeux. Nappe entre 100
et 150 cm. de profondeur en saison sèche.
Pente longitudinale = 0,05 % à 0,2 %.
-  Glissements, terrassettes, décapage
sur pentes fortes. Fort ruissellement
faible couverture herbacée.
-  Filons granitiques.
(Affleurements en boules)
-  Talus anthropiques
-  cours d'eau.
-  Rizières.
-  Canaux d'évacuation/aménée d'eau
dans les rizières.
-  Bassin.
-  Limite de bassin versant
-  Route-digue.

Fig.5

**CARTE MORPHOPÉDOLOGIQUE
DU BAS-FOND
D'AMBOHITRAKOHO**



MATÉRIAU DE RECOUVREMENT

-  Colluvions limono-argilo-sableuses gris-Foncé.
-  Colluvions argilo-limono-sableuses grises.
-  Colluvions argilo-limono-sableuses brun-grisâtres.
-  Alluvions argileuses brunes.

NIVEAU ORGANIQUE ENTERRÉ

-  Tourbe finement fibreuse.
-  Limon tourbeux.
-  Limon organique non ou peu tourbeux.
-  Argile organique ("anmoor").

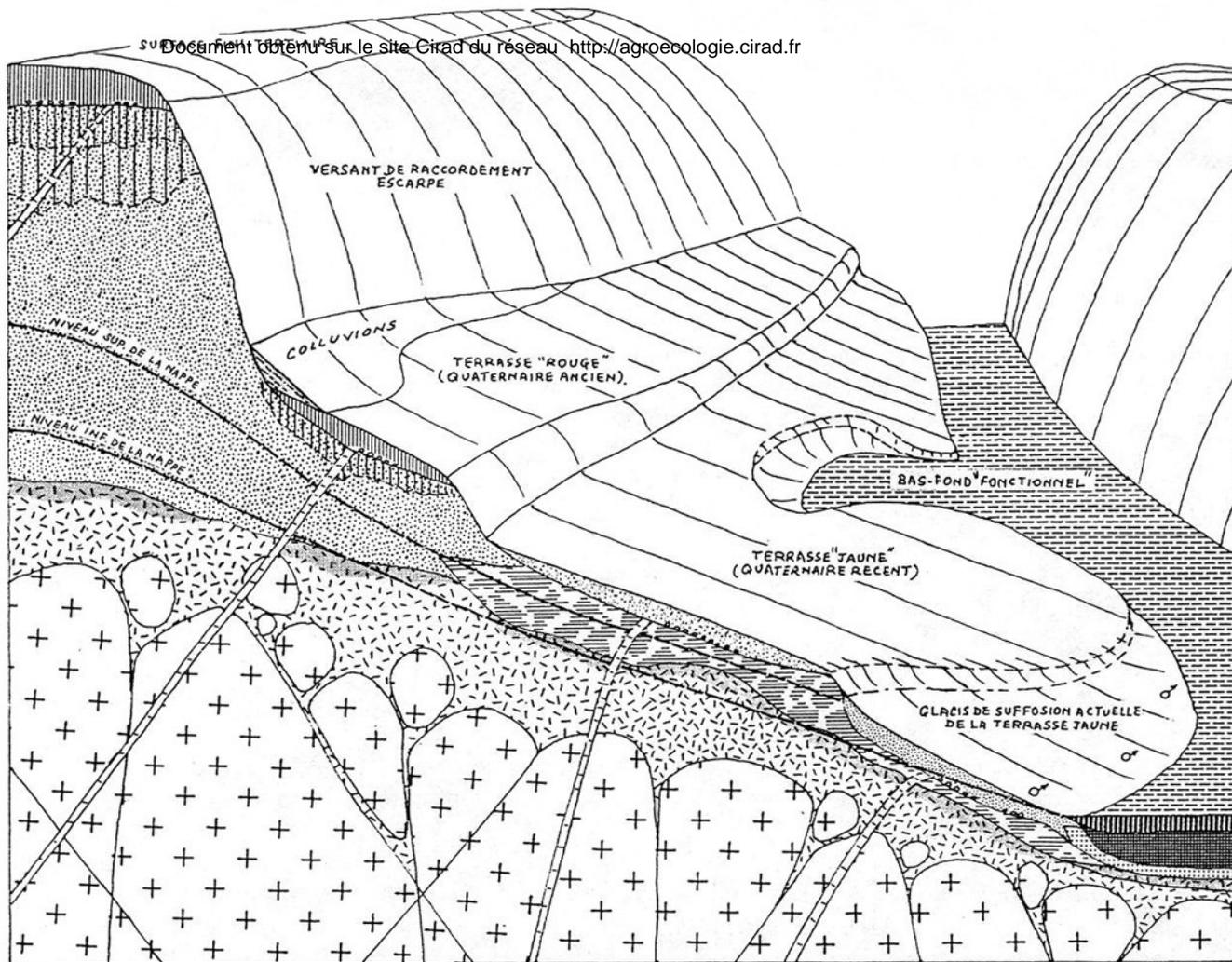
MATÉRIAU DE FLUAGE LAVÉ

-  Sable grossier beige à blanchâtre.
-  Stone line de quartz.

