

ENSEIGNEMENTS METHODOLOGIQUES D'UNE OPERATION DE RECHERCHE INTERDISCIPLINAIRE A MADAGASCAR : L'ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UN BAS-FOND RIZICULTIVE

M.RAUNET*

Résumé: A l'issue d'une opération de recherches menée durant trois années sur un bas-fond des Hauts-Plateaux de Madagascar. ressortent rétrospectivement un certain nombre d'enseignements généraux d'ordre méthodologique. concernant :

- les conditions d'une démarche systémique et de la mise en œuvre d'une véritable interdisciplinarité ;

- le rôle prépondérant du contexte régional (physique, humain, sociologique, matériel) dans le fonctionnement d'une opération de ce genre ;

- la nécessité d'une intégration. d'une structuration et d'une spatialisation des situations et des processus dynamiques à différentes échelles (que signifie cette notion d'"échelle") ;

- l'interaction de l'activité humaine, avec les phénomènes du milieu physique.

Mots clés : Méthodologie, approche systémique, interdisciplinarité, représentativité, fonctionnements, échelles, spatialisation, bas-fonds, riziculture.

1. INTRODUCTION

D'octobre 1986 à octobre 1989 a été entreprise à Madagascar, à 25 km de Tananarive, une opération de recherche, coordonnée par l'IRAT, intitulée: "Etude du fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé sur les Hauts-Plateaux malgaches",

Ce programme rentre dans le cadre général du PIREN (Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement) proposé par le CNRS, Elle était financée par le CIRAD (300000 FF) et le CNRS (90000 FF).

La recherche concerne un petit système naturel des Hauts-Plateaux, à savoir la "maille" élémentaire du réseau de vallées caractéristique de cette région : un bas-fond couvert par 20 ha de rizières repiquées, et son bassin de 100 ha. Ce bas-fond a été considéré et étudié comme un "écosystème anthropisé" où les riziculteurs, avec leurs pratiques, sont en interactions étroites avec les autres composantes du milieu,

Les suivis s'étalent sur trois cycles climatique, hydrologique et agronomique, complets. Le dispositif est donc en place jusqu'au mois d'octobre 1989. La valeur de cette étude réside en grande partie dans l'approche systémique, l'interdisciplinarité et la spatialisation des phénomènes corrélés entre eux.

La synthèse finale et complète, qui prendra en compte l'ensemble des résultats mis en relations, ne sortira que durant l'année 1990.

Beaucoup de travail de synthèse, de compilation et d'exploitation de données reste à faire. Aussi n'est-il pas encore possible de résumer ici tous les résultats originaux avec leurs implications.

L'objet essentiel du document qui suit est de présenter schématiquement la démarche méthodologique et l'esprit qui ont animé l'opération :

- .Qu'est-ce qui a été entrepris, pourquoi et comment ?
- .Quelles en ont été les différentes étapes ?
- .Quelles ont été les interactions entre chercheurs de différentes disciplines ?
- .Comment le contexte et les problématiques locales ont déterminé les objectifs (à la fois appliqués et scientifiques) et la coopération franco-malgache ?

2. ANTECEDENTS

A plusieurs reprises, de 1979 à 1983, dans le cadre d'opérations de développement sur les Hauts-Plateaux malgaches (projets blé de contre-saison, projet orge, lac Alaotra), des reconnaissances du milieu physique (de type "hydro-morpho-pédologique") ont été effectuées par l'IRAT dans cette région. Une vue d'ensemble a ainsi pu être dégagée concernant la typologie et le potentiel des petites vallées rizicultivées sur les Hauts-Plateaux.

L'opportunité du programme des ATP PIREN (CNRS), dont l'idée a été lancée en 1985 a permis de proposer un projet d'étude de fonctionnement d'un bas-fond élémentaire. Ce programme constituait ainsi la suite logique et la valorisation des reconnaissances globales précédentes, qui garantiraient la représentativité du site sélectionné et; en aval, faciliteraient l'établissement des conditions d'extrapolation des résultats. Le contexte historique permet ainsi de voir comment l'on est passé du général au particulier, que l'ATP n'était pas un "parachutage" *ex nihilo* sur un milieu inconnu et que celui-ci représentait une étendue économique considérable à Madagascar, les trois quarts de la riziculture repiquée des Hauts-Plateaux, soit environ 6 000 km² ([fig. 1](#) et [fig. 2](#)). Cela justifie que l'on s'intéresse un peu plus qu'auparavant à ces types de milieu.

La compréhension préalable du mode général de structuration, de fonctionnement et d'utilisation de ces bas-fonds, a ainsi grandement déterminé les axes du programme de recherches et les grands thèmes à approfondir, si possible à quantifier. L'accent devra être mis sur la dynamique des eaux souterraines, responsables en grande partie de l'alimentation du vallon, la physico-chimie particulière et complexe de ces sols de rizières (engorgés 6 à 10. mois par an), les rôles des pratiques culturelles traditionnelles, comment elles utilisent. et modifient les conditions naturelles. On ne comprendra le système que dans ses inter et retro-actions le définissant comme un véritable écosystème à étudier en tant que tel.

Les trois grandes disciplines de base à introduire et à faire collaborer étroitement dans le programme étaient donc l'agronomie, la physico-chimie et l'hydrologie- hydrogéologie.

