

**PHENOMENES
DE PEDOGENESE ET DE KARSTIFICATION
DANS LE SUD-OUEST DE MADAGASCAR**

par M. SOURDAT*, J.P. KARCHE** et R. BATTISTINI***



-
- * Section de Pédologie, Centre ORSTOM.
 - ** Laboratoire de Géologie, Faculté des Sciences.
 - *** Laboratoire de Géographie, Faculté des Lettres.

PLAN

INTRODUCTION

I. — LES ELEMENTS PRINCIPAUX DU MODELE KARSTIQUE.

- 1° canyons
- 2° avens
- 3° réseau hydrologique souterrain
- 4° dolines et poljés
- 5° lapiaz et lapiés
- 6° les sols

II. — L'ORGANISATION DES PAYSAGES

- 1° paysages karstiques typiques
- 2° paysages calcaires en topographie « normale »

III. — CONDITIONS LOCALES DE LA KARSTIFICATION

- 1° conditions liées aux variations du niveau marin
- 2° conditions liées à la succession des climats
- 3° conditions liées à la nature des roches calcaires
- 4° conditions liées à l'existence d'une couverture meuble

IV. — GENESE DES LAPIAZ, LAPIES, CROUTES ET CROUTES BRECHOIDES A CIMENT ROUGE

- 1° lapiaz et lapiés
- 2° les formes virtuelles du karst couvert
- 3° les formes vives du karst nu
- 4° croûtes lapiésées
- 5° croûtes bréchoïdes à ciment rouge

V. — PETROGRAPHIE

- 1° les calcaires marins
- 2° les croûtes blanches
- 3° les croûtes bréchoïdes à ciment rouge
- 4° remarques
- 5° étude par dissolution
- 6° étude par diffractométrie aux rayons X

CONCLUSIONS

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

La prépondérance des processus d'érosion par dissolution est à l'origine des reliefs dits « karstiques » par analogie avec le karst d'Istrie ; c'est le fait des roches solubles et surtout des roches dures carbonatées.

En particulier, l'affleurement de calcaires purs, massifs et peu plissés favorise l'évolution d'un type de relief « anormal » constitué de plateaux et de dépressions fermées ; on n'y reconnaît pas la marque de l'érosion fluviale parce que les eaux météoriques sont évacuées par des réseaux souterrains.

Cette définition empruntée à DERRUAU (1956) intègre les facteurs pétrographiques, structuraux et hydrologiques de la formation des karsts de plateau ; elle rend parfaitement compte de la présence dans le sud-ouest de Madagascar de modèles plus ou moins typiques selon les conditions dans lesquelles ces facteurs exercent, ou ont exercé leur action. Le modèle karstique peut aussi se définir par un ensemble de formes caractéristiques qui répondent à une nomenclature précise (FENELON, 1968). Il en existe à Madagascar de remarquables exemples dans les régions nord et ouest de l'île sur calcaires jurassiques et sous climats subhumides voire humides (selon classification THORNTHWAITE, in HERVIEU, 1967) ; tels sont les « Causses » de l'Ankarana, du Kelifely, de l'Antsingy (SAINT-OURS, 1959, DECARY et KIENER, 1970).

Ceux que nous étudions sont situés dans le sud-ouest sous climats subarides et arides. L'affleurement des calcaires crétacés supra-basaltiques constitue le plateau de Vineta (feuilles 1/100 000 E 57 de l'IGN et du Service Géologique). L'affleurement des calcaires éocènes entre la Menarandra et l'Onilahy constitue le plateau mahafaly ; il se prolonge au nord sous le nom de Belomotra. Nos observations portent plus particulièrement sur la région dite des « clairières mahafaly » (feuilles DÉ 60'61), sur les interfluves Onilahy-Fiherenana (feuille D 58) et Fiherenana-Manombo (feuille D 57). Les affleurements de grès dunaires quaternaires comportent aussi quelques formes karstiques ; nous citerons celles de la plaine de Tuléar (feuille C 58).