MATÉRIAU MIGMATIQUE EN PLACE

-  Arène argilifiée micacée à montmorillonite, souvent verdâtre.
-  Arène grenue grossière.
-  Migmatite saine fissurée, avec filons de quartz.

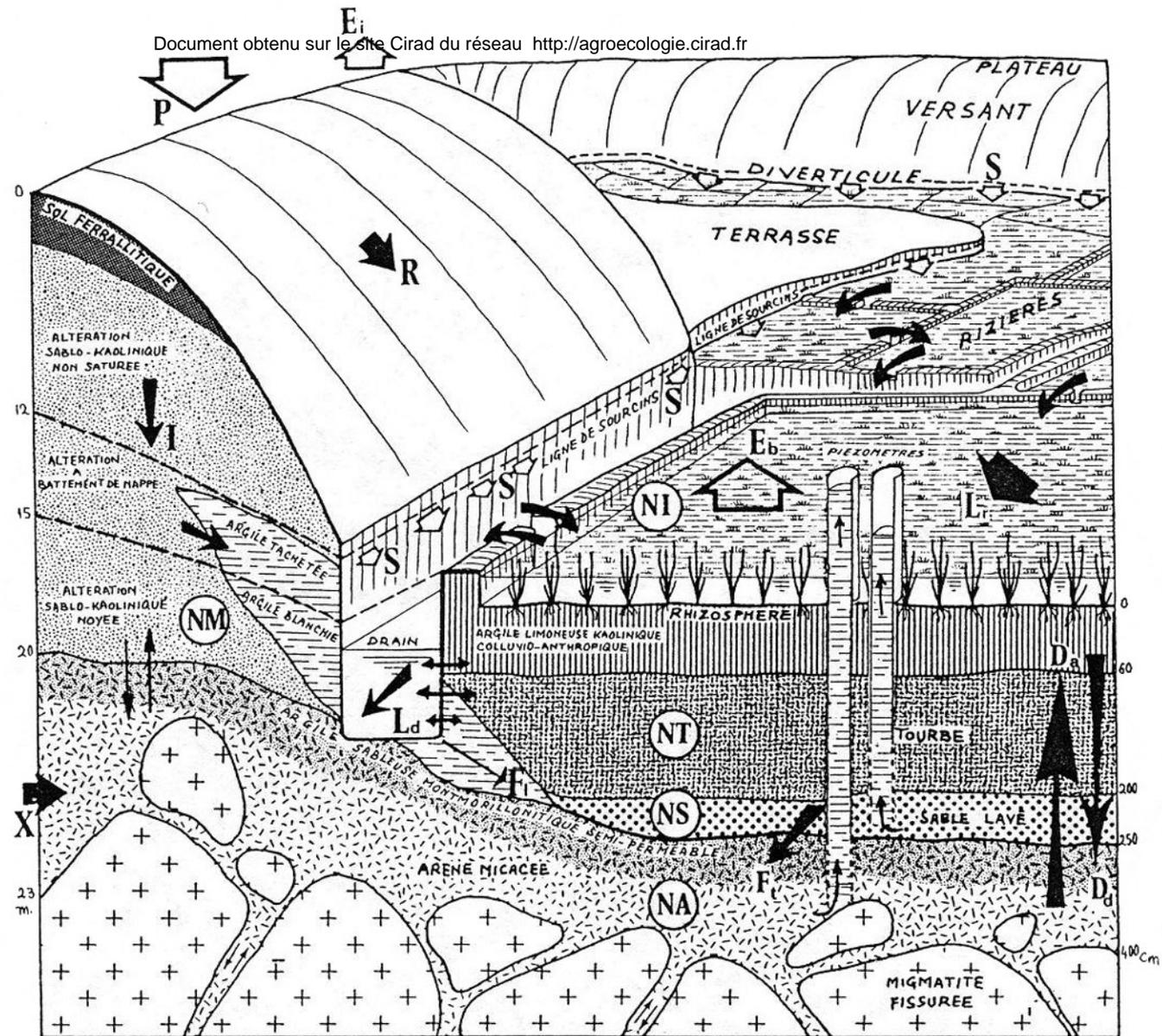
MATÉRIEAUX DU BAS-FOND D'AMPHITRAKOHO



MATERIAU FERRALLITIQUE ROUGE, REMANIÉ	MATERIAUX ALTERITQUES HYDROLYSÉS ISOVOLUMIQUES KAOLINIQUES	MATERIAUX ALTERITQUES EN COURS D'HYDROLYSE, ISOVOLUMIQUES	MATERIAUX SUPERIEURS DE LA TERRASSE "JAUNE" ET DE SON GLACIS DE SUFFOSION	MATERIAUX SPECIFIQUES AU BAS-FOND
<p> Sol ferrallitique argileux, très filtrant. 1 à 3 mètres.</p> <p> colluvions de matériaux ferrallitiques.</p> <p> Stone Line.</p>	<p> Argileux à argilo-sableux rouge 1 à 3 mètres.</p> <p> Argilo-sableux à limono-argilo-sableux rosâtre. 3 à 5 mètres.</p> <p> Limono-argilo-sableux à sableux grossiers Rosâtre à décoloré 5 à 10 mètres.</p> <p> Argileux Marmorisé ou décoloré (blanchâtre). 1 à 3 mètres.</p>	<p> Arène argilifiée micacée à montmorillonite gris-verdâtre. 0 à 2 mètres.</p> <p> Arène granue grossière à minéraux altérables. 1 à 6 mètres.</p> <p> Migmatite saine fissurée. Environ à 20 mètres de profondeur sous les plateaux</p>	<p> Limono-argilo-sableux à argilo-sableux. Massif. Gris-brun-jaunâtre. 0,80 à 1,50 mètre.</p> <p> Limono-argilo-sableux à sableux. Grisâtre. 0,50 à 1,30 mètre.</p> <p> Stone Line</p>	<p> Colluvions argilo-limono-sableuses. gris à gris-brunâtre. 0,40 à 0,75 mètre.</p> <p> Niveau organique en terre souvent tourbeux gris-noirâtre. 0,50 à 2 mètres.</p> <p> Sable lavé beige à blanchâtre.</p>