3. MONTAGE DE L'OPERATION

Ce montage avait pour contraintes et nécessités de base :

- la durée { 3 ans } ;
- le financement: ne pas dépasser 500 000 FF , ordre de grandeur "raisonnable" pour être retenu dans ce genre d'appel d'offres ;
- le respect du thème général de l'ATP-PIREN ;
- l'adaptation à la problématique socio-économique régionale, pour montrer qu'il ne s'agissait pas (uniquement) de "caprices" de chercheurs ;
- l'obligation de "faire avec" la réalité locale, structurelle (institutionnelle), humaine et matérielle ;
- la nécessité, dans l'équipe de recherche, d'assurer un certain équilibre franco-malgache ;
- une mise à disposition souple des crédits attribués par les organismes de tutelle (CIRAD et CNRS), en l'occurrence l'exigence d'une gestion directe par l'IRAT ;
- le choix d'un site non seulement bien circonscrit et représentatif, mais aussi accessible, cette condition étant fondamentale ;
- l'association avec le FOFIFA comme "maître d'oeuvre" local, en vertu des accords-cadres (CIRAD -FOFIFA) de 1984 excluant en principe toute autre éventualité ;
- enfin, une exigence personnelle du responsable scientifique qui est l'approche interdisciplinaire réelle et opérationnelle.

La nécessité de respecter l'ensemble de ces exigences, en plus bien sûr de la pertinence et de la cohérence scientifique et méthodologique du programme vis-à-vis du CIRAD et du CNRS, a demandé une année de négociations entre institutions et chercheurs français et malgaches, aussi bien à l'extérieur qu'au sein du CIRAD.

3.1. LE CHOIX DU SITE ([fig. 4](#) et [fig. 5](#))

Il n'a pas posé de problème. Il était déjà connu par des expérimentations agronomiques et des mesures piézométriques. Les études antérieures avaient montré qu'il représentait bien la maille élémentaire amont du réseau de vallées des Hautes-Terres. Autres avantages déterminants: sa situation à 25 km de la capitale et à 5 km de la station météo très complète de l'aéroport, son accès aisé en une demi-heure en toute saison, la délimitation sans ambiguïté de son bassin versant formant ainsi un système territorial très bien circonscrit de 120 hectares (dont 20 hectares de bas-fond rizicultivé). D'autre part, ce site est le terroir rizicole d'un village unique directement dominant le bas-fond, ce qui facilite l'enquête du milieu humain qui se montrera, par ailleurs, très "tolérant" vis-à-vis de nos investigations (condition importante).

3.2. CHERCHEURS ET INSTITUTIONS LOCAUX ([fig. 3](#))

-Le FOFIFA (ministère de la Recherche) étant le partenaire "obligé", localement la coordination du programme s'est faite autour de l'axe IRAT- FOFIFA par un "contrat de programme". Le FOFIFA a pris en charge" toute "la partie agronomique sous forme d'essais "classiques" dits :contrôlés, échelonnés le long du bas-fond ; la pédologie fine a aussi été assurée par le FOFIFA. Quatre chercheurs malgaches ont participé au programme.

Autour de cet axe ont été "greffés" les autres intervenants, faisant l'objet de contrats annexes avec le FOFIFA. Il s'agit:

-du LRI (Laboratoire des radio-isotopes) dépendant de l'Université (ministère de l'Enseignement Supérieur). Ce laboratoire, pilier important du programme, a pris en charge, sous forme d'essais spécifiques et en laboratoire, en particulier: l'étude de la physico-chimie des sols de rizière et la dynamique de l'azote minéral apporté sous forme de super-granules d'urée (SGU). Trois chercheurs français et un chercheur malgache participaient au programme.

-de la direction de l'Eau du MIEM (ministère de l'Industrie, de l'Énergie et des Mines) : cet organisme a assuré l'implantation des forages dans les altérites des interfluves, les essais de pompages, les relevés piézométriques. Tout cela était dirigé scientifiquement par le laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Montpellier.

-de l'ESSA (Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques) dépendant du ministère de l'Enseignement supérieur. Un enseignant français a ainsi dirigé 2 DEA malgaches en matière de microbiologie des sols.

3.3. CHERCHEURS ET LABORATOIRES FRANÇAIS (fig. 3)

Ont participé au programme:

-l'IRAT, qui, en plus de la coordination de l'ensemble de l'opération, a assuré concrètement la synthèse sur le milieu physique, l'exploitation des analyses foliaires, l'introduction de la physiologie végétale comme discipline à part entière ;

-le laboratoire d'hydrogéologie de l'université de Montpellier, concernant la conception des campagnes hydrogéologiques et l'exploitation des résultats ;

-le laboratoire d'hydrogéologie de l'université d'Avignon, pour l'hydro-chimie et les traçages isotopiques (180 et D) ;

-l'ORSTOM, concernant les deux aspects suivants :

* l'hydrologie: l'antenne de Tananarive a pris en charge les mesures des écoulements de surface à l'exutoire du bas-fond et les enregistrements climatiques (pluies, évaporation),

* la physico-chimie : en particulier le protocole de suivi de l'ambiance physico-chimique et la dynamique du fer, cet élément s'avérant jouer un rôle clé dans la nutrition minérale du riz.

-le laboratoire de géologie structurale de l'université de Montpellier, en matière de typologie des bas-fonds, commandés par la structure du socle. (Ce volet a entièrement été financé par le laboratoire).