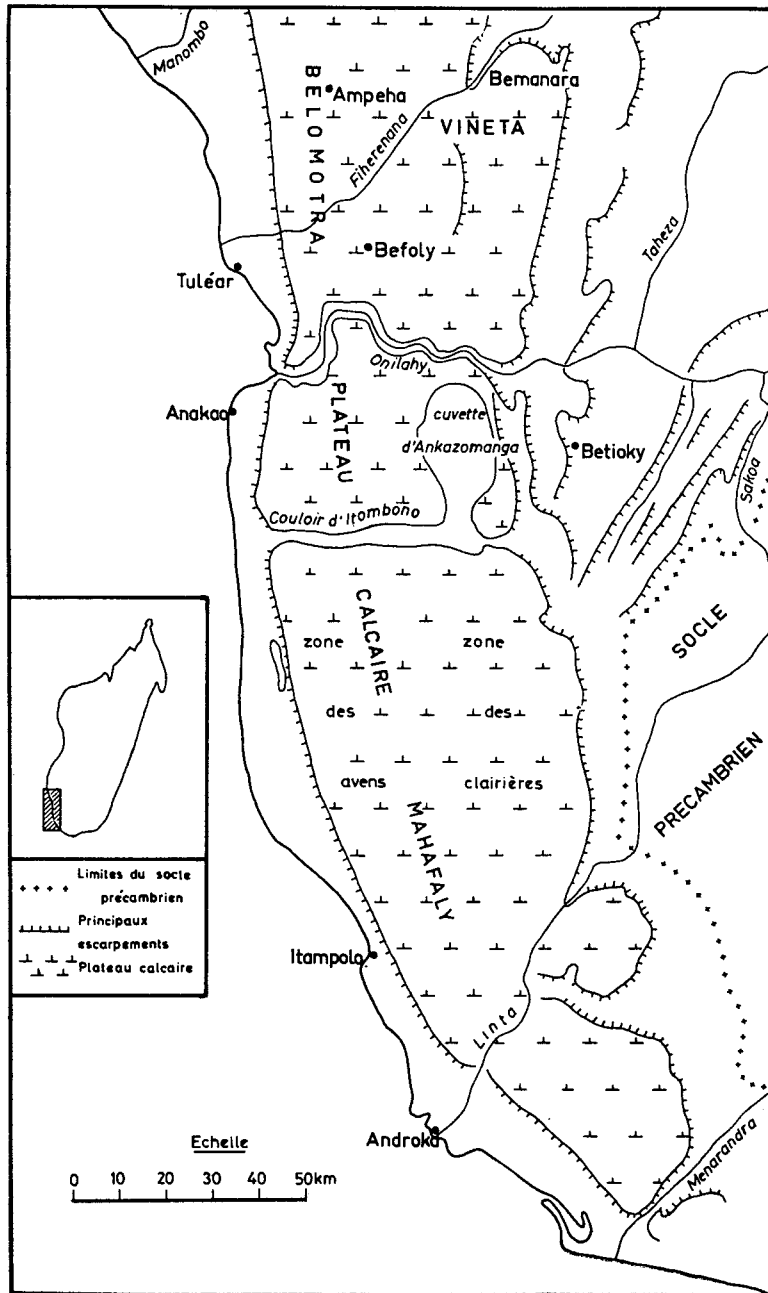


Fig. 1. — Croquis général de localisation.

I. — LES ELEMENTS PRINCIPAUX DU MODELE KARSTIQUE

Nous passerons brièvement en revue certaines formes de relief dont la présence identifie le modelé karstique. Leur rareté ou leur absence implique par contre l'existence d'une topographie « normale », l'une et l'autre pouvant coexister sous les mêmes climats et sur les mêmes affleurements.

1. — *Canyons*.

Les percées conséquentes de fleuves allogènes tels que la Menarandra et la Linta (BATTISTINI, thèse 1964), l'Onilahy, le Fiherenana et la Manombo (PACHOUD, 1964) au travers de l'Eocène sont autant d'exemples de canyons. Par contre les quelques ravins organisés à l'intérieur des plateaux au profit du Fiherenana et de l'Onilahy ne relèvent pas du processus karstique. D'une part, ils empruntent des directions tectoniques privilégiées, d'autre part, leur réseau s'est vraisemblablement surimposé aux calcaires à partir de la surface fini-tertiaire, modelée dans les sables d'épandage continentaux (SOURDAT, 1970-1).

2. — *Avens*.

L'affleurement de l'Eocène moyen entre la Linta et l'Onilahy comporte au moins 90 avens repérés par BATTISTINI ; leur diamètre peut atteindre 500 m et leur profondeur 120 m ; l'Eocène inférieur en est moins riche. Entre l'Onilahy et le Fiherenana, deux avens sont connus : Tolikisy et Ankikihy. Le premier atteint une profondeur de 180 mètres. Entre le Fiherenana et la Manombo, les avens dits Manamby (105 m) et Fandrany (63m) sont aussi connus. Par ailleurs, il existe plus au Nord de nombreux avens très étroits et profonds : 1 à 2 m de diamètre seulement pour plus de 80 mètres de profondeur (renseignements oraux de J. DUFLOS, 1970). Nous ne connaissons pas d'avens notables sur le plateau de Vineta. Par contre il existe dans la plaine de Tuléar deux petits avens pratiqués dans les grès quaternaires (SOURDAT, 1969).

3. — *Réseau hydrologique souterrain*.

L'existence d'une circulation interne dans les calcaires est prouvée par le nombre des résurgences plus ou moins puissantes qui se font jour au fond des canyons ou au pied de la falaise occidentale des plateaux (AUROUZE, 1957).

4. — Dolines et Poljés.

Le plus grand nombre des dépressions fermées décrites par BATTISTINI sur l'affleurement de l'Éocène supérieur des clairières mahafaly sont des dolines. D'autres peuvent être interprétées comme des axes hydrographiques embryonnaires établis à la faveur d'accidents tectoniques ; elles s'apparentent à des poljés.

Le plateau situé au nord d'Ampeha (entre Fiherenana et Manombo) est typiquement criblé de petites dolines dont quelques-unes dégèrent en avens du fait d'effondrements centraux. Celles de Vineta sont plus rares et masquées par l'épaisseur du matériau meuble de couverture.

5. — Lapias et Lapiés.

Ces formes de détails sont abondamment représentées. Leur étude sera développée au chapitre IV.

6. — Les sols.

Les formes typiques du modelé karstique sont presque exclusivement associées dans le sud-ouest de Madagascar à des matériaux de couleur rouge vif répondant à la notion de « terra rossa » (MARCELIN in PLAISANCE & CAILLEUX, 1958). Les uns proviennent en tout ou majeure partie de la décalcification *in situ* et présentent par ailleurs les caractères morphologiques et chimiques des sols dits « rouges méditerranéens ». D'autres sont constitués en majeure partie de sables allochtones hérités des épandages pliocènes dont il existe quelques témoins à la surface des plateaux (SOURDAT, 1970) ; ils présentent une morphologie indifférenciée dite « fersiallitique » *sensu lato* (SOURDAT, 1971). D'autres encore présentent les traces d'un héritage ferrallitique et d'une origine complexe.

Les sols rouges dits « méditerranéens » ne sont pas profonds de plus d'un mètre et représentent des horizons bien structurés de type polyédrique. Le taux d'argile granulométrique atteint au moins 30 % ; la saturation du complexe n'est généralement pas inférieure à 80 % ; le rapport silice/alumine varie de 2,0 à 2,4.

Les sols rouges « fersiallitiques » sont parfaitement indifférenciés sur plusieurs mètres de profondeur. Leur structure est massive, secondairement particulaire ; ils sont très friables et restent très fragiles même après une longue exposition à l'air libre. Le taux d'argile atteint rarement 20 % ; la saturation varie considérablement selon la profondeur des horizons calcaires, (de 30 % à 100 %), sans que la morphologie en soit affectée ; le rapport silice/alumine est compris entre 1,9 et 2,1.

L'héritage ferrallitique se reconnaît à l'existence d'alumine libre (gibbsite) ; le rapport silice/alumine s'abaissant à 1,2.

La pratique des feux saisonniers et du surpâturage sensibilise la surface de ces sols à l'érosion en nappe en dépit du cloisonnement aréique propre au modelé karstique ; ils restent cependant capables de s'approfondir aux dépens des calcaires sous-jacents.

