

Michel SOURDAT

Pédologue - Mission ORSTOM à Quito

Le Sud-Ouest de Madagascar. Etude géodynamique

Thèse soutenue à l'Institut des Sciences de la Terre de Dijon, pour l'obtention du grade de Docteur-Ingénieur, le 15 novembre 1975.

RÉSUMÉ

La région étudiée occupe la partie méridionale du versant occidental de Madagascar. Elle est constituée de terrains sédimentaires et volcaniques, étalés en contrebas des Hautes Terres Centrales qui correspondent à un socle granito-gneissique. Son climat, tropical à saisons contrastées, est affecté, de par la situation sous le vent des alizés, d'un fort gradient d'aridité, croissant selon un axe NE-SW (tabl. I).

Du port de Tuléar au bourg de Ranohira, la route nationale n° 7 représente pour la prospection un itinéraire privilégié, étendu sur 200 km environ (fig. 1).

TABLEAU I

Gradient des précipitations, en volume et en jours de pluies, selon un axe NE-SW, entre Mananjary et Anakao

	Situation	Alt. (m)	P (mm)	Nombre de jours de pluie
Mananjary	Côte Est	6	2 799	209
Fianarantsoa	Hautes Terres	1 106	1 221	167
Ranohira	Versant Ouest	833	912	80
Sakaraha	— —	460	733	63
Vineta	— —	430	685	—
Tuléar	Côte Sud-Ouest	9	341	34
Anakao	— —	6	235	—

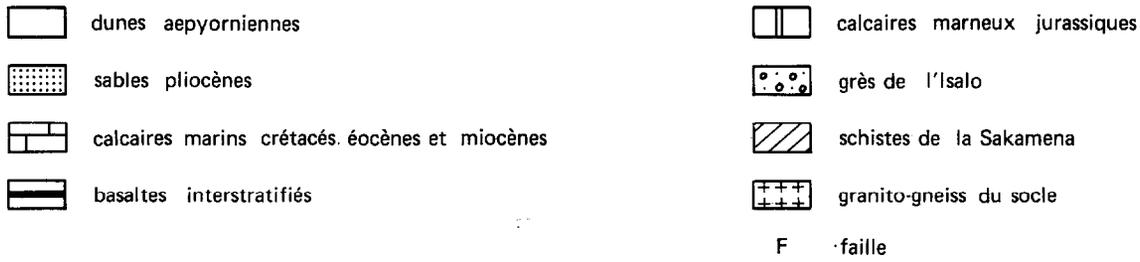
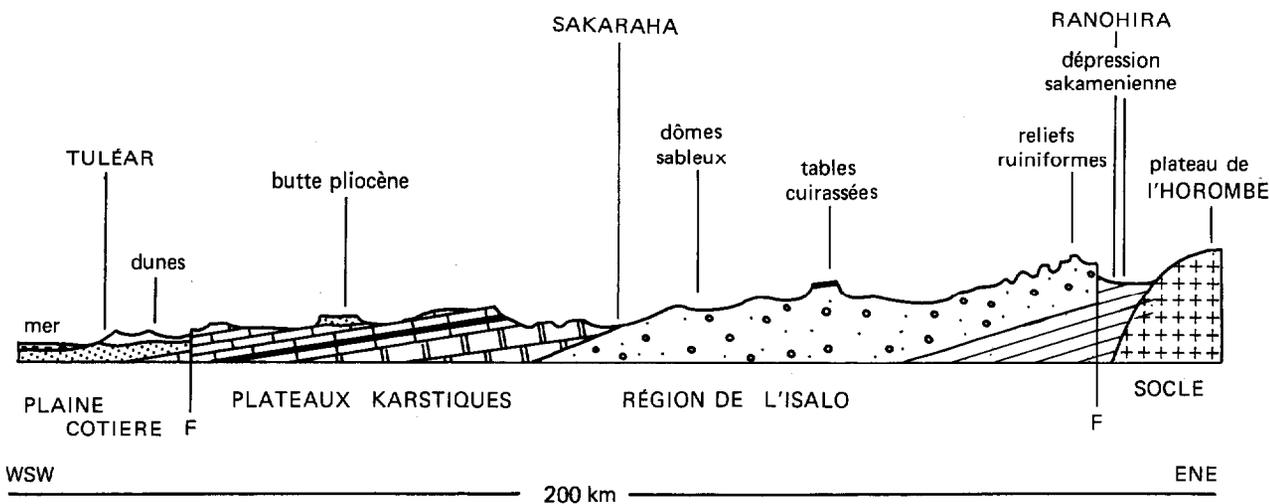


FIG. 1. — Coupe géologique schématique du bassin sédimentaire de Morondava.