-l'IMG (CNRS) en tant que conseils concernant l'hydrodynamique en non saturé et la variabilité spatiale des phénomènes.

4. LES THEMES DE RECHERCHE

Au cours du programme de recherche, les enquêtes ont porté sur les eaux, les sols, le riz, et les pratiques des riziculteurs. L'accent a été mis, en plus des caractérisations (états des lieux), sur les dynamiques (fonctionnements) et les répartitions spatiales (structures): à quels circuits ou processus, différenciés dans l'espace, sont soumis, au sein du système, les flux entrants de tous ordres, naturels et anthropiques (eaux, solutés, intrants traditionnels, "énergie anthropique"...), quelles sont les transformations cycliques qu'ils y commandent ou y engendrent en interactions avec les matériaux et les sols. L'objectif est d'identifier les conditions de croissance du riz, qui au-delà de certaines contraintes "incompressibles" (humaines et physiques) spécifiques au milieu, déterminent les

rendements, considérés ici comme les sorties "intéressantes" du système. Nous avons essayé de faire de ce système naturel un "modèle de fonctionnement" ([fig. 9](#)) spatialisé et si possible quantifié, aussi près de la réalité que possible et non pas un simple modèle de comportement" (boîte noire), qui ne s'intéresserait qu'au bilan global entrées-sorties, ne représenterait que lui-même et ne permettrait donc pas de connaître ses conditions d'extrapolation. Nous nous sommes donc placés dans une optique strictement naturaliste et déterministe (étude du réseau de causalités).

Le but est d'identifier, dans le milieu, les conditions de croissance du riz "les nœuds stratégiques" sur lesquels on pourra éventuellement intervenir de façon économique pour optimiser les "sorties".

De façon concrète, les domaines abordés ont été essentiellement les suivants :

- la nature et la structuration morpho-pédologique du bas-fond et de son bassin ([fig. 6](#)) ;
- les pluies (3 pluviographes) et l'évaporation (1 bac Colorado) ;
- la dynamique et l'hydrochimie des nappes phréatiques du bassin, contenues, d'une part dans le manteau altéritique supérieur. (nappe libre déminéralisée) et d'autre part dans les arènes et le socle fissuré profond (nappe semi-captive minéralisée). Ces nappes ont en effet un rôle essentiel sur l'alimentation du bas-fond. Elles ont été étudiées grâce à 12 forages à 25 mètres sur les interfluves ([fig. 5](#)), dans lesquels on a effectué des essais de pompage (caractérisation hydrodynamique), des marquages aux isotopes naturels de la molécule d'eau ^{18}O et D , des suivis de conductivité, des relevés piézométriques ou piézographiques durant trois années ;
 - les débits des écoulements en surface du bas-fond, contrôlés à l'exutoire par 2 limnigraphes ;
 - les fluctuations et l'hydrochimie des nappes d'inféro-flux du bas-fond, grâce à 11 batteries de piézomètres. Ces écoulements sont en liaison étroite avec les convergences des nappes phréatiques d'interfluves ;
 - les débits et les conductivités des suintements de sourcins qui forment une ligne continue en bordure du bas-fond ([fig. 6](#)). A cet effet, 7 sourcins ont été aménagés ;
 - l'hydrodynamique des remontées capillaires pour les cultures de contre-saison ;
 - l'ambiance physico-chimique (*in situ*) des sols de rizières (pH, Eh, températures, teneurs en fer ferreux) ([fig. 15](#)) ;
 - l'activité microbologique : biomasse et dénombrement des groupes bactériens des cycles de l'azote, du fer et du soufre, suivant différents traitements et différentes situations ;
 - la cinétique de l'azote ammoniacal (NH_3 et NH_4^+) au niveau rhizosphérique grâce à l'outil "supergranule d'urée" (SGU) ([fig. 10](#), [fig. 11](#), [fig. 12](#)) ;
- la réponse spatialisée du riz au milieu par :
 - * des expérimentations "classiques" en parcelles (supposées) contrôlées (doses et interactions des éléments majeurs, formes d'azote) échelonnées tout au long du bas-fond sur une quinzaine de sites ([fig. 15](#)),
 - * des analyses minérales des feuilles (stade paniculaire) en parcelles traditionnelles à variétés locales et sans engrais. 190 échantillons ont été analysés ([fig. 15](#)),
 - * des informations comparatives (par rapport à l'espace) recensées auprès de la quasi-totalité des riziculteurs du bas-fond.

-la connaissance des pratiques des paysans par des questionnaires adaptés: 21 riziculteurs (sur les 25 du bas-fond) ont été enquêtés séparément sur chacune de leurs parcelles concernant la nature du sol, la dynamique et la gestion de l'eau, la fertilité des rizières, les pratiques culturales. Les informations qualitatives mais comparatives et spatialisées ont été privilégiées.

Toutes ces informations d'ordre différent mais qui sont les composantes du fonctionnement annuel du bas-fond, ont été mises en inter-relations causales et d'échelle. Beaucoup en effet, s'expliquent les unes par les autres. Elles ont permis de bâtir un modèle intégré de fonctionnement. Une préoccupation constante a été (dans la mesure du possible) de structurer spatialement tous ces phénomènes et d'en établir leurs dynamiques temporelles annuelles liées aux cycles saisonniers.