On constate qu'à la topographie « normale » sont associés des sols de couleurs grise ou brune, peu profonds et dont les éléments sont empruntés en majeure partie aux calcaires *in situ* ; ces sols appartiennent selon les conditions locales aux classes dites « non évoluée », « peu évoluée », « calcimorphe », « isohumique » et « verticale » de la classification pédologique française (AUBERT, 1965, RQUIER, 1968, SOURDAT, 1970-2).

II. — L'ORGANISATION DES PAYSAGES

1. — *Paysages karstiques typiques.*

On désigne sous le nom de « karst couvert » les paysages dans lesquels les lapiaz sont enfouis sous un matériau meuble ; on parle dans ce cas de lapiaz « virtuels » par opposition aux lapiaz « vifs » des karst « nus » dont les formes dures sont exhumées.

On distingue encore le karst couvert *sensu stricto* (couvert par les résidus de sa décalcification), du karst « sous-jacent », fossilisé par un matériau meuble allochtone.

Dans le sud-ouest malgache les paysages typiques sont ceux des clairières mahafaly, du Belomotra au nord d'Ampeha et de Vineta. Leur trait essentiel est l'aréisme qui résulte de divers facteurs structuraux, pétrographiques et historique. Selon FENELON les karst couverts *sensu lato* seraient très évolutifs parce que la corrosion du calcaire est plus intense au contact du matériau meuble ; cela est particulièrement vrai dans le sud-ouest puisque ce matériau meuble est un sol rouge décalcifié de pH souvent inférieur à 7. Les sols rouges comblent toutes les dépressions fermées ; à Vineta, leur épaisseur dépasse parfois 6 m. Ils subsistent également, en épaisseurs moindres (de 0 à 2 m) sur quelques points hauts lorsqu'ils sont retenus dans les cavités des lapiaz.

Cependant la plupart des lapiaz en position haute ont été débarrassés par érosion au profit des dépressions fermées, révélant leur architecture caverneuse aux formes ajourées. Le contraste est accusé par la présence de savanes herbeuses ou arborées sur les parties couvertes et de forêt sclérophile sur les parties nues ; les lisières coïncident presque toujours exactement avec les limites morphologiques.

Du fait de l'aréisme et du cloisonnement propre aux lapiaz, l'érosion des sols se limite à de faibles déplacements de la couverture entre parties nues et parties couvertes, les unes se couvrent de lapiaz, les autres s'approfondissent par pédogenèse.

Il y a peu d'exportation de matériau solide et les plateaux ainsi isolés sont propices à la conservation des paléosols.

2. — *Paysages calcaires en topographie « normale ».*

En marge des zones aréiques, certains facteurs structuraux (directions tectoniques privilégiées), pétrographiques (impureté du calcaire), ou historique (surimposition), provoquent la circulation superficielle des eaux et la formation de réseaux qui rejoignent les canyons. Le modelé « normal » subsiste par exemple dans le Mahafaly au nord du couloir d'Itambono, et dans le Belomotra dans sa plus grande partie. Le ruissellement provoque une vive érosion et le microrelief n'est plus capable de retenir les matériaux rouges s'il y en eut.

Les points hauts et les pentes restent sporadiquement couverts de sols peu évolués ou tronqués ; la troncature au niveau d'horizons limono-calcaires semble à l'origine de la formation de croûtes. Certains points bas recueillent des matériaux très divers sur lesquels se développent des profils complexes. La forêt sclérophile couvrait récemment l'ensemble de ce paysage mais elle a été détruite par l'homme partout où la moindre profondeur de sols meubles se trouvait accumulée. L'essartage déborde actuellement même sur les champs de croûtes et accélère la disparition des matériaux meubles résiduels.

L'aspect de ces paysages s'accorde mieux à la nature semi-aride ou aride des climats actuels du sud-ouest que celui des karsts couverts où la présence des sols rouges maintient dans les mêmes conditions météorologiques un pédoclimat et des conditions de développement biologiques plus favorables et qu'on peut qualifier d'anachroniques.

III. — CONDITIONS LOCALES DE LA KARSTIFICATION

1. — *Conditions liées aux variations du niveau marin.*

Les formes majeures, canyons, avens et réseau souterrain en sont particulièrement affectés. Si l'on ne connaît pas dans le sud-ouest de grottes comparables à celles de la région nord-ouest (de SAINT-OURS, 1953), l'existence d'un réseau hydrologique souterrain, immergé au-dessous de la nappe générale ne saurait néanmoins être mis en doute ; les résurgences côtières à fort débit, sur l'estran au niveau des basses mers et la présence de poissons aveugles, *Typhleotris* sp. dans les avens de l'intérieur, l'attestent.

Les grandes régressions marines pré-karimbolienne et pré-flandrienne, et l'abaissement corrélatif du niveau de base auront contribué à son développement d'autant mieux qu'en admet la coïncidence de ces régressions et de climats pluviaux, aptes à porter les processus de dissolution et le débit du réseau à leur maximum. Le retour flandrien de la mer et la remontée de la nappe ont eu pour effet de le moyer.

2. — Conditions liées à la succession des climats.

Elles intéressent plus particulièrement les sols et les formes de détail qui prennent naissance au sein des sols.

Pour provoquer initialement la décalcification d'une surface de calcaire dur et la formation d'un sol rouge décalcifié il paraît nécessaire que, par l'intermédiaire d'horizons organiques adéquats, d'une part les solutions du sol soient évacuées après neutralisation et renouvelées grâce à un régime hydrique suffisamment lixiviant. Il faut aussi que les résidus non carbonatés puissent s'accumuler sur place. Dans le langage d'EHRART (1967) ces conditions seraient localement celles de la « biostasie ». Elles ne semblent pas réunies dans le sud-ouest de Madagascar où règnent actuellement des climats sub-arides ou arides marqués par des précipitations rares et violentes.

On observe en effet que le bilan de l'érosion et de la pédogenèse est généralement négatif : les sols s'amincissent et les roches se rapprochent de la surface. Dans le cas des sols peu profonds et carbonatés qui couvrent les affleurements de calcaires en topographie normale, leur évolution ultérieure en sols rouges décalcifiés ne paraît pas devoir être envisagée.