— Elle monte par paliers, du niveau de la mer à celui des Hautes Terres, voisin de 1 100 m, et contourne deux sommets de plus de 1 300 m.

— Elle recoupe les principaux affleurements sédimentaires et les émissions basaltiques intercalées dont la disposition générale est sub-méridienne.

— Son orientation SW-NE coïncide avec celle du gradient climatique et recoupe les courbes d'isovaleur de la météorologie.

— Elle traverse une succession ordonnée de paysages contrastés, caractérisés par diverses combinaisons des facteurs de situation, de structure, de substrat et de climat.

Ces paysages peuvent être regroupés en trois grands domaines naturels que nous nommerons le domaine côtier, le domaine calcaro-basaltique et le domaine gréseux.

Leur inventaire conduit à trois constatations.

D'une part, des sols bisiallitiques, monosiallitiques, allitiques et podzoliques, rubéfiés ou non, y sont représentés — c'est-à-dire toute la gamme cristallo-chimique de sol définie par Pedro (1968) à l'échelle de l'univers — bien que la genèse de certains d'entre eux puissent paraître incompatible avec les caractéristiques actuelles des climats locaux, arides ou subarides ; d'où l'idée de phases d'évolution anciennes qui auraient été favorisées par des climats plus humides.

D'autre part, ces sols qui témoignent de processus génétiques et de degrés d'évolution très dissemblables se rencontrent, superposés ou juxtaposés, à l'intérieur de mêmes domaines ; d'où l'idée d'une évolution cyclique qui aurait favorisé alternativement, soit l'altération des roches et la différenciation de plusieurs générations de sols, soit le décapage plus ou moins total de ces sols et la régénération des matériaux originels.

Enfin, les mêmes sols étant associés aux mêmes modelés, il semble que la pédogenèse et la morphogenèse se sont exprimées dialectiquement de manière cyclique, selon des modalités bien déterminées.

Cette hypothèse n'est pas nouvelle, à Madagascar notamment. Les travaux antérieurement effectués dans l'extrême-sud (Battistini, 1964), sur les Hautes Terres (Bourgeat, 1972) et à Tuléar même (Sourdat et Gense, 1969) ont mis en évidence les traces morpho-pédogénétiques de séquences eustatiques et climatiques : 4 transgressions et 4 displuviaux ont rythmé la chronologie d'une période dite *aepyornienne*, période qui a suivi le Pliocène et s'est ache-

vée avec le Flandrien sans que l'on puisse affirmer qu'elle coïncide exactement avec le Quaternaire.

Ces séquences étant portées dans les colonnes 1 et 2 d'une grille (tabl. II), celle-ci fait apparaître de façon schématique certaines relations de causes à effets et certaines coïncidences chronologiques qui pourraient être contestées. Elles s'appuient néanmoins sur des considérations théoriques développées par Tricart (1966), et sur de nombreuses observations locales (Bourgeat et Ratsimbazafy, 1975).

— Aux transgressions correspondent les pluviaux, ce qui favorise la stabilisation des modelés, l'altération des roches et l'approfondissement des sols dans un contexte de biostasie.

— Aux régressions correspondent les displuviaux, ce qui favorise l'érosion, la troncature des sols et le renouvellement des matériaux originels dans un contexte de rhexistasie.

L'étude de quelques associations morpho-pédogénétiques des trois grands domaines du Sud-Ouest va nous permettre de vérifier, compléter et généraliser ces données.

Les formations dunaires proches de Tuléar constituent le paysage le plus représentatif du domaine côtier. Il s'agit de sédiments plio-aepyorniens d'altitude inférieure à 35 m. Le climat est actuellement mégathermique et aride.

