



CIRAD-CNRS-INRA-ORSTOM-UNIVERSITÉ

LES ANDOSOLS DE L'ÎLE DE LA RÉUNION

**PRÉPARATION D'UN PROGRAMME
DE RECHERCHES PLURIDISCIPLINAIRES**

**SÉMINAIRE DE SAINT-DENIS
24 MAI – 1^{ER} JUIN 1988**

SOMMAIRE

LISTE DES PARTICIPANTS	5
AVANT-PROPOS	7
JUSTIFICATION D'UN PROGRAMME DE RECHERCHE SUR LES ANDOSOLS À LA RÉUNION	11
APERÇU SUR LE MILIEU PHYSIQUE ET LES SOLS ANDIQUES DE LA RÉUNION. (M. RAUNET)	17
LES ANDOSOLS. ÉTAT DES CONNAISSANCES. PROBLÉMATIQUE. (P. QUANTIN)	51
MINÉRALOGIE ET MICROSTRUCTURE DES ANDOSOLS. (M. ROBERT)	77
SYSTÈMES DE CULTURE DANS LES SOLS ANDIQUES DE LA RÉUNION. (R. MICHELLON)	93
CARACTÉRISATION ET SUIVI DE LA FERTILITÉ PHYSICO-CHIMIQUE DES ANDOSOLS À LA RÉUNION. (P.F. CHABALIER)	113
CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES ET PHYSIQUES DES SOLS ANDIQUES À LA RÉUNION. (S. PERRET)	121
QUELQUES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DES ANDOSOLS DE LA RÉUNION EN LIAISON AVEC LEUR UTILISATION AGRICOLE. (M. BROUWERS, M. FORTIER)	139
APERÇU SUR L'ÉRODIBILITÉ DES ANDOSOLS CULTIVÉS À LA RÉUNION. (J. BOUGERE)	155
PROBLÉMATIQUE EN MATIÈRE D'HYDRODYNAMIQUE DANS LES ANDOSOLS DE LA RÉUNION. (P. LANGELLIER, M. VAUCLIN)	163
QUELQUES PROBLÉMATIQUES AGRONOMIQUES. (J.C. REMY)	173
RECHERCHES À ENTREPRENDRE	185
CONCLUSION	205
BIBLIOGRAPHIE SUR LES ANDOSOLS	211

LISTE DES PARTICIPANTS

- M. J.P. BABUT	IRAT REUNION
- M. Y. BERTIN	IRFA REUNION
- M. J. BOUGERE	UNIVERSITE REUNION
- M. M. BROUWERS	IRAT MONTPELLIER
- M. O. CASTANIE	IRAT RUANDA
- M. P.F. CHABALIER	IRAT REUNION
- M. J.M. CHASTEL	IRAT REUNION
- M. J. COUDRAY	UNIVERSITE REUNION
- M. F. DEMARNE	IRAT REUNION
- M. A. DUCREUX	CEEMAT MONTPELLIER
- Mme M.C. GIBOULOT	SUAD TROIS-BASSINS
- M. P. LANGELLIER	IRAT REUNION
- M. P. LEGIER	IRAT REUNION
- M. R. MICHELLON	IRAT REUNION
- M. P. de MONTAIGNAC	ONF REUNION
- M. J.M. PAILLAT	CEEMAT REUNION
- M. P. PARIENTE	IRAT REUNION
- M. S. PERRET	CEEMAT REUNION
- M. R. PIROT	CEEMAT REUNION
- M. P. QUANTIN	ORSTOM BONDY
- M. M. RAUNET	IRAT MONTPELLIER
- M. J.C. REMY	INRA PARIS
- M. Y. ROERERER	CTFT REUNION
- M. M. ROBERT	INRA VERSAILLES
- M. J. SERVANT	CIRAD REUNION
- M. O. SOUVANNAVONG	CTFT NOGENT S/ MARNE
- M. M. VAUCLIN	IMG GRENOBLE
- M. J. VAUDEL	DAF REUNION

SIGLES

APR	Association pour la Promotion Rurale
CEEMAT	Centre d'Etudes et d'Expérimentation du Machinisme Agricole Tropical (Département du CIRAD)
CERF	Centre d'Essai de Recherche et de Formation (canne à sucre)
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CTFT	Centre Technique Forestier Tropical (Département du CIRAD)
CTICS	Centre Technique Interprofessionnel de la Canne et du Sucre
DAF	Direction de l'Agriculture et de la Forêt
DDE	Direction Départementale de l'Équipement
DRRT	Délégation Régionale à la Recherche et à la Technologie
IMG	Institut de Mécanique de Grenoble (associé au CNRS)
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IRAT	Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières (Département du CIRAD)
IRFA	Institut de Recherches sur les Fruits et Agrumes (Département du CIRAD)
ONF	Office National des Forêts
ORSTOM	Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération
SICA	Société d'Intérêt Collectif Agricole
SUAD	Service d'Utilité Agricole et de Développement (Chambre d'Agriculture)

AVANT-PROPOS

Jean SERVANT
Michel RAUNET

AVANT PROPOS

Du 24 mai au 1er juin 1988 s'est tenu, à l'initiative du CIRAD, à la station de la Bretagne/St Denis, un atelier de travail relatif aux Andosols de la Réunion.

Ce séminaire avait pour objet de faire le point sur le thème des Andosols Réunionnais et d'en préparer un programme de recherche pluridisciplinaire sur plusieurs années, devant être lancé en 1988, grâce à des crédits CORDET* (Ministère de la Recherche/Ministère des DOM-TOM) dont la demande avait été faite début 1988.

A l'époque du Séminaire, l'allocation de crédits n'était pas encore décidée. Elle ne l'a été que fin juin 1988, pour un montant de 220.000 FF la première année de recherche.

L'esprit du Programme est de mettre en commun les expériences et compétences scientifiques et agronomiques de façon à bénéficier d'un maximum d'efficacité dans les résultats.

C'est pourquoi le montage du programme sera résolument trans-institutionnel et trans-disciplinaire.

Chaque participant, conscient des limites de sa propre activité, était bien convaincu, dès le départ, de cette nécessité. D'ailleurs le côté "contraintes structurelles" éventuelles, n'a pratiquement pas été évoqué, tellement il semblait aller de soi que la priorité était la synergie scientifique au service d'une problématique agronomique régionale très concrète et bien exprimée.

* CORDET : Commission de coordination et d'Orientation de la Recherche dans les Départements et Territoires d'Outre-Mer.

Les associations entre laboratoires et organismes de développement, à aucun moment, ne sont apparues en termes de compétition ou de "chasse gardée" mais toujours de coopération et de complémentarité.

Ce séminaire, très ouvert et enrichissant, a donné lieu à des exposés sur les différents thèmes, théoriques ou pratiques, relatifs à la connaissance et à la gestion des andosols. Il a été l'occasion de discussions approfondies, de débats contradictoires, de constats (acquis, incertitudes, lacunes), que ce soit au niveau conceptuel, méthodologique ou encore échelles de perception des phénomènes et processus.

Parallèlement aux débats en salle, des tournées sur le terrain ont été réalisées, permettant le contact avec la réalité concrète du contexte Réunionnais.

Le Séminaire ne s'est pas tenu en vase clos, puisqu'une large publicité en a été faite auprès des structures régionales et départementales (Conseil Régional, Conseil Général, Chambre d'Agriculture, DAF, SUAD, ONF, CERF, CTICS, SICA, DRRT, Université...), ainsi qu'auprès des médias qui en ont largement rendu compte. Une table ronde, qui a donné lieu à un débat fructueux, s'est tenue à la Chambre d'Agriculture, à laquelle avaient été invités les responsables impliqués dans le développement agricole de l'île.

A l'issue de ces discussions, des orientations de recherches ont été élaborées, avec établissement des thèmes prioritaires et définition des responsabilités et tâches de chacun. Il est évident qu'un programme aussi vaste, fonctionnant avec des crédits encore limités, avec un personnel scientifique et technique à mettre progressivement en place, demande au départ une certaine hiérarchisation et une certaine modestie des interventions. D'autre part, tout ne pouvant être prévu à l'avance, la pertinence et la faisabilité de certaines méthodologies étant encore problématiques pour ces matériaux très particuliers que sont les andosols, un tel plan de recherche sera obligatoirement amené à être, en cours de route, modulé, adapté ou même profondément modifié. Il faut donc se garder d'une trop grande rigidité au démarrage.

La fin du séjour des participants à cet atelier de travail, s'est terminé par un merveilleux feu d'artifice offert par le volcan (pour ne pas dire ses organisateurs !) qui a ébloui et enthousiasmé chacun. Voyons-y un symbole pour la réussite future de ce projet.

**POURQUOI UNE RECHERCHE
SUR LES ANDOSOLS
A LA REUNION ?**

JUSTIFICATION D'UN PROGRAMME DE RECHERCHE
SUR LES ANDOSOLS A LA REUNION

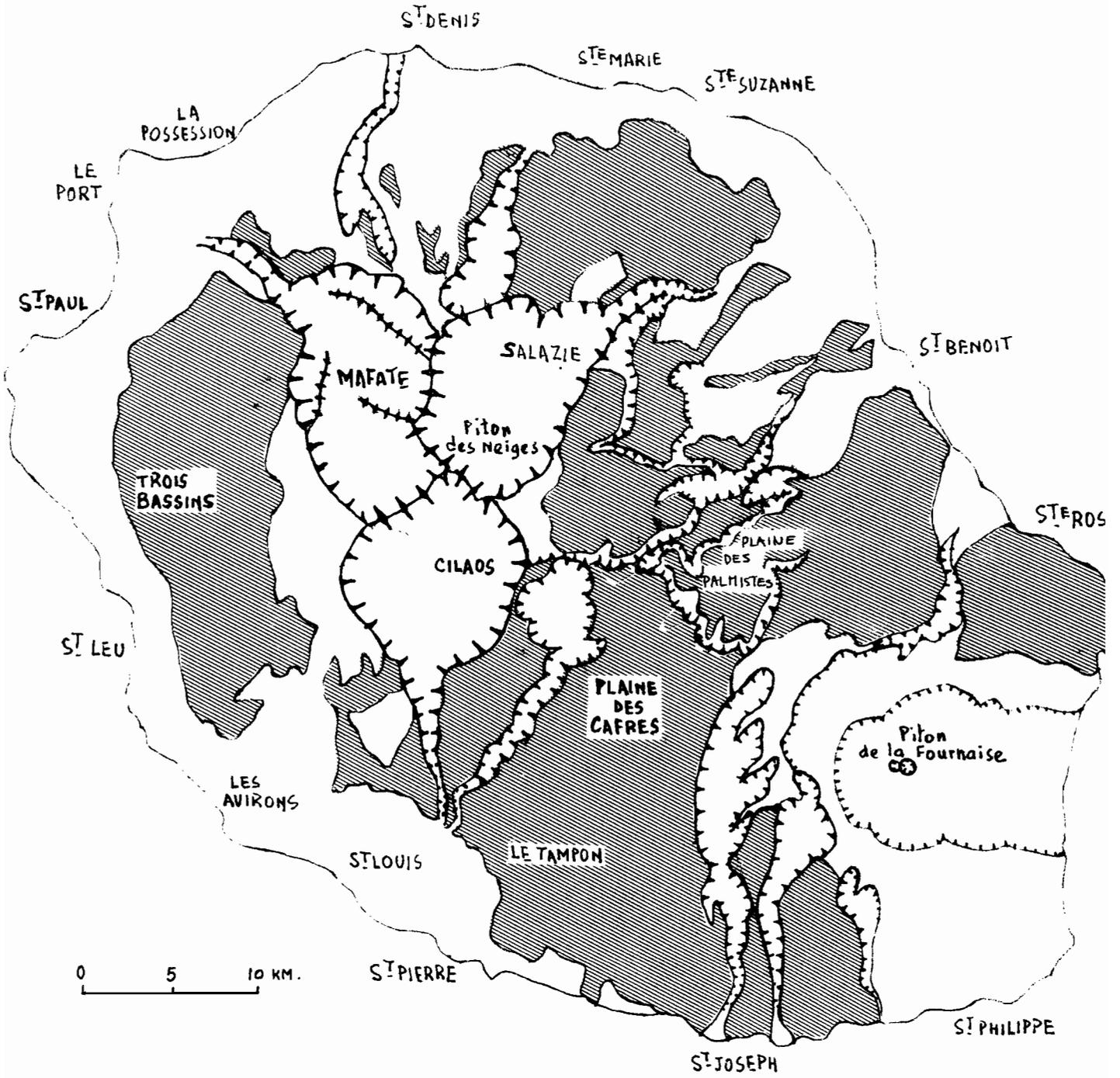
1 - Les andosols représentent, à la Réunion, 80 % des terres cultivables.

2 - L'avenir agro-socio-économique du Département de la Réunion et la restructuration de son espace rural, exigeront une intensification et une diversification de la production sur les andosols, compatibles avec une protection efficace de ce type de milieu contre l'érosion.

3 - De par leurs propriétés spécifiques très particulières, ces sols posent de sérieux problèmes pratiques d'utilisation agricole, entre autres :

- . Difficultés d'exploitation du sous-sol (en dessous de 30 cm de profondeur) par les systèmes racinaires.
- . Rétention énergétique du phosphore.
- . Acidité et résistance à l'élévation du pH par les amendements calciques.
- . Faible portance pour les engins agricoles.
- . Erodibilité des sols sous culture, après travail mécanique.
- . Déshydratation irréversible et problèmes d'alimentation hydrique.
- . Toxicités et engorgement pour les espèces à fort enracinement (arbres fruitiers, reboisements).
- . Difficulté de caractérisation physico-chimique (pH, capacité d'échange...) et donc d'établissement de recommandations pertinentes aux agriculteurs.

4 - Tous les organismes confrontés aux problèmes d'aménagement (agriculture, équipement...) sont demandeurs d'une meilleure connaissance sur ces sols : DDA, SUAD, ONF, CERF, SICA, IRAT, CEEMAT, IRFA, DDE. Les productions concernées sont nombreuses : canne à sucre, géranium, cultures maraichères, maïs, arboriculture fruitière,



EXTENSION DES ANDOSOLS CULTIVABLES
A L'ILE DE LA REUNION

prairies, reboisements. Les géniés, Civil et Rural, sont également intéressés, ainsi que les hydrogéologues (caractérisation de la zone d'alimentation des nappes phréatiques).

5 - La plupart des travaux thématiques ou spécialisés sur les andosols de la Réunion concluent à la nécessité d'entreprendre un programme approfondi interdisciplinaire sur le sujet. La connaissance "macroscopique" ou comportementale ("boîte noire") déjà bien avancée sur les andosols, s'avère cependant encore insuffisante pour remédier efficacement aux contraintes reconnues. Il faut maintenant y adjoindre des recherches sur la microstructure et la dynamique intime (minérale, hydrique et rhéologique) de ce type de matériau, autrement dit, relier en un programme coordonné le fondamental et l'appliqué, le laboratoire et le terrain, le microscopique et le macroscopique.

6 - En dehors de la Réunion, les andosols couvrent, dans le monde tropical volcanique une superficie considérable : Amérique du Sud et Amérique Centrale (cordillères), Hawaï, Antilles, Asie ("ceinture de feu" du Pacifique), Îles du Pacifique et de l'Océan Indien, Nouvelle Zélande, Afrique Centrale (Cameroun, Zaïre, Kenya, Tanzanie, Ruanda, Burundi).

7 - Jusqu'à présent sauf exception, les nombreuses études sur les andosols dans le monde (Japon, Hawaï, Nouvelle Zélande, Amérique Latine, Antilles) ont abordé des aspects thématiques et fragmentaires ou bien à préoccupations taxonomiques, mais généralement à l'échelle macroscopique. La plupart ont été réalisées en laboratoire, dans des conditions éloignées de celles régissant le fonctionnement naturel de ces sols. Jamais, à notre connaissance, n'a été tentée, à partir des contraintes de terrain bien identifiées, une approche globale essayant de relier différentes disciplines complémentaires à différentes échelles de perception (du paysage au microscopique), combinant les recherches "in situ" et celles en laboratoire.

8 - A la Réunion, où les problématiques issues des demandes multiples des praticiens sont clairement identifiées et posées et où les structures de recherches et d'intervention sont éminemment favorables, pourrait se monter un "laboratoire de référence sur les andosols". Ce laboratoire (ou cellule de recherche) aurait pour but de définir et de coordonner les études transdisciplinaires sur les andosols de la Réunion. Il aurait aussi pour rôle la diffusion de

résultats à l'extérieur ainsi que la mise en relation (intégration, comparaison) des recherches Réunionnaises et étrangères.

**APERÇU SUR LE MILIEU PHYSIQUE
ET LES SOLS ANDIQUES
DE LA REUNION**

Michel RAUNET

APERCU SUR LE MILIEU PHYSIQUE
ET LES SOLS DE
LA REUNION

(M. RAUNET)

En 1987, l'IRAT (M. RAUNET) a effectué les travaux de terrain destinés à l'établissement de la carte morpho-pédologique de l'île à l'échelle du 1/50.000.

Cette carte (dont la maquette très réduite figure en couverture de ce document) en était en juin 1988 au stade de la confection des typons destinés à l'impression off-set. Sa sortie est prévue pour fin 1988 ainsi que la notice.

Les documents feront ressortir les liaisons entre les composantes morpho-climatiques (modélé, type de dissection, pentes, exposition, altitude), les aspects géologiques (pétrographie, types d'émission volcanique, âges), la pédogenèse et les caractéristiques pédo-agronomiques.

La Réunion, île volcanique de type "bouclier intra-plaque" juxtaposant un massif "ancien" (Piton des neiges) et un massif récent/actuel (la Fournaise), présente une géographie physique extrêmement contrastée, des points de vue géologique, climatique, orographique, végétal et par conséquent pédologique :

- La géologie est elle-même diversifiée concernant tant la chimie des laves que leurs types d'émission et leur chronologie. En effet la gamme pétrographique des laves (alcalines) s'étend des océanites (basaltes très riches en Olivine) jusqu'aux trachytes (laves "acides" à plus de 60 %

de SiO₂) en passant par les andésites. Bien que le volcanisme soit à dominance effusive (coulées "aa", "pahoehoe", autobréchifiées), de nombreux et vastes épisodes explosifs, pyroclastiques se sont intercalés, qu'ils soient de type "sec" (lapilli, cendres), de type "phréato-magmatique" (cendres, certains tufs) ou de type "nuée" (ignimbrites, ponces, tufs soudés). Les âges des laves s'étalent suivant des épisodes assez bien délimités, (notamment par des périodes d'altération des mouvements tectoniques et des phases de saupoudrage cendreux) depuis 3 millions d'années jusqu'à l'actuel.

- Le climat est marqué par :

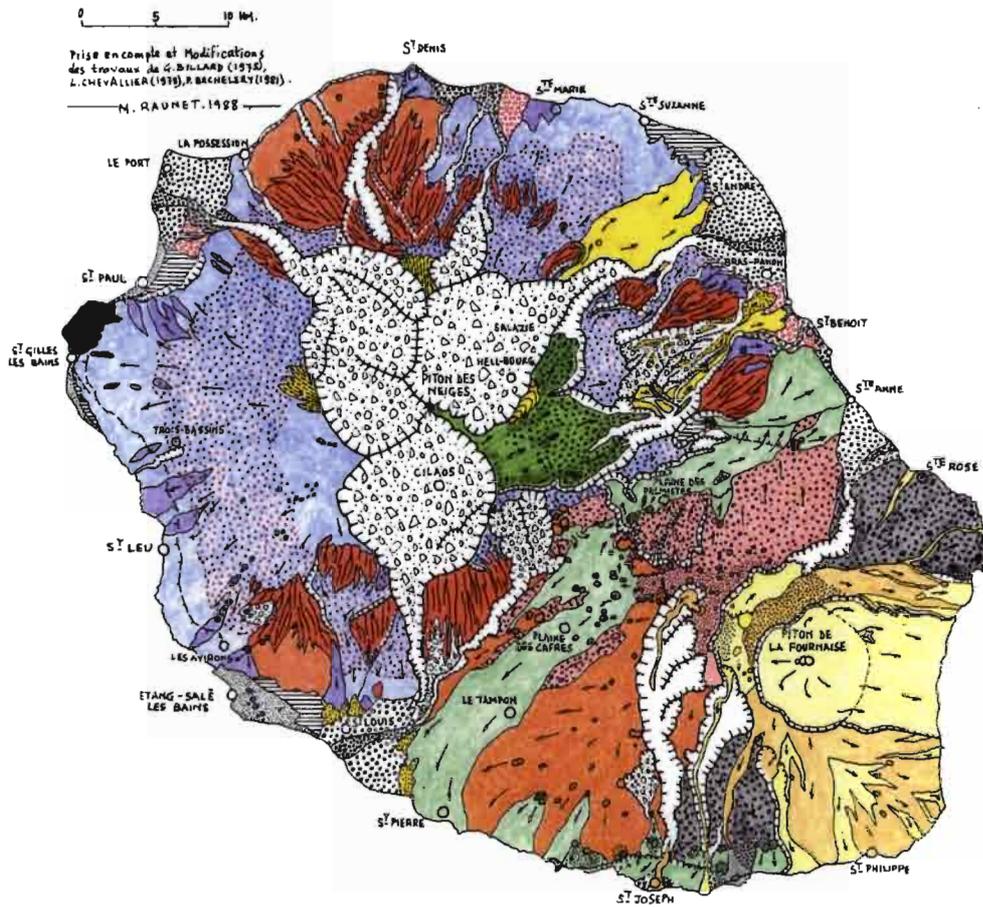
- . de très forts gradients de pluviosité depuis 500 mm jusqu'à 9.000 mm, conditionnés par l'exposition aux alizés (face au vent, face sous le vent), l'altitude et l'orographie très accentuée,
- . des périodes cycloniques violentes et souvent destructrices,
- . un fort gradient de température lié étroitement à l'altitude.

- Du point de vue orographique :

L'île est "compacte" et fortement accidentée puisque, pour un diamètre moyen de 60 kilomètres, le point culminant central (piton des neiges) se situe à 3.000 mètres d'altitude. La dissection est très active, aussi bien (mais de modalités différentes), sur les versants "externes" que dans le coeur du massif. Les flancs externes du volcan-bouclier sont découpés par des entailles profondes ("ravines") isolant de grands panneaux de types "planezes", à formes triangulaires (pointes vers le haut) ou en lanières étroites, dont les pentes s'atténuent et se concavissent dans leurs parties basses terminales. Le centre du vieux massif, quant à lui, est profondément éventré par de spectaculaires "cirques" coalescents entourés de "remparts" sub-verticaux de 500 à 1.000 mètres de dénivelées. L'érosion très active, en bad-lands, aidée par la tectonique tardive y évacue actuellement, vers la mer, spécialement en périodes cycloniques, des quantités impressionnantes de matériaux, à l'origine de vastes cônes de déjection à gros galets, qui forment des épandages emboîtés d'âges différents. Quand au massif récent (Fournaise), sa morphologie est marquée par les formes volcano-tectoniques fraîches encore peu disséquées et peu altérées.

- La végétation est également bien différenciée et

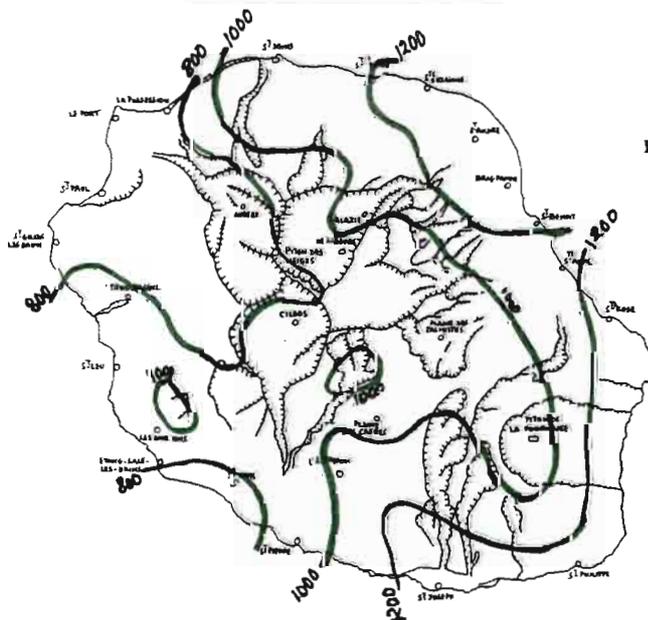
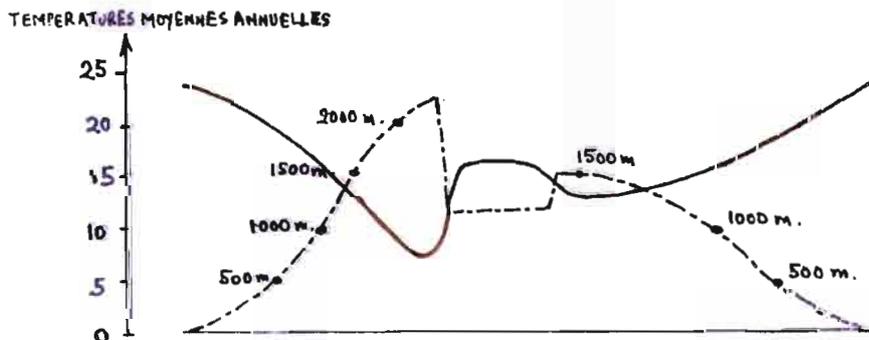
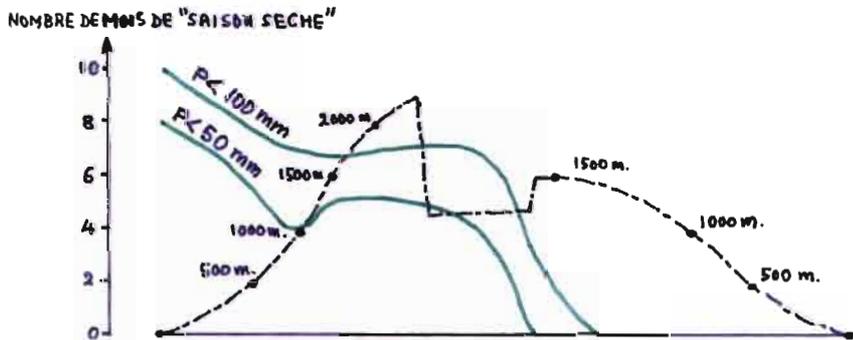
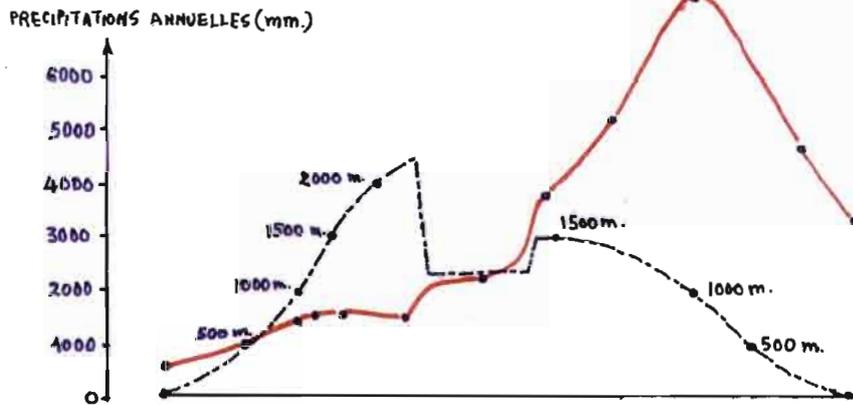
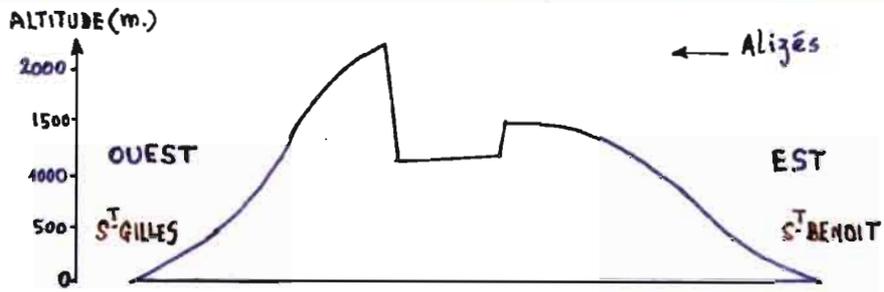
ILE DE LA REUNION
 CARTE MORPHO-GEOLOGIQUE



PITON DES NEIGES					PITON DE LA FOURNAISE			
PHASES	PETROGRAPHIE CARACTERISTIQUE	TYPES D'EMISSION	TECTONIQUE EROSION - ALLUVIONNEMENT	AGES APPROXIMATIFS	TECTONIQUE	TYPES D'EMISSION	PETROGRAPHIE	PHASES
	OCEANITES ZÉOLITISÉES	HYALOCLASTITES ET "BRECHES TRINITIVES" (VISIBLES DANS LES "CIRQUES")		3.000.000	FLANC EST DU PITON DES NEIGES SERVANT DE SUBSTRATUM AUX EMPILEMENTS DE LA FOURNAISE ET FAVORISANT LES GUSSEMENTS ET CISAILLEMENTS EMBOÎTÉS (PSEUDO-CALDERAS) SUCCESSIFS DES VERSANTS ORIENTAUX			
	OCEANITES (BOUCHER PRIMITIF)	EMPILEMENT ÉPAIS DE COULÉES STRATOBOMBS (AA ET PANOHOË) DU BOUCHER PRIMITIF	1 ^{RE} CALDERA	600.000				
	TUFS DE ST-GILLES	FISSURAL-EXPLOSIF-PHREATIQUE		430.000				
		CALME VOLCANIQUE	ALTERATION, GLISSEMENTS ET RENVERSEMENTS SUB-HORIZONTAUX DU PLANCH OCCIDENTAL DU VOLCAN BOUCHER	400.000		COULÉES "AA" ET "PANOHOË"	OCEANITES	
	HAWAÏTES PORPHYROÏDES (Basalte "Bixlado")	COULÉES "AA" ET "PANOHOË"	EROSION REGRESSIVE ACTIVE DES COULÉES II RECOURANT LOCAL, LEHENT LA CALDERA, PERMETTANT LA SORTIE DES COULÉES (BOS de Liang, Trou Malois, Rivière St Denis, Grand Plate, Le Ta page...)	350.000			HAWAÏTES	
	MUGEARITES APHYRIQUES	COULÉES "AA" PARFOIS AUTO-BRECHIFIÉES	EFFONDEMENTS LOCALISÉS Plaine des Mamelles, Dos Dame... ENVAHIS PAR COULÉES DE...	250.000				
			2 ^{DE} CALDERA	230.000	1 ^{RE} CALDERA (Terrain: Nord de BOUF)			
	"TUF JAUNE" (NIVEAU REFÈRE) ET CENDRES LITÉES	ERUPTIONS FISSURALES THRETO-MAGMATIQUES (LIÉES A L'FORMATION DE LA 2 ^{DE} CALDERA)	CONTRACTION ECONOMIQUE DE BIERE, PANOHOË, (RELIÉES DES PLANCH OCCIDENTAL DES MAMMELLES, DES CAPRES)	78.000	EFFONDEMENTS DE LA PLAINNE DES PALMISTES RECOURANT LE NORD DE LA 1 ^{RE} CALDERA	COULÉES "AA" ET "PANOHOË" SE DÉVERSANT DANS LA PLAINNE DES PALMISTES ET LA PLAINNE DES CAPRES	OCEANITES	2
	BENMOREÏTES	COULÉES AUTO-BRECHIFIÉES (REMPLEISSAGE DE LA 2 ^{DE} CALDERA)		50.000		ÉPISODES EXPLOSIFS	HAWAÏTES	3
	CENDRES	VOLCANISME EXPLOSIF		40.000				4
				35.000	2 ^{DE} CALDERA ("Caldera des sables")			
	BENMOREÏTES TRACHYTES COMÉDITES	COULÉES AUTOBRECHIFIÉES (CENTRIFÈRES A LA 2 ^{DE} CALDERA)	EROSION REGRESSIVE ET OUVERTURE MORD-ORIENTALE DE LA 2 ^{DE} CALDERA AUX NIVEAUX DES RIVIÈRES DU MAT, DES ROCHES, DES MAMMELLES, PASSAGES DES COULÉES	15.000	OUVERTURE VERS L'EST PRESQUE JUSQU'A 120° (DE ST-ANNE A ST-JOSEPH) DE LA CALDERA DES SABLES	COULÉES "AA" ET "PANOHOË"		5
		COULÉES IGIMBRITIQUES (Rivière des Roches, Deux Mamelles)		12.000		ÉPISODES EXPLOSIFS	OCEANITES	CENDRES
		COULÉES TRÈS VISQUEUSES (Bélouze)		10.000		COULÉES "AA" ET "PANOHOË" MORS CALDERA (COULÉES LES PLUS RÉCENTES DE L'AVE: PLAINNE DES CAPRES - PLAINNE DES PALMISTES)	HAWAÏTES	6
		"TUFS SOUDES" (Maïdo)		8.000		ÉPISODES EXPLOSIFS (PIRENO), MAGMATIQUES OU NON, VERS 1000 ET 5000 ANS		ÉPISODES EXPLOSIFS
		NUÉES PONCEUSES (St-Louis)		5.000	GLISSEMENTS DES FLANCS EST ET SUD: PSEUDO CALDERA LIMITÉ PAR LES BANDES BASSE-VALLEE ET CONSTANTIN	COULÉES "AA" ET "PANOHOË" REMPLISSANT LA PSEUDO CALDERA DÉVERSANT VERS LE SUD-EST	OCEANITES	5
			EROSION - EFFONDEMENTS ? CIRQUE - RIV. DES ROCHES - DIV. DES PLANCH - GRAND BASIN - TROIS-BASSINS - ENTRE-DEUX		FORMATION DE LA 3 ^{DE} CALDERA ("ENCLOS") GLISSEMENT DES GRANDES MAMMELLES (BRULE)	COULÉES "AA" ET "PANOHOË" ÉPISODES EXPLOSIFS PHRETO-MAGMATIQUES MORS CALDERA (CENDRES DE BELLECOMBE)	BASALTES A OLIVINE	6
			LAHAR DE LA RIVIÈRE DES GABETS				BASALTES COTECTIQUES	
			INNOYAGES ALLUVIAUX FINS					
			SABLES LITTORAUX					

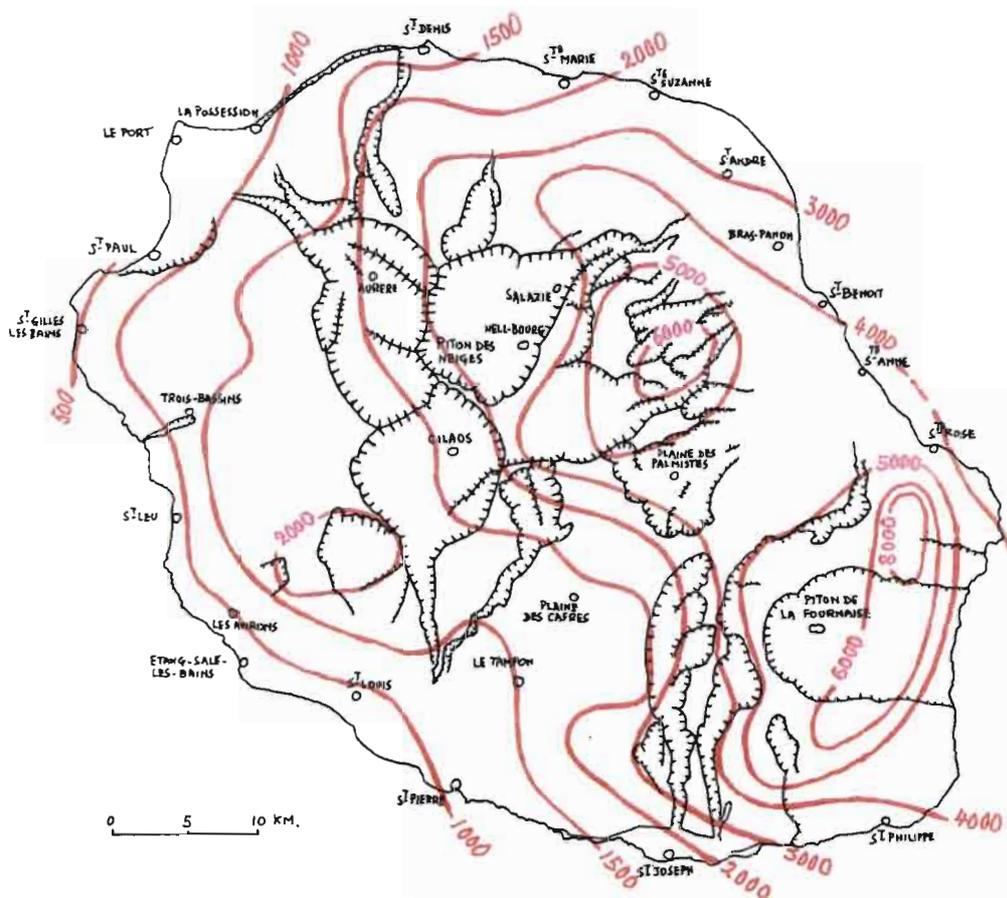
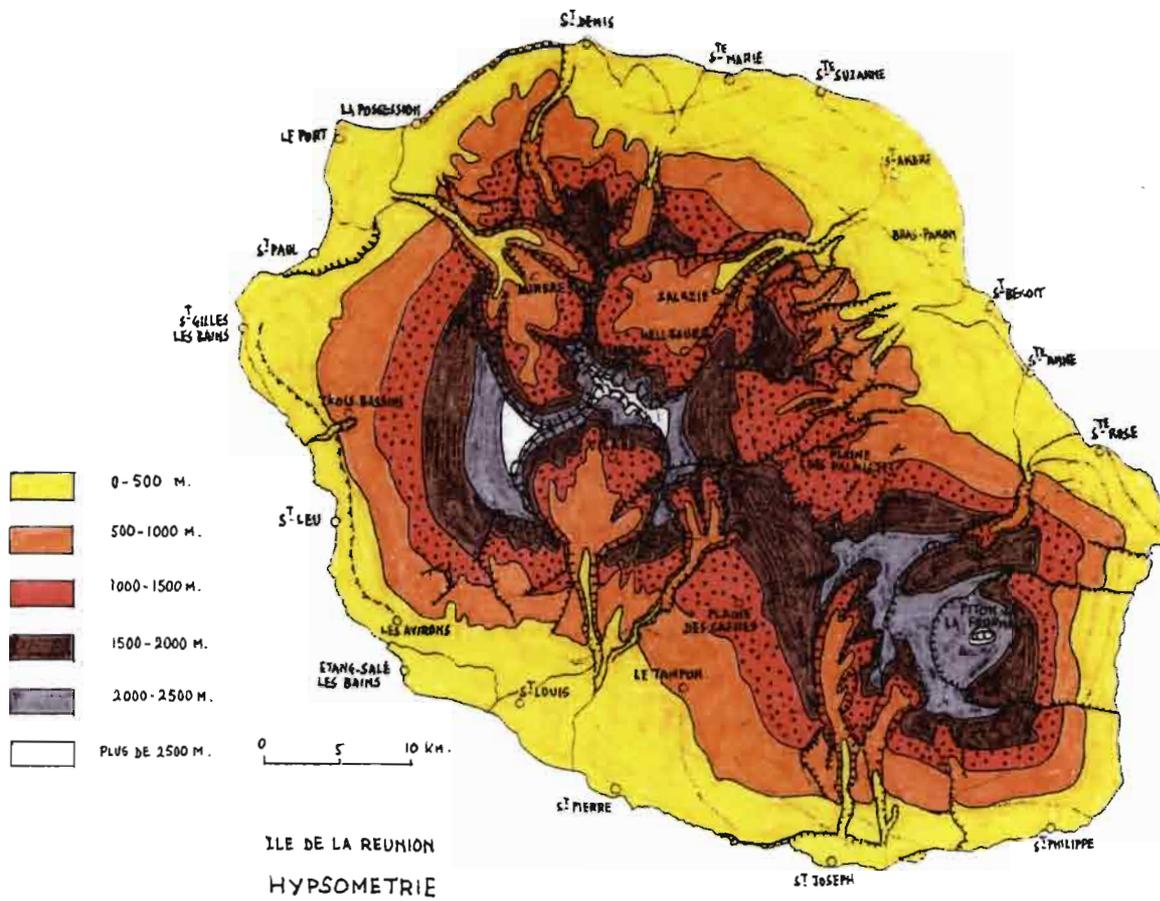
PRISE EN COMPTE DES TRAVAUX DE G. BILLARD (1976), L. CHEVALIER (1979), P. BACHELERY (1981), MODIFICATIONS PROPOSÉES PAR M. RAUNET POUR LES ÉVÉNEMENTS DE MOINS DE 50.000 ANS.

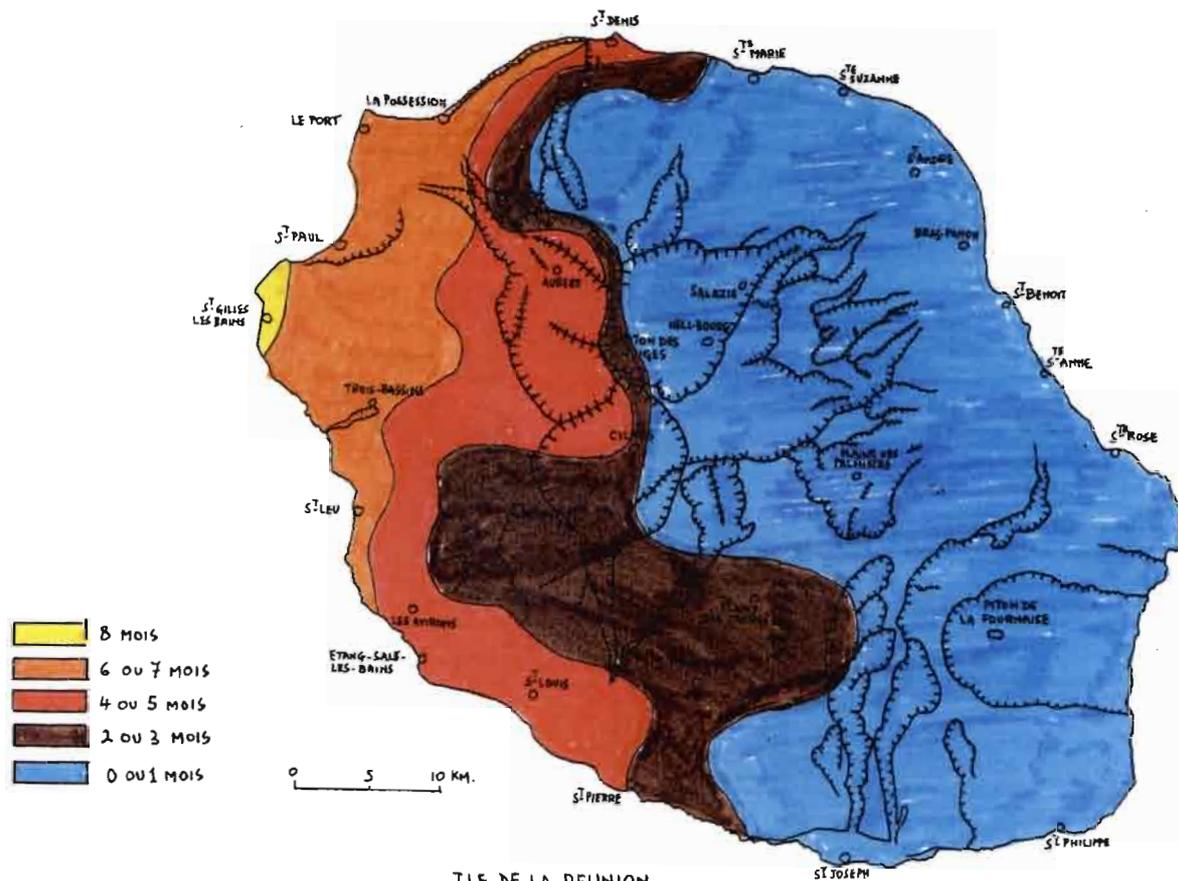
ALTITUDE-CLIMAT : COUPE SCHEMATIQUE DE L'ILE (S^T-GILLES - S^T-BENOIT)



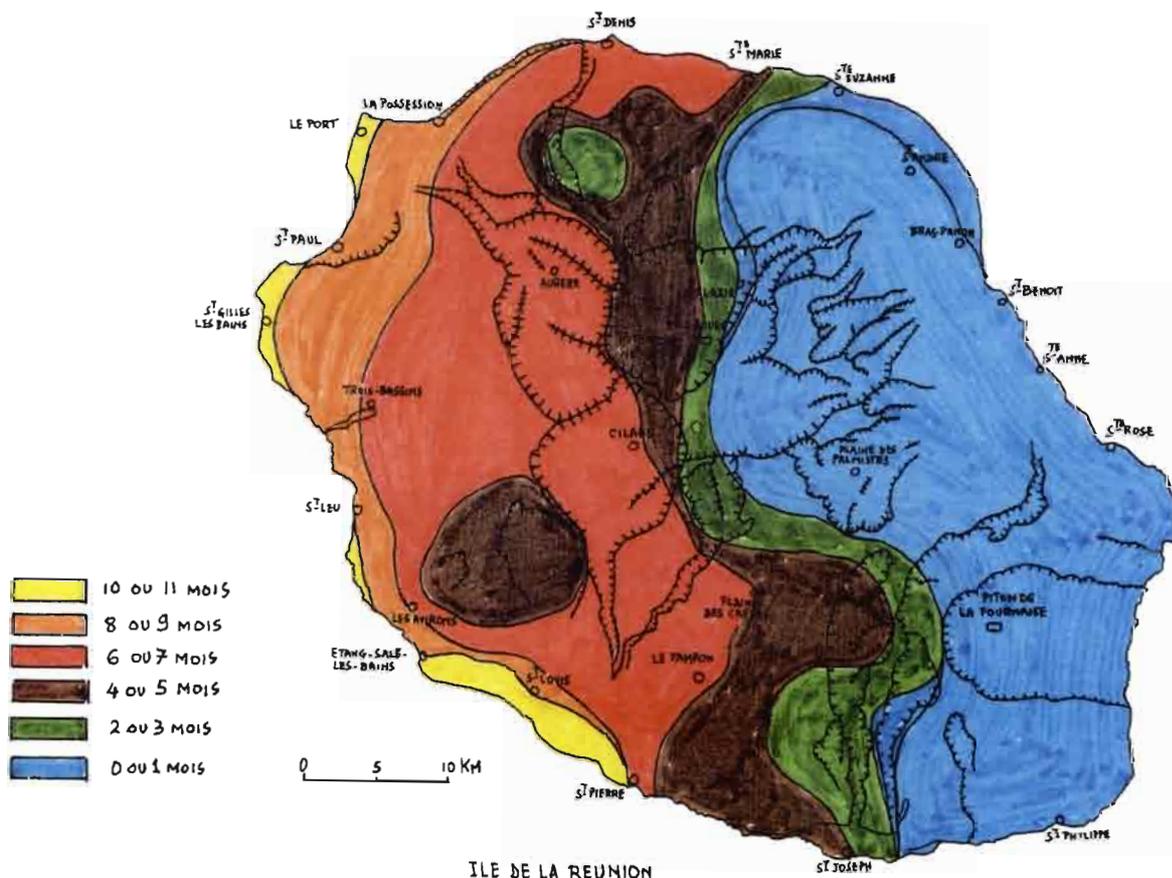
ILE DE LA REUNION
E.T.R
MOYENNE ANNUELLE
1971-1981

EN UTILISANT L'ETP-TURC
ET EN SUPPOSANT UNE
RU DE 100 MM.





ILE DE LA REUNION
 NOMBRE DE MOIS "SECS" (MOINS DE 50 MM.)
 - PERIODE 1951 - 1969 -



ILE DE LA REUNION
 NOMBRE DE MOIS "PEU PLUYIEUX" (MOINS DE 100 MM.)
 - PERIODE 1951 - 1969 -

VEGETATION NATURELLE

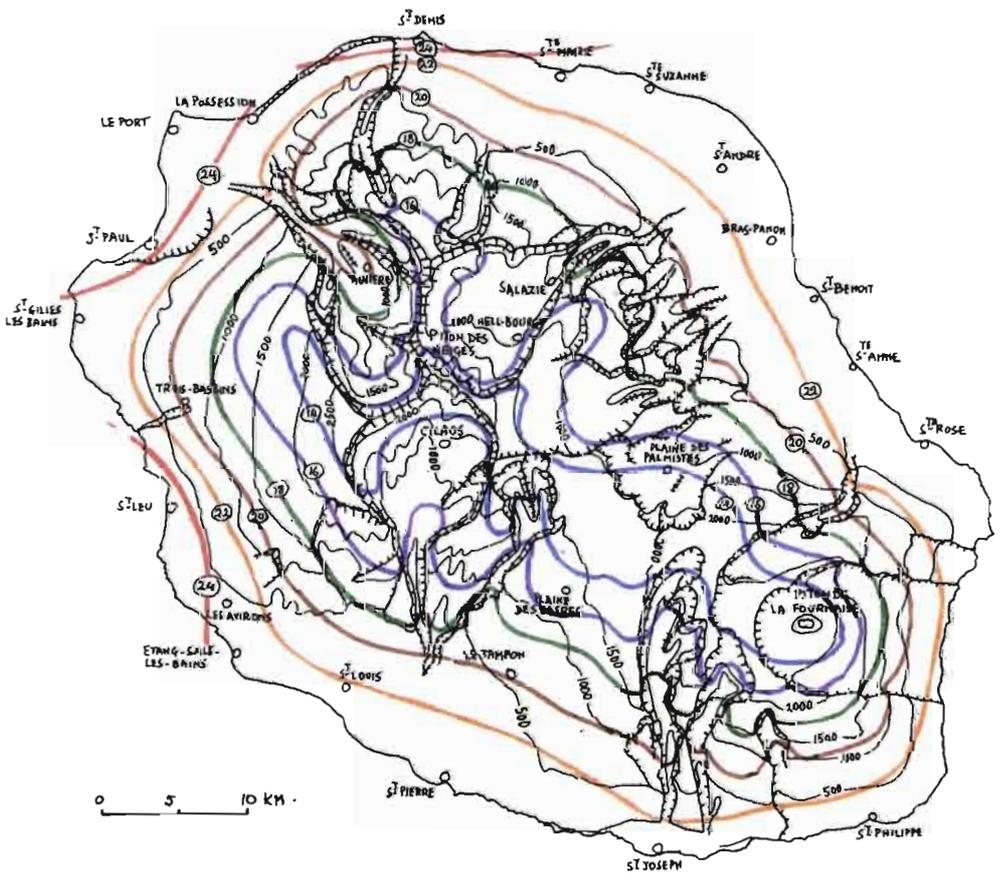
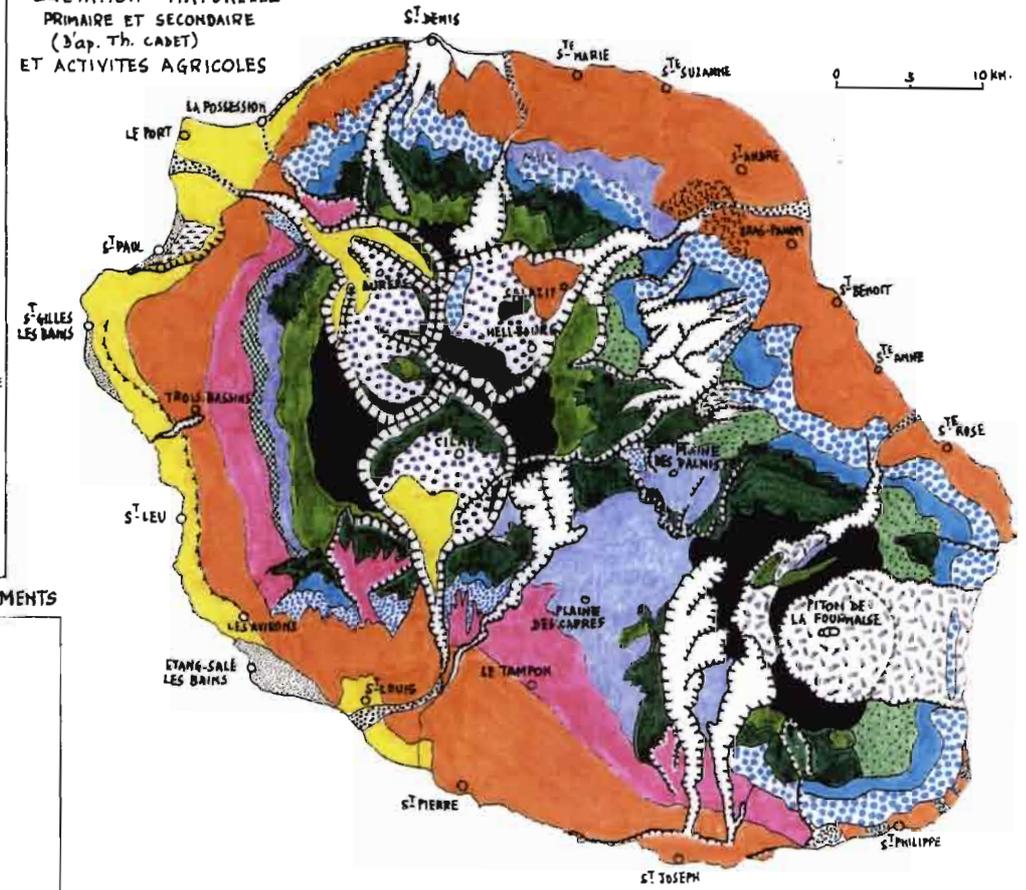


ACTIVITÉS AGRICOLES ET BOISEMENTS



ILE DE LA REUNION

**VEGETATION NATURELLE
PRIMAIRE ET SECONDAIRE
(D'ap. Th. CADET)
ET ACTIVITES AGRICOLES**



ILE DE LA REUNION

TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES

zonée grossièrement en ceintures sub-circulaires s'étageant en fonction de l'altitude et de l'exposition. Les extrêmes étant, d'une part la savane semi-aride du littoral Ouest, d'autre part, la lande éricoïde de haute altitude (plus de 1.800 mètres). Au delà de la "ceinture sucrière" qui entoure l'île en dessous de 600 mètres d'altitude, s'étendent dans l'ouest des cultures de géranium et des cultures "tempérées" (légumes, maïs, tabac...) auxquelles succèdent des pâturages. Au delà (700 mètres dans l'est, 1.200 mètres dans l'ouest), s'étend la végétation forestière naturelle commençant souvent par une bande de forêt secondaire à espèces introduites (goyavier, jamrose...), passant ensuite à la forêt primitive (non "polluée") à "bois de couleur", de type mégatherme puis mésotherme. L'étage à Tamarins (*Acacia heterophylla*) est très spécifique à la Réunion, à partir de 1.600 jusqu'à 2.000 mètres d'altitude ; il précède les landes de l'étage supérieur. Les coulées sub-actuelles et actuelles de la Fournaise ne portent qu'une végétation pionnière à base de lichens et de fougères.

- La nature et la répartition des sols sont les résultantes des interactions et recoupements de toutes les composantes précédentes. Voici brièvement quelques "clés" de distribution :

. Forte pluviosité - âge ancien et températures chaudes favorisent l'hydrolyse poussée des minéraux des roches et donc la pédogénèse ferrallitique. C'est donc sur les roches des épisodes volcaniques anciens (plus de 75.000 ans en moyenne) exposées "au vent", à basse et moyenne altitude, que l'on trouve les sols les plus anciens, de nature ferrallitique..., à condition toutefois que la dissection, qui a eu le temps de faire son oeuvre, n'ait pas tout décapé. En conséquence, les planèzes ferrallitisées bien conservées sont d'autant plus restreintes qu'elles sont anciennes. Autrement dit, les sols fortement ferrallitiques peu tronqués sur volcanisme très ancien (plus de 200.000 ans) sont peu répandus, alors que les sols faiblement à moyennement ferrallitiques (moins désaturés) sur planèzes moins "anciennes" (75.000 à 200.000 ans) sont davantage représentés car moins touchés par l'érosion (mais toutefois suffisamment pour que les recouvrements cendreux postérieurs aient disparu).

. L'existence d'un matelas de pyroclastites cendro-tuffeuses, récent (15.000 - 40.000 ans) ayant recouvert la majeure partie du massif dit "ancien" (à l'exception de ses coulées terminales) et une partie de la Fournaise, conditionne, de façon fondamentale (lorsque ce dépôt n'a pas été éliminé), la zonation des sols, qui est dans ce cas, puisque l'âge et la

nature du matériau sont assez homogène partout, déterminée uniquement par l'exposition (nombre de mois de saison sèche, pluviosité) et l'altitude. C'est sur des cendres que se sont formés la majorité des andosols de l'Ile.

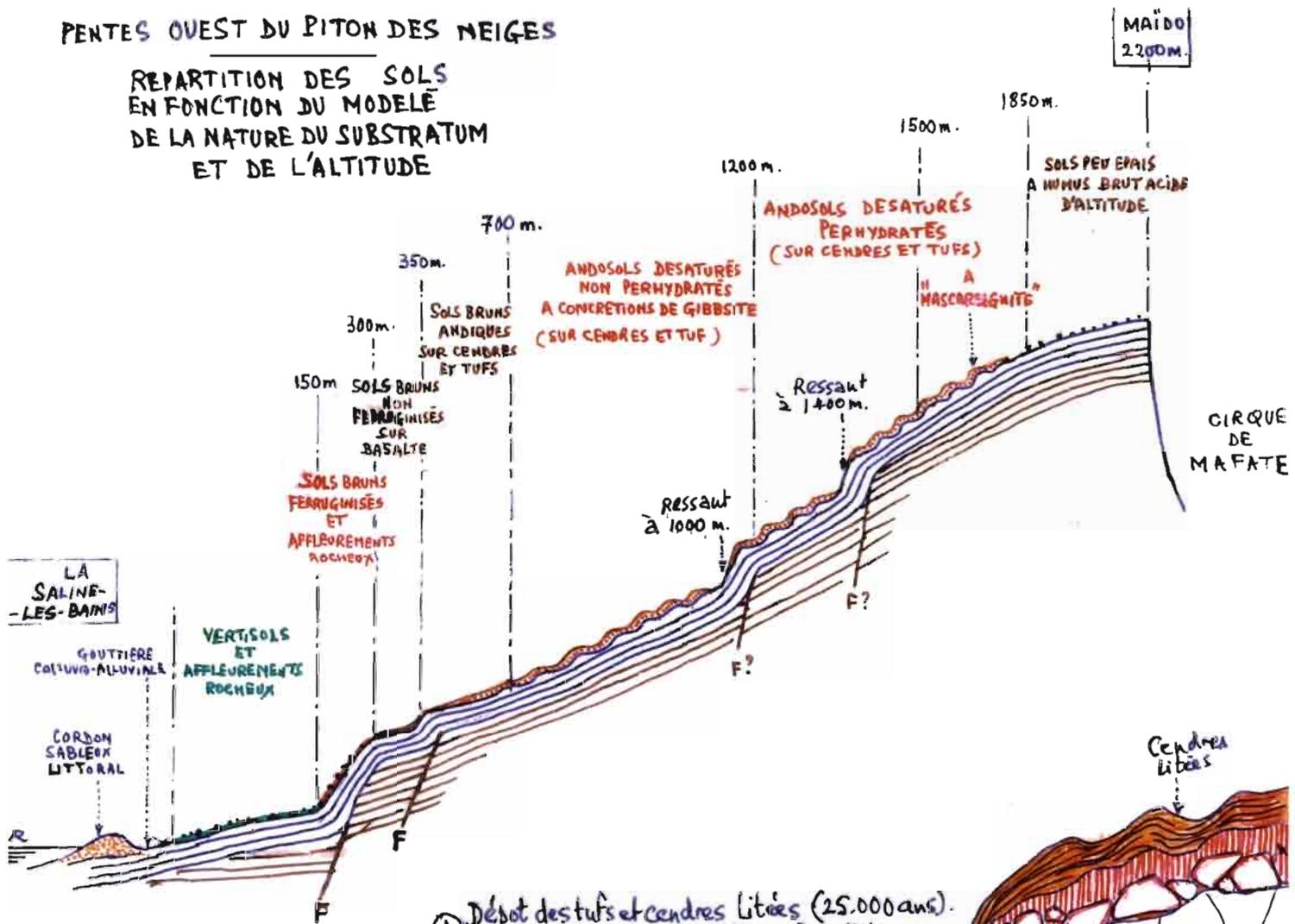
Le versant ouest montre une différenciation liée au climat et à l'altitude très nette : sols bruns andiques de 350 à 500 mètres, andosols peu désaturés de 500 à 600 mètres, andosols désaturés non perhydratés de 600 à 1.100 mètres, andosols désaturés perhydratés de 1.100 à 1.600 mètres, andosols désaturés podzoliques de 1.600 à 1.800 mètres ; au delà de 1.800 mètres, andosols vitriques humiques, peu épais (placages de cendres et lapilli en grande partie décapés, sous landes à bruyères). Dans la gamme des andosols perhydratés existent des "variétés" régionales telles que les sols à "avoune" (à épaisse litière acide semi-tourbeuse sous forêt mésotherme, riche en bruyère), les sols à "mascareignite" à horizon supérieur de couleur cendreuse composés exclusivement de phytolites d'opale d'origine biologique, les perhydratés hydromorphes à plancher sub-aliotique (ou "placique") continu (plaine des Palmistes).

. Dans les zones à longue saison sèche (sous le vent) et à végétation peu couvrante, de moyenne et basse altitude, dans le prolongement aval de la séquence précédente (en dessous de 400 mètres d'altitude), où la couverture pyroclastique récente a été éliminée par l'érosion, on sort du domaine des andosols pour arriver à une succession plus "classique" qui, du haut vers le bas de la toposéquence est la suivante : sols fersiallitiques rougeâtres (souvent racines d'anciens ferrallitiques), sols bruns, sols bruns vertiques, vertisols, sols lithiques d'érosion. C'est cette gamme de sols, à laquelle s'ajoutent des sols bruns andiques à la limite supérieure, qui est destinée à être irriguée sur la façade ouest, lorsque le réseau de captage et d'amenée des eaux des cirques sera terminé (prévision 1992).

. Tous les épisodes volcaniques postérieurs à l'épisode pyroclastique (cendres à tendance trachytique) majeur du Piton des Neiges, se reconnaissent à leur faible altération et à la quasi absence de recouvrements cendreux (exception faite des saupoudrages discontinus issus de la Fournaise) donc à une surface rocailleuse plus difficile à cultiver ("gratons" de coulées "aa" ou auto-brèchechifiées le plus souvent). Ce critère (absence ou présence de pyroclastites du Piton des Neiges), qu'il faut néanmoins utiliser avec prudence surtout quand on se rapproche de la Fournaise, a servi dans certains cas à identifier et à dater de façon relative les coulées récentes les unes par rapport aux autres. C'est ainsi que certaines coulées du Piton des Neiges situées en amont de

PENTES OUEST DU PITON DES NEIGES

REPARTITION DES SOLS EN FONCTION DU MODELE DE LA NATURE DU SUBSTRATUM ET DE L'ALTITUDE

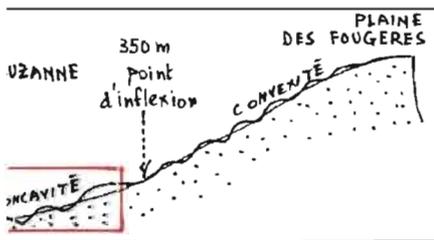
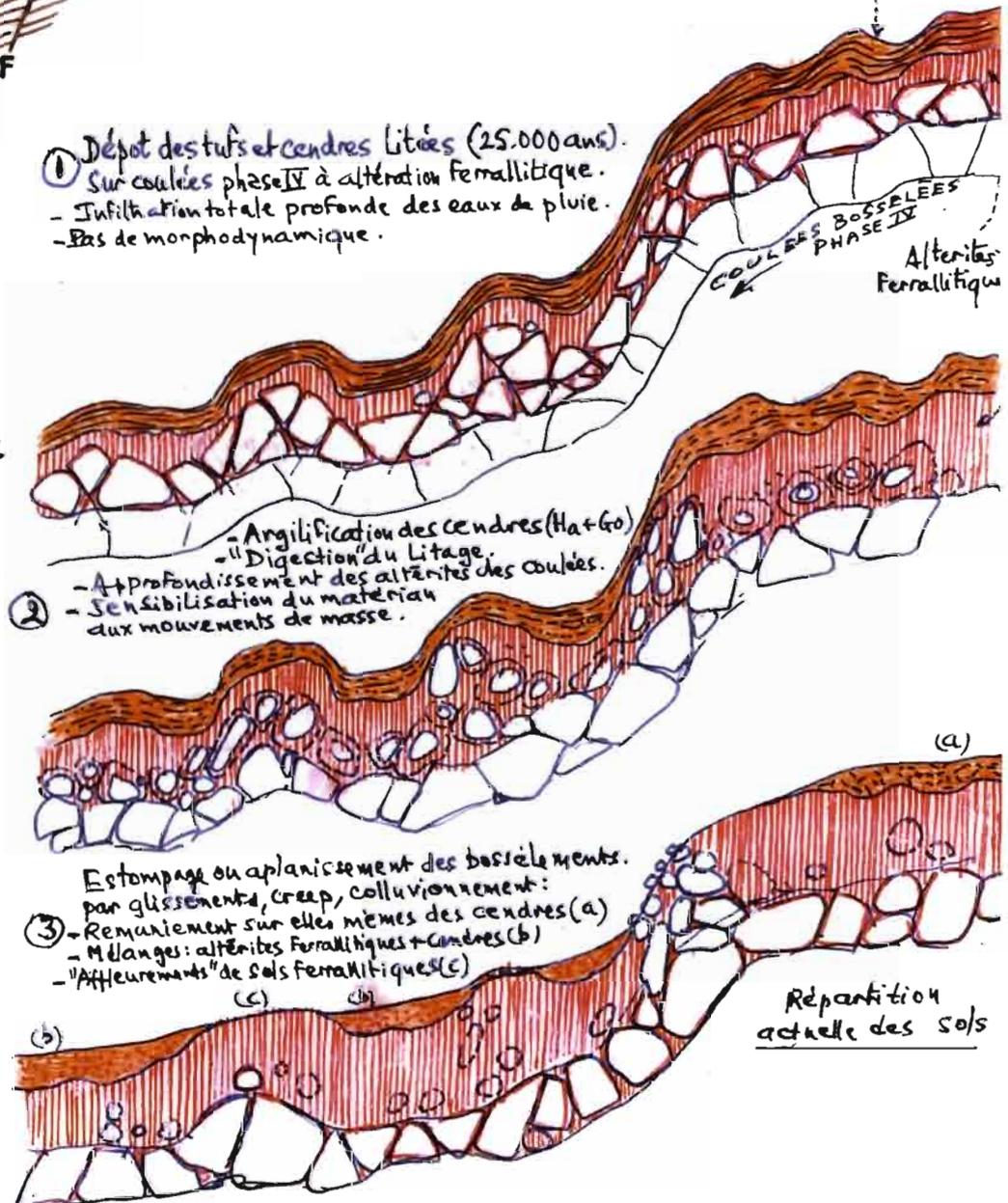


① Dépôt des tufs et cendres litées (25.000 ans).
 Sur coulées phase IV à altération ferrallitique.
 - Infiltration totale profonde des eaux de pluie.
 - Pas de morphodynamisme.