Fig. 7

TOPOSEQUENCE DE MATERIAUX
 SOUS LES UNITES MORPHOPÉDologiques
 AUTOUR DU BAS-FOND D'AMBOHITRAKHO



NAPPES : NA=NAPPE ARENE-SOCLE NM=NAPPE D'ALTERITES NI=NAPPE D'INONDATION DES RIZIERES

NT= NAPPE DE LA TOURBE NS=NAPPE DES SABLES LAVÉS

FLUX : P= PLUIE R=RUISSELLEMENT SUR INTERFLUVES I= INFILTRATION S= SUINTEMENTS DE LA LIGNE DE SOURCINS

Ld=LAME D'ÉCOULEMENT DES DRAINS Lt=LAME D'ÉCOULEMENT DES RIZIERES Ft= INFERO FLUX TOTAL LONGITUDINAL

Fi= INFERO FLUX LATERAL Da= DRAINANCE ASCENDANTE Dd= DRAINANCE DESCENDANTE Ei= EVAPOTRANSPIRATION

DES INTERFLUVES Eb= EVAPOTRANSPIRATION DU BAS-FOND X= ALIMENTATION EXTERIEURE AU BASSIN LOCAL

FIG. 8 COUPE TRANSVERSALE PARTIELLE DE LA ZONE D'AMBIANANT

MODELÉ, MATERIAUX ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

Fig.9a NAPPES DES INTERFLUVES

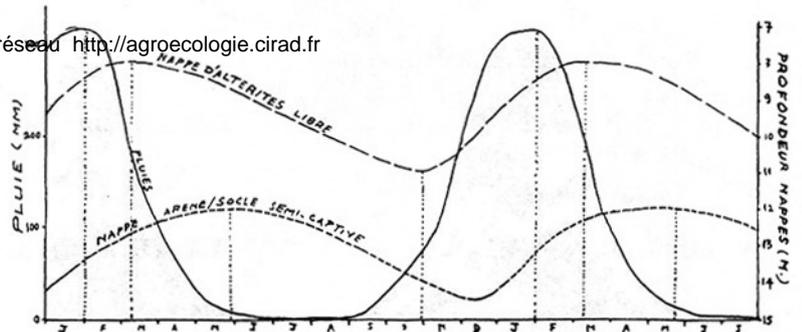


Fig.9b NAPPES DU BAS-FOND (TRONCON CENTRAL) ET DEBITS DE SURFACE EN AVAL

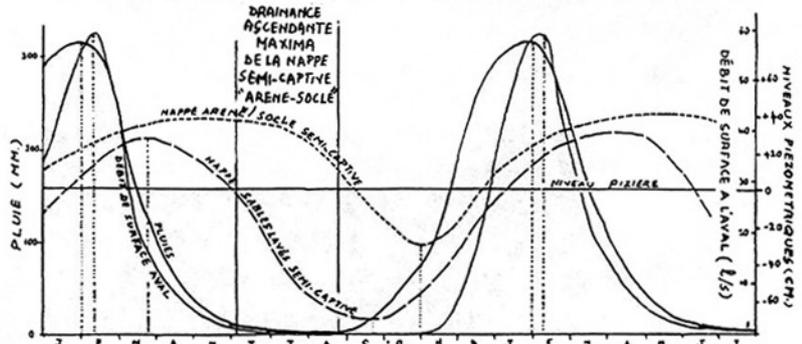


Fig.9c PRESSIONS DES NAPPES DU BAS-FOND PENDANT L'ANNEE, D'AVANT EN AMONT

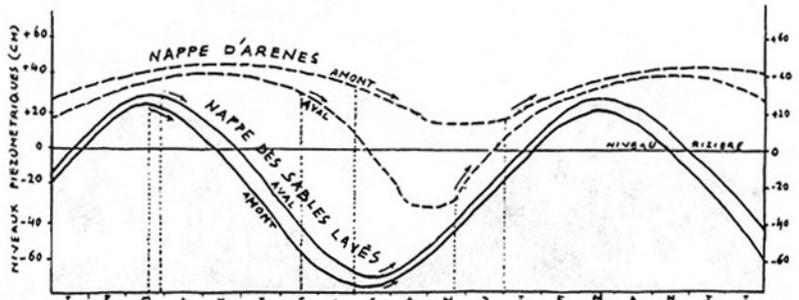


Fig.9d CONDUCTIVITES ET TEMPERATURES DES SOURCINS

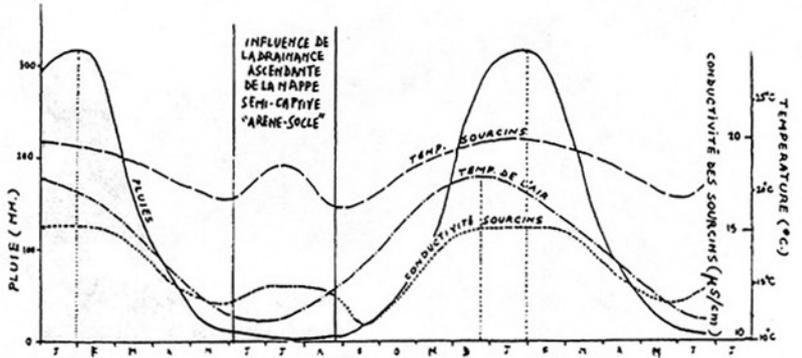


Fig.9e SUPERFICIE TOTALE INONDEE ET EVAPOTRANSPIRATION

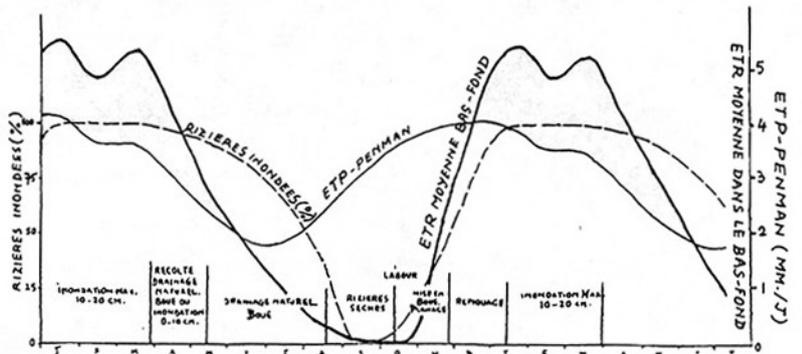


Fig.9 ALLURES DES VARIATIONS HYDROLOGIQUES MOYENNES
Document obtenu sur le site Cirad du réseau <http://agroecologie.cirad.fr>
PLUIES - EVAPORATION - NAPPES DES INTERFLUVES - NAPPES
DU BAS-FOND - SOURCINS