C'est pourquoi dans le cas des sols rouges du karst, il nous semble également improbable qu'ils se soient formés dans les conditions actuelles : leur différenciation doit être imputée à des périodes climatiques anciennes à caractère biostasiq.

Si les processus de décalcification et de rubéfaction nous paraissent incompatibles *dans leur phase initiale* avec les conditions actuelles, il est non moins certain qu'amorcés à la faveur de conditions bioclimatiques plus favorables, ils s'exercent encore dans la profondeur des sols rouges : on y observe très bien l'altération pelliculaire décrite au Liban par LAMOUROUX (1965). L'épaisseur des sols rouges entretient un pédoclimat différent de celui des sols carbonatés peu épais : ce pédoclimat est en quelque sorte hérité des périodes anciennes dont il prolonge les effets pédogénétiques.

Les calcaires de la série tertiaire du sud et de l'ouest malgaches ont été exposés à l'érosion depuis la fin du Miocène, durant le Pliocène et le Quaternaire à l'exception des périodes au cours desquelles ils sont restés fossilisés par les épandages continentaux corrélatifs de l'aplanissement fini-tertiaire (BATTISTINI, thèse 1964 & 1966). On peut penser qu'à l'image du karst de Narinda (dans la région nord-ouest) les karst du sud-ouest étaient déjà modelés avant d'être recouverts par les matériaux pliocènes : les formes karstiques exhumées par l'érosion quaternaire ou actuelle seraient donc très anciennes. Il en est d'ailleurs ainsi de la grande cuesta orientale.

En quelques endroits par contre, et particulièrement sur le Belomotra au nord et au sud du Fiherenana (SOURDAT, 1970-1), les buttes témoins du Pliocène recouvrent des couches non karstifiées de l'Eocène soit que les karsts adjacents se soient formés antérieurement, soit que les nappes sableuses aient cheminé électivement sur les surfaces de topographie « normale ».

Toujours est-il que la genèse des karsts doit être envisagée non pas en fonction du climat actuel mais des climats anciens dont la chaleur et l'humidité avaient été plus fortes et ont progressivement décliné du Pliocène à l'Aepyornien et jusqu'à nos jours. Sans doute, le relief karstique avait-il acquis ses caractères essentiels à l'issue des « pluviaux » Pré-taximien et Ambovombien. Ses formes ont encore évolué, d'autres se sont développées postérieurement au maximum marin karimbolien et aux dépôts dunaires correspondant qu'elles affectent.

3. — Conditions liées à la nature des roches calcaires.

Les calcaires purs et durs favorisent le drainage en profondeur aux dépens du ruissellement superficiel car ils sont progressivement dissous et non pas désagrégés, libérant un taux minimum de résidus insolubles.

Au contraire, l'altération de calcaires tendres et impurs se bloque précocement car ils se désagrègent en formant des horizons limono-calcaires peu perméables. Outre le fait que la circulation des solutions y est entravée, celles-ci restent saturées de carbonates et conservent un pH élevé.

4. — Conditions liées à l'existence d'une couverture meuble.

La décalcification des calcaires durs peut s'effectuer théoriquement à l'air libre sous l'effet des eaux météoriques ou par l'intermédiaire d'organismes vivants (lichens) ; dans le sud-ouest elle est sans doute très faible et parfois compensée par la formation d'une pellicule calcaire d'évaporation.

La dissolution est plus active dans les cavités où l'eau stagne et où des matériaux résiduels peuvent s'accumuler ; elle s'exerce dans ce cas verticalement en approfondissant les cavités du lapiaz et en individualisant les saillies.

Les conditions optimales de la décalcification ne se trouvent réalisées que lorsque toutes les faces des blocs calcaires réagissent au contact intime d'un matériau meuble tel que les sols rouges, d'autant plus longtemps humides et d'autant plus acides qu'ils sont profonds.

Dans les sols rouges peu profonds (rattachés le plus souvent au type « rouge méditerranéen »), les horizons calcaires sont encore trop proches de la surface pour être soustraits totalement à l'évaporation et aux mouvements ascensionnels. L'équilibre entre les mouvements de carbonates et de Ca^{++} se traduit par des pH compris entre 7 et 8. C'est pourquoi de petits fragments de calcaire restent distribués dans le profil, de même qu'au contact de la roche des horizons limono-calcaires subsistent.

Dans les sols rouges profonds — généralement du type « ferriallitique indifférencié » — l'évaporation ne donne lieu à aucun mouvement de carbonates ni de Ca^{++} , nous observons que le pH est voisin de 6 dans les horizons organiques de surface et atteint 5,4 en semi-profondeur. Un tel pH exclut la présence de résidus calcaires dans la plus grande partie des profils.

Au sein des sols rouges la digestion des blocs calcaires s'exerce sur *toutes* leurs faces puisqu'elles sont également au contact du matériau décalcifié. La corrosion s'exerce en toutes directions et non plus dans le seul sens vertical. On peut constater que le sol rouge situé immédiatement *en-dessous* d'un bloc en voie d'altération ne donne aucune effervescence à l'acide. Les blocs isolés adoptent dans ces conditions la forme de galets ; on y observe l'altération pelliculaire (1).

On relève d'ailleurs la présence de ces pseudo-galets et l'absence d'horizons limoneux de contact dans les profils semi-colluviaux qui occupent quelques axes de drainage embryonnaires soumis à un lessivage oblique.



(1) A la périphérie des blocs, la corrosion, en saison humide, conditionne la formation d'un « cortex d'altération ». Ce cortex, collé au sol, se détache en saison sèche et donne naissance à la pellicule dite d'altération. Sous l'effet des pluies suivantes les carbonates sont définitivement éliminés tandis que les résidus non calcaires s'incorporent au sol (d'après LAMOUREUX, 1965).

IV. — GENESE DES LAPIAZ, LAPIES, CROUTES BRECHOIDES

1. — *Lapiaz et lapiés.*

Selon FENELON (1968) le terme de lapiés désigne les rainures creusées à la surface des roches, de taille centimétrique ou métrique ; elles résultent de la structure interne du calcaire par inégale répartition des masses solubles, fractures, diaclases, ou joints de stratification si les strates sont redressées. Le lapiaz désigne la surface calcaire sculptée de lapiés.