COTE NORD (NIVEAU S^{TE} SUZANNE)

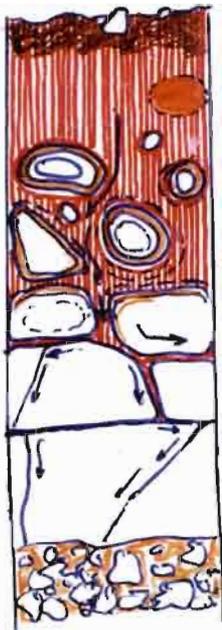
INTERACTIONS ENTRE LES PROCESSUS D'ALTÉRATION DES MATÉRIEAUX ET D'APLANISSEMENT DU MODÈLE DANS LE SYSTÈME

"CENDRES (25.000 ANS) SUR COULÉES PHASE IV (100.000 ANS)"



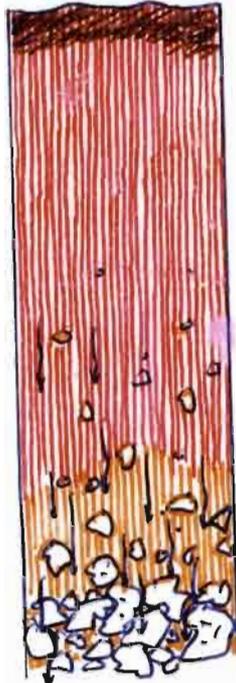
Répartition actuelle des sols

PROGRESSION DU FRONT D'ALTERATION ET CHEMINEMENT DE L'EAU SUIVANT LA NATURE DU MATERIAU



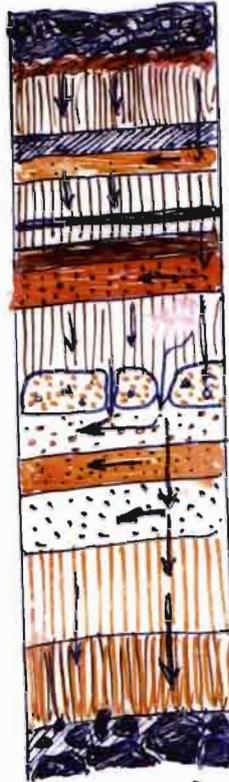
COULÉE MASSIVE

Front d'altération ondulés irréguliers
cheminement de l'eau discontinu



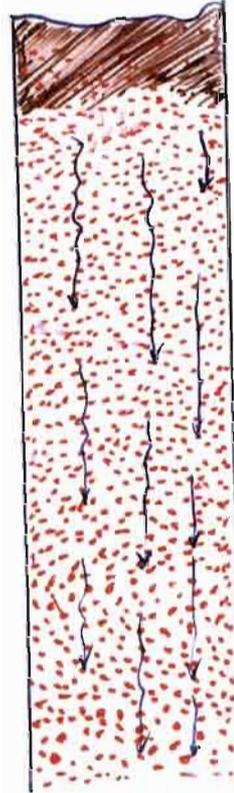
COULÉE SCORIACÉE

Front d'altération régulier



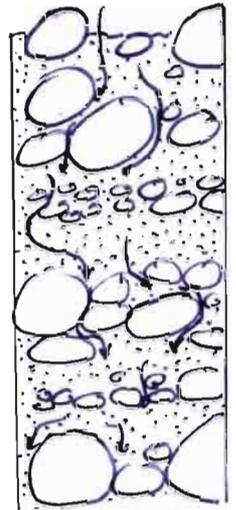
CENDRES LITÉES

Altération, lessivage et accumulations différentiels



LAPILLI

Altération rapide et très régulière



ALLUVIONS A GALETS

ILE DE LA REUNION

PEDOGENESES SUR COULÉES BASALTIQUES (SANS RECOUVREMENT CENDREUX)

INFLUENCES DE L'AGE DES COULÉES ET DU CLIMAT

PLUVIOMETRIE AGE DES COULÉES	PLUS DE 1800 mm.	1200 - 1800 mm.	800 - 1200 mm.	800 - 1000 mm.	MOINS DE 800 mm.
PHASE II (Sup.) 500.000 ans	FERRALLITIQUE FORTEMENT DESATURÉ. COULEUR BRUNE	FERRALLITIQUE FORTEMENT DESATURÉ COULEUR ROUGE	FERRALLITIQUE FORTEMENT DESATURÉ ROUGE INSTABLE, SENSIBLE A L'EROSION	BRUN BRUN VERTIQUE ET CAILLOUX	BRUN VERTIQUE PEU EPAIS NOMBREUX CAILLOUX
PHASE III (Sup.) 300.000 ans	FERRALLITIQUE MOYENNEMENT DESATURÉ COULEUR BRUNE	FERRALLITIQUE MOYENNEMENT DESATURÉ COULEUR ROUGE	BRUN SUR ARENE FELSPATHIQUE	BRUN ET BRUN VERTIQUE	BRUN VERTIQUE
PHASE IV (Sup.) 100.000 ans	FERRALLITIQUE FAIBLEMENT DESATURÉ COULEUR BRUNE	FERRALLITIQUE FAIBLEMENT DESATURÉ COULEUR ROUGE	BRUN	BRUN FERRUGINISÉ	VERTISOL.
PHASE V (Sup.) 60.000 ans	ANDOSOL PEU EPAIS CAILLOUTEUX.	BRUN ANDIQUE PEU EPAIS CAILLOUTEUX.	BRUN PEU EPAIS CAILLOUTEUX	-	-

CARACTERISTIQUES COMPAREES DES GRANDES CLASSES DE SOLS DE L'ILE DE LA REUNION

	COULEUR	CONSISTANCE	% D'ARGILE	DENSITE APPARENTE	PERMEABILITE	MAT. ORG. 0-20 cm (%)	MAT. ORG. 20-50 cm (%)	HUMIDITE PF.3	HUMIDITE PF.4,2	pH (eau)	C.E.C. (Bases) (me%)	% SAT.	Al Ech. (me%)	P Total (ppm)	P Ass. (ppm)	MINERALOGIE
ANDOSOLS	BRUN-BEIGE A CHOCOLAT	TRES FRIABLE	40-60	0,3-0,6	TRES FORTE	15-30	5-15	100-300	60-150	4-5	30-80	10	2-5	2000	15-50	Im. Al. H.am. Gib.
FERRALLITIQUES	ROUGE	FRIABLE	60-75	1	FORTE	6	1	30-40	25-30	5	8	10	0-2	500	15-50	Meta Ha Hem-Goe. Gib.
BRUNS	BRUN-JAUNE BRUN BRUN-ROUGE	FERME	40-50	1,2-1,5	Moy.	6	1	40-50	30-35	6,5	10-20	100	0	1000	50-100	Ha. Goe.
VERTISOLS	BRUN-GRIS FONCE	COMPACT	50-75	1,8-2,1	TRES FAIBLE	4	1	45-60	35-40	7	25-30	100	0	1000	25-50	Mont.

Im = IMOGOLITE
Al = ALLOPHANE
H.am. = HYDROXYDES AMORPHES (Fe et Al.)
Gib. = GIBBSITE

Hem. = HEMATITE
Goe. = GOETHITE
Ha. = HALLOYSITE
Meta Ha. = META HALLOYSITE
Mont. = MONTMORILLONITE

TOPOSEQUENCE ET CARACTERES DES SOLS SUR CENDRES ET TUFFS ENTRE SAINT-GILLES ET LE MAÏDO

	ALTITUDE	COULEUR	CONSISTANCE	STRUCTURE	PERMEABILITE	TEXTURE TOUCHER	DENSITE APPARENTE	POROSITE F* (30cm)	HUMIDITE NATURELLE %	EAU UTILE %	MATIERE ARGILEUSE %	pH	C.E.C. me/100g	% SAT.	GIBBSITE APPARENTE	MINERALOGIE
ANDOSOL PERHYDRATE A MASCAREIGNITE	1500-1850	LITAGE CENDRES TRES RENFORCE	TRES FRIABLE	MASSIVE	TRES FORTE	LIMONEUX	0,3-0,5	1-2	150-300	60-150	30-40	4	30-80	5		Op I H.am. Gib.
ANDOSOL PERHYDRATE	1200-1500	LITAGE CENDRES TRES RENFORCE	TRES FRIABLE	MASSIVE	TRES FORTE	LIMONEUX	0,3-0,5	1-2	150-300	60-150	20-30	4-4,5	30-80	5-10	*	A I H.am. Gib.
ANDOSOL NON PERHYDRATE	700-1200	LITAGE NET CHOCOLAT	FRIABLE	MASSIVE	FORTE	LIMONO-ARGILEUX	0,5-0,8	2-3	60-150	20-60	15-20	4,5-5,5	20-40	10-50	***	I A H.am. Gib. Ha.
SOL BRUN ANDIQUÉ	400-700	BRUN-JAUNE	FERME ASSEZ RASQUE	POLYEDRIQUE A MASSIVE	MOY.	ARGILEUX	0,8-1,1	3-4	20-60	15-20	5-15	5,5-6,5	10-20	50-100		Ha. Goe.
SOL BRUN	300-400	BRUN-ROUGE	FERME RASQUE	POLYEDRIQUE NETTE	FAIBLE	TRES ARGILEUX	1,1-1,3	4-5	15-20	10-15	4-5	6-7	10-20	100		Meta Ha. Goe.

*F = $\frac{4250}{I_p \cdot L_l}$ (sur échantillons prélevés et non séchés)

I_p = Indice de plasticité = $L_l - L_p$
 L_l = Limite de liquidité
 L_p = Limite de plasticité

Op = Opale (phytolithes)
A = Allophane ($SiO_2/Al_2O_3 = 4$)
I = Imogolite ($SiO_2/Al_2O_3 = 1,3a2$)
H.am = Hydroxydes amorphes
PRODUITS "AMORPHES"

Gib = Gibbsite
Ha = Halloysite
Goe = Goethite
Meta Ha. = Métahalloysite
PRODUITS CRISTALLISES

St André et de St Benoît apparaissent extrêmement récentes.

De même pour la Fournaise, qui a également émis de son côté des cendres (de nature basaltique cette fois) en plusieurs phases, l'épaisseur de ces cendres, qui conditionne la qualité des sols, est en général d'autant plus faible que le volcanisme est plus récent.

QUELQUES CARACTERISTIQUES GENERALES
DES ANDOSOLS TYPIQUES (PERHYDRATES) DE LA REUNION

L'Etymologie est japonaise : de "ando" signifiant "noir". Au Japon, les sols formés sur cendres volcaniques sont assombris par la matière organique.

Ces sols, à propriétés très particulières, ont en effet d'abord été reconnus au Japon, il y a une trentaine d'années. Depuis, ils ont été décrits dans de nombreux pays, tempérés ou tropicaux, où existent des régions volcaniques d'altitude. Sous les tropiques, leur couleur n'est généralement pas noire, en particulier à la Réunion. Mais le vocable d'"andosol" est resté pour les désigner.

On les appelle aussi "sols à allophanes", du fait de leur richesse en minéraux amorphes aux rayons X et en microscopie classique. Cette substance complexe est dénommée au sens large "allophane". Il s'agit d'un gel aluminosilicaté hydraté.

Ils sont souvent désignés : "sols dérivés de cendres volcaniques". Car c'est sur les matériaux pyroclastiques qu'ils sont les mieux développés.

Ce sont des sols jeunes ayant des propriétés très spécifiques, les distinguant nettement des autres catégories de sols. Ils en diffèrent par leurs caractères physiques, hydriques, chimiques et minéralogiques, et en conséquence, par leur comportement agronomiques et géotechnique.

1 - PROPRIETES PHYSIQUES

A la Réunion, les andosols s'observent à partir de 600 mètres d'altitude dans l'Ouest et dès le niveau de la mer dans l'Est. Les plus typiques sont formés sur projections tuffo-cendreuseuses sous plus de 1500 mm de pluviométrie annuelle.

- Ils constituent des "terres franches" épaisses, de couleur d'ensemble brune, beige ou chocolat.

- Ils sont toujours humides, très friables et légers.

- Leur structure est massive, sans organisation apparente (pas d'agregats, pas de fentes).

- Au toucher, leur aspect est limoneux, onctueux ; ils ne glissent pas entre les doigts et ne sont pas plastiques comme les sols argileux "classiques". Nous verrons que cette propriété correspond effectivement à l'absence de minéraux bien formés cristallisés en feuillets.

- Les andosols les plus typiques présentent le caractère de thixotropie, c'est-à-dire qu'ils peuvent passer brutalement de l'état pâteux à l'état liquide. On dit en géotechnique que leurs "limites d'Atterberg" sont très voisines. Cela se traduit sur le terrain par les propriétés suivantes :

. test au couteau : quand on enfonce brusquement une lame de couteau, elle s'enfonce sans résistance jusqu'à la garde, comme dans du beurre. Par contre, le sol oppose une résistance au retrait de la lame.

. Test du malaxage : une motte triturée à la main de façon énergique libre, à un moment donnée, brusquement son eau et devient gluante.

. Au champ : un engin lourd s'enfonce brusquement, faute de portance suffisante. Les andosols (sans charge caillouteuse) ne se prêtent donc pas à la mécanisation lourde.

- Malgré leur absence de structure et leur macroporosité faible, les andosols sont toujours très perméables quand ils ne sont pas dégradés par les cultures. Il n'y a pas de ruissellement.

Ils se comportent comme des sols sableux de ce point de vue.

- Leur stabilité structurale est très élevée

- Leur densité apparente est très faible comprise entre 0,3 et 0,6.

2 - PROPRIETES HYDRIQUES

- Une de leurs propriétés les plus remarquables est qu'à l'état naturel, à la capacité au champ, les andosols peuvent contenir jusqu'à 100 - 250 % d'eau en poids sec (c'est-à-dire qu'1 kg de sol saturé peut se réduire à 250 g à l'état très desséché). L'eau fait partie intégrante du matériau et est responsable de nombre de leurs propriétés. Une fois desséché, le sol n'est plus le même et ses caractères changent.

- Une autre propriété des andosols typiques est leur "déshydratation irréversible" : desséchés par une succion supérieure à 10 bars, ils sont par la suite incapables de se réhydrater à l'état initial. Ils perdent leur micro-structure par contraction et agglomération de leurs particules élémentaires dues au départ de l'eau des micropores ; il se forme des petits agrégats globuleux très stables, conférant au matériau des propriétés totalement différentes de l'état naturel antérieur.

- Ainsi, la dessiccation des andosols le long des tranchées de route montre une desquamation en plaquettes polyédriques de 1 à 2 cm d'épaisseur, très légères, formant un craquelage en "peau de crocodile". Cette croûte est permanente quelque soit l'humectation postérieure. En dessous, le sol, protégé de l'évaporation par la croûte, reste humide, friable et sans structure et possède les vraies propriétés du sol.

- En dessous de l'horizon humifère de surface, les andosols typiques présentent une porosité utile (accessible aux échanges gazeux) nulle, car ils sont complètement saturés d'eau. Ils peuvent donc se comporter vis à vis des racines, comme des sols hydromorphes.

- Le travail du sol excessif, provoque un dessèchement superficiel, favorise la formation de micro-agrégats stables mais faiblement agrégés entre eux, conférant au sol un aspect poussiéreux facilement entraînable par les eaux de ruissellement.

3 - PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES

Les substances amorphes des andosols sont des gels amphotères à point isoélectrique élevé, à micro-organisations et microporosités emboîtées (voir plus loin) et à surfaces spécifiques très élevées (jusqu'à 500 m²/gramme).

Cela leur confère, comme pour les propriétés hydriques, des propriétés chimiques, très originales et difficiles à caractériser en laboratoire.

- le pH : A l'état naturel il est bas, compris entre 4 et 5. En surface, le pH est d'autant plus bas que la végétation naturelle fournit un humus acide, ce qui est le cas à partir de 1200 mètres environ.

- La matière organique : est toujours très abondante : jusqu'à 25 % en surface, 5 à 15 % jusqu'à un mètre de profondeur. Cette matière organique (acides fulviques) se lie très fortement aux produits amorphes minéraux et est très stable. Elle contribue à retarder la cristallisation. Elle est l'une des causes de la capacité d'échange élevée.

- Le complexe absorbant : la capacité d'échange est difficile à définir ; suivant qu'on la mesure sur une solution d'extraction à pH acide ou à pH alcalin, la CE n'est pas la même.

Ceci est dû au caractère amphotère des gels amorphes, qui possèdent des charges variables en fonction du pH environnant. Les radicaux silice et alumine, faiblement liés, reagissent indépendamment l'un de l'autre.

. Pour les cations, la CE est maxima à pH alcalin. C'est alors la silice et la matière organique qui fixent les cations.

. Pour les anions, la CE est maxima à pH acide. C'est l'alumine qui fixe les anions. Cela explique que les andosols, à pH acide, ont la particularité de fixer fortement les ions phosphates. D'où l'intérêt de relever le pH du sol pour libérer le phosphore et le rendre assimilable par les racines. Ainsi l'emploi du chaulage, des engrais riches en supertriple (21 % de CaO) peuvent relever le pH, donc diminuer la CE anionique et libérer le phosphore.

. La capacité d'échange totale est, à l'état naturel, très élevée, de l'ordre de 30 à 70 mé %. Elle est due à la surface spécifique très importante des amorphes et à la richesse en matière organique.

. La saturation du complexe par les ions alcalins (Mg, Ca, K, Na) est toujours très faible, inférieure à 10 %. Par contre, l'alumine peut représenter jusqu'à 7 mé %. Elle est d'autant plus abondante que le pH est bas.

- Le phosphore : la teneur en phosphore total est souvent élevée (jusqu'à 2000 ppm) en surface. Par contre sa proportion assimilable est très faible (moins de 50 ppm...)

4 - PROPRIETES MINERALOGIQUES ET MICROSTRUCTURALES

Les progrès récents des moyens d'observation tel la microscopie électronique à haute résolution (à balayage ou à transmission) ou la spectroscopie d'absorption infra-rouge, permettent d'y voir plus clair dans l'organisation fine des andosols, et de relier la microstructure aux caractères macroscopiques.

- Ainsi, les andosols seraient composés de 2 minéraux de base :

- l'imogolite
- l'allophane (ss. str.)

L'imogolite : (que l'on peut extraire en milieu acide) présente :

- une structure fibreuse entrelacée,
- les fibres sont creuses et de rayons 10 à 20 Å,
- une surface spécifique de 1000 m²/g,
- un rapport SiO₂/Al₂O₃ = 1,1.

Plus riche en alumine que l'allophane, elle fixerait préférentiellement les anions.

L'allophane : (que l'on peut extraire en milieu alcalin) présente :

- une structure globulaire,
- chaque unité élémentaire à 35 à 50 Å de diamètre,
- une surface spécifique de 800 m²/g,
- un rapport SiO₂/Al₂O₃ = 1,3 à 2.

Elle fixerait préférentiellement les cations.

- En plus de ces deux constituants fondamentaux, les andosols de la Réunion contiennent d'autres minéraux :

- . des hydroxydes de fer et d'alumine amorphes en assez grande quantité,
- . de la goethite (en faible quantité),
- . de la gibbsite (cristallisée) en grande quantité,
- . des complexes organo-métalliques.

- La microstructure et la micro-porosité :

Il y a emboitements hiérarchisés des structures : la particule d'agrégation élémentaire a 0,5 à 1 micron de diamètre. Elle est globulaire et composée en proportions variables de :

- . filament d'imogolite,
- . sphérules d'allophane
- . cristaux de gibbsite,
- . d'hydroxyde de fer amorphe (jusqu'à 30 %),
- . d'un peu d'hallowyite,
- . de complexes organo-métallique.

Ce "flocon" élémentaire a une porosité interne élevée et complexe, surtout au niveau de l'imogolite et de l'allophane.

Imogolite : porosités intra-tubes, inter-tubes, intra-filament, inter-filament...
Allophane : porosité intra-sphérules, inter-sphérules...

Puis ces flocons s'associent en glomérules d'un niveau supérieur (2) de 5 à 10 microns de diamètre qui développent des porosités d'un niveau supérieur.

Ces glomérules s'associent en glomérules de niveau 3 de 50 à 100 microns de diamètre, qui eux-mêmes s'associent en unités de 500 à 1000 microns.

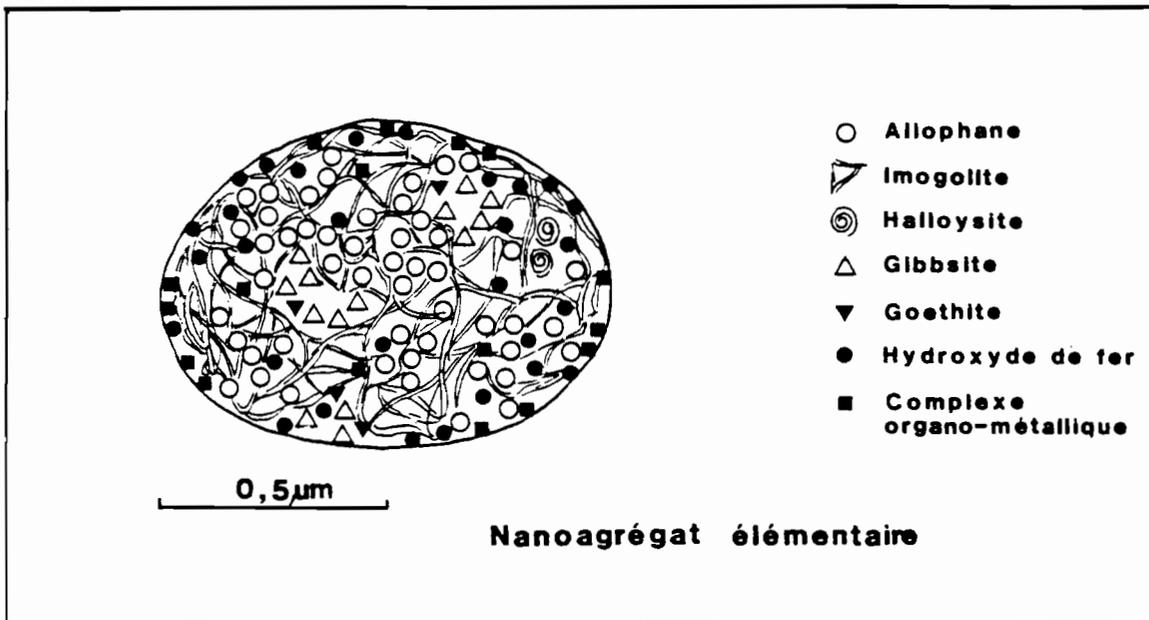
Le sol est alors composé de ces particules limoneuses qui ont de faibles liaisons.

On voit que l'eau peut se loger à divers niveaux de porosité emboîtées. Suivant la force de succion, on extrait l'eau de telle ou telle classe de pores. La déshydratation irréversible atteint les pores les plus internes, provoquant une aggrégation très stable des glomérules, qui ne peuvent retrouver l'état initial (l'eau ne peut plus rentrer).

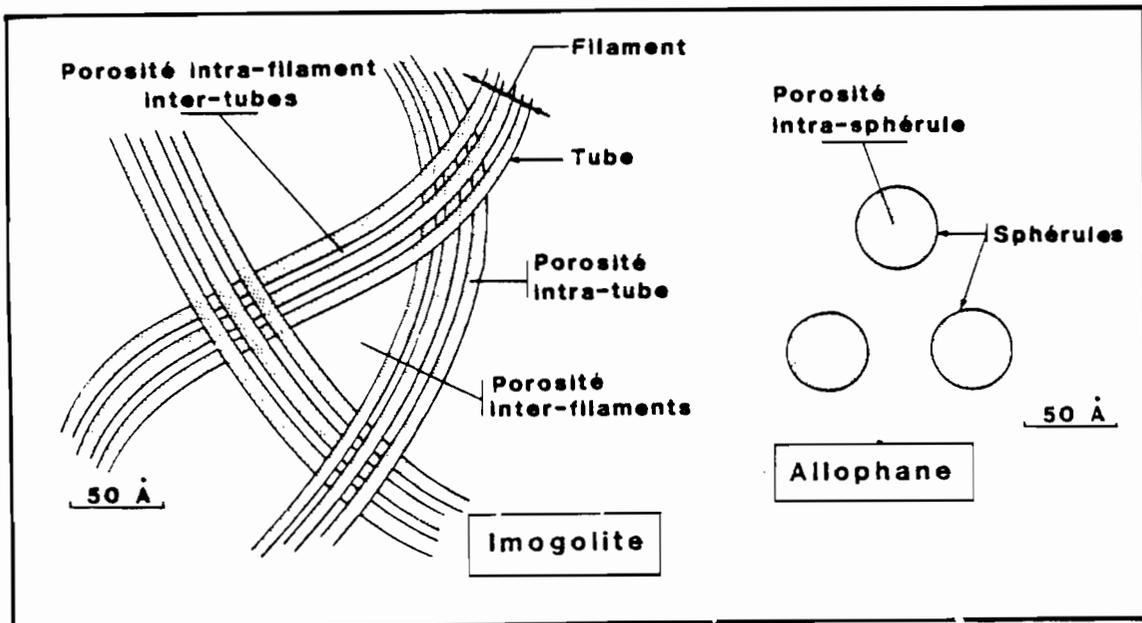
Il existe en gros deux sortes de porosités :

- une porosité "passive" dont le dessèchement n'est pas irréversible,

- une porosité "active" dont le dessèchement modifie fortement la structure de l'ensemble du matériau, de façon irréversible.



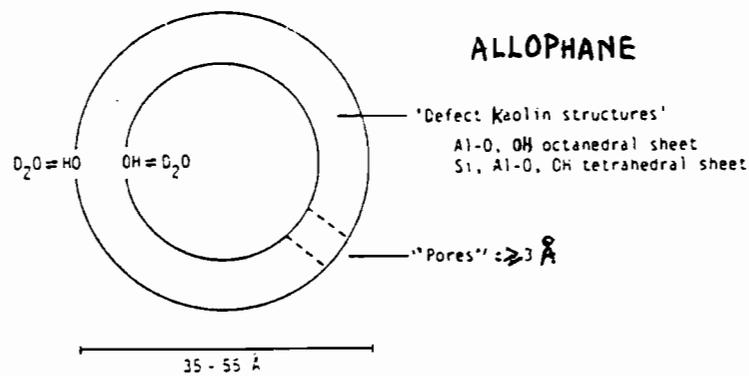
*Représentation schématique du nanoagrégat élémentaire.
 (D'ap. V. ROSELLO, 1984)*



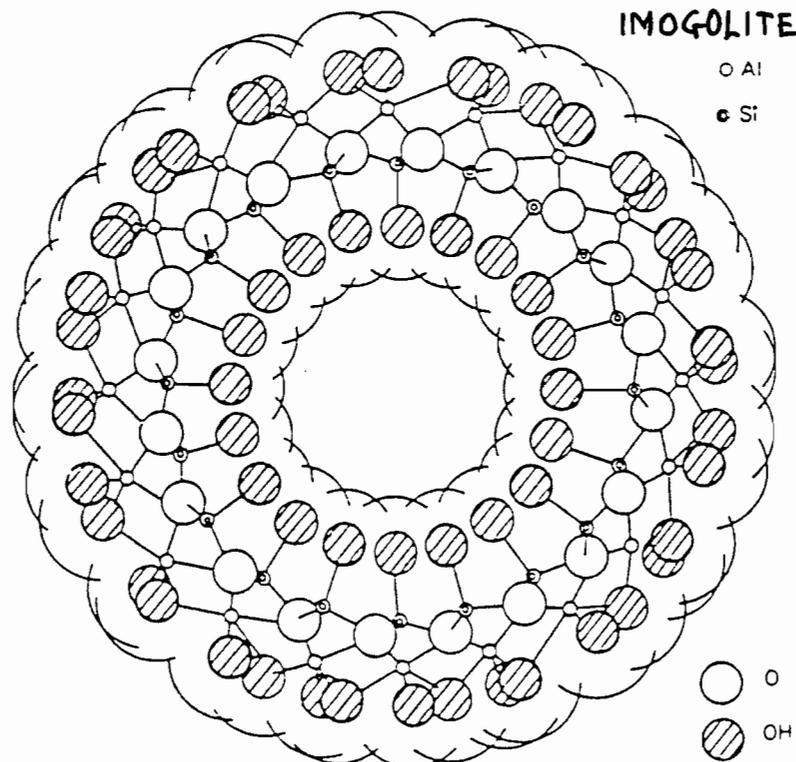
*Représentation schématique de l'arrangement des particules
 élémentaires d'imogolite et d'allophane.
 (D'ap. V. ROSELLO - 1984)*

Structural formulas for imogolite, allophane and kaolinite (Wada, 1979, in Theng, 1980)

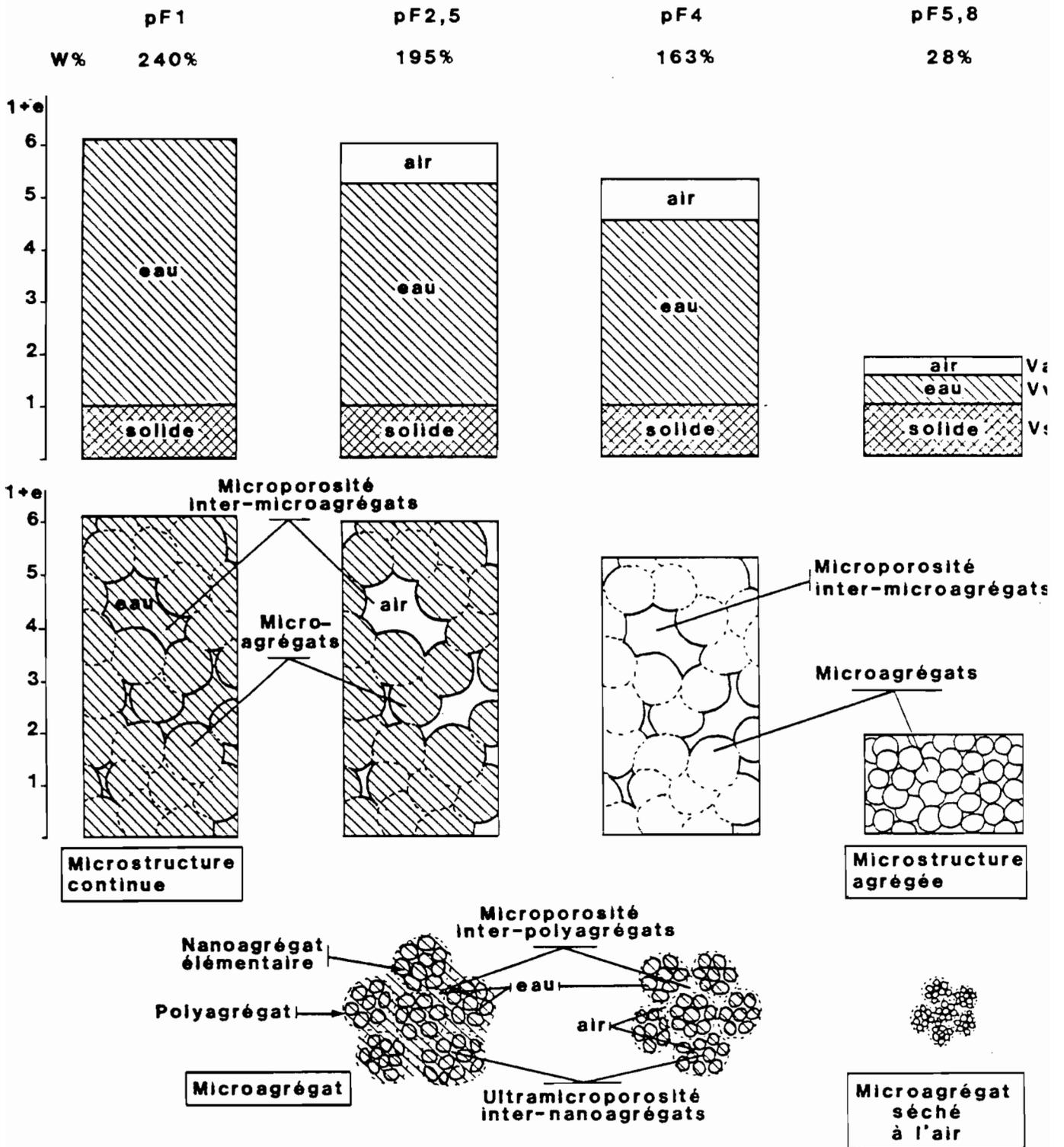
Imogolite	Allophane	Allophane	Kaolinite
6OH	4OH, 2H ₂ O	2OH, H ₂ O	6OH
4Al	3Al	1Al	4Al
6O	2O, 4OH	1O, 2OH, H ₂ O	4O, 2OH
2Si	2Si, 1Al	2Si, 1Al	4Si
2OH	3O, 2OH, H ₂ O	3O, 2OH, H ₂ O	6O
Molar ratio:			
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1.0	1.0	2.0
H ₂ O(+)/Al ₂ O ₃	2.0	2.5	3.0



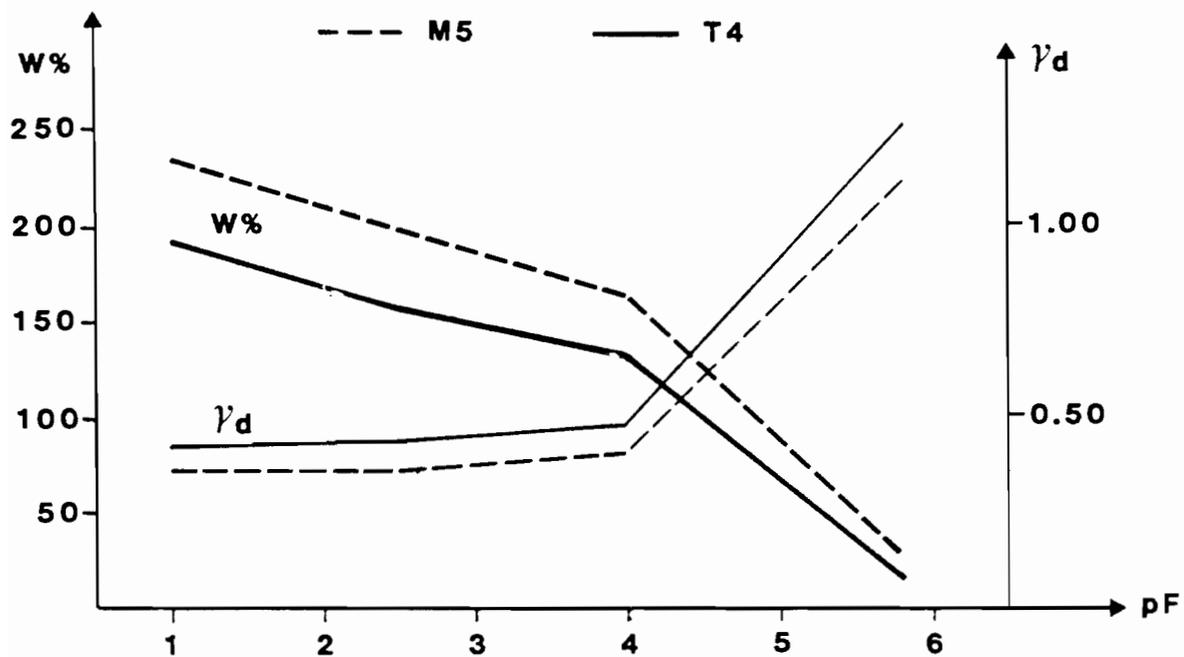
Représentation schématique de la "sphérule" élémentaire d'allophane (D'ap. WADA, 1979 in Theng, 1980).



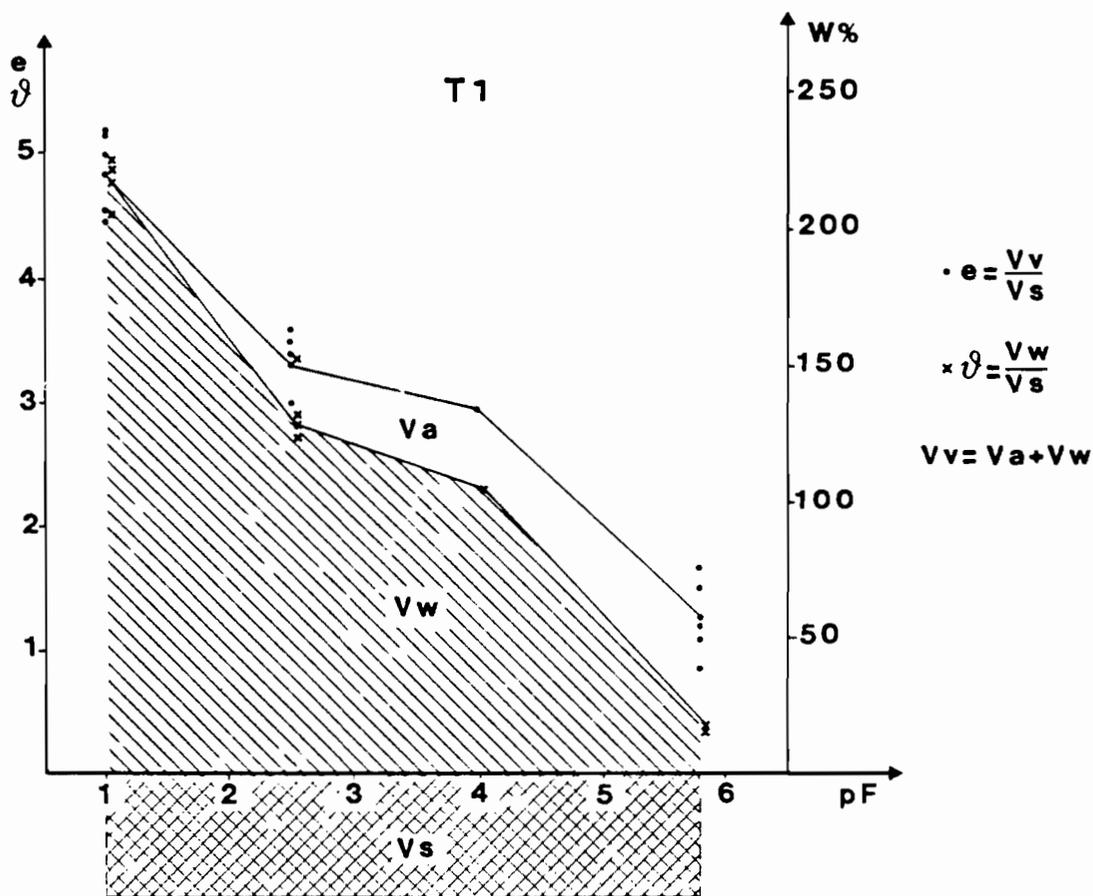
Coupe d'un tube d'imogolite (D'ap. PARFITT, in THENG 1980, d'après diagrammes de BROWN et AL. 1978).



Représentation schématique du comportement du matériau andosolique au cours de la dessiccation. (d'ap. V. ROSELLO - 1984)



Comparaison des évolutions simultanées des teneurs en eau pondérales (W%) et des densités apparentes (γ_d) pour 2 matériaux argileux (M5 et T4) au cours de la dessiccation. (V. ROSELLLO. 1984)



Evolution de l'indice des vides e et de l'indice d'eau v sur matériau argileux au cours de la dessiccation (pF). (V. ROSELLLO. 1984)

LES ANDOSOLS
ETAT DES CONNAISSANCES
PROBLEMATIQUE

Paul QUANTIN

LES ANDOSOLS, ETAT DES CONNAISSANCES, PROBLEMATIQUE

P. QUANTIN

I. INTRODUCTION

1. Les Andosols ont été reconnus et caractérisés tout d'abord au Japon par des pédologues américains. Le néologisme "Ando" signifie sol noir. Il caractérise des sols appelés localement Kuroboku, de couleur noire, riches en matière organique humifiée, acides, et dérivant de cendres volcaniques. Ces sols se distinguent des sols noirs de steppe, tchernozems, par leur caractère acide et leur fraction argileuse non cristalline. Le grand-groupe des Andosols a été introduit dans la Classification des Sols Américaine en 1949 par Thorp et Smith. Il est devenu le sous-ordre des Andepts dans la 7ème Approximation de la Soil Taxonomy en 1960. La classe des Andosols est apparue seulement en 1967 dans la Classification des Sols Française (CPCS). L'unité Andosols a été ensuite reconnue, en 1968, dans la Légende des Unités de Sols du Monde (FAO - UNESCO). En 1978-79, G. Smith puis le groupe ICOMAND (International Committee on the Classification of Andisols, pour la révision de la Soil Taxonomy), ont proposé de créer un ordre spécifique, les Andisols.

C'est dire l'originalité, reconnue mondialement, des Andisols. Duchaufour, en 1977, a proposé un processus d'andosolisation, pour expliquer la genèse particulière de ces sols.

2. Au cours des années 50 et 60, les nombreuses études effectuées au Japon, en Nouvelle Zélande, à Hawaï, puis en Amérique Latine et aux Antilles, etc..., ont mis en évidence le rôle majeur des produits "amorphes", c'est-à-dire non cristallins et para-cristallins, notamment : allophane, imogolite, gels d'hydroxydes, complexes organo-minéraux. Les

principales propriétés qui en dépendent sont : des charges variables, cationiques et anioniques ; une rétention d'eau ; une faible densité apparente ; une teneur élevée en acides humiques.

C'est pourquoi la Classification Américaine (Soil Taxonomy, 1975) a développé le concept de sols dont "le complexe d'échange est dominé par des matières amorphes" (et à faible densité apparente, ou riches en verres volcaniques). La Classification Française (CPCS, 1967) fait référence "aux sols dont les propriétés originales sont dues à l'abondance des produits amorphes, les allophanes, associées à des teneurs souvent élevées de matières organiques...".

ICOMAND (1979-1987) propose le concept central de sols développés sur des produits volcaniques, dont la fraction colloïdale est constituée de "short range order minerals" ou de complexes Al-humus, mais à faible translocation d'Al et Fe, les distinguant ainsi des Spodosols par l'absence d'horizon Albique. Le concept d'Andosol a donc été élargi, des sols à allophanes aux sols à Al-chélaté. Ceci rejoint le point de vue de Duchaufour (1977, 1983, 1988), selon lequel l'andosolisation serait un degré très atténué du processus de podzolisation, sous "l'action stabilisante de l'alumine-active".

Pour ICOMAND (1987), le critère de laboratoire principal est la quantité (Al + 1/2 Fe) extractible par l'oxalate (pH 3, obscurité, 4 heures de contact), qui doit être > 2 % quand les "propriétés andiques" sont bien exprimées. Il s'y ajoute deux critères majeurs : densité apparente < 0.9 et P-rétention > 85 % (méthode Blackmore 1979) ou éventuellement le caractère vitrique (> 60 % de verres volcaniques) et dans ce cas Al + 1/2 Fe oxalate = 0.40 à 2 %.

Ce sont donc les propriétés dues à des formes non cristallines ou paracristallines des oxyhydroxydes d'Al et de Fe qui servent à définir les Andosols. Cependant, l'approche d'ICOMAND est trop simplifiée et celle de Duchaufour est ambiguë. L'ensemble Andosol est en réalité très varié, aussi bien par la large extension du climat (perhumide à subaride, tropical à froid) où il existe, que par la diversité de l'âge des sols, de la morphologie et des propriétés observées. Il ne peut donc être réduit à un concept simple, à un processus unique, ni caractérisé par seulement quelques critères diagnostics. C'est pourquoi il convient de revenir à une approche plus fondamentale. C'est ce que nous avons proposé en 1987 pour le Référentiel Pédologique Français.

II. CONCEPT - DEFINITION

Les andosols sont habituellement définis, d'abord, par leurs propriétés "andiques".

1. Définition

Les andosols sont des sols riches en complexes organo-minéraux stables, souvent très hydratés et à propriété de gel,

- dont les produits minéraux d'altération sont essentiellement :
 - . à l'état amorphe : gels d'hydroxydes d'Al, Fe, Si etc... et ou de chélates d'Al et Fe,
 - . et (ou) à l'état paracristallin* : alumino-silicates de type allophane, imogolite ou hysingérite ; oxy-hydroxydes de fer de type ferrihydrite ; oxyde de silice de type opale ; (mais pas ou peu de phyllites argileuses et d'oxyhydroxydes métalliques bien cristallisés) ;
- et dont les produits humifiés sont abondants et forment des complexes organo-minéraux stables ;
- dont les propriétés de surface sont très développées (rétention d'eau, capacité d'échange anionique et cationique) et variables selon les conditions de la mesure (état humide et état sec, pH de la solution, charge ionique, etc...),
- dont la structure est micro-agrégée, permettant une très grande micro-porosité et une faible densité apparente, mais n'est pas plastique et est très friable.

Ce sont souvent des sols jeunes, qui dérivent (très souvent) de produits volcaniques pyroclastiques, et demeurent riches en minéraux altérables. Les profils sont peu différenciés : Ils ne comportent que des horizons A et C ou A, S et C, mais pas d'horizons diagnostiques d'autres classes de sols tels que E, B, BO, BP, BT, BK etc...

* Minéraux imparfaits, de très petite taille, dont l'organisation moléculaire est "à courte période", et présente de nombreux "défauts".

Les sols d'apports volcaniques sont souvent complexes et rajeunis en surface. Les andosols se caractérisent en outre par : une faible densité apparente ($< 0,9$), une quantité importante d'Al extractible par NH_4 -Oxalate à pH 3.5 ($\geq 2\%$) (ou $\text{d'Al} + \frac{1}{2}\text{Fe oxal.} \geq 2,5\%$), une forte capacité de rétention du phosphore ($> 80\%$, méthode Blackmore), et une forte réaction alcaline ($\text{pH} > 9.5$) dans une solution de Na F en moins de 2 minutes.

D'autres propriétés peuvent servir de diagnostic, dont : le taux de C.E.C.-dépendante du pH ($\geq 40\%$ de la valeur maximum, à pH 9) ; le taux de déshydratation irréversible du sol séché à l'air, à pF_3 ($\geq 40\%$ de la valeur maximum sur sol humide-non cultivé) ; le $\Delta\text{pH} (\text{H}_2\text{O} - \text{KCl}) < 1$, le ZPC (plus élevé que celui des minéraux argileux et des acides humiques), une structure micro-agrégée (nano-agrégats de diamètre $\sim 1\mu\text{m}$).

2. Processus

Le concept de "processus d'andosolisation" est variable selon l'expérience des auteurs qui l'ont émis. Mais s'agit-il vraiment d'un processus ?

En réalité, les propriétés andiques peuvent provenir d'au moins deux processus fondamentaux d'altération (bio-géochimique) : l'hydrolyse et l'acido-complexolyse. Le premier est plus fréquent en climat tropical, le second en climat tempéré et froid.

D'autre part, l'état andique n'est pas stable. Il se situe généralement au début de la pédogénèse, plus rarement en final. Sa permanence est favorisée par un pédoclimat perhumide et fortement drainé. Au contraire, un climat sec ou un mauvais drainage réduisent la durée de cette étape.

Ce sont les matériaux vitreux et très poreux (volcaniques, pyroclastiques, non cimentés) ou très finement divisés (loess périglaciaires), qui permettent le mieux l'apparition des caractères andiques, surtout dans le cas du processus d'hydrolyse. Mais l'acido-complexolyse semble aussi former des sols andiques sur des matériaux plus massifs ou d'anciennes altérites, d'origine volcanique ou non.

D'après l'effet (prédominant) de l'un ou de l'autre de ces deux processus fondamentaux, il ressort deux ensembles fondamentaux d'andosols (sols à propriétés andiques, en général) : les andosols typiques, dits "allophaniques", et les andosols "non allophaniques".

1) Les Andosols typiques, sont le produit d'un processus d'hydrolyse à partir d'un matériau pyroclastique-non cimenté. Ils peuvent être appelés "allophaniques" ; car ils sont constitués (en abondance) d'alumino-silicates para-cristallins dans l'ensemble du profil ou du moins dans la partie supérieure, y compris l'horizon humifère.

En effet, l'hydrolyse (acidolyse en général, parfois alcalinolyse sur roches basiques en début d'altération) très rapide des verres volcaniques et de certains microlites très altérables (olivine, augite, labrador, etc...), fournit des solutions très concentrées en bases et en silice, ainsi que des résidus riches en gels d'hydroxydes (Al, Fe) et de silice "amorphe", qui ne permettent pas la genèse d'argiles et d'oxyhydroxydes bien cristallisés, mais de minéraux para-cristallins. Ces produits, à forte activité de surface, adsorbent rapidement les acides humiques, avec lesquels ils forment des pseudo-complexes stables, s'aggrégeant en nano-agrégats ovoïdes ($\phi \sim 1 \mu\text{m}$) et en micro-agrégats ($\phi \sim 100 \mu\text{m}$), très micro-poreux. Les acides humiques ainsi fixés, s'accumulent et protègent à leur tour les produits minéraux, retardant leur réorganisation et cristallisation.

Cependant, en fonction du temps, ces produits minéraux évoluent par une désilicification plus ou moins poussée (selon le pédo-climat), dans la partie supérieure du sol, et une resilicification éventuelle à la base du profil ou de la toposéquence, vers des minéraux mieux cristallisés (gibbsite et goethite d'une part, halloysite et, ou, smectites d'autre part).

Selon le degré d'évolution du matériau et de différenciation du profil, en fonction du temps et du climat, il est possible de distinguer diverses étapes, caractérisées par un ensemble de propriétés bien définies, et donc divers grands groupes d'andosols. Il y a également une transition vers d'autres classes de sols, dès le moment où apparaissent de nouveaux horizons diagnostiques, tout en conservant encore dans une partie du profil certaines des propriétés atténuées des andosols. Ce sont les intergrades.

2) Les andosols "non-allophaniques", produits d'un processus (modéré) d'acido-complexolyse, sont probablement des sols cryptopodzoliques, à propriétés andiques, car sans différenciation évidente d'horizons diagnostiques des sols podzoliques. Ils ont été appelés andosols "non-allophaniques", parce que l'horizon humifère (souvent très épais) est constitué en abondance de chélates, surtout d'aluminium, stables, et relativement peu ou très peu d'alumino-silicates para-cristallins.

Mais il y a souvent formation en profondeur, dans la partie plus minérale du sol (horizons S ou B ou C), d'allophane et d'imogolite, voire de minéraux argileux (halloysite, vermiculite hydroxy-alumineuse). Cette genèse semble conditionnée par des mouvements de matière en solution ou pseudo-solution (silice et chélates d'Al, et, ou, proto-imogolite ?). Sans vouloir trancher entre les 2 hypothèses rappelées par Ugoli (1986), nos observations dans le cas d'andosols d'Italie semblent attester que l'alumine est mobilisée en profondeur par des chélates.

La différence essentielle avec les andosols typiques est donc dans l'horizon humifère, par suite de la présence prédominante de vrais complexes organo-minéraux (chélates), au lieu d'allophane ; ces complexes sont stabilisés par leur forte charge en aluminium ; ils forment aussi des gels avec les hydroxydes (Al, Fe) et éventuellement un peu d'allophane, qui s'organisent en micro-agrégats très poreux. La différence avec les podzols est que la redistribution des chélates dans ce profil n'est pas évidente morphologiquement, mais seulement d'après l'analyse chimique.

Le processus d'acido-complexolyse prédominante apparaît en climat très humide et généralement plus froid que le processus d'hydrolyse (stricto sensu). On observe un passage progressif de l'un à l'autre, à courte distance, dans des topo-climosequences altitudinales, aussi bien sous les tropiques (Equateur, Rwanda) qu'en région méditerranéenne (Italie) ; ou à plus longue distance dans des séquences latitudinales (Amérique du Sud). Cependant l'acido-complexolyse peut apparaître aussi à plus basse altitude en région tropicale, mais sur des paléosols ou des paléo-altérites ferrallitiques, extrêmement pauvres du point de vue édaphique (Rwanda, Tahiti). Il faut mentionner qu'elle ne se développe pas, comme l'autre processus, quasi-uniquement sur des matériaux pyroclastiques d'âge récent, mais aussi sur des produits volcaniques massifs ou cimentés et des matériaux non volcaniques, d'âge plus ancien.

Cela pose un problème de classification. Doit-on généraliser la dénomination Andosol à l'ensemble des sols ayant des propriétés andiques, comme c'est la tendance actuellement ? Mais, dans ce cas, il faudrait distinguer deux sous-classes fondamentales : les andosols "allophaniques" et les andosols "non-allophaniques", ou "crypto-podzoliques". Sinon il faut restreindre les andosols au seul cas des sols "allophaniques", et prévoir dans la Classe des sols podzoliques, une sous-classe des sols "andiques".

III. SOLUM - HORIZONS DIAGNOSTIQUES

Il serait possible de distinguer des horizons diagnostics plus ou moins spécifiques des Andosols et des horizons accessoires éventuellement observés dans les divers profils d'Andosols.

1. Horizons spécifiques

a) Aa Horizon humifère andique : Il a tous les caractères andiques bien exprimés (cf. la définition). En outre, il est très humifère ($\geq 10\%$ de mat. organ. bien humifiée), il a une couleur très foncée (code $\leq 3/3,5$ humide), une texture apparente de la terre fine limoneuse-humifère, une structure microagrégée, grumeleuse fine, en grappe, "farineuse", très friable, un chevelu racinaire très dense, une grande épaisseur (≥ 20 cm).

Sa Horizon minéral andique : Il a tous les caractères andiques bien exprimés (cf. définition), (sans illuviation apparente, ni taches d'oxy-réduction) ; une texture apparente limoneuse de la terre fine ; une teneur importante en matière organique bien humifiée ($\geq 1\%$), sans que cela soit toujours évident d'après la couleur ; une couleur dont la valeur s'affaiblit rapidement par dessiccation à l'air ; une structure micro-agrégée et faiblement cimentée par des films ou des ponts de gels organo-minéraux, ou fragmentaire polyédrique fine, très friable ; sol non collant, ni plastique ; bien drainé, sans engorgement apparent même à saturation.

b) Il serait possible de distinguer Aaa typique, des andosols "allophaniques", de Aap cryptopodzolique riche en chélates d'Al, des andosols "non-allophaniques". Ceux-ci peuvent être définis par le rapport Al-Tétraborate/AL-Oxalate $\geq 0,5$ (?) et par les teneurs très faibles en Si Oxalate ($< 0,5\%$?).

c) Le caractère vitrique, particulier à certains andosols jeunes, ou peu altérés, dérivant de cendres et lapilli volcaniques, pourrait être précisé également, en reprenant certaines des propositions de la Soil Taxonomy et du projet ICOMAND. Cela donnerait des horizons Aav et Sav, dont les propriétés andiques sont plus restreintes du fait de :

- leur forte teneur en matériaux vitreux inaltérés ($> 60\%$ fraction > 2 mm et $> 30\%$ de verres dans la fraction sable) ;
- et de leur faible teneur en produits organo-minéraux amorphes et para-cristallins (Al ox entre 0,5 et 2% ; Matière organique humifiée $< 10\%$, etc...) ;

CARACTÈRES principaux des ANDOSOLS

<p>-> produits minéraux d'altération à l'état non cristallin ou paracristallin, en prédominance, rapidement solubles (oxalate pH 3.5, à l'obscurité, HCl (2N), etc...)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - état non-cristallin (amorphe) <ul style="list-style-type: none"> -gels d'hydroxydes Al, Fe, Mn, etc... ou d'oxydes Si, Ti, etc... -chélates d'Al, Fe etc... - état para-cristallin prédominant <ul style="list-style-type: none"> -silicates : allophane, imogolite, hisingerite -silice : opale (biologique, ou chimique) -oxyhydroxydes et oxydes métalliques par Al, ou par Si, etc... - état cristallin accessoire <ul style="list-style-type: none"> -argiles : halloysite, beidellite, vermiculite -oxyhydroxydes : gibbsite, goethite, hematite, etc - pseudo-complexes organo-minéraux <ul style="list-style-type: none"> -acides humiques co-adsorbés sur les gels de produits minéraux non cristallins ou paracristallins
<p>-> propriétés de surface très développées, variées</p>	<ul style="list-style-type: none"> - capacité de rétention d'eau (à différents pF) <ul style="list-style-type: none"> élevée en % des produits organo-minéraux, forte déshydratation irréversible > 40% après dessiccation-air. (4) - C.E.C. et A.E.C. <ul style="list-style-type: none"> élevées en % des produits organo-minéraux, très variables, surtout en fonction du pH ΔCEC > 40% mais aussi de l'état humide ou sec, de la concentration ionique.
<p>-> structure micro-agrégée micro-poreuse, stable</p>	<ul style="list-style-type: none"> - capacité de rétention de P, très élevée : > 85% (méthode Blackmore) - Z.P.C. élevé : fonction de la charge en hydroxydes d'Al et Fe - micro-porosité très développée, (souvent de 60 à > 80% du volume) - densité apparente faible : le plus souvent < 0.9, varie de 0.9 à 0.2 - non plastique : à cause de l'absence de phyllites argileuses - très friable : cimentation faible, fragile après dessiccation à l'air; mais stable à l'état naturel (indice IS de Hénin très faible)
<p>-> autres propriétés</p>	<ul style="list-style-type: none"> - couleur variable : s'atténue rapidement par dessiccation à l'air - test de NaP : pH > 9.5 en moins de 2 min. - abondance de minéraux volcaniques altérables et de verres, résiduels, très fréquente.

ANDOSOLS

Soils à complexes organo-minéraux stables, très hydratés, à propriétés de gel, en prédominance dans les produits d'altération (bio-géochimique) sols le plus souvent jeunes, dérivant de produits volcaniques pyroclastiques.

NB { (1) taux de déshydratation irréversible : $\frac{ApF3 \text{ (humide)} / \text{sec-ai}}{pF3 \text{ (humide)}} \times 100$
 (2) taux de CEC variable : $\frac{\Delta CEC (pH9 / pH4)}{CEC (pH9)} \times 100$
 = humide = sol naturel ressuyé (à la capacité de rétention au champ).

- propriétés restreintes : $D_a < 1,1$ - Rétention d'eau à pF 4,2 $< 25\%$ sur sol sec air ou $< 30\%$ sur sol humide - CEC à pH 7 < 15 me/100 g de terre fine (< 2 mm).

d) Le caractère "thixotropique," particulier aux andosols de régime climatique "per-humide", peut être ajouté \rightarrow Sath. Il est défini par la propriété de thixotropie, une capacité de rétention d'eau élevée ($> 100\%$ à pF 3, sur sol humide) et un taux de déshydratation irréversible après dessiccation à l'air, très élevé ($\geq 70\%$). Ce serait l'horizon Sat.

2. Horizons accessoires

- Aam mélanique (code de couleur $\leq 2/1,5$ humide).
- Aac chromique (code de couleur $> 2/1,5$ humide).
- Oh Accumulation de matière organique humifiée, en surface.
- G Gley ou Pseudo-gley, en profondeur ($\geq 0,50$ cm), hydromorphie non permanente.
- Bp placique, illuviation indurée d'hydroxyde de fer et éventuellement d'humus et d'alumino-silicates paracrystallins.
- Sao oxique, andosol riche en oxyhydroxydes de fer et en gibbsite, proche géochimiquement des sols ferrallitiques.
- Sab argileux (ou mixte), andosol de "transition", contenant en mélange de l'alophaane et des minéraux argileux (halloysite, smectite, vermiculite) bien évidents sur les diagrammes de rayons X (à propriétés andiques atténuées).
- Sak calcique, andosol des climats sub-arides, à calcaire pulvérulent (et éventuellement gypse).
- Sf ou Bf fragique, à cimentation friable à l'état humide, dure à l'état sec, par des alumino-silicates para-cristallin (imogolite), des argiles (halloysite), ou de la silice.
- Sd ou Bd durique, à cimentation et induration permanente, par de la silice paracrystalline (calcédoine) et (ou) éventuellement des argiles, ou de la calcite.

3. Taux de saturation en bases échangeables

Bien que la Capacité d'Echange de Cations soit très dépendante du pH du sol, dans les sols à propriétés andiques, il est de tradition d'utiliser le taux de saturation en bases, de la Capacité d'Echange mesurée à pH 7, comme critère de classification des Andosols. Les Andosols saturés sont ceux où le taux de saturation est $\geq 50\%$ dans l'ensemble du sol. Les Andosols désaturés sont ceux où le taux de saturation est inférieur à 50% dans tout le profil ou au moins dans l'horizon S_A . Une transition est possible dans le cas où le taux de saturation est $\geq 50\%$ seulement dans l'horizon Aa. Ces valeurs permettent de distinguer les Andosols à caractère édaphique "eutrophe" de ceux qui sont "mésotrophe" ou "oligotrophe".

IV . GRANDS TYPES

Deux options sont possibles : soit reprendre en le précisant et le complétant le schéma proposé en 1971, par le "Groupe de Travail Andosols" (publié en 1972 dans les Cahiers de Pédologie, ORSTOM). Soit, repartant des nouveaux concepts précédents, compléter et redistribuer les grands groupes d'Andosols, pour servir de base à une nouvelle classification. Il ne paraît pas opportun de transposer en français les propositions de ICOMAND, car les principes sont trop différents de ceux de la Classification CPCS, les subdivisions et les critères un peu arbitraires et pas encore totalement testés et bien établis.

A. Schéma de classification de 1972, adapté.

La définition des andosols pourrait être légèrement élargie et précisée en fonction des connaissances récentes.

Les andosols sont subdivisés en deux sous-classes, en fonction du degré de différenciation du profil, puis en groupes en fonction des propriétés du sol en accord avec les facteurs de formation, surtout climatiques et de durée d'altération, troisièmement en sous-groupes, par des différenciations d'horizons particuliers (Aa mélanique, B placique, Sa thixotropique, B durique, etc...). Enfin des intergrades avec d'autres classes sont admis, dans la mesure où le caractère andique est subordonné à des propriétés de diagnostic (horizon diagnostique) qui les rattachent à une autre classe.

Andosols à profil peu différencié AaC, Aa-R, etc...

1. Andosols vitriques
 - à Aav
 - . Saturés (S/T \geq 50%) . à Aav { mélanique
ou chromique
 - . Désaturés (S/T < 50%) . id "
2. Andosols humiques-saturés (molliques)
 - à Aaa (S/T \geq 50%) . à Aav { mélanique
ou chromique
3. Andosols humiques-désaturés (S/T < 50%)
 - à Aaa ou Aap
 - . allophaniques; à Aaa (typique) { mélanique
ou chromique
 - . cryptopodzoliques, à Aap, (généralement) mélanique
 - . histiques, à Oh, Aaa ou Aap, éventuellement G

Andosols à profil différencié Aa-Sa-C ou R, etc...

4. Andosols saturés
 - à Aaa-Sa (S/T \geq 50%)
 - . mélaniques Aam
 - . chromiques Aac
 - . calciques Sak
 - . indurés à fragipan ou duripan
 - . placiques à horizon placique ? exceptionnel
5. Andosols désaturés - non perhydratés
 - à Aaa ou Aap-Sa (S/T < 50%)
 - . mélaniques à Aam
 - . chromiques à Aac
 - . placiques à horizon placique et Aap (ou Aaa ?)
 - . gleyiques à G
 - . argileux à Sab
6. Andosols désaturés-perhydratés
 - à Aaa ou Aap et Sat (S/T < 20%)
 - . mélaniques à Aam
 - . chromiques à Aac
 - . placiques à horizon placique et Aap (ou Aaa ?)
 - . gleyiques à G
 - . oxiques à Sao.

- NB 1) des transitions sont possibles entre les groupes, par exemple d'Andosol désaturé en Sa, à horizon Aa faiblement saturé.
- 2) des combinaisons sont possibles d'horizons accessoires, au niveau des sous-groupes.
- 3) des intergrades sont connus avec diverses autres classes et grands groupes de sols du CPCS, tels que : Sols Peu Evolués d'apport éolien, Sols Bruns, Sols Ocreux, Sols Podzoliques, Sols Isohumiques, Sols Ferrallitiques, Sols Ferrallitiques à halloysite, Sols Ferrallitiques oxiques (à gibbsite)...

En schématisant, pour un référentiel au niveau des grands groupes de sols il y aurait 6 ensembles :

- Andosols vitriques
- Andosols humiques-saturés (molliques)
- Andosols humiques-désaturés
- Andosols saturés
- Andosols désaturés-non perhydratés
- Andosols désaturés - perhydratés

B. Schéma nouveau proposé

On pourrait, à la lumière des connaissances récentes, si l'on admet une définition élargie des Andosols : sols à propriétés andiques (telles que définies précédemment et par ICOMAND, 1986), distinguer :

- deux sous classes - Andosols allophaniques (= typiques)
à Aaa (avec ou sans Sa)
- Andosols non-allophaniques (= crypto ou para-podzoliques)
à Aap (avec ou sans Sa).

Andosols "allophaniques" à Aaa = typiques ou Andosols (stricto sensu)

1. Andosols vitriques à Aav/C ou R
- . saturés , mélaniques ou chromiques
 - . désaturés , id "

2. Andosols humiques à Aaa/C ou R
 - . saturés (molliques), mélaniques ou chromiques
 - . désaturés (umbriques), mélaniques, chromiques, ou histiques, etc...

3. Andosols saturés (eutrophes) à Aaa/Sa/C ou R
 - . mélaniques ou chromiques
 - . calciques, à fragipan, à duripan (peut être à horizon placique ?)

4. Andosols désaturés (mésotrophes, en général) à Aaa/Sa/C ou R
 - . mélaniques ou chromiques
 - . à horizon placique, gleyique, argileux.

5. Andosols perhydratés (oligotrophes, en général), à Aaa/Sat/ C ou R
 - . mélaniques ou chromiques
 - . à horizon placique, gleyique, oxisque.

Andosols "non-allophaniques" à Aap : para-podzoliques ou Para-Andosols

6. Andosols para-podzoliques humiques à Aap / C ou R
 - . généralement mélaniques
 - . éventuellement avec Oh, G, horizon placique

7. Andosols para-podzoliques ^{typiques} à Aap/Sa
 - . mélaniques ou chromiques
 - . éventuellement perhydratés (à Sat), à horizon placique, gleyique.

Pour synthétiser les dénominations on pourrait distinguer

- Les Andosols (stricto sensu)
- Les Para-Andosols (à Aap).

Il faudrait au moins 7 grands-groupes (ou Types) de sols correspondant aux principaux ensembles naturels :

1. Andosols vitriques
2. Andosols humiques
3. Andosols eutrophes
4. Andosols mésotrophes
5. Andosols perhydratés
6. Para-andosols humiques
7. Para-Andosols. ^{typiques}

V. PEDOGENESE

La formation des Andosols, en condition de bon drainage, suit deux séquences principales : 1°) en fonction du climat = climato-séquence, 2°) en fonction du temps = chronoséquence.

1. Climato-séquences.a - latitudinales.

En condition de climat humide, des régions tropicales aux régions froides, on observe une évolution de l'horizon humifère, de plus en plus foncé, acide et profond, et le développement de caractères podzoliques discrets dans les sols sur roches basiques (cryptopodzoliques, B_s ocreux ou B_{Fe} placique), ou affirmés dans les sols sur roches acides (sols podzoliques ocreux et podzols humo-ferrugineux) ; puis des sols tourbeux à héli-gley de toundra en climat pergélitique. A l'inverse, l'allitisation, marquée par le développement de la gibbsite, se développe dans les sols tropicaux et subtropicaux (le sol s'enrichit en oxy-hydroxydes de fer et d'alumine).

La limite de température moyenne annuelle, en dessous de laquelle apparaissent les caractères podzoliques discrets (acide complexolyse prédominante dans l'horizon A ; abondance de chélates d'Al peu mobiles), semble se situer vers 12° C.

b - altitudinales, effet de l'altitude et effet de versant (orientation des Alizés) en régions tropicales et subtropicales.