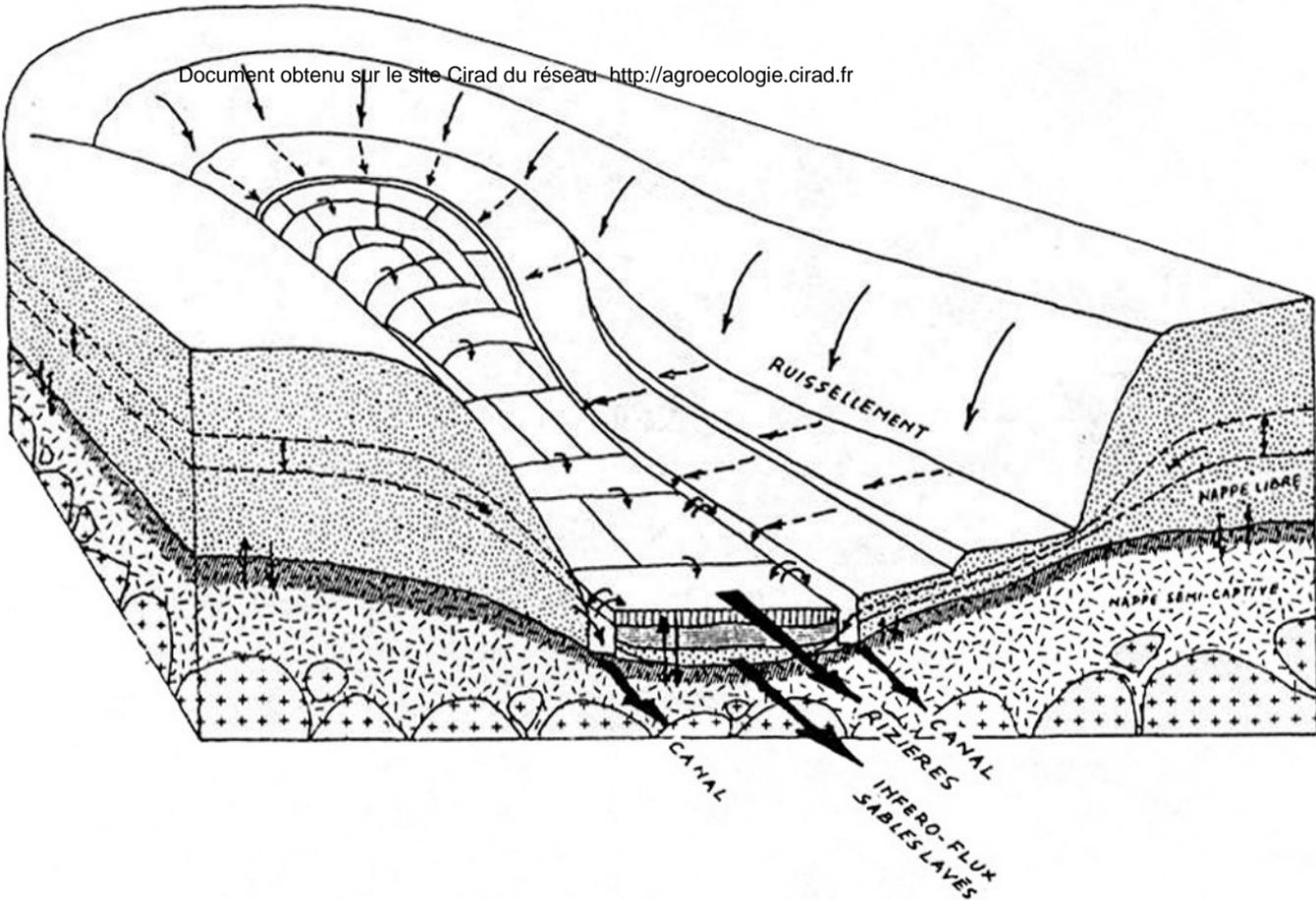


Fig.10. DIFFERENTS ECOULEMENTS LONGITUDINAUX DANS LE BAS-FOND

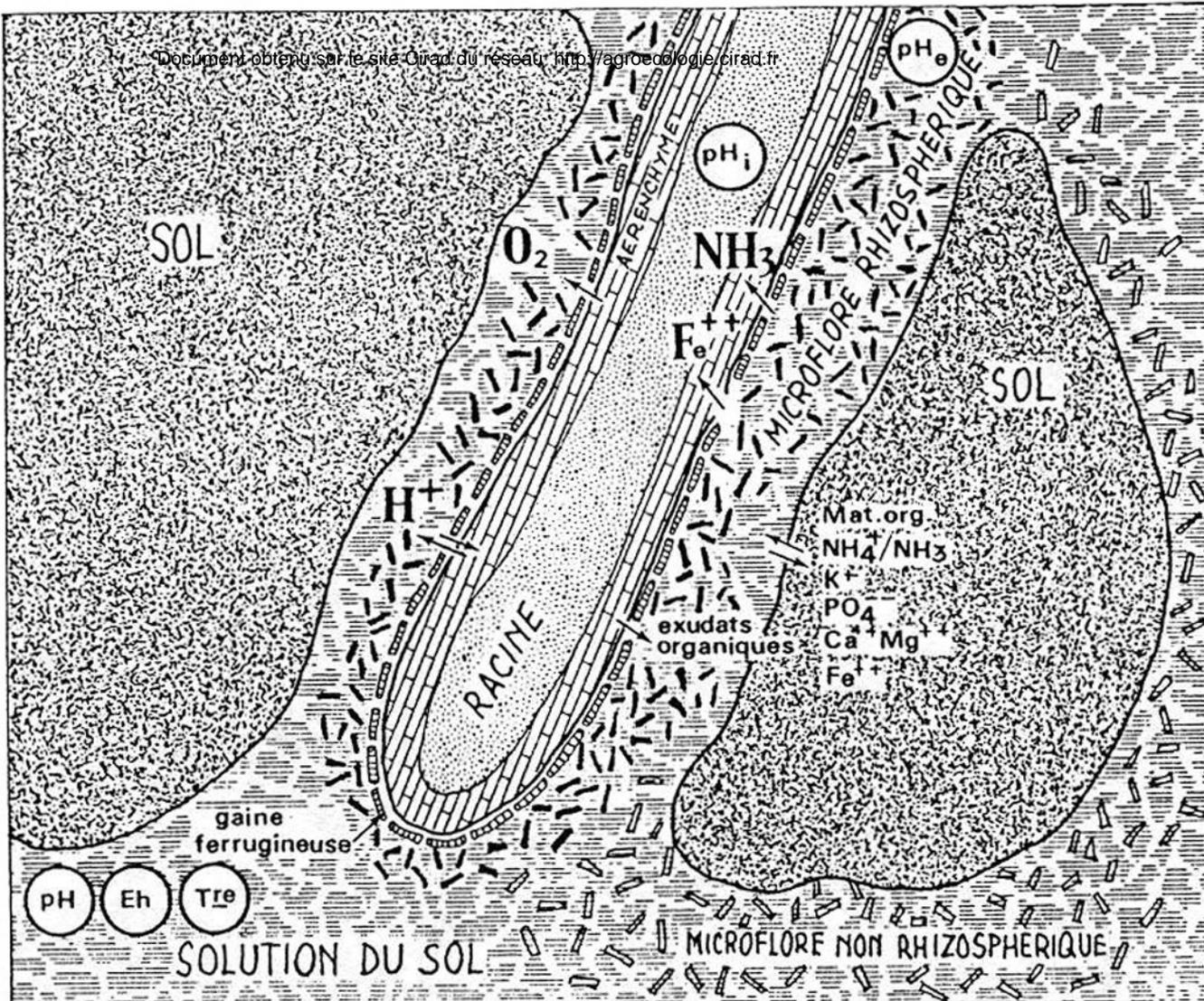