5. LES SYNERGIES INTERDISCIPLINAIRES

La démarche n'était pas "pluri" mais "interdisciplinaire" ; ce terme signifie que les disciplines, complémentaires, doivent se "nourrir" les unes les autres, être en synergie et non rester côte à côte. Une telle approche a été tentée opérationnellement et non plus seulement sur le papier .

Voici quelques exigences idéales pour faire une bonne recherche de ce type :

- ententes entre chercheurs sur les objectifs ;
- pas d'individualisme excessif ;
- circulation totale des informations ;
- dépassement des "contraintes structurelles" dues à l'appartenance des chercheurs à des organismes n'ayant pas les mêmes règles de fonctionnement ;
- entente sur les échelles de raisonnement et de suivi des phénomènes,
- maximum de terrain ensemble ;
- transdisciplinarité* individuelle, faisant en sorte que chaque chercheur, tout en gardant ses propres méthodes et centres d'intérêt, s'instruise ou s'informe des disciplines voisines, les intègre dans ses raisonnements pour mieux valoriser sa propre démarche et faire émerger de nouvelles hypothèses ;
- acceptation qu'une discipline oriente en partie les protocoles d'autres ;
- correction des hypothèses en fonction des apports voisins ;
- réunions régulières d'information et de concertation inter-organismes et inter sous-programmes.

L'équipe de recherche doit fonctionner comme un système cohérent avec sa dynamique propre assurée par de multiples interactions et rétroactions, mais tout en restant ouverte sur "l'extérieur" c'est-à-dire capable de se réajuster en fonction d'informations et contraintes nouvelles qui apparaissent en cours de route, qu'elles soient d'ordre structurel, dues à l'apparition .de problématiques non prévues, à l'introduction de nouveaux acteurs, à des difficultés financières, des contretemps divers, etc.

Les "éléments" d'un tel système sont les sous-programmes qui coïncident souvent avec les différents laboratoires et les grands thèmes. Ils doivent avoir chacun une relative autonomie tout en restant coordonnés entre eux.

C'est le responsable scientifique et coordinateur du programme qui doit assurer la régulation de l'ensemble.

Les disciplines qui sont intervenues, à des degrés divers, ont été les suivantes ([fig. 13](#) et [fig. 14](#)) :

- morpho-pédologie ;

- sociologie rurale ;
- agronomie ;
- hydrologie (eaux de surface) ;
- hydrogéologie (eaux profondes) ;
- physico-chimie ;
- physiologie végétale ;
- microbiologie ;
- géologie structurale.

6. LES INTERACTIONS DANS LE MILIEU

Voyons quelques ensembles d'interactions entre les grandes "catégories" qui cloisonnent conceptuellement le milieu étudié.

6.1. INTERACTIONS « MODELE, MATERIAUX, SOLS, EAUX DE SURFACE, EAUX PROFONDES »- (fig. 6)

Ces cinq "composantes" du système sont étroitement dépendantes les unes des autres, dans leur genèse comme dans leur "fonctionnement" actuel. La répartition des matériaux et des formes au sein du bas-fond et des interfluves qui le dominent résultent de processus d'ordre géomorphologique aidés par les eaux profondes : alternance de stabilité et de "crises" morpho-climatiques avec réajustements des niveaux de base emboîtés les uns dans les autres, formant des terrasses étagées. A l'heure actuelle, les eaux qui traversent le manteau d'altérites et les matériaux du bas-fond (arène micacée, sable lavé, tourbe, argile supérieure), subissent des dynamiques et des transformations spatio-temporelles à cycles annuels, desquels résultent la nature des sols: durées d'engorgement, teneur en matière organique, profondeur de la tourbe... De plus, ces caractères sont modulés selon les portions de bas-fonds considérés (amont, centre, aval, bordures...), étroitement dépendantes du modelé.

A partir du moment où on s'intéresse au "fonctionnement" et à la spatialisation des phénomènes dynamiques, on doit donc absolument considérer l'ensemble fonctionnel: les flux (eaux, solutés), ce qui est traversé par ces flux (sols, matériaux) et ce qui détermine spatialement les modalités de ces interactions, en l'occurrence la topologie.

Le "sol de rizière" dans cette optique, n'est pas réductible aux 20 premiers centimètres de la rhizosphère (et limité à la "compétence" du pédologue seul), mais pratiquement à tout l'environnement qui conditionne son ambiance physico-chimique (pH, Eh, tre) et les apports éventuels de solutés à partir de la profondeur -et donc de la succession des matériaux qui composent ce substrat.

6.2. INTER.ACTIONS « MODELE DE DETAIL, HYDROLOGIE, SOLS, MILIEU HUMAIN »

L'influence anthropique est importante (fig. 5) ; les riziculteurs font partie du système. Le bas-fond a été "aménagé" de façon à le rendre apte à la riziculture aquatique à maîtrise partielle de l'eau. Le régime hydrologique naturel est ainsi à la fois .exploité et modifié par la création d'un réseau de

micro-hydraulique villageoise pour le contrôle et la répartition communautaire des eaux (drains, réseau de diguettes, réservoirs latéraux, rectification de la pente...). En même temps, les paysans rechargent périodiquement leurs rizières par des apports d'argile ferrallitique prélevée sur les bordures. Tout cela modifie les sols d'origine et leurs régimes d'engorgement. En plus, il y a des apports réguliers de fumier (seul intrant) qui influent sur la vie microbienne.