- séquence d'Hawaii, en fonction de la pluviosité (USDA. Soil Survey. 1973) (→ fig. 1)

α - au vent : typic Dystrandepts → Hydric Dystrandepts →
typic Hydrandepts → Vitrandepts

β - sous le vent : Vitrandepts → typic Eutrandepts → Ustollic
Eutrandepts (avec C_{Ca} de calcaire friable)

- séquence du Nord des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu), sur roches basiques

α - au vent : andosols saturés → andosols désaturés → andosols perhydratés

β - sous le vent : andosols désaturés → andosols saturés → Sols bruns andiques
(cf. QUANTIN 1972-79, et thèse). (→ fig. 2)

- séquence des îles Canaries (FERNANDEZ-CALDAS, QUANTIN, TEJEDOR-SALGUERO, 1975, 1978-1979-1980). (→ fig. 3)

α - séquence septentrionale :

- sols récents : bruns-andiques, andosols désaturés ± perhydratés,
andosols vitriques (altitude croissante de 300 à 2000 m)

- sols plus anciens : vertisols, sols fersiallitiques, sols ferrallitiques
± rajeunis et andiques en surface

β - séquence méridionale :

sols ± rajeunis : andosols vitriques, sols bruns, sols fersiallitiques,
vertisols et sols ± calcaires, gypseux et sodiques.

(altitude décroissante de 2200 à 200 m).

En Italie (QUANTIN, LULLI, BIDINI, 1986), les effets de la podzolisation discrète (fort chélation de l'Aluminium) apparaissent vers 900 m d'altitude à une température moyenne annuelle inférieure à 12° C. Il en est de même dans les topo-climosequences andines (Equateur, Colombie) et au Mexique.

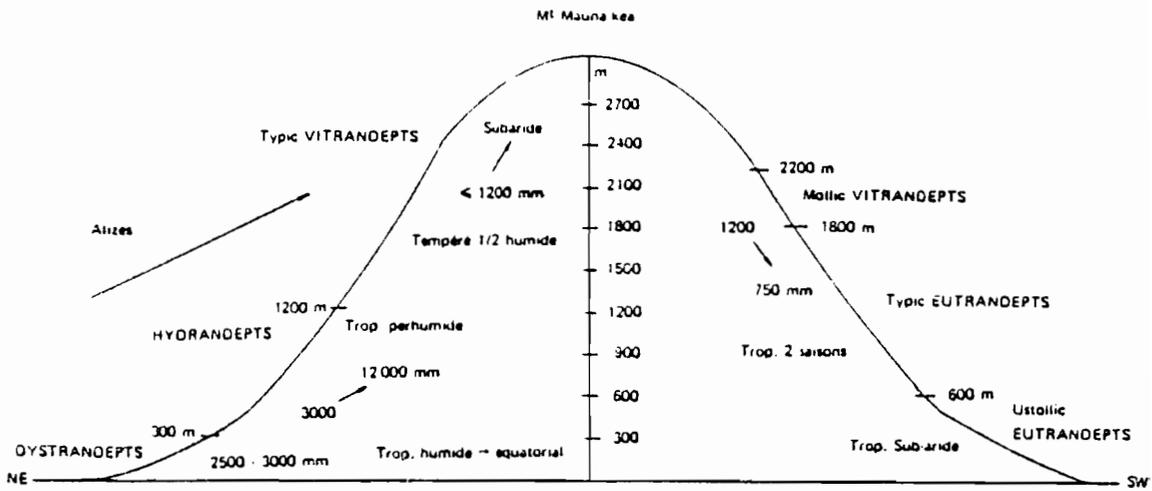


Fig. 1 Séquence topoclimatique des Andosols d'Hawaï

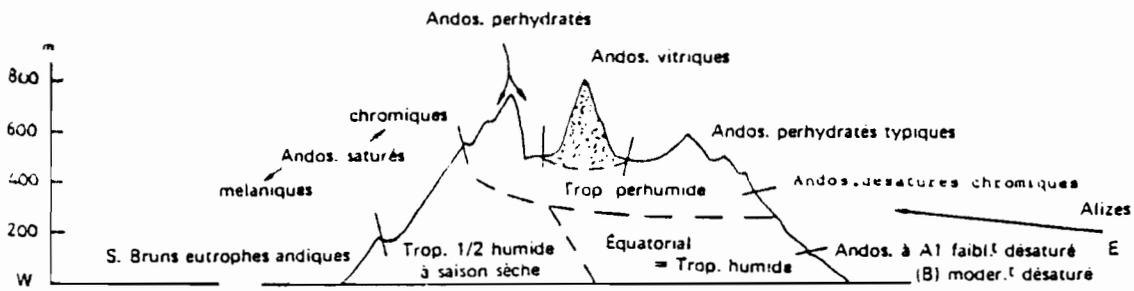
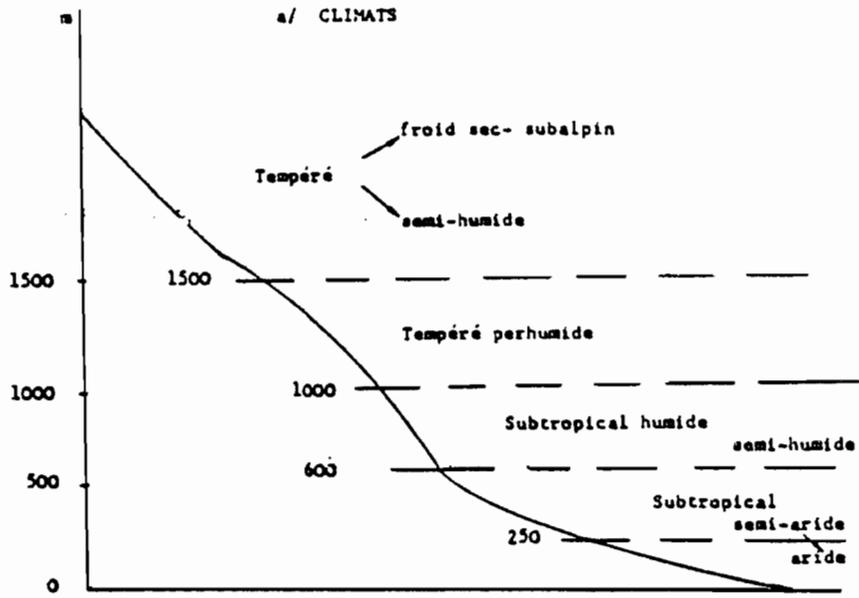


Fig. 2 Séquence topoclimatique de Santa Maria (Vanuatu) Andosols et bruns-andiques/basaites (P. QUANTIN, 1978)



b/ SOLS

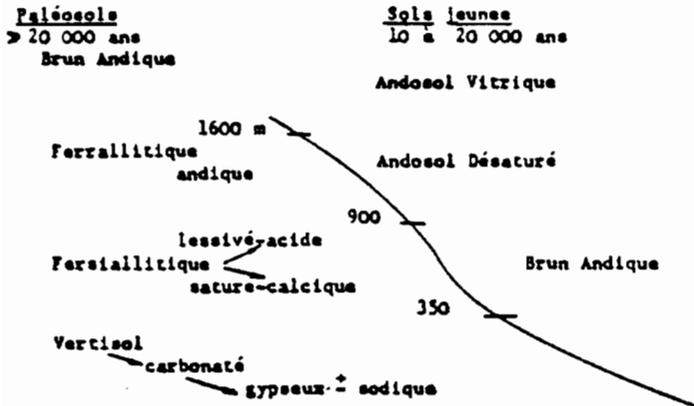


Fig. 3

I. Canaries- Séquence topo-climatique et chrono-séquence comparée des sols dérivés de roches volcaniques.

Synthèse schématique des versants nord et sud.
d'après Fernandez Caldas et al. (1981)

- séquence du Massif-Central français (BONFILS 1971, HETIER 1975, MOINEREAU 1977).

a - La présence des andosols et sols andiques est limitée à la partie supérieure, au-delà de 800 à 900 m d'altitude.

+ Sur roches basiques (basaltes, andésites) on observe les andosols les plus typiques sur les produits pyroclastiques quaternaires de la chaîne des Puys. Sur des laves plus anciennes les sols ont des caractères intergrades : bruns-andiques, ou ocreux et cryptopodzoliques.

+ Sur roches plus acides (rhyolites, domites) les sols ont des caractères plus podzoliques : rankers andiques, rankers cryptopodzoliques, podzols ocreux ou humo-ferrugineux.

3 - A basse altitude, sur basaltes, les sols sont des sols brunifiés (bruns acides et bruns eutrophes).

MOINEREAU pense que cela est dû à l'effet récent de la culture plutôt qu'à une différence climatique.

Il est probable que les deux effets, climatiques et culturels se conjuguent le deuxième accusant le premier.

2. Chrono-séquences

a - La séquence des îles Canaries nous a montré qu'en région subtropicale :

+ en climat "perhumide" : les andosols désaturés → sols ferrallitiques,

+ en climat "ustique" : - les andosols ± désaturés → sols ferrallitiques
ou des sols bruns en haut de séquence,

- les andosols saturés → sols ferrallitiques

ou des sols vertiques en bas de séquence,

+ en climat subaride : les andosols saturés → vertisols,

et sols ± salés à différenciations calcaires, gypseuses et sodiques.

b - Aux Nouvelles-Hébrides, en climat tropical, nous avons pu établir les filiations suivantes (QUANTIN, 1972-79 et thèse) :

+ en climat perhumide les andosols perhydratés → sols ferrallitiques "oxiques" à caractères andiques permanents, gibbsitiques :

+ en climat humide de basse altitude, les andosols saturés → sols bruns eutrophes ferruginisés ou andosols désaturés, puis sols ferrallitiques ± désaturés à halloysite.

+ en climat tropical, à courte saison sèche, les andosols saturés → sols bruns-andiques → sols ferrallitiques et sols bruns vertiques.

c - A La Réunion, une gamme assez étendue de climats, en altitude (de tropical humide à tempéré perhumide sur le versant "au-vent", jusqu'au tropical à longue saison sèche sur le versant "sous le vent") et une large durée des apports volcaniques (Miocène à actuel), font ressortir une large différenciation des sols et des altérations (ZEBROWSKI, 1973 - GENSE, 1976, → fig. 4 et 5 : Les andosols ne persistent,

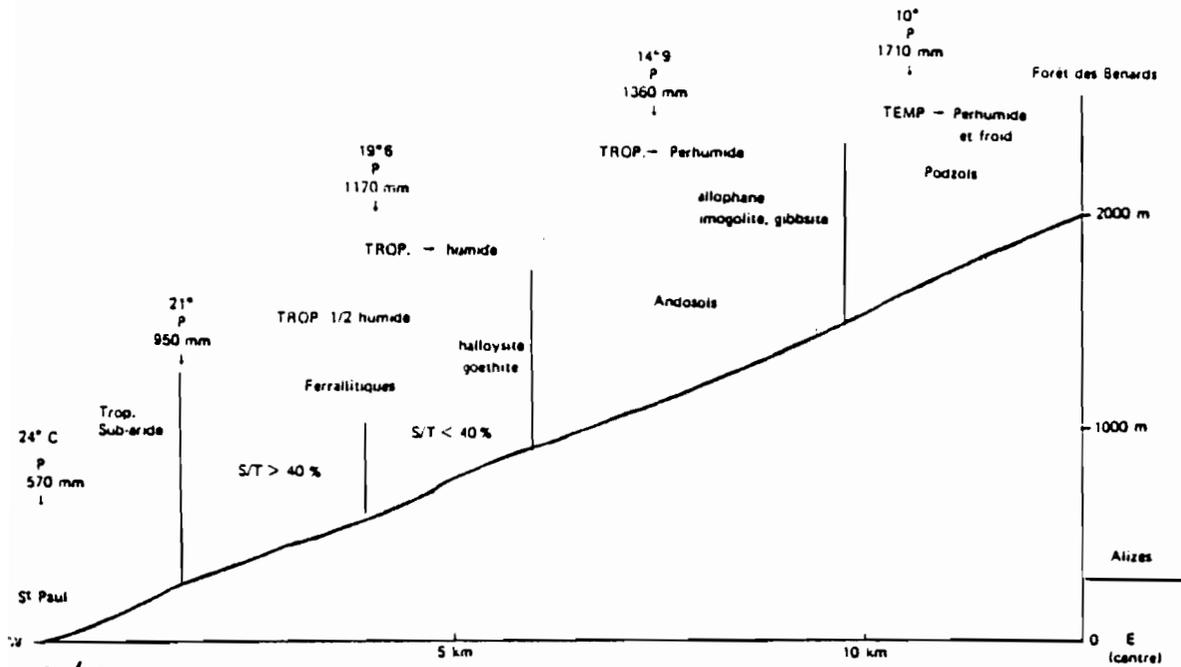


Fig. 4 Séquence topoclimatique des sols de La Réunion (versant « sous le vent ») (d'après ZEBROWSKI, 1973)

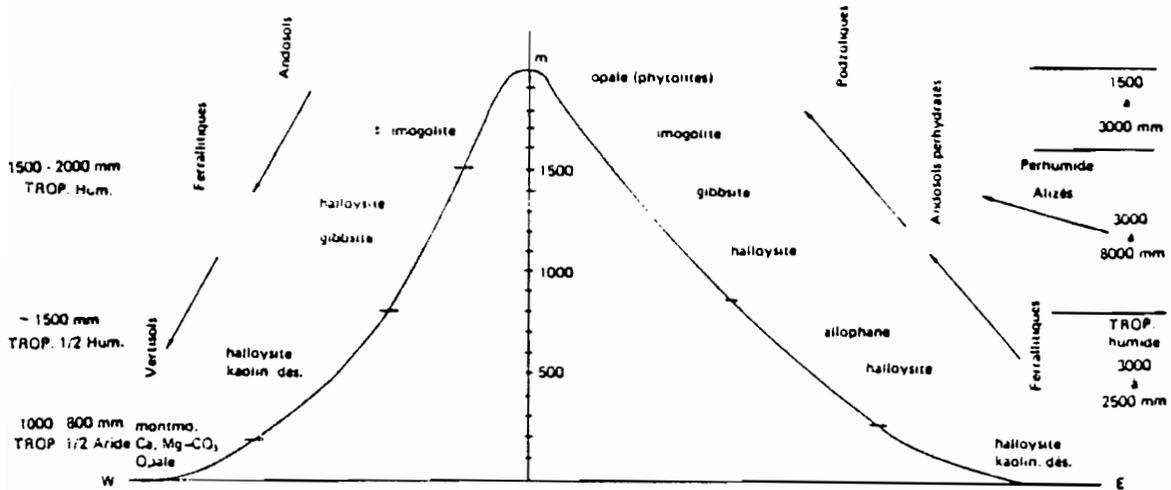


Fig. 5 Séquence topoclimatique des sols et alterations de La Réunion. Schema d'après GENSE (1976) et ZEBROWSKI (1973)

typiquement, que dans la zone de climat tropical perhumide. Ils sont même remplacés par des podzols sur les sommets, en climat plus froid, tempéré et perhumide. En climat tropical humide et à courte saison sèche, les andosols sont relayés par des sols ferrallitiques. En climat tropical à longue saison sèche, ils ont évolué en vertisols ou sols fersiallitiques, où se différencient même des carbonates (Ca, Mg) et de l'opale. Cette observation rejoint celle des îles Canaries en climat subtropical.

Des séquences analogues ont été observées aux Antilles (COLMET-DAAGE et al. 1965), en Equateur (COLMET-DAAGE et al. 1967-69). Dans ce dernier cas, les andosols situés entre 3500 et 4500 m d'altitude, en climat froid (Cryandeps) sont des andosols peu différenciés-humiques, de couleur très noire, sols analogues à ceux du Japon en climat froid, ou en Nouvelle-Zélande en situation semblable et sur roches acides (rhyolites).

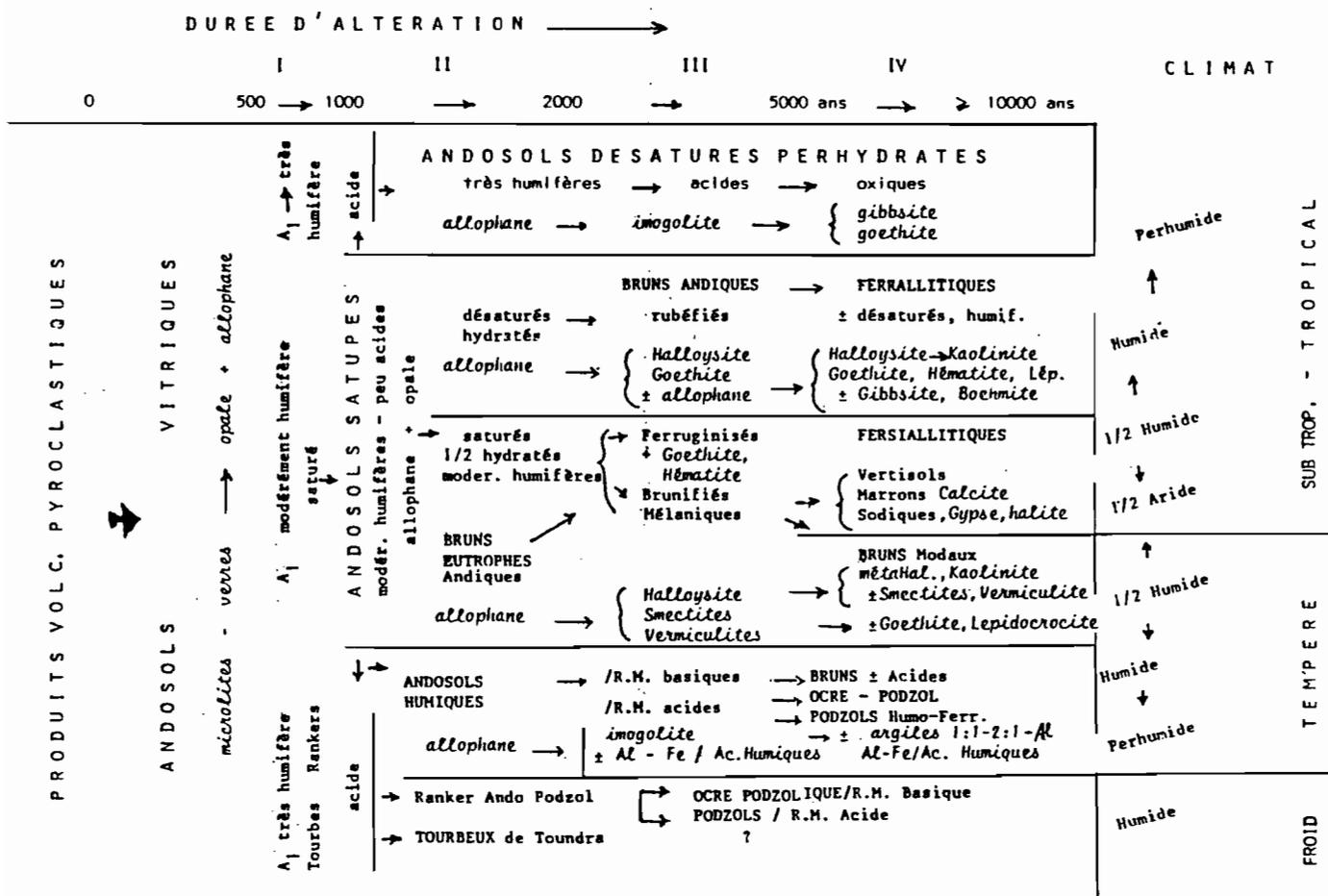
3. Schéma général d'évolution des andosols.

Un schéma (fig. 6), permet de résumer l'évolution des andosols en fonction du climat et de la durée d'altération, et éventuellement du caractère plus ou moins basique de la roche-mère.

Ce schéma montre une évolution rapide, pendant au plus 5000 à 10000 ans (probablement). En climat suffisamment humide et chaud, le stade peu évolué humifère → andosols vitriques ne dépasse pas 1000 à 2000 ans. Ensuite on assiste à une différenciation climatique. D'une manière générale, les caractères andiques perdurent d'autant plus que le climat est perhumide, permettant ainsi une évolution géochimique de l'altération plus poussée, que cela soit en climat tropical (→ sols oxiques) ou en climat tempéré (→ sols ocreux ou cryptopodzobliques). Plus le climat est sec pendant une longue période, plus rapide est la formation de minéraux argileux (→ halloysite, smectites, vermiculites) et la stabilisation géochimique du sol).

- En climat tropical et subtropical, on observe trois filières climatiques :
 - x perhumide → andosols perhydratés très humifères → sols oxiques ;
 - └ allophane → imogolite → gibbsite + goéthite cryptocristalline
 - x humide (courte saison sèche) → sols bruns-andiques ferruginisés → sols ferrallitiques;
 - └ allophane → halloysite ± goéthite .
 - x 1/2 humide (longue saison sèche) → sols bruns-andiques mélanisés
 - sols fersiallitiques, vertisols (et sols ± carbonatés, gypseux et halomorphes);

Fig. 6 Evolution des Sols dérivés de roches volcaniques pyroclastiques / temps et climat



l'allophane-hisingérite } → Fe-Mg smectites
 } → smectites + carbonates, gypse et attapulgite .

x tempéré humide et perhumide d'altitude $T_m < 12^\circ\text{C}$
 para andosols à chélates d'Al prédominants dans l'horizon A

- En climat tempéré, on a observé deux filières principales :

x humide et + froid → ⁽¹⁾ $(T_m < 8^\circ\text{C})$ andosols désaturés / → sols bruns acides, bruns-
 andiques ou rankers cryptopodzoliques sur roches basiques
 → ⁽²⁾ rankers andiques → sols ocre-podzoliques ou
 podzols humo-ferrugineux sur roches acides ;

l'allophane + Ac. Fulv., ou Hum - Fe, Al complexes

+ imogolite, ± halloysite, Al-vermiculites ou smectites .

x 1/2 humide et tempéré ^(à été chaud et sec) $(T > 7^\circ\text{C})$ → bruns ± eutrophes et andiques

→ sols bruns modaux, sur roches basiques

→ sols bruns ± acides ou lessivés sur roches acides

l'allophane → halloysite, smectites, vermiculites et intergrades Al-2:1.

- En climat froid :

x humide - sur roches basiques : rankers-andiques ou cryptopodzoliques
 → sols ocreux

- sur roches acides : rankers-andiques → podzols humoferrugineux.

NB. dans les sols ocreux sur roches basiques, en profondeur, dans les paléo-
 sols, il se forme des argiles (halloysite, kaolinite, vermiculites) et
 des hydroxydes de fer, mais en petite quantité.

x pas d'études connues en climat plus aride.

x pergélisque = on ne connaît que les sols tourbeux de toundra.

4. Sur les matériaux peu perméables et cimentés (tufs, ignimbrites, coulées
 massives) , l'évolution est différente; car le drainage est ralenti et l'alté-
 ration est beaucoup moins rapide. Ainsi, sur des tufs pyroclastiques des minéraux
 argileux (halloysite, smectites) peuvent se former directement, sans transition
 par l'allophane, comme c'est la règle sur des matériaux meubles et très perméables
 (cendres, lapilli). C'est pourquoi sur les matériaux peu perméables, il se forme
 plutôt des sols argileux: Bruns , Fersiallitiques, Ferrallitiques, ou Vertiques.
 Mais leur développement est beaucoup moins rapide que celui des Andosols.

VI. PROPRIÉTÉS - FONCTIONNEMENT ⇒ APTITUDES EDAPHIQUES

Les propriétés andiques majeures :

- Liées à des gels, à propriétés de surface : rétention d'eau, d'anions et de cations, très développées, mais très variables selon les conditions de la mesure, ou les modifications consécutives de l'utilisation du sol.
- Liées à des complexes ou pseudo-complexes organo-minéraux stables.
- Liées à une structure micro-agrégée et à microporosité très développée permettant une forte rétention de l'eau et cependant un bon drainage du sol.
- Entraînant une accumulation d'humus plus ou moins profonde, consécutive d'un turn-over ralenti.
- Entraînant l'accumulation de certains éléments liés à l'humus, tels que NPS, ou à la forte capacité de rétention anionique de l'allophane et des hydroxydes d'alumine, d'éléments tels que P.
- Et cependant dans le cas des andosols (stricto sensu) les plus typiques, sols jeunes sur des cendres volcaniques, une abondance de minéraux primaires altérables, fournisseurs permanents de bases échangeables.

Les andosols (S.S.) se distinguent des para-andosols, par les effets prédominants de l'allophane (au sens large), et la quasi-absence de chélates (d'Al et Fe). Ils sont faiblement à modérément acides ($\text{pH} > 5,5$ en général), même quand le taux de saturation en bases échangeables (à $\text{pH} 7$) est apparemment faible. Cependant ils peuvent être riches en minéraux altérables. Malgré une forte accumulation humifère, le rapport C/N reste souvent < 15 et manifeste une bonne activité biologique.

Les andosols vitriques sont des andosols "peu-évolués" à propriété de sable volcanique-humifère. Ils sont souvent riches en bases échangeables et en phosphore assimilable. Leurs facteurs limitants sont d'ordre physique : profondeur restreinte, forte macroporosité, fort drainage et faible rétention d'eau, ou leur conséquence: un risque de lixiviation rapide de certains éléments, dont l'azote minéral.

Les andosols saturés ont des caractères de sols eutrophes. Ils sont constitués d'une allophane modérément alumineuse et ferrifère et ils ont des propriétés modérées de gels. Ils sont suffisamment évolués et peu acides pour avoir une capacité d'échange de bases élevée et une rétention modérée du phosphore. Ils ont aussi une capacité de rétention en eau suffisante. Ce sont des sols très fertiles qui supportent un usage agricole intensif. Ils ne présentent pas de problème grave de fertilisation en phosphore. Les sols situés en climat à saison sèche marquée peuvent présenter un déficit hydrique saisonnier.

Les andosols désaturés manifestent au maximum les propriétés de gels et de rétention anionique, notamment du phosphore.

- les andosols désaturés non perhydratés, ont des caractères de sols mésotrophes. Ils ont d'excellentes propriétés physiques, une richesse suffisante en bases échangeables ; mais la forte capacité de rétention du phosphore peut poser problème pour la fertilisation.

- les andosols perhydratés, marquent le stade extrême, où l'allophane est la plus alumineuse (imogolite + gels d'hydroxydes d'Al et Fe), les propriétés de gel les plus développées, la rétention du phosphore la plus énergique, la macroporosité la plus restreinte. Il n'y a cependant pas de toxicité aluminique évidente. Le taux de saturation en bases échangeables est très faible ; des déficiences en bases sont possibles. Ce sont des sols à caractère oligotrophe, qui posent des problèmes sérieux de fertilisation, notamment en phosphore.

Les Para-Andosols, non-allophaniques, se marquent par l'abondance des chélates organiques à prédominance d'aluminium. L'horizon humifère est franchement acide ($\text{pH} < 5$), fortement désaturé en bases échangeables ; il y a possibilité de toxicité aluminique. Le phosphore est fortement retenu, soit dans la molécule organique, soit sous forme de pseudo-sels complexes avec les chélates d'alumine. La fertilité est très restreinte. Ce sont des sols à caractère oligotrophe qui posent de très sérieux problèmes de fertilisation.

MINERALOGIE ET MICROSTRUCTURE

Michel ROBERT

MINÉRALOGIE ET MICROSTRUCTURE DES ANDOSOLS

M. ROBERT

Station de Science du Sol
I.N.R.A. - 78000 - Versailles

Les andosols constituent certainement dans la classification pédologique l'exemple le plus typique pour lequel les propriétés apparaissent comme spécifiques et directement en relation avec la nature des constituants et leur organisation. Nous allons nous efforcer de dégager ces spécificités et d'en tirer des applications pour la mise en valeur de ces sols.

I. LES CONSTITUANTS ET LES MICROSTRUCTURES

A. Les constituants

Les constituants secondaires sont directement issus des structures mal organisées des verres volcaniques par lessivage des éléments basiques (K, Na, Ca, Mg) et de la silice. On retrouve des constituants qui ont pu être appelés amorphes et qui se révèlent en réalité organisés à très courte distance lorsqu'on les étudie en microscopie électronique à transmission ou par microdiffraction électronique.

Les **allophanes** (WADA, 1977, 1982) sont ainsi constituées de petites sphères creuses de 3,5 à 5,5 nm de diamètre constituées par un seul feuillet 1/1 de type kaolinite avec la couche octaédrique tournée vers l'extérieur de la sphère et une couche tétraédrique incomplète à l'intérieur (fig.1).

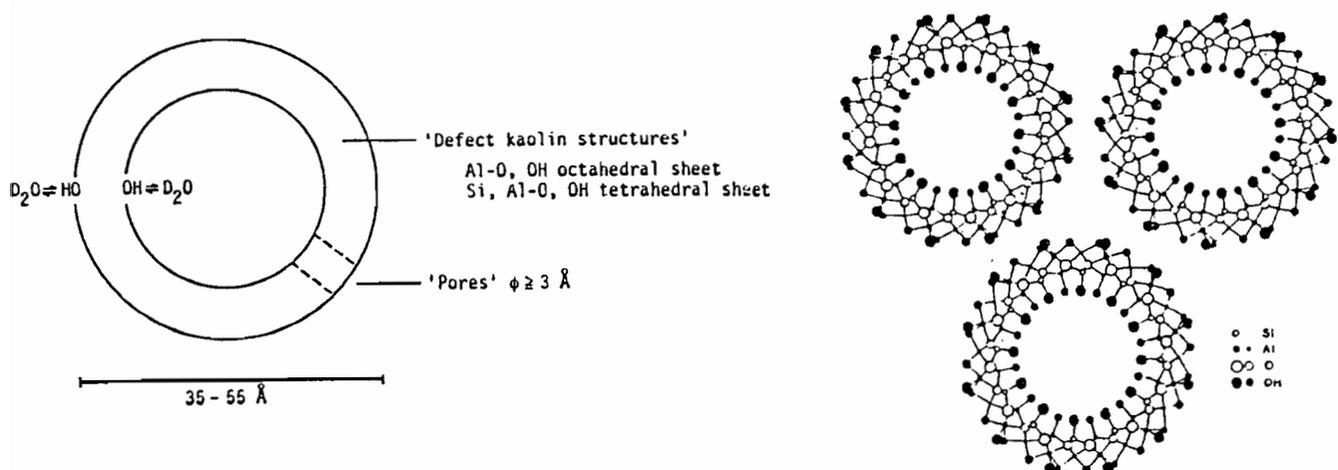


Fig. 1 - Présentation schématique d'une sphère d'allophane, (à gauche) et d'une coupe de tubes d'imogolite à droite

La composition de ces allophanes (tableau 1) peut varier de rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ voisin de 2 que l'on retrouve pour les kaolinites à 1 (allophane like) qui caractérise l'imogolite.

La coordinence de l'aluminium peut dans certains cas, être tétraédrique (structure proche des feldspathoïdes), ou être entièrement octaédrique comme dans les kaolinites. Les "allophane like".

TABLEAU 1

Classification et nomenclature des minéraux argileux "mal cristallisés"

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio	Brown (1955)	Present	$\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ratio	Brown (1955)	Present
∞	Opaline silica	Opaline silica	∞	Opaline silica	Opaline silica
2	Allophane	----- ↑ Allophane ↓ -----	4	-----	----- ↑ Poorly ordered nontronite, Fe-saponite etc. ↓ -----
1	-----	----- ↑ Allophane-like constituents ↓ -----	2	----- Hisingerite	-----
25	-----	-----	1.5	-----	----- ↓ -----
0	Kliachite	----- ↓ ----- ?	1	-----	----- ↑ Si-containing ferrihydrite ↓ -----
			0.5	-----	----- ↓ Poorly ordered goethite, lepidocrocite etc. ↓ -----
			0	----- Limonite	----- ↓ Ferrihydrite

L'imogolite fréquente dans les sols de La Réunion a une structure dite paracristalline dans la mesure où une organisation régulière existe le long d'un tube qui a une section voisine de celle de l'allophane (2,2 nm) et une longueur pouvant atteindre plusieurs μm . Les fibres peuvent se regrouper parallèlement les unes aux autres. La structure comprend des tétraèdres tournés vers l'intérieur de la fibre et une couche gibbsitique à l'extérieur ; le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est de 1 (Fig.1).

Dans les andosols on trouve également d'autres constituants mal cristallisés de très petite taille (sphères de 2 à 10 nm) qui sont des polycations et gels d'aluminium (klichite) et de fer (ferrihydrite) et pour le pôle siliceux (Tableau 1) de l'opale en particules de 0,2 à 5 μm qui sont en réalité des agrégats de petites sphères de 5 à 10 nm. L'importance de ces gels Si, Al, Fe serait à préciser aussi bien en ce qui concerne la genèse des autres constituants (EGGLETON, 1987) que pour expliquer certaines propriétés (rôle de liant ou pour la rétention des ions).

Dans les andosols plus anciens ou soumis à un climat plus sec, l'hallowysite (phyllosilicate 1/1 hydraté à 10 \AA) est présente en quantité variable, et dans certains cas des phyllosilicates 2/1 peuvent commencer à se former. De même, on peut retrouver des oxydes et hydroxydes cristallisés (gibbsite-goethite-hématite) parfois en quantité importante comme c'est le cas aux Iles Hawaï.

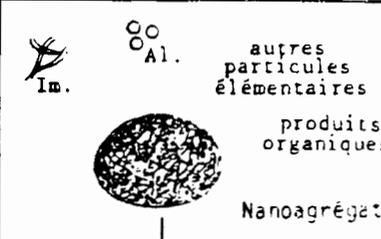
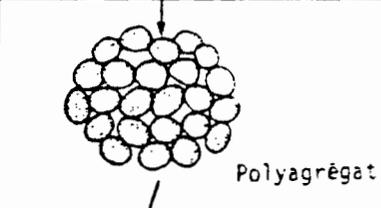
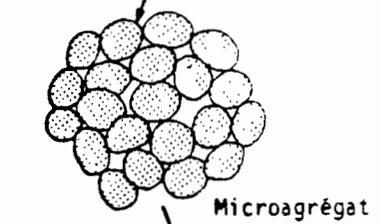
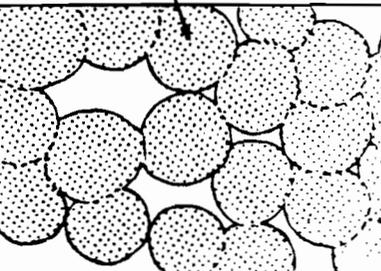
Dans les fractions granulométriques plus grossières, on retrouve les fragments de verre volcanique plus ou moins altéré et poreux dont la proportion augmente pour les sols jeunes et les matières organiques non évoluées. Tous ces composés mal cristallisés sont stabilisés par la matière organique évoluée (acides humiques ou fulviques) souvent très abondante (10 à 20 %) qui apparaît liée d'une manière très étroite.

Au niveau des processus, l'andosolisation apparaît donc comme un processus intermédiaire entre la podzolisation où le complexe organique entraîne Al et Fe et permet leur migration et la ferrallitisation où les composés cristallisés de type oxyde hydroxydes ou minéraux 1/1 se forment rapidement. Il est donc normal de retrouver les podzols et les sols ferrallitiques au-dessus et au-dessous des andosols dans la séquence altitudinale. De même, avec le temps, les andosols évoluent vers la ferrallitisation.

B. Les microstructures

Les constituants que nous venons d'énumérer sont le plus souvent associés pour donner différents niveaux d'organisation hiérarchisés (Tableau 2). A La Réunion, V. ROSELLO (1984) a ainsi pu mettre en évidence des nanoagrégats de taille 0,1 à 1 μ , puis des polyagrégats de premier ordre (5 à 10 μ), puis de deuxième

TABLÉAU 2 - Les différentes unités d'organisation microstructurale définies dans le fond matriciel des horizons B andosoliques (ROSELLO, 1984)

Unités d'organisation	Constituants	Dimensions	Porosité	Autres appellations	Représentation schématique
<u>NANOAGREGAT</u> <u>ELEMENTAIRE</u>	PARTICULES ÉLÉMENTAIRES imogolite tube filament allophane sphérule halloysite gibbsite, goethite, hydroxydes Fe MATIÈRE ORGANIQUE	<u>0,1-1 μm</u>	NANOPOROSITÉ intra-particule 10-100 Å inter-particules 0,001-0,01 μm	- agrégat-type (HETIER, 1975) - flocon structural (MOINEREAU, 1977) - domaine (0,01-1 μm) (MAEDA et al., 1977)	
<u>POLYAGREGAT</u> DE 1er ORDRE	NANOAGREGATS ÉLÉMENTAIRES	<u>5-10 μm</u>	ULTRAMICROPOROSITÉ inter-nanoagregats 0,1-1 μm	- agrégat élémentaire arrondi (30-40 μm) (BECH-BORRAS et al., 1977) - cluster (TERZAGHI, 1958)	
<u>POLYAGREGAT</u> DE 2ème ORDRE ou <u>MICROAGREGAT</u>	POLYAGREGATS I	<u>50-100 μm</u>	MICROPOROSITÉ inter-polyagregats 1-10 μm	- cluster (1-100 μm) (MAEDA et al., 1977) - agrégats arrondis (400-700 μm) (BECH-BORRAS et al., 1977)	
<u>MICROSTRUCTURE</u> <u>CONTINUE</u>	MICROAGREGATS	<u>100 μm-1mm</u>	MICROPOROSITÉ inter-microagregats 10-100 μm MACROPOROSITÉ biologique 100 μm-1mm		

ordre (50 à 100 μm) et enfin, des microagrégats de 100 μ à 1 mm. Tous ces agrégats laissent entre eux des pores de taille croissante. On ne sait pas encore quels sont les ciments ou liants responsables de cette agrégation dans les andosols de La Réunion ; (sans doute des polymères de fer et d'aluminium).

Mais cette organisation est susceptible de subir des modifications considérables en particulier lors de la dessiccation (GRANDJEAN, 1983). Les glomérules d'allophanes s'agglomèrent alors et sont transformés en pseudosables plus ou moins hydrophobes (fig.2).

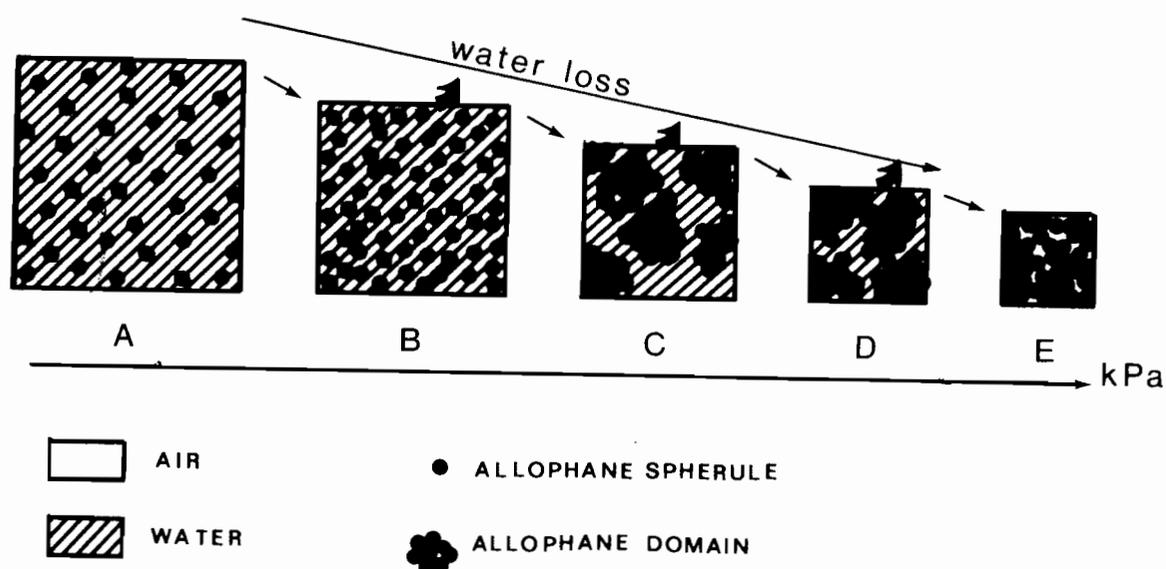


Fig. 2 - Réorganisation des glomérules d'allophane au cours de la dessiccation avec formation de domaines ou pseudosables (d'après GRANDJEAN, 1983)

II. CONSEQUENCES AU NIVEAU DES PROPRIETES

L'explication de la plupart des propriétés spécifiques des andosols est à rechercher, soit au niveau de la nature des constituants, c'est en particulier le cas pour les propriétés chimiques, soit de leur organisation en agrégats de différentes tailles, c'est le cas pour les propriétés physiques et mécaniques.

A. Propriétés chimiques

Les propriétés chimiques d'un sol sont en relation directe

avec la surface des constituants et les charges disponibles. Nous avons vu que tous les constituants cristallisés à courte distance ou paracrystallins qui sont vraiment spécifiques des andosols sont de très petite taille : de 2 à 10 nm. La détermination de la **surface spécifique** de constituants de si petite taille pose des problèmes énormes. Un simple calcul en tenant compte de la porosité interne des tubes ou sphères donne des chiffres de 1400 m²/g pour l'imogolite ou de 2000 m²/g pour l'allophane. Toutes les déterminations donnent des chiffres très inférieurs dans la mesure où l'accessibilité des surfaces est difficile pour les molécules d'azote (mesures de surfaces dites parfois externes) ou de polyalcools (surfaces internes des phyllosilicates). Ce dernier réactif donne cependant des valeurs qui peuvent atteindre 1000 m²/g, donc supérieures aux surfaces totales développées par les montmorillonites (800 m²/g).

En ce qui concerne les charges, il est classique de distinguer les charges permanentes (dues à des substitutions isomorphiques dans le réseau) et les charges dites variables avec le pH dues à des dissociations de groupements Al-OH ou Fe-OH en position externe par rapport aux particules. Un certain nombre de charges permanentes, négatives, conférant aux sols une capacité d'échange cationique, peuvent exister en relation soit avec les substitutions tétraédriques d'aluminium dans les allophanes, soit avec la dissociation des groupements Si-OH soit enfin avec la présence de matière organique (fig.3). Mais la majorité des charges sont dues à la dissociation des OH en fonction du pH selon la réaction :

$$\text{MOH}_2^+ \xrightleftharpoons[\text{H}^+]{\text{OH}^-} \text{M OH} \xrightleftharpoons{\text{OH}^-} \text{MO}^- + \text{H}_2\text{O}$$

milieu acide point de charge nulle milieu alcalin
(ZPC)

Les valeurs de ZPC pour lesquelles les constituants changent de signe sont généralement supérieures à 7 ; elles peuvent cependant être abaissées vers des valeurs de pH de 6 ou 5 par la fixation spécifique de certains anions par des liaisons de coordinence (silice - phosphates, matière organique). D'une manière générale aux valeurs de pH, les plus communes pour les andosols (4,5 à 6) les constituants de type gels ou allophanes seront généralement chargés positivement et fixeront de manière énergique les anions de manière non sélective pour Cl⁻, NO₃⁻ ou sélective pour

PO_4^{3-} SiO_3^{2-} ou FeOO^- . La présence de charges variables se rencontre également pour des constituants comme les oxydes hydroxydes et les kaolinites et elle est égale à 4 à 10 OH par nm^2 .

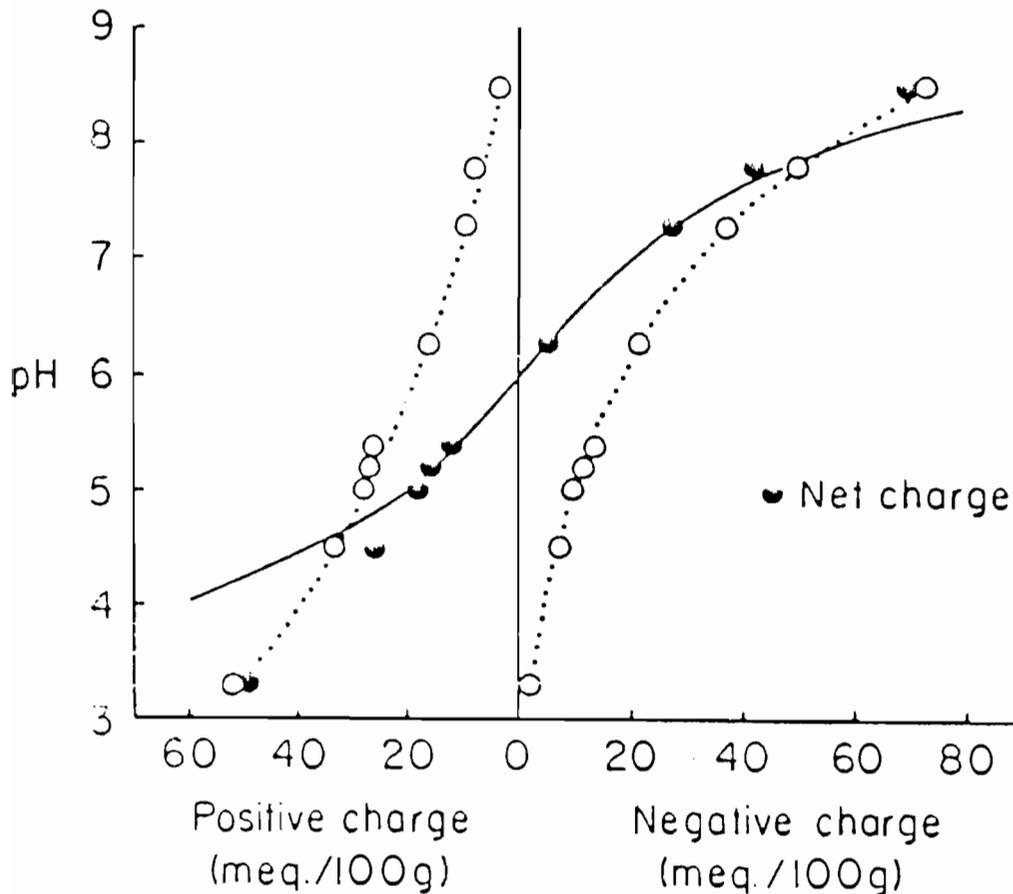


Fig. 3 - Variations des charges négatives et positives d'un allophane (la ligne continue représente la charge nette calculée en utilisant les équations de NERNST et GOUY-CHAPMAN)

Dans le cas des andosols, ces charges prennent une importance exceptionnelle du fait des surfaces importantes mises en jeu et elles expliquent d'une part la formation d'associations organominérales très fortes souvent indissociables qui peuvent constituer un "puits" pour parfois 20 % de matière organique, d'autre part, la fixation très énergique des phosphates (fig.4).

Il faut cependant noter qu'il est important de détecter la présence de minéraux 1/1 (halloysite) et surtout de minéraux 2/1 (montmorillonite) en impuretés, car elle peut conférer aux sols des propriétés de fixation sélective pour K (ou NH_4) DELVAUX et

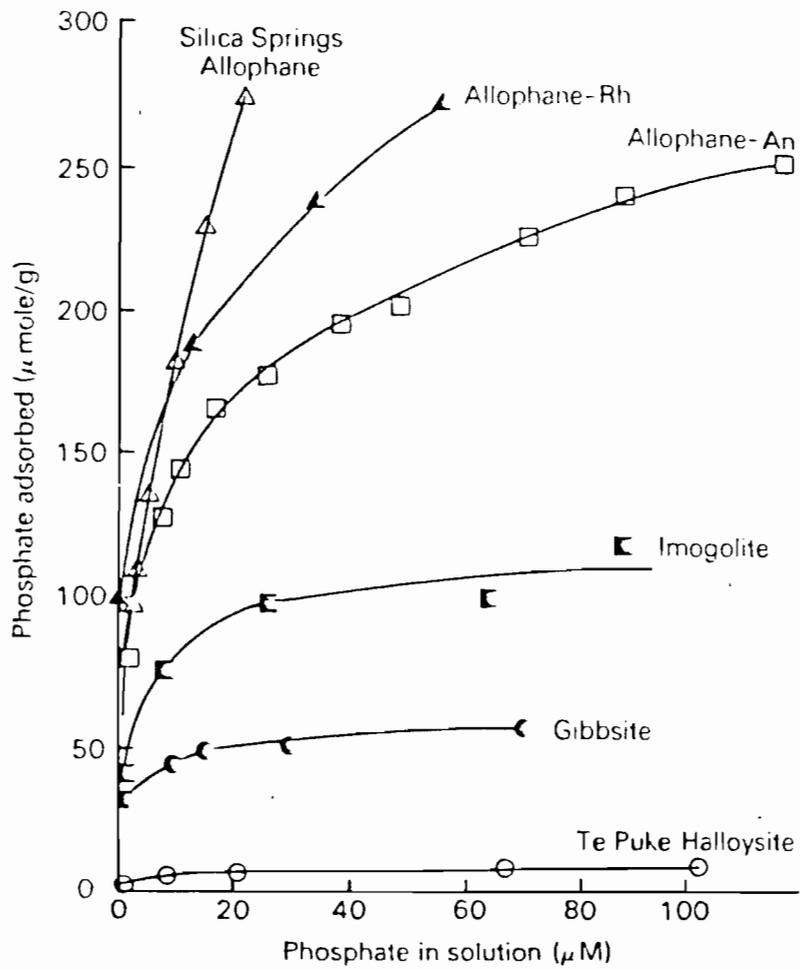


Fig. 4 - Courbes d'adsorption de phosphate réalisées en milieu 0,01 M CaCl_2 (16 heures) pour différents constituants présents dans les andosols (d'après CHURCHMAN and PARFITT)

al. Il est donc essentiel pour les andosols plus encore que pour les autres sols de bien connaître la nature et la quantité des constituants minéraux et organiques présents pour pouvoir adapter et raisonner la fertilisation (N, P, K), le rôle des amendements (chaulage) ou de la matière organique.

Un apport de silicate de chaux, expérimenté aux Iles Hawaiï par exemple (FOX) a une influence sur la capacité d'échange cationique et anionique (compétition du silicium pour les sites) en même temps que sur une remontée du pH.

B. Propriétés physiques et mécaniques

Les andosols ont des propriétés très spécifiques qui sont d'ailleurs prises en compte au niveau de la classification : faible densité apparente (< 1 et pouvant atteindre des valeurs de 0,3), forte rétention en eau en particulier aux faibles contraintes (150 à 300 % d'eau à pF1) avec une forte variation de cette rétention en eau après une dessiccation (phénomène d'hystérésis très important conduisant à une déshydratation dite irréversible). Cette forte rétention en eau s'explique par la structure et la taille des composés allophanes imogolites ou gels et surtout par leur organisation à différentes échelles.

Chaque type d'agrégats délimite par entassement un type de porosité de taille déterminée qui retient l'eau à une contrainte déterminée (loi de Laplace).

Ainsi, tous les dépôts d'eau qui sont représentés sur la courbe teneur en eau/contrainte (fig.5) sont directement reliés aux différents niveaux d'organisation (TESSIER, 1984 ; ROSELLO, 1984). On peut également préciser si les pores sont occupés par l'eau et par l'air.

Tous ces éléments sont essentiels pour une bonne prévision des propriétés de rétention en eau et de développement des cultures. A partir de ces courbes, à condition qu'elles soient répétées et confirmées par de nombreuses déterminations, on peut en déduire des besoins en eau pour l'irrigation.

Elle se révèlent également très utiles pour la prévision des propriétés mécaniques et en particulier la sensibilité au compactage. Ainsi, ROSELLO (1984) a pu montrer (fig.6), que le compactage affectait essentiellement la porosité supérieure à 10μ

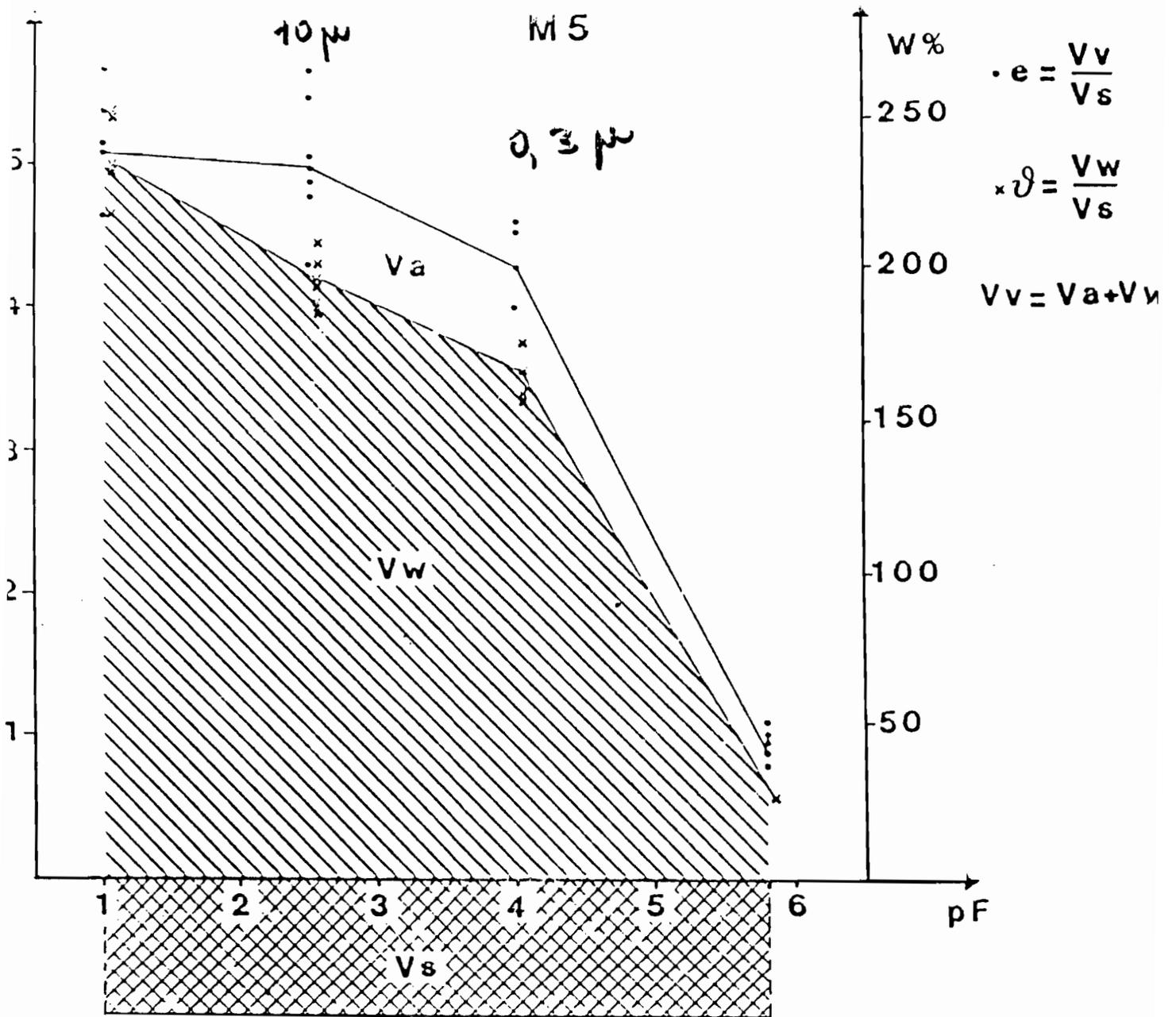


Fig. 5 - Evolution de l'indice des vides e et de l'indice d'eau v d'un andosol au cours de la dessiccation (ROSELLO, 1984)

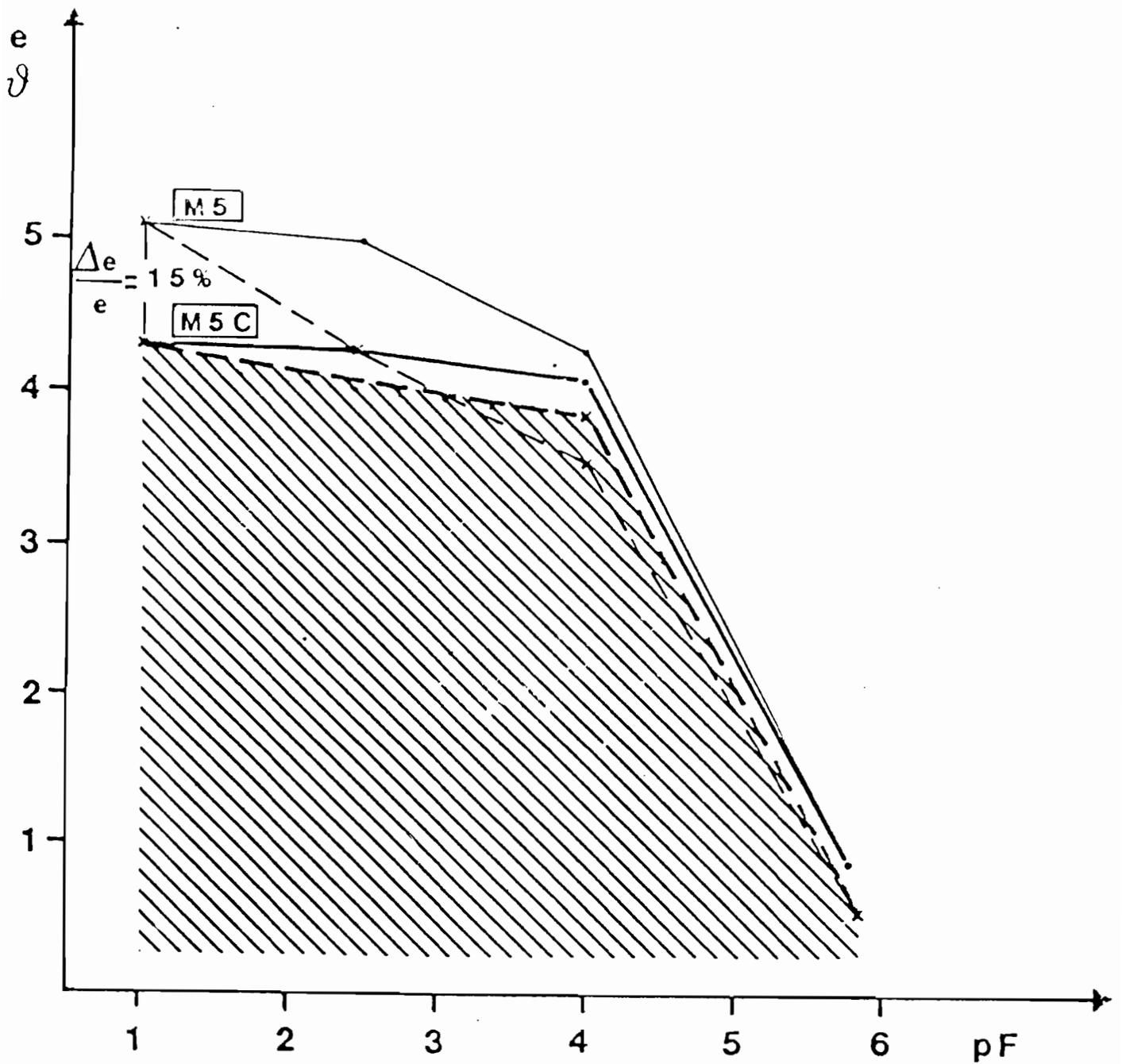


Fig. 6 - Comparaison des évolutions de l'indice des vides et de l'indice d'eau pour un andosol et un andosol compacté

(accessible à l'air ou en partie responsable de la perméabilité).

Comme nous l'avons dit précédemment, la dessiccation est le facteur qui perturbe le plus les organisations et donc les propriétés physiques. Après une forte dessiccation qui peut intervenir en surface lors des pratiques culturales, le sol acquiert une texture et un comportement de pseudosable hydrophobe et les propriétés de rétention en eau sont fortement abaissées.

Pour l'effet des contraintes mécaniques (compactage) comme pour celui des contraintes hydriques (dessiccation) il est possible de définir des seuils à ne pas dépasser ce qui constitue des éléments importants de prévision au niveau des pratiques culturales.

Nous ne ferons que citer les propriétés de ces sols vis-à-vis de la circulation de l'eau qui sont évoquées ailleurs. Les sols ont généralement d'assez fortes conductivités hydrauliques en saturé (parfois 10^{-2} à 10^{-3} cm sec⁻¹ selon MAEDA et al., 1977), ce qui si on se réfère à la taille des constituants et de certains niveaux de structure peut paraître étonnant. En réalité, cette circulation de l'eau se fera par les plus grands pores (d'origine biologique) et sa prévision implique plus qu'ailleurs des mesures et l'utilisation des statistiques.

Là encore, des modifications importantes interviendront sous l'effet des contraintes hydriques et mécaniques.

CONCLUSION

Les andosols apparaissent donc comme des sols vraiment particuliers qui nécessitent des études spécifiques à tous les niveaux. Déjà de nouvelles méthodologies sont à mettre en oeuvre pour la caractérisation des constituants et des microstructures qui permet de prévoir une grande partie des propriétés physique et chimique des sols.

Il est tout d'abord essentiel de fixer l'état hydrique des échantillons puisque toute modification de cet état s'accompagne de modifications importantes. Il est également essentiel de pouvoir faire varier de manière contrôlée les contraintes hydriques et mécaniques.

Sur ces échantillons placés dans des conditions bien connues, il est alors possible d'étudier les différents niveaux d'organisation et de porosité. La microscopie électronique à transmission (haute résolution) doit permettre de faire encore progresser les connaissances sur ces constituants particuliers de petite taille (< 1 nm). La localisation de la matière organique inconnue jusqu'à présent doit pouvoir être précisée. Il en est de même pour la localisation du phosphore et des types de liaisons impliquées. La méthodologie concernant les propriétés chimiques est également à revoir et adapter complètement : détermination des surfaces, des charges et des capacités d'échange cationique ou anionique.

L'étude de ces sols implique donc des recherches spécifiques qui doivent cependant avoir pour objectifs essentiels les problèmes concrets posés par la mise en valeur des andosols, c'est-à-dire :

- **sur le plan chimique**, la disponibilité du phosphore et des cations, le devenir de la matière organique et de l'azote, l'effet du chaulage et de l'apport éventuel de silicate de chaux sur les propriétés des sols ;

- **sur le plan physique**, l'effet des différentes pratiques sur les organisations et les propriétés hydriques ou la sensibilité à l'érosion. A ce niveau, la modification des allophanes par dessiccation avec formation de pseudosables est un des facteurs essentiels à prendre en compte.

REFERENCES

- DELVAUX B., HERBILLON A., DUFÉY J., BURTIN G. et VIELVOYE L. (1988) - Adsorption sélective du potassium par certaines halloysites (10 Å). Evidences et signification soumis à pédologie
- EGGLETON R.A. (1987) - Non crystalline Fe-Si-Al oxyhydroxides Clays and clay Min., 35, 29-37
- FOX R.L. (1980) - Soils with variable charge : Agronomic and fertility aspects. Chapter in Soils with variable charge ed BKG Theng, New Zealand Soc. of Soil Science, 448 p.
- GRANDJEAN E. (1983) - Relations entre la minéralogie des fractions fines et le comportement hydrique des sols. Toposéquence développée sur cendres andésitiques, Basse-Terre, Guadeloupe, D.E.A. Pédologie, INAP-G, 72 p.

MAEDA T., TAKENAKA H., WARKENTIN B.P. (1977) - Physical properties of allophane soils. Adv. Agron., 29, 229-264

ROSELLO V. (1984) - Les sols bruns des Hauts (Ile de la Réunion). Thèse Univ. Paris VII, 200 p.

TESSIER D. (1984) - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Doc., Univ. de Paris VII

WADA K. (1977) - Allophane and imogolite. in Minerals in soils environments. Dixon T.B., WEED S.B. ed. Soil Sci. Soc. America. Mad. Wisc. USA, 948 p.

WADA K. (1982) - Amorphous clay minerals - chemical composition, crystalline state, synthesis and surface properties, Int. clay conf. 1981, 385-398

SYSTEMES DE CULTURES
DANS LES SOLS ANDIQUES
DE LA REUNION

Roger MICHELLON

SYSTEMES DE CULTURE DANS LES SOLS ANDIQUES

R. MICHELLON

Les Hauts de l'Ouest, situés ^{sur andosols,} au-dessus de 600 m d'altitude dans la région sous le vent, s'étendent sur 20.000 ha dont le quart est géré par l'Office National des Forêt.

Le géranium rosat a permis de mettre en valeur ces terrains accidentés, inexploités au début de ce siècle et s'est facilement intégré à l'économie de plantation.

I. SYSTEME TRADITIONNEL

Les exploitations de la zone s'étendent sur de petites superficies, puisque près de 90 % d'entre elles ont moins de 3 ha de S.A.U. et sont spécialisées dans la culture du géranium : ainsi, plus de la moitié sont en monoproduction (BRIDIER, 1985).

Cette plante est cultivée traditionnellement de manière itinérante après une jachère arborée composée d'*Acacia decurrens*, ou en rotation avec la canne à sucre à la limite inférieure de la zone.

Le caractère itinérant de la culture et le fait que les planteurs ne soient pas propriétaires du terrain (les trois quarts sont en colonat partiaire) expliquent leur méconnaissance des modes de préservation du capital foncier, voire leur indifférence à cet égard.

Cependant, la conduite de la fertilisation au cours du cycle du géranium prend en compte la baisse progressive de la fertilité du sol : la fertilisation nulle l'année de la défriche croît avec l'âge de la plantation.

L'itinéraire technique traditionnel se caractérise par des transferts réduits entre le système d'exploitation et l'extérieur, limités aux apports d'engrais et à quelques dizaines de litres d'huile essentielle, ce qui a facilité la mise en valeur de ces zones autrefois enclavées (Tableau 1).

Mais le champ de géranium n'est pas conduit de façon homogène en raison de la présence de cultures associées destinées à l'autoconsommation. Plusieurs sous-systèmes de culture ayant leurs propres itinéraires techniques peuvent être distingués en fonction de l'emplacement dans la parcelle (proximité de l'alambic, zone de trop forte pente,...) (Tableau 2). Ils contribuent à réduire les transferts avec l'extérieur, et permettent d'augmenter la productivité de la terre et de la main-d'oeuvre.