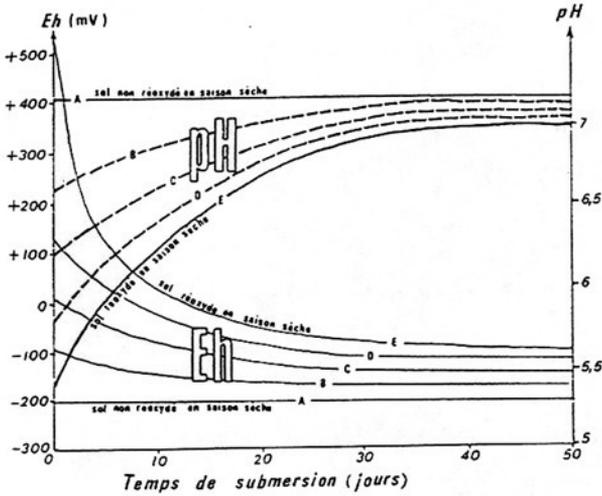
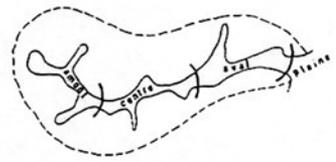
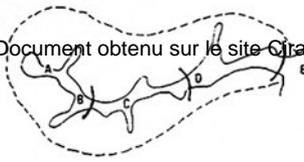
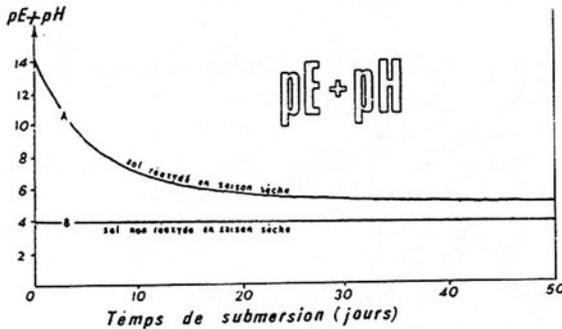