D'Ouest en Est à partir du rivage, on observe successivement un cordon dunaire beige (10 YR Munsell), un massif dunaire roux clair (7,5 YR), une nappe de sables roux foncés (5 YR) et des gisements sporadiques de sables roux-rouges (2,5 YR), associés à un petit relief de grès dunaire encroûté par le calcaire.

Les diverses formations de *sables roux* représentent les horizons supérieurs décarbonatés et plus ou moins rubéfiés de profils pédologiques dont les horizons inférieurs, beiges et calcaires, sont semblables.

Or, ces formations se fossilisent partiellement l'une l'autre : ainsi, les sables roux clair décarbonatés ont été retrouvés par sondage à quelques mètres sous les matériaux beiges et calcaires du premier cordon dunaire ; les sables roux foncés décarbonatés ont été retrouvés sous les matériaux originels, calcaires et beiges, de la formation roux clair et de même les sables roux-rouges sous les matériaux originels beiges et calcaires de la formation roux foncé (fig. 2).

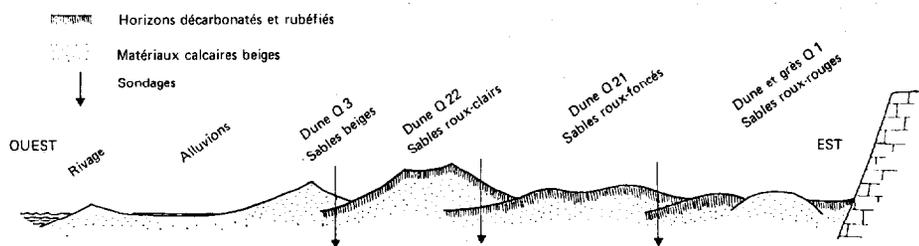


FIG. 2. — Stratification des sols sur dune du domaine côtier.

De plus, l'étude minéralogique montre que les sables beiges des matériaux originels et du premier cordon dunaire sont de constitution semblable : quartz, calcite, kaolinite, attapulgite, chlorite, illite, montmorillonite... que les sables roux clair sont caractérisés, outre la disparition de la calcite, par une moindre proportion d'attapulgite de chlorite et de montmorillonite ainsi que par la présence de fer apparemment amorphe... que les sables roux foncés sont réduits au quartz, à la kaolinite et au fer amorphe... que les sables roux-rouges enfin ne renferment plus guère que du quartz et des particules de fer amorphe. Il s'agit donc de matériaux bien différenciés, bisiallitiques ou monosiallitiques, plus ou moins rubéfiés.

Ces observations prouvent qu'à quatre reprises, à la faveur sans doute d'un retrait de la mer en phase aride, des sédiments sableux calcaires se sont déposés sur la côte ; qu'à trois reprises, à la faveur de phases relativement humides mais d'efficiences pédogénétiques décroissantes, accompagnant sans doute un retour de la mer, ces dépôts ont été décarbonatés et rubéfiés à divers degrés ; quant à la quatrième phase climatique, elle fut impuissante à modifier significativement le taux de calcaire et la couleur du dernier dépôt.

Reportant ces conséquences sédimentaires et pédogénétiques dans la colonne 3 du tableau II, nous constatons que les phénomènes observés dans un paysage typique du domaine côtier sont parfaitement compatibles avec la grille de référence.

Le plateau de Vineta représente un paysage typique du domaine calcaire-basaltique. Il repose sur des calcaires crétacés, à l'altitude de 450 m et sous climat mégathermique sub-humide. Son modelé plus ou moins nettement karstique s'est dégagé progres-

sivement d'un glaciaire d'épandage pliocène dont témoignent quelques buttes de sables grossiers rubéfiés et une contamination superficielle diffuse.

Par la granulométrie et la teneur en minéraux lourds, les matériaux issus de la décarbonatation du substrat diffèrent de ceux qui héritent de la couverture sableuse (Sourdat et Mahé, 1975 ; Sourdat, Delaune et Mahé, 1975). Selon la prédominance des uns ou des autres, des sols *sur* calcaires se distinguent des sols *associés* aux calcaires. Il existe par ailleurs des relations constantes entre la lithologie du substrat, le modelé et les sols.

Ainsi, sur les affleurements de calcaires impurs et lités non karstiques, se sont développés deux types de sols : les uns peu profonds, limono-calcaires, riches en montmorillonite et bruns ; les autres moyennement profonds, argileux, non calcaires, moins riches en montmorillonite et rouges. Il s'agit de sols bisiallitiques, rubéfiés ou non.