Il est commode d'y ajouter une notion génétique en désignant sous le nom de lapiés, les sculptures développées à l'air libre et dans le plan vertical en raison de la dissolution préférentielle des formes en creux et de la persistance des formes saillantes, et par lapiaz les formes de plus grande ampleur qui s'individualisent principalement en profondeur par dissolution au contact intime d'une couverture meuble décalcifiée.

Les lapiaz se couvriraient de lapiés lorsqu'ils sont exhumés. Il n'est pas certain que cette distinction, commode à Madagascar, soit généralisable, et si l'on veut garder en synonymie les termes de lapiaz et lapié (simples variantes orthographiques à l'origine), on les appliquera aux formes d'ensemble individualisées par dissolution subsuperficielle, ces formes étant ultérieurement ciselées, sculptées, etc.

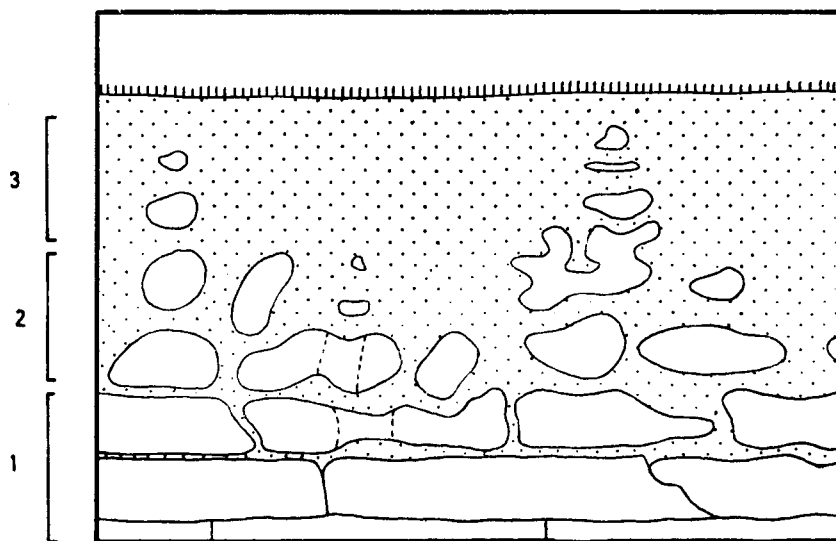


Fig. 2. — Coupe schématique de strates calcaires lapiazées.

2. — *Les formes virtuelles du karst couvert.*

Les lapiaz s'individualisent souvent selon les strates de la roche calcaire (figure n° 2) :

— Les strates les plus profondes (1) correspondent à une couche calcaire dont seules les discontinuités structurales sont investies par le matériau rouge et dont les surfaces sont piquetées par la corrosion.

— Les strates moyennes (2) emballées par le matériau rouge sont amincies par la dissolution ; l'action pionnière des racines (en supposant un couvert forestier à l'origine) est sans doute responsable des multiples perforations dont elles sont ajourées.

— Les strates supérieures (3) sont constituées de blocs individualisés évoluant en pseudo-galets noyés dans le sol rouge.

L'exhumation de ces lapiaz stratifiés amène en surface successivement des champs de boules et de blocs (cliché n° 1), des formes amiboïdes perforées en lunettes (cliché n° 2) et en dernier lieu la dalle discontinue. Lorsque l'exhumation est récente, les lapiaz ne sont pas encore ciselés et présentent seulement les piquetures de la corrosion (il arrive que les fossiles formés de calcite bien cristallisée soient saillants).



Cliché 1. — *Karst couvert de Vineta* : exhumation au niveau des pseudo-galets et formes amiboïdes.



Cliché 2. — *Lapiaz d'exhumation très récente* : le calcaire n'est ni ciselé ni encroûté (Vineta).

3. — *Les formes vives du karst nu.*

Lorsque l'exhumation est ancienne, elle révèle l'architecture caverneuse du lapiaz selon la stratification. Les faces supérieures des dalles, des lamettes, des blocs et boules se couvrent de ciselures (lapiés) (clichés n^{os} 3 et 4) ; les blocs isolés affectent la forme caractéristique en chicots (cliché n^o 5). Il est notable que dans le cas de calcaires purs, durs et peu poreux, les lapiés sont sculptés à même la roche sans interposition d'encroûtement ; la coupe d'un lapié monté en lame révèle dès la surface la structure organogène d'un calcaire sans modification superficielle.

4. — *Croûtes lapiées.*

Sur de grandes étendues l'érosion a exhumé les horizons limono-calcaires formés par l'altération de roches tendres et impures ; cela se rencontre surtout en topographie normale. Les calcaires ont été partiellement désagrégés et leur structure désorganisée par une dissolution incomplète. Ils sont ultérieurement réenvahis par les carbonates d'évaporation, une structure cryptocristalline se substitue à la structure



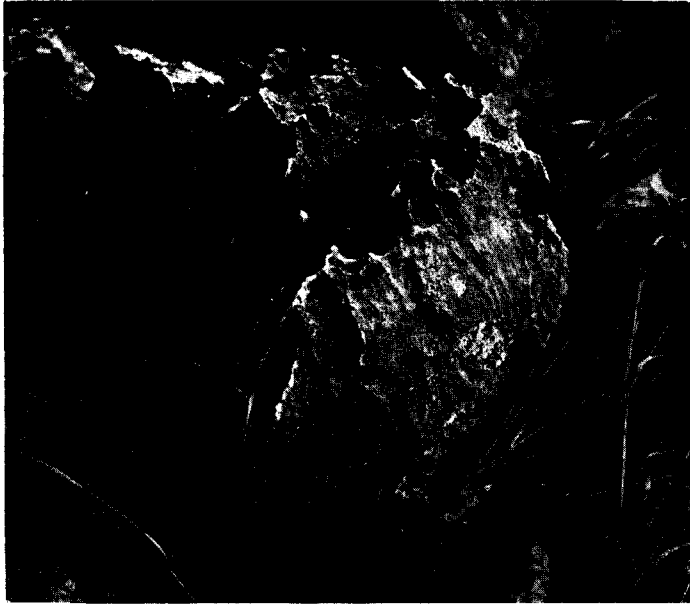
Cliché 3. — *Lapiaz d'exhumation plus ancienne* ; formes en saumons avec perforations ; les ciselures sont peu marquées (Vineta).