FIG. 11 SCHEMA DU SYSTEME PROCHE RACINAIRE (RIZ AQUATIQUE)



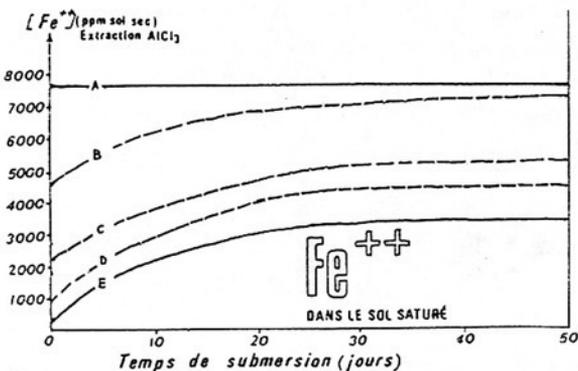
	AMONT		CENTRE		AVAL		PLAINE	
	0-25 cm	25-50 cm						
ARGILE %	30	33	35	43	38	38	42	45
LIMONS %	21	19	23	22	26	26	28	30
SABLES %	41	41	35	30	30	30	24	18
MAT. ORG. %	7,5	7,0	7,3	6,0	6,5	6,5	6,0	5,0
N %	1,2	1,0	1,2	1,0	1,9	1,4	2,6	1,6
CIN %	36	40	35	35	20	25	13	20
pH eau	4,9	5,0	5,0	5,1	5,2	5,1	5,1	5,0
pH KCl	4,0	4,0	4,1	4,2	4,2	4,3	4,2	4,2
Ca (mè)	0,8	0,7	0,7	1,0	1,1	1,3	3,0	2,5
Mg	0,6	0,6	0,7	1,1	1,1	1,2	2,0	2,6
K	0,06	0,04	0,07	0,04	0,1	0,04	0,2	0,07
SOMME DES BASES	1,2	1,2	1,5	2,1	2,3	2,5	5,3	5,8
P Total (ppm)	600	500	700	500	700	700	700	700
P Olsen	30	60	30	50	60	60	60	60
FER TOTAL (Fe ₂ O ₃ % (HCl))	5,2	2,5	5,5	3,1	5,5	3,5	7,0	5,0