6.3. INTERACTIONS « PHYSICO-CHIMIE, REGIME HYDROLOGIQUE, PHYSIOLOGIE, MICROBIOLOGIE » (fig. 7 ET fig. 8)

Au niveau rhizosphérique, puis du système très proche racinaire, existe une "ambiance" particulière qui conditionne la nutrition minérale du riz et ses dysfonctionnements. C'est un domaine complexe où le sol, la solution du sol, la racine et la microflore sont en équilibre dynamique. Ce milieu ne peut être caractérisé séparément par les indicateurs "classiques" du pédologue, du microbiologiste ou du physico-chimiste, qui opèrent à un niveau plus global. Le système racinaire du riz aquatique (en particulier les variétés locales les mieux adaptées) est capable de contrôler en partie son propre environnement nutritionnel par des échanges avec le milieu, tel que transferts d'oxygène, exudations diverses (protons, acides organiques...) créant des conditions (pH, Eh) et substrats, spécifiques à une microflore rhizosphérique, qui favorise la solubilisation ou la précipitation de certains éléments. Lorsque le milieu est trop contraignant (excès d'engorgement), la régulation n'est plus possible et apparaissent des déséquilibres nutritionnels dans la plante: absence d'assimilation de l'azote donc de transamination, toxicité ferreuse par éventuels blocages enzymatiques, etc... On passe alors dans la plante elle-même avec ses multiples processus énergétiques et enzymatiques. Les interactions N -P -Fe, dans ce type de bas-fond, apparaissent comme fondamentaux. Le passage du sol à l'intérieur de la plante, même à ce niveau de recherche fondamentale, qui n'a évidemment pas été abordé ici, ne peut être compris, dans un milieu donné, sans complémentarité interdisciplinaire

6.4. INTERACTIONS « MILIEU HUMAIN -MILIEU PHYSIQUE – AGRONOMIE »

Les caractéristiques, le fonctionnement actuels du bas-fond et sa productivité rizicole résultent non seulement de spécificités irréductibles du milieu physique des Hauts-Plateaux mais aussi d'aménagements, traditions culturelles et modes de gestion de l'eau, qui sont le fait de la communauté des riziculteurs ayant investi le vallon. Cette communauté modifie et utilise l'environnement, aussi bien le sol que la topographie ou le régime hydrologique. L'étude du "fonctionnement" hydrique et minéral du bas-fond anthropisé n'est donc envisageable que si on considère la logique du milieu rural traditionnel comme une de ses composantes. Les rendements du riz (fig. 15) en parcelles et conditions paysannes, qui montrent une structuration spatiale dans le bas-fond, sont les réponses de la plante aux 2 ordres de phénomènes, humains et physiques, en interactions.

L'approche agronomique, à Ambohitrakoho a donc été conduite sous plusieurs formes complémentaires spatialisées :

- de façon "classique" sur des parcelles à intrants et traitements (en principe) contrôlés, mais réparties tout au long du bas-fond, pour constater l'éventuelle différenciation spatiale ;
- en suivi des parcelles traditionnelles sans modification ;
- par des enquêtes auprès des 21 riziculteurs du bas-fond que l'on a interrogés, pour chacune de leurs rizières, sur les rendements, les pratiques culturelles, la nature des sols et la gestion de l'eau. Ceci,

dans un esprit comparatif (plus que quantitatif) et toujours spatialisé. Les contraintes des pratiques communautaires sur un parcellaire petit (0,5 à 25 ares) et figé ont ainsi été mises en évidence ;

-par analyses foliaires (stades paniculaire) des riz produits en conditions traditionnelles, répartis dans tout le vallon.

7. LES "EMBOITEMENTS D'ECHELLE" (FIG. 4 A FIG. 8)

L'échelle, au sens cartographique et courant du terme, est le rapport de dimensions spatiales entre l'objet réel et sa représentation sur le papier ; mais elle recouvre aussi la notion de "point de vue", de « niveau de perception », de "niveau logique", de "niveau de cohérence". C'est-à-dire qu'elle concerne les domaines sur lesquels on raisonne et dont la pertinence dépend de cette échelle. Ces domaines peuvent correspondre, dans nos catégories, à des "champs disciplinaires". Un système naturel est toujours inclus dans un système plus large (contexte, métasystème), qui le conditionne. Inversement, il est composé de sous-système qui, si on veut en étudier indépendamment la cohérence et les processus de fonctionnement, demanderont des champs de raisonnement, des méthodes et des outils propres ; ceux-ci peuvent, n'avoir rien de commun avec, ceux des niveaux logiques intégrateurs supérieurs. Autrement dit le problème classique des "transferts d'échelle" est souvent insoluble. On ne peut pas passer logiquement d'un ensemble structuré habité par des processus définissant un. système ,à un autre ensemble structuré de processus émergeant par intégration et définissant le système englobant supérieur .On ne peut pas expliquer le passage d'un niveau cohérent à un niveau supérieur. En règle générale, la notion d'émergence de propriétés nouvelles est fondamentalement non linéaire, non prévisible et non modélisable. Il faut en avoir conscience pour éviter de s'acharner sur des problèmes qui ont peu de sens.