Cliché 4. — *Lapiaz d'exhumation plus ancienne* : formes en lunettes.

originelle, mais il arrive qu'on y devine des fantômes de fossiles. En affleurant, ces horizons encroûtés se fragmentent en plaques polygonales dont la partie supérieure exposée aux intempéries se couvre de croûtes zonées et ciselées.

On remarque que les lapiés sur croûtes sont de formes relativement molles et émoussées. Actuellement l'érosion va jusqu'à déchausser ses plaques polygonales et en forme des champs sur la surface.



Cliché 5. — *Karst nu* : formes en chicots profondément ciselées (lapiés).

5. — *Croûtes bréchoïdes à ciments rouges.*

C'est souvent à la limite des zones karstiques typiques et des reliefs normaux qu'on observe l'affleurement de formations hétérogènes constituées d'éléments de calcaire organogène, non altérés mais arrondis, de veines de calcaire cryptocristallin non quartzeux et d'un ciment rouge abondamment pourvu en quartz et minéraux opaques. Leur aspect général est celui des brèches de bas de pentes dont on peut voir un bel exemple à Sarodrano (sud de Tuléar).

Cependant la nature, la couleur et la répartition des éléments constitutifs de ces formations présentent une analogie frappante avec celles des éléments qui figurent dans les horizons de contact entre calcaires et sols rouges. L'examen pétrographique confirme cette

analogie ; c'est pourquoi nous considérons ces « croûtes bréchoïdes » comme d'anciens horizons profonds de sols, rapprochés de la surface par érosion et pétrifiés *in-situ* par la remontée capillaire des solutions carbonatées. Elles témoignent donc d'une alternance climatique : période biostasique pour l'approfondissement des sols et période rhexistasique pour son érosion et sa pétrification.

C'est la forme ronde des « pseudo-galets » dont nous avons constaté par ailleurs l'individualisation par corrosion en place qui entretient la confusion avec un matériel détritique usé par transport. Il va de soi que le mécanisme que nous invoquons n'exclut pas les remaniements locaux et qu'il ne saurait exister de différences absolues entre brèches et croûtes bréchoïdes ; celles-ci néanmoins méritent d'être distinguées.

Ces croûtes bréchoïdes sont très dures et ornées de ciselures particulièrement aiguës.

V. — PETROGRAPHIE (1)

1. — *Les calcaires marins.*

Il s'agit de calcaires de couleur claire à organismes très apparents. Dans l'Eocène les Alvéolines sont accompagnées d'Orbitolites, de Nummulites, de Miliolles, de radiolles d'oursins, de débris de Bryozoaires et de Lithothamniées ; dans le Crétacé ces deux derniers organismes dominant.

La structure est microcristalline ou microgranulaire dans les échantillons typiques de l'Eocène à Alvéolines. Elle est graveleuse ou granulaire à la base de l'Eocène et dans le Crétacé. Ces structures sont compactes.

Les minéraux opaques contenus dans ces calcaires consistent essentiellement en grains de magnétite et d'hématite de tailles généralement inférieures à 0,1 mm.

— Ils sont parfois noirs et de contours nets, parfois de couleur rouge sombre ou rouille et de contours imprécis. A la limite ils font place à des taches ou moirures rouilles.

Dans tous les cas identifiables on reconnaît de la magnétite s'altérant en hématite puis en produits diffus, amorphes ou cryptocristallins. L'hématite bien cristallisée est rare, on ne saurait dire si elle existait à l'origine ou provient de la magnétite.

(1) 60 lames minces ont été examinées dont 23 représentent les calcaires, 16 les croûtes ou encroûtements ; 10 représentent les brèches à ciment rouge et 12 les grès dunaires encroûtés. Il s'agit des couches à l'affleurement.

— Les opaques semblent accompagner les quartz : lorsqu'ils sont nombreux les quartz le sont aussi, lorsqu'ils sont absents, rares ou de taille excessivement réduite, il en est de même des quartz.

Les calcaires sont blancs lorsqu'ils ne contiennent pas de minéraux opaques ou que ceux-ci consistent en magnétite non altérée. Ils sont légèrement teintés — jaunes ou rosés — proportionnellement à la présence de produits d'altération. Lorsqu'une lame présente la surface d'un pseudo-galet, on constate la coloration rouge vif de la périphérie qui se trouve au contact d'une quantité considérable de grains de magnétite et hématite altérées appartenant au matériau rouge de couverture.

— Un classement des lames selon la quantité de minéraux altérés ou de taches rouilles fait apparaître une corrélation directe avec le taux d'impureté qui a été mesuré par ailleurs (cf. § 5).

1. Calcaires blancs	Nombre de lames	% d'impuretés
1.1. Minéraux opaques non altérés rares avec quartz sans quartz	0 4	— 0,8.1
1.2. Minéraux opaques non altérés nombreux avec quartz	3	
2. Calcaires teintés	Nombre de lames	% d'impuretés
2.1. Minéraux opaques altérés rares avec quartz sans quartz	0 3	— 3,2.4. —
2.2. Minéraux opaques altérés nombreux avec quartz sans quartz	3 3	— 1.3,6.5 —
2.3. Minéraux altérés et non altérés mêlés. avec quartz sans quartz	1 2	8 2.4 —
2.4. Minéraux altérés ou non très petits avec quartz sans quartz	0 2	1 — 1.1,5

Deux explications sont possibles : soit que l'altération préalable de la magnétite coïncide dans le sédiment avec un taux plus élevé d'argiles, soit que la présence d'argile dans les calcaires durs implique une plus grande porosité de ceux-ci et qu'elle ait permis l'oxydation ultérieure de la magnétite au sein de la roche. Il faudrait admettre pour cela qu'un faible taux d'impureté suffise à augmenter notablement la porosité et la perméabilité de la roche. Il en est d'ailleurs ainsi au Liban selon LAMOUREUX.