Aux affleurements de calcaires durs et massifs, modelés en lapiaz, sont associés le plus souvent des sols profonds, sablo-argileux, non calcaires et rouges, constitués de quartz, de kaolinite et d'oxydes de fer partiellement amorphes. Il s'agit de sols monosiallitiques rubéfiés.

En outre, aux abords du lieu-dit Tranokaky, on peut observer, associés à des lapiaz de calcaires durs et massifs deux types de sols, argileux, non calcaires et riches en gibbsite : l'un est rouge et semble s'être développé puis conservé en place ; l'autre est jaune et provient de sédiments d'origine basaltique piégés dans les lapiaz comme le prouve sa teneur en minéraux lourds et en minéraux magnétiques. Il s'agit de sols allitiques, rubéfiés ou hydratés.

Le plateau de Vineta est encadré par deux crêtes basaltiques de structure identique mais d'altitudes très différentes : l'Analavelona, culminant à 1 343 m

et l'Andrambo à 649 m. Leur érosion a donné naissance à des épandages de matériaux finement divisés qui ont fossilisé le plateau calcaire en contre-bas. Plusieurs sols sur basaltes ou sédiments basaltiques peuvent être distingués.

Des vertisols (sols bisiallitiques non rubéfiés) couvrent certains affleurements de basaltes. D'autres, développés sur sédiments basaltiques, fossilisent les

sols rouges sur calcaires comme on peut le voir dans la coupe de la rivière Siva.

Des sols peu profonds, riches en pseudo-particules, rouges, riches en métahalloysite et en oxydes de fer amorphes (sols monosiallitiques rouges) peuvent également être observés sur basaltes. De plus un sol profond, riche en pseudo-particules, rouge, riche en gibbsite, se trouve conservé au sommet de l'Analavelona (sol allitique rouge) (fig. 3).

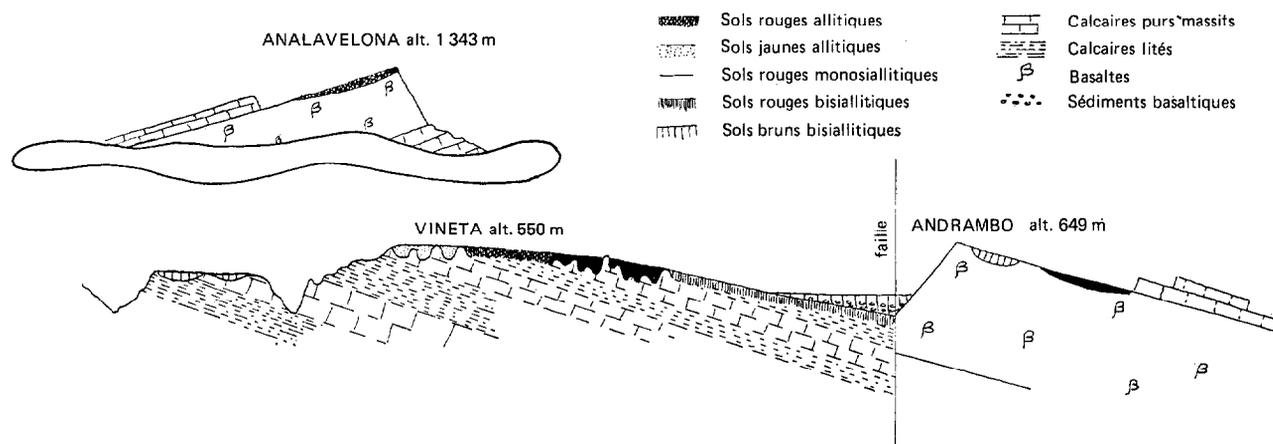


FIG. 3. — Disposition des sols et des modelés du domaine calcaro-basaltique.

Ainsi donc, des morpho-séquences de sols allitiques, monosiallitiques, bisiallitiques, rubéfiés ou non, s'observent parallèlement sur calcaires ou sur basaltes. Certains déphasages chronologiques sont évidents : piégeage de matériaux allochtones dans des lapiaz pré-existants ; évolution inégale de sédiments basaltiques d'origines identiques mais d'âge très différents ; fossilisation d'un sol rouge sur calcaire par le dernier sédiment basaltique...