Tableau 1 : Itinéraire technique employé pour une culture traditionnelle de géranium rosat

Opérations culturales	Techniques adoptées	Outils																																														
Préparation du terrain	Défrichage manuel. Ecobuage des débris végétaux. Annelage des arbres débités au fur et à mesure des besoins en bois pour la distillation ou du ménage.	Sabre à canne "Gratte"																																														
Plantation	Les boutures boutées, de 20 à 40 cm de hauteur, sont plantées "au trou", en tous sens pendant la saison fraîche, à 40 000-45 000 plants par ha. Elles sont prélevées dans des champs en voie d'abandon. Des manquants sont remplacés chaque année.	Couteau "Pique", pour les trous																																														
Desherbage	Sarclages après chaque récolte. Les parcelles sont laissées enherbées pendant la saison cyclonique, où la vitesse de développement des adventices est supérieure à la capacité de sarclage des agriculteurs (pratique dite de "l'enherbement cyclonique").	Gratte																																														
Protection phytosanitaire	Inexistante																																															
Fertilisation	<p>Fumure minérale d'entretien, localisée au pied de chaque plant, en un apport par an, en fin de saison des pluies, d'un engrais ternaire 10-20-20.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Année</th> <th>Année P = année de plantation</th> <th>P + 1</th> <th>P + 2</th> <th>P + 3</th> <th>P + 4</th> <th>P + 5</th> <th>P + 6</th> <th>P + 7</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fumure</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Apports par plant, en g de 10-20-20</td> <td>0</td> <td>3</td> <td>5</td> <td>7</td> <td>9-10</td> <td>9-10</td> <td>9-10</td> <td>9-10</td> </tr> <tr> <td>Apports par ha en kg de 10-20-20</td> <td>0</td> <td>100-150</td> <td>150-200</td> <td>250-300</td> <td>300-400</td> <td colspan="3">150 à 350 en fonction de la densité</td> </tr> </tbody> </table> <p>Amendement organique éventuel : compost de géranium localisé au trou de plantation lors du remplacement des manquants (environ 100 à 150 g par plant, soit de l'ordre de 1 t par ha et par an)</p> <p>Remarques : L'estimation des exportations pour 20 t de Matière Verte; soit 40 kg d'huile essentielle, donne, en unités fertilisantes</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>N</th> <th>P205</th> <th>K20</th> <th>Ca0</th> <th>Mg0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>70 à 80</td> <td>15 à 25</td> <td>100 à 130</td> <td>100 à 150</td> <td>15-25</td> </tr> </tbody> </table>	Année	Année P = année de plantation	P + 1	P + 2	P + 3	P + 4	P + 5	P + 6	P + 7	Fumure									Apports par plant, en g de 10-20-20	0	3	5	7	9-10	9-10	9-10	9-10	Apports par ha en kg de 10-20-20	0	100-150	150-200	250-300	300-400	150 à 350 en fonction de la densité			N	P205	K20	Ca0	Mg0	70 à 80	15 à 25	100 à 130	100 à 150	15-25	<p>Pique ou gratte et épandage manuel</p> <p>"Pique ou gratte" Épandage manuel</p>
Année	Année P = année de plantation	P + 1	P + 2	P + 3	P + 4	P + 5	P + 6	P + 7																																								
Fumure																																																
Apports par plant, en g de 10-20-20	0	3	5	7	9-10	9-10	9-10	9-10																																								
Apports par ha en kg de 10-20-20	0	100-150	150-200	250-300	300-400	150 à 350 en fonction de la densité																																										
N	P205	K20	Ca0	Mg0																																												
70 à 80	15 à 25	100 à 130	100 à 150	15-25																																												
Récoltes	<p>Coupe de la partie aérienne (l'huile essentielle étant située principalement dans les bourgeons et les feuilles). Les jeunes pousses sont laissées comme tige-sève.</p> <p>Hydrodistillation du géranium.</p> <p>Rendements : 1 à 4 % de la Matière Verte (250 g à 1 kg d'huile essentielle par distillation) soit 20 et 40 kg d'huile essentielle par ha et par an.</p>	<p>Secateur</p> <p>Alambic 3 à 4 m³ de capacité installé sur chaque champ, appartenant au propriétaire du terrain</p>																																														
Sous-produits	<p>Valorisation des sous-produits : le fumier de géranium résulte d'un compostage naturel des résidus de distillation mis en tas à l'air libre près de l'alambic. Ce compost est restitué au champ, soit lors du remplacement des manquants, soit lors de la plantation des cultures associées. Une part importante mais non quantifiée de cet amendement organique est exportée vers le jardin familial. 10 t de ce compost bien décomposé permettent les restitutions suivantes, exprimées en unités fertilisantes.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>N</th> <th>P205</th> <th>K20</th> <th>Ca0</th> <th>Mg0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>70-80</td> <td>20</td> <td>50</td> <td>150</td> <td>20</td> </tr> </tbody> </table>	N	P205	K20	Ca0	Mg0	70-80	20	50	150	20																																					
N	P205	K20	Ca0	Mg0																																												
70-80	20	50	150	20																																												

Tableau 2 : Les différents sous-systèmes traditionnels de cultures associées au géranium

	Cultures associées "ponctuelles"	Cultures associées "couvrantes"	Cultures associées concentrées autour de l'alambic	Cultures "intercalaires"
Definitions et localisation	Productions disséminées par touffes ou individus dans l'ensemble du champ de géranium sur les résidus de sarclage et de défriche mis en tas	Spéculations réservées à la périphérie du champ, aux zones très érodées, ou d'accès difficiles (ruptures de pentes, bords de ravins, ...)	Cultures localisées dans un rayon de 10 à 20 m autour du tas de compost de géranium, où le géranium devient une production très secondaire	Productions organisées sur 300 à 5000 m ² , parfois disséminées sur la totalité du champ, selon des critères d'espacement qui tiennent compte de la culture de géranium
Caractéristiques	Utiliser la matière organique issue de la décomposition des adventices, ou les éléments minéraux (P, K, Ca) libérés lors de l'écobuage	Mettre en valeur les zones pauvres où le géranium disparaît rapidement, et délimiter les parcelles	Optimiser l'emploi du compost de géranium en cultivant des espèces à haute valeur marchande et exigeantes en éléments fertilisants	Mettre en culture l'espace disponible entre les plants de géranium
Espèces cultivées	- Choux pérennes, oignons (écobuage) - Pomme de terre, fleur, patates douces (résidus d'adventices)	- Chayottes (<i>Sechium edule</i>) - Songes (<i>Colocasia antiquorum</i>) - Bananiers, vetyver (<i>Vetiveria zizanioides</i>)	- Cultures légumières très variées (tomate, ail, oignon, artichauts, piments, aubergines, ...)	- Haricot de Mars à Septembre, éventuellement tomate ou pomme de terre - Maïs de Décembre à Juin
Destinations	- Autoconsommation	Autoconsommation et crames (vetyver)	Autoconsommation. Troc, ou vente des surplus	Autoconsommation
Itinéraires techniques adoptés pour les productions associées au géranium	- Plantation au trou, quand la main d'oeuvre est disponible - Aucune fumure de complément (Buttage pour la pomme de terre) - Récolte échelonnée en fonction des besoins d'autoconsommation	- Plantation au trou, quand la main d'oeuvre est disponible - Parfois compost de géranium à la plantation - Récolte échelonnée en fonction des besoins	- Sarclage, parfois préparation de "planches" - Plantation au trou, parfois pépinières - Fumure organique localisée à la plantation + compléments minéraux - 2 à 3 sarclages en plus de ceux nécessaires au géranium - Récolte échelonnée en fonction des besoins d'autoconsommation	- Sarclage du géranium - Plantation échelonnée au trou en poquets - La densité est une fonction inversée de celle du géranium, pour le haricot, les tomates et les pommes de terre (5000 à 30000 poquets/ha), pour le maïs, c'est une constante (2000 plants/ha) - Compost de géranium localisé à la plantation (50 à 150 g par poquet soit 0,5 à 1,5 t par ha) - Fertilisation minérale éventuelle (50 à 150 kg) de 10-20-20 par ha - 1 sarclage buttané un mois après la levée en plus de ceux intervenant pour le géranium - Récolte échelonnée en fonction des besoins
Successions culturales	Sur un même point : 1 à 2 cycles culturels avant une plantation de géranium	Cultures pérennes présentes tout le long du cycle du géranium	Assolement défini en fonction des besoins d'autoconsommation	Très variables et difficiles à cerner

Malgré la restitution des résidus de distillation, la fertilité du sol se dégrade en raison du décapage de l'horizon humifère à structure grumeleuse.

Les matériaux sous-jacents à structure continue, présentent des caractéristiques médiocres et sont peu exploités par les racines en particulier pour les cultures à cycle court.

La baisse de la fertilité, l'accroissement des temps de sarclage lié à la prolifération des adventices, et la multiplication des dépérissements du géranium sont les facteurs essentiels qui contribuent à l'abandon des parcelles.

Mais le système traditionnel de culture itinérante sur défriche d'*Acacia decurrens* tend à se marginaliser et on assiste à une sédentarisation progressive des surfaces cultivées. Ainsi, près des trois quarts des planteurs produisent du géranium en permanence sur la même parcelle (BRIDIÉ, 1985). Les rendements régressent alors et se situent entre 5 et 20 Kg d'huile essentielle par ha.

II. LES OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Les objectifs de l'étude initiée en 1983 sur un financement du Ministère de la Recherche et de la Technologie, puis depuis 1986 par un Contrat de Plan avec la REGION REUNION, sont :

- la maîtrise de systèmes de production associant le géranium à des cultures nouvelles ;

- l'augmentation de la productivité afin d'aboutir à des exploitations viables économiquement ou assurant un complément de revenu non négligeable aux pluriactifs ;

- la sédentarisation de l'agriculture et la préservation, voire la restauration, du milieu physique afin de maintenir la fertilité à long terme.

III. LE DISPOSITIF DE RECHERCHE SUR LES SYSTEMES DE CULTURE

3.1. Choix d'un milieu d'étude représentatif

La production du géranium étant familière des cycles rapides d'expansion-récession, une station d'expérimentation pour la diversification des cultures, utilisée aussi ensuite pour des études thématiques sur le géranium, a été créée dès 1963.

Itinéraires	Traditionnel amélioré	Intermédiaire	Intensif conduit :	
			en culture pure	en culture associée
Définitions	Agriculture traditionnelle améliorée avec respect des calendriers culturaux et comportant une rotation.	Niveau intermédiaire entre ces extrêmes sur le plan de l'intensification et ayant recours à une entreprise extérieure pour l'implantation des cultures en Mars-Avril (blocage au niveau de la main d'oeuvre)	Agriculture intensive faisant intervenir : - l'ensemble des recommandations actuellement éprouvées concernant les variétés, la fumure, l'agrotechnie ; - et une petite mécanisation adapté permettant un travail minimum du sol	
Assolements	Rotations du géranium (3 à 4 ans) et de cultures de diversification (haricot, maïs, tabac, pomme de terre pendant 1 à 2 ans)		ou monoculture de géranium intensif	
Précédents culturaux	Géranium rosat en monoculture traditionnelle sédentarisée : système dégradé ayant abouti à un abandon de l'exploitation par son propriétaire.			
Maîtrise de l'enherbement	Extirpation manuelle avant chaque cycle de culture	Labour annuel en Mars.	Traitement au glyphosate en première année.	
Amendements et Fumures	Fumures organiques et minérales localisées lors de l'implantation des cultures de diversification		Amendements minéraux pour correction des carences Fumure minérale seulement (les apports organiques sont remplacés par le mulch en décomposition)	Fumure minérale seule pour le géranium. Fumures organiques et minérales localisées pour les cultures intercalaires

TABLEAU 3 : Définition et principales caractéristiques des itinéraires techniques compatibles avec les systèmes d'exploitation rencontrés et étudiés en milieu contrôlé

Sur cette station, l'élévation de la fertilité du sol et son entretien ont été réalisés grâce à un aménagement antiérosif très efficace, la mise en oeuvre de rotations incluant des graminées fourragères et le recours à des fumures régulières.

Les effets cumulatifs de ces pratiques ont créé progressivement un milieu différent. Les sols sont moins acides, plus riches en potassium que ceux du reste de la zone, mais surtout l'horizon de surface à structure grumeleuse est nettement plus épais. Des banquettes se forment et malgré l'érosion qui persiste et la moindre fertilité en amont des terrasses, les rendements du géranium atteignent 80 Kg d'huile essentielle par ha et par an. Ils sont proches de ceux obtenus par les agriculteurs à la limite inférieure de la zone, en rotation avec la canne à sucre.

Mais la diffusion des modèles avec bandes alternées de plantes sarclées et de cultures fourragères, qui ne prennent pas en compte les structures foncières, ni les contraintes de temps de travaux, d'approvisionnement, ... a été nulle.

Afin de conduire des recherches dans des conditions plus représentatives, un terrain abandonné par son propriétaire après culture continue du géranium rosat, a été loué en 1984.

Les problèmes agronomiques rencontrés, en particulier d'épuisement de la fertilité des sols, d'enherbement et de dépérissement du géranium sont équivalents à ceux de la majorité des parcelles de la zone.

3.2. Etude de systèmes de culture en grandeur réelle

La mise au point de systèmes de culture susceptibles de se pérenniser comporte une évaluation de différents modèles définis à partir des études thématiques antérieures et prenant en compte les contraintes et la diversité des projets et moyens de production des agriculteurs (Tableau 3).

Les problèmes sont étudiés sur des parcelles de taille voisine à celle dont ils disposent et où sont comparées :

- une monoculture intensive du géranium ;
- des rotations du géranium avec des cultures pures de haricot, tabac, pomme de terre et maïs, plantes qui se rencontrent le plus généralement chez les agriculteurs ;
- une diversification par des cultures intercalaires au sein d'un géranium intensif.

Les rotations sont étudiées avec différents niveaux de productivité du facteur travail (culture manuelle traditionnelle, intensive avec petite mécanisation ou recours à des prestations de service pour le labour par exemple).

Les problèmes spécifiques à chaque type de système sont étudiés dans des essais thématiques ou tests réalisés chez des agriculteurs en formation. Ils sont généralement multilocaux afin de prendre en compte l'hétérogénéité du milieu dans la zone.

IV. RESULTATS

L'influence de la fumure minérale, principalement des éléments majeurs : azote, phosphore, potassium a été mise en évidence dans de nombreux essais thématiques et tests. Les recommandations sur la fumure portaient donc essentiellement sur des apports minéraux, la réponse aux apports organiques étant faible en station (Tableau 4).

Mais après abandon du géranium, les sols sont très hétérogènes et leur horizon superficiel structuré est généralement décapé.

L'enracinement de la plante semble optimal lorsque l'horizon structuré est important, il apparaît très étroitement lié à l'itinéraire technique lorsque cet horizon est érodé (Tableau 5). Les rendements restent alors très faibles quelle que soit la culture sauf si l'itinéraire technique est proche du traditionnel : implantation après travail minimum du sol et apport de matière organique où se concentrent les racines.

Ces apports localisés au semis indispensables en zone érodée chez le haricot permettent aussi d'accroître très sensiblement le rendement de la pomme de terre (Graphique 1).

Cette pratique permet à l'agriculteur de régulariser les productions malgré les incertitudes climatiques et la variabilité de la fertilité des sols.

Le géranium rosat permet un approvisionnement aisé et peu onéreux en matière organique grâce aux résidus de sa distillation.

Employée en faibles quantités, elle présente une arrière action limitée sur le rendement de la culture suivante. Mais à moyen terme, ses effets cumulés sont très importants.

Ainsi, les cultures vivrières conservent un statut privilégié auprès des agriculteurs et bénéficient presque toujours exclusivement de ces apports. Mais dans les systèmes de culture avec intercalaire, ces apports destinés aux plantes vivrières augmentent sensiblement la production du géranium associé (Graphique 2).

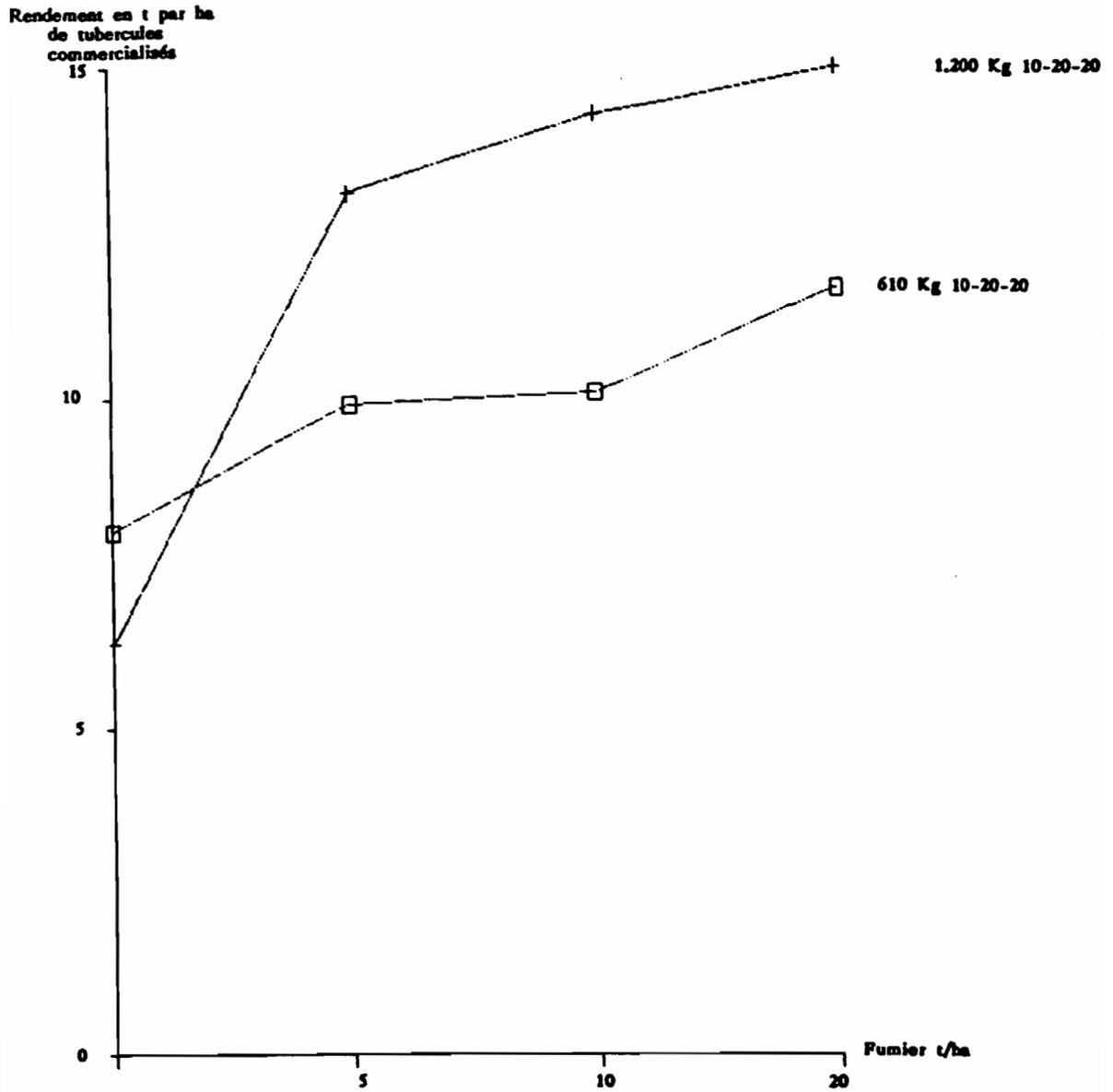
Traitement	Production de grains secs à 17 % d'humidité en q/ha
. Fumure complète (*)	9,6
. Fumure complète moins la chaux	7,8
. Fumure complète moins les scories et le bore	9,5
. Fumure complète moins l'inoculation	9,2
. Fumure complète moins le compost de géranium	9,1
. Fertilisation vulgarisée (engrais ternaire seul + inoculation)	7,3

TABLEAU 4 : Résultats de tests de fumure du haricot Marlat réalisés sur la Station des Colimaçons et chez trois agriculteurs en Avril 1982. Les pH eau des parcelles varient de 5,2 à 5,7

(*) Fumure complète : fertilisation vulgarisée (60 N, 120 P 0 et 120 K 0 par ha sous forme de 10-20-20 + chaux (2 t par ha de CaO sous forme de corail broyé) + scories Thomas (1 t par ha) + bore (5 Kg par ha de borate de sodium) + résidus de la distillation du géranium rosat (20 t par ha) + inoculation des semences (souche ha-waïenne HFE).

Mode d'implantation	Fumure localisée pour le haricot	Emplacement	Poids de grain par plante (en g)	Densité en milliers de plantes/ha	Rendement en q/ha
Labour puis semis après sillonnage	40-80-80 + 5 t par ha de compost de géranium	Erodé	2,9	98	2,8
		Peu érodé	9,4	99	9,3
Semis direct mécanisé	60-120-120	Erodé	2,8	93	2,6
		Peu érodé	8,6	144	12,4
Semis après sillonnage direct en intercalaire de géranium	25-50-50 + 3 t par ha de compost de géranium	Erodé	11,0	44	4,8
		Peu érodé	13,8	46	6,3

TABLEAU 5 : Interaction entre l'état structural du sol et l'itinéraire technique sur les composantes du rendement du haricot.

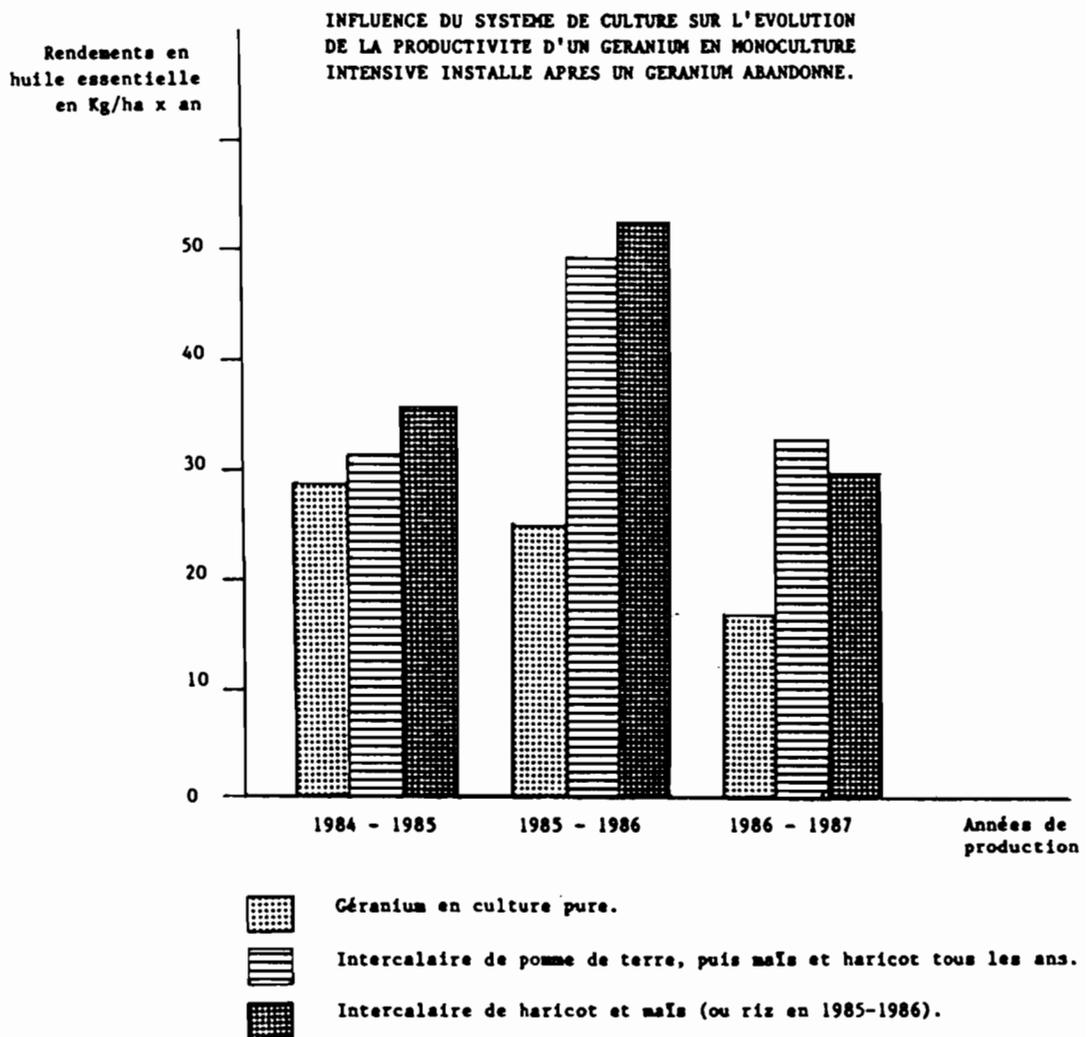


GRAPHIQUE 1 : influence de la fumure organique et minérale sur le rendement de pomme de terre sur sol érodé .

Les effets de l'engrais et du compost sont significatifs.

La réponse aux doses de compost est ajustable à une courbe du second degré (C.V. = 25 % ; ETM = 1,2 t/ha)

GRAPHIQUE 2



Le développement du système racinaire du géranium profond et fasciculé est nettement modifié en culture intercalaire : la densité des racines augmente alors très sensiblement dans l'interligne, où le compost est localisé.

Outre son effet sur la structure, ces restitutions de matière organique jouent un rôle certainement complexe lié à l'activité biologique du sol et l'alimentation hydrique et minérale de la plante. Ainsi, la mortalité du géranium, liée principalement aux dépérissements (*pseudomonas* et pourridiés) apparaît nettement diminuée en culture intercalaire.

4.2. Influence du travail du sol

Certains agriculteurs qui bénéficient des structures d'exploitation les plus favorables ont recours au labour en période de pointe de travail pour lutter contre les mauvaises herbes.

Bien versé, il ralentit la prolifération des adventices à multiplication végétative (*Phalaris arundinacea*, *Oxalis sp.*), mais la flore évolue et d'autres mauvaises herbes se développent (ainsi, *Raphanus raphanistrum* devient prédominant dès qu'un travail ultérieur est réalisé).

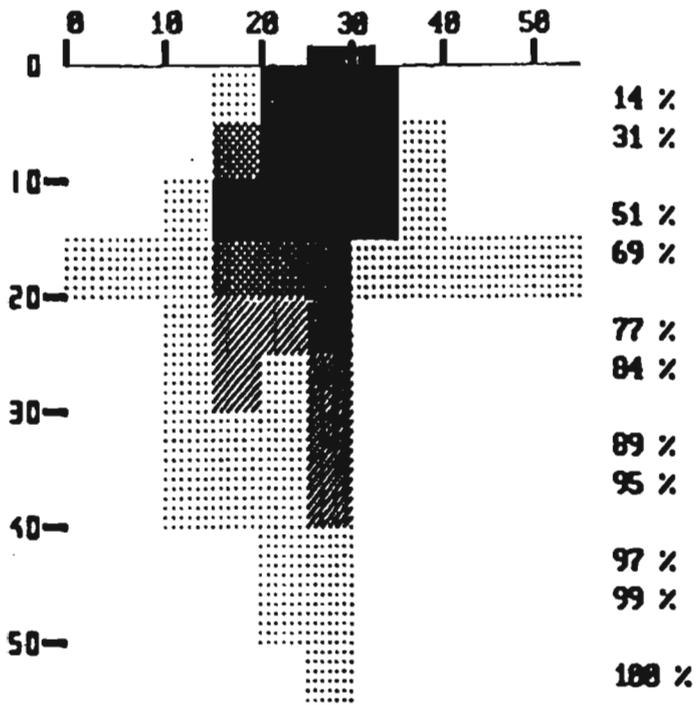
Son influence apparaît variable selon l'état structural du sol et les espèces cultivées.

Lorsque l'horizon structuré est important, il semble présenter un intérêt sur l'enracinement (Graphique 3) mais non sur le rendement des plantes (Tableau 6).

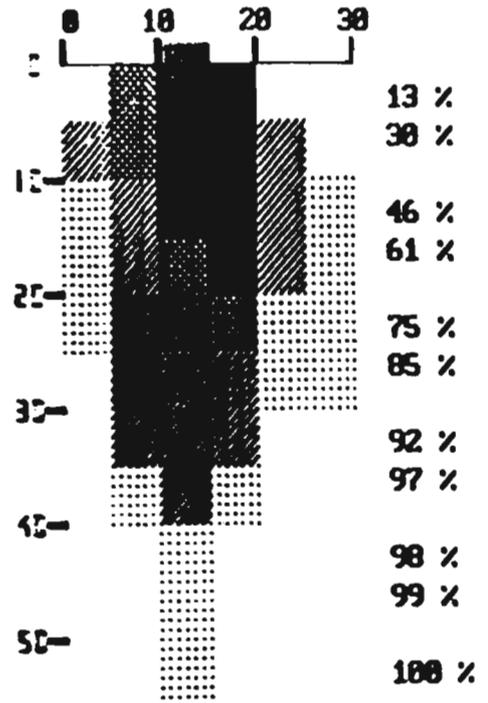
Par contre, dans les zones érodées, il conduit à la formation de mottes provenant de l'horizon B sous-jacent. Ces mottes sont mélangées à l'horizon pulvérulent de surface engendré par les sarclages manuels répétés. Les racines de certaines plantes à cycle court, telles que le haricot, restent alors localisées dans le sillon où est rapportée la matière organique, mais n'exploitent que très peu le reste du sol travaillé.

De même, le rendement de la pomme de terre apparaît particulièrement affectée probablement en raison de son enracinement réduit qui augmente sa sensibilité aux stress hydriques (Graphique 4).

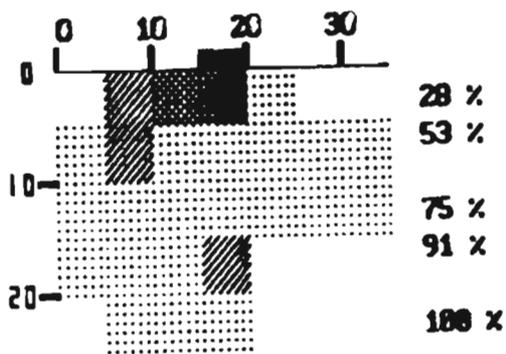
Par contre, le labour favorise le développement du système racinaire de certaines plantes à racines pivotantes (tabac, crucifères...) et améliore leur productivité.



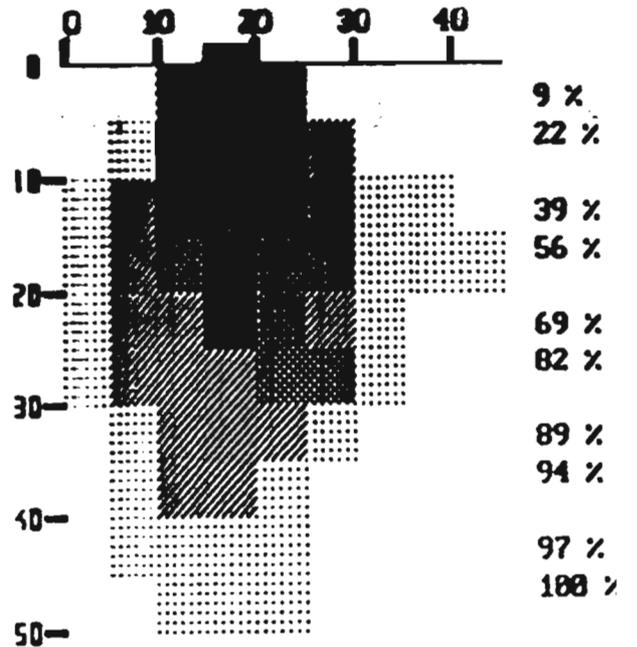
Labour en Mars et en Octobre



Labour en Mars
Sillonnage seulement en Octobre



Sillonnage en Mars et en Octobre



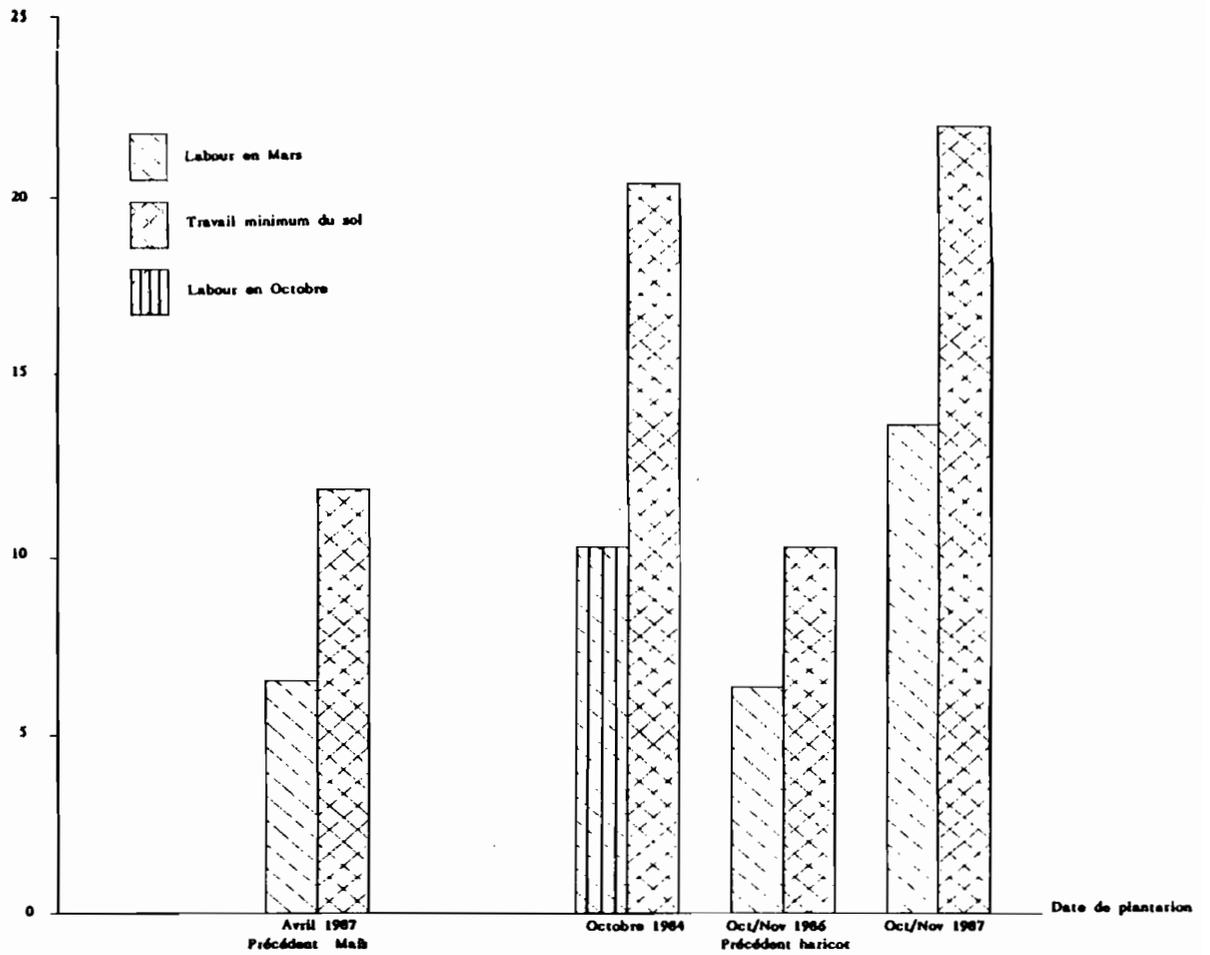
Sillonnage en Mars
Labour en Octobre

GRAPHIQUE 3 : Enracinement du Maïs (cycle 1986-1987) sur sol structuré (semis en Octobre après un précédent haricot). L'enracinement a été observé sur une plante le 19 Mars 1987.

RENDEMENTS PARCELLE XV - T/HA					
1er cycle	Labour	Labour	Rien	Rien	
2ème cycle	Labour	Rien	Rien	Labour	
85/2	2,14	2,16	2,19	1,81	MAIS
86/01	0,13	0,35	0,55	0,35	HARICOT
* 86/02	0,43	0,85	1,10	0,86	MAIS
87/01	1,65	1,66	1,72	1,68	HARICOT
87/02	3,00	4,16	5,24	5,30	MAIS

TABEAU 6 : Influence du travail du sol sur le rendement du haricot en premier cycle annuel (semis en Mars-Avril), ou du maïs en second cycle (semis en Octobre-Novembre) sur une parcelle à horizon A structuré.

Rendement en t de
tubercules par ha



GRAPHIQUE 4 : Influence du travail du sol sur la productivité de la pomme de terre variété Réay au cours de différents cycles (M. TECHIER en 1984 ou TROIS-BASSINS en 1986 et 1987)

Introduit dans les rotations avec des cultures vivrières recevant des apports réduits de matière organique, il permet en deux ans de tripler le rendement du géranium par rapport à la monoculture (Graphique 5).

Le labour accompagné de restitutions de résidus de récolte entraînerait une redistribution homogène des éléments chimiques en profondeur et une minération de la matière organique qui, avec un travail du sol seulement superficiel, se concentrent en surface (Graphiques 6 à 11).

Il s'accompagne d'une amélioration de la structure du sol et favorise un meilleur développement du système racinaire du géranium.

4.3. Conséquences sur l'érosion

Le labour apparaît comme un moyen de lutte contre les mauvaises herbes et de restauration de la fertilité. Mais cette technique peut conduire à des évolutions défavorables :

- soit réversibles telles que l'assèchement du sol s'il est pratiqué trop tard en fin de saison cyclonique, qui s'ajoute à une rupture des remontées capillaires des horizons sous-jacents ;

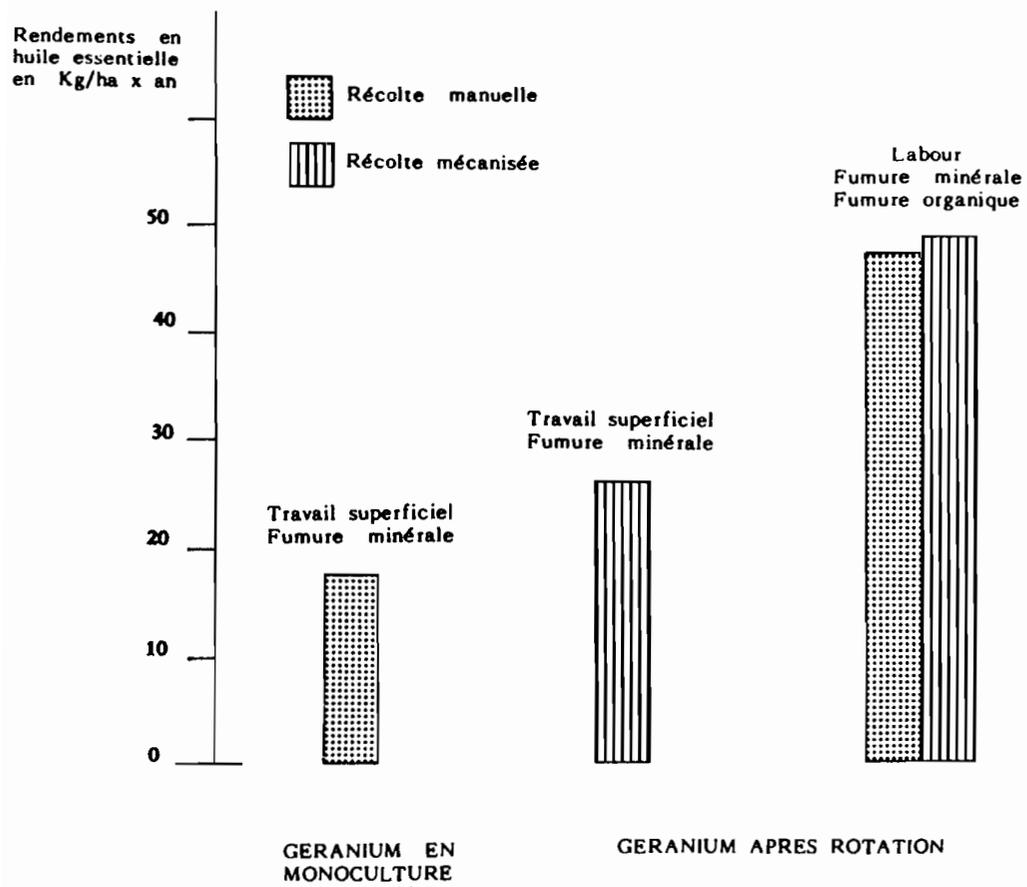
- soit irréversibles à long terme en raison de l'érosion lorsque la pente est forte, s'il est pratiqué trop tôt ou si le sol n'est pas couvert lors de la saison cyclonique suivante.

L'érosion semble par contre réduite avec un travail minimum du sol manuel ou mécanisé, lorsque la maîtrise des adventices est partielle ou qu'un mulch subsiste.

La mise au point de techniques de culture avec couverture permanente du sol permettrait alors de restaurer la fertilité plus lentement, mais d'une manière plus durable.

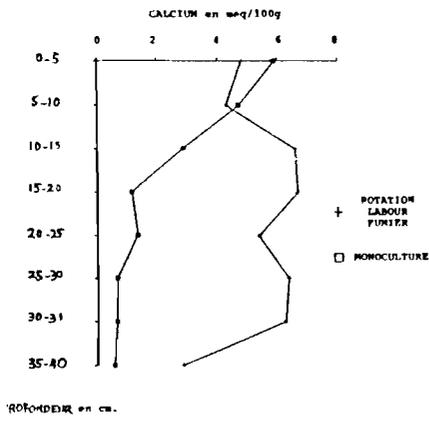
Graphique 5

Influence de l'introduction de rotations et du mode de gestion du sol sur la productivité annuelle d'un géranium conduit intensivement (Trois-Bassins, 1986-1987)



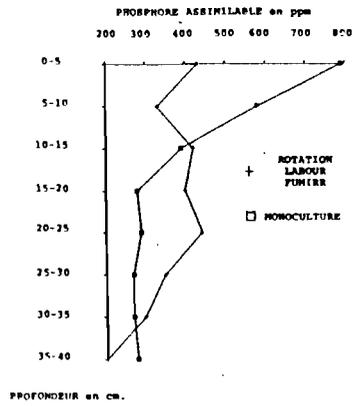
Graphique 6

INFLUENCE DU TRAVAIL DU SOL SUR LA REPARTITION DU CALCIUM DANS LE PROFIL.



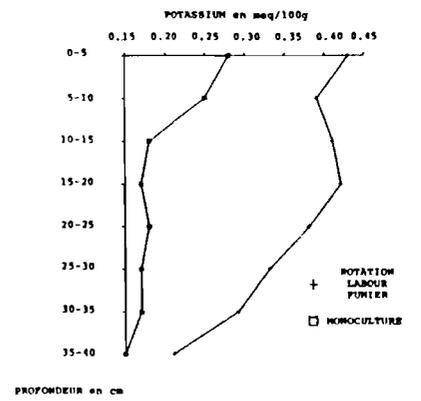
Graphique 7

INFLUENCE DU TRAVAIL DU SOL SUR LA REPARTITION DU PHOSPHORE ASSIMILABLE EN ppm.



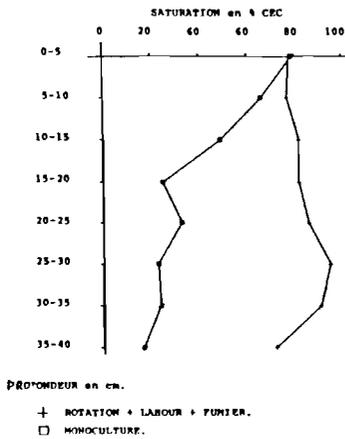
Graphique 8

INFLUENCE DU TRAVAIL DU SOL SUR LA REPARTITION DU POTASSIUM DANS LE PROFIL.



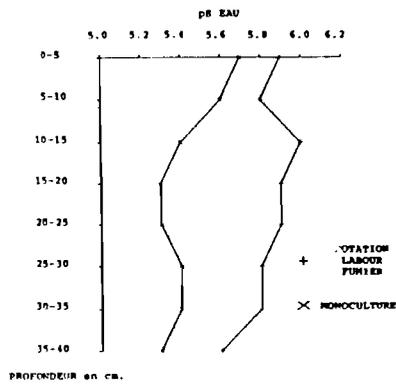
Graphique 9

INFLUENCE DU TRAVAIL DU SOL SUR LA REPARTITION SUR LA SATURATION



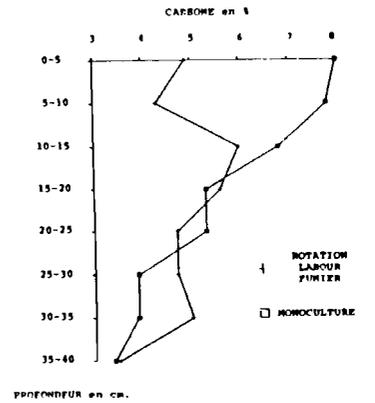
Graphique 10

INFLUENCE DU TRAVAIL DU SOL SUR LA REPARTITION DU pH.



Graphique 11

INFLUENCE DU TRAVAIL DU SOL SUR LA REPARTITION DU CARBONE.



BIBLIOGRAPHIE

- BRIDIER B., 1985 : Quel avenir pour le géranium et le développement agricole des Hauts de l'Ouest de la Réunion. L'Agron. Trop. 40 (4), p. 342-356.
- GARIN P., 1986 : Systèmes de culture et itinéraires techniques dans les exploitations à base de géranium dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion. Article en cours de publication dans l'Agronomie Tropicale.
- MICHELLON R., 1987 : Amélioration des systèmes de culture à base de géranium. IRAT-REUNION, 25 p.
- MICHELLON R., BABUT J.P., 1988 : Les cultures vivrières dans les systèmes de production des Hauts de l'Ouest. IRAT-REUNION, 20 p.

CARACTERISATION ET SUIVI
DE LA FERTILITE PHYSICO-CHIMIQUE
DES ANDOSOLS DE LA REUNION

Pierre-François CHABALIER

CARACTERISATION ET SUIVI DE LA FERTILITE PHYSICO-CHIMIQUE DES ANDOSOLS

P.F. CHABALIER

MATIERE ORGANIQUE

a- Caractérisation de la M.O.

Il y aurait un changement de type de matière organique suivant la toposéquence et l'altitude. Ce changement serait concomittant avec le changement de type d'altération : hydrolyse et complexolyse.

Il s'agirait donc d'étudier sur plusieurs stations la caractérisation de la M.O. :

- étude du rapport C/N - étude du rapport C/N après un fractionnement mécanique (50 μ).
- rapport Ac. Hum./Ac. Fulvique.
- type d'insolubilisation des composés humifiés : agent d'insolubilisation = aluminium et/ou fer.
- type de condensation, d'adsorption et de séquestration de ces microagrégats par une étude physico-chimique ou par une nouvelle technique de microscopie électronique.

On pourrait ainsi bien connaître l'influence du climat et de l'altitude sur le type de M.O. et préciser les catégories d'andosols définies d'après leur type de M.O. et d'altération :

- andosols de climat tropical et subtropical des Bas.
- andosols acides des Hauts et podzols de haute altitude liée à une végétation typique.

b- Caractéristiques agronomiques de la M.O.

Le problème majeur qui se pose actuellement provient de la mise en culture des sols des Hauts de l'Ouest (800-1200 m) qui favorise une très forte érosion et la disparition rapide de l'horizon humifère.

Il faut alors régénérer progressivement la fertilité de l'horizon B par des apports de M.O. fraîche. Mais on ne connaît pas son action exacte dans le sol.

La problématique de la M.O. dans les sols des Hauts se pose ainsi :

- lorsque l'horizon A existe, le taux de M.O. est important, mais celle-ci se minéralise peu et fournit peu d'éléments assimilables aux plantes.

Après dessèchement, les agrégats sont hydrophobes. Vu leur faible densité et leur faible pouvoir de réhumectation, ces agrégats "flottent" lors des fortes pluies et sont entraînés par le ruissellement. Il faudrait donc d'une part pouvoir activer la minéralisation de ce pool de M.O. et d'autre part lutter contre l'érosion (éviter de dessèchement total des agrégats par exemple).

- lorsque l'horizon A est décapé, il faut redonner à l'horizon B des caractéristiques favorables à la mise en culture à savoir :
 - favoriser l'enracinement par l'agrégation de particules provoquée notamment par l'apport de M.O. et de desséchage partiel du sol.
 - enrichir en éléments fertilisants la couche travaillée avec des apports de M.O. compostée pour favoriser les caractéristiques physico-chimiques du sol.

Dans un profil A/B, l'analyse classique de la M.O. ne fait pas apparaître de fortes discontinuités entre l'horizon A et l'horizon B. Pourtant ceux-ci sont franchement différents :

- par leur couleur
- par leur densité
- par leur structuration

Une étude plus fine de la M.O. dans le profil permettrait sans doute de comprendre la nature exacte de la M.O. et l'action de ses caractéristiques liées à la structuration. Avec les résultats de cette étude, on pourrait suivre dans le temps, l'évolution de M.O. compostée apportée au sol et son devenir au sein de la M.O. du sol corrélativement aux propriétés physico-chimiques qu'elle lui confère.

Pour comprendre le rôle de la M.O. du sol, plusieurs niveaux analytiques sont possibles à partir de prélèvements au champ ou de sol, après culture en vases ou en micropots.

- des fractionnements physiques par tamissage.
- des caractérisations du carbone (ac. fulvique - ac. humique) et de l'azote (C/N).
- des fractionnements de l'azote : N extrait à KCl, hydrolyse acide...
- des tests de minéralisation de la M.O. en pot.
- des tests de réorganisation de N introduit par marquage à N^{15} .
- des tests de réorganisation de M.O. compostée introduite (marquage possible par C^{13} ?).

Enfin, il serait également bon de connaître un peu mieux la microbiologie de ces sols, d'abord selon leur séquence dans le paysage, ensuite en fonction de leur évolution agronomique. Les japonais ont observé que des andosols étaient spécialement riches en actinomycètes et pauvres en bactéries (significativement plus de bactéries anaérobies). La mise en culture et l'apport de M.O. font varier la microflore selon la nature des apports. Les changements de pH sont également importants sur la répartition des populations. Ceci serait donc à étudier.

CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

- Le Phosphore

Ces sols fixent énormément de phosphore (plus de 3000 ppm). En vases, ces sols réagissent toujours comme des sols très carencés en P, pourtant la valeur de phosphore total est importante (plus de 2000 ppm). Ce phosphore est lié principalement à la M.O. qui se minéralise peu et au fer et à l'alumine qui le fixent. En général les teneurs P-Al sont assez liées à celles de Al échangeable.

Elles sont plus faibles dans les sols de basse altitude que dans les andosols perhydratés d'altitude.

la moitié de la quantité fixée par le sol reste isotopiquement diluable et des apports de chaux pour les sols acides et de silicates pour tous les andosols améliorent la disponibilité du phosphore.

L'apport d'un amendement organique peut avoir des conséquences très différentes sur le mode de fixation du P apporté selon la nature biochimique de cet amendement. L'apport de M.O. au sol diminue l'adsorption de P apporté par les métaux. La réduction de cette adsorption résulte de plusieurs phénomènes physico-chimiques (chelation de Fe et Al - hydrolyse des composés organiques - compétition entre anions).

Les apports organiques augmentent toujours la teneur en composés organo-cationiques qui fixent P mais de façon moins énergique que les gels ferriques. De ce point de vue les fumiers semblent plus efficaces que les composts mûrs. Les différents tests et analyses mettent en évidence la difficulté de prédire les quantités de P assimilable par les plantes.

Pour l'instant, la méthode de P Olsen-Dabin qui extrait des quantités assez importantes de phosphore P-Al par rapport aux autres méthodes semble bien prédire la réponse de la plante au champ. Mais aucune expérimentation fine n'a été faite pour corréliser cette méthode à la croissance d'une plante et à ses exportations en phosphore.

De plus, il peut y avoir un biais par le fait de la mycorhization de certaines plantes dont le pouvoir d'assimilation de P à partir de formes peu assimilables se trouve ainsi renforcé.

D'une façon pratique au champ, la technique de fertilisation par des apports localisés donne des résultats satisfaisants. Le fractionnement par des apports annuels d'entretien permet en général de couvrir les besoins des cultures.

Par contre, lorsque les apports ne sont pas localisés (cas de la fertilisation de la canne aux repousses) la nutrition dépend nettement des teneurs en P ass. du sol. Des fumures de correction localisées au sillon lors des replantations sont alors nécessaires. Mais on ne connaît pas la durée de disponibilité de ce phosphore dans le temps.

Les deux points qui semblent intéressants à développer sont donc d'après les discussions :

- la recherche d'une méthode adaptée de dosage du P assimilable.
- le devenir et la disponibilité du P engrais apporté dans le temps en fonction de certaines techniques agronomiques (apport de M.O ou non, concentration par localisation ou non, etc...).

- Le complexe échangeable

Ces sols ont une CEC et une AEC qui dépendent de la nature des colloïdes et du pH. Leur mesure reste donc très aléatoire selon leurs conditions de mesure.

Ces sols sont essentiellement des mélanges de composants ayant des réactivités différentes. De ce fait, la sélectivité d'un sol pour un cation ou un anion donné peut varier selon la nature du site d'échange disponible à un certain pH.

Dans ces sols, la valeur du PCN (point de charge nulle) dépend de la nature des colloïdes du sol. Les courbes de titration potentiométriques donnant le PCN et la CEC dépendront de la nature de ces colloïdes, et donc de la qualité de l'andosol considéré (formation par acidolyse ou par complexolyse).

Le pH du PCN peut être sensiblement modifié par l'application de M.O., de chaux, de phosphate et d'engrais.

Au contraire, en absence d'apport d'engrais, il y a acidification et le pH du sol s'abaisse lentement vers le PCN. Il n'y a plus alors de CEC et la lixiviation des cations est élevée.

L'accroissement du pH permet d'augmenter les charges négatives et donc la capacité du sol à retenir les cations : d'où la réduction de la lixiviation. Cependant, ces sols ont un pouvoir tampon assez élevé et les apports sont assez importants. On peut également jouer sur les deux phénomènes :

- apport de M.O. ou d'anions (silicates-phosphore) pour abaisser le pH du PCN (non vérifié par l'expérimentation d'Hailé).
- chaulage pour maintenir ou augmenter le pH et donc la CEC.

L'étude d'Hailé a montré que le chaulage à très forte dose avait une action nette sur toutes ces propriétés. Les phosphates et les silicates avaient une action variable et de moindre importance. Mais une meilleure caractérisation des sols aurait été nécessaire pour comprendre les phénomènes mis en jeu.

D'un point de vue agronomique, de tels apports d'amendements ne sont pas possibles. Cependant, nous avons montré qu'à des doses utilisables au champ, les caractéristiques du PCN et de la CEC étaient favorablement transformées. Mais on ne connaît pas la persistance de ces caractéristiques dans le temps.

Dans le cadre de ce thème, quelques axes de recherche ont été ébauchés et un programme plus complet et précis serait à définir ultérieurement. Il a été discuté notamment des possibilités de :

- 1- d'implanter des capteurs de solution dans l'expérimentation sous les 8 traitements prévus, au niveau du suivi hydrique du sol par sonde à neutrons et tensiomètres.

On suivrait ainsi l'aspect lixiviation du sol en élément (silice-anions-cations) sous les différents traitements.

- 2- utiliser les 3 lysimètres de Trois-Bassins pour suivre des lixiviations de cations sous lame d'eau (profondeur du sol de 150 cm).
- 3- Suivre des dynamiques de cations et d'anions sur des colonnes de sol en place (découpées au champ et enrobées de parafine) au laboratoire.

Plusieurs types de sol et plusieurs horizons de sol (A, B, A sur B) pourraient ainsi être étudiés.

SUIVI DE LA FERTILITE SOUS L'EXPERIMENTATION CEEMAT

Dans le cadre de l'essai au champ, le suivi de la fertilité demande de mesurer correctement les caractéristiques de départ et celles acquises après 2 ans de culture dans une première phase. Associés à d'autres mesures physiques, des prélèvements de profils semblent être une bonne méthode d'échantillonnage.

Des mesures simples ou sophistiquées sur certains profils représentatifs sont à mettre en oeuvre.

**CARACTERISTIQUES
MECANIQUES ET PHYSIQUES
DES ANDOSOLS DE LA REUNION**

Sylvain PERRET

**CARACTERISTIQUES MECANIKES ET
PHYSIQUES DES SOLS ANDIQUES A
LA REUNION, CONSEQUENCES SUR
LEUR COMPORTEMENT AGRONOMIQUE.**

**BILAN DES CONNAISSANCES, MOYENS D'INVESTIGATION ACTUELS ET
OBJECTIFS DE RECHERCHE**

S. PERRET

A. LES OBSERVATIONS DE TERRAIN

a) variabilité spatiale

* Importante, même sur de faibles surfaces: pour la morphologie du profil cultural, pour les caractères physiques couramment mesurés (δd et θ) et pour le comportement vis à vis des contraintes mécaniques (effets des outils, tassements...)

* Décelable par l'observation du modelé parcellaire mais peu prévisible cependant.

b) morphologie du profil cultural

* distribution racinaire:

Pour les cultures annuelles à système racinaire fasciculé, l'enracinement est limité à l'horizon superficiel organique, finement structuré et poreux. Le substrat profond (horizon B ou S) massif et continu, de faible macroporosité et d'humidité forte ($\theta_v = 40$ à 70%) reste hostile au développement racinaire (asphyxie, hydromorphie masquée ?).

Seules les cultures semi-perennes ou à enracinement pivotant peuvent coloniser ce milieu.

* observations sur l'état du profil:

L'andosol conserve peu la trace visuelle de passage des outils de travail du sol: l'horizon superficiel manifeste un foisonnement important lors du passage de dents mais se retasse rapidement. L'horizon B à son humidité naturelle résiste peu au passage des pièces travaillantes (sauf lorsque la forte adhérence du sol au pièces métalliques provoque la formation de blocs compacts sur celles-ci). Ce substrat flue à leur contact pour se refermer derrière (effet "beurre-couteau").

c) le contact sol-outil

La mécanisation des travaux du sol est récente à la Réunion (1982-83 prairies, canne à sucre puis cultures maraichères).

L'utilisation généralisée d'outils à disques a évolué vers une gamme plus vaste de matériel.

En plus des obstacles socio-économiques et du relief chahuté, la mécanisation du travail du sol se heurte aux caractéristiques physiques contraignantes des sols andiques:

L'horizon superficiel est peu cohérent à l'état sec. Sa structure finement grumeleuse et sa densité faible déterminent une érodabilité importante. Le labour parvient mal à retourner ce substrat et à enfouir résidus de récolte et adventices. En condition sur-humides, le labour est mieux retourné mais moulé, lissé et difficile à reprendre.

L'utilisation d'outils animés mal adaptés conduit à pulvériser cet horizon (sol soufflé) et en accentue l'érodabilité.

L'horizon B est touché par le travail lorsque l'érosion a décapé la surface (cas général sous culture sarclée). Ses caractéristiques de thixotropie et parfois de perhydratation déterminent son adhérence très forte aux pièces travaillantes, l'effort de traction est augmenté.

La portance aux engins est faible; soumis aux contraintes des pneumatiques, le sol devient fluent et l'adhérence des engins est compromise.

La fragmentation mécanique de ce substrat continu, associée au dessèchement en modifie les caractéristiques. En surface, il peut devenir pulvérulent et facilement mobilisable par le ruissellement.

Le labour à la charrue à soc, pratiqué par certains agriculteurs en période de pointe pour lutter contre les mauvaises herbes, présente quelques avantages (cf partie "systèmes de culture"):

- * lutte contre les adventices, s'il est bien versé
- * amélioration de l'enracinement des cultures à cycle court
- * amélioration du profil chimique (homogénéisation, minéralisation accélérée, redistribution des éléments en profondeur)
- * restauration rapide d'un horizon cultural structuré à partir de l'horizon B (avec apport de M.O fraîche).

Il présente cependant deux inconvénients majeurs:

- * érodabilité du sol accrue
- * dessèchement important de la zone travaillée.

Des expérimentations vont être mise en place, elles concernent:

pour le travail du sol:

- l'utilisation de nouveaux types de versoirs (versoirs claire-voie, versoirs avec boulons stylo...) moins sensibles au collage de terre.

- le travail du sol par une machine à bécher, outil animé qui semble adapté au problème de forte pente (moins de problème de dévers), moins exigeant en puissance-tracteur et réalisant un labour émietté.

pour le semis-direct:

- réutilisation et amélioration du prototype de semoir existant.

Des mesures concernant les conséquences de l'utilisation comparée du travail du sol et du semis-direct doivent accompagner l'expérimentation: état du profil cultural, comportement hydrique, évolution chimique.

B. LES RECHERCHES ENGAGEES SUR PLACE

a) recherche de métrologie adaptées

* la sonde gamma-neutronique:

Elle permet l'accès aux données de base δd et θ .

Dans le contexte andique, les gammes de variation de ces paramètres sont importantes et leurs valeurs inhabituelles ($\delta d = 0.3$ à 1.3 , $\theta = 30$ à 80%), l'étalonnage des sondes nucléaires est délicat (A. DUCREUX, M. WAKSMANN, B. SIEGMUND 1985; S. MARLET 1986).

Les problèmes se situent en particulier:

- au dessus de 15cm où les mesures d'humidité sont imprécises.

- dans la gamme des densités sèches faibles (< 0.5) où les valeurs réelles mesurées au cylindre échappent largement à la courbe d'étalonnage calculée.

Les protocoles de mesure au champ doivent prendre en compte l'hétérogénéité spatiale du sol.

Une méthodologie raisonnée et précise d'interprétation des données obtenues, ainsi qu'un étalonnage adapté au milieu andique sont en cours de définition (S. PERRET 1988, à paraître) (inter-dépendance des variations de δd et θ , validité statistique des différences observées, facteurs d'erreur ou d'incertitude à divers niveaux...).

* métrologie des systèmes racinaires:

L'analyse quantitative ne peut être envisagée: la séparation automatisée racines/sol par flottation n'est pas réalisable, le sol contient de nombreux débris organiques non-décomposés (défriche) et minéraux de faible densité, et la dispersion complète du sol est difficile (forte liaison allophane-matière organique, agrégats de colloïdes).

Un système d'évaluation de la profondeur d'absorption racinaire par réaction à l'injection dans le sol de substances léthales (cocktail d'herbicide) va être testé.

* réalisation de profils chimiques et racinaires par extraction de cylindre de sol:

Lors du suivi diachronique d'essais, le creusement de fosse, destructeur et mal adapté aux dimensions du parcellaire, a été abandonné au profit d'un échantillonnage par extraction de cylindre de sol. La colonne obtenue est découpée en tronçons sur lesquels comptages racinaires et analyses chimiques sont réalisés.

L'estimation qualitative de l'enracinement sur de tels échantillons est à l'étude (comptage 0/1).

b) étude des variations de volume

M. WAKSMANN (1987) a travaillé sur le comportement hydrique des sols andiques réunionnais et particulièrement sur les variations de volume qui accompagnent les pertes en eau, pertes irréversibles au delà d'un seuil.

Les résultats obtenus montrent que:

* les capacités de retrait des andosols sont importantes

* le concept de limite de retrait s'applique mal aux andosols: chaque départ d'eau provoque une nouvelle diminution de volume par réorganisation des constituants, la courbe de retrait se limite à deux cinétiques: la première suit la droite de saturation, la seconde traduit des pertes de volume moins que proportionnelles aux départ d'eau.

* la dessiccation poussée ($> pF 4$) du matériau andique est irréversible, la réhumectation ne permet de retrouver que la moitié de l'humidité initiale. Cette particularité s'applique surtout aux horizons profonds (passage d'une microstructure continue à une microstructure agrégée V. ROSELLO 1983). Les mesures de retrait réalisées sur le sol de surface montrent un comportement similaire à celui du sol profond séché à l'air. Pour les horizons profonds *in situ*, les contraintes hydriques restent modérées ($< pF 4$) et les pores de diamètre inférieur à $0.3\mu m$ ne sont pas altérés.

* l'hétérogénéité des densités sèches et des humidités de l'horizon B résulterait plus de phénomènes pédogénétiques (sols jeunes à évolution rapide) que des contraintes climatiques (dessiccation superficielle).

c) granulométrie

On connaît la contradiction entre l'appréciation texturale faite sur le terrain (limono-argileuse) et les résultats d'analyse granulométrique des sols andiques séchés à l'air. Ceux-ci présentent une texture sablo-limoneuse de pseudo-particules sableuses, de peu de sable vrai et de peu d'argile granulométrique ($< 15\%$).

Une étude (A. PENSEC 1987) a montré l'influence du séchage préalable sur la mesure granulométrique des andosols ainsi que l'importance de la dispersion du substrat: destruction complète de la m.o., dispersion mixte chimique et mécanique (ultra-sons).

d) compactage dynamique

La mécanisation intégrale de la récolte de la canne à sucre se développe et entraîne des problèmes de tassement des sols canniers.

Une étude de la sensibilité au compactage dynamique de divers sols canniers a été entreprise (méthode PROCTOR) (C. BECLIN, S. PERRET 1988). Trois toposéquences ont été choisies dans des zones cannières, elles intéressent des sols ferralitiques, bruns et andiques, répartis selon l'altitude.

On montre globalement que:

* Le test PROCTOR donne des résultats bien contrastés: en fonction des types pédogénétiques, la variation de sensibilité est importante

* Pour l'ensemble des sols testés, la sensibilité au compactage dynamique est faible. On note cependant que les sols ferrallitiques les plus anciens de la zone Nord-Est et les sols alluvio-colluviaux des secteurs littoraux sont les plus sensibles (c'est dans ces zones à relief assez favorable que se développe plus intensément la coupe mécanique)

* Les sols andiques ne se compactent que faiblement, et lorsque le protocole de manipulation les préserve d'un séchage excessif, leur sensibilité diminue encore. Le compactage dynamique PROCTOR utilisé met en jeu une énergie de compactage modérée, correspondante aux contraintes imposées au sol par le passage des engins de récolte. Cette énergie occasionne des "macro-réarrangements" au sein du matériau testé. Dans le cas des andosols, les réarrangements possibles concernent principalement la micro-structure, mobilisable par des contraintes d'énergie fortes (contraintes hydriques $pF > 4$...). Cela peut expliquer cette sensibilité faible au compactage dynamique.

C. INVESTIGATIONS A VENIR

a) les moyens actuels

personnel:

Un VAT CIRAD/CEEMAT (physique/travail du sol) depuis 1986.

Contact permanent avec A. DUCREUX (CEEMAT-Montpellier) et mission d'appui annuelle.

locaux:

Un laboratoire de 27m² a été attribué en juillet 87 pour installer un laboratoire de physique des sols

équipement:

Équipement de base (étuve, balances, verrerie, matériel divers de labo et de terrain)

Appareillages physique du sol (tests Proctor, consistances, montage pF, granulométrie, densitomètre à membrane, sonde gamma-neutronique)

b) thèmes d'étude abordés

- Caractérisation mécanique des sols canniers en toposéquences sur 3 sites de l'île (compactage dynamique, consistances, granulométrie), en collaboration avec le laboratoire commun CIRAD/ENSA Montpellier

- Etude de l'influence de différents itinéraires techniques dans les Hauts de l'Ouest sur:

- * l'état physique du profil cultural
- * le développement des systèmes racinaires
- * l'évolution des stocks d'eau
- * l'évolution chimique du profil.

c) thèmes d'étude à envisager et modalités

Les demandes d'informations permanentes provenant des instituts CIRAD à la Réunion et concernant les problèmes aux interfaces sol/eau/plante/machine justifient l'initiation de recherches *in-situ*.