2. — *Les croûtes blanches.*

Les encroûtements et croûtes se reconnaissent aisément en lames minces en raison de l'effacement des structures qui définissaient les calcaires. Celles-ci sont remplacées par une structure cryptocristalline, très vacuolaire et d'aspect crayeux.

On constate que des accumulations de carbonates peuvent se former comme par expansion au sein de matériaux encore mal consolidés : cela est frappant dans les croûtes sur grès dunaires car des zones crayeuses blanches, absolument dépourvues de quartz, séparent des zones remplies de quartz et de minéraux opaques. Une stratification éolienne peut intervenir dans ce phénomène. Plus souvent, les croûtes incluent divers minéraux. Il suffit généralement de très peu de minéraux ferrugineux pour colorer l'ensemble ; ainsi les zonations blanches, roses ou rouilles sont dues à la diffusion d'une plus ou moins grande quantité d'oxyde de fer. Lorsqu'une croûte d'évaporation se trouve en surface, il suffit parfois d'une faible pollution d'origine éolienne pour provoquer la différenciation d'une zone colorée. Dans les grès dunaires de la plaine de Tuléar, cependant, les croûtes restent blanches même en présence de magnétite altérée ou d'hématite qui ne donnent lieu à aucune diffusion de colorants.

3. — *Les croûtes bréchoïdes à ciment rouge.*

Elles sont composées des éléments suivants :

— Des graviers arrondis de calcaire organogène parfaitement sain, plus ou moins pourvus en minéraux opaques et généralement très pauvres en quartz.

— Des fossiles résistant isolément à la corrosion.

— Des ciments de couleur rouge rosé (Munsell 10 R 6/3-4) ou rouge moyen (10 R 5/3-4) ou grenat clair (2,5 YR 6/6) dont l'extrême richesse en quartz et en minéraux opaques contraste avec la pauvreté des calcaires.

Les magnétites, altérées ou non, sont aisément identifiées ; quelques cristaux d'hématite identifiable atteignent 4 mm. Les ciments semblent essentiellement formés de calcite et d'hématite.

— Des zones plus vivement colorées correspondent au blocage de colorants solubles autour d'inclusions telles que les quartz, les graviers calcaires ou des grains de calcite bien recristallisés.

— Des zones argilo-ferrugineuses.

Dans certains échantillons, le ciment est homogène et inclut directement les morceaux de calcaire selon l'hypothèse de pétrification en place d'horizons pédologiques. D'autres échantillons comportent des éléments de ciment rouge eux-mêmes sertis dans un ciment plus clair et associés à des zones de croûtes blanches ; cet aspect se rapproche plus de celui des brèches et suppose la succession de plusieurs phases d'encroûtement. Un autre échantillon présente un ciment très homogène et d'un rouge intense apparemment fissuré et contaminé ultérieurement par un matériau clair formé de quartz, hornblendes, magnétites etc... englobé dans un ciment calcaréo-argileux.

4. — Remarques.

On constate la faible quantité de quartz présente dans les calcaires organogènes d'une part, et la rareté des grès calcaires dans la zone d'autre part. Les sols rouges étant par contraste extrêmement quartzeux à Vineta et sur le Belomotra, il y a tout lieu de rechercher l'origine de ces quartz dans les épandages pliocènes qui ont couvert une partie de ces régions et dont nous avons décrit, par ailleurs, deux témoins remarquables, précisément à Befoly et Ampeha, dominant les sols rouges. Nous avons montré aussi l'apparemment sédimentologique des sables des terra-rossa, des buttes pliocènes et de l'arrière pays isalien par la granulométrie et le comptage des minéraux lourds (SOURDAT, 1970-1).

Dans la zone des clairières mahafaly, il n'y a par contre aucun témoin d'épandage et on observe que les sols rouges sont de texture beaucoup plus fine : il faut admettre alors qu'ils se sont formés par décalcification *in situ*.

Selon LAMOUROUX (communication personnelle), les calcaires contiennent, outre les minéraux figurés, du fer à l'état amorphe, de couleur brune, qui, rubéfié après décalcification, enrobe les résidus argileux et les colore. Ce fer amorphe résiduel pourrait colorer un sol au taux de 1 à 2 %.

Lorsque la décalcification s'effectue sous une couverture allochtone très riche en magnétites, comme c'est ici le cas le plus fréquent, la coloration des sols peut être plus intense.

5. — *Etude par dissolution.*

Nous avons dissous dans l'acide acétique tamponné (pH 4,2) quelques échantillons de calcaires organogènes de l'Eocène (Belomotra) et du Crétacé (Vineta), des croûtes blanches et des croûtes à ciment rouge. Les résidus ont été recueillis et analysés. Les quantités obtenues sont approchées par défaut.

Parmi ces matériaux, les croûtes blanches et elles seules contiennent de la matière organique qui s'est manifestée par une mousse noirâtre abondante accompagnant le dégagement gazeux. Il a semblé que conformément à nos hypothèses les calcaires prélevés sont généralement très purs : pour l'Eocène le taux d'impureté de 6 échantillons non quartzeux se trouve toujours inférieur à 1,2 % : pour le Crétacé (3 échantillons) ce taux s'élève de 2 à 8 %. Les calcaires prélevés au voisinage de la butte pliocène de Befoly et qui donnent lieu à un relief normal et à des sols non rubéfiés contiennent de 4 à 36 % d'impuretés (5 échantillons). Les croûtes fournissent le matériau le plus pur puisque le résidu de 4 échantillons n'a pas atteint 1 % ; ce taux s'élève dans la mesure où elles incluent des quartz mais cela ne se présente généralement que dans la zone des grès dumaires.

Le résidu des ciments rouges par contre contient toujours beaucoup de quartz et minéraux divers : le taux en est de 14 % environ dans la zone des calcaires marins et de 30 % dans la zone des grès dumaires (Itampolo).