CARACTERES ANALYTIQUES MOYENS DES SOLS DES RIZIERES DANS LE RECOUVREMENT ARGILO-LIMONEUX SUPERIEUR (0-50 CM)



	AMONT	CENTRE	AVAL	PLAINE
RIZICULTURE TRADITIONNELLE PAS D'ENGRAIS 1.5T fumier/ha tous les 2 ans	1,4	1,7	1,9	2,2
ESSAIS Fumier 5 T/ha	1,7	2,1	2,4	3,0
ESSAIS N-P-K = 60-90-45	2,4	3,2	3,8	4,3
ESSAIS N-P-K = 60-90-45 + fumier 5 T/ha	3,1	3,8	4,0	4,6

RENDEMENTS MOYENS DES RIZIERES EN T/ha



	AMONT	CENTRE	AVAL	PLAINE
Fe ppm	500	400	350	200
P %	0,26	0,24	0,22	0,20
K %	1,20			
N %	2,40			2,50
Mg %	0,050	0,065	0,075	0,090
Ca %	0,33	0,35	0,36	0,40
Si %	7 à 10			
Zn ppm	19			

TENEURS MINERALES DES FEUILLES PANICULAIRES DE RIZ EN CULTURE ET AVEC VARIETES TRADITIONNELLES (SANS ENGRAIS) CAMPAGNE 1987-88

QUELQUES INDICATEURS DE L'AMBIANCE PHYSICO-CHEMIQUE

[Fe⁺⁺] (ppm solution du sol)

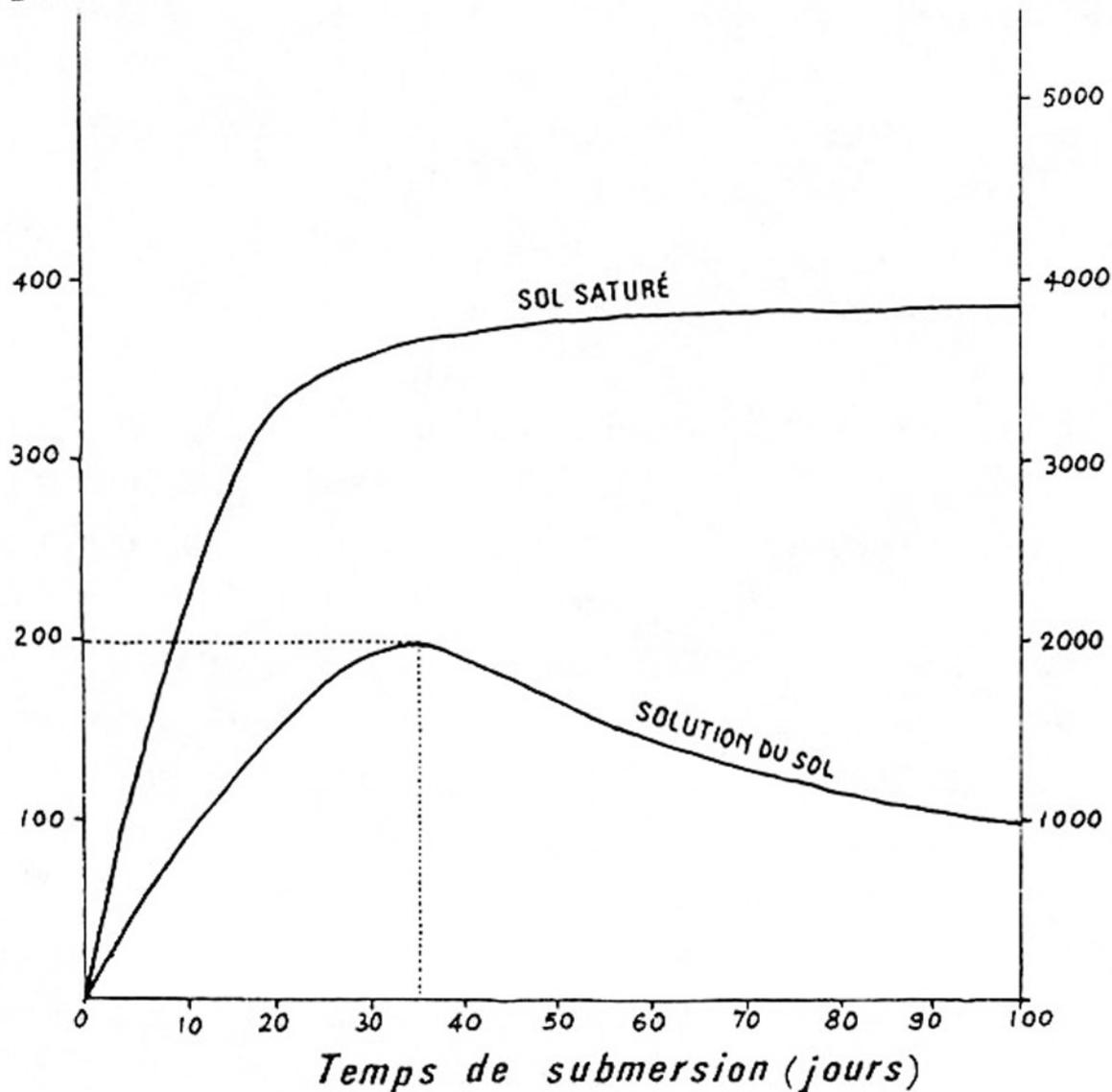


Fig.13 CINETIQUES DES TENEURS EN FER FERREUX
DANS LA SOLUTION DU SOL ET DANS LE SOL SATURÉ
A L'AVAL DU BAS-FOND D'AMBOHITRAKOHU