Deux types d'investigation semblent nécessaires, l'un à prédominance laboratoire, l'autre plus tributaire de contingences agronomiques:

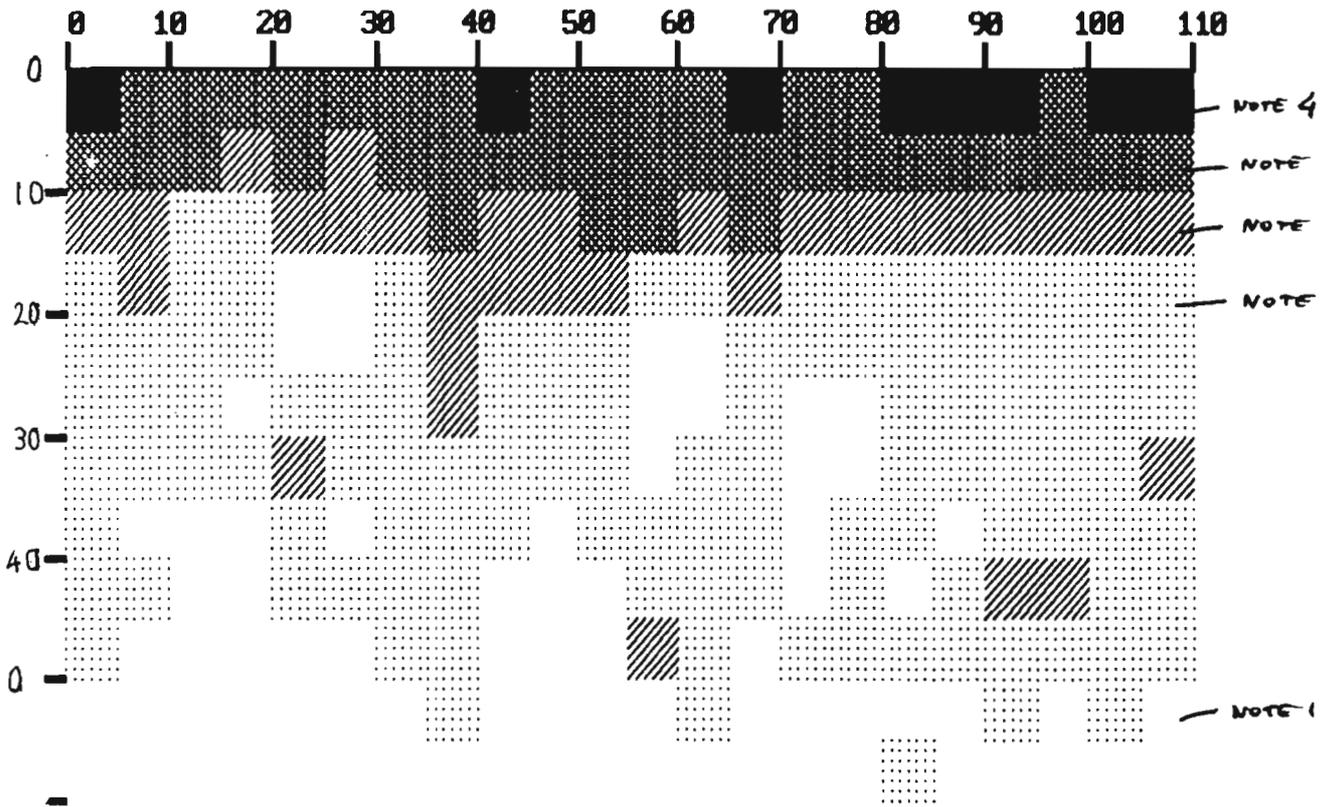
* Rhéologie et propriétés mécano-physiques des sols andiques, micromorphologie des arrangements structuraux intimes en fonction des contraintes et de l'état hydrique, variabilité spatiale: étude en toposéquences, remise en cause et recherche de métrologies adaptées (granulométrie, limites de consistance, hydrodynamique...)

* Etude de l'influence de différents itinéraires techniques (avec et sans travail du sol) sur un sol andique: génération/entretien d'un horizon cultural Ap, suivis diachroniques physiques, chimiques et hydrodynamique, aspects micromorphologiques, recherche d'outils adaptés, notions de retrait, d'agrégation, de structuration, de dessiccation irréversible *in-situ*, étude des facteurs de transition horizons A/B, érodabilité de l'horizon cultural...

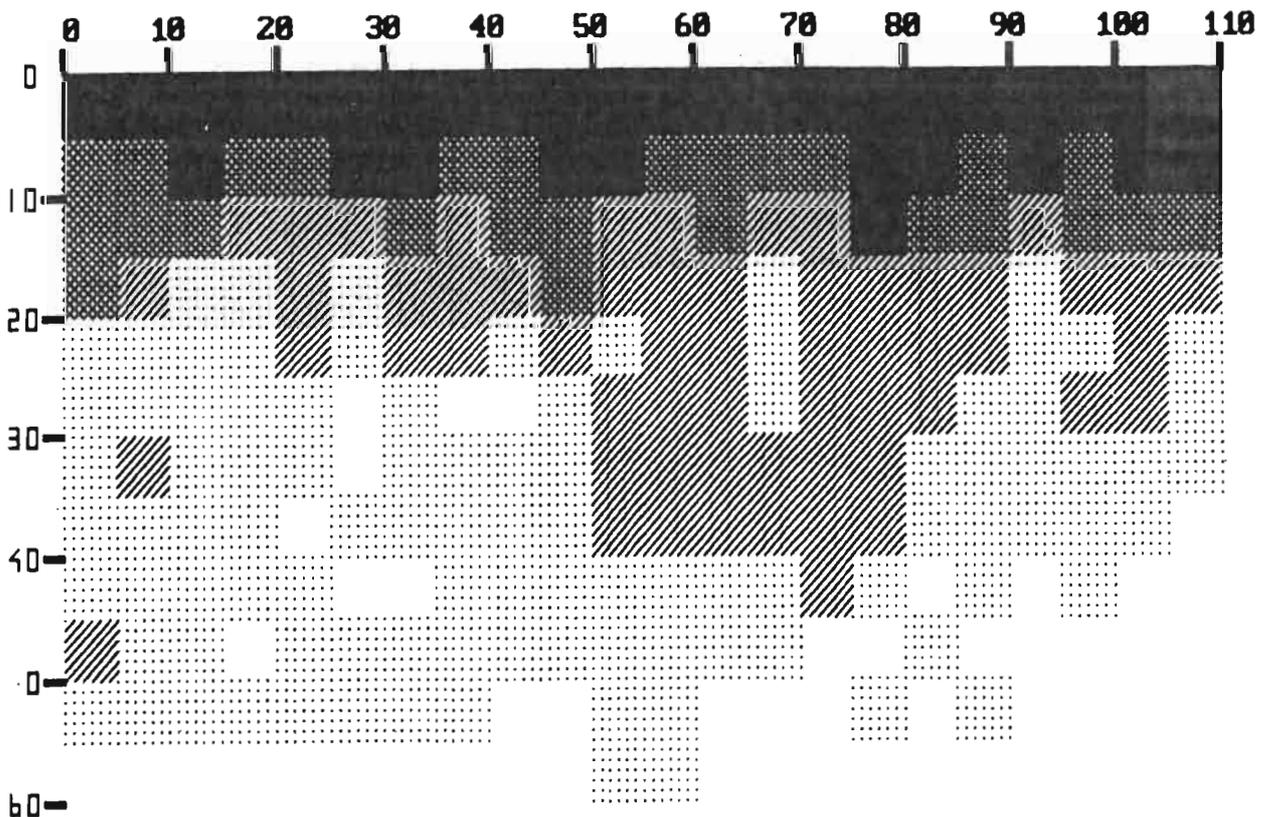
Une étude à long terme de type thèse de 3^e cycle CIRAD/CEEMAT appuyée par des études plus ponctuelles (stages...) devrait prendre en compte les problématiques envisagées ici.

L'infrastructure actuelle "physique des sols" à la Réunion permet l'accueil de stagiaires en plus du VAT, le nouveau laboratoire -centralisé et en voie rapide d'équipement- nécessiterait la présence d'un personnel permanent véritable (un thésard par exemple) pour assurer l'animation, la recherche et l'encadrement.

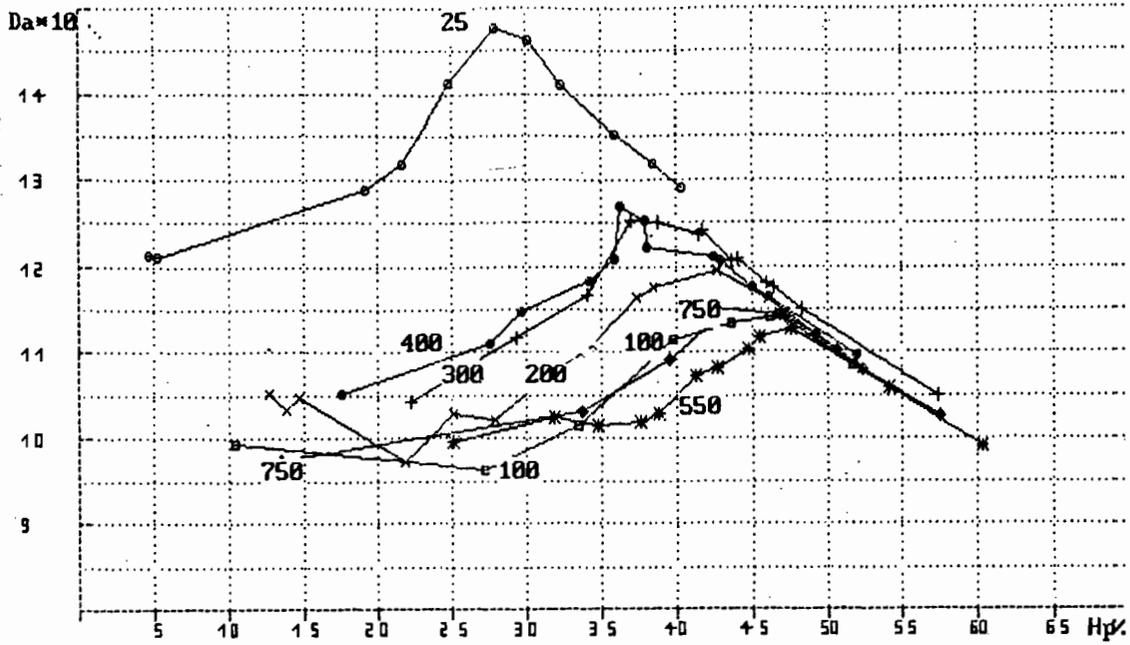
**METROLOGIE DES SYSTEMES
RACINAIRES: CARTES RACINAIRES**



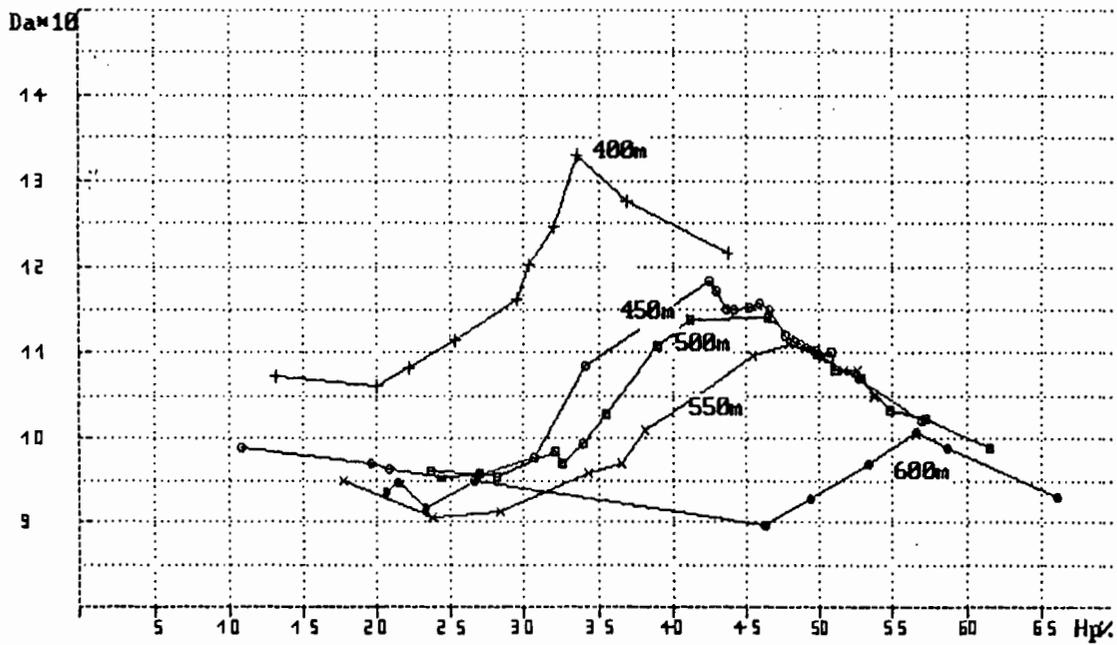
profil racinaire de prairie essai permal tiller 01.08.86



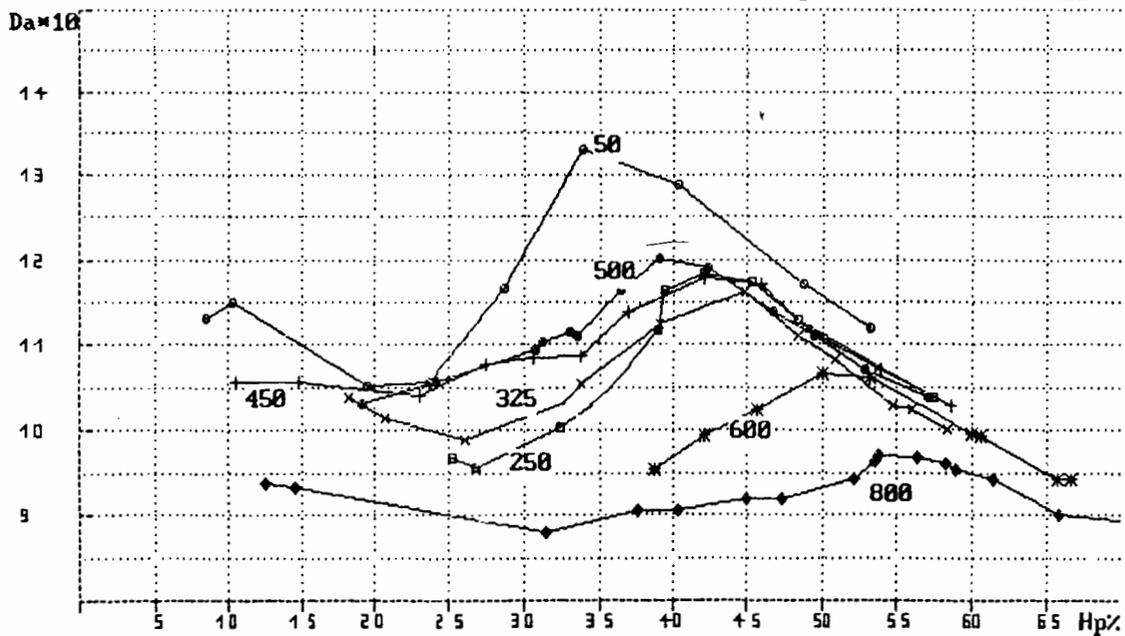
profil racinaire de prairie essai permal labour 01.08.86



Courbes Proctor sur la toposéquence de La Mare. 3 couches. 22 coups de dame

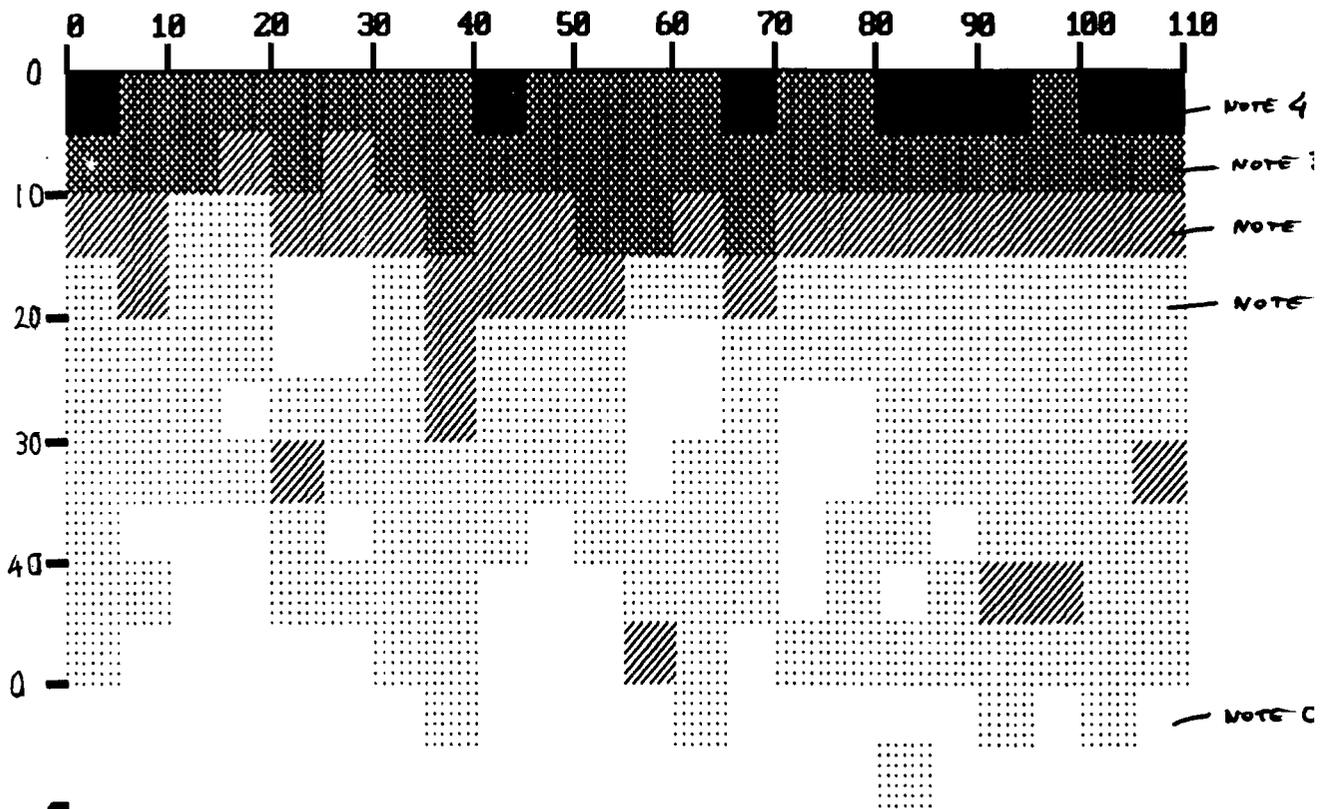


Courbes Proctor sur la toposéquence de Stella. 22 coups de dame. 3 couches

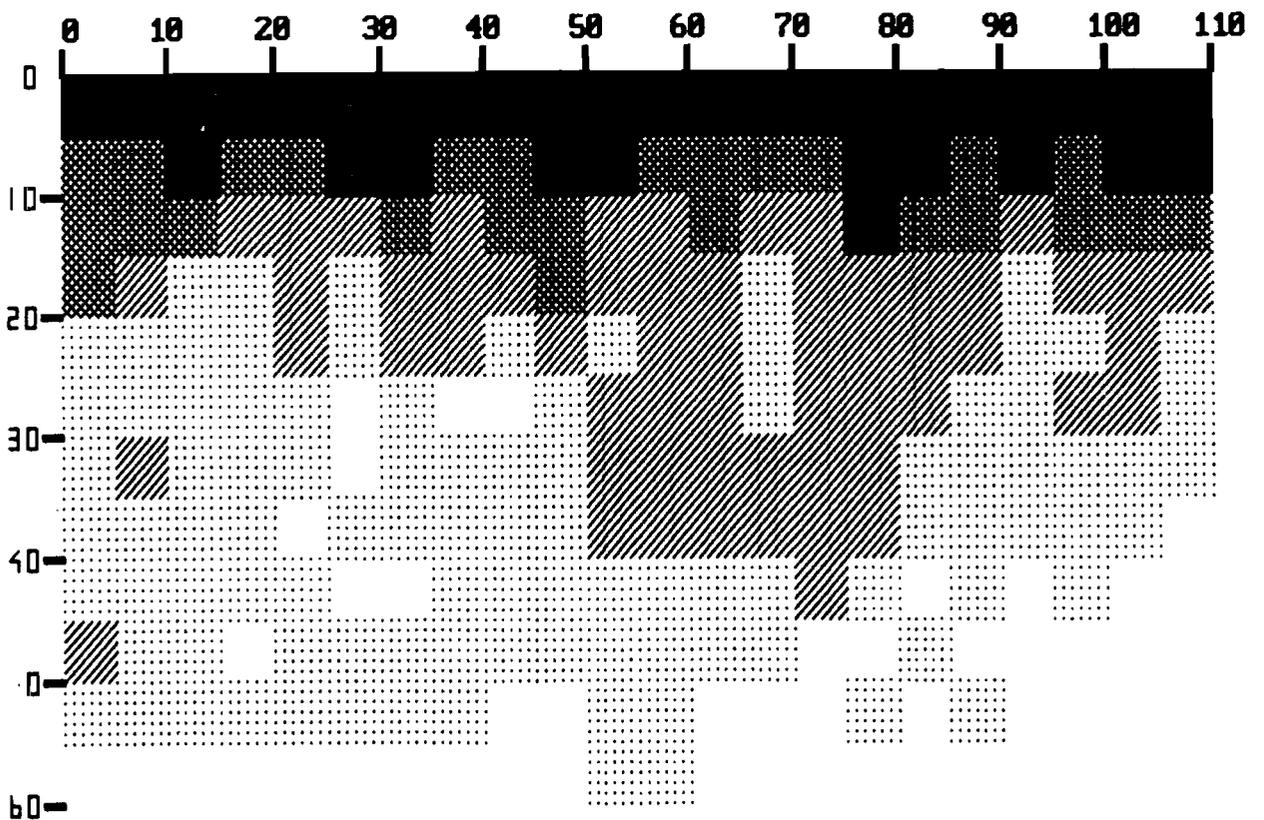


Courbes Proctor sur la toposéquence de Bérive. 3 couches. 22 coups de dame.

**METROLOGIE DES SYSTEMES
RACINAIRES: CARTES RACINAIRES**



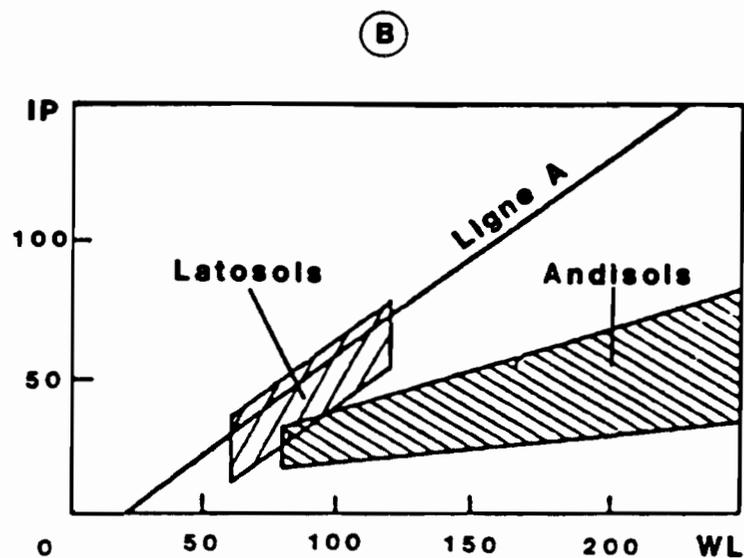
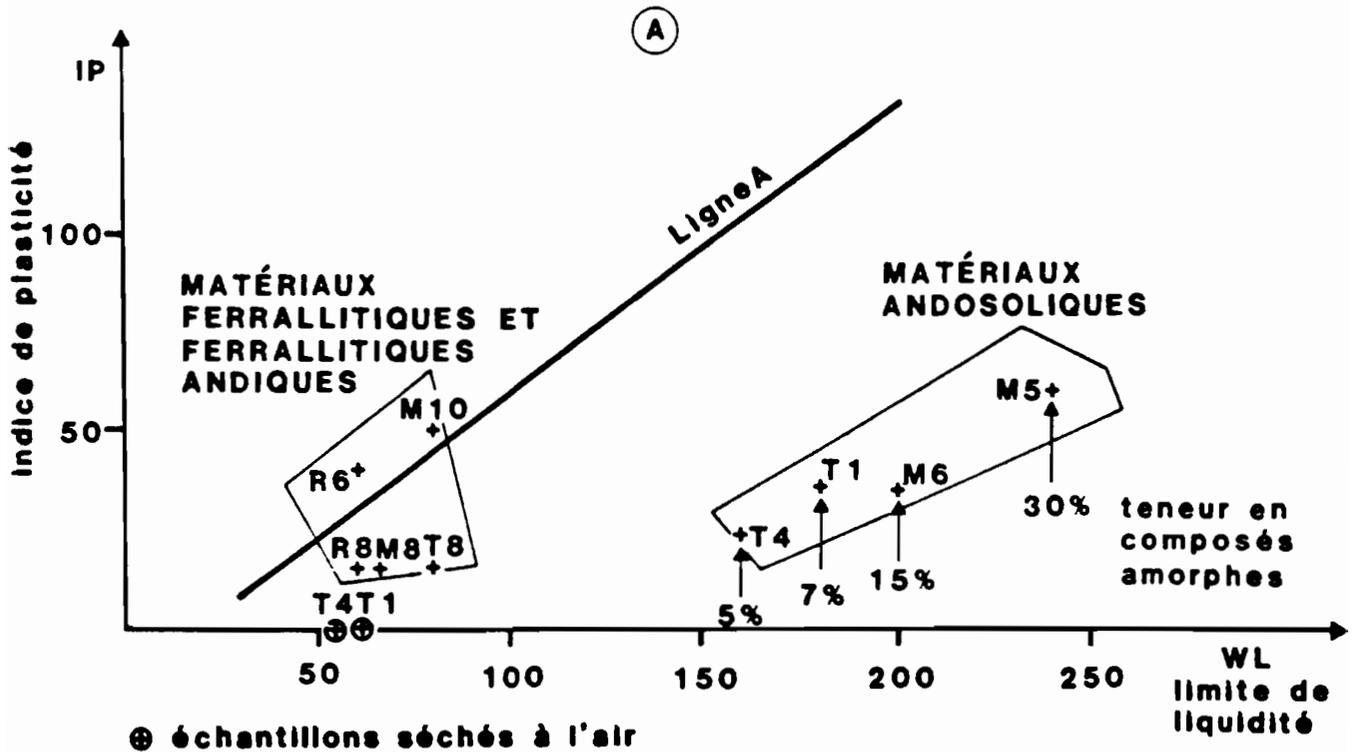
profil racinaire de prairie essai permal tiller 01.08.86



profil racinaire de prairie essai permal labour 01.08.86

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

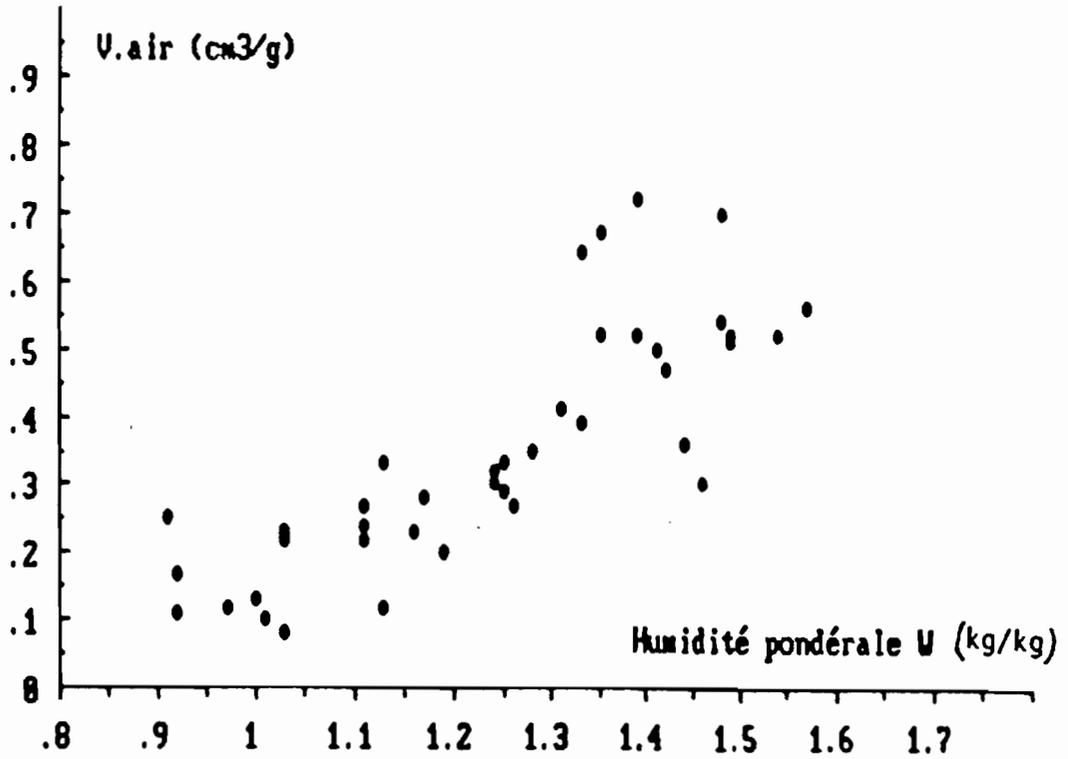
ANDOSOL				Temps de sechage prealab			
Temperature de sechage (°C)				T1	T2	T3	T4
				Frais	7h/30°C	8h/70°C	24h/105°C
Argile %	:	A	:	31.8	3.5	1.2	
Limon fin %	:	Lf	:	17.4	5.5	7.7	8
Limon grossier %	:	Lg	:	33.6	11.2	1.5	1
Sable fin %	:	Sf	:	4.4	41.8	31.7	30
Sable grossier %	:	Sg	:	1.7	26.4	46.4	47
Matiere organique %	:	M.O	:	12	11	11	
Pourcentage materiaux %	:	Total	:	100.9	99.4	99.5	99
BRUN							
Temperature de sechage (°C)				T1	T4		
Argile %	:	A	:	62.7:	62.7:		
Limon fin %	:	Lf	:	23.6:	23.8:		
Limon grossier %	:	Lg	:	5.2:	5:		
Sable fin %	:	Sf	:	3:	3:		
Sable grossier %	:	Sg	:	5.3:	5.4:		
Matiere organique %	:	M.O	:	1.4:	1.4:		
Pourcentage materiaux %	:	Total	:	101.2:	101.3:		
FERKALLITIQUE							
Temperature de sechage (°C)				T1	T4		
Argile %	:	A	:	47.9:	47.8:		
Limon fin %	:	Lf	:	39.9:	39.9:		
Limon grossier %	:	Lg	:	4.9:	5:		
Sable fin %	:	Sf	:	4.5:	4.2:		
Sable grossier %	:	Sg	:	1.9:	2:		
Matiere organique %	:	M.O	:	.9:	.8:		
Pourcentage materiaux %	:	Total	:	100:	99.7:		



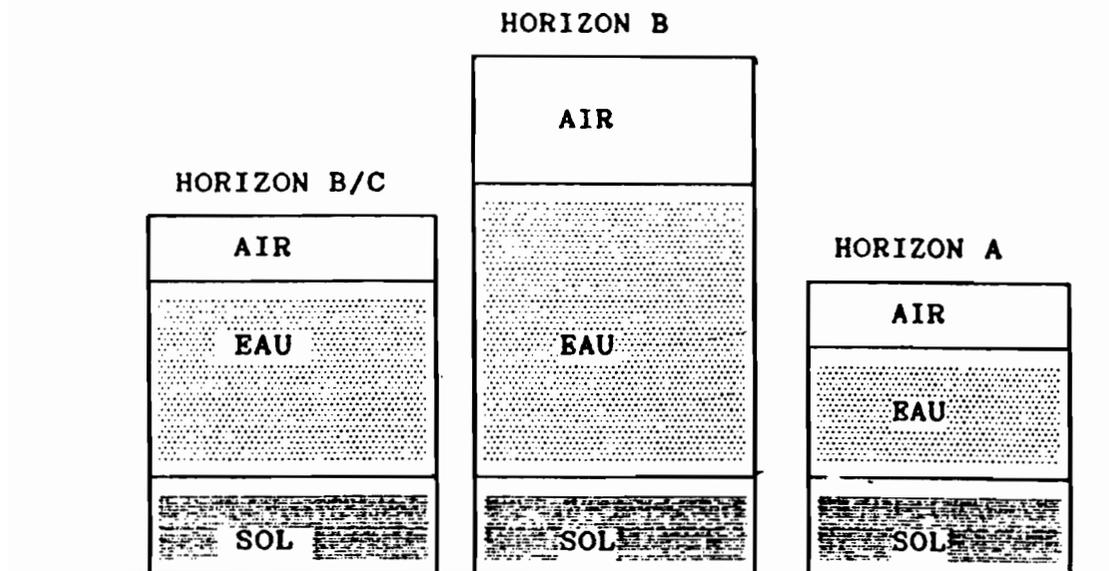
A: Position des andosols étudiés et des sols associés sur le diagramme de Casagrande, d'après CREVIN (1983).

B: Sols à allophane (Andisols) et sols à halloysite (Latosols) de Java, d'après WESLEY (1973).

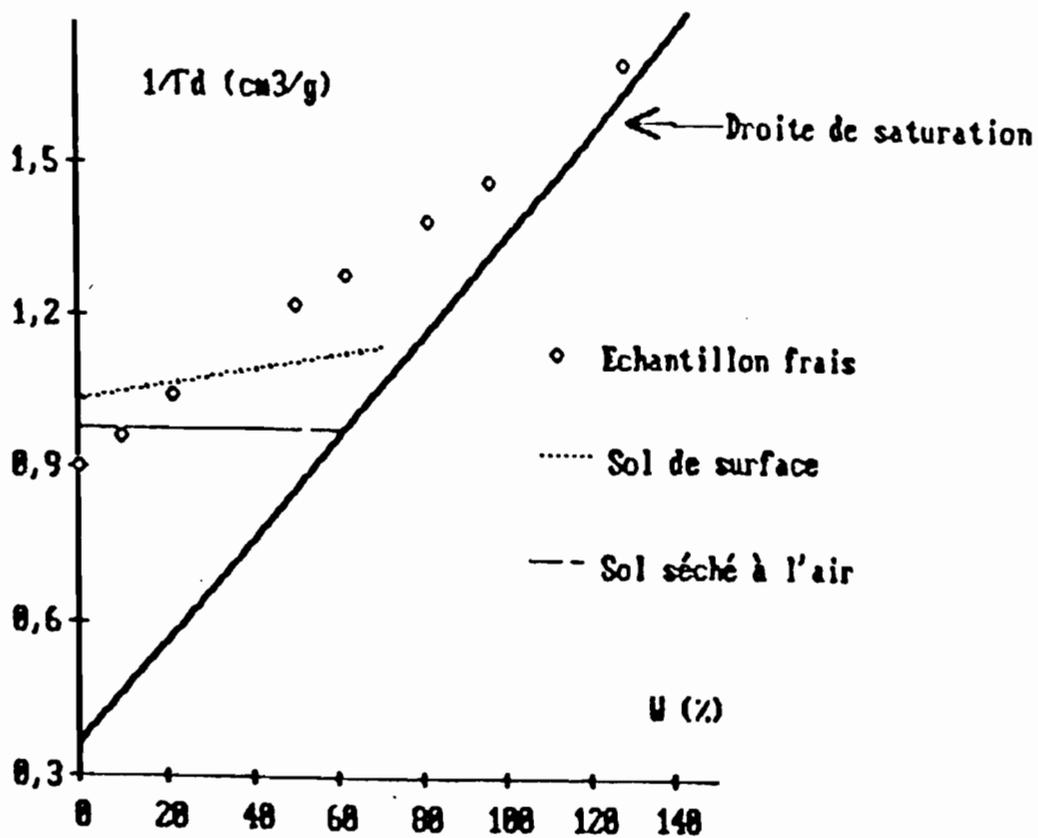
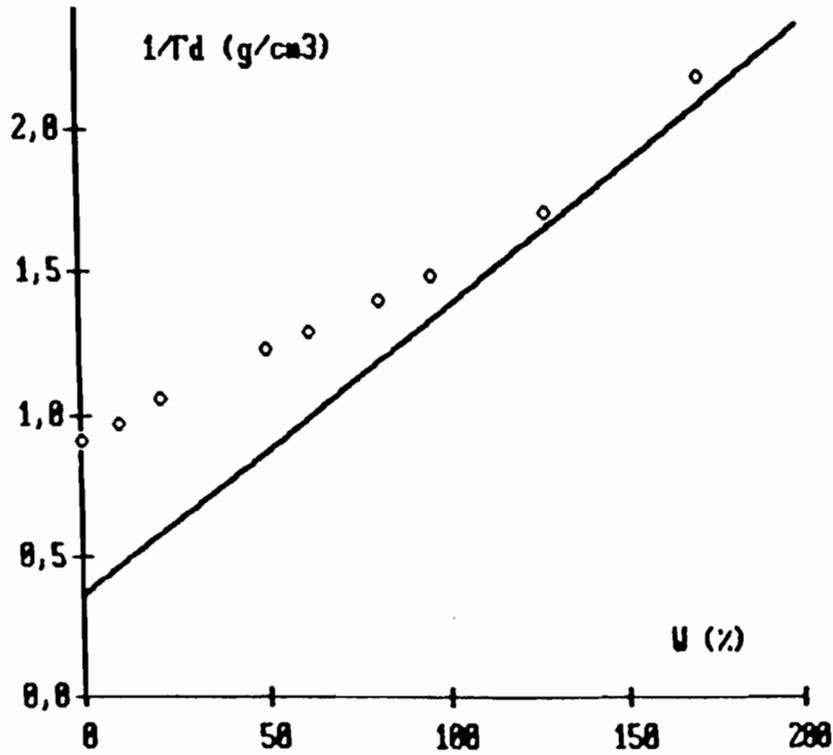
Relation entre la teneur en eau du sol et le volume apparent de l'air sur les andosols de l'ouest de l'île.



Schématisation de l'évolution pédogénétique sur les volumes massiques des constituants d'un andosol.

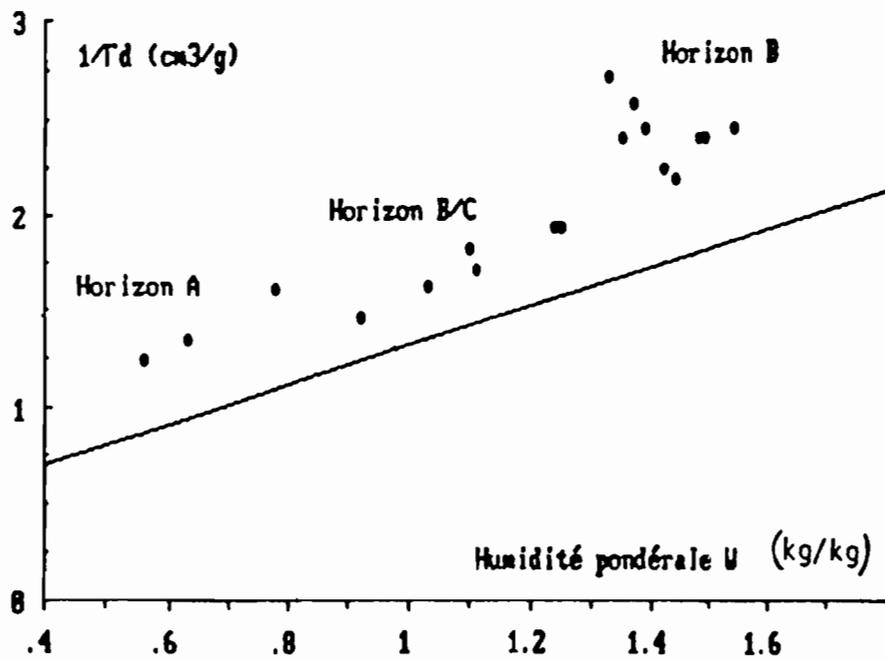
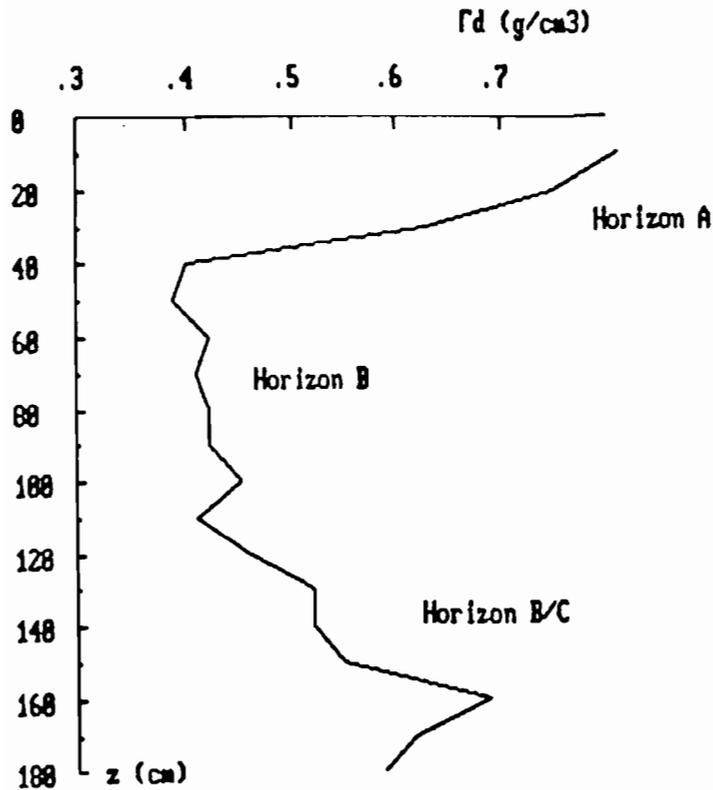


Courbe de retrait sur l'andosol de Trois Bassins.



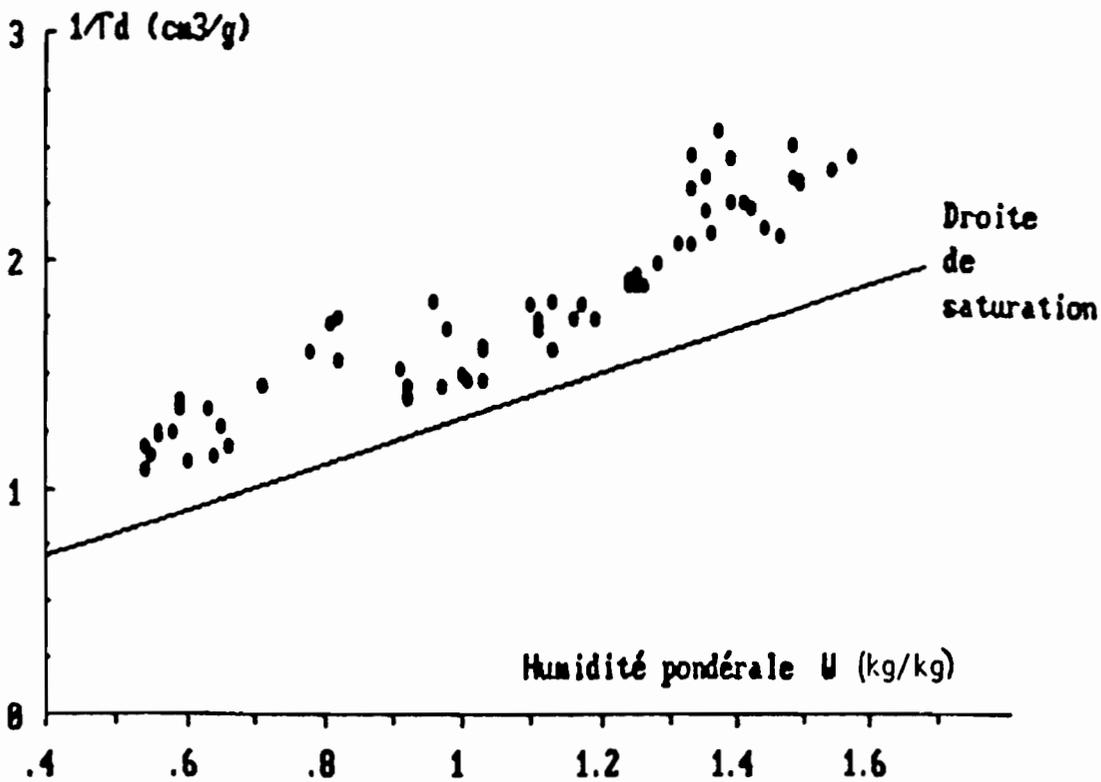
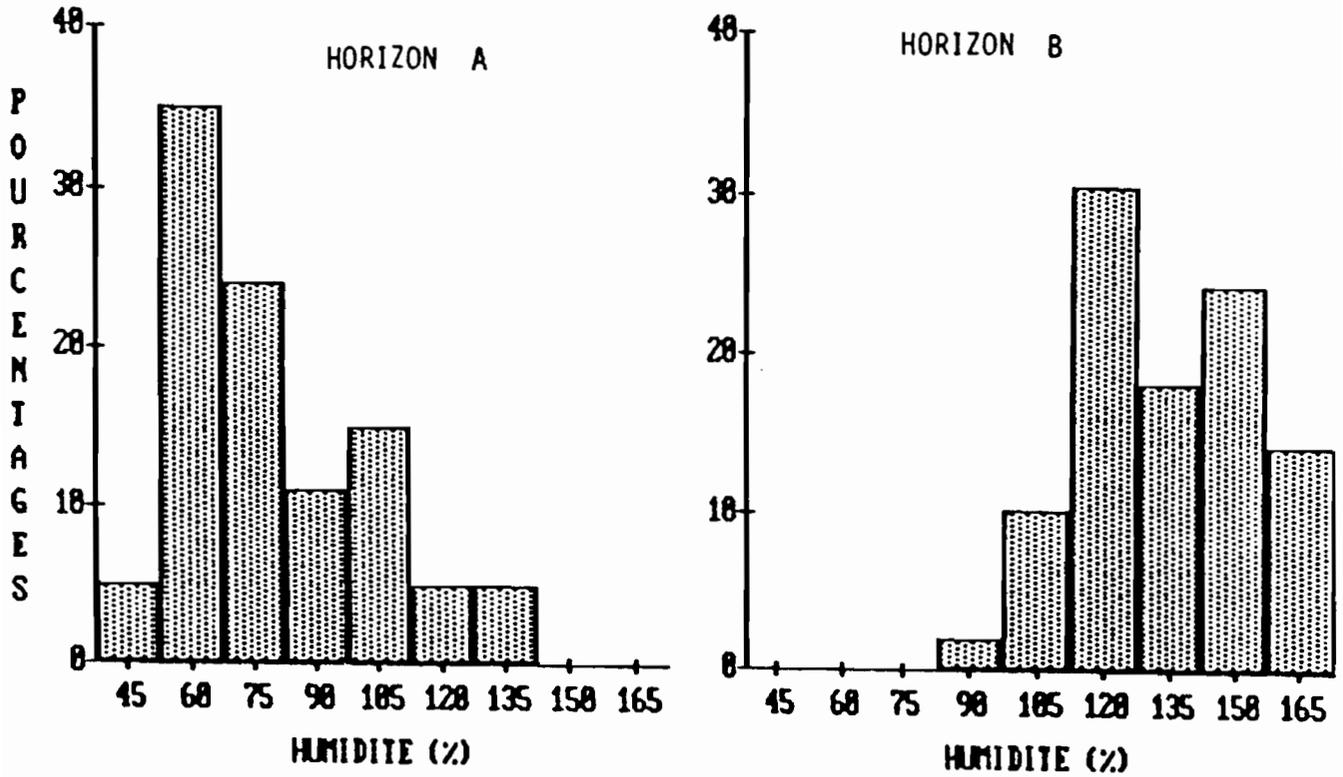
Comparaison du retrait sur sol frais, sol séché à l'air et sol de surface. Site de Trois Bassins.

Profil type de l'évolution des masses volumiques apparentes sèches avec la profondeur sur l'andosol de Trois Bassins.



Courbe de retrait réalisée sur un profil de Trois Bassins, à partir d'échantillons non remaniés.

Histogrammes des fréquences de teneurs en eau sur les horizons A et B du site de Trois Bassins.



Courbe de retrait réalisée à partir d'échantillons de Trois Bassins non remaniés et d'humidité variable.

QUELQUES PROPRIETES RHEOLOGIQUES DES ANDOSOLS DE LA REUNION

Marinus BROUWERS
Michel FORTIER

QUELQUES PROPRIÉTÉS RHEOLOGIQUES
DES ANDOSOLS DE LA REUNION
EN LIAISON AVEC LEUR UTILISATION AGRICOLE

M. BROUWERS - M. FORTIER

1° INTRODUCTION

Cette opération concerne actuellement essentiellement l'île de la Réunion dont les sols, dérivant de matériaux volcaniques, présentent une grande diversité liée à l'âge, l'altitude et la pluviométrie.

Les propriétés physiques des sols andiques ont été étudiées par divers auteurs, mais les résultats obtenus restent cependant soit trop généraux, soit trop fondamentaux.

Si l'on veut s'intéresser à la gestion des sols, il est nécessaire de les caractériser d'une manière plus spécifique correspondant aux problèmes rencontrés tels que la mise en état des terres, la conservation des sols, les techniques culturales ou l'irrigation.

Outre les déterminations systématiques (granulométrie, densité réelle, densité apparente, humidité aux différents pF), nous nous sommes intéressés cette année à caractériser les sols du point de vue de l'accessibilité au terrain en déterminant les limites d'Atterberg et en testant une méthode d'évaluation des limites de traficabilité.

2° MATÉRIELS ET MÉTHODES

A - Matériel

Quatre profils de nature pédologique différente ont été prélevés en saison sèche sur les sites suivants :

- TROIS BASSINS - Andosol peu hydraté sur cendres
(altitude 1 000 m)

0 - 5 cm A
10 - 40 cm B21
55 - 80 cm B22
90 - 105 cm B3

- TERRE ROUGE - Sol brun andique sur cendres
(altitude 310 m)

0 - 25 cm Ap
40 - 60 cm B12
100 - 120 cm B3

- SAINT GILLES - Sol brun sur cendres
(altitude 450 m)

0 - 15 cm Ap
25 - 40 cm A12
50 - 70 cm AB
90 - 110 cm B

- BEAULIEU
(altitude 60 m) - Sol peu évolué sur colluvions grossières
(climat perhumide)

2 - 20 cm A
20 - 40 cm C
50 - 80 cm C

S'agissant de matériaux andiques, les échantillons ont été conservés à leur humidité initiale et en chambre froide.

B - Méthodes

Les analyses classiques ont été réalisées selon les protocoles usuels sauf les limites d'Atterberg, déterminées sur le mortier des échantillons maintenus à leur humidité initiale.

Limites de traficabilité

Suite aux travaux de PERDOCK (1982), et considérant que dans un sol un taux d'air de 10 % est le minimum indispensable aux échanges gazeux nécessaires au bon développement végétatif (KMOCH, 1962 ; TROUSE, 1965 ; HENIN, 1976), on définit les limites de traficabilité comme étant les couples pression-humidité aboutissant à l'obtention de ce taux. La pente de la relation pression limite-humidité caractérise alors la sensibilité au tassement du sol.

Dans des cylindres de prélèvement de 100 cm³, les sols sont amenés à une densité apparente voisine de celle observée sur le terrain. Préalablement saturés, ils sont ensuite soumis à des tensions correspondantes à des pF de 1.8 - 2.0 - 2.5 - 3.0. A chaque valeur de pF, les échantillons sont transportés sur un bâti de consolidation où leur est appliquée une série de charges normales équivalentes à des pressions de 1.27 - 2.55 - 3.82 - 5.09 bars. Chaque contrainte est appliquée durant cinq minutes, et suivie d'une relaxation de durée identique. Pendant les périodes de compression et de relaxation, les variations de hauteur de l'échantillon sont contrôlées à l'aide d'un comparateur. Après relaxation, une mesure de la perméabilité intrinsèque à l'air est effectuée avec l'appareil mis au point par KMOCH. Les contrôles d'humidité sont réalisés par pesées au cours de chaque phase du test.

3° RESULTATS - DISCUSSION

Les caractéristiques analytiques sont indiquées aux tableaux 1 et 2. L'analyse des résultats ne sera faite que sur les échantillons pour lesquels la totalité des déterminations a été effectuée, soit pour les sites de Trois Bassins et de Terre Rouge.

A - Propriétés hydriques

L'humidité des échantillons, prélevés en saison sèche, indique la limite supérieure de l'eau utilisable par les plantes. On peut estimer qu'elle correspond à un pF d'environ 3.5 pour le site de Terre Rouge et de 3.0 pour le site de Trois Bassins. Il est donc erroné pour des sols andiques de calculer une réserve utile en prenant le pF 4.2 comme référence, ce qui est conforté par les observations de BROUWERS (1982) et les études de ROSELLO (1984) montrant que l'irréversibilité des modifications structurales liées aux contraintes hydriques commence à partir de pF 4.0.

Les relations $\psi = f(t)$ obtenues par JOUVE (1984) (Fig. 1) montrent que deux jours après irrigation, entre 35 et 65 cm de profondeur, ces sols se trouvent approximativement à pF 1.8, et qu'il faut attendre au moins huit jours pour qu'ils atteignent pF 2.0 (Fig. 1). On est donc fondé

à estimer l'eau utile entre l'humidité à pF 1.8 et l'humidité en saison sèche, et considérer que la limite de l'eau facilement utilisable se situe aux alentours de pF 3.0.

L'observation des résultats d'humidité aux différents pF sur sol en vrac et sur cylindre (sol reconstitué) fait bien ressortir l'influence de la structure (surtout à faible pF), ce qui rend inopérentes les mesures classiques sur sol en vrac (Tableau 3).

Si l'on considère comme semblable la structure du sol naturel et du sol reconstitué, l'humidité aux différents pF nous permet de déterminer la distribution de l'espace poral (Tableau 4) et de constater que les fortes porosités totales observées ne correspondent pas à une qualité agronomique, 50 % au moins du volume des pores étant indisponible (Tableau 5).

Mise en relation avec les courbes $K = f(h)$ des deux sites (Fig. 2) la caractérisation de l'espace poral permet de mieux comprendre la décroissance brutale de la perméabilité si l'on considère le sol constitué d'agrégats ayant une grande teneur en eau fortement liée et d'une porosité interstitielle à vidange rapide comme le suggère la Figure 3.

L'eau contenue dans la microporosité ne participe donc pas à la dynamique des écoulements.

B - Propriétés mécaniques

a) Limites d'Atterberg (Tableau 2)

Une caractéristique des andosols notée par plusieurs auteurs (CHEVIN, WESLEY cités par ROSELLO) est de se situer en dessous de la ligne A sur le diagramme de plasticité de Casagrande (Fig. 4). Les valeurs élevées des limites de plasticité et de liquidité sont dues principalement aux importantes surfaces spécifiques des composés amorphes et à la proportion relative entre ceux-ci et les minéraux argileux, même si la matière organique contribue à la rétention en eau (ROSELLO).

Situant nos échantillons sur ce diagramme, on vérifie que le site de Trois Bassins correspond bien à un andosol, et que les sites de Terre Rouge Beaulieu et Saint Gilles se définissent comme des matériaux plus évolués à caractère andique. Les sols sont généralement qualifiés de plastique, ce qui leur confère une bonne aptitude au travail du sol.

La destruction totale des matériaux, inhérente à la détermination des limites d'Atterberg, rend toutefois délicate la correspondance avec les humidités de matériaux structurés.

Il serait bon d'établir la concordance entre celles-ci par l'observation des conditions hydriques lors des travaux culturaux et la qualité du travail résultant.

La valeur des limites de retrait étant toujours inférieure à l'humidité en saison sèche, cette limite perd beaucoup de son intérêt, et demanderait pour être exploitée correctement, de suivre l'évolution des

variations de volume en fonction de l'humidité par des mesures ponctuelles et non par l'utilisation de la formule classique comme cela a été le cas dans cette étude. La variation volumique déterminée par rapport à l'humidité en saison sèche pouvant être alors une information complémentaire à la travaillabilité du sol.

b) Limites de traficabilité

Les principaux résultats quant aux variations du taux d'air et de la perméabilité à l'air en fonction de l'humidité et de la charge appliquée sont fournis au tableau 6.

Pour chaque humidité et séquence de contrainte, on recherche graphiquement la valeur de la pression correspondante à un taux d'air de 10 % (Fig. 5 a, b, c et Tableau 7).

Ces pressions limites varient avec les sols et ne correspondent pas à un même potentiel hydrique, ce qui nous incite à définir la sensibilité au tassement comme la pente de la relation pression limite admissible - humidité pondérale (Fig. 7). Dans ces conditions, la pente la plus faible indique la plus grande sensibilité au tassement. Nous obtenons ainsi le classement suivant :

<u>Echantillons</u>	<u>Pente</u>
TR 10 - 20	0.62
TR 40 - 60	0.40
TB 10 - 40	0.14

L'andosol de Trois Bassins apparaît donc comme le plus sensible, l'horizon de surface de Terre Rouge ne semblant pas présenter de risque.

La perméabilité à l'air, tous pF et charges confondus, est bien corrélée au taux d'air volumique (Fig. 6). Dans la mesure où sa valeur ne serait pas biaisée par les séquences de compression-relaxation, la pente des courbes obtenues correspondrait à l'évolution de la tortuosité du système poral. On constate d'autre part que le taux d'air de 10 % pris comme référence, est en bonne concordance avec une valeur de perméabilité à l'air de $1 \mu m^2$ utilisée par PERDOCK lors de ses travaux. Pour 10 % d'air, nous obtenons en moyenne $0,995 \mu m^2$ de perméabilité, ce qui nous permet d'utiliser l'un ou l'autre de ces paramètres comme facteur explicatif. Toutefois, la mesure du taux d'air est plus facile à réaliser et surtout moins variante que la perméabilité à l'air très affectée par l'état de surface du matériau.

Réalisés sur des échantillons remaniés subissant des compressions uniaxiales en milieu fretté, les résultats obtenus par ce test de comportement sont encourageants quant à la portée pratique que l'on peut en attendre. Ils permettent en effet de classer les sols en fonction de leur aptitude à la traficabilité et d'orienter ainsi le choix et les conditions d'emploi des matériels.

4° CONCLUSION

La conclusion générale que l'on peut tirer de cette étude est en parfait accord avec celle de ROSELLO.

Ce n'est que par l'étude de l'organisation structurale des matériaux que l'on peut appréhender le comportement des propriétés physiques et mécaniques des sols à caractère anisotrope.

Ainsi, les observations concernant le ressuyage ou la perméabilité, l'évolution de la compacité du sol sous contrainte et la qualité de la réserve utile s'expliquent fort bien par rapport à la distribution de l'espace poral. Si le caractère explicatif de l'organisation structurale est attrayant, nous ne possédons cependant pas assez de mesures de terrain pour le rendre déterminant.

D'un point de vue technique, il semble évident d'abandonner les mesures d'humidité aux différents pF sur échantillons en vrac. Quant aux limites d'Atterberg, et considérant la gamme des humidités rencontrées sur le terrain, elles ne paraissent pas, pour l'instant, présenter un réel intérêt.

L'observation des conditions hydriques lors des travaux culturaux et la qualité du travail résultant devraient être un meilleur critère d'appréciation de la travaillabilité des sols. Il en est de même pour la traficabilité dont la concordance entre les effets d'application de contraintes en milieu fretté et sur le terrain doit être réalisée afin d'améliorer son caractère opérationnel.

D'un point de vue prospectif, si la concordance entre les relations $\Psi = f(\theta_w)$ réalisées sur cylindre de prélèvement et sur le terrain apparaît acceptable, cela pourrait simplifier considérablement les problèmes liés à l'étalonnage de la sonde neutronique.

BIBLIOGRAPHIE

BROUWERS M., 1982

Le milieu physique et les sols de la zone de moyenne altitude
de Saint-Paul - Aptitude à la canne à sucre
Rapport D.D.A. - Département de la Réunion

HENIN S., 1976

Cours de Physique du Sol - Tome I
ORSTOM-EDITEST, 159 p.

JOUVE S., 1984

Caractéristiques hydriques et hydrodynamiques de deux types de sol
(andosol - sol brun à caractère andique)
Rapport de stage de fin d'études - Licence de gestion de l'eau
Université d'Avignon - Septembre 1984

KMOCH H.G., 1961

Die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit des Bodens und ihre Bedeutung für
einige ackerliche Problem
Verlag Gebr - Bornträger, Berlin, 90 p.

PERDOCK U.D., HENDRIKSE L.M., 1982

Workability test procedure for arable land.
Proc., 9 th conf. ISTRO, OSIJEK, Yugoslavia

ROSELLO V., 1984

Les sols bruns des Hauts - Ile de la Réunion
Caractérisation minéralogique et microstructurale de matériaux andosoliques ;
Reconnaissance expérimentale de leur comportement
Thèse de doctorat de spécialité en géologie appliquée.
Université Paris VII - UER Sciences physiques de la Terre

TROUSE A.C., 1965

Effects of soil compression on the development of sugar cane roots.
Proc. 12 th congress, ISSCT Puerto Rico, 1965, 137-152

TABLEAU 1

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MATERIAUX

Echantillons	Humidité initiale %	Terre en vrac			Cylindre de 100 cm ³				Densité réelle	Porosité totale %
		pF 2.0	pF 3.0	pF 4.2	pF 1.8	pF 2.0	pF 2.5	pF 3.0		
TROIS BASSINS										
. 0 - 5 cm	48.45	73.3	53.8	40.1	-	-	-	-	2.59	71.8
. 10 - 40 cm	135.25	173.6	139.6	121.7	150.1	142.7	141.1	135.3	2.37	81.0
. 55 - 80 cm	118.57	146.6	122.0	108.7	-	-	-	-	2.51	84.0
. 90 - 105 cm	125.16	149.5	128.4	92.9	-	-	-	-	2.57	81.7
TERRE ROUGE										
. 0 - 25 cm	35.75	45.0	37.0	31.6	45.3	42.3	39.5	37.0	2.80	63.6
. 40 - 60 cm	51.50	61.9	52.6	47.2	58.1	56.4	54.7	53.2	2.81	66.9
. 100 - 120 cm	52.12	60.5	53.2	49.0	-	-	-	-	2.74	68.2
SAINT GILLES										
. 0 - 15 cm	21.41	36.7	30.0	25.6	-	-	-	-	2.82	57.1
. 25 - 40 cm	27.97	43.7	36.4	32.4	-	-	-	-	2.92	-
. 50 - 70 cm	30.20	42.9	36.6	32.3	-	-	-	-	3.02	-
. 90 - 110 cm	41.12	50.4	43.7	40.6	-	-	-	-	2.76	60.5
BEAULIEU										
. 2 - 20 cm	45.38	47.3	37.1	30.1	-	-	-	-	2.79	-
. 20 - 40 cm	42.90	46.5	40.0	29.5	-	-	-	-	2.84	-
. 50 - 80 cm	43.83	46.9	40.6	30.3	-	-	-	-	2.58	-

- Humidité en % pondéral

TABLEAU 2

LIMITES D'ATTERBERG

Echantillons	LL	LP	LR	Ip	Variation Volumique %
TROIS BASSINS					
. 0 - 5 cm	94.5	-	53.8	-	32.6
. 10 - 40 cm	186.2	169.2	23.4	17.0	73.0
. 55 - 80 cm	155.6	130.8	22.0	24.9	70.3
. 90 - 105 cm	165.7	140.4	21.8	25.3	71.3
TERRE ROUGE					
. 0 - 25 cm	69.1	49.4	24.5	19.7	44.2
. 40 - 60 cm	81.4	69.6	25.8	11.8	48.3
. 100 - 120 cm	81.3	63.9	27.3	17.4	45.6
SAINT GILLES					
. 0 - 15 cm	55.7	40.8	17.9	14.9	38.9
. 25 - 40 cm	67.0	49.1	21.6	17.9	44.5
. 50 - 70 cm	61.1	49.0	20.6	12.1	43.4
. 90 - 110 cm	70.5	55.3	21.8	15.2	44.7
BEAULIEU					
. 2 - 20 cm	68.5	52.5	27.6	16.0	38.8
. 20 - 40 cm	69.2	48.7	26.1	20.5	41.7
. 50 - 80 cm	59.3	46.6	30.6	12.7	31.5

TABLEAU 3

RESERVE UTILE (mm par cm de sol)
- entre pF 2.0 et l'humidité en saison sèche -

Echantillons	Vrac	Cylindre
TR 10 - 20	0.917	0.649
TR 40 - 60	1.291	0.400
TB 10 - 40	1.381	0.300

TABLEAU 4

DISTRIBUTION DE L'ESPACE PORAL
(en % volumique)

Diamètre des pores (μm)	> 47	47 - 30	30 - 9	9 - 3	3 - 0.2	< 0.2
TR 10 - 20	19.7	3.0	2.8	2.4	5.4	31.3
TR 40 - 60	23.4	1.4	1.4	1.2	4.9	38.6
TB 10 - 40	14.0	3.3	0.7	2.6	6.6	53.9

TABLEAU 5

POURCENTAGES CUMULES DE LA POROSITE

Diamètre des pores (μm)	> 47	> 30	> 9	> 3	> 0.2	> 0
TR 10 - 20	30.5	35.1	39.4	43.1	51.4	100
TR 40 - 60	33.0	35.0	37.0	38.7	45.6	100
TB 10 - 40	17.3	21.4	22.3	25.5	33.6	100

TABLEAU 6

POURCENTAGE D'AIR ET PERMEABILITE INTRINSEQUE A L'AIR
DES ECHANTILLONS EN FONCTION DE LA CHARGE APPLIQUEE ET DE L'HUMIDITE

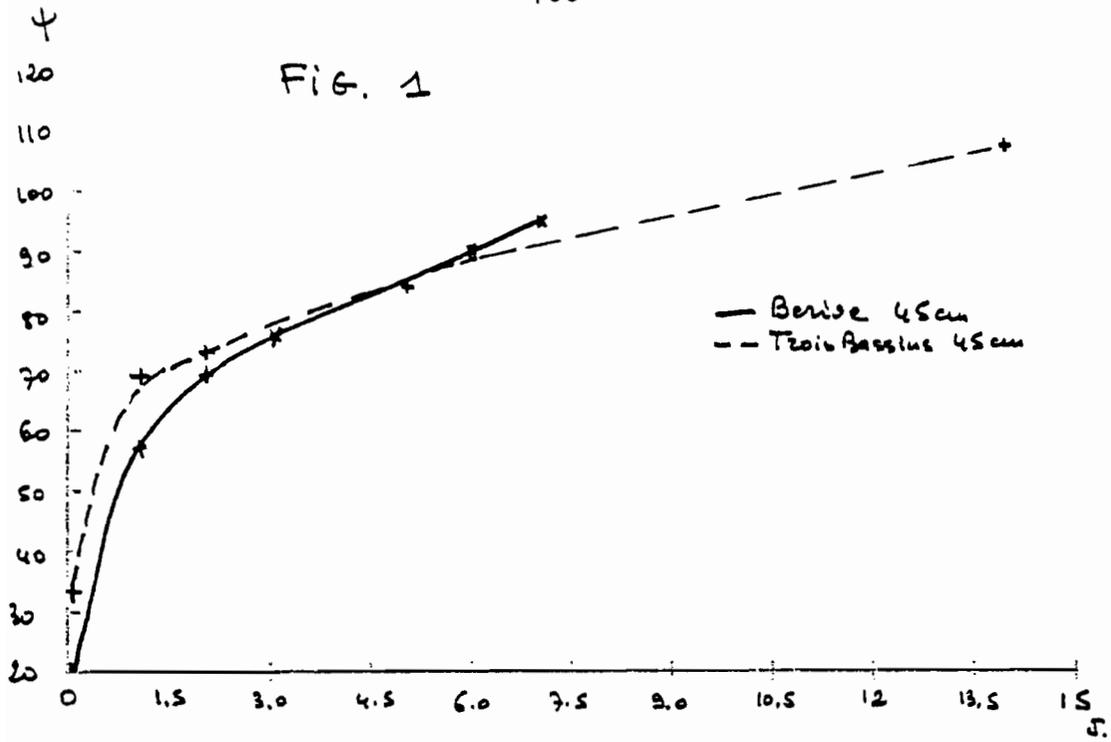
Echantillon	pF	Humidité pondérale %	CHARGE APPLIQUEE (bar)									
			0		1.27		2.55		3.82		5.09	
			Air %	K_1 μm^2	Air %	K_1 μm^2	Air %	K_1 μm^2	Air %	K_1 μm^2	Air %	K_1 μm^2
TR 10 - 20	1.8	45.3	17.79	8.89	1.61	4.16	0.05	2.57	-	1.40	-	
	2.0	42.3	22.58	15.09	5.82	8.84	1.07	5.04	0.09	2.56	-	
	2.5	39.5	25.80	20.35	11.20	14.19	2.98	10.36	0.98	7.14	0.37	
	3.0	37.0	28.72	24.59	16.50	18.83	5.73	15.03	2.23	11.97	0.92	
TR 40 - 60	1.8	58.1	23.01	13.68	5.16	6.15	0.18	1.67	-	0.33	-	
	2.0	56.4	24.52	17.53	9.44	9.65	1.37	4.43	0.13	1.45	-	
	2.5	54.7	26.01	20.52	13.36	12.49	2.27	7.09	0.41	2.92	0.04	
	3.0	53.2	27.22	23.35	17.96	15.84	4.12	10.17	0.87	6.09	0.20	
TB 10 - 40	1.8	150.1	13.83	9.19	0.51	3.51	0.01	2.37	-	0.80	-	
	2.0	142.7	16.90	13.50	2.77	4.36	0.03	2.21	-	0.97	-	
	2.5	141.1	18.14	15.54	4.34	6.04	0.34	2.13	0.02	0.56	-	
	3.0	135.3	21.13	19.31	5.57	12.18	1.04	7.33	0.18	2.65	0.03	

TABLEAU 7

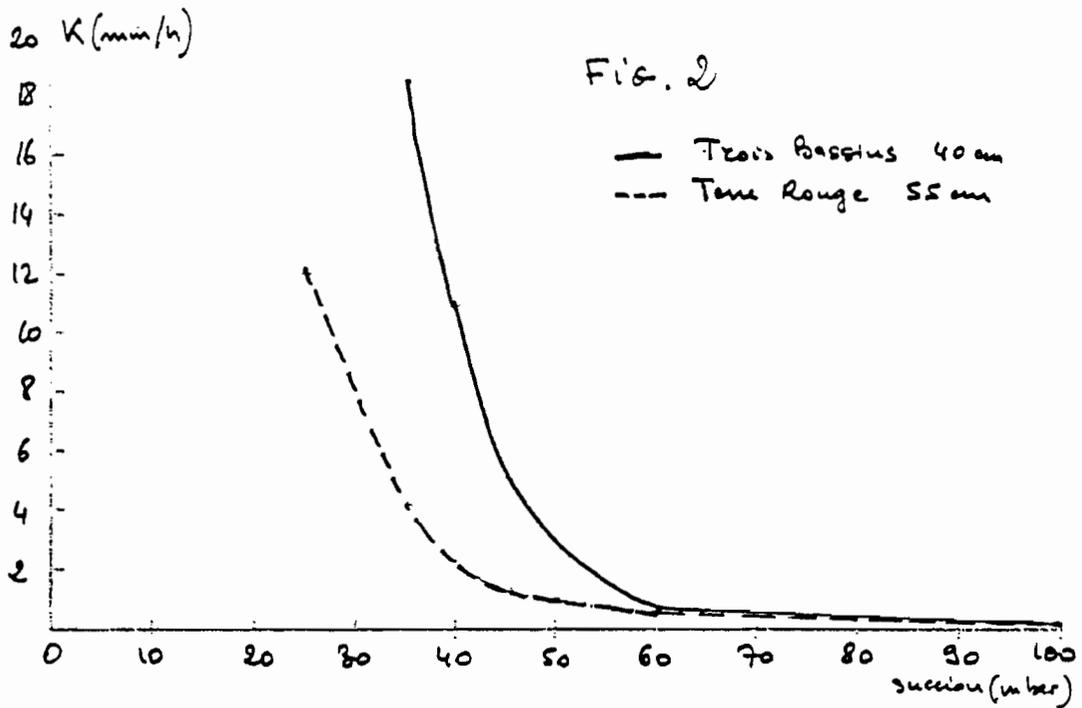
PRESSION LIMITE ADMISSIBLE (bar) en fonction du pF

Echantillon	pF 1.8	pF 2.0	pF 2.5	pF 3.0
TR 10 - 20	1.09	2.30	3.92	* 6.35
TR 40 - 60	1.89	2.45	3.10	3.89
TB 10 - 40	1.02	1.74	2.00	3.06

* valeur extrapolée.