6. — *Etude par diffractométrie aux rayons X.*

Les fractions fines recueillies après dissolution sont essentiellement constituées, en ce qui concerne les calcaires marins purs, de kaolinite avec des traces plus ou moins nettes de chlorite, montmorillonite, illite et interstratifiés ; elles sont jaunes (10 YR 6/6), et contiennent de la goethite. Les calcaires argileux de Befoly renferment de la montmorillonite accompagnée de kaolinite et d'illite. Les croûtes blanches sont caractérisées par la médiocre cristallisation des argiles : kaolinite, chlorite et montmorillonite. Par contre, le ciment rouge des croûtes bréchoïdes se signale par de la kaolinite très bien cristallisée ; la médiocrité des indices de chlorites, montmorillonite et interstratifiés nous paraît d'autant plus significative

que les échantillons ne peuvent jamais être tout à fait indemnes de fragments de calcaire organogène et de croûte blanche. Ce ciment est donc un matériau minéralogiquement plus évolué que celui des calcaires et des croûtes blanches. D'ailleurs un échantillon prélevé sur les hauteurs de Bemanara (extrême nord de Vineta) présente des indices assez nets d'alumine libre sous forme de gibbsite : il a évolué autrefois jusqu'au stade de l'allitisation.

Les diagrammes confirment la présence d'hématite et de goethite, la magnétite n'apparaissant pas, on peut supposer qu'elle n'est pas passée par la fraction fine.

CONCLUSIONS

Cette étude nous a permis de dégager quelques points d'intérêt régional ou général.

— Le modelé dont nous avons décrit quelques formes caractéristiques est indiscutablement un modelé karstique mais de développement relativement modeste : les lapiaz mis à nu sur les points hauts représentent le seul obstacle majeur à la pénétration alors que certains karsts du nord et de l'ouest de l'île sont presque infranchissables. Cette différence est probablement d'ordre pétrographique et stratigraphique mais une moindre agressivité des climats anciens et actuels peut également être invoquée.

On remarque par ailleurs que l'exhumation des matériaux calcaires non massifs est toujours suivie d'encroûtements tandis que le karst de la région de Majunga par exemple en est absolument dépourvu : cela résulte d'une différence climatique actuelle.

— Nous avons distingué les formes d'érosion qui se dégagent au sein des matériaux meubles de couverture, en raison d'une dissolution qui s'exerce par contact sur toutes les faces des blocs, et celles qui se manifestent en surface sous l'effet d'une érosion tant mécanique que chimique et orientée dans le sens vertical : nous les avons appelées respectivement lapiaz et lapiés. Si le choix des termes est discutable, l'observation par contre doit pouvoir être généralisée. Nous insistons sur les relations qui existent entre les roches dures et les matériaux meubles du karst couvert : il convient de ne pas étudier les formes caractéristiques des roches indépendamment des matériaux meubles au sein desquelles elles s'ébauchent.

On ne saurait donc confondre les processus qui s'exercent sous le matériau de décalcification et se généralisent au fur et à mesure que celui-ci s'approfondit et les processus qui peuvent se manifester sous un matériau meuble allochtone. Sous ce rapport la distinction entre karst couvert et karst sous-jacent n'a pas qu'une valeur formelle mais aussi une signification génétique en rapport avec la géographie et les climats anciens.

— Les paysages karstiques tropicaux se prêtent particulièrement bien à l'étude des paléoclimats car en l'absence de ruissellement superficiel, des sols peuvent s'y trouver conservés à l'état meuble depuis des temps très anciens. D'autres témoins des pédogenèses anciennes se retrouvent sous la forme particulièrement résistante des croûtes bréchoïdes à ciments rouges que l'on considère comme des matériaux pédologiques pétrifiés par recarbonatation. La rubéfaction des argiles à rapport silice/alumine élevé, au profit d'argiles du type kaolinite ($R = 2$) et l'apparition d'alumine libre (gibbsite) dans ces ciments représentent les étapes classiques de la pédogenèse en milieu tropical et reflètent le caractère plus ou moins agressif des climats sous lesquels ces matériaux ont évolué.

— La décalcification et la rubéfaction initiales des sols rouges que nous observons sont imputées à l'influence d'un climat ancien plus humide en raison du fait que le climat actuel ne provoque dans cette région ni décalcification ni rubéfaction des roches brutes. Le pédoclimat des sols « en équilibre » ne le permet pas. Cependant on observe au sein des sols rouges la persistance des processus évolutifs primordiaux sous forme d'altération pelliculaire. Ceci nous conduit à considérer l'héritage des climats anciens sous un aspect dynamique. Cet héritage est constitué non seulement par le matériau rouge mais par le pédoclimat qui règne au sein de ce matériau.

Les termes de paléosols, sols reliques, ou sols à caractères reliques s'appliquent selon RUELLAN (1970), à des sols dont la formation résulte de mécanismes qui n'ont plus cours actuellement. Ce n'est pas le cas ici puisque l'altération pelliculaire persiste.

Le terme de sols « en équilibre » ne convient pas non plus puisque dans les conditions actuelles ils ne se forment plus mais peuvent seulement s'approfondir. Peut-être peut-on parler d'équilibre « instable » puisque son déplacement par érosion modifierait qualitativement et irréversiblement les processus évolutifs fondamentaux (un sol rouge érodé se transforme en sol calcimorphe).

L'interférence d'un climat ancien sur le climat actuel par l'intermédiaire du pédoclimat échappe à l'analyse des données météorologiques et n'est exprimé par aucune classification. Il est néanmoins très important de prendre ce fait en considération.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G). — 1965 — La classification pédologique utilisée en France — Pédologie. *Symp. intern.* 3, *class. des sols*, pp. 25-26, Gand.
- AUBERT (G). — 1965 — Classification des sols. *Cahiers ORSTOM*, sér. péd., III, n° 3.
- AUROUZE (J). — 1957 — Notice explicative sur la carte hydrogéologique du Sud de Madagascar à l'échelle du 1/500 000. *Serv. Géol.*, Tananarive, multigr., 13 p.
- BATTISTINI (R). 1964 — l'extrême Sud de Madagascar. Etude géomorphologique. Thèse de Docteur. Lettres. *Etudes malgaches*, n° 10 et 11, 636 p.
- BATTISTINI (R). — 1966 — Le littoral du paléokarst de la presqu'île de Narinda au Nord de Majunga (Madagascar) : un exemple de côte contraposée. *Bull. Ass. Géogr. Français*, n° 346-347, pp. 41-49, 2 figures.
- DECARY (R) et KIENER (A). — 1970 — Les cavités