Par analogie avec ce qui a été constaté dans le domaine côtier, on peut admettre qu'à quatre reprises au cours de phases biostasiques, des sols se sont différenciés, sur basaltes ou sur calcaires, à des degrés divers et décroissants dans le temps, tandis qu'à quatre reprises les phases rhexistasiques avaient simultanément isolé quelques témoins des sols anciens et ramené en surface les matériaux originels des sols récents. Les quatre générations de sols trouvent place dans la colonne 4 du tableau II.

Le domaine d'affleurement des grès grossiers à galets quartzitiques de l'Isalo a été nivelé par un cycle d'érosion méso-tertiaire, dont témoigne un ensemble tabulaire disséqué, à l'altitude de 1 100 m environ, sous climat mégathermique sub-humide.

Tous les éléments résiduels de cette surface ancienne sont couverts par un même sol, profond de plus de 20 m, dont l'horizon superficiel rouge, argilo-sableux, riche en pseudo-particules, contient de la kaolinite, du quartz, de la gibbsite, et des oxydes de fer ; il s'agit d'un sol allitique rubéfié. Cet horizon se prolonge en profondeur par des horizons gravillonnaires et altéritiques polychromes ; à la périphérie des plateaux, ceux-ci affleurent et se consolident sous forme de cuirasse ferrugineuse oo-pisolithique.

En contre-bas du paysage tabulaire s'étend un paysage de glacis coalescents ; les dômes sableux.

TABLEAU II

Grille chronologique schématique

(1) Transgressions	(2) Displuviaux	(3) Domaine dunaire	(4) Domaine calcaro-basaltique	(5) Domaine gréseux-isalien
— +Flandrien	Post-Flandrien —	Dune Q3 beige et calcaire Rubéfaction de la dune Q22: sables roux-clairs	Erosion Sols Bisiallitiques non rubéfiés	Rubéfaction de l'horizon <i>b</i> Lessivage ou podzolisation du niveau M4
— +Karimbolien II	Vavatenien —	Dépôt de la Dune Q22 Rubéfaction de la dune Q22: sables roux-foncés	Erosion sélective Sols Bisiallitiques rubéfiés	Troncature du niveau M3 Epanchage du niveau M4 sur une stone-line de macro-agrégats Evolution du niveau M3
— +Karimbolien I	Sambainien —	Dépôt de la dune Q21 Rubéfaction de la Dune Q1: sables roux-rouges	Erosion sélective Sols monosiallitiques rubéfiés	Troncature du niveau M2 Epanchage du niveau M3 sur une stone-lines de macro-agrégats Evolution du niveau M2
— +Tatsimien	Moramangien	Dépôt de la dune QI	Erosion sélective Karstification Sols allitiques rouges	Troncature du niveau M1 Epanchage du niveau M2 sur la stone-line 2 (galets et débris de cuirasse) Evolution du niveau MI
— Pliocène +			Erosion-Transfert de matériaux allitiques sur basaltes dans les lapiaz Karstification Sols allitiques rouges	Troncature de l'altérite sur grès et épanchage du niveau MI - sur la stone-line de base (galets et débris de cuirasse) Sols allitiques rouges des tables

D'un glacié à l'autre, les coupes observées diffèrent beaucoup mais l'observation d'une centaine d'entre elles permet de reconstituer une coupe typique dont les autres dérivent par différents types de troncutures. La coupe typique dont un exemple au moins a été réellement observé comporte 4 niveaux de sols superposés, séparés par de fortes discontinuités (fig. 4).

A la base, se trouvent les grès altérés, bariolés, sous un aspect semblable à celui de l'altérite du sol ferrallitique des tables.

Au-dessus s'étend une épaisse stone-line (1 mètre) de galets et de débris de cuirasse, surmontée d'un

matériau argilo-sablo-gravillonnaire, rouge piqué de blanc, rarement allitique et dont l'organisation pédo-plasmatique semble avoir été perturbée.

Au-dessus s'observe une seconde stone-line et un matériau argilo-sableux, rouge, souvent allitique, fortement organisé en micro-agrégats. En outre, des macro-agrégats d'origine illuviale s'individualisent au sommet de ce niveau.