Ainsi, le bas-fond d'Ambohitrakoho fait partie d'un "ensemble de systèmes emboîtés" qui, du plus général au plus "fin", peuvent être :

-le réseau de vallées rizicultivées, formant un dessin typique, propre aux Hautes-Terres malgaches ([fig. 2](#) et [fig. 4](#)) ;

-le bas-fond élémentaire ([fig. 5](#))

-les tronçons "homogènes" dans le bas-fond ([fig. 6](#)) ;

-la rizière ([fig. 6](#)) ;

-la rhizosphère du riz ([fig. 7](#)).

Cet emboîtement est centré volontairement autour de la production du riz aquatique dans les petites vallées: déterminisme de la structuration spatiale des réponses de la plante (différenciation spatiale des rendements) et processus de fonctionnement du milieu (y compris anthropiques) qui contribuent à expliciter ces différences, à chaque niveau.

-La connaissance préalable du niveau 1, nécessitant une reconnaissance de type "hydro-morpho-pédologique" et l'appréhension du contexte socio-économique général, a été suffisante pour choisir le site du niveau 2 et les grandes problématiques à y aborder .

-Les niveaux 2 (bas-fond élémentaire) et 3. (unités hydro-morpho-pédologiques homogènes), qui étaient l'objet essentiel de l'ATP , ont

demandé une structuration fine du milieu, l'identification des successions des matériaux

(niveau 2) et, leurs modalités d'occurrence dans l'espace (niveau 3) : quantification de l'ambiance physico-chimique, des flux hydriques et minéraux. Pour ces derniers, il a fallu considérer le manteau d'altération du bassin versant local comme faisant partie du système. L'homme intervient ici au niveau de la communauté paysanne qui gère le bas-fond peut-être davantage qu'à un niveau individuel. L'homme s'adapte à son milieu spécifique mais sa marge de liberté est limitée par la communauté des riziculteurs (et ses hiérarchies) concernant la gestion de l'eau en particulier et l'entretien des aménagements communs (drains).

-Le niveau 4, qui est celui de la rizière, est l'élément anthropique de base du bas-fond qui le "digitalise" spatialement (apparemment de façon arbitraire), suite à une histoire socio-culturelle en partie indépendante (pas tout à fait concernant la taille et la disposition des parcelles) du milieu physique. A l'intérieur de chaque parcelle, le paysan gère sa fertilité et ses pratiques culturales de façon relativement autonome (dates et mode de labour, date de repiquage, drainage, apports de fumures, de terre de tanety ...), suivant ses possibilités et ses motivations. Il reste lié à la communauté pour l'eau. Le paysan est d'autre part soumis aux contraintes du milieu (dynamique hydrologique, sols, pentes), différentes suivant le tronçon de bas-fond où sa parcelle se situe (cf. niveau 3).

-Au niveau 5 (rhizosphère), on descend à un système tout à fait différent. Ici on ne s'intéresse plus seulement à des indicateurs intégrateurs et globaux (pH, Eh, rendements à la parcelle) mais aux interactions ([fig. 7](#)) entre les éléments qui conditionnent les états et sorties du niveau 4. Les supports et agents du système sont ici la solution du sol, le sol, les racines et la microflore. Ils déterminent la nutrition minérale du riz qui en conditionne le rendement. Cette échelle est la plus complexe à étudier des points de vue méthodologique et moyens d'investigation. Les conditions réelles in situ sont difficiles à appréhender. On est souvent obligé de passer par des modalités de laboratoire. Dans cette ATP, nous avons entrevu cette échelle sans réellement l'aborder. Ce pourrait être l'objet d'une recherche postérieure. Elle serait d'autant plus pertinente que les niveaux englobant supérieurs sont maintenant suffisamment connus.

On peut donc voir, en définitive, que ces approches successives ne sont bien sûr pas indépendantes ; elles ont pourtant chacune leur cohérence propre autorisant de les étudier séparément. Cependant un niveau de perception, quel qu'il soit, sera étudié d'autant plus efficacement que ses niveaux supérieurs (différents contextes), tels des "anneaux de garde" } auront été mieux compris (dans l'espace et dans le temps). Inversement si la filiation des différentes échelles est établie, le domaine d'extrapolation d'une échelle particulière sera mieux défini.

8. STRUCTURE SPATIALE ET FONCTIONNEMENT TEMPOREL

Le bas-fond pris comme objet d'étude est un système organisé spatialement, traversé par des flux hydriques et minéraux ; il est le siège de transformations de divers ordres (éléments minéraux, ambiance physico-chimique, bio-masse, engorgement-réoxydation des sols...). Ces flux et transformations peuvent être considérés à plusieurs échelles temporelles : d'ordre "géo-morpho-climatique" {à l'échelle: du quaternaire), d'ordre historique (depuis l'arrivée de l'homme il y a 500 ans environ), ou à l'échelle actuelle et annuelle, en fonction des cycles des saisons sur lesquels se calent les cycles hydrologiques et agronomiques.

La première échelle intéresse la genèse du milieu (pédogénèse et morphogénèse). Les particularités morpho-pédologiques observées actuellement sont des héritages qui résultent d'une longue évolution du milieu avec interactions des processus géochimiques, morphodynamiques, hydrologiques, éventuellement tectoniques.

Cette évolution se poursuit à l'heure actuelle mais son sens et sa vitesse nous sont difficilement accessibles.