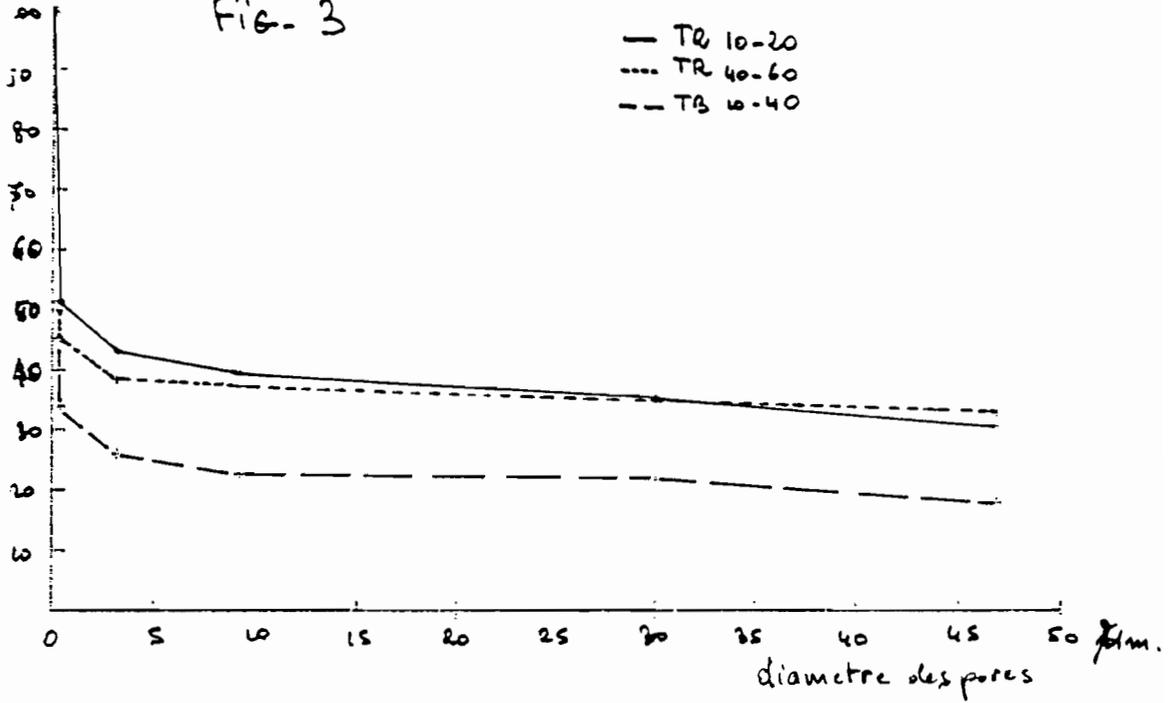
RESSUYAGE (courbes réalisées à partir des données de JOURE)



CONDUCTIVITE HYDRIQUE
(courbes réalisées à partir des données de JOURE)

% cumulé de la porosité totale.

Fig. 3



BERIVE-TROIS BASSINS

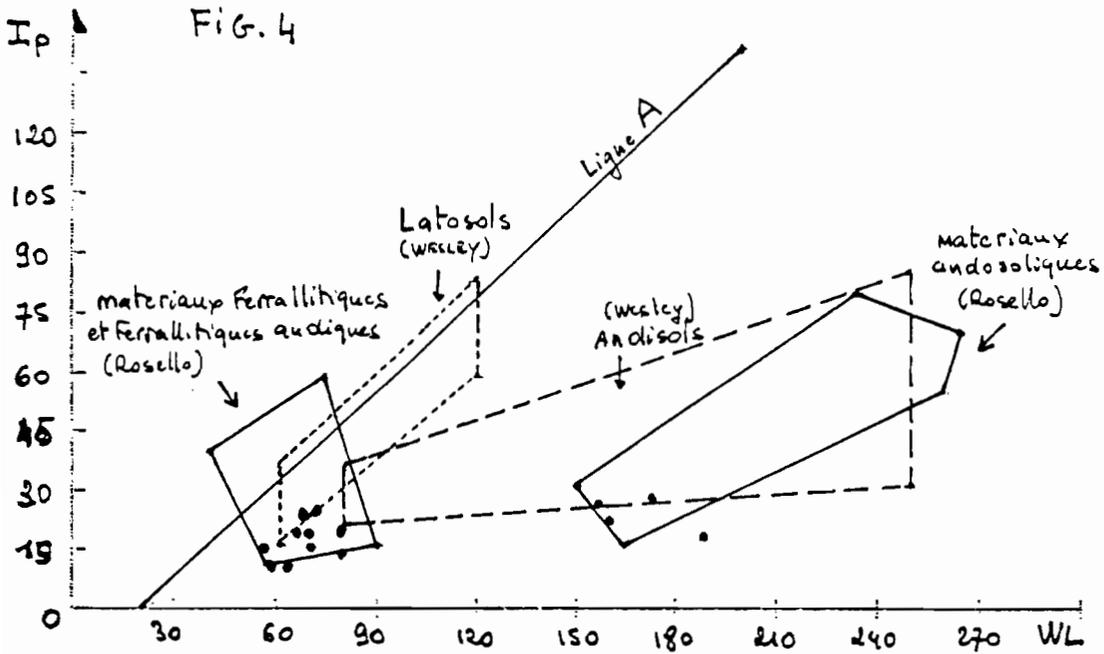
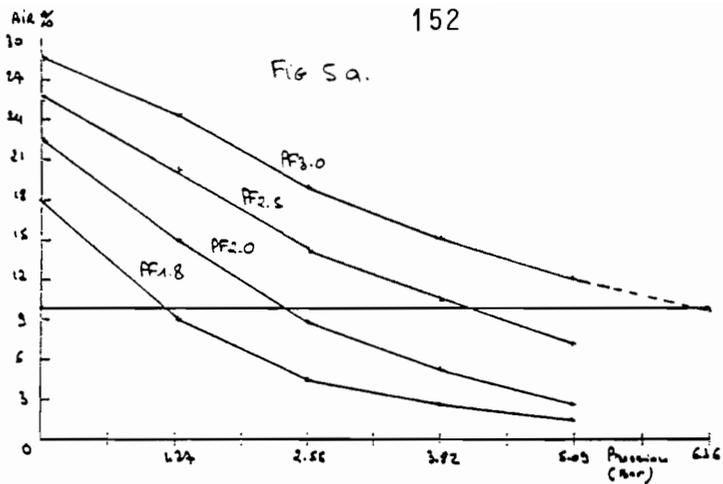
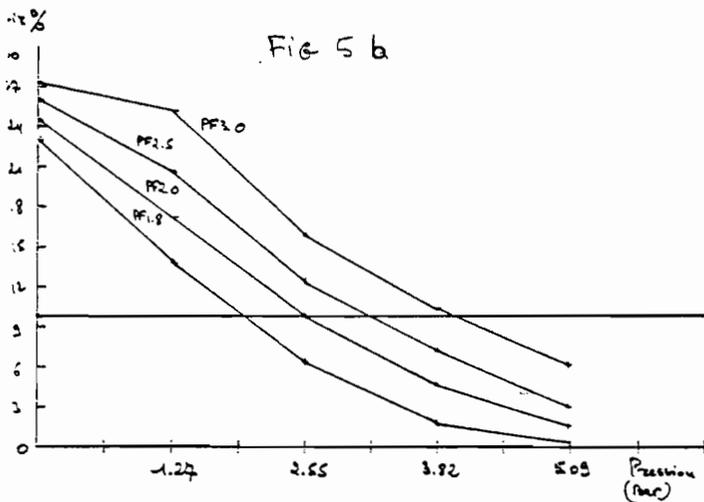


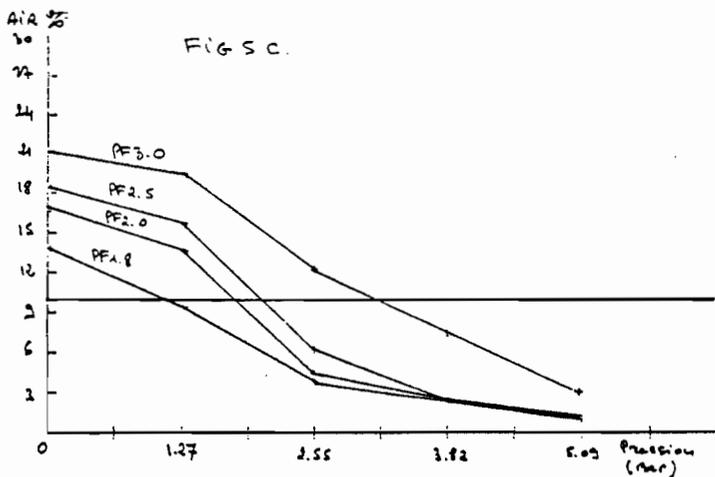
DIAGRAMME DE PLASTICITE (CASAGRANDE)



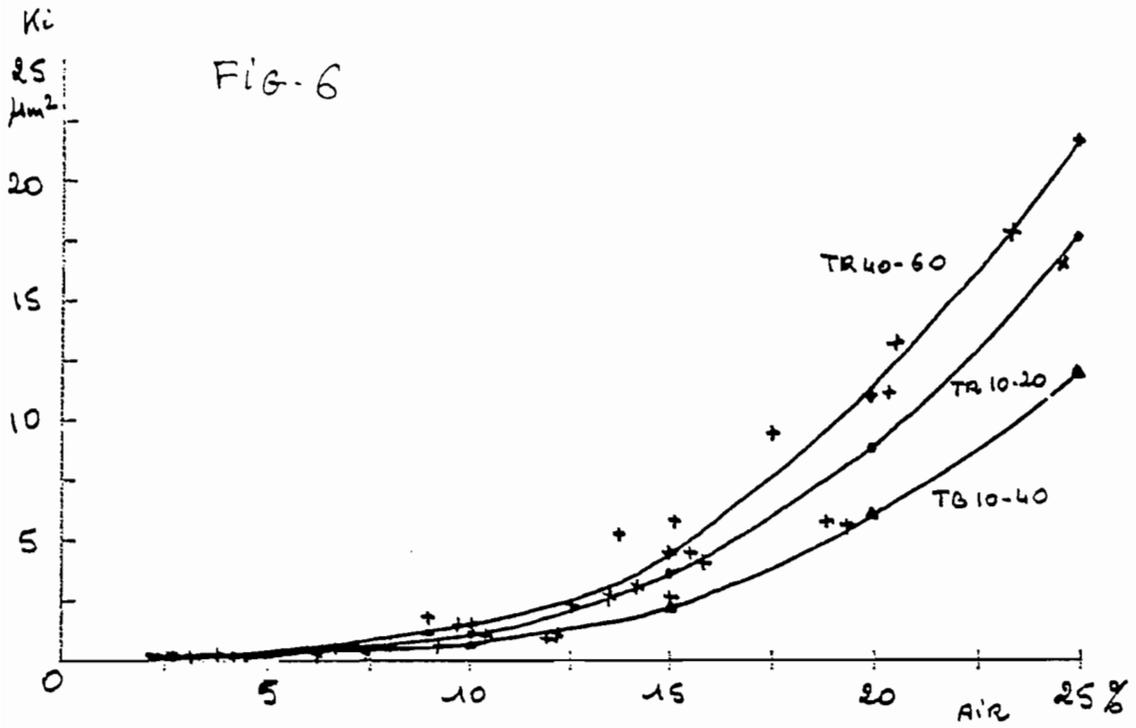
TERRE ROUGE 10-20CM



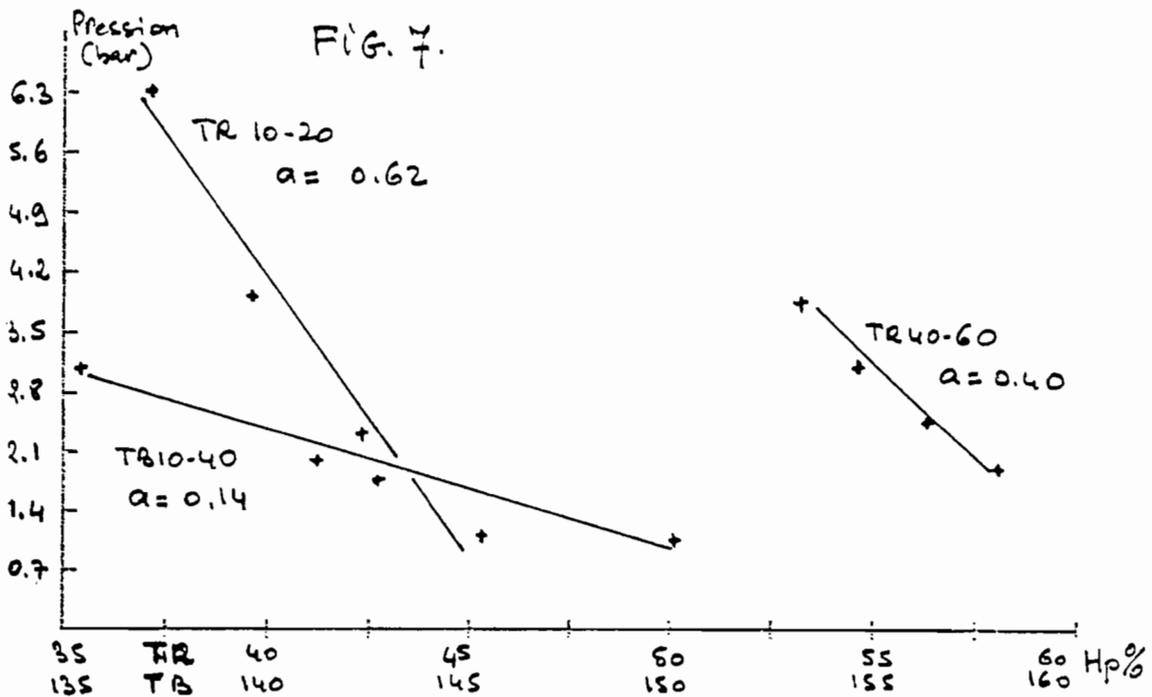
TERRE ROUGE 40-60CM



TROIS BASSINS 10-40CM



RELATION PERMEABILITE A L'AIR-TAUX D'AIR



SENSIBILITE AU TASSEMENT

APERÇU SUR L'ÉRODIBILITÉ
DES ANDOSOLS
CULTIVÉS À LA REUNION

Jacques BOUGERE

APERCU SUR L'ERODIBILITE
DES ANDOSOLS CULTIVES
A LA REUNION

J. BOUGERE

Les trois années de mesures de l'érosion sur parcelles ont été riches d'enseignement. Ces mesures ont été effectuées à Trois-Bassins sur quatre parcelles sur andosols désaturés non perhydratés, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- P1 : parcelle de référence sarclée régulièrement ; pente 9 degrés,
- P2 : parcelle cultivée manuellement ; pente 9 degrés,
- P3 : parcelle travaillée en mécanisation minimum ; pente 10,5 degrés,
- P4 : parcelle travaillée en labour à 40 cm ; pente 7 degrés.

Les principales observations que nous pouvons faire après ce temps de travail sont les suivantes :

- les andosols sont particulièrement sensibles à l'érosion par la pluie dès que la structure a été dérangée,
 - un type d'érosion spécifique semble exister sous forme d'agrégats non détruits par le transport par le ruissellement,
 - une modification des produits transportés s'est opérée en quatre ans, amenant des produits plus grossiers.
-

I - SENSIBILITE DES ANDOSOLS A L'ENERGIE PLUVIALE

La sensibilité des sols andiques à l'érosion dépend du stade de dérangement des particules du sol et de l'intensité du travail du sol. Sur P1, le travail du sol est toujours le même et les résultats dépendent de l'intensité maximum en 30 mn avec des écarts provenant principalement de la durée de la pluie (cyclones ou dépression tropicale) ou de l'humidité préalable du sol pour les pluies plus courtes : les pluies orageuses de début ou de fin de saison des pluies sont régulières dans leur occurrence et particulièrement efficaces pour l'érosion.

Les pluies d'orage de mars 1985 ont donné 9,2 t/ha sur 1 avec 103 mm de pluie alors que les précipitations de la dépression "Celestina" avaient été de 601 mm occasionnant seulement 0,4 t/ha, en janvier de la même année. De même, deux dépressions tropicales peuvent donner des résultats différents suivant l'intensité :

- 14/20-02-85 Celestina I_{max}/30 mm : 16,0 Erosion : 0,4 t/ha
- 09/16-02-87 Clotilda I_{max}/30 mm : 32,0 Erosion : 60,5 t/ha

Le travail du sol est également un facteur déterminant : les phases de début de cycle cultural et les périodes post-récoltes sont souvent des moments critiques ; en 1985, après une récolte de maïs sur P3, 3,5 t/ha sont parties contre 0,018 pour P2 (28 fév.) et le travail en cours de cycle peut avoir les mêmes résultats si des pluies a forte intensité interviennent aussitôt après. En 1987, à la suite d'un sarclage en plein sur P2 (cultivée manuellement !), deux pluies ont donné 43,6 t/ha avec des intensités faibles (28 et 29,5 mm/30 mn).

L'exemple le plus frappant de l'influence du travail du sol est celui de la parcelle P3, après la récolte de pommes de terre de la seconde semaine de février 1988. Comme d'habitude, des pluies orageuses se sont produites à cette époque, trois jours de suite : le 15/2 : 61 mm, le 16/02 : 47 mm et le 17/02 : 121 mm ; les intensités ont été respectivement de 23, 16 et 42,5 mm/30 mn. Le sol était préalablement très humide : pendant les trois semaines précédentes, il était tombé 50,5 mm, 46 mm et 61 mm.

L'érosion consécutive aux trois averses citées a été pour la parcelle concernée de 4,21 t pour les 100 m² soit un équivalent de 421 t/ha si l'on généralise le résultat. Pendant ce même temps, les autres parcelles ont eu des chiffres plus modestes ; la parcelle P4 pourtant labourée, mais non récoltée cette semaine là, n'a rien fourni, la P2, cultivée en traditionnel a donné 38 t/ha et la P1, parcelle de référence régulièrement sarclée a fourni 180 t/ha.

L'érosion est donc principalement le fait des averses orageuses à forte intensité ou des pluies cycloniques d'intensité moindre mais de longue durée engendrant des ruissellements importants. La parcelle P3 est la plus sensible bien que la mécanisation y soit réduite au minimum (sillonage direct) parce que la pente y est la plus forte.

II - UNE FORME SPECIFIQUE D'EROSION DES ANDOSOLS

Les analyses granulométriques effectuées en 1984-85 avaient montré une très grande proportion de sables (plus de 50 % en général) dans les produits érodés recueillis dans les cuves. Les granulométries effectuées sur des échantillons de sol prélevés dans le cadre de profils classiques avaient montré des valeurs nettement inférieures, surtout lorsque les échantillons avaient été laissés à leur état d'humidité naturelle.

		% de sables dans échantillon	
		séché à l'air	humidité naturelle
Trois-Bassins	87,45	28,21	
	84,30	20,97	
Beaumont-Ste Marie	81,30	48,64	
	77,40	46,01	

Le problème a été repris lors de l'arrivée de l'appareil à ultra-sons qui a permis une plus grande dispersion des agrégats classés suivant leur taille ; il s'est avéré qu'en effet les "sables" n'étaient que des agrégats de taille variable et variée ; une fois passés aux

ultra-sons, les pourcentages de sables sont tombés à des valeurs comprises entre 16 et 20 %.

Ceci vient de la très forte stabilité structurale des agrégats vis-à-vis de l'eau, stabilité renforcée par la dessiccation saisonnière de surface.

Cette observation montre aussi qu'il ne faut pas se leurrer sur la stabilité structurale des andosols : ce sont les agrégats qui sont stables, mais lorsque l'énergie cinétique de la pluie intervient après dessiccation saisonnière, le sol dans son ensemble ne manifeste plus aucune solidarité ; il y a individualisation du comportement de chaque agrégat.

III - MODIFICATION DES PRODUITS ERODES

Deux remarques peuvent être faites sur la qualité des produits érodés : la densité a augmenté en quatre ans et la taille des produits s'est accrue.

Les agrégats de dimension supérieure à 2 mm sont passés de 10-20 % en 1985 à des proportions de 30-50 % à partir de fin 1986 ; les agrégats de dimension comprise entre 1-2 mm et 0,5-1 mm sont restés stables, la perte s'est répercutée sur la dimension inférieure à 0,5 mm.

La densité des agrégats a augmenté depuis le début des observations passant de 1,05-1,38 à 2,08-2,11 en trois ans ; il semble que ceci soit le résultat du décapage de l'horizon A tel que nous avons pu l'observer sur le terrain ; actuellement le travail du sol permet, paraît-il de refaire des agrégats, mais ils n'ont pas la même qualité que les agrégats de surface ; ils ont perdu leur cohésion inter-agrégats, les proportions de sables grossiers ont augmenté de 50-77 % et leur densité plus forte montre qu'ils sont plus massifs : la porosité et la perméabilité ont donc diminué ce qui ne facilite sans doute pas l'enracinement.

La conclusion que nous tirons est que, dans l'état actuel des pentes et des bandes d'arrêt qui ont été façonnées, l'érosion est active et nécessite une révision des

calculs des ouvrages en fonction du comportement des andosols. Nous assistons actuellement à ce que les pédologues appellent pudiquement un "rajeunissement" des sols ce qui en clair signifie la disparition de l'horizon humifère : l'aménagement du territoire se transforme alors en déménagement. Il devient urgent de contrôler les méthodes et dispositifs anti-érosifs basés sur une observation fine du terrain et suivant le type de culture à pratiquer, associant les méthodes biologiques et mécaniques.

**PROBLEMATIQUE
EN MATIERE D'HYDRODYNAMIQUE
DANS LES ANDOSOLS DE LA REUNION**

Pierre LANGELLIER
Michel VAUCLIN

PROBLEMATIQUE
 EN MATIERE D'HYDRODYNAMIQUE
 DANS LES ANDOSOLS
 DE LA REUNION

P. LANGELLIER
 M. VAUCLIN

I - LES CONSTATS

- Mauvaise colonisation racinaire de l'horizon B,
- Très fortes humidités seulement en partie disponible pour les plantes,
- Variabilité spatiale importante des humidités pondérales,
- Variabilité temporelle observée en laboratoire des masses volumiques,
- Hydrodynamique spécifique (comparable à un sol sableux - influence de la variabilité de θ d sur les courbes $\psi(\theta)$),
- Difficultés de détermination des humidités remarquables (discordance entre les déterminations labo et les observations de terrains).

II - LES CONSEQUENCES

Les difficultés rencontrées sont de divers ordres :

- | | |
|-----------------|--|
| 1) métrologique | - étalonnage des appareils
- représentativité des mesures |
| 2) agronomique | - comportement des cultures |

- 3) hydrologique
- détermination des humidités remarquables
 - détermination des potentiels hydriques
 - disponibilité réelle de l'eau pour les plantes
 - relation $K-\theta$

III - LES QUESTIONS POSEES

1) Compte tenu d'une organisation microstructurales complexe, à plusieurs types de porosités imbriquées, conférant à ces sols des humidités importantes, la loi de DARCY continue-t-elle à s'appliquer ?

- En particulier, quel est le rôle de chaque type de porosité dans la circulation de l'eau et l'alimentation des plantes ?

- Comment l'eau est-elle redistribuée dans le milieu après une pluie ou une irrigation ? Quelle part devient inaccessible aux racines ?

2) Dans quelle mesure les variations de θ constatées au labo sont reproductibles sur le terrain, surtout dans l'horizon A et en fonction de la teneur en minéraux. Si elle apparaissait mesurbale, y a-t-il un lien avec l'enracinement ?

3) Peut-on lier la mauvaise colonisation racinaire de l'horizon B à :

- la microstructure,
- l'aération,
- un facteur chimique.

4) La variabilité doit-elle rester une valeur stochastique ou bien pourrait-on la caractériser par un paramètre physico-chimique (lui-même variable, mais sa présence permettrait a priori de prévoir une variabilité).

IV LES THEMES A ABORDER

La difficulté résidera dans l'étagement des sols. En effet, depuis les andosols perhydratés podzoliques d'altitude jusqu'aux sols bruns et aux sols ferralitiques à métalloalloysite, les propriétés physico-chimiques varient en fonction de la teneur en minéraux amorphes.

L'étude à réaliser doit s'appliquer non seulement en "stations" mais aussi sur une toposéquence afin de déterminer des gradients ou des seuils dans les évolutions de ces propriétés. Il ne faut pas perdre de vue que les cultures se répartissent sur cet ensemble.

- rôle des composants minéraux (surtout par leur structure microporeuse) sur les flux hydriques. Comportement en fonction des compositions relatives en minéraux amorphes.

- évolution de l'organisation microstructurale au cours de la dessiccation. Participation de chaque type de porosité. En laboratoire, et IN SITU pour faire le lien avec l'absorption racinaire.

- évolution des divers types de porosité dans l'horizon A en particulier sous l'effet des travaux cultureux. Conséquence sur le stockage de l'eau et sur les flux hydriques.

- à la limite, pourrait-on prévoir les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques par la seule connaissance des teneurs relatives en minéraux ?

- en conséquence de ces travaux, déduire les limites de la métrologie actuellement employée (sonde à neutrons, gamma densitomètre, tensiomètre) et le cas échéant, proposer d'autres méthodes plus fiables de suivi du bilan hydrique.

Compte tenu des connaissances déjà acquises sur le sujet, des échanges de vues et discussions menées lors du séminaire qui s'est tenu à l'Ile de la Réunion du 26 au 31 mai, ce programme, qui ne peut être que pluridisciplinaire, s'articule schématiquement autour de deux axes :

1) thématique englobant les aspects rhéologique, hydrodynamique et physico-chimique. Il est bien évident que ces différents aspects sont fortement couplés (notamment au niveau des bilans hydriques et minéraux, des pertes en sol) et il convient de les considérer comme tels et non séparément.

2) Spatial

Trois échelles d'observation et d'investigation scientifique doivent être envisagées :

- l'échelle microscopique (la sphérule, le pore) à laquelle il convient de se placer pour l'étude et la compréhension fines des mécanismes fondamentaux mis en jeu (cf. exposés de P. QUANTIN, et M. ROBERT, notamment).

- l'échelle macroscopique : (l'échantillon de sol au laboratoire, le profil de terrain). La complexité de la microstructure des andosols, les difficultés non surmontées à l'heure actuelle que posent la définition précise des domaines occupés par les différentes phases et la métrologie des variables et paramètres d'intérêt font que la description microscopique ne peut être mise en pratique qu'après un changement d'échelle dont l'étape essentielle conduit à définir un volume élémentaire représentatif, permettant d'établir une équivalence entre le milieu réel dispersé et un milieu fictif continu. A cette échelle, les phénomènes de transfert sont décrits, en moyenne par des équations dont les variables (i.e. humidité, pression, concentration) et les paramètres (i.e. conductivité hydraulique, coefficient de dispersion) sont représentatifs de grandeurs physiques moyennes au sein du Continuum de milieu poreux.

- L'échelle mégascopique (la parcelle, le paysage, etc...). A cette échelle, le sol est rarement uniforme et homogène et ses propriétés varient d'un "point macroscopique" à un autre. Etudier et modéliser les transferts, le comportement mécanique, nécessitent d'utiliser des concepts statistiques et géostatistiques et une description stochastique des paramètres pertinents.

A l'évidence, les différents aspects brièvement inventoriés ici, de façon non exhaustive, ont été abordés par l'ensemble des participants au Séminaire, en fonction de leur thématique propre et leur spécificité scientifique.

V - CONTRIBUTION DE L'INSTITUT DE MECANIQUE DE GRENOBLE

Pour sa part, l'Institut de Mécanique de Grenoble (groupé Hydrologie-Ressources en eau) peut apporter sa contribution à trois niveaux :

1. Etude de l'hydrodynamique sur échantillons de sols "non remaniés"

Il s'agit d'une part d'étudier les cinétiques d'infiltration et de drainage des andosols et d'autre part de déterminer leurs propriétés hydrauliques macroscopiques : relations entre la conductivité hydraulique, la pression de l'eau, l'humidité et l'indice des vides.

Le caractère déformable des andosols (cf. courbes de retrait publiées par Vacksman, 1987) nécessite l'utilisation de la spectrométrie gamma double - sources (Am 241, Cs 137), de pratique courante à l'IMG. On rappelle que cette méthode permet de mesurer simultanément et de façon non destructive les variations spatio-temporelles de l'humidité volumique et de la masse volumique d'échantillons de sol non remanié (diamètre 6 cm à 10 cm, hauteur maximum 50 cm). On s'attachera notamment à vérifier la validité de la Loi de Darcy, préalable indispensable pour la quantification des bilans hydriques et minéraux "in situ". Pour plus de détails, le lecteur peut consulter le document de synthèse "hydrodynamique dans les sols partiellement saturés, déformables", M. Vauclin, 1987) qui a fait l'objet d'une présentation orale au cours du séminaire.

Cette étude peut être réalisée dans le cadre d'un travail de thèse. A l'évidence, elle apparait complémentaire des actions menées par l'INRA-Versaille, le CEEMAT et indispensable pour mieux comprendre les écoulements qui seront observés sur le terrain.

2. Etude "in situ" des bilans hydriques et minéraux

La participation de l'IMG est envisagée en appui aux équipes locales tant au plan de la définition des protocoles expérimentaux que de l'analyse et l'interprétation des résultats.

i) A l'occasion d'un essai de caractérisation hydrodynamique (ou indépendamment), une expérience de traçage est souhaitée afin d'identifier les paramètres de transfert (dispersion hydrodynamique, échanges, adsorption, etc...) de certaines espèces chimiques. Les résultats fournis par un tel essai sont très riches d'informations tant au plan de la physico-chimie que du fonctionnement hydriques lui-même, mise en évidence possible et probable pour ce type de sol, de phases d'eau mobile et stagnante (cf. exposé de M. Vauclin).

Cette étude peut également faire l'objet d'un travail de thèse co-tutélaire (P.F. Chabalière/M. Vauclin).

ii) A l'échelle du profil de sol, il nous parait important de mieux cerner l'hydrodynamique des horizons A et B et plus particulièrement l'interface dont le comportement, encore mal compris, semble avoir une influence déterminante sur l'enracinement. Outre des expérimentations fines de

laboratoire (cf. précédemment), il paraît opportun de réaliser une étude in situ des transferts hydriques fondée sur la méthodologie neutro-tensiométrique, à condition de bien maîtriser l'étalonnage de l'humidimètre (variant avec la masse volumique) et d'équiper le profil en tensiomètres en veillant à bien cerner l'interface.

On rappelle qu'un gamma-densimètre de profondeur nous paraît indispensable notamment pour l'étalonnage de l'humidimètre neutronique.

3. Etude de la variabilité spatiale des propriétés hydro-physico-chimiques

Là encore, la participation de l'IMG se fera en collaboration avec les équipes locales et métropolitaines tant pour définir les plans d'échantillonnage que pour l'analyse des données par la géostatistique, en vue notamment de cartographier ces propriétés (krigeage et cokrigeage notamment).

Deux niveaux d'études nous semblent importants à considérer :

- au plan de la parcelle agronomique, il s'agit d'apprécier la représentativité spatiale des mesures locales des bilans, effectuées nécessairement en un nombre réduit de points. Cela peut être effectué, par la prise d'échantillons de sol à la tarière, selon un maillage régulier. Les données obtenues (i.e. teneur en eau, concentration de la solution du sol, etc...) sont analysées en termes de lois de distribution et de fonctions de structure. Cet échantillonnage réalisé à différents temps permet alors d'inférer une représentativité statistiques des mesures stationnelles et d'apprécier sa stabilité temporelle.

- au plan des toposéquences, la même analyse géostatistique peut être mise en oeuvre. En assimilant les variables et paramètres d'intérêt à des variables régionalisées, la méthode permet de mettre en évidence, les éventuelles composantes déterministes (liées par exemple au gradient topographique, climatique, à la pédogénèse, etc...) et stochastiques (bruit expérimental, variabilité à courte distance, etc...).

Il convient de noter que cette approche est riche d'informations, le prix à payer étant de pouvoir disposer d'un nombre suffisant de données (i.e. 30 sur une grille : 50

sur un transect.), topographiquement bien définies.

A titre indicatif, on pourra se reporter aux exemples suivants :

* "Spatial dependence and interpolation of soil properties in west Sumatra, Indonesia", B.B. Trangmar, R.S. Yost and G. Vehara, 1986

1. Anisotropic variation. SSSAJ, Vol 50 (1391-1395),
2. Co-regionalization and co-kriging. SSSAJ, Vol 50 (1396-1400).

Ces auteurs étudient et cartographient les propriétés suivantes : fractions granulométriques, pH du sol, P extractable (25 % HCl). Les résultats montrent clairement que la distribution spatiale non aléatoire et non isotrope de ces grandeurs est étroitement liée à la direction principale des dépôts volcaniques et au sens de la dégradation et l'altération régionale des sols.

* "Geostatistical analysis of Soil chemical properties of large land areas", R.S. Yost, G. Vehara and R.H. Fox, 1982

1. Semi-variograms. SSSAJ, Vol 46 (1028-1032),
2. Kriging. SSSAJ, Vol 46 (1033-1037).

Ces auteurs étudient, pour l'île d'Hawaï, la variabilité spatiale du pH du sol, du phosphore adsorbé et des cations échangeables (Ca, Mg, K, Na). Les résultats montrent à l'échelle de l'île, de grandes variations (distribution log-normale) non aléatoires de ces propriétés, liées pour une large part à la distribution spatiale de la pluviométrie annuelle.

Ces deux exemples, parmi d'autres, mais vraisemblablement assez voisins des conditions réunionnaises, nous semblent suffisants pour montrer l'intérêt d'une telle démarche et justifier une action de recherche dans cette voie, qui pourrait se faire dans le cadre d'une thèse (i.e. M. Raunet/M. Vauclin).

Les moyens, tant humains que matériels (équipement laboratoire, logiciels, etc...), que l'IMG peut mettre à disposition du programme, ayant été précisés lors de l'avant-projet, il nous paraît inutile de les rappeler ici.

QUELQUES PROBLEMATIQUES AGRONOMIQUES

Jean-Claude REMY

QUELQUES PROBLEMATIQUES

AGRONOMIQUES

1 - INTRODUCTION

L'Ile de la Réunion, 250 000 ha et 550 000 habitants, possède une agriculture orientée pour plus de la moitié vers la canne à sucre sur les 60 000 ha de SAU qui ne représente guère que le 1/4 de la surface d'un territoire au relief très montagneux.

L'objectif principal de la recherche consiste à mobiliser et à compléter l'ensemble des connaissances destinées à améliorer la mise en valeur des andosols et des sols andiques qui représentent plus de 60 % des terres cultivables de l'Ile.

Nous laisserons de côté les problèmes de gestion des sols proches du littoral, essentiellement valorisés par la canne à sucre, pour concentrer notre attention sur les sols cultivables compris entre 500 et 1500m appelés les "Hauts de l'Ouest" pouvant représenter une vingtaine de milliers d'hectares d'un tissu de très petites exploitations (2,2 ha en moyenne) pour lesquelles on peut craindre pour leur pérennité en raison de méthodes assez peu efficaces et surtout ne respectant pas la conservation du milieu.

Après quelques considérations sur la description du milieu, sur l'évolution des principaux critères de fertilité, nous proposerons quelques idées de protocoles expérimentaux permettant de répondre aux principales inquiétudes du moment.

2 - DESCRIPTION SOMMAIRE DU MILIEU

**Le Climat :*

Située à 21° de latitude Sud, le climat reste subtropical avec une très forte modulation par le relief, orientation par rapport aux vents dominants et influence de l'altitude.

La température moyenne sur le littoral oscille entre 21° jusqu'à 26° en Février, avec une amplitude thermique de 10° à 15°.

La durée du jour varie peu, mais l'écart de 2 heures environ est largement suffisant pour imprimer à la végétation un rythme saisonnier pour les différentes espèces. Une adaptation par voie génétique est d'ailleurs tout à fait possible. L'exemple du maïs le prouve.

L'utilisation de l'altitude pour faire varier la température sans modifier l'éclairement, hormis les différences de nébulosité sur le rayonnement global reçu, en fait un phytotron naturel que les scientifiques pourraient sans doute beaucoup mieux exploiter. C'est un peu ce qui est fait à la Station IRFA de Saint Pierre sur les espèces fruitières.

Dans la zone qui nous intéresse, on peut caractériser la pluviométrie par la relation :

$$P = 700 + A$$

P : Pluviométrie mm

A : Altitude (exprimée en m)

jusque vers 1 000 m. Au-dessus, la pluviométrie reste aux environs de 1 700 mm.

La pluie est très mal répartie dans le temps avec une saison cyclonique en Janvier Février, et une saison sèche d'autant plus marquée que l'altitude est basse, rendant indispensable l'irrigation. Le Régime cyclonique entraîne des intensités pluviométriques horaires très importantes avec une forte propension au ruissellement plutôt qu'à l'infiltration. Le fonctionnement hydraulique des nappes en est rendu très compliqué à gérer sur le plan des ressources en eau (protection et utilisation).

De vastes projets d'irrigation (récupération des eaux du cirque de Salazie) vont permettre une extension notable des périmètres irrigués dans l'Ouest. Une des questions d'importance est de connaître l'altitude maximale à laquelle l'eau sera disponible. Une étude pédologique détaillée des zones concernées devrait permettre d'ajuster le compromis entre le surcoût de l'installation et l'intérêt des zones récupérées pour l'irrigation.

**Les Sols Andiques et Andosols :*

La topographie est très mouvementée avec une pente générale de 15 à 20 %. En outre, la pente générale entre les sommets et le littoral est sillonnée par des ravines dont certaines peuvent être gigantesques. L'érosion est partout présente et nous reviendrons sur cet important problème.

La roche mère est constituée de matériaux pyroclastiques constitués de cendres volcaniques et les sols se sont développés selon une topo-climo-séquence que l'on retrouvera décrite en détail par les collègues QUANTIN et RAUNET :

- Vitrisols,
- Andosols vitriques,
- Andosols podzoliques (sol à "Mascareignite")
- Andosols typiques, (terres hydratées puis nonperhydratées)
- Sols bruns andiques,
- Sols bruns,
- Sols bruns vertiques,
- Vertisols.

Si les termes ultimes de la séquence sont riches en minéraux gonflants, les premiers termes comprennent des sols où les smectites sont absentes et où l'on rencontre des minéraux argileux non phylliteux comme l'imogolite. Mais, d'une façon générale, ces sols sont caractérisés par la présence d'une forte proportion de gels d'hydroxydes peu ou pas cristallisés "silencieux à la diffraction X", appelés allophanes.

Naturellement, les propriétés des sols seront fortement influencées par la proportion respective d'allophanes, d'imogolites et de phyllites.

***La Structure Agraire :**

Si la production cannière comporte quelques grandes exploitations semi-industrielles, les "Hauts de l'Ouest" ne comportent que des petites exploitations de moins de 5 ha. Les Chefs d'exploitation sont très souvent des pluri-actifs, mais avec des travaux saisonniers peu mécanisés qui demandent beaucoup de main d'oeuvre (Plantation, Gratte, Récolte, ...).

Les exploitants ne sont, en général, pas propriétaires ce qui explique leur comportement face au patrimoine foncier.

D'un système itinérant avec retour au bout d'une dizaine d'années de friche, il convient de passer à un système plus sédentaire, plus productif et respectant le patrimoine foncier. Nous verrons que la partie est loin d'être gagnée.

3 - LES PROPRIETES DES SOLS

****Minéralogie et arrangement des constituants***

Les andosols, bien que structurés en surface par la présence d'une importante quantité de matière organique ne génèrent pas de structure bien marquée. C'est particulièrement le cas pour l'horizon situé sous la couche organique.

En l'absence de vie biologique, de phases alternées d'humectation, dessiccation, de matériaux gonflants, aucun phénomène structurant ne sévit. Seule la présence de racines ou de conduits racinaires peut rompre la monotonie de cette structure continue.

Les particules les plus fines ou allophanes sont constituées par de petites vesicules monocouches tétraédriques de 35 à 50 Å de diamètre, remplies d'eau et présentant une surface spécifique très grande 800 m²/g en raison de la petite taille de ces particules. Ces sphérules sont agrégées en réseau assez lâche de nano-agrégats (0,5 u) puis poly-agrégats 5(u) et enfin macro-agrégats (50 u). Les espaces inter-agrégats sont occupés par l'eau.

L'imogolite apparaît dans les milieux plus pauvre en silice. Sa structure est constituée de fibres creuses de 10 à 20 Å de diamètre, entrelacées, avec une surface spécifique également très grande.

En dehors de ces deux minéraux de base, et ayant un rôle plus ou moins fort de cimentation, nous trouvons des hydroxydes de Fer et d'alumine amorphe sous forme de gel inorganisé et aussi des cristaux rares de Goethite ainsi que des cristaux de gibbsite en grande quantité.

La matière organique, présente en grande quantité, doit être présente dans différents sites inter-agrégats. Il sera intéressant d'avancer un peu plus dans la compréhension de cette micro-structure en utilisant la microscopie électronique en transmission.

**Rétention en Eau :*

Une telle organisation est en relation avec des propriétés de rétention en eau très fortes.

Cette structure très lâche, en l'absence de phase de dessiccation, conduit à des teneurs en eau de 200 % et plus. La densité apparente sèche est dans ce cas de 0,5 à 0,6.

La dessiccation même lente n'est pas réversible et il existe une très forte hystérèse. Elle est sans doute accentuée par la présence de matière organique qui perd sa mouillabilité au cours de la dessiccation. Le matériau desséché très léger et désagrégé est alors très vulnérable à l'érosion.

La mise en culture, par l'absorption d'eau dans les couches superficielles, par le travail du sol provoque ces dessiccations irréversibles. Ces sols montrent alors des "capacités au champ" qui décroissent jusque vers 80 %, avec des densités apparentes remontant vers 1,3. Le rapprochement des particules crée des édifices plus serrés et l'on pourrait penser plus stables.

Une consolidation raisonnée du matériau peut être une solution à retenir pour la mise en valeur.

Quelle est l'importance du réservoir d'eau pour les cultures ? Il n'y a pas de réponse satisfaisante, les notions de capacité au champ, point de flétrissement permanent ou temporaire, n'ont de sens que si l'on peut compter sur une réversibilité satisfaisante des phénomènes. Des recherches seront à conduire pour mieux caractériser ce réservoir d'eau pour les plantes et pouvoir ainsi conduire convenablement une irrigation.

**Propriétés Mécaniques :*

L'effet le plus particulier est celui de thixotropie. Ce phénomène consiste en une perte de résistance mécanique au malaxage. Du domaine résistant ou plastique, le sol passe brutalement dans le domaine liquide, bien au-delà du point d'adhésivité. Ainsi une lame facilement enfoncée dans le sol en ressort difficilement.

Ce comportement tout à fait particulier incite à une grande prudence face aux travaux culturaux et au choix des pièces travaillantes :

- Intérêt du retournement du sol ?
- Intérêt des griffages profonds ?

Celui-ci devrait croître avec la densité apparente atteinte où la chute corrélative de capacité au champ. Une stratégie d'intervention différente devrait pouvoir être proposée, depuis le non travail sur les andosols perhydratés jusqu'au labour sur les andosols "anthropiques" !

Une grande attention devra être alors apportée à la notion de profil vertical. Les premières expériences conduites sur l'appréciation de l'enracinement l'ont bien montré.

**La Circulation de l'Eau :*

Malgré son apparente saturation, les sols andiques possèdent une bonne capacité de filtration tant en surface qu'en profondeur.

Toutefois, les modifications irréversibles citées vont modifier ce comportement. Il faudra prendre en compte ces modifications dans l'évaluation des risques d'érosion, la rapidité de réhumectation des profils, l'évolution des bulbes d'irrigation.

L'hétérogénéité spatiale actuelle et future, engendrée par la mise en culture, doit être contrôlée, comme le suggère M. VAUCLIN, pour maîtriser les écoulements préférentiels dans le profil ou la parcelle.

Au niveau de la parcelle, un effort particulier devra être fait pour connaître les modalités de partage des eaux superficielles en relation avec les risques d'érosion.

**Le Statut Organique des Sols :*

La teneur en matière organique est très forte, 15 à 30 %, même au-delà de 20 cm (5 à 15 %) sans qu'elle soit très visible, montrant ainsi sa très grande intégration à la fraction minérale.

Le C/N tombe rapidement de 14-15 à 11 sous culture, avec une relative inertie ensuite. Des hypothèses de protection physique ont été avancées pour expliquer le peu de réactivité de la matière organique en l'absence d'apports récents et fréquents. Ici encore, il faudra comparer des sols jeunes et des sols anciennement mis en culture.

- L'acidité de ces sols est générale, au voisinage de 4,5. Ils contiennent des quantités notables d'aluminium libre ou échangeable que l'on peut facilement mettre en évidence sur le terrain avec le test au fluorure de sodium.

Le relèvement du pH est une obligation pour réussir la mise en culture de ces sols pour les raisons suivantes :

- Réduction de la toxicité aluminique,
- Accroissement de la capacité d'échange cationique,
- Réactivation de la microflore bactérienne, notamment pour les différentes étapes du cycle de l'azote,
- Réussite de l'inoculation pour les légumineuses,
- Réduction du pouvoir fixateur des sols vis-à-vis du phosphore. Les silicates de Ca se sont montrés plus efficaces à ce propos que les carbonates.

Si le Géranium tolère assez bien l'aluminium et l'acidité, beaucoup d'autres plantes en souffrent. Un redressement progressif du pH vers 5 à 5,5 semble indispensable et les moyens doivent être trouvés.

- La Capacité d'échange suit un comportement typique des andosols, avec un fort caractère amphotère et un point de charge nul (PCN), plus ou moins élevé selon le taux de matière organique. Très minéral, le PCN est élevé et la rétention des cations est mal assurée à pH faible. Très organique le sol possède un PCN bas, redonnant un caractère plus "normal" au sol.

Il semble cependant que même à pH très bas, la rétention des anions reste très faible. Notamment les nitrates migrent dans le profil sans difficulté. Le relèvement du pH ne fera que faciliter ce mouvement de lixiviation, le calcium servant alors de cation accompagnateur.

On peut s'interroger ici sur la validité des méthodes de détermination de la capacité d'échange à pH 7 !

- La proportion de Garniture du complexe adsorbant par les cations nutritifs reste une méthode assez robuste. Ici, elle devrait assez bien s'appliquer, en l'absence de smectite et de pouvoir fixateur marqué.

Notons à propos du potassium, qu'un pourcentage de 5 % reste un critère satisfaisant.

En matière de bilan, il serait intéressant de savoir ce qui est perdu dans les eaux de distillation pour K, Na et Mg et de comparer par rapport aux exportations réelles, les fumiers n'en restituant qu'une partie.

- Le Statut du Phosphore est lui aussi particulier en raison des nombreux sites de fixation possibles, en dehors de la précipitation pure et simple de phosphate d'Alumine. Cette dernière cesse pratiquement lorsqu'on dépasse pH 5.

Les andosols possèdent des teneurs élevées en P total mais des teneurs faibles en phosphore assimilable (en olsen). M. DABIN a proposé, pour ces sols, un traitement au fluorure de sodium pour accroître l'agressivité du réactif dans ces milieux. Il faudrait très certainement revoir ces méthodes d'extraction en utilisant des méthodes d'extraction plus douces. Cependant, le phosphore total reste significatif si la plante peut y accéder via les mycorhizes qui certainement existent pour ces espèces. Le mécanisme est bien connu en sol carbonaté, il l'est moins dans un sol aluminique.

En ce qui concerne les formes d'engrais phosphatés, il est vraisemblable qu'il faut choisir d'autant plus des formes hypo-solubles que l'on apporte la fumure phosphatée longtemps avant la période d'utilisation par la plante.

L'efficacité de la localisation de la fumure est un fait acquis et maintes fois vérifiée en sol pauvre.

Les grilles d'interprétation, pour les analyses de sol, devraient progressivement être revues en fonction des types de sol (par exemple : en fonction de l'intensité du caractère andique).

La mesure du pouvoir fixateur pourrait constituer un projet d'amélioration du diagnostic par rapport à la seule teneur en phosphore assimilable.

De toute façon, l'extention du système racinaire est un élément important du comportement des plantes face à la nutrition phosphatée.

4 - LES SYSTEMES CULTURAUX

****La Monoculture du Géranium :***

Telle qu'elle est pratiquée, elle conduit à une perte de fertilité :

- Physique par érosion de la couche arable,
- Chimique en acidifiant davantage et en réduisant le coût de la fertilisation phosphatée,
- Biologique par la réduction du taux de matière organique et l'absence de restitution.

****Les Rotations Plus ou Moins Intensives :***

La culture du géranium est interrompue par des plantes comme le tabac, le maïs, le haricot et des cultures maraîchères diverses.

Hormis la fumure minérale, ces cultures reçoivent un compost organique sous forme de compost de géranium. Les essais ont montré le bien-fondé de cette technique malgré les contraintes qui restent fortes.

****Les Cultures Associées ou en Lignes Alternées :***

Bien que donnant en général des résultats moindres pour les deux cultures complantées, on remarque ici un bénéfice pour le géranium car le travail et la fumure inter-rang lui profitent.

****Les Aménagements Fonciers Anti-érosifs*** sont devenus prioritaires en raison des déplacements de quantités énormes de matières lors des pluies violentes. Peu de réalisations ont été proposées. Les remèdes sont connus mais demandent une adaptation locale :

- Réduction des périodes de sol nu (cultures intercalaires),
- Travail du sol minimum,
- Travail et semis selon les courbes de niveau,
- Enherbement permanent des thalweg,
- Réalisation d'un micro-relief en banquette,
- Réalisation de murets de retenue.

La réalisation d'aménagements fonciers peut se faire :

- rapidement par nivellement au bulldozer, en ménageant la couche arable,
- lentement, en construisant des murets avec les pierres provenant de l'épierreage des parcelles. Cette méthode a l'avantage de pouvoir être réalisée en toute saison, avec les moyens du bord.

Le dimensionnement de ces ouvrages est à imaginer en fonction de la pente et du type de mécanisation et d'irrigation envisagée.

5 - VERS UNE EXPERIMENTATION INTEGREE

L'ensemble des problèmes évoqués conduit à mettre un plan d'action comportant les facettes suivantes :

a) Amélioration des Méthodologies

Beaucoup de méthodes générales de caractérisation des sols ne s'adaptent pas aux andosols.

Des améliorations spécifiques doivent être proposées :

- Pour la mesure de la CEC,
- Pour la détermination du phosphore assimilable,
- Pour la mesure du pouvoir fixateur en phosphore,
- Pour la mesure des caractéristiques de rétention d'eau sur échantillons non remaniés et non desséchés,
- Pour la mesure des conductivités hydrauliques,

b) Analyse des Situations Culturelles :

Par enquête avec la Chambre d'Agriculture, il serait nécessaire de recenser les pratiques culturelles et le statut socio-économique des exploitations agricoles afin de déceler l'impact probable de la prise en compte du progrès technique vers une agriculture à la fois plus productive mais plus respectueuse de la conservation du milieu naturel.

c) Une Expérimentation à Caractère Mono-factorielle :

- Sur la réalisation et la comparaison de dispositifs anti-érosifs, avec contrôle de débit solides et débit liquides,
- Sur la correction de l'acidité des sols par différents amendements calcaires,
- Sur la maîtrise et le contrôle de l'irrigation en goutte à goutte, seule technique économe et adaptée aux sols en pente,
- Sur le niveau de fertilisation azotée, la densité de plantation et le contrôle de la qualité,
- Sur l'amélioration du statut phosphaté des sols.

d) Une Expérimentation de Système :

Elle doit être réalisée sur une parcelle acquise ou louée pour une durée suffisamment longue (9 ans), par la mise en place de systèmes de cultures très différents :

- l'un très agressif : Géranium en monoculture très intensif (forte densité, forte fumure minérale),
- l'un très protecteur : Prairie permanente,
- l'un intermédiaire en rotation simple.

L'enjeu principal étant de maîtriser l'évolution irréversible des sols vers des situations culturales stables et bénéfiques pour l'exploitation.

Une alternative consisterait à comparer l'évolution de parcelles caractéristiques d'un andosol perhydraté d'un groupe de parcelles mis en culture de longue date et quasi stabilisées.

*e) Après la Réalisation d'une Reconnaissance au 1/50 000 (1988),
Réalisation d'une Carte Détaillée au 1/10 000 :*

Cette carte, non exhaustive, doit concerner en priorité les zones à aménager :

- soit pour des dispositifs anti-érosifs sur des bassins versants bien choisis,
- soit sur les périmètres susceptibles d'être irrigués (en concertation avec la DDA).

La carte pédologique détaillée doit être un préalable à tout projet d'aménagement. Elle fait partie de la pré-étude.

6 - EN CONCLUSION

Un grand "chantier pluri-disciplinaire" doit se mettre en place pour améliorer significativement la situation dans cette région de l'île de La Réunion.

Ce projet concerté doit faire travailler ensemble :

- les hommes de terrains capables de faire les reconnaissances et les premières appréciations nécessaires. Ils devront aussi tester les solutions les plus crédibles, notamment en matière de systèmes anti-érosif,
- les spécialistes de Science du Sol pour élucider certains mécanismes atypiques par rapport aux sols classiques
- les hommes de l'art capables d'imaginer et de projeter les ouvrages et les outils nécessaires à la mise en valeur de ces systèmes,
- les conseillers agricoles capables de motiver et de convaincre les agriculteurs de s'engager sur une voie de progrès durable,
- les politiques pour soutenir des actions à long terme et protéger le patrimoine foncier et la capacité de production d'une agriculture spécialisée.

RECHERCHES A ENTREPRENDRE

COORDINATION :

Michel RAUNET

Jean SERVANT

NECESSITE D'UNE APPROCHE SYSTEMIQUE
A DIFFERENTS "NIVEAUX DE PERCEPTION"

Les andosols sont des matériaux complexes qui demandent à être examinés simultanément sous différents aspects, à différentes échelles, avec des techniques diverses et complémentaires. Le "structural" et le fonctionnel sont en interactions, l'ensemble évolutif pouvant subir des modifications non réversibles. Trois ensembles de processus dynamiques peuvent être distingués : les "fonctionnements" hydriques, physico-chimiques et mécaniques.

1 - FONCTIONNEMENT HYDRIQUE

L'eau est un constituant intrinsèque très important des andosols (jusqu'à 300 % en poids) qui leur confère nombre de leurs propriétés très spécifiques dont la faible masse volumique (0,3 à 0,6). L'hydrodynamique spatio-temporelle, en interaction avec la "matrice" organo-minérale (elle-même évolutive et difficile à caractériser) est fondamentale à étudier si l'on veut d'une part, identifier les flux hydriques et de solutés ainsi que les "porosités utiles" qui interviennent dans l'alimentation des plantes, et d'autre part, comprendre le comportement mécanique (thixotropie en particulier) du matériau. Les nombreux degrés de liaison de l'eau à la matrice solide, l'aptitude du matériau au retrait, à la déformation et à la réorganisation internes imposent une grande prudence quant à l'application des lois "classiques" de l'hydrodynamique.

Autrement dit, l'étude de l'eau dans les andosols doit être fortement corrélée à la connaissance microstructurale, physico-chimique et rhéologique (stabilité structurale, thixotropie, perméabilité, densité apparente...) de ce système dynamique. La compréhension ne peut être que globale.

2 - FONCTIONNEMENT PHYSICO-CHIMIQUE

Cela inclut la minéralogie, la composition géochimique globale, l'agencement structural, les types de liaisons entre éléments, la dynamique du système et l'étude des équilibres thermodynamiques.

Les études antérieures (V. ROSELLO) montrent qu'au niveau micro-structural, dans son état naturel, le matériau présente des organisations emboîtées les unes dans les autres, dont les rôles et les fonctionnements hydrique et minéral, sont différenciés. Le dessèchement progressif du matériau entraîne des déformations de l'ossature et des réorganisations structurales qui se répercutent d'une part sur le comportement rhéologique d'ensemble, d'autre part sur l'activité chimique : surfaces spécifiques, sites d'échange ionique et forces de liaison. Enfin, en fonction des variations du pH environnant, le matériau andique est un système évolutif complexe, amphotère, à charges variables ; il présente, dans les conditions naturelles, une capacité d'échange anionique susceptible de retenir fortement les ions phosphate. La matière organique, bien que peu visible, est toujours abondante dans ces sols et fortement liée au complexe allophanique ; elle doit jouer un rôle important dans leur comportement physico-chimique et leur forte capacité d'échange. Certaines formes de cette matière organique (acides fulviques) sont susceptibles de migrer en profondeur en entraînant des éléments minéraux, tel peut être l'aluminium, rappelant les processus de la podzolisation.

La complexité du système exige donc qu'on étudie celui-ci à toutes les échelles : micro, méso et macroscopique. Ce qui se passe au niveau macroscopique et agronomique "in situ" ne peut être compris, éventuellement contrôlé ou modifié, que si l'on examine avec les outils d'observation les plus performants, les agencements fonctionnels au niveau microscopique et à toutes les échelles intermédiaires, sièges, à chaque étape, d'organisation emboîtée, de l'émergence de propriétés nouvelles et différentes. L'étude du fonctionnement hydrique, qui règle l'"ambiance" physico-chimique (pH, concentrations en solutés, aération) aussi bien que la stabilité ou l'instabilité des structures, est donc inséparable de l'étude physico-chimique.

3 - FONCTIONNEMENT RHEOLOGIQUE

Ce volet, particulièrement important pour les andosols de la Réunion, intéresse le comportement mécanique des matériaux en fonction des variations de teneur en eau et des contraintes extérieures qui y sont exercées (trafic des engins, travail du sol, piétinement du bétail, pénétration racinaire...) : thixotropie, déformations internes avec apparition de nouveaux agencements structuraux, transformation des types de porosités, évolution de la

perméabilité, mode de répercussion dans les horizons profonds... Tout cela évidemment en relation étroite avec l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'eau aussi bien descendante (drainage) que remontante (capillarité) ou oblique. Observations microscopiques, tests de laboratoire sur échantillons non remaniés et essais au champ devront être associés.

Ces études auront pour objectif, en fonction des conditions d'environnement, des systèmes de culture et des degrés de mécanisation envisagés, de préciser le travail optimum du sol de façon à favoriser au maximum l'exploitation racinaire des plantes tout en luttant contre la dégradation du milieu (diminution de la stabilité structurale, compactage, ruissellement, érosion).

LES PROBLEMES MAJEURS A ABORDER PAR LA RECHERCHE

L'atelier de travail sur les sols andiques de la Réunion a révélé plusieurs problèmes majeurs concernant : la caractérisation des andosols, l'analyse de leurs propriétés, l'impact des cultures et des façons culturales, l'amélioration de la fertilité, le contrôle de l'érosion, la conduite de l'irrigation et l'étude de l'activité microbiologique.

1/ La caractérisation des Andosols

A la suite des études de RIQUIER, ZEBROWSKI et GENSE (ORSTOM), puis de ROSELLO (Paris VI), les travaux tout récents de BROUWERS et de RAUNET (IRAT) ont permis d'établir une bonne cartographie morphopédologique de l'île. Mais, pour avoir une caractérisation assez approfondie des sols, il semble nécessaire de faire une étude plus fine de la climato-topo-séquence occidentale mettant en évidence les processus majeurs de la différenciation du sol et de ses propriétés, en relation avec les variations bioclimatiques au long de cette séquence. En outre, la caractérisation des sols, devrait être entreprise avec des méthodes plus précises et plus complètes, pour mieux connaître les constituants et leurs propriétés. Cette caractérisation concerne essentiellement :

- la connaissance des matériaux originels du sol (couches de cendres volcaniques, minéralogie et géochimie),
- la minéralogie et la géochimie du sol, allophane, hydroxydes non cristallins d'Al et de Fe, chélates d'Al, argiles et oxydes bien cristallisés,
- les constituants organiques et organo-minéraux du sol, fractions humifiées,
- la microstructure et la porosité du sol conservé dans son état naturel (en évitant les effets de la dessiccation), microscopie optique et électronique, densité apparente, etc....,

- les propriétés physiques et chimiques du sol dans son état naturel, propriétés spécifiques des andosols (déshydratation irréversible, charges variables, rétention de P, etc...) ; fertilité potentielle,
- les critères spécifiques (de terrain et de laboratoire) pour distinguer les principaux types de sols andiques, méthodologie à préciser.

2/ Les problèmes de fertilité chimique

- Le blocage du turn-over de la matière organique et des éléments N.P.S., etc..., dans l'humus du sol ; comment activer la minéralisation d'une partie du stock organique et contrôler la fertilisation azotée.
- La forte rétention du phosphore par les complexes organo-minéraux non cristallins ; comment la réduire ; comment évaluer le phosphore assimilable et une fertilisation économique ; intérêt des mycorhizes.
- L'acidité de certains andosols, toxicité aluminique et blocage du phosphore ; problème et limite du chaulage dans des sols à fort pouvoir tampon.
- L'adaptation des méthodes d'analyse (CEC au pH du sol, variation de CEC en fonction du pH) et leur interprétation concernant la fertilité.

3/ Les problèmes de comportement physique et l'impact des façons culturales

- L'effet irréversible de la dessiccation provoquée par le travail du sol, sur les propriétés physiques ; diminution de la capacité de rétention en eau et variation de la réserve utile ; modification de la micro-agrégation du sol et accroissement de l'instabilité structurale et de l'érodibilité ; compactation, diminution de l'infiltration de l'eau et de l'aération.
- La difficulté du travail du sol, notamment du labour, par suite de la non-plasticité du sol et de son adhérence aux outils.
- Le comportement particulier de l'horizon B de la plupart des andosols cultivés de la Réunion ; problème de la mauvaise pénétration des racines des plantes cultivées (compacité, défaut d'oxygène ?) et de la stérilisation des terres érodées ;

défaut d'oxygène ?) et de la stérilisation des terres érodées ; comment y remédier (ameublissement, fertilisation et stabilisation par des apports organiques).

4/ Le contrôle de l'érosion

- Le paradoxe de sols à agrégats stables (indice de Hénin faible < 1), très érodibles après travail du sol et dessiccation (non mouillabilité et faible densité des agrégats).

- Les façons culturales adaptées ; travail minimum du sol, maximum de couverture végétale (cultures intercalaires, mulch, etc....).

- La régénération des sols érodés ; amélioration physique de l'horizon B (voir ci-dessus).

5/ Le fonctionnement hydrodynamique, conduite de l'irrigation

- La détermination au laboratoire de la capacité de rétention en eau et de la réserve utile pose un problème méthodologique à cause de la forte variation irréversible de ces mesures après dessiccation du sol (formation de pseudo-sables) ; comment évaluer les besoins en eau dans un système très variable (large hétérogénéité de surface induite par la culture) ; méthodologie de mesures in situ ou sur sol non perturbé à mettre au point.

- Le fonctionnement hydrodynamique est fortement perturbé à l'interface sol cultivé/sous-sol (diminution de l'infiltration d'eau dans l'horizon B).

- Le problème de l'aération du sol en milieu microporeux, à diffusion lente de l'air ; risques d'asphyxie dans l'horizon B à évaluer.

- Le suivi des flux hydriques et des éléments chimiques entraînés.

6/ Le fonctionnement microbiologique

Il y a là un domaine important à explorer, car il conditionne la minéralisation de la matière organique, la stabilité et la fertilité des andosols. Cette étude comporterait deux approches :

- La caractérisation de la microflore,
- la mesure de son activité : mécanismes du blocage ralentissant le turn-over, comment améliorer cette activité ; développement des mycorhizes utiles.