(ppm sol sec)

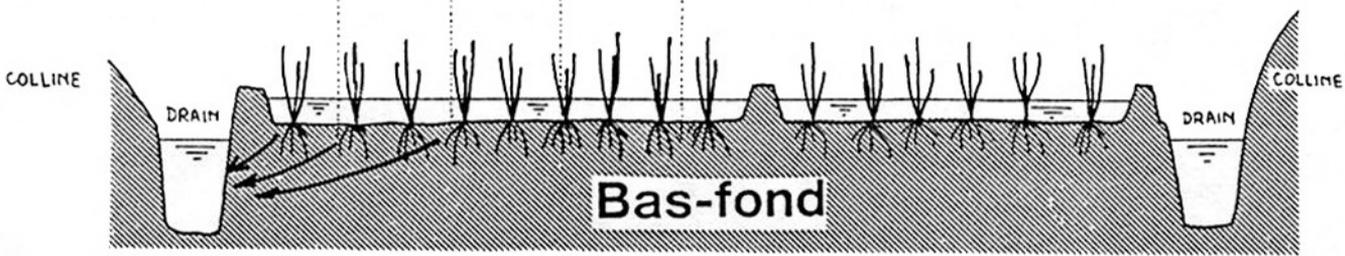
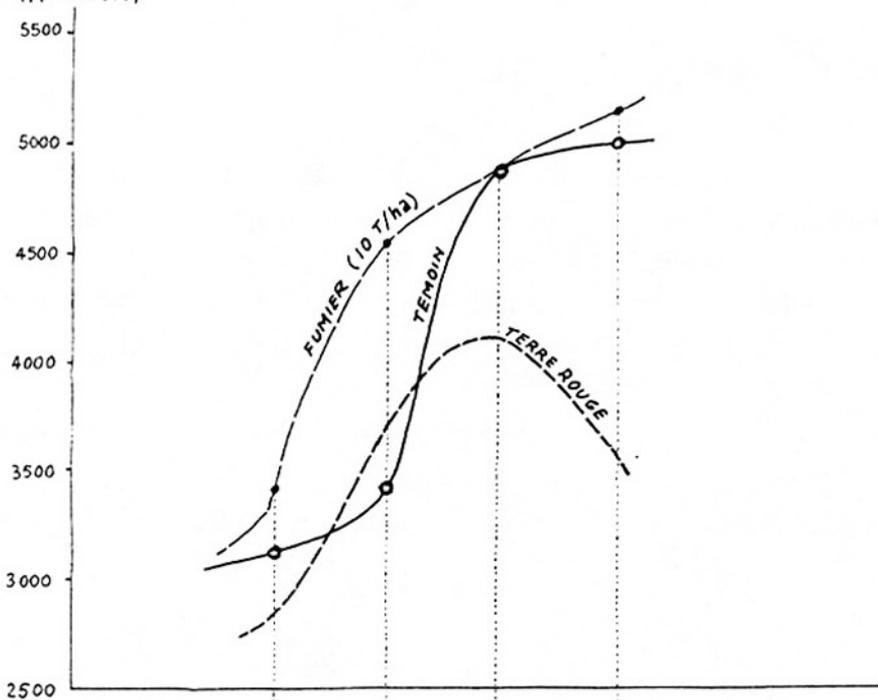


Fig. 14

CONCENTRATION EN FER FERREUX DANS LE SOL DE BAS-FOND (TRONCON CENTRAL)
40 JOURS APRES REPIQUAGE

SUIVANT L'ELOIGNEMENT DU DRAIN LATERAL

Document obtenu sur le site Cirad du réseau <http://agroecologie.cirad.fr>

EFFETS D'APPORTS DE FUMIER ET DE TERRE ROUGE

(D'ap. DE GIUDICI - 1989)

	AMONT	CENTRE	AVAL	PLAINE	TERRE ROUGE
Fer total ‰	34	36	36	46	20-80
Fer amorphe ‰	21	22	22	29	1-3
Fe ²⁺ ‰	7	5	4	3	0
Fe ²⁺ / Fer amorphe %	33	23	18	10	0
pH	7,2	7,1	7,1	7,0	5,0
Eh (mV)	- 200	- 120	- 100	- 80	

50 jours après repiquage

**Fig. 15. LES FORMES DU FER DANS LES SOLS DE RIZIERES
LE LONG DU BAS-FOND D'AMBOHITRAKOHO**