L'échelle historique permet de raisonner sur les processus de transformation du milieu ayant pour origine la communauté villageoise, pour aboutir peu à peu à l'équilibre actuel.

La troisième échelle temporelle, dans le cadre de notre opération de recherche, est celle qui nous intéresse directement car elle rythme la production rizicole; ses processus sont accessibles à nos observations et mesures. On considère alors que les évolutions à plus long terme sont "figées".

Pour simplifier, la structure d'un système est l'ordonnement spatial de ce qui ne "bouge pas" à une certaine échelle de temps. Par exemple, à notre échelle, il en est ainsi pour le modelé, les matériaux, certaines propriétés des sols (granulométrie, matière organique, capacité d'échange, bases échangeables, phosphore) ([fig. 15](#)). Ces choses fixes sont agencées entre elles de façon à différencier des entités spatiales appelées "unités de milieu" ou "unités morphopédologiques". Cet agencement spatial est la structure du système.

Le fonctionnement est tout ce qui traverse la structure et qui "bouge" pendant l'année, que ce soit des flux (eaux) ou des états (pH, Eh...) ([fig. 15](#)) ; mais la façon dont cela bouge possède une répartition spatiale calquée sur celle des unités morpho-pédologiques qui constituent la structure. Structure spatiale et fonctionnement actuel se déterminent mutuellement. C'est pourquoi tous les phénomènes que nous avons suivi sur le bas-fond ont été mis en relations spatiales, depuis l'ambiance physico-chimique du sol jusqu'aux rendements du riz, en passant par les profondeurs et caractéristiques des divers matériaux du bas-fond, les flux hydrologiques ou les pratiques paysannes..

Pour cela la carte topographique et les photos aériennes (décembre 1987 et avril 1988) à l'échelle du 1/2500, ont été constamment utilisées comme support.

9. CONCLUSIONS

A l'issue de la présentation et de l'examen rétrospectif de notre opération de recherche, nous concluons par la présentation des trois tableaux qui suivent.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- ARTHAUD (F), GRILLOT (J.C), RAUNET (M), 1989- Contrôle néotectonique des directions de drainage sur les Hauts Plateaux de Madagascar, C.R. Acad. Sci., Paris, t. 308, série II, pp. 527-530, 1989
- 2- ARTHAUD (F), GRILLOT (J.C.), RAUNET (M), 1989- Mise en évidence d'un néotectonique en distension N-S à Madagascar (Hauts Plateaux). C.R. Acad. Sci" Paris, à paraître fin 1989.
- 3 -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., Ottawa, Canada.
- 4 -CIRAD/CNRS/MRSm, 1987 -Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les Hautes Terres de Madagascar. Rapport d'avancement, 71 pages + annexes, juin 1987.
- 5 -CIRAD/CNRS/MRSTD, 1988 -Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les Hautes Terres de Madagascar. Rapport d'avancement, 306 pages. juin 1988.
- 6 -CIRAD/CNRS/MRSTD. 1989 -Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les Hautes Terres de Madagascar. Rapport d'avancement. 196 pages. juin 1989.
- 7 -DE GIUDICI (P). 1988 -Etude préliminaire de la mobilisation du fer en sol de bas-fond et ses incidences sur l'adsorption de phosphore. ATP "Bas-fond" -Rapport d'avancement juin 1988, pp. 55-76,
- 8 -DE GIUDICI (P), RAUNET (M), VIZIER (J.F.), 1989 -La physico-chimie des sols de rizières d'un bas-fond des Hauts Plateaux de Madagascar, Implications agronomiques. En préparation pour "l'Agron. Trop.". s
- 9 -DE GIUDICI (P), 1989 -Caractérisation physico-chimique de l'état d'hydromorphie des sols du bas-fond d'Ambohitrakoho pendant le cycle du riz, ATP "Bas-fond" -Rapport d'avancement juin 1989, pp, 49- 74.
- 10 -DUPUY (J), 1988 -Evaluation au champ des niveaux de fer de la solution du sol, ATP "Bas-fond" -Rapport d'avancement juin 1988, pp. 43-54.
- 11 - GAUDIN (R), 1987- L'effet supergranule d'urée (SGU) en sols de rizières : un problème de diffusion avec échange d'ions, Essai de modélisation, Thèse de doctorat de l'Institut polytechnique de Lorraine, Nancy- Vandoeuvre, 147 pages.
- 12- GAUDIN (R), 1988 -Etude des remontées capillaires et de l'alimentation hydrique du triticale de contre-saison, ATP "Bas-fond" -Rapport d'avancement juin 1988, pp. 155-174.
- 13- GAUDIN (R), 1988 -Les problèmes de nutrition minérale (en particulier azotée) posés par l'étude de la fertilisation supergranule d'urée en différents points du bas-fond d'Ambohitrakoho, ATP "Bas-fond" -Rapport d'avancement juin 1988, pp, 107-130,
- 14- GAUDIN (R), 1988 -Mise en évidence d'une contribution séparée des phénomènes de diffusion et de prélèvement racinaire dans l'évolution de la concentration en ammoniacale au point d'apport d'un supergranule d'urée. ATP "Bas-fond" -Rapport d'avancement juin 1988, pp. 91-130,
- 15 -GAUDIN (R), 1989 -De l'absorption de l'azote ammoniacal sous sa forme moléculaire NH₃ à la sonde de fertilité : implication physiologique et intérêt agronomique. ATP "Bas-fond" - Rapport d'avancement juin 1989, pp, 79-97.
- 16- GAUDIN (R), DUPUY (J), BOURNAT (P), 1987- Suivi du contenu en azote de la

solution du sol d'une rizière après placement d'urée. *L'Agron. Trop.* 42, 1, 13-19, 1987.