PLAN DE RECHERCHE

PREMIERE EBAUCHE

Il a été admis que la Recherche se ferait d'une part en "stations" (dits "sites lourds" entièrement contrôlés) auxquelles seraient annexés des réseaux d'observations multilocaux en milieux paysans traditionnels, et d'autre part, le long de toposéquences où l'on caractériserait des situations "typiques" (orthotypes) et les gradients de transition entre celles-ci.

A long terme, il est prévu 3 ou 4 stations principales réparties sur les sites à andosols les plus "représentatifs" de l'Ile des points de vue des caractéristiques morpho-pédo-climatiques et des problématiques agronomiques.

Dans un premier temps (les 2 premières années), les efforts seront concentrés :

- sur la toposéquence la plus intéressante, par sa diversité altitudinale et pédogénétique, qui est celle de l'Ouest (Piton Maïdo-St Gilles),

- sur une seule station, située sur le versant ouest, à Trois Bassins (1000 mètres d'altitude), sur andosols non perhydratés. Cette station, en pleine zone "Géranium", serait un banc d'essai concernant la faisabilité méthodologique, où l'expérience acquise serait mise à profit par la suite, en fonction des moyens disponibles, sur d'autres sites qui pourraient être :

- * sur le versant ouest : zone de la station CIRAD actuelle de Petite France (1300 mètres d'altitude) sur andosols perhydratés,

- * sur le versant ouest toujours, mais en situation irrigable (dans l'optique du vaste projet d'irrigation de cette région), vers 400 mètres d'altitude (sols bruns andiques),

- * sur le versant est très arrosé (au vent), par exemple dans la région de St Benoît (andosols perhydratés).

RECHERCHE EN STATION A TROIS-BASSINS

1. CHOIX DU SITE DE LA STATION

Le principe du choix d'un site à proximité de la station IRAT de Trois Bassins, à 1000 mètres d'altitude a été retenu, d'une part, à cause de sa très bonne représentativité vis-à-vis du milieu physique à étudier ainsi que des contextes agricoles et humains, d'autre part, pour profiter dès le départ du maximum de connaissances acquises lors des expériences précédentes. Il existe déjà à 3 Bassins, des équipements climatologiques et des dispositifs de mesures en aménagements anti-érosifs.

Pour mener à bien les expériences et suivis à mettre en oeuvre (voir ci-dessous), une superficie de 2 ha semble largement suffisante.

Après discussions, bien que la place y soit disponible, il apparaît que le site même de la station IRAT actuelle, mise en place il y a déjà 25 ans, ne convenait pas du fait que son passé est fort complexe et qu'elle avait été trop perturbée par rapport au milieu d'origine : aménagement en terrasses (raclages, remblaiements), fertilisations et travaux du sol multiples. Le sol actuel n'a donc plus grand chose à voir avec ce que l'on veut étudier.

Pour le nouveau site de recherche, les principaux critères de choix sont les suivants :

- * Nécessité d'une histoire des parcelles peu "mouvementée" et homogène, facilement reconstituable, de préférence monolithique,

- * Présence de 2 situations nettes (ayant en gros chacune la même surface) sur lesquelles se feront des suivis comparatifs :

- . une situation peu "dégradée", c'est-à-dire où l'horizon A n'a pas été décapé,
- . une situation plus "dégradée" où l'horizon A a été érodé.

- * La topographie doit être la plus régulière possible afin de s'affranchir au maximum de ce

facteur d'hétérogénéité.

* Le manteau cendré sur lequel se forment les andosols doit être assez épais (plus de 1 mètre) au dessus du "tuf jaune" ou du basalte de coulée sous-jacent formant le substratum.

* Les parcelles devront être entièrement disponibles pour l'équipe de Recherche qui décidera des traitements et des suivis à y effectuer. La location du terrain (SAFER ou Agriculteur) sur plusieurs années est donc la seule solution.

2. LES TRAITEMENTS

- Le 1er traitement (T1) est destiné à conserver les sols "érodés" et non "erodés" dans leurs états sans apport de fertilisant. Les 2 parcelles T1A (avec horizon "A"), et T1B (directement sur le "B") seront mises en prairie permanentes.

- Le 2ème traitement (T2) sera consacré à la monoculture traditionnelle de géranium qui sera planté en sillons (80 x 15 cm). Il y aura 2 sous-traitements T2A et T2B.

- Le 3ème traitement (T3) s'inspirera de la méthode traditionnelle améliorée : 3/4 ans de géranium, 1/2 ans d'autres cultures en rotation (haricots, maïs, tabac, pomme de terre).

On ne prendra pas de culture sarclées (pomme de terre, tabac) dont les suivis hydriques et physiques sont trop délicats. On retiendra plutôt alternativement le maïs et le haricot, semés en interlignes de 70 cm (25 cm sur la ligne).

Sur chaque type de sol (A et B), on fera 2 "sous-traitements" :

- Labour + semis manuel après enfouissement de matière organique ("compost" de géranium) : T3A1 et T3A2,

- Semis direct manuel : T3B1 et T3B2.

On aura donc au total 8 sous-traitements sur chacun desquels on fera les observations, mesures, suivis et prélèvements.

3. LES MESURES ET SUIVIS

3.1. DISPOSITIFS DE TERRAIN

3.1.1. Hydrodynamique

- Sonde à neutrons : 1 tube par traitement enfoncé à 2 mètres. Les mesures se feront tous les 10 centimètres, en dessous de 20 cm de profondeur. Dans la partie 0-20 cm, où les mesures neutroniques sont difficiles, on fera des prélèvements tarière (\varnothing 3 cm) ou cuiller tous les 5 cm répartis aléatoirement dans la parcelle de traitement.

La fréquence de mesures sera approximativement hebdomadaire sur 0-20 cm et mensuel en dessous.

On pourra réduire davantage les intervalles de mesures aux épisodes intéressants (humectation, dessèchement).

- Densité apparente (sonde gamma-densimétrique)

On suivra les variations de densité en fonction de l'humidité.

Au préalable, pour l'horizon de surface, il faudra étalonner la sonde en fonction du temps. Dans l'idéal, il faudrait effectuer 2 étalonnages sur le site même avec 2 sondes : une sonde calée pour la surface, une sonde pour la profondeur.

- Tensiomètres :

L'équipement minimal consistera à encadrer la dernière mesure neutronique (entre 1 et 2 mètres) par 2 tensiomètres (au dessus et en dessous), de façon à identifier les sens des flux.

On utilisera un lecteur direct et mobile de tension de l'eau, sans s'encombrer de tubes capillaires perturbant le traitement dans la parcelle.

- Conductivité hydraulique

En fin de campagne, on suivra les cinétiques d'infiltration (double anneau) sur les essais "travail du sol" et "non travail du sol".

- Problèmes prévisibles évoqués à résoudre

- . variabilité spatiale intra-parcellaire (on la testera a posteriori ou en cours d'expérimentation),
- . étalonnages des sondes,
- . lourdeur du suivi (fréquence optimale à moduler suivant les épisodes climatiques et cultureux),
- . difficulté pour caractériser les 20 premiers centimètres,
- . pietinage et perturbations diverses autour des tubes pouvant entacher la représentativité des mesures,
- . évaluation des précipitations occultes (importantes dans cette région).

3.1.2. Profils culturaux et racinaires

Pour l'enracinement, on réalisera :

- un suivi diachronique : prélèvements par carottage et comptage des racines,
- un profil racinaire après la récolte.

- Difficultés attendues :

. Attention au remaniement de la couche de surface, du fait de trous et prélèvements trop nombreux (à faire aux stades importants de développement de la plante),

. Choix d'une tarière ad-hoc efficace et peu perturbante.

3.1.3. Micro altimétrie

Il faudra bien identifier le "niveau zéro" de départ.

On essaiera d'apprécier l'évolution de la surface du sol par rapport à un repère fixe (cf. "méthode cabidoche" ou "méthode Bougère" à vis à 4 directions, permettant une précision du mm).

On pourra ainsi avoir une idée des effondrements structuraux en surface, dûs à des rétractions ou tassements sous-jacents, ainsi que des départs de terre.

On ne ferait ces mesures que sur les traitements T3 (avec et sans labour), après des épisodes pluvieux.

Il s'agit d'une méthodologie à mettre au point qui sera à corrélérer avec les mesures en parcelles d'érosion (voir plus loin).

3.1.4. Physico-chimie

Les éléments principaux à suivre sont l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, l'aluminium et la matière organique.

La périodicité des analyses et prélèvements est variable selon les éléments. C'est l'azote qui demande le suivi le plus rapproché.

- Concernant la matière organique, on fera sur échantillons (tous les 5 cm) des caractérisations initiales et en fin de culture :

- . fractionnements physiques par tamisage,
- . rapports acides humiques-acides fulviques,
- . rapport C/N,
- . fractionnement de l'azote,
- . tests d'activité microbologique ;
- éventuellement, identification et comptage de microflore.

- Pour suivre la lixiviation en anions et cations :

- . on plantera des capteurs de solution (bougies poreuses), si possible à proximité des tensiomètres, sur chacune des parcelles des 8 traitements envisagés.
- . on utilisera les 3 lysimètres de 150 cm de profondeur, existant déjà sur la station IRAT de Trois-Bassins permettant de suivre simultanément in situ les aspects hydriques et chimiques.

Ces suivis seront complétés par des expériences en laboratoire sur colonnes de sol non remanié.

3.2. MESURES EN LABORATOIRES

3.2.1. Caractérisation de l'Etat initial

Des prélèvements à 5 niveaux se feront dans des fosses creusées en bordure des 8 parcelles.

- Aspects géochimique, minéralogique et microstructural

* Analyses chimiques, après extraction (oxalate NH₄, ou HCl 2N) ; dosage à l'IRAT (La Bretagne) par absorption atomique, des éléments constitutifs des amorphes (Al, Fe, Si...)

* Détermination des constituants et des structures

- Sur lames minces et ultra-minces (remplacement de l'eau par de l'alcool puis une résine) à étudier au microscope optique ou électronique (laboratoire INRA de Versailles),

- pour les éléments cristallisés : méthodes "classiques" : par diffraction X, analyses thermiques, spectroscopie I.R. (INRA Versailles),

- pour les nano-organisations et propriétés de surface électronique à transmission des constituants en microscopie, sur échantillons non remaniés et non desséchés (méthodologie "Tessier" INRA Versailles). Analyses par sondes.

- Granulométrie

Cet aspect important nécessitera une mise au point méthodologique, de façon à résoudre les problèmes de dissolution différentielle, dispersion et séparation granulométrique des matériaux colloïdaux, minéraux et organiques : différents compartiments de la matière organique (liée ou non liée), limons, sables (résidus non altérés), pseudo-sables (résistant à la dispersion).

- Aspect physico-chimique

Essentiellement, détermination du ZPC, des CEC et AEC à différents pH, des teneurs en éléments échangeables (en particulier l'aluminium), au pH du sol, du phosphore assimilable (Olsen-Dabin) et du phosphore total.

3.2.2. Etude des propriétés "évolutives"

- Concernant la physico-chimie :

On essaiera de prélever des colonnes de sol non remanié (enrobées de parafine) si possible comprenant l'interface A/B sur lesquelles on fera des essais de percolation en laboratoire qui compléteront les essais en lysimètres sur le terrain. On suivra ainsi les échanges colloïdaux en fonction de la composition et de la charge de l'eau de percolation.

- Concernant les paramètres hydro-dynamiques :

On essaiera de déterminer (sur cylindre ou en colonne) les relations perméabilité - indices des vides - pF - humidité. De tels essais pourront être effectués :

- . au laboratoire du CIRAD à la Réunion,
- . à Grenoble (IMG) pour des expériences plus spécifiques sur banc gamma-métrique, sur colonne de faible diamètre (moins de 10 cm). La spectrométrie gamma double source permettrait de mesurer simultanément les variations spatio-temporelles de l'humidité volumique et de la masse volumique du sol. Des essais de traçage à l'eau tritiée, en saturé ou non saturé, pourraient différencier l'eau mobile de l'eau immobile.

RECHERCHE "ANDOSOLS-REUNION"

REPARTITION DES TACHES

COORDINATION

LA REUNION : J. SERVANT
METROPOLE : M. RAUNET

SECTEURS DE RECHERCHES	RESPONSABLES SCIENTIFIQUES	APPUI OU CONSEIL SCIENTIFIQUE EVENTUEL	VAT STAGIAIRE THESARD	OUVRIERS à former pour suivis et prélevements	Laboratoires
I PHYSIQUE DU SOL ET HYDRO-DYNAMIQUE En liaison avec II, III, IV, V, VI, VIII	S. PERRET P. LANGELLIER (CIRAD)	A. DUCREUX M. BROUWERS M. VAUCLIN	. 1 VAT (sept. 88) . 1 stagiaire IMG (mars 89) . 1 stagiaire IRAT/CEEMAT (mars 89)	1 ouvrier résidant à Trois-Bassins	CEEMAT (Réunion) CEEMAT/IRAT (Montpellier) (IMG Grenoble)
II BIO-PHYSICO-CHIMIE DU SOL En liaison avec I, III, V, VI, VIII	P.F. CHABALIER (CIRAD)	J.C. REMY C. PIERI	1 stagiaire Réunion mai 89	Trois-Bassins	IRAT (Réunion) CIRAD (Montpellier)
III MINERALOGIE-GEOCHIMIE MICROSTRUCTURE En liaison avec I, II, V, VI	M. ROBERT D. TESSIER (INRA)	G. PEDRO	1 stagiaire INRA Versailles mars 89		INRA (Versailles)
IV EROSION En liaison avec I, II, V, VI	J. BOUGERE (St Denis) (Université)		2 étudiants Université	1 ouvrier résidant à Trois-Bassins	Université (St Denis) CEEMAT (Réunion) IRAT (Réunion)
V PROBLEMATIQUES MILIEU RURAL En liaison avec I, II, IV	P. MICHELLON M.C. GIBOULOT (CIRAD - SUAD)		-		
VI PEDOGENESE CARACTERISATION DIAGNOSTIC En liaison avec I, II, III, VI	P. QUANTIN (ORSTOM)		-		ORSTOM (Bondy)
VII LIAISONS GEOMORPHOLOGIE-PEDOLOGIE-CARTOGRAPHIE En liaison avec V, IV, VI	M. RAUNET (CIRAD)		-		CIRAD (Montpellier)
VIII GEOSTATISTIQUE MODELISATIONS En liaison avec I, V, VI	M. VAUCLIN (IMG - CNRS)		1 stagiaire ou 1 VAT ou 1 thésard à déterminer	1 ouvrier	IMG (Grenoble)

CONCLUSION

CONCLUSIONS

Cet atelier de travail inter-institutionnel et interdisciplinaire a passé en revue les connaissances actuelles sur les andosols tropicaux en général, ainsi que les problématiques, acquis et inconnues concernant la gestion des sols de la Réunion. Quelques points forts sont constamment apparus, ce qui a permis de dégager quelques principes de base pour la recherche à entreprendre :

1 - Quelques points forts

- Les andosols constituent un matériau ayant des propriétés et un fonctionnement hydriques, physico-chimiques et rhéologiques tout à fait particuliers comparés aux autres types de sols. Il existe une incertitude concernant l'application ou l'interprétation de certaines techniques d'étude et de certains concepts (granulométrie, surfaces spécifiques, capacité d'échange, réserve hydrique, structure, porosité...). Autrement dit, il faut s'attendre à revoir les méthodologies habituelles, dans lesquelles il ne faudra pas s'enfermer.

- Toutes leurs propriétés (richesse en eau, minéraux mal cristallisés, charge variable, rétention anionique, structures emboîtées, déformabilité...) sont toujours interdépendantes ; cela nécessite de les étudier, dans la mesure du possible, simultanément et en constantes relations interdisciplinaires.

A différents niveaux de perception (échelles) du microscopique au "mégascopique", le matériau montre des comportements, propriétés et processus différents qu'il faut appréhender avec des méthodes ou modèles adaptés. Les niveaux supérieurs ne se déduisent pas forcément de façon simple des niveaux "fondamentaux". A l'échelle du profil, on est souvent réduit à raisonner à un niveau global intégrateur ("cela se passe comme si"...).

Une de leurs caractéristiques spécifiques est l'acquisition de nouvelles propriétés plus ou moins irréversibles, quand on change artificiellement de façon assez drastique leur environnement (rétention hydrique, mouillabilité, propriétés d'adsorption et d'échange, néostructuration, perméabilité, "flottabilité", érodibilité).

L'utilisation agricole de ces sols conduit ainsi à créer un nouveau support, du moins pour la partie supérieure, où les relations d'interfaces (surface du sol entre le A et le B) sont changées. Il faudra donc attacher beaucoup d'importance à l'étude des transformations induites par les pratiques culturales sur la dynamique du sol dans son ensemble.

Ceci présente une importance considérable à la Réunion où le terroir est composé à 80 % d'andosols en pentes généralement fortes et où la mise en culture entraîne une érodibilité accélérée de la partie supérieure (horizon A) "fertile", conduisant à l'affleurement du "B" quasi stérile, en tout cas très difficile à améliorer. Il y a là un problème crucial de protection du patrimoine agricole, qui est actuellement ressenti comme prioritaire par l'ensemble des responsables et praticiens (le débat à la Chambre d'Agriculture a été significatif à cet égard).

2 - Quelques principes de base du programme de recherche

La recherche qui sera entreprise sur les andosols à la Réunion, s'inspirera des principes de "fonctionnement" suivant :

- 1) Elle sera interdisciplinaire. Seront associées en particulier les disciplines suivantes : agronomie, pédologie, physico-chimie, minéralogie, hydrologie, mécanique des sols.
- 2) Elle se basera au départ sur des faits agronomiques, constatés sur le terrain par les "utilisateurs" des andosols à la Réunion. A partir de ce constat, on abordera les aspects plus fondamentaux dont la finalité sera la compréhension fine des processus (hydrologiques, physico-chimiques et rhéologiques) afin de pouvoir en exploiter, en corriger ou en maîtriser certaines et améliorer en définitive l'utilisation du milieu.
- 3) Elle associera l'approche naturaliste à l'approche théorique : elle abordera toutes les échelles d'observation, alimentées les unes par les autres, du niveau "paysage" (pédogénèse, structure spatiale et dynamiques à l'échelle du versant) au niveau microscopique (microstructure, minéralogie).
- 4) Elle reliera les essais au champ (versant, parcelle, profil) aux essais et tests en laboratoire (échantillon de sol non remanié, lames minces...).

5) Elle comprendra un aspect méthodologique proprement dit. En effet, les matériaux andiques, à propriétés peu "classiques" et encore mal connues, nécessitent probablement que l'on remette en cause, ou que l'on teste de façon critique, certaines techniques de mesures ou leurs interprétations. Ceci spécialement dans le domaine de l'eau et des analyses physico-chimiques.

6) Elle nécessitera un coordinateur général ou un comité de coordination, dont le rôle sera de maintenir la cohérence de l'équipe pluridisciplinaire vis à vis des objectifs fixés, de revoir éventuellement certains de ces objectifs, d'éviter une dispersion excessive des travaux, d'assurer la liaison constante entre les chercheurs (locaux et métropolitains) et "praticiens", de diffuser la bibliographie française et étrangère sur le sujet, de finaliser les synthèses associant plusieurs disciplines.

7) Sa durée sera fixée provisoirement à 3 années. Elle sera reconduite ensuite en fonction de l'intérêt prouvé des travaux et des crédits disponibles.

BIBLIOGRAPHIE SUR LES ANDOSOLS

BIBLIOGRAPHIE

ANDOSOLS - SOLS VOLCANIQUES - PRODUITS "AMORPHES"

(Les références relatives à La Réunion sont encadrées)

- AHMAD (N.), PRASHAD (S.), 1970 - Dispersion, mechanical composition, and fractionation of West Indian Yellow Earth Soils (Andepts). *J. Soil Sci.*, 1 : 63-71.
- AMANO (Y.), 1981 - Phosphorus status of some Andosols in Japan. *J.A.R.Q.*, 15, 1 : 14-21.

ANGE (A.), BURDIN (S.), PORTIER (M.), 1977 - Fragmentation d'un sol ferrallitique à caractères andiques par les ultrasons et l'eau oxygénée. *Agron. Trop.*, 32, 4 : 352-359.

- AOMINE (S.), EGASHIRA (K.), 1968 - Flocculation of allophanic clays by electrolytes. *Soil Sci. Plant Nutr. Jap.*, 14, 3 : 94-98.
- AOMINE (S.), EGASHIRA (K.), 1970 - Heat of immersion of soil allophanic clays. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 16, 5 : 204-211.
- AOMINE (S.), JACKSON (M.L.), 1959 - Allophane determination in Andosols by Cation Exchange Capacity Delta Value. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 23 : 210-214.
- AOMINE (S.), KAWASAKI (H.), 1963_a - Vermiculite in some Japanese soils. *Soil Sci. Plant Nutr. Jap.*, 1 : 18-27.
- AOMINE (S.), KAWASAKI (H.), 1963_b - Influence of dispersion treatments on the properties of soil colloids. *Soil Sci. Plant Nutr. Jap.*, 9, 6 : 238-243.
- AOMINE (S.), MIYAUCHI (N.), 1962 - Clay mineral from diagenesis in warm and humid climate. *Soil Sci. Plant Nutr. Jap.*, 8, 5 : 186-190.
- AOMINE (S.), MIYAUCHI (N.), 1963 - Age of the youngest hydrated halloysite in Kyushu. *Nature, Lond.*, 199 : 1311-1312.
- AOMINE (S.), MIYAUCHI (N.), 1965 - Imogolite of imogo-layers in Kyushu. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 11, 5 : 28-35.
- AOMINE (S.), MIZOTA (C.), 1973 - Distribution and genesis of imogolite in volcanic ash soils of Northern Kanto, Japan. *Proceed. Int. Clay Conf. Madrid, 1972*, in J.M. Serratosa Ed. : 207-213.
- AOMINE (S.), OTSUKA (H.), 1968 - Surface of soil allophanic clay. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaide, 1 : 731-737.
- AOMINE (S.), WADA (K.), 1962 - Differential weathering of volcanic ash and pumice resulting in formation of hydrated halloysite. *Amer. Mineralogist.*, 47, 9-10 : 1024-1048.
- AOMINE (S.), WADA (K.), 1966 - Grade of weathering and fertility of volcanic ash soils of Aso volcano. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 12, 2 : 73-79.
- AOMINE (S.), YOSHINAGA (N.), 1955 - Clay minerals in volcanic ash soils in Japan. *Soil Sci.*, 1 : 349-358.

- ARIAS (A.E.), GUERRERO (R.R.), 1971 - algunas propiedades físicas de dos suelos derivados de cenizas volcánicas de Pasto, Colombia, determinadas por diferentes métodos. *Turrialba (Costa-Rica)*, 21, 4 : 393-403.
- ASKENASY (P.E.), DIXON (J.B.), Mc KEE (T.R.), 1973 - Spheroidal halloysite in a Guatemalan Soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37 : 799-803.
- AUBERT (G.), 1965 - Classification des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, III, 3 : 269-288.
- AUBERT (G.), SEGALEN (P.), 1966 - Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, IV, 4 : 97-112.
- BADAUT (D.), 1981 - Néoformation de smectites à partir de frustules de diatomées. Le cas des lacs salés de l'Altiplano de Bolivie. Mise en évidence par des techniques de microscopie électronique. Thèse 3ème cycle Univ. L. Pasteur, Strasbourg 73 p. 12 pl.
- BARRAT (B.C.), 1971 - Micromorphology of some intrazonal soils of New Zealand. *New Zealand J. Sci.*, 14, 3 : 698-733.
- BARRON (P.F.), WILSON (M.A.), CAMPBELL (A.S.), FROST (R.L.), 1982 - Detection of imogolite in soils using solid state ²⁹Si NMR. *Nature, London*, 299 : 616-618.
- BECH-BORRAS (J.), QUANTIN (P.) et SEGALEN (P.), 1976 - Etude des andosols d'Olot (Gerona, Espagne). 1ère partie : Ecologie, morphologie, caractéristiques physiques et chimiques - 2ème partie : caractéristiques minéralogiques, conclusions. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XIV, 1 : 73-87 et 2 : 95-111.
- BECH-BORRAS (J.), FEDOROFF (N.) et SOLE (A.), 1977 - Etude des Andosols d'Olot (Gerona, Espagne). 3ème partie : Micromorphologie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XV, 4 : 381-390.
- BENAYAS (J.), FERNANDEZ-CALDAS (E.), TEJEDOR-SALGUERO (M.L.), RODRIGUEZ (R.A.), 1980 - Características micromorfológicas de los suelos de una climatosecuencia de la vertiente meridional de la Isla de Tenerife. *Anal. Edafología Agrícola*, XXXIX, 1-2 : 51-74.
- BERTRAND (R.), 1969 - Les sols des formations volcaniques de l'Eérault. Thèse 3è cycle, Paris IRAT, 102 p. multigr.
- BESOAIN (E.M.), 1964 - Clay formation in some Chilean soils derived from volcanic materials. *New Zeal. J. Sci.*, 7 : 79-86.
- BESOAIN (E.M.), 1968 - Imogolite in volcanic soils of Chile. *Geoderma*, 2 : 151-169.
- BESOAIN (E.M.), SERRATOSA (J.M.), HIDALGO (A.), 1964 - Espectros de absorción infrarroja de la fracción arcilla de suelos volcánicos de Chile. *An. Edafol., Agron. biol.*, 23, 7-8 : 293-303.
- BIROT (P.), CAILLERE (S.), HENIN (S.), 1959 - Etude du problème des premiers stades de l'altération de quelques roches. *Ann. Agron.*, 103 : 257-265.
- BIRREL (K.S.), 1961 a - The absorption of cations from solution by allophane in relation to their effective size. *J. Soil Sci.*, 12 : 307-316.
- BIRREL (K.S.), 1961 b - Ion fixation by allophane. *New Zeal. J. Sci.*, 4 : 393-414.

- BIRREL (K.S.), 1964 - Voir FAO, 1964 : 11-27 et 74-81.
- BIRREL (K.S.), 1966 - Determination of clays content in soils containing allophane. *New Zeal. J. Agric. Res.*, 9, 3 : 554-564.
- BIRREL (K.S.), FIELDS (M.), 1952 - Allophane in volcanic ash soils. *J. Soil Sci.*, 3, 1 : 156-166.
- BIRREL (K.S.), GRADWELL (M.), 1956 - Ion exchange phenomena in some soils containing amorphous mineral constituents. *J. Soil Sci.*, 7 : 130-147.
- BISQUE (R.E.), 1962 - Clay polymerization in carbonate rocks : a silification reaction defined. Nat. Conf. clays. *Clay Min.*, 9, 1960, Lafayette, Indiana : 365-374.
- BONFILS (P.), MOINEREAU (J.), 1971 - Propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques au Sud du Massif-Central. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, LX, 3 : 345-363.
- BONFILS (P.), 1972 - Caractérisation des andosols de l'Escandorgue et des sols bruns andiques du Lodevois. *Bull. A.F.E.S.*, 1972, 3 : 112-127.
- BRIGATTI (M.F.), 1981 - Hisingerite, a review of its crystal chemistry. *Int. Clay Conf.*, Bologna, 1981 : 97-110.
- BRINDLEY (G.W.), PEDRO (G.), 1970 - Rapport du Comité International de nomenclature A.I.P.E.A. des minéraux argileux. Tokyo 1969, *Bull. Gr. fr. Argiles*, XXII : 1-4.
- BRINER (G.P.), JACKSON (M.L.), 1969 - Allophanic material in Australian soils derived from Pleistocene basalt. *Aust. J. Soil Res.*, vol. 1 : 163-169.
- BRINER (G.P.), JACKSON (M.L.), 1970 - Mineralogical analysis of clays in soils developed from basalts in Australia. *Israel J. Chem.*, 8, 3 : 487-500.
- BROADBENT (F.E.), JACKMAN (R.H.), Mc NICOLL (J.), 1964 - Mineralization of carbon and nitrogen in some New Zealand allophanic soils. *Soil Sci.*, 98 : 118-128.
- BROUWERS (M.), RAUNET (M.), 1981 - Inventaire morpho-pédologique dans les "Hauts" de La Réunion. Aptitudes agricoles des terres. IRAT, DDA. Aménagement agricole des hauts de l'île, 90 p. + annexes, cartes 1/25.000.
- BROUWERS (M.) et LATRILLE (E.), 1974 - Etude des terres cultivées de l'île d'Anjouan (Archipel des Comores). Approche morpho-pédologique en vue de la définition des contraintes et des propositions culturelles. *Agron. Trop.*, 29, 2-3 : 212-257.
- BRUCKERT (S.), HETIER (J.M.) et GUTIERREZ (F.), 1974 - Dynamique de l'humification des andosols du Massif-Central français et des Iles Canaries : Caractérisation physico-chimique des complexes organo-minéraux. *Bull. Assoc. Fr. Et. Sol, Sci. du Sol*, 1974, 4 : 225-245.
- BRYDON (J.E.), DAY (J.H.), 1969 - Use of the Fieldes an Perrott sodium fluoride test to distinguish the B horizons of podzols in the field. *Can. J. Soil Sci.*, vol. 50 : 35-41.
- CABEZAS-VIANO (O.), 1975 - Estudio mineralogico (fraccion < 2 μ) de los andosoles de las Islas Canarias. Thesis, Univ. La Laguna, Tenerife.
- CAILLERE (S.), BENIN (S.), RAUTURLAU (M.), 1982 - Cours de minéralogie des argiles, 2^e édition. Masson, Paris.
- CALHOUN (F.G.), CARLISLE (V.W.), LUNA (C.), 1970 - Micromorphology and genetic interpretation of selected colombian andosols. Dept. Soils, Univ. Florida, Gainesville, USA - Dept. Inst. Geogr. A. Codazzi, Bogota, Colombia.
- CALHOUN (F.G.), CARLISLE (V.W.), MEJIA (L.), 1970 - Unique micromorphological characteristics of Colombian andosols - mêmes références.
- CAMPBELL (A.S.), MITCHELL (B.D.), BRACEWELL (J.M.), 1968 - Effect of particle size, pH and organic matter on the thermal analysis of allophane. *Clay Min.*, 7 : 451-454.
- CAMPBELL (A.S.), YOUNG (A.W.), LIVINSTONE (L.G.), WILSON (M.A.), WALKER (T.W.), 1977 - Characterization of poorly-ordered aluminosilicates in a vitric andosol from New Zealand. *Soil Sci.*, 123, 6 : 362-368.
- CAMUS (G.), KIEFFER (G.), 1979 - Les couches rouges ("Red partings") du massif volcanique des Coirons (Ardèche, France). *Géologie Méditerranéenne*, VI,
- CHU (A.C.), SHERMAN (G.D.), 1952 - Differential fixation of phosphate by typical soils of the Hawaiian great soil groups. *Univ. Hawaii agric. Exp. : St. Bull.* n° 16, 20 p.
- CHUKHROV (F.V.), BERKMIN (S.I.), ERMILOVA (L.P.), MOLEVA (V.A.), RUDNITSKAYA (E.S.), 1964 - Le problème des allophanes. *Izvest Akad. Nauk SSSR, ser. Geol.*, 4 : 3-19 (en russe).
- CHUKHROV (F.V.), ZVJAGIN (B.B.), RUDNITSKAYA (E.S.), ERMILOVA (L.P.), 1966 - Sur la nature et la genèse des halloysites. *Izvest Akad. Nauk SSSR, ser. Geol.*, 5 : 3-20 (en russe).
- CHUKHROV (F.V.), ZVJAGIN (B.B.), 1966 b - Halloysite a cristallographically and mineralogically distinct species. *Int. Clay Conf.*, 1966, Jerusalem, I : 11-25.
- CHUKHROV (F.V.) et al., 1973 - New data on iron oxides in the weathering zone. *Proc. Int. Clay Conf.*, 1972, Madrid, 1 : 397-404, (déf. ferrihydrite).
- CHUKHROV (F.V.) et al., 1976 - Mineralogical criteria in the origin of marine iron-manganese nodules. *Mineral. deposita Berl.*, 11 : 24-32, (déf. ferroxhyte).
- CLEMENT (B.), 1970 - Etude des propriétés physiques des andosols et des sols andiques : recherche de corrélations entre les propriétés mécaniques et la rétention d'eau. DEA de Pédologie, Fac. Sci. Montpellier, 30 p.
- CLINE (M.G.) et al., 1955 - Soil Survey of the Territory of Hawaii. Soil Conserv. Service, US Dept. Agr., 644 p.
- CLOOS (P.), HERBILLON (A.), ECHEVERRIA (J.), 1968 - Allophane-like synthetic silico-alumina, phosphate adsorption and availability. 9. *Int. Congr. Soil Sci.*, Congr. 1968, Adelaïde, II : 733-743.
- CLOOS (P.), LEONARD (A.J.), MOREAU (J.P.), HERBILLON (A.), FRIPIAT (J.J.), 1969 - Structural organization in amorphous silico-alumina. *Clays and clay minerals*, vol. 17 : 271-287.

- COLEMAN (J.D.), FARRAR (D.M.), MARSH (A.D.), 1964 - The moisture characteristics composition and structural analysis of a red clay soil from Nyeri, Kenya. *Géotechnique*, 14 : 262-276.
- COLMET-DAAGE (F.), CUCALON (F.), 1965 - Caractères hydriques de certains sols des régions bananières d'Equateur. *Fruits*, 20, 1 : 19-23.
- COLMET-DAAGE (F.), LAGACHE (P.), 1965 - Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, III, 2 : 91-121.
- COLMET-DAAGE (F.) et al., 1967 et 1969 - Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques :
- 1ère partie : *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, V, 1 : 3-38.
- 2ème partie : *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, V, 4 : 353-391.
- 3ème partie : *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VII, 4 : 493-560.
- COLMET-DAAGE (F.) et al., 1970 - Caractéristiques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la côte Pacifique du Nicaragua. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VIII, 2 : 113-172.
- COLMET-DAAGE (F.), GAUTHEYROU (J. et M.), de KIMPE (C.), FUSIL (G.), 1972 - Dispersion et études des fractions fines des sols à allophane des Antilles et d'Amérique Latine. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, X, 2 : 169-191 et 3 : 219-242.
- COLMET-DAAGE (F.), GAUTHEYROU (J. et M.), SEGALIN (P.), 1973 - Etude des sols à allophane dérivés de matériaux volcaniques des Antilles et d'Amérique Latine, à l'aide d'une technique de dissolution différentielle. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XI, 2 : 97-120.
- COLMET-DAAGE (F.) et al., 1974 - Caractéristiques et propriétés hydriques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques du Chili-central. *ORSTOM-Antilles* n° 84, 115 p. multigr.
- COLMET-DAAGE (F.) et GAUTHEYROU (J.), 1974 - Soil associations on volcanic material in tropical America, with special reference to Martinique and Guadeloupe. *Trop. Agric. (Trinidad)*, 51, 2 : 121-128.
- C.P.C.S., France, 1967 - Classification des sols. Note ENSA Grignon, 67 p. multigr.
- C.P.C.S., Groupe de Travail Andosols, 1972 - Proposition de classification des andosols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, X, 3 : 302-303.
- CORTES (A.), FRANZMEIER (D.P.), 1972a - Weathering of primary minerals in volcanic ash derived soils of the Central Cordillera of Colombia. *Géoderma*, 8, 2-3: 165-176.
- CORTES (A.), FRANZMEIER (D.P.), 1972b - Climatosequence of ash-Derived Soils in the Central Cordillera of Columbia. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36, 4, : 653-659.
- COUTINET (S.), 1967 - Contribution à l'étude des sols à allophane. *Agron. trop.*, 22 : 1157-1175.
- CRADWICK (P.D.G.), FARMER (V.C.), RUSSEL (J.D.), 1972 - Imogolite a hydrated aluminium - silicate of tubular structure. *Nature, Phys. Sci.*, London, 240 : 187-189.
- DALRYMPLE (J.B.), 1964 - The application of soil micro-morphology to the recognition and interpretation of fossil soils in volcanic ash deposits from the North Island, New Zealand. "Soil Micromorphology" Proc. II int. working-meeting on Soil Micromorphology Arnhem. Elsevier Publ. Co, Amsterdam, London, New York : 339-343.
- DIXON (J.B.), Mc KEE (T.R.), 1974a - Internal and external morphology of tubular and spheroidal particles. *Clays Cl. Miner.*, 22 : 127-137.
- DIXON (J.B.), Mc KEE (T.R.), 1974b - Spherical halloysite particles in a volcanic ash soil of Mexico. *10th Int. Congr. Soil Sci.*, Moscou, VII : 115-124.
- DIXON (J.B.), WEEDS (S.B.) et al., 1977 - Minerals in soil environments. *Soil Sci. Soc. Amer.*, Madison USA, 948 p.
- Mc DOUGALL I., 1971 - The geochronology and evolution of the young volcanic island of Reunion, Indian Ocean. *Geochim. Acta*, 35 : 261-288.
- DUCHAUFOUR (Ph.), SOUCHIER (B.), 1966a - Note sur une méthode combinée d'extraction de l'aluminium et du fer libre dans les sols. *Science Sol*, 1 : 17-31.
- DUCHAUFOUR (Ph.), SOUCHIER (B.), 1966b - Sols andosoliques et roches volcaniques des Vosges. *Sci. de la Terre.*, XI, 3 : 345-365.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1972 - Processus de formation des sols. *Biochimie et géochimie. Coll. Et. et Rech.*, Nancy, 184 p.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1977 - Pédologie I ; Pédogénèse et classification. *Masson*, Paris.
- DUCHAUFOUR (Ph.), et SOUCHIER (B.), 1979 - Pédologie II ; Constituants et propriétés du sol. Ed. dirigée par M. BONNEAU et B. SOUCHIER. *Masson*, Paris.
- DUDAL (R.), SOEPRAPTOHARDJO (M.), 1960 - Some considerations on the genetic relationship between latosols and andosols in Java (Indonesia). *Trans. VIIIth. Int. Congr. Soil Sci.*, Madison, IV-V : 229-237.
- DUDAS (M.J.), HARWARD (M.E.), 1975 - Weathering and authigenic halloysite in soils developed in Mazama ash. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39 : 561-566.
- DULCE (R.A.J.), SANTACRUZ (M.M.), 1971 - Propiedades físicas de algunos suelos volcanicos del altiplano de Ipiales. *Tesis Universidad de Narino*.
- DUPUIS (J.), BOREMANS (P.), 1966 - Observations sur quelques sols du Massif Central. *Ann. Inst. Nation. Agron.*, IV : 317-375.
- ECKSTEIN (Y.), YAALON (D.H.), YARIV (S.), 1970 - The effect of lithium on the cation exchange behaviour of crystalline and amorphous clays. *Israel J. Chem.*, 8, 3 : 335-342.
- EDELSTEIN-HELLER (D.), et al, 1974 - Caractérisation chimique de certains sols formés sur matériaux volcaniques des Carpates orientales (Roumanie). *Anal. Inst. Stud. Cercetari Pedol. (Român)*, 1972, XL : 347-373.
- EGASHIRA (K.), AOMINE (S.), 1974 - Effects of drying and heating on the surface area of allophane and imogolite. *Clay Sci.*, 4, 5 : 231-242.
- EGAWA (T.), OSHIKAMO (Y.), 1963 - Vermiculite type clay minerals in some "Kuroboku" soil distributed in Mia Prefecture, of West Japan. *Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap.*, 9, 3 : 111-116.
- EGAWA (T.), SATO (A.), NISHIMURA (T.), 1960 - Release of OH ions from clays minerals treated with various anions, with special reference to the structure and chemistry of allophane. *Adv. Clay. Sci.*, 2 : 252-262.
- EGAWA (T.), 1977 - Properties of soils derived from volcanic ash. In soils derived from volcanic ash in Japan, by YOSHIKAKI ISHIZUKA and CA. BLACK ; *CITMINT, Mexico*. Ch. 2 : 10-63.

- ESCART (J.), 1951 - Les méthodes d'adsorption. a) adsorption des gaz. *Bull. Gr. Fr. Argilas*, 3 : 79-84.
- ESCHENA (T.), GESSA (C.), 1967 - Gli andosuoli della Sardegna. *Studi Sassari*, 15, 2 : 363-386.
- ESCHENA (T.), SOLINAS (V.), 1969 - Gli andosuoli del Vulcano Laziala. *Studi Sassari*, 17, 3 : 279-301.
- ESCOVAR (G.), JURADO (R.), GUERRERO (R.R.), 1972 - Propriedades físicas de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas del Altiplano de Pasto, Narino (Colombia). *Turrialba (Costa Rica)*, vol. 22, 3 : 338-346.
- ESWARAN (H.), de CONINCK (F.), 1971 - Clay mineral formations and transformations in basaltic soils in tropical environments. *Pedologie Gand*, XXI, 2 : 181-210.
- ESWARAN (H.), 1972 - Morphology of allophane, imogolite, and halloysite. *Clay min.*, 9 : 281-285.
- ESWARAN (H.), STOOPS (G.) et PAEPE (P. de), 1973 - A contribution to the study of soil formation on Isla Santa Cruz, Galapagos (Chili). *Pédologie (Gand)*, XXIII, 2 : 100-122.
- FAO - UNESCO, 1964 - Meeting on the classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, Juin 1964. World Soil Resources reports, 14. FAO-UNESCO, 169 p. Scope of volcanic Ash Soils, Their Extent and Distribution by M. OHAMASA..... p. 7
 The "Andosols" or "humic Allophane" Soils of South America, by A.C.S. Wright..... p. 9
 Report on Soils of Volcanic Ash Origin in El Salvador, by M. RICO..... p.23
 The Andosols in Indonesia, by Tan Kim Hong..... p.23
 Hawaiian Soils from Volcanic Ash, by D. Sherman and L.D. Swindale..... p.36
 Volcanic Ash Soils of Korea, by Shin Yong Hwa..... p.50
 Volcanic Ash Soils of the Philippines, by J.A. Mariano..... p.53
 Genesis and Morphology of Volcanic Ash Soils, by M. Ohmasa..... p.56
 Genesis and Morphology of ash-derived soils in the United States of America, by K. Flach..... p.61
 Properties of Volcanic Ash Soils, by K. Kobo..... p.71
 Some properties of Volcanic Ash Soils, by K.S. Birrell..... p.74
 The properties of Soils derived from Volcanic Ash, by L.D. Swindale... p.82
 Mineralogical Properties of Volcanic Ash Soils in Japan, by T. Egawa... p.89
 Volcanic Ash Soils of Chile, by E. Besoain..... p.92
- FAO-UNESCO, 1974 - Soil Map of the world, 1/5.000.000, Vol. I, Legend, 59 p., Paris, modifié 1981 - Revised legend, multi. 115p. Rome, 1981.
- FARMER (V.C.), FRASER (A.R.), RUSSEL (J.D.), YOSHINAGA (N.), 1977 - Recognition of imogolite structures in allophanic clays by infrared spectroscopy. *Clay Min.*, 12, 1 : 55-57.
- FARMER (V.C.), FRASER (A.R.), TAIT (J.M.), PALMIERI (F.), VIOLANTE (P.), NAKAI (M.), YOSHINAGA (N.), 1978 - Imogolite and proto-imogolite in an Italian soil developed on volcanic ash. *Clay Min.*, 13, 3 : 271-274.
- FARMER (V.C.), FRASER (A.R.), TAIT (M.), 1979 - Characterization of the chemical structures of natural and synthetic aluminosilicate gels and soils by infrared spectroscopy. *Geochim., Cosmochim. Acta*, 43 : 1417-1420.
- FARMER (V.C.), FRASER (A.R.), 1979 - Synthetic imogolite, a tubular hydroxy-aluminium silicate. *Int. Clay Conf.*, 1978, Elsevier Sc. Publ. Comp., Amsterdam : 547-553.
- FARMER (V.C.), RUSSEL (J.D.), BERROW (M.L.), 1980 - Imogolite and proto-imogolite-allophane in spodic horizons : evidence for a mobile aluminium-silicate complex in podzol formation. *J. Soil Sci.*, 31 : 673-684.
- FARMER (V.C.), SMITH (B.F.L.), TAIT (J.M.), 1977 - Alteration of allophane and imogolite by alkaline digestion. *Clay Min.*, 12, 3 : 195-197.
- FARMER (V.C.), SMITH (B.F.L.), TAIT (J.M.), 1979 - The stability, free energy and heat of formation of imogolite. *Clay Min.*, 14, 2 : 103-104.
- FERNANDEZ-CALDAS (E.), BENAYAS (J.), ALONSO (J.J.), 1975 - Influencia del medio ecologico en la micromorfologia de Andosuelos (I. Tenerife), con especial referencia a la materia organica y fraccion arcilla. *Anal. Edafol. Agrobiol.* XXXVI, 1-2 : 77.
- FERNANDEZ-CALDAS (E.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), 1975 - Andosoles de las Islas Canarias. *Servicio de Publicaciones de la Caja General de Ahorros de Santa Cruz de Tenerife*, nº29, 210 p.
- FERNANDEZ-CALDAS (E.), QUANTIN (P.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), 1978 - Séquence climatique des sols récents de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). 2ème partie : Caractéristiques minéralogiques, interprétation et classification. *Cahiers ORSTOM, série Pédol.*, XVI, 4 : 397-412.
- FERNANDEZ-CALDAS (E.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), QUANTIN (P.), 1979 - Séquences climatiques de sols anciens de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). 1ère partie : Caractéristiques morphologiques et physico-chimiques. *Cah. ORSTOM série Pédol.*, XVII, 1 : 37-46.
- FERNANDEZ-CALDAS (E.), QUANTIN (P.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), 1981 - Séquences climatiques de sols dérivés de roches volcaniques aux Iles Canaries. *Géoderma*, 226,1 : 47-62.
- FEY (M.V.), LE ROUX (J.), 1977 - Properties and quantitative estimation of poorly crystalline components in sesquioxidic soil clays. *Clays Cl. Miner.*, 25 : 285-294.
- FIEDES (M.), 1955 - Clay mineralogy of New Zealand Soils, Part. 2 : Allophane and related colloids. *New Zealand J. Sci. Tech. B*, 37 : 336-350.
- FIEDES (M.), 1962 - The nature of the active fraction of soils. *Int. Soc. Soil Sci. Comm. IV* et V. Joint meeting 1962. *Palmerston North, New Zeal.* : 62-78.
- FIEDES (M.), 1966 - The nature of allophane in soils. 1. Significance of structural randomness in pedogenesis. *New Zeal. J. Sci.*, 9 : 599-607.
- FIEDES (M.), CLARIDGE (G.G.C.), 1975 - Allophane in Soil components, chap. 10, : 351-393. *Ed. J.E. Gieseking Springer-Verlag, New York, Heidelberg.*
- FIEDES (M.), FURKERT (R.J.), 1966 - The nature of allophane in soils: 2. Differences in composition. *New Zeal. J. Sci.*, 9 : 608-622.
- FIEDES (M.), FERROTT (K.W.), 1966 - The nature of allophane in soils: 3. Rapid field and laboratory test for allophane. *New Zeal. J. Sci.*, 9 : 623-629.
- FIEDES (M.), SCHOFIELD (R.K.), 1960 - Mechanism of ion adsorption by inorganic soil colloids. *New Zeal. J. Sci.*, 3 : 563-579.
- FLACH (K.W.) et al., 1980 - Genesis and classification of Andepts and Spodosols, in Theng, "soils with variable charge". *New Zealand Society of Soil Science* : 411-426.
- FOSBERG (M.A.), FALEN (A.L.), et al., 1979 - Physical, Chemical and Mineralogical Characteristics of Soils from volcanic ash in Northern Idaho. I, Morphology and genesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43 : 541-547 ; II, Phosphorus sorption id., p. 547 et suivante.
- FOX (R.L.), et al., 1968 - Phosphate requirements of Hawaiian Latosols and residual effects of fertilizer phosphorus. *Int. Congr. Soil. Sci.*, 9, 1968, Adelaide, vol II : 301-310.
- FREI (E.), 1961 - Filtrations-Verlagerung ¹⁴C Markierter organischer Substanz in einem Andosol am Mt Kenya. *Bull. B.G.S.*, 5 : 21-28.
- FUJISHIMA (R.Y.), FAN (P.F.), 1977 - Hydrothermal mineralogy of Keolu Hills, Oahu (Hawaii). *Amer. Mineralog.*, 62, 5-6 : 574-582.

- FURKERT (R.J.), FIELDS (M.), 1968 - Allophane in New Zealand Soils. *Int. Congr. Soil Sci.* 9, 1968, Adelaide vol. III : 133-141.
- GALINDO (G.G.), OLGUIN (C.), SCHALSCHA (E.B.), 1971 - Phosphate sorption capacity of clay fractions of soils derived from volcanic ash. *Geoderma*, 7 : 225-232.
- GALLARDO (J.E.) et al., 1973 - Sobre la presencia y caracterización de andosuelos en la Sierra de Francia (España). *Anal. Edafol. Agrobiol.*, 32 : 1135-1141.
- GAUTHIEROU (J. et M.), COLMET-DAAGE (F.), 1976, 1977 - 1981 - Chronobibliographie signalétique et analytique des sols à allophane. 1ère période : 1809 - 1972, T.I index, 158 p., T.II chronobibliographie, 322 p., 2ème période : 1973-1975, T.III, index et chronobibliographie - Reprise à jour annuelle en 1978, 79, 80 et 81 jusqu'aux références de 1981. *Publ. multigr.* Bureau des Sols des Antilles (ORSTOM).
- GENSE (C.), 1970a - Premières observations sur l'altération de quelques roches des hautes terres malgaches. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VIII, 4 : 451-467.
- GENSE (C.), 1970b - Altération du basalte dans une basse colline de la côte est de Madagascar (unité morphologique de cette région). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, II, 2, 241-258.
- GENSE (C.), 1973 - Conditions de formation de l'imogolite dans les produits d'altération de roches volcaniques basiques de l'île de la Réunion. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, XXV, 1 : 79-83.
- GENSE (C.), 1976 - L'altération des roches volcaniques basiques sur la côte orientale de Madagascar et à la Réunion. *Thèse Sci. Université Louis Pasteur. Strasbourg*, 176 p.
- GIBBS (H.S.), 1968 - Volcanic ash soils in New Zealand. *New Zeal. Dept. sci. industr. Res. Inform.*, ser. n° 65, 39 p.
- GONZALES-BATISTA (A.), HERNANDEZ-MORENO (J.M.), FERNANDEZ-CALDAS (E.), HERBILLON (A.J.), 1981 - Influence of silica content on the surface charge characteristics of allophanic clays. *Clays and Clay Miner.*, 29, 6 :
- GONZALEZ-BATISTA (A.), 1978 - Estudio de las cargas permanentes y variables en los suelos de Tenerife. *Tesis doctoral*, Univ. La Laguna.
- GONZALEZ-BATISTA (A.), HERNANDEZ-MORENO (J.M.), FERNANDEZ-CALDAS (E.), 1980 - Características electroquímicas de Andosoles. II. Punto cero de carga y retención iónica. *Anal. Edaf. Agrob.* XXXIX, 5-6: 835-843 - III Conductimetrica, id, XXXIX, 7-8 : 1175-1180.
- GONZALEZ (M.A.), GAVANDE (S.A.), 1969 - Propiedades físicas de algunos suelos dedicados al cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica. *Turrialba (Costa Rica)*, 19, 2 : 235-245.
- GONZALEZ-MARTINEZ (S.P.), BESOAIN (E.M.), 1976 - Minerales 2:1 y 2:2 en suelos volcanicos de Chile. 2 - Suelos derivados de toba riolitica en la region central. *Ciencia e Investigacion Agraria*, 3, 2-3 : 129-137.
- GONZALEZ DE VALLEJO (L.I.), JIMENEZ SALAS (J.A.), LEGUEY JIMENEZ (S.), 1981 - Engineering geology of the tropical volcanic soils of la Laguna, Tenerife. *Engineering Geology*, 17 : 1-17.
- GREENLAND (D.J.), QUIRK (J.P.), 1962 - Surface area of soil colloids. *Int. Soc. Soil Sci. Comm. IV et V. Joint meeting 1962. Palmerston North, New Zealand* : 79-87.
- GREENLAND (D.J.), WADA (K.), HAMBLIN (A.P.), 1969 - Imogolite in Papua. *Austral. J. Soil Sci.*, 32 : 56-58.
- GUNJIGAKE (N.), WADA (K.), 1981 - Effects of phosphorus concentration and pH on phosphate retention by active Aluminium and Iron of Ando Soils. *Soil Sci.*, 132, 5 : 347-352.
- GUTIERREZ-JEREZ (F.), BORGES-PEREZ (A.), del CASTILLO (T.J.), 1980 - Estudio del fosforo asimilable en andosoles de las Islas Canarias. *Anal. Edafol. Agrobiol.*, XXXIII : 2165-2173.
- GUVEN (N.), LAFON (G.M.), LEE (J.), 1981 - Experimental hydrothermal alteration of albite to clays : preliminary results. *Int. Clay Conf., Bologna*, 1981 : 495-511.
- HARVARD (M.E.), BORCHARDT (G.A.), 1969 - Mineralogy and trace elements composition of ash and pumice soils in the Pacific North West of the United States (USA). *Panel. Volcan. Ash Soils Latin America* : B5:1-12.
- HASIMOTO (I.), JACKSON (M.L.), 1960 - Rapid dissolution of allophane and kaolinite-halloysite after dehydration. *Clays Cl. Min.*, 7 : 102-113.
- HENMI (T.), PARFITT (R.L.), 1980 - Laminar opaline silica from some volcanic ash soils in New Zealand. *Clays clay Miner.*, 28 : 57-60.
- HENMI (T.), WADA (K.), 1976 - Morphology and composition of allophane. *Amer. Mineral.*, 61 : 379-390.
- HENMI (T.), YOSHINAGA (N.), 1981 - Alteration of imogolite by dry grinding. *Clay Miner.*, 16 : 139-149.
- HETIER (J.M.), 1968 - Etude de quelques sols andosoliques sur roches volcaniques primaires des Vosges. *Thèse 3ème cycle, Univ. Nancy*, I, 54 p.
- HETIER (J.M.), TARDY (Y.), 1969 - Présence de vermiculite-Al, montmorillonite-Al, et leur répartition dans quelques sols des Vosges. *C.R. Acad. Sci. Fr., sér. D*, 260 : 259-261.
- HETIER (J.M.), 1970 - Etude de l'application du test FNa à l'estimation des constituants amorphes dans les sols tempérés. *Sci. du Sol* : 91-97.
- HETIER (J.M.), 1971-73 - Caractérisation et répartition de quelques sols sur roches volcaniques du Massif Central. *Sci. du Sol*, 1971, 2 : 51-82 ; 1973, 2 : 97-114.
- HETIER (J.M.), 1975 - Formation et évolution des andosols en climat tempéré. *Thèse Université Nancy*, 194 p. multigr.
- HETIER (J.M.), JEANROY (E.), 1973 - Solubilisation différentielle du fer, de la silice et de l'alumine par le réactif Oxalate-Dichionite. *Pédologie, Gand*, XXIII, 2 : 85-99.
- HETIER (J.M.), GUTIERREZ-JEREZ (F.), BRUCKERT (S.), 1974 - Morphoscopie et composition des complexes organo-minéraux des andosols. *C.R. Acad. Sci., Paris*, T. 278 : 2735-2737.
- HETIER (J.M.), YOSHINAGA (N.), WEBER (F.), 1977 - Formation of clay minerals in Ando soils under temperate climate. *Clay Miner.*, 12 : 299-307.
- HIGASHI (T.), IKEDA (H.), 1974 - Dissolution of allophane by acid oxalate solution. *Clay Sci.*, 4 : 205-211.
- HIGASHI (T.), WADA (K.), 1977 - Size fractionation, dissolution analysis and Infra-Red Spectroscopy of humus-complexes in Ando Soils. *J. Soil Sci.*, 28 : 653-663.
- HOFMANN (V. von), REINGRABER (R.), 1969 - Einlagerung Verbindungen in wasserarmen Halloysite. *Z. anorgan. Allg. Chemie*, 369 : 208-211.
- HORIKAWA (Y.), FUJIO (Y.), 1977 - State analysis of iron in allophanic clays. I. Mössbauer effect analysis of iron in allophanic clays. *Clay Sci.*, 5 : 67-77.

- HOUNG (K.H.), 1964 - A study on the soils containing amorphous materials in the Island of Hawaii, *Thèse Univ. Hawaii*, 187 p.
- HOUNG (K.H.), UEHARA (G.), SHERMAN (G.D.), 1966 - On the exchange properties of allophanic clays. *Pacific Sci.*, 20, 4 : 507-514.
- ICOMAND 1979-1981 - International Committee on the classification of Andisols. Circular letters n° 1 (3 Ap. 1979), n° 2 (25 jan. 1980), n° 3 (30 Ap. 1980), n° 4 (9 sept. 1981) (M. Leamy, New Zeal. Soil Bureau.
[Circ. → n° 9 (1 May 1981)]).
- IIMURA (K.), 1960a - Ion adsorption curves in allophane. *Clay Sci. Jap.*, 1, 3-4 : 40-44.
- IIMURA (K.), 1960b - Acidic property and ion exchange in allophane. *Clay Sci. Jap.*, 1, 1-2 : 28-32.
- IIMURA (K.), 1966 - Acidic properties and cation exchange of allophane and volcanic ash soils. *Bull. Nation. Inst. Agric. Sci.*, Tokyo B, 17 : 101-157 (Jap.)
- IIMURA (K.), 1969 - The chemical bonding of atoms in allophane. The "structural formula" of allophane. *C.R. Int. Clay Conf. Tokyo*, : 161-172.
- INGLES (O.G.), WILLOUGHBY (D.R.), 1967 - An occurrence of hisingerite with evidence of its genesis, *Soil Sci.*, 104, 5 : 383-385.
- INIGUEZ (J.), BARRAGAN (E.), 1974 - Andosuelos desarrollados sobre filitas en Ulzama (Navarra). *Anal. Edafol. Agrobiol.*, 33 : 1055-1069.
- INOUE (T.), WADA (K.), 1968 - Adsorption of humified clover extracts by various clays. *9th Congr. Soil Sci.*, III : 289-298.
- IVANOVA (E.N.), ROZOV (N.N.), 1967 - Classification and determination of Soil Types. n° 1-5. (Translated from Russian, 1970 - *Israel Progr. Sci. Transl. Jerusalem*, 271 p.)
- IVANCOVA (E.N.) et al., 1942 - Present status of the doctrine of soil genesis in the USSR *Soviet Soil Sci.*, 3 : 265-277.
- JACKMANN (R.H.), 1964 - Accumulation of organic matter in some New Zealand Soils under permanent pasture. *New Zealand J. Agric. Res.*, 7, 4 : 445-479.
- JACKMANN (R.H.), 1966 - Organic matter, ploughing and the supply of available nutrients in pasture soils. *N.Z. agric. Sci.*, 1, 7 : 19-21.
- JACKSON (M.L.), 1965 - Free oxides, hydroxides and amorphous aluminosilicates. in : Methods of soil analysis. C.A. Black ed. *Amer. Soc. Agron. Madison* : 578-603.
- JACKSON (M.L.), 1968 - Weathering of primary and secondary minerals in soils. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaide, IV : 281-292.
- JACKSON (M.L.), TYLER (S.A.), WILLES (A.L.), 1948 - Weathering sequence of clay size minerals. *J. Phys. Chem.* 52 : 1237-1262.
- JONES (R.C.), UEHARA (G.), 1973 - Amorphous coatings on mineral surfaces. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38 : 792-798.
- KALMS (J.M.), 1970 - Etude des propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques. Recherches de corrélation entre la granulométrie, la densité apparente et les propriétés physiques. *DEA de Pédologie, Montpellier*, 37 p.
- KANEHIRO (Y.), SHERMAN (S.D.), 1956 - Effect of dehydration-rehydration on cation exchange capacity of Hawaiian Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 20 : 341-344.
- KANNO (I.), 1961 - Genesis and classification of humic allophanic soil. in Japan. *Int. Soc. Soil Sci. Com. II at V. Joint Meeting 1961. Palmerston North, New Zealand* : 421-427.
- KANNO (I.), ARIMURA (S.), 1967 - Dispersion of humic allophanic soils with supersonic vibration. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 13, 6 : 165-178.
- KANNO (I.) et al., 1968 - Weathering and clay mineralogical characteristics of volcanic ashes and pumices in Japan. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaide, III : 111-132.
- KAWAI (K.), 1969a - Changes in cation exchange capacity of some Andosols with dithionite-citrate treatment, *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 15, 3 : 97-103.
- KAWAI (K.), 1969b - Micromorphological studies of andosols in Japan. *The Bull. of Nation. Inst. of Agric. Sci.*, (Japan), Série B, n° 20.
- KAWAI (K.), 1977 - Estimation of the amount of amorphous materials for characterizing andosols. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 41, 6 : 1171-1175.
- KAWAI (K.), 1978 - Amorphous materials of andosols (Kuroboku) in Japan. *J.A.R.Q.*, 12, 3 : 132-137.
- KAWAI (K.), 1980 - The relationship of phosphorus adsorption to amorphous Aluminium for characterizing Andosols. *Soil Science*, 129, 3 : 186-190.
- KAWASAKI (H.), AOMINE (S.), 1966 - So called 14 Å clays minerals in some Andosols, *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 12, 4 : 144-150.
- KIMPE (C.R. de), LAVERDIERE (M.R.), 1982 - Dissolution of organo-metallic complexes and silica from the clay fraction of Podzolic Soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 13, 5 : 387-400.
- KIRKMAN (J.E.), 1977 - Possible structure of halloysite disks and cylinders observed in some New Zealand rhyolitic tephra. *Clays minerals*, 12, 3 : 199-216.
- KITAGAWA (Y.), 1971 - The "unit particles" of allophane. *Amer. Miner.*, 56, 3-4 : 465-475.
- KITAGAWA (Y.), 1972 - Substitution of aluminium by iron in allophane. *Clay Sci.*, 4, 151-154.
- KITAGAWA (Y.), 1973 - A short discussion of the chemical composition of allophane basal on the data of Yoshinaga in 1966. *Soil Sci. Plant Nutrit.*, 19, 4 : 321-324.
- KITAGAWA (Y.), 1974 - Dehydration of allophane and its structural formula. *Amer. Mineral.*, 59 : 1094-1098.
- KITAGAWA (Y.), 1975 - Dehydration, micromorphology and chemical composition of allophane. *Bull. Nat. Inst. Agric. Sci.*, n° 26, série B : 130-131.
- KITAGAWA (Y.), 1976-77 - Determination of allophane and amorphous inorganic matter in clay fraction of soils.
I - Allophane and allophane-halloysite mixture.
II - Soil clay fraction.
Soil Sci. Plant Nutrit. 22, n° 2 : 137-147 ; 23, n° 1 : 21-31.
- KOBO (K.), FUJISAWA (T.), 1964 - Studies on the clay-humus complex. 4: Preferential adsorption of humic acid by clay. *J. Sci. Soil Manure, Tokyo*, 35 : 40-46 (J.).
- KOHYAMA (N.), FUKUSHIMA (K.), FUKAMI (A.), 1981 - Interlayer hydrates and complexes of clay minerals observed by electron microscopy using and environmental cell. *Int. Clay Conf., Bologna*, 1981 : 373-384.
- KUBOTA (T.), 1972 - Aggregate formation of allophanic soils : Effect of drying on the dispersion of the soils. *Soil Sci. Plant. Nutrit. (Tokyo)*, 18 : 79-87.
- KUBOTA (T.), 1973 - Studies on surface properties of soil particles and formation of soil structure. *Soc. Sci. Soil Manure, Japan (ed.) Dojo Hiryo no Kenkyu*, vol. 4, Yokendo, Tokyo : 37-45.

- KURASHIMA (K.), SHOJI (S.), YAMADA (I.), 1981 - Mobilities and related factors of chemical elements in the top-soil of Andosols in Tohoku, Japan - 1 : Mobility sequence of major chemical elements. *Soil Sci.*, 132, 4 : 300 - 307.
- KYUMA (K.), KAWAGUCHI (K.), 1964 - Oxidative changes of polyphenols as influenced by allophane. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28 : 371-374.
- KYUMA (K.), HUSSAIN (A.), KAWAGUCHI (K.), 1969 - The nature of organic matter in soil organo-mineral complexes. *Soil Sci. Plant. Nutrit.*, 15, 4 : 149-155.
- LAI (S.H.), SWINDALE (L.D.), 1969 - Chemical properties of allophane from Hawaiian and Japanese soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33 : 804-808.
- LAMOUREUX (M.), QUANTIN (P.), 1973 - Utilisation des courbes de vitesse de dissolution dans la méthode cinétique de SEGALÉN. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XI, 1 : 3-14.
- LATHAM (M.), DENIS (B.), et al, 1983 - Iles Fidji orientales. Etude du milieu naturel, de son utilisation et de son évolution sous l'influence humaine. *Rapp. Génér. n° 3, Projet UNESCO, UNFPA - Travaux. Doc. ORSTOM n° 162*, Paris, 184 p., 4 cartes h. t.
- LEON VALLEJO (G.), SEGALÉN (P.), 1970 - Observations sur des sols rouges dérivés de roches volcaniques basiques dans le Bajío (Mexique Central). *Cah. ORSTOM, série Pédol.*, VIII, 1 : 49-61.
- LEVIN (I.), OTT (E.), 1932 - X-rays study of opals, silica glass and silica gels. *Z. Kristallogr.*, 81 : 305-318.
- LOGANATHAN (P.), SWINDALE (L.D.), 1969 - The properties and genesis of four middle-altitude Dystrandepts volcanic ash soils from Maunaea Kea, Hawaii. *Pacific Sci.*, XXIII, 2 : 161-171.
- LOYNET, 1975 - Relations entre les propriétés hydriques, la matière organique et les substances amorphes dans des sols sur matériaux basaltiques en climat tropical humide. *Mémoire de stage à l'ENSAM-IRAT*, 16 p.
- LULLI (L.) et BIDINI (D.), 1978 - Guida escursione dibattito sui suoli dei vulcani Roccamonfina e Vulture. *Centr. Genesi Classif. Cartogr. Suolo CNR, Univ. Firenze, Publ. n° 51*.
- LULLI (L.) et BIDINI (D.), 1980 - A climosequence of soils from tuffs on slopes of an extinct volcano in Southern Italy. *Geoderma*, 24, 2 : 129-142.
- LULLI (L.), BIDINI (D.), DABIN (B.), QUANTIN (P.), 1983 - Etude de deux sols andiques dérivés de roches volcaniques, d'Italie du Sud (Mts Roccamonfina et Vulture), à caractère crypto-podzolique. *Cah. ORSTOM, série Pédol.*, XX, 1 : 27 - 61.
- MAC KEAGUE (J.A.), KODAMA (H.), 1981 - Imogolite in cemented horizons of some British Columbia soils. *Geoderma*, 25 : 189-197.
- MEADA (T.), TAKENAKA (H.), WARKENTIN (B.P.), 1977 - Physical properties of allophane soils. *Advances in Agronomy*, 29 : 229-264.
- MARTINI (J.A.), 1969 - Geographic distribution and properties of ash derived soils in Central America. *Congrés Turrialba, Costa Rica A 3* : 1-12.
- MARTINI (J.A.), PALENCIA (J.A.), 1975 - Soils derived from volcanic ash in Central America, 1 : Andepts. *Soil Sci.*, 120, 4 : 278.
- MASUI (J.), SHOJI (S.), UCHIYAMA (N.), 1966 - Clay mineral properties of volcanic ash soils in the northeastern part of Japan. *Tohoku J. Agric. Res.*, 17 : 17-35.
- MASUI (J.), SHOJI (S.), 1969 - Crystalline clay minerals in volcanic ash soils in Japan. *Proc. 3th Int. Clay Conf.*, 1 : 383-392.
- MATSUI (T.), 1969 - Clay mineralogy of the Volcanic Ash soils profiles on the southern foot of the Zao volcano, *Misc. Rep. Res. Inst. Nat. Resources, Jap.*, 79, 25 : 22-31.
- MATSUI (T.), TOTANI (M.), 1963 - Studies on some functions of vermiculitic clays Japanese soils. *Clay Sci. Jap.*, 1, 6 : 29-49.
- MATSUSAKA (Y.), SHERMAN (G.D.), 1961 - Magnetism of iron oxides Hawaiian soils. *Soil Sci.*, 91 : 239-245.
- MATSUSAKA (Y.), SHERMAN (G.D.), SWINDALE (L.D.), 1965 - Nature of magnetic mineral in Hawaiian Soils. *Soils Sci.*, 100, 3 : 192-199.
- MEHRA (O.P.), JACKSON (M.L.), 1960 - Iron oxides removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Nat. Conf. on Clays and Clay Miner.*, 7, 1958, Washington : 317-327.
- MELIERES (F.), PERSON (A.), 1978 - Genèse de smectites ferrifères par altération deutérique de la base de coulées volcaniques du Massif Central français. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dym.*, (2), XX, fasc. 5 : 389-398.
- METSON (A.J.), LEE (R.), 1977 - Soil chemistry in relation to the New Zealand genetic soil classification. *Soil Sci.*, 123, 6 : 347-352.
- MILLOT (G.), 1964 - Géologie des argiles, *Masson Paris*, 494 p.
- Ministry of Agriculture and Forestry, Japanese Government - 1964 - Volcanic ash soils in Japan. *Ministry of agriculture & forestry, Tokyo*, 289 p. multigr.
- MITCHELL (D.L.), FARMER (V.C.), Mc HARDY (W.J.), 1964 - Amorphous inorganic materials in soils. *Adv. in Agron.*, 16 : 327-373.
- MIYAUCHI (N.), AOMINE (S.), 1964 - Does "Allophane B" exist in Japanese volcanic ash soils. *Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap.*, 10, 5 : 199-203.
- MIYAUCHI (N.), AOMINE (S.), 1966 - Effects of exchangeable cation on the high temperature exothermic peak of allophane. *Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap.*, 12, 1 : 13-17.
- MIZOTA (C.), 1976 - Relationships between the primary minerals and the clay mineral composition of some recent andosols. *Soil Sci. Plant. Nut.*, 22, 3 : 257-268.
- MIZOTA (C.), WADA (K.), 1980 - Implications of clay mineralogy to the weathering and chemistry of Ap horizons of Ando soils in Japan. *Geoderma*, 23 : 49-63.
- MIZOTA (C.), 1981 - Clay mineralogy of seven dystrandepts developed from basalts in Northland, the French Massif Central and the Western Oregon. *Soil Sci. Plant. Nut.*, 27, 4 : 511-522.
- MOINEREAU (J.), 1965 - Observations pédologiques sur les sols du Massif Volcanique des Coirons. *Bull. A.F.E.S.*, 6-7 : 188-223.
- MOINEREAU (J.), 1966 - Etude des sols et des paléosols du Bas-Vivarais. *Thèse 3ème cycle, Paris*, 164 p.
- MOINEREAU (J.), 1974 - Andosols, sols podzolisés, sols andiques et sols bruns. Séquence sur matériaux basaltiques dans le Velay oriental et le Vivarais (Massif Central, France). Evolution de la fraction amorphe. *Sci. du Sol*, 4 : 253-267.