Après une discontinuité, fortement marquée par le rassemblement des macro-agrégats sous forme d'une mince stone-line, on trouve un autre niveau de sol rouge semblable au précédent.

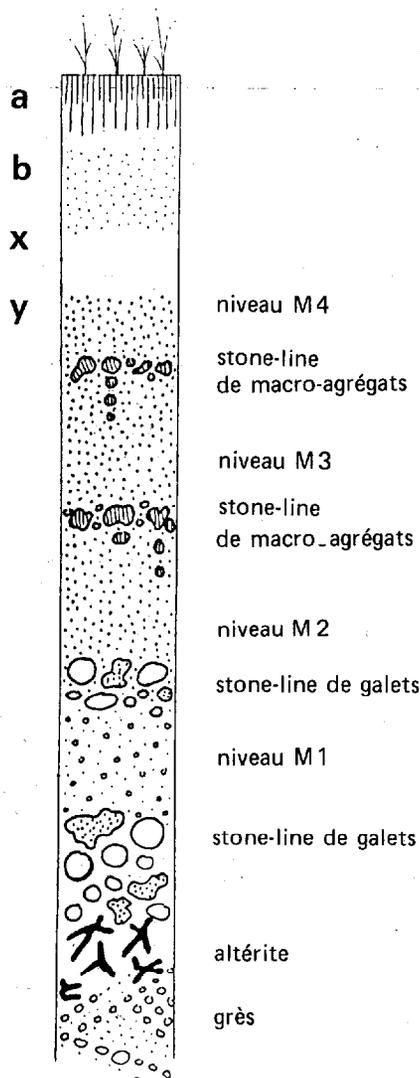


FIG. 4. — Coupe des glacis du domaine gréseux de l'Isalo.

Au-dessus enfin se trouve le véritable « profil » le plus souvent formé d'une séquence complexe de 4 horizons : un horizon sableux, humifère, grisâtre (*a*) ; un horizon imperceptiblement plus argileux mais nettement plus ferme, plus coloré — brun ou rouge pâle — (*b*) ; un horizon d'aspect délavé et de consistance lâche (*x*) et enfin un horizon argilo-sableux rouge et ferme (*y*) qui surmonte directement la stone-line d'agréats du niveau inférieur. La genèse de cette séquence originale reste hypothétique. On peut penser que l'horizon coloré *b* s'est

individualisé au sein de l'horizon *A* d'un ancien profil lessivé ($A = a + b + x - B = y$), à la faveur d'une modification du régime hydrique d'origine climatique.

A ces profils originaux sont associés des podzols, les premiers sous savanes et les seconds sous forêts. Il semble que les profils lessivés (*AB*) et les podzols se soient développés simultanément, la podzolisation se substituant au lessivage sous l'action d'un humus forestier, là où le matériau sableux est le plus grossier ou encore là où une forte discontinuité de régime hydrique correspond à la troncature plus brutale du niveau sous-jacent.

Les diverses phases de dépôt, d'altération, d'organisation, de troncature ou de remaniement des niveaux de sols qui constituent les coupes de glacis de l'Isalo s'inscrivent aisément dans la grille de référence. Quant au sol des tables, il la déborde car son altération est forcément antérieure à la première phase de démantèlement de la cuirasse.

La chronologie de référence constitue donc un canevas satisfaisant pour l'interprétation de la morpho-pédogenèse des trois grands domaines du Sud-Ouest. Sa valeur s'en trouve confirmée et généralisée.

Il est particulièrement intéressant de saisir trois modalités de morpho-pédogenèse résultant de l'influence de mêmes cycles morpho-climatiques sur trois domaines géologiques dissemblables.

Ainsi, en milieu dunaire, après que les stocks minéralogiques des matériaux superficiels aient été épuisés par la formation d'une première génération de *sables roux*, le renouvellement de ce stock a été assuré par le dépôt d'un nouveau sédiment, matériau originel de la génération suivante.

En milieu calcaire ou basaltique, ce n'est plus par sédimentation mais par érosion que s'opère le renouvellement des stocks géo-chimiques, l'érosion respectant ici et là des reliques sporadiques des sols anciens.