17 -GRILLOT (J.C.), RAUNET (M), 1988 -Aquifère d'arènes granitiques sous recouvrement argilo-limoneux et organique (Hauts-Plateaux cristallophylliens, Madagascar). *C.R. Acad. Sci., Paris*, t. 306, série II, pp. 611-614.

18 -GRILLOT (J.C.), FERRY (L), 1990 -Approche des échanges surface-terrain en milieu cristallin altéré aquifère (Hautes-Terres de Madagascar). Proposé aux Cahiers ORSTOM (hydrologie).

19 -GRILLOT (J.C.), RAUNET (M), FERRY (L), 1990 -Comportement piézométrique des nappes d'altérites en zone intertropicale humide d'altitude (Hauts-Plateaux de Madagascar). *Journal of Hydrology*, Elsevier Sci. Publishers B. V., Amsterdam, à paraître.

20- GRILLOT (J.C.), BLAVOUX (B), RAUNET (M), 1990 ? -Recharge des aquifères de socle en zone intertropicale -d'altitude. *Rev. Géodynamica Acta*, Paris.

21- GRILLOT (J.C.), BLAVOUX (B), RAKOTONDRAINIBE (J.H), RAUNET (M), RANDRIANARISOA (N), 1987 - A propos des aquifères d'altérites sur les Hauts-Plateaux cristallophylliens de Madagascar. *C.R, Acad, Sci., Paris*, t. 305, série II, pp. 1471-1476, 1987.

22- GRILLOT (J.C.), BLAVOUX (B), RAKOTONDRAINIBE (J.H), RAUNET (M), 1990 - Dynamique en Hautes eaux des aquifères d'altérites sur les Hauts-Plateaux cristallophylliens de Madagascar. *Journal of African Earth Sci.*, Pergamon Press., England, vol. 8, no 12, à paraître.

23- PUARD (M), 1988 -Interactions eau-sol-riz aquatique dans le milieu proche racinaire - Réflexions préliminaires. ATP "Bas-fond" -Rapport d'avancement juin 1988.

24- RAUNET (M), 1980 -Les bas-fond et plaines alluviales des Hautes-Terres de Madagascar .Reconnaissance morpho-pédologique et hydrologique. IRAT/MPARA, 1980 -Projet Blé, 166 pages.

25- RAUNET (M), 1981 -Potentialités écologiques de Madagascar pour la culture de l'orge de brasserie. IRAT/MPARA, 1981, 58 pages.

26- RAUNET (M), 1983- Les potentialités écologiques de Madagascar pour le blé et l'orge. *L'Agron. Trop.*, XXXVII-2, pp. 131-141.

27- RAUNET (M), 1984- Les potentialités agricoles des bas-fonds en région intertropicale. L'exemple de la culture du blé de contre-saison à Madagascar. *L'Agron. Trop.* 39, 2, pp. 121-135, 1984.

28 -RAUNET (M), 1984 -La région du Lac Alaotra (Madagascar). Etude du milieu physique. Système et structure. IRAT/MPARA, 1984, pages 2, cartes 1/50.000.

29 -RAUNET (M), 1985 -Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar. Géomorphologie, pédologie, hydrologie. *Z. Geomorph. NF, Suppl. Bd 52*, 25-62, 1985.

30 -RAUNET (M), 1985 -Cartographie morpho-pédologique de cinq terroirs rizicoles sur -les Hautes-Terres de Madagascar. Aptitudes à la culture du blé de contre-saison en rizières. IRAT/KOBAMA, 1985, 44 pages, 5 cartes.

31- RAUNET (M), 1985- Bas-fonds et riziculture -Approche structurale comparative. *L'Agron. Trop.*, 1985, 40-3, pp. 181- 201.

32 -RAUNET (M), 1986 -Environnements physiques et aménagements des terroirs rizicoles sur les Hautes-Terres de Madagascar. Accepté pour publication dans *L'Agron. Trop.*"

33- RAUNET (M), 1987- Géomorphologie et pédologie sur le bas-fond d'Ambohitrakoho. ATP "Bas-fond" -Rapport d'avancement juin 1987, pp. 9-17.

34 -RAUNET (M), 1989 -Approche systémique appliquée à la cartographie morpho-

pédologique du paysage. 1er séminaire Franco-Africain de pédologie Tropicale -ORSTOM-Université du Bénin (Togo), Lomé, 6- 12 fév., 1989- 36 pages.

35- VIZIER (J.F.), 1988- Etude de la physico-chimie des sols de rizières. Protocole d'étude. ATP "Bas-fond" -Rapport d'avancement juin 1988, pp. 131-138.

36 -VIZIER (J.F.), 1988 -La toxicité ferreuse dans les sols de rizières -Importance du problème, causes et mécanismes mis en jeu, conséquences pour l'utilisation des sols. ATP "Bas-fond" -Rapport d'avancement juin 1988, pp. 77-89.