- MOINEREAU (J.), 1975 - Andosols, sols podzolisés, sols andiques et sols bruns : nature et évolution de la fraction argileuse. *Sci. du sol*, 4 : 295-313.
- MOINEREAU (J.), 1977a - Altération des matériaux basaltiques et genèse des argiles en climat tempéré humide et milieu organique. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, XV, 2 : 157-173.
- MOINEREAU (J.), 1977b - Adsorption de composés humiques par une montmorillonite H+, Al³⁺. Présence de smectites à couches interfoliaires organo-minérales dans les Andosols. *Clay Miner.*, 12 : 75-82.
- MOINEREAU (J.), 1977c - Altération des roches, formation et évolution des sols sur basalte, sous climat tempéré humide (Velay - Vivarais - Coirons). *Thèse, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier*, 139 p.
- MOINEREAU (J.), GRILLOT (J.C.), NAUD (G.), 1972 - Origine et géochimie des niveaux rouges du plateau basaltique des Coirons en Ardèche. *Rev. Géol. Phys. Géol. Dyn.*, XIV, 1 : 85-94.
- MOINEREAU (J.), BIBENT (B.), TRICHET (J.), 1974 - Présence de produits amorphes et de minéraux argileux de la famille de l'hallowysite dans les eaux de drainage d'un tuf basaltique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, T. 278, 6 mai 1974, Sér. D : 2389-2392.
- MONACO (A.), VALETTE (J.N.), 1978 - Etude des produits d'altération fumerollienne et météorique à Vulcano (Iles Eoliennes, Italie). *Clays Minerals*, 13, 1 : 79-91.
- MULJADI (D.), 1972 - Structural problems of Indonesian soils. *Medelingen van de Faculteit Landbouwentenschappen. Rijksuniversiteit, Gent*, 37, 3 : 1062-1065.
- MUMBRUN (L.E. de), CHESTERS (G.), 1964 - Isolation and characterization of some soils allophanes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28, 3 : 355-359.
- NAKAI (M.), YOSHINAGA (N.), 1976 - A device in the determination of Si in dithionite-citrate-bicarbonate extract. *Soil Sci. Plant. Nutr.*, 22, 4 : 481-483.
- NAKAI (M.), YOSHINAGA (N.), 1980 - Fibrous goethite in some soils from Japan and Scotland. *Geoderma*, 24 : 143-158.
- NAVROT (J.), SINGER (A.), 1976 - Geochemical changes accompanying basic igneous rocks clays transition in a humid mediterranean climate. *Soil Sci.*, 121, 6 : 337-345.
- NEALL (V.E.), 1977 - Genesis and weathering of andosols in Taranaki, New Zealand. *Soil Sci.*, 123 (6) : 400-408.
- NEW ZEALAND, Department of Scientific and Industrial Research, 1968 - Soils of New Zealand, Part. 1, chap. 3. Regional description of New Zealand Soils. Part. 2, chap. 6. Mineralogy of New Zealand Soils. Part. 3, chap. 11, description and analyses of reference soils. *Soil Bureau Bull.* n° 26.
- NORTHEY (R.D.), 1966 - Correlation of engineering and pedological soil classification in New Zealand. *New Zealand J. Sci.*, 9, 4 : 809-832.
- OBO (Y.), KOBO (K.), 1965 - 1° Agregates in fine sand fraction of volcanic ash soils by sonic treatment. *J. Sci. Soil Manure, Tokyo*, 36 : 203-210 (en Jap.).
- OHMASA (M.), 1964 - Scope of volcanic ash soils. *In FAO Meet.*, 1964 : 7-8.
- OKAJIMA (H.), 1977 - Reclamation and improvement of soils derived from volcanic ash. *In Soils derived from volcanic ash in Japan*, by YOSHITAKI ISHIZUKA and C.A. BLACK ; *CEMEX, Mexico*. Chap. 3 : 65-84.
- ONIKURA (Y.), 1964 - Factors relating to labile phosphate levels in volcanic ash soils. *Soil Sci. Plant. Nutr. Jap.*, 10 : 20-27.
- PALMONARI (C.), 1966 - Etude d'un matériau d'altération de roche pyroclastique. *Bull. Soc. fr. Ceram.*, 70 : 3-9.
- PARFITT (R.L.), 1972 - Amorphous material in some Papua New Guinea soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36, 4 : 683-686.
- PARFITT (R.L.), 1980 - Chemical properties of variable charge soils : in *Soils with variable charge*, Ed. *Thang*, 1980 : 167-194.
- PARFITT (R.L.), HENMI (T.), 1980 - Structure of some allophane from New Zealand. *Clays and clay Miner.*, G.B.R., 28, 4 : 285-294.
- PARFITT (R.L.), HENMI (T.), 1982 - Comparison of an oxalate - extraction method and an infra-red spectroscopic method for determining allophane in soils clays. *Soil Sci. Plant. Nutr.*, 28, 2 : 183-190.
- PARK (R.G.), 1969 - The electrophoretic separation of mixtures of pure clays and the electrophoretic separation and characterization of a soil allophane. *Thèse Univ. Idaho (U.S.A.)*.
- PATERSON (E.), 1977 - Specific surface area and pore structure of allophanic soil clays. *Clay Miner.*, 12, 1 : 1-19.
- PECROT (A.), GASTUCHE (M.G.), DELVIGNE (J.), VIELVOYE (L.), FRIPIAT (J.J.), 1962 - L'altération des roches et la formation des sols aux Kivu (Rép. du Congo) *INEAC. Publ. sér. Sci.*, n° 97, Bruxelles, 92 p.
- PEDRO (G.), 1968 - Note sur le type d'altération superficielle caractérisant les projections volcaniques récentes du Puy de la Vache (Massif Central) ; Conséquences géochimiques. *Bull. A.F.E.S.*, 3 : 17-20.
- PEDRO (G.), LUBIN (J.C.), 1968 - Etude sur l'évolution géochimique des gels aluminosiliciques et la formation des hydroxydes d'aluminium en condition de libre drainage. *Ann. Agron.*, 19, 3 : 293-347.
- PEDRO (G.), MELFI (A.J.), 1970 - Recherches expérimentales sur le comportement des hydrates ferriques et des constituants silico-ferriques amorphes en milieu lessivé. *Pédol.*, XX, 1 : 5-33.
- PERROTT (K.W.), 1978 - The influence of organic matter extracted from humified/on the properties of amorphous aluminosilicates. Part. I, Surface charge, Part. II, Phosphate retention. *Austral. J. Soil Res.* 16 : 327-339 et 341-346.
- PERROTT (K.W.), 1981 - Effects of pH and aluminosilicate composition on K-Mg exchange selectivity of amorphous aluminosilicates. *Geoderma*, 26 : 311-322.
- PETTIPIECE (W.W.), PAWLICK (S.), 1972 - Clay mineralogy of soils developed partially from volcanic ash. *Proceed. Soil Sci. Soc. Amer.*, 36 : 515-519.
- PYMAN (M.A.F.), KNUTMAN (M.K.), et al., 1979 - Examination of the heterogeneity of amorphous silico-aluminas and allophanes using the electron micro-probe. *J. Soil Sci.*, 30 : 333-345.
- QUANTIN (P.), 1972a - Note sur la nature et la fertilité des sols sur cendres volcaniques provenant d'éruptions récentes dans l'Archipel des Nouvelles-Hébrides. *Cah. ORSTOM, série Pédol.*, 10, 2 : 123-151 et 3 : 207-217.
- QUANTIN (P.), 1972b - Les Andosols - Revue bibliographique des connaissances actuelles. *Cah. ORSTOM, série Pédol.*, Vol. X, 3 : 273-302.
- QUANTIN (P.), 1973 - Andosols saturés sur cendres basaltiques des Nouvelles-Hébrides. *Bull. Liaison Thème Andosols*, n° 2 : 78-104. *Rapp. ORSTOM, Paris, multic.*

- QUANTIN (P.), 1974a - Hypothèse sur la genèse des andosols en climat tropical. Evolution de la "pédogénèse initiale" en milieu bien drainé sur roches volcaniques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XII, 1 : 3-12.
- QUANTIN (P.), 1974b - Genèse et évolution des substances minérales amorphes et cristallisées dans les andosols des Nouvelles-Hébrides. *Transact 10 th Internat. Cong. Soil Sci., Moscou*, vol. VII : 37-43.
- QUANTIN (P.), 1975a - Problème de la détermination des substances minérales amorphes. Communication Semaine Pédologique de l'ORSTOM (22-26 Septembre 1975) ; résumé 5 p. multigr., Centre ORSTOM Bondy.
- QUANTIN (P.), 1975c - Observations sur les sols de Ténérife, Lanzarote, et La Palma. Rapport multigr. ORSTOM Services Scientifiques Centraux, Bondy.
- QUANTIN (P.), 1972-79 - Atlas de l'Archipel des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Sols et quelques données du milieu naturel. Carte de Pédologie, géologie, formes de relief, végétation et utilisation des sols, 18 planches en couleur. Notice explicative de 255 p., 34 x 46 cm, en 7 fascicules : Vaté ; Epi-Shepherd ; Ambrym - Aoba - Maewo - Pentecôte ; Espiritu-Santo ; Malikolo ; Banks-Torrès ; Erromango - Tanna - Anatom. ORSTOM, Paris.
- QUANTIN (P.), 1982 - Proposition du taux de Capacité d'Echange de Cations dépendante du pH, comme critère de classification des andosols des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). *Cah. ORSTOM sér. Pédol.*, XIX, 4 : 369-380.
- QUANTIN (P.), 1982 - Caractérisation des constituants minéraux amorphes et crypto-cristallins d'andosols (méthodologie, application et extension à d'autres sols). *Comm. orale à l'Ass. Fr. Etude des Sols, 18 décembre 1982, Paris*, à paraître en 1983 dans *Science du Sol*.
- QUANTIN (P.), Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Etude de la pédogénèse initiale en milieu tropical. *Mémoire de thèse, en cours de rédaction*.
- QUANTIN (P.), 1982 - Carte des potentialités agronomiques et des aptitudes culturales du Vanuatu (Nouvelles-Hébrides). Notice explicative français-anglais. Planches en couleur à 1/500.000e (2 feuilles) et à 1/100.000e (5 feuilles). ORSTOM, Paris, 244 p.
- QUANTIN (P.), BADAUT-TRAUTH (D.) et WEBER (F.), 1975 - Mise en évidence de minéraux secondaires, argiles et hydroxydes dans les andosols des Nouvelles-Hébrides, après déferrification par la méthode de ENDREY. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, XXVII, 1 : 51-87.
- QUANTIN (P.), FERNANDEZ-CALDAS (E.) et al., 1975 - Problème du rajeunissement des sols issus de l'altération de roches volcaniques, par des éruptions récentes de cendres volcaniques, aux Nouvelles Hébrides et aux Iles Canaries. *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, n° 426 : 211-217.
- QUANTIN (P.), FERNANDEZ-CALDAS (E.), TEJEDOR-SALGUERO (M.L.), 1977 - Climatosequence de la région méridionale de l'Ile de Ténérife (Iles Canaries) 1ère partie : Ecologie, morphologie, caractéristiques physico-chimiques. *Cah. ORSTOM, série Pédol.*, XV, 4 : 391-407.
- QUANTIN (P.), TEJEDOR-SALGUERO (M.L.), FERNANDEZ-CALDAS (E.), 1978 - Observations sur la présence de sols ferrallitiques dérivés de matériaux volcaniques aux Iles Canaries. *Cah. ORSTOM série Pédol.*, XVI, 2 : 155-175.
- QUANTIN (P.), FERNANDEZ-CALDAS (E.), TEJEDOR-SALGUERO (M.L.), 1978 - Séquence climatique des sols récents de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). *Cah. ORSTOM sér. Pédol.* 1ère partie, vol. XVI, n° 3 : 251-264 ; 2ème partie, vol. XVI, n° 4 : 397-412.
- QUANTIN (P.), JANOT (Ch.), 1975 - Evolution de la localisation du fer dans les sols volcaniques des Nouvelles-Hébrides. *Comm. orale, 11ème Congr. Ass. Int. Sci. Sol, Edmonton (Canada)*, Abstr. vol. I : 179.
- QUANTIN (P.), LAMOUROUX (M.), 1974 - Adaptation de la méthode cinétique de SEGALEN à la détermination des constituants minéraux de sols variés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XII, 1 : 13-46.
- RICHE (G.), SEGALEN (P.), 1969 - La zonalité verticale en Ethiopie du Centre et du Sud-Est. *Bull. Bibliogr. Pédol.*, XVIII, fasc. 2 : 5-10.
- ROSS (C.S.), KERR (P.F.), 1930 - The kaolin minerals. *Geol. Surv. prof. Paper, USA*, 165-G : 151-180.
- ROSS (C.S.), KERR (P.F.), 1934 - Halloysite and allophane. *Geol. Surv. prof. Paper, USA*, 185-G : 135-148.
- ROSS (G.J.), KODAMA (H.), 1979 - Evidence for imogolite in Canadian soils. *Clays Cl. Miner.*, 27, 4 : 297-300.
- ROSELLO (V.), 1982 - Compte-rendu de recherches bibliographiques concernant l'altération de matériaux volcaniques, ainsi que la formation et les propriétés des sols qui en dérivent. *Rapp. multigr., Labo. Pédologie, Univ. Paris 7*, 85 p.
- ROULLIER (J.), BURTIN (G.), SOUCHIER (B.), 1972 - La dispersion des sols dans l'analyse granulométrique. Méthode utilisant les résines échangeuses d'ions. *Bull. ENSAIA*, XIV, 2 : 193-205.
- RUSSEL (J.D.), Mc HARDY (W.J.), FRAZER (A.R.), 1969 - Imogolite : a unique aluminosilicate, *Clay Miner.*, 8 : 87-99.
- RUSSEL (M.), PARFITT (R.L.), CLARIDGE (G.G.C.), 1981 - Estimation of the amount of allophane and other materials in the clay fraction of an Egmont-Lwam profile and other volcanic ash soils, New Zealand. *Austral. J. Soil. Res.* 19 : 185-195.
- RUTHERFORD (G.K.), 1962 The Yellow Brown Soils of the Highlands of New Guinea. *Int. Soc. Soil Sci. Comm. IV et V. Joint meeting 1962. Palmerston North, New Zealand* : 434-439.
- RUTHERFORD (G.K.), DEBENHAM (P.L.), 1981 - The mineralogy of some silt and clay fractions from soils on the Faerøe Islands. *Soil Sci.*, 132, 4 : 288-299.
- RUXTON (B.P.), 1968 - Rates of Weathering of Quaternary volcanic ash in North-East Papua. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaïde, vol. IV : 367-376.
- SAITO (M.), KAWAGUCHI (K.), 1971 - Flocculating tendency of paddy soils. II Soils derived from volcanic ash and significance of aggregates in paddy soils. *J. Soil. Soil Manure (Jap. ed.)*, 42, 2 : 58-60.
- SCHAEFFER (R.), ALCAYAGA (U. de), SAN MARTIN (E.), 1969 - Microbial activities as a mechanism of ecosystem regulation in the hydromorphic volcanic ash soils of Southern Chile. In *Turrialba*, Costa Rica, B.6 : 1-15.
- SCHAEFFER (R.), BENLOT (C.), 1978 - Les sols à allophane dérivés de cendres volcaniques. Relations entre le caractère des activités microbiennes et les conditions de climat. *C.R. 103ème Congr. Nat. Soc. Sav. Nancy*, Fasc. II : 16 p.
- SCHWERTMANN (U.), FISCHER (W.R.), PAPENDORF (H.), 1968 - The influence of organic compounds on the formation of iron oxides. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaïde, vol. I : 645-655.
- SCHWERTMANN (U.), et al., 1978 - The influence of Al on Fe oxide formation. Part. II. *Clays Cl. Miner.* 26, 6 : 273-283.
- SCHWERTMANN (U.), 1978 - Non crystalline and accessory minerals. *Int. Clay Conf.* 1978, Oxford : 491-499 in, MORTLAND, FARMER Ed, Developments in Sedimentology n° 27, Elsevier Publ.
- SEGALEN (P.), 1957 - Etude des sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. *Thèse Mém. Inst. Sci. Madagascar*, D VIII : 1-181.

- SEGALEN (P.), 1967 - Les sols de la vallée du Noun. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, v, 3 : 287-349.
- SEGALEN (P.), 1968 - Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VI, n° 1 : 105-126.
- SEGALEN (P.), 1973 - Quelques progrès récents dans la connaissance des produits amorphes des sols. *Bull. de liaison du thème D "Andosols". Comité Technique de Pédologie, ORSTOM*, n° 2, Mars 1973.
- SHERMAN (G.D.), KANEHIRO (Y.), MATSUSAKA (Y.), 1953 - The role of dehydration in the development of laterites. *Pacif. Sci.*, 7, 438 p.
- SHERMAN (G.D.), MATSUSAKA (Y.), IKAWA (H.), UEHARA (G.), 1964 - The role of the amorphous fraction in the properties of the tropical soils. *Agrochimica Ital.*, 8, 2 : 148-162.
- SHOJI (S.), MASUI (J.), 1969 - Amorphous clay minerals of recent volcanic ash soils in Hokkaido. *Soil Sci. Plant. Nutr. Jap.*, 15, 4 : 161-168 et n° 191-201.
- SHOJI (S.), ONO (T.), 1978 - Physical and chemical properties and clay mineralogy of andosols from Kitakami, Japan. *Soil Sci.*, 126, 3 : 297-312.
- SHOJI (S.), SAIGUSA (M.), 1977 - Amorphous clay materials of Towada andosols. *Soil Sci. Plant. Nutr.*, 23, 4 : 437-455.
- SHOJI (S.), SAIGUSA (M.), 1978 - Occurrence of laminar opaline silica in some Oregon Andosols. *Soil Sci. Plant. Nutr.*, 24 : 157-160.
- SIEFFERMANN (G.), 1969 - Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. *Thèse Sci. Nat. Univ. Strasbourg*, 285 p. multigr. *Mémoire ORSTOM n° 66*, 1973, 183 p.
- SIEFFERMANN (G.), JEHL (G.), MILLOT (G.), 1968 - Allophanes et minéraux argileux des altérations récentes des basaltes du Mt. Cameroun. *Bull. Gr. fr. Argiles*, XX : 109-129.
- SIEFFERMANN (G.), MILLOT (G.), 1968 - L'Halloysite des sols jeunes sur basaltes récents du Centre Cameroun. *Bull. Gr. fr. Argiles*, XX : 25-38.
- SIEFFERMANN (G.), MILLOT (G.), 1969 - Equatorial and tropical weathering of recent basalts from Cameroun. Allophanes, halloysite, metahalloysite, kaolinite and gibbsite. *Int. Clay Conf., 1969, Tokyo*, 1 : 417-430.
- SIEFFERMANN (G.), 1973 - Les facteurs de formation des produits amorphes silico-alumineux. Le rôle de la matière organique dans leur maintien. *Bull. de liaison du thème D "Andosols" ; Comité Technique de Pédologie, ORSTOM*, n° 2, Mars 1973.
- SIFFERT (B.) et WEY (R.), 1961 - Sur la synthèse de la kaolinite à la température ordinaire. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 254 : 1460-1463.
- SIFFERT (B.), 1962 - Quelques réactions de la silice en solution. La formation des argiles. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.* n° 21, Strasbourg.
- SIMONSON (R.W.), NIEGERS (S.), 1967 - Soils on the Andepts suborder in Alaska. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31, 5 : 692-699.
- SINGER (A.), 1970 - Weathering products of basalt in the Galilee. *Israel J. Chem.*, 8, 3 : 459-468.
- SINGER (A.), NAVROT (J.), 1977 - Clay formation from basic volcanic rocks in a humid mediterranean climate. *Soil Sci. Am. J.*, 41, 3 : 645-650.
- SINGH (B.R.), KANEHIRO (Y.), 1969 - Adsorption of nitrate in amorphous and kaolinitic Hawaiian soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33 : 631-683.
- SMALLEY (I.J.), ROSS (C.W.), WHITTON (J.S.), 1980 - Clays from New Zealand support the inactive particle theory of soil sensitivity. *Nature*, 288 : 576-577.
- SMITH (G.), 1978 - A preliminary proposal for reclassification of Andepts and some andic subgroups. *New Zealand Soil Bureau*, 20 p. multigr.
- SNETSINGER (SK.G.), 1967 - High-alumina-allophane as a weathering product of plagioclase. *Amer. Mineralogist.*, 52, n° 1-2 : 254-262.
- SOKOLOV (I.A.), 1969 - Weathering of volcano-clastic deposits in conditions of cold-humid climate. *3th Int. Work. Meet. Soil Micromorphology, Wrocław*, p.513-518.
- SOKOLOV (I.A.), 1972 - Recent soil formation on Kamchatka, in the zone of light ash falls. *Transl. Pochvovedeniye*, 1972, 10 : 13-25.
- SOKOLOV (I.A.), 1973 - Volcanisme et pédogénèse ; sur l'exemple des sols du Kamchatka. *Izd. Nauka, Moscou, 1973, traduction ORSTOM, Bondy. (M. KOBYLANSKY)*.
- SOKOLOV (I.A.), BELOUSOVA (N.I.), 1964 - Organic matter in Kamchatka soils and some aspects of illeuvial humus formation. *Pochvovedeniye*, 10 : 1026-1035.
- SOKOLOV (I.A.), BELOUSOVA (N.I.), 1966 - Water physical properties and water thermal regime of ochrous volcanic soils of Kamchatka. *Pochvovedeniye*, 5 : 533-543.
- SOKOLOV (I.A.), TARGUL'YAN (V.O.), 1962 - Characteristics of soil formation in Kamchatka in relation to recent volcanic activity. *Summ. papers confer. Siberian Soil Sci. Gorno-Altaysk 1962*.
- STROMEYER (F.), HAUSMANN (J.F.L.), 1816 - Allophan von Gräfenahl. *Gött. Geol. Anz.*, 2, 125, *Gzlb. Am.*, 54, 120 u.
- SUDO (T.), NAKAMURA (T.), 1952 - Hisingerite from Japan. *Amer. Mineralogist*, 37 : 618-621.
- SUDO (T.), TAKANASI (M.), 1955 - Shapes of halloysite particles in Japanese clays. *Nat. Conf. on Clays and clay Miner.*, 4, 1955, Pennsylvania : 67-69.
- SUDO (T.) et SHIMODA (S.), 1978 - Clays and clay minerals of Japan. Development in sedimentology n° 26, 326 p., *Elsevier Publ. Amsterdam*.
- SUNG-HO-LAI, SWINDALE (L.D.), 1969 - Chemical properties of allophane from Hawaiian and Japanese Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33 : 804-808.
- SUZUKI (S.), SATOH (T.), 1980 - Effect of iron on the exothermic peak temperature of allophane from a Misotsuchi weathered pumice bed. *Soil Sci. Plant. Nutr.*, 26, 3 : 441-445.
- SWINDALE (L.D.), SHERMAN (G.D.), 1964 - Hawaiian soils from volcanic ash. *FAO, W.R. Rep.*, 14 : 36-49.
- TAIT (J.M.), YOSHINAGA (N.) et MITCHELL (B.D.), 1978 - The occurrence of imogolite in some Scottish soils. *Soil Sci. Plant. Nutr.*, 24 : 145-151.
- TAMINI (T.M.), KANEHIRO (Y.), SHERMAN (G.D.), 1963 - Ammonium fixation in amorphous Hawaiian soils. *Soil Sci.*, 95 : 426-430.
- TAMINI (Y.N.), KANEHIRO (Y.), SHERMAN (G.D.), 1964 - Reactions of the ammonium phosphate with gibbsite and with montmorillonite and kaolinite soils. *Soil Sci.*, 98, 4 : 249-255.
- TAN (K.H.), 1965 - The andosols in Indonesia. *Soil Sci.*, 99 : 375-378.
- TAN (K.H.), 1966 - On the pedogenetic role of organic matter in volcanic ash soils under tropical conditions. *Soil Sci. Plant. Nutr. Jap.*, 12, 2 : 80-84.
- TAN (K.H.), 1969 - Chemical and thermal characteristics of allophane in Andosols of the tropics. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33 : 469-472.

- TAN (K.H.), PERRINS (H.F.), Mc CREERY (R.A.), 1975 - Amorphous and crystalline clays in volcanic ash soils of Indonesia and Costa Rica. *Soil Sci.*, 119, 6 : 431-440.
- TAZAKI (K.), 1978 - Micromorphology of halloysite produced by weathering of plagioclase in volcanic ash. *Int. Clay Conf.*, Oxford, 1978 : 415-422. Ed. MORTLAND, FARMER ; *Development in Sedimentology n° 27*, Elsevier Publ.
- TAZAKI (K.), 1981 - Analytical electron microscopic studies of halloysite formation processes ; morphology and composition of halloysite. *Int. Clay Conf.*, Bologna, 1981 : 573-584.
- TEJEDOR SALGUERO (M.L.), FERNANDEZ CALDAS (E.), QUANTIN (P.), 1978 - Séquence climatique des sols récents de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). 1ère partie : Ecologie, morphologie, caractéristiques physico-chimiques. *Cah. ORSTOM, série Pédol.*, XVI, 3 : 251-264.
- TEJEDOR SALGUERO (M.L.), QUANTIN (P.), FERNANDEZ CALDAS (E.), 1978 - Climatoséquence de la région méridionale de l'Ile de Ténérife (Iles Canaries). 2ème partie : Caractéristiques minéralogiques, interprétation et classification. *Cah. ORSTOM, série Pédol.*, XVI, 1 : 83-106.
- TEJEDOR SALGUERO (M.L.), QUANTIN (P.), FERNANDEZ CALDAS (E.), 1979a - Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). 2ème partie : Caractéristiques minéralogiques et micromorphologiques. *Cah. ORSTOM série Pédol.*, XVII, 2 : 119-127.
- TEJEDOR SALGUERO (M.L.), QUANTIN (P.), FERNANDEZ CALDAS (E.), 1979b - Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). 3ème partie : typologie, pédogénèse et classification. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XVII, 3 : 185-193.
- TERCINIER (G.), QUANTIN (P.), 1968 - Influence de l'altération de cendres et ponces volcaniques d'âge récent sur la nature, les propriétés et la fertilité des sols aux Nouvelles-Hébrides. *Cah. ORSTOM, série Pédol.*, VI, 2 : 203-224.
- TERCINIER (G.), 1969 - Modifications apportées par la préparation conventionnelle des échantillons de terre à leurs propriétés physiques et hydriques. *Cah. ORSTOM, série Pédol.*, VII, 4 : 585-601.
- THENG (B.K.G.), RUSSEL (M.), CHURCHMANN (J.), PARFITT (R.L.), 1982 - Surface properties of allophane, halloysite, and imogolite. *Clays and clay Miner.*, 30, 2 : 143-149.
- THENG (B.K.G.), 1979 - Formation and properties of clay-Polymer complexes. *Development in Soil Science n° 9*. Elsevier Publis. Co, Amsterdam, 362 p.
- THENG (B.K.G.), et al., 1980 - Soils with variable charge. *Soil Bureau, Dept. Sci. Industr. Res.*, New Zealand, 448 p.
- THORP (J.) et SMITH (G.), 1949 - Higher categories of soil classification. *Soil Sci.*, 67 : 117-126.
- TOKASHIKI (Y.), WADA (K.), 1972 - Determination of silicon, aluminium and iron dissolved by successive and selective dissolution treatments of volcanic ash soil clays. *Clay Sci.*, 4 : 105-114.
- TOKASHIKI (Y.), WADA (K.), 1975 - Weathering implication of clay fractions of two andosols, Kyushu. *Geoderma*, 14 : 47-62.
- TOKUDOME (S.), KANNO (I.), 1965a - Nature of the humus of humic allophane soils in Japan. Part I: Humic acids (Ch)/Fulvic acids (Cf) ratio. *Soil Sci. Plant. Nutr. Jap.*, 11, 5 : 185-192.
- TOKUDOME (S.), KANNO (I.), 1965b - Nature of the humus of humic allophane soils in Japan. Part 2: Some physico-chemical properties of humic and fulvic acids. *Soil Sci. Plant. Nutr. Jap.*, 11, 5 : 193-199.
- TOKUDOME (S.), KANNO (I.), 1968 - Nature of the humus of some Japanese soils. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaide, III : 163-173.
- TRICHET (J.), 1970 - Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques ; *Thèse Sci. Nat.*, Paris, Ecole Normale Supérieure, Travaux du laboratoire de Géologie, 4, Paris, 153 p.
- TRICHET (J.), SELLA (C.), 1968 - Etude de la structure des verres volcaniques. Relation avec leur mode de formation et d'altération. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, sér. D, t. 267 : 1084-1087.
- TRICHET (J.), SVORONOS (D.R.), 1968 - Etude des premiers stades d'altération d'un verre volcanique. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, sér. D, t. 266 : 1207-1209.
- UCHIYAMA (N.), MASUI (J.), ONIKURA (Y.), 1962 - Montmorillonite in a volcanic ash soil. *Soil Sci. Plant. Nutr. Jap.*, 8, 1 : 13-19.
- UCHIYAMA (N.), MASUI (J.), SHOJI (S.), 1968 - Crystalline clays minerals of the soils derived from recent volcanic ashes in Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant. Nutr. Jap.*, 14, 4 : 125-140.
- UDAGAWA (S.), NAKADA (T.), NAHIIIRA (M.), 1969 - Molecular structure of allophane as revealed by its thermal transformation. *C.R. Int. Clay Conf.* Tokyo : 151-159.
- UEHARA (G.), IKAWA (H.), SHERMAN (G.D.), 1966 - Desilication of halloysite and its relation to gibbsite formation. *Pacific Sci.*, 20, 1 : 119-124.
- U.S.D.A., 1972 - Soil Survey of Islands of Kauai, Oahu, Maui, Molokai, and Lanai, State of Hawaii, 232 p. et carte à 1/253.440.
- U.S.D.A., Hawaii University, 1973 - Soil survey of Island of Hawaii, (State of Hawaii). *Hawaii Agric. Exper. Stat. dec. 1973*, 115 p., 195 maps.
- U.S.D.A., 1975 - Soil Taxonomy. A basic system of Soil Classification for making and interpreting soil surveys. U.S.D.A. Soil Conservation Service. *Agric. Hand-book n° 436*, 754 p.
- VANDICKELEN (R.), DE ROY (G.), VANSANT (E.F.), 1980 - New Zealand allophanes : a structural study. *J.C.S. Faraday, I*, 76 : 2542-2551.
- VIEILLEFON (J.), BOURGEAT (F.), 1965 - Notice explicative ; cartes pédologiques de reconnaissance à 1/200.000e ; feuille d'Ambilobo - ORSTOM, notice n°22, Paris, 92 p., 1 carte.
- VILLIERS (J.M. de), 1970 - The problem of quantitative determination of allophane in soil. *Soil Sci.*, 112, 1 : 2-7.
- VIOLANTE (P.), et VIOLANTE (A.), 1973 - Gli andosuoli del Vulture. *Ann. Fac. Sci. Agr. Univ. Studio Napoli*, Portici, ser. IV, 7 : 3-22.
- VIOLANTE (P.), 1978 - Considerazioni generali sulla genesi delle argille nei suoli vulcanici ; in LULLI et BIDINI, 1978.
- VIOLANTE (P.) et TAIT (J.M.), 1979 - Identification of imogolite in some volcanic soils from Italy. *Clay Minerals*, 14, 2 : 155-158.
- VIOLANTE (A.), JACKSON (M.L.), 1981 - Clay influence on the crystallization of Aluminium hydroxide polymorphs in the presence of citrate, sulfate or chloride. *Geoderma*, 25 : 199-214.

- VIZCAYNO-MUNOZ (C.), GARCIA-VICENTE (J.), GARCIA-GONZALEZ (M.T.), 1978-79 - Suelos volcanicos españoles. 6 partes in *Anales de Edafología y Agrobiología* - 1978 ; Part. I, p. 1017 ; part. II, p. 1035.
- 1979 ; Part. III, p. 7 ; part. IV p. 23.
- 1979 ; n° 3-4, p. 413-429 ; part. V, Campo de Calatrava (Ciudad Real) ; características morfológicas y químicas, p. 431-445 ; part. VI, idem, mineralogía de la fracción arcilla.
- VOSS (R.L.), 1969 - The characteristics and genesis of the Akaka and Hilo Soils of Island of Hawaii. *Thesis Soil Sci.*, Univ. Hawaii, Honolulu, VII, 94 p.
- WADA (K.), 1959 - Reaction of phosphate with allophane and halloysite. *Soil Sci.*, 87 : 325-330.
- WADA (K.), 1966 - Deuterium exchange of hydroxyl groups in allophane. *Soil Sci. Plant Nutr. Jap.*, 12, 5 : 176-182.
- WADA (K.), 1967 - A structural scheme of soil allophane. *Amer. Mineralogist*, 52 : 690-708.
- WADA (K.), 1977 - Allophane and Imogolite. In *Minerals in Soil Environments*, edited by DIXON J.B., WEED S.G., 1977. *Soil Sci. Soc. of Amer.*, Madison, Wisconsin, USA : 603-638.
- WADA (K.), 1978 - Allophane and imogolite ; in *Clays and clay minerals of Japan*, Ed. Sudo, Shimoda, 1978, : 147-187.
- WADA (K.), 1979 - Structural formula of allophanes. *Intern. Clay Confer., Oxford*, 1978, in *Develop. in sedimentology*, n° 27, Elsevier Sci. Publish. Co, 1979 : 537-545.
- WADA (K.), 1980 - Mineralogical characteristics of Andisols ; in soils with variable charge. *Ed. Thang*, 1980 : 87-107.
- WADA (K.), 1981 - Amorphous clay minerals - Chemical composition, crystalline state, synthesis and surface properties. *Int. Clay Conf. Bologna*, 1981 : 385-398. *Ed. Van OLPHEN, VENIALE*, Develop. Sedimentology 35, *Elsevier Publ.*
- WADA (K.), AOMINE (S.), 1966 - Occurrence of gibbsite in weathering of volcanic materials at Kuroishibarū, Kumamoto. *Soil Sci. Plant Nutr. Jap.*, 12 : 151-157.
- WADA (K.), AOMINE (S.), 1973 - Soil development on volcanic materials during the Quaternary. *Soil Sci.*, vol. 116, n° 3 : 170-177.
- WADA (K.), GREENLAND (D.J.), 1970 - Selective dissolution and differential infrared spectroscopy for characterization of "amorphous" constituents in soil clays. *Clay Min.*, 8 : 241-254.
- WADA (K.), HARWARD (M.E.), 1974 - Amorphous clay constituents of soils. *Advances in Agronomy*, 26 : 211-260.
- WADA (K.), HENMI (T.), YOSHINAGA (N.), PATERSON (S.H.), 1972 - Imogolite and allophane formed in saprolite of basalt on Maui, Hawaii. *Clays clay Miner.*, 20 : 375-380.
- WADA (K.) et HIGASHI (T.), 1976 - The categories of aluminium and iron-humus complexes in Ando-Soils determined by selective dissolution. *J. Soil Sci.*, 27 : 357-368.
- WADA (K.), HUBO (H.), 1975 - Precipitation of amorphous aluminosilicates from solution containing monomeric silica and aluminium ions. *J. Soil Sci.*, 26 : 100-111.
- WADA (K.), INOUE (A.), 1967 - Retention of humic substances derived from rotted clover leaves in soil containing montmorillonite and allophane. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 13, 1 : 9-16.
- WADA (K.), INOUE (A.), 1974 - Adsorption of monomeric silica by volcanic ash soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, (Tokyo), 20, 1 : 5-15.
- WADA (K.), KAKUTO (Y.), 1980 - Selective adsorption of Zinc on halloysite. *Clays, clay Miner.*, 28, 5 : 321-327.
- WADA (K.), KAWANO (T.), 1978 - Use of Jeffri Acid-Oxalate treatment in particle-size analyses of Ando-soils. *Geoderma*, 20 : 115-224.
- WADA (K.), MATSUBARA (I.), 1968 - Differential formation of allophane, imogolite and gibbsite in the Kitakami pumice bed. *Int. Congr. Soil Sci.*, 9, 1968, Adelaide, vol. III : 123-155.
- WADA (K.), OKAMURA (Y.), 1980 - Electric charge characteristics of Ando A₁ and buried A₁ horizon soils. *J. Soil Sci.*, 31 : 307-314.
- WADA (K.), TOKASHIKI (Y.), 1972 - Selective dissolution and difference Infra-Red Spectroscopy in quantitative mineralogical analysis of volcanic ash soils clays. *Geoderma*, 7 : 199-213.
- WADA (K.), WADA (S.), 1976 - Clay mineralogy of the B horizon of two Hydrandepts, a Torrox and a Humitropept in Hawaii. *Geoderma*, 16 : 139-157.
- WADA (K.), YOSHINAGA (N.), 1969 - The structure of imogolite. *Amer. Mineralogist.*, vol. 54 : 50-71.
- WADA (K.), YOSHINAGA (N.), YOSSUMOTO (H.), et al., 1970 - High resolution electron micrographs of imogolite. *Clay Miner.*, 8 : 487.
- WADA (S.I.), ETO (A.), WADA (K.), 1979 - Synthetic allophane and imogolite. *J. Soil Sci.*, 30, 2 : 347-355.
- WADA (S.I.), WADA (K.), 1977 - Density and structure of allophane. *Clay Min.*, 12 : 289-298.
- WADA (S.I.), WADA (K.), 1980 - Formation, composition and structure of hydroxyl-aluminosilicate ions. *J. Soil Sci.*, 31 : 457-467.
- WADA (S.I.) et WADA (K.), 1981 - Reactions between aluminate ions and orthosilicic acid in dilute alkaline to neutral solutions. *Soil Science*, 132, 4 : 267-273.
- WARKENTIN (B.P.), 1972 - Use of the liquid limit in characterizing clay soils. *Canadian J. Soil Sci.*, 52, 2 : 457-464.
- WARKENTIN (B.P.), MAEDA (T.), 1974 - Physical properties of allophane soils from the West Indies and Japan. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38, 2 : 372-377.
- WATANABE (Y.), 1963 - Etude des argiles dans les sols au microscope électronique. Part 2, allophane et gels synthétiques, Part. 3, fraction argileuse des sols dérivés de cendres volcaniques. *Soil Sci. Plant Nutr. Jap.*, Part 1 et 2, 4 : 6-14; Part 3, 5 : 1-4.
- WELLS (N.), FURKERT (R.J.), 1972 - Bonding of water to allophane. *Soil Sci.*, 113, 2 : 110-115.
- WESLEY (L.D.), 1973 - Cluster hypothesis and the shear strength of a tropical red clay. *Géotechnique*, 23, 1 : 109-113.
- WESLEY (L.D.), 1973 - Some basic engineering properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia. *Géotechnique*, 23, 4 : 471-494.
- WESLEY (L.D.), 1977 - Shear strength properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia. *Géotechnique*, 27, 2 : 125-136.
- WEY (R.), SIFFERT (B.), 1961 - Réaction de la silice mono-moléculaire en solution avec les ions Al³⁺ et Mg²⁺; In Genèse et synthèse des argiles, *Ed. CNRS*, Paris : 11-23.
- WHITE (R.W.), SARCIA (C.), 1978 - Natural and artificial weathering of basalt, north-western United States. *Bull. BRGM (2e série)*, Sect. II, 1 : 1-29.
- WILFREDO-VERA (E.), WALTER LUZIO (L.), 1980 - Variaciones mineralógicas de un suelo derivado de cenizas volcanicas (Vitrandepts), sometido a lixiviación experimental (Chile). *Anál. Edafol. Agrobiol.*, 39, 7-8 : 1193-1206.
- YAMAGUCHI (M.), NAKAI (M.) et YOSHINAGA (N.), 1975 - Formation of imogolite in volcanic ash layers erupted in 1914 (Taisho-ash) and in 1778-1780 (Anei-ash) from Mt Sakurazima. *Abst. Ann. Meet. Soc. Soil Sci.*, Soil Manure, Japan, 21 : 26.

- YOSHINAGA (N.), 1966 - Chemical composition and some thermal data of eighteen allophanes from andosols and weathered pumices. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 12, 2: 47-54.
- YOSHINAGA (N.), 1967 - The behaviour of adsorbed water in clays on addition of inorganic electrolytes as aqueous solution. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 13, 1: 1-8.
- YOSHINAGA (N.), 1968 - Identification of imogolite in the filmy gel materials in the Imaichi and the Shichihonzakura pumice beds. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.* 14, 6 : 238-246.
- YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962a - Allophane in some Ando Soils. *Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap.*, 8, 2 : 6-13.
- YOSHINAGA (N.), AOMINE (S.), 1962b - Imogolite in some Ando Soils. *Soil Sci. Plant. Nutrit. Jap.*, 8, 3 : 114-121.
- YOSHINAGA (N.), YAMAGUCHI (M.), 1970a - Adsorption of polyphosphates by allophane. *Soil Sci. Plant Nutrit. Jap.*, 16, 3 : 121-127.
- YOSHINAGA (N.), YAMAGUCHI (M.), 1970b - Occurrence of imogolite as a gel film in the pumice and scoria beds of western and central Honshu and Hokkaido. *Soil Sci. Plant. Nutrit.*, 16, 5 : 215-223.
- YOSHINAGA (N.), NAKAI (H.), YAMAGUCHI (M.), 1973 - Unusual accumulation of gibbsite and halloysite in the Kitakami pumice bed, with a note on their genesis. *Clay Sci.*, 4 : 155-165.
- YOSHINAGA (N.), YOTSUMOTO (H.), IBE (K.), 1968 - An electron microscopic study of soil allophane with an ordered structure. *Amer. Mineralogist.*, 53, 1-2, : 319-322.
- YOUNGBERG (C.T.), DYRNESS (C.T.), 1964 - Some physical and chemical properties of pumice soils in Oregon. *Soil Sci.*, 97 : 391-399.
- ZAVALETA (A.), 1969 - Geographical distribution and characteristics of soil derived from volcanic ash of Peru. In Panel of volcanic ash soils in Latin America. Turrialba, Costa Rica, A.2 : 1-14.
- ZEBROWSKI (Cl.), 1971 - Propriétés des andosols de l'Itasy et de l'Ankaratra (Madagascar). *Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie*, IX, 1 : 83-108.
- ZEBROWSKI (Cl.), 1973 - Quelques andosols de Madagascar et de La Réunion. Problème de la podzolisation sur un andosol. *ORSTOM, Bull. de Liaison, thème D "andosols"*, n° 2 : 53-77.
- ZEBROWSKI (Cl.), 1975a - Propriétés et pédogénèse de certains sols sur roches volcaniques de la région d'Antsirabe (Madagascar). *Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie*, XIII, 1 : 49-59.
- ZEBROWSKI (Cl.), 1975b - Etude d'une climato-séquence dans l'île de la Réunion. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie* XIII, 3 : 255-278.
- ZUNINO (H.), APPELT (H.), BERNARDI (C.), 1974 - Influence of extracted aluminum on organic matter fractionation in soils derived from volcanic ash. *Soil Sci.*, 118, 1 : 28-30.

ADDENDA

- AGUILERA (N.), 1969 : Geographic distribution and characteristics of volcanic ash soils in Mexico. In Panel on volcanic ash soils in Latin America, A.6, Inter American Inst., Agr. Sci., Turrialba, Costa Rica.
- ALBERTELLI (C.), 1987 : Comparaison de tests de chaulage et étude des caractéristiques d'Andosols acides à la Réunion (Mémoire ISTOM/CIRAD).
- ALLBROOCK (R.F.), 1983 : Some physical properties of allophane soils from the North Island, New Zealand. *N.Z. Journal of Science*, 26, pp. 481-482.
- ALLBROOK (R.F.), : Physical properties of volcanic ash soils. Congreso internacional de suelos volcanicos. La Laguna, 1984, pp. 1-10.
- ALVARADO (A.), BUOL (S.W.), 1975 : Toposequence relations of dystrandepts in Costa Rica. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 39, pp. 932-937.
- APPELT (H.), COLEMAN (N.T.), PRATT (P.F.), 1975 : Interactions between organic compounds, minerals and ions in volcanic ash derived soils. Effects of organic compounds on the absorption of phosphate. *Soil Sc. Amer. Proc.* (39), 628-630.
- BENAVIDES (G. De), 1983 : Cuantificación del material amorfo en algunos suelos derivados de cenizas volcánicas y su relación con los parámetros de la taxonomía de suelos. *Suelos equatoriales*, 13 (2). En prensa.

BERTRAND (R.), 1972 : Compte-rendu provisoire de mission pédologique à la Réunion. IRAT-Réunion n° 52.

BERTRAND (R.), 1972 : Environnement et morphologie d'un andosol à horizon d'accumulation induré. C.r. Acad. Sc. Paris, 1972, T. 275, pp. 1343-1346.

BLAKEMORE (L.C.), SEARLE (P.L.), DALY (B.K.), 1981 : Methods for chemical analysis of soils. New Zealand Bureau Sci. Rep. 10 A, DSIR, New Zealand.

BORIE (F.), ZUNINO (H.), 1983 : Organic matter - phosphorus association as a sink in P-fixation processes in allophanic soils of Chile. Soil Biol. Biochem., 15 (5), 599-604.

BOWDEN (J.W.), POSNER (A.M.), QUIRCK (J.P.), 1980 : Adsorption and charging phenomena in variable charge soils. In : B.K.G. THENG ed. Soil with variable charge, New Zealand, Soc. Soil Sc., 147-166.

BROUWERS (M.), 1982 : Inventaire morpho-pédologique dans les Hauts de la Réunion, 2ème phase, IRAT.

BROUWERS (M.), CASTA (P.), FORTIER (M.), 1985 : Limites de traficabilité et sensibilité au compactage de trois matériaux de sols cultivés en canne à sucre à la Réunion.

CARRASCO (A.), SADZAWKA (A.), 1984 : Importancia del pH en suelos chilenos derivados de cenizas volcánicas. Congress internacional de Suelos volcánicos (La Laguna), pp. 83-100.

CAVALLARO (N.), ETCHEVERS (J.D.), DONATO GARCIA (L.), 1984 : The nature of the volcanic material from the chichonal volcano (Mexico) and its effects on agricultural production. Congreso internacional de suelos volcánicos. La Laguna, pp. 250-263.

CHABALIER (P.F.), 1985 : Effet du séchage du sol sur les déterminations chimiques réalisées sur les sols à caractères andiques. Fiche n° 13, IRAT-Réunion.

CHAPELLE (J.), 1985 : Les sols du Rwanda. Séminaire national sur la fertilisation. Ministère de l'Agriculture, Kigali, Rwanda.

CHITOSHI MIZOTA, CHAPELLE (J.), 1988 : Characterization of some andepts and andic soils in Rwanda (Central Africa). GEODERMA, 41 (1988), pp. 193-209.

COLMET-DAAGE (F.), 1981 : Andisols of Central and South America. 4th Int. Soil classification workshop, Rwanda, July 1981.

CONEA (A.), 1972 : Andosols in Rumania. Prvi Natsionalen Kongres po, pochvoznanie, Bulgarie, 1969, pp. 465-472.

COUTERON (P.), 1987 : Lutte contre l'érosion à la Réunion. Rapport DAF, La Réunion.

ESPIAU (P.), 1987 : Contribution à l'étude du complexe absorbant des sols acides à charges mixtes. Application aux andosols du Velay. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIII, n° 2, 1987, pp. 79-94.

ESPINOZA (W.), GAST (R.G.), ADAMS (R.S.), 1975 : Charge characteristics and nitrate retention by two andepts from South-Central Chile, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39, pp. 842-846.

FASSBENDER (H.W.), 1969 : Phosphorus deficiency and fixation in volcanic ash soils in Central America. Panel of Volcanic ash in Latin America, July 6-13, Turrialba, Costa-Rica.

FLACH (K.W.), HOLZHEY (C.S.), DE CONINCK (F.), BARTLETT (R.J.), 1980 : Genesis and classification of andepts and spodosols. Chapter 20, soils with variable charge, BKG, Theng (Ed.), NZ, Soc. Soil Sci. pp. 411-425.

FOX (R.L.), 1980 : Soils with variable charge : agronomic and fertility aspects.
In : B.K.G. THENG (ed.), Soils with variable charge. New Zealand, Soc. Soil Sc., pp. 195-224.

FREI (E.), 1978 : Andepts in some high mountains of East Africa. Geoderma 21, pp. 119-131.

FRITZ (J.), 1967 : Recherche des carences minérales des sols de la Réunion en vases de végétation. Coll. Fert. Sols Trop. Tananarive (Madagascar), pp. 381-385.

FRITZ (J.), 1973 : Dynamique de l'azote dans le sol en deux situations de la Réunion. IRAT.

FROSSARD (E.), 1983 : Amélioration du statut phosphorique d'un sol réunionnais par apports de matières organiques.
D.E.A. - Option fertilisation, Institut National Polytechnique de Lorraine, ENSA Nancy, 57 p.

FROSSARD (E.), 1985 : Etude expérimentale de l'influence de composés organiques sur l'évolution des ions phosphates en sols "ferrallitiques". La réunion.
Thèse Doctorat INPL. ENSA Nancy, 109 p.

GODEFROY (J.), 1980 : Etude agropédologique des stations IRFA de la Réunion. Mémoire IRFA, 97 p.

GOLLARDO (J.F.), GARCIA SANCHES (A.), SAAREDRA (J.), 1973 : Properties of andosols of the Sierra de Francia (Western Spain). Anales Edafol Agrofiol, 32, pp. 1135-1141.

GRANDJEAN (E.), : Relation entre la génèse, la minéralogie des fractions fines et le comportement hydrique d'une séquence de sols développée sur roches volcaniques récentes. Basse Terre (Guadeloupe). INRA (Versailles), 78 p.

GRANDJEAN (E.), CABIDOUCHE (Y.M.), ROBERT (M.), TESSIER (D.), 1984 : Effect of the total hydric behaviour on that of some guadeloupean Andosols.
Congreso internacional de suelos

volcanicos, La Laguna, 1984, pp. 27-42.

GRIFFITH (S.M.), SCHNITZER (M.), 1975 : Analytical characteristics of humic and fulvic acids extracted from tropical volcanic soils. Soil Sci. Soc. Am. Proceedings, 39 (5), pp. 861-867.

GUERRERO (R.), HERNANDO PABON (S.), 1984 : La détermination rapida de material amorfo y su aplicacion en el diagnostico de suelos volcanicos en Columbia.
Congreso internacional de suelos volcanicos. La Laguna (1984), pp. 151-163.

HAATJENS (H.A.), REYNDERS (J.J.), MOUTHAN (W.L.P.J.), 1967 : Major soil groups of New Guinea and their distribution. Common. Dep. Agric. Res. R. Trop. Inst., 55, 87 p.

HAILE (A.), 1982 : Etude de l'effet d'amendements minéraux sur la réduction des pertes minérales par lixiviation dans quelques sols dominés par des colloïdes à charges variables (La Réunion et autres pays). IRAT, Thèse Ac. Montpellier.

HERBILLON (A.), TRAN VINH AN (J.), 1964 : Etude de la fraction amorphe colloïdale de quelques sols tropicaux, Int. Sci. Sol, Bucarest, 1964, III, pp. 1191-1201.

HIGASHI (T.), 1983 : Characterisation of Al/Fe-humus complexes in DYstrandeps through comparison with synthetic forms. Geoderma, 31, pp. 277-288.

HINGSTON (F.J.), POSNER (A.M.), QUIRK (J.P.), 1972, : Anion adsorption by goethite and gibbsite. 1/ Role of the proton in determining adsorption envelopes. J. of Soil SC. (23), pp. 177-192.

HSU (P.H.), BATES (T.F.), 1964 : Formation of x-ray amorphous and crystalline aluminium hydroxides. Min. Mag., 33, pp. 749-768.

JOUVE (S.), 1984 : Caractéristiques hydriques et hydrodynamiques de 2 types de sols. Andosols et sol brun à caractère andique. La Réunion. Université d'Avignon, IRAT, sept. 1984, 110 p.

KANJI KAWAI, 1984 : Comparison of the differentiation criteria of andisols to those of Kuroboku soils (Japanese andosols). Congress internacional de suelos volcanicos. La Laguna, pp. 357-367.

KIRKMAN (J.H.), 1981 : Morphology and structure of halloysite in New-Zeland Tephra clays and minerals, vol. 39, n° 1, pp. 1-9.

KIRKMAN (J.H.), Mc HARDY (W.J.), 1980 : A comparative study of the morphology chemical composition and weathering of rhyolitic and andesitic glass. Clay Min., 15, pp. 165-175.

KOBAYASHI (S.), SHOJI (S.), YAMADA (I.), MASUI (J.), 1976 : Chemical and mineralogical studies on volcanic ashes. Soil Sci. Pl. Nutr., 22, pp. 7-13.

KOBO (K.), OBA (Y.), OISHI (K.), 1974 : Genesis and characteristics of volcanic ash soils in Japan (part. 5) : the relation between the degree of weathering and parent material to mineral composition in clay fraction and dispersion of clay. J. Sci. Soil Manure, Japan, 45, pp. 8-11.

LEAMY (M.L.), SMITH (G.D.), COLMET-DAAGE (F.), OTOWA (M.), 1980 : The morphological characteristics of andisols. Chap. 2, soils with variable charge, BKG. Theng (Ed.), N.Z. Soc. Soil Sci., pp. 17-34.

LEAMY (M.L.), 1984 : Andisols of the world. Congreso internacional de suelos volcanicos. La Laguna, 1984, pp. 369-387.

LIVEROVSKII, YU (A.), 1971 : Volcanic ash soils of Kamchatka, Pochvovedanie, n° 6, pp. 3-11.

LUNA (C.), 1969 : Genetic aspects of Colombian andosols, In panel on volcanic ash soils in Latin America, A.3. Inter-american Ins. Agr. Sci. Turrialba, Costa Rica.

MARIANO (J.A.), 1965 : Report on soils of volcanic ash origin in El Salvador. In world soil resources 14, FAO/UNESCO, pp. 23-29.

MIZOTA (C.), 1981 : Clay mineralogy of seven dys trandepts developed from basalts in Northland, the French Massif Central and Western Oregon. Soil Sci. Pl. Nutr., 27, pp. 511-522.

MIZOTA (C.), VAN REEUWIJK (L.P.), 1987 : Chemistry and clay mineralogy of "andisols" and related soils from diverse climatic regimes. International Soil reference and Information Centre. Monogr. 2, In press.

MUNEVAR (F.), WOLLUM (A.G.), 1977 : Effects of the addition of phosphorus and inorganic nitrogen on carbon and nitrogen mineralization in andepts from Colombia. Soil Sc. Soc. Am. J. (41), pp. 540-545.

PARFITT (R.L.), MAVO (B.), 1975 : Phosphate fixation in some Papua New Guinea soils. Science in New Guinea, 3, pp. 179-190.

PARFITT (R.L.), FRASER (A.R.), RUSSELL (J.D.), FARMER (V.C.), 1977 : Adsorption on hydrous oxydes. II - Oxalate, benzoate and phosphate on gibbsite. J. of Soil Sc., (28), pp. 40-47.

PARFITT (R.L.), FRASER (A.R.), FRAMER (V.C.), 1977 : Adsorption on hydrous oxydes. III - Fulvic and humid acide on goethite, gibbsite and imogolite. J. of Soil Sc., (28), pp. 289-296.

PARFITT (R.L.), 1978 : Anion adsorption by soils and soil material. Adv. in Agron. (30), pp. 1-50.

- PARFITT (R.L.), FURHERT (R.J.), 1980 : Identification and structure of two types of allophane from volcanic ash soils and tephra. Clays and clay minerals, vol. 28, n° 5, pp. 328-334.
- PARFITT (R.L.), WEBB (T.), 1983 : Allophane in some South Island yellow-brown shallow and stony soils and in high country and upland yellow-brown earths. N.Z. J. Sci.
- PARFITT (R.L.), RUSSEL (M.), ORBELL (G.E.), 1983 : Weathering sequence of soils from volcanic ash involving allophane and halloysite, New Zealand. Geoderma, 29, pp. 41-57.
- PARFITT (R.L.), 1984 : The nature of andic and vitric materials. Congreso internacional de suelos volcanicos. La Laguna, pp. 413-435.
- PARFITT (R.L.), WILSON (C.W.), 1985 : Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils. Catena suppl. 7, pp. 1-8.
- PARFITT (R.L.), CHILDS (C.W.), 1988 : Estimation of forms of Fe and Al : a review and analysis of contrasting soils using dissolution and Moessbauer methods. Aust. J. Soil Res., 26 (1), In press.
- PARFITT (R.L.), CHILDS (C.W.), EDEN (D.N.), 1988 : Ferrihydrite and allophane in four andepts from Hawaii and implications for their classification. GEODERMA, (41), 1988, pp. 223-241.
- PEDRO (G.), 1983 : Les constituants amorphes des sols. Eléments d'introduction. Sciences du sol (3-4), pp. 137-152.
- PENSEC (A.), 1987 : Influence du séchage sur les caractéristiques physico-chimiques des sols à caractère andique à la Réunion. IRAT, Réunion, juillet-Nov. 1987, 125 p.
- QUANTIN (P.), 1982 : Proposition du taux de capacité d'échange de cations dépendante du pH, comme critère de classification des andosols des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., vol; XIX, n° 4, 1982, pp. 369-380.
- QUANTIN (P.), 1984 : Characteristics of the Vanuatu andosols. Congreso internacional de suelos volcanicos. La Laguna, pp. 449-460.
- QUANTIN (P.), DABIN (B.), BOULEAU (A.), LULLI (L.), BIDINI (L.), 1985 : Characteristics and genesis of two andosols in Central Italy. Catena supplement 7 : volcanic soils, 1985, pp. 107-117.
- QUANTIN (P.), BOULEAU (A.), 1983 : Détermination des constituants minéraux amorphes et crypto-cristallins d'andosols par l'analyse cinétique de leur dissolution par HCl et NaOH. Sc. du Sol, Bull. APES, n° 3-4, 1983, pp. 217-234.
- RADCLIFFE (D.J.), 1983 : The management properties of andisols in Southern Highlands Province, PNG, APTSEMU Tech. rep. n°12.
- RADCLIFFE (D.J.), GILLMAN (G.P.), 1984 : Surface charge characteristics of volcanic ash soils from the Southern highlands of Papua New Guinea. Congreso internacional de suelos volcanicos, La Laguna, 1984, pp. 164-192.
- RAUNET (M.), 1988 (à paraître) : Structure et cartographie morpho-pédologique de l'île de la Réunion.
- RECEL (M.R.), 1980 : Reclassification of andepts of the state of Hawaii the proposed order andisols. M.S. thesis, Univ. of Hawaii.
- RICO (M.), 1965 : Report on soils of volcanic ash origin in El Salvador. In world soil Resources Report 14, FAO/UNESCO, pp. 23-29.

RIQUIER (J.), VALLERIE (M.), ZEBROWSKI (C.), 1975 :
"Pédologie" in Atlas des DOM, la Réunion,
CEGET Bordeaux et IGN Paris.

ROSELLO (V.), 1984 : Les sols bruns des Hauts, Ile de la
Réunion. Caractérisation minéralogique et
microstructurale de matériaux
andosoliques. Reconnaissance expérimentale
de leur comportement. Thèse de
spécialité, Université Paris VII.

SHOTI (S.), SAIGUSA (M.), TAKA HASHI (T.), 1980 : Plant root
growth in acid andosols from northeastern
Japan. 1. Soil properties and root growth
of burdock, barley and orchard grass.
Soil Sci., 130, pp. 124-131.

SHOTI (S.), FUJIWARA (Y.), 1984 : Active Al and Fe in the
humus horizons of andosols from North
Easter Japan : their forms, properties
and significance in clay weathering. Soil
Sci.

SIMONSON (R.W.), 1979 : Origine of the name "ando soils",
GEODERMA, 22 (1979), pp. 333-335.

SMITH (G.), 1984 : The andisol proposal, 1978. New Zeland
Soil Bureau Record 96, D.S.I.R., New
Zeland.

TAZAKI (K.), 1971 : Imogolite in the Daisen loam and Sanbesan
loam. Geol. Soc. Japan, J. 77, pp. 407-
414.

TAZAKI (K.), 1979 : Micromorphology of halloysite produced by
weathering of plagioclase in volcanic
ash. Int. Clay Conf., Elsevier,
Amsterdam, pp. 415-422.

TOKASHIKI (Y.), 1974 : Mineralogical analysis of volcanic ash
soil and clays by selective dissolution
method. Ph. D. Thesis, Kyushu,
University, Fukuoka Japan.

TRUONG (Binh), BERTRAND (R.), BURDIN (S.), PICHOT (J.), 1974 :
Contribution à l'étude du phosphore dans
les sols dérivés de roches volcaniques de
l'Ile de la Réunion (Mascaraignes).
Action du carbonate et du silicate de
calcium. Agr. Trop. vol XXIX, 1974, n° 6-
7, pp. 663-674.

TUNCER (E.R.), LOHNES (R.A.), DEMIREL (T.), 1977 :
Dessication of soils derived from
volcanic ash. Nat. Acad. of Sci.
Washington D.C., Transportation research
record, n° 642, pp. 44-49.

VALDES (A.), 1969 : Geographic distribution and
characteristics of volcanic ash soils in
Peru. In panel on volcanic ash soils in
Latin America. Inter-American Inst. Agr.
Sc. Turrialba, Costa Rica.

VAN DER GAAST (J.J.), MIZOTA (C.), JANSEN (J.H.F.), 1986 :
Curved smectite in soils from volcanic
ash in Kenya and Tanzania : a low-angle
X-ray powder diffraction study. Clays
clay miner., 34, pp. 665-671.

VEHARA (G.), GILLMAN (G.P.), 1981 : The mineralogy, chemistry
and physics of tropical soils with
variable charge clays. Westview Press,
Boulder, Colorado, 1981, 170 p.

WADA (K.), WADA (S.I.), 1976 : Clay mineralogy of the B
horizons of two hydrotropepts, a Torrox and
a Humitropepts in Hawaii. Géoderma, 16,
pp. 139-157.

WADA (K.), GUNJIGAKE (N.), 1979 : Active aluminium and iron
phosphate adsorption in ando soils. Soil
Sci., 128, pp. 331-336.

WAKATSUKI (T.), WIELEMAKER (W.G.), 1985 : Clay mineralogy of
a soil formed in peralkaline volcanic ash
from the great rift valley in Kenya. Soil
Sci. Plant Nutr., 31, pp. 475-480.

WAKSMAN (M.), 1987 : Etude du fonctionnement hydrique des
andosols et des sols andiques de l'Ile de
la Réunion. Thèse Montpellier.

- WARKENTIN (E.P.), MAEDA (T.), 1980 : Physical and mechanical characteristics of andisols, In BKG, Theng, ed. 281-301.
- WHITE (L.P.), 1967 : Ash soils in Western Sudan. J. Soil Sci. 18, pp. 309-317.
- WIELEMAKER (W.G.), WAKATSUKI (T.), 1984 : Properties, weathering and classification of some soils formed in peralkaline volcanic ash in Kenya. Geoderma, 32, pp. 21-44.
- WRIGHT (A.C.S.), 1985 : The andosols of humic allophane soils of Southern America. In : World Soil Resources Report 14, FAO/UNESCO pp. 9-22.
- YAMAKA (S.), 1977 : Distribution and morphology of soils derived from volcanic ash in Japan. In : Y. Ishizuka and C.A. Black (Ed.) Soils derived from volcanic ash in Japan. CIMMYT, Mexico, pp. 1-9.
- YAMANAKA (K.), YAMADA (Y.), 1964 : Distribution of volcanic ash soils. In : Volcanic ash soils in Japan. Ministry of Agriculture and Forestry, Japanese Government, pp. 4-7.
- ZUNINO (V.H.), 1983 : Ecología microbiana, acumulación de humus y fertilidad en suelos alofanicos. Suelos Ecuatoriales, 13 (1), pp. 23-35.