En milieu gréseux isalien, d'une part les sols des tables ont été isolés et protégés de processus de renouvellement du fait de leur situation élevée et de leur épaisseur ; d'autre part, sur les glacis, il y a bien eu troncature des diverses générations successives de sols, et évolution de matériaux superficiels remaniés mais, contrairement à ce qui s'est passé dans les autres domaines, ce ne sont pas des matériaux renouvelés qui sont en jeu mais des maté-

riaux déjà épuisés par une longue histoire qui ont été périodiquement recyclés. C'est pourquoi les quatre générations de sols de l'Isalo sont assez peu différenciées entre elles (allitiques, monosiallitiques ou exceptionnellement podozoliques, mais de morphologies très semblables) tandis que les sols sur dunes, sur calcaires ou sur basaltes sont très diversifiés, et nettement distincts.

Il n'existe pas dans le Sud-Ouest de toposéquences comparables à celles qui ont été si souvent décrites en Afrique parce que les divers milieux que nous avons étudiés sont excessivement perméables et fort bien drainés. Il n'existe que très exceptionnellement des bassins de réception où les éléments issus de l'amont pourraient se rassembler et se recombinaison. Par contre, les relations constantes établies entre les sols et le modelé constituent des morphoséquences.

Les paysages sont caractérisés par une opposition constante, d'une part entre les modelés anciens qui

sont figés et les modelés récents qui sont vulnérables, d'autre part entre les matériaux anciens qui sont stabilisés par épuisement ou forte organisation pédoplasmatique, et les matériaux récents qui sont minéralogiquement riches et par conséquent fertiles. Cette opposition illustre admirablement la théorie biorhexistatique d'Erhart et la dialectique de stabilité-instabilité morpho-dynamique de Tricart.

Il eut été difficile de résoudre les problèmes pédologiques qui se trouvent posés dans le Sud-Ouest de Madagascar sans replacer leur étude dans le cadre plus vaste de l'évolution géomorphologique qui commande la pédogenèse. Cette voie féconde avait été ouverte par nos prédécesseurs et collègues, géographes et pédologues du Centre ORSTOM de Tananarive auxquels les résultats acquis rendent hommage.

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'ORSTOM le 13 octobre 1976.

BIBLIOGRAPHIE

- BATTISTINI (R.), 1964. — L'extrême-Sud de Madagascar. Thèse Doct. Lettres. Ed. Cujas, 2 t., 636 p., 180 fig., 121 photos.
- BOURGEAT (F.), 1972. — Sols sur socle ancien à Madagascar. Types de différenciation et interprétation chronologique au cours du Quaternaire. *Mém. ORSTOM*, n° 57, Paris, 324 p., 5 pl. photos.
- BOURGEAT (F.) et RATSIMBASAFY (C.), 1975. — Retouches à la chronologie du Quaternaire continental de Madagascar. Conséquences sur la pédogenèse. *Bull. Soc. Géol. Fr.* (7), t. XVII, n° 4 : 554-561.
- PEDRO (G.), 1968. — Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique (2 fig., 4 tabl.). *Rev. de Géog. Phys. et de Géol. Dynam.*, vol. X, fasc. 5 : 457-470.
- SOURDAT (M.) et GENSE (C.), 1969. — Les sables roux de la région de Tuléar. Observations stratigraphiques. Analyses par diffraction aux rayons X. *C.R. Sem. Géol. Madagascar*, Impr. Nat. Tananarive, planche h. t., tabl., bibliogr. (11 réf.) : 99-104.
- SOURDAT (M.) et MAHÉ (J.), 1975. — Etude granulométrique par l'analyse factorielle des correspondances : application aux sables des formations superficielles du Sud-Ouest de Madagascar. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 280 (21 mai 1975), Série D : 2207-2210.
- SOURDAT (M.), DELAUNE (M.) et MAHÉ (J.), 1975. — Etudes granulométriques par les méthodes classiques et par l'analyse factorielle des correspondances. Application aux formations superficielles du Sud-Ouest de Madagascar. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. VII, n° 2 : 125-144.
- TRICART (J.), 1966. — Paléoclimats et terrasses quaternaires. *C.R. Sommaire Soc. Géol. Fr.*, fasc. 5 : 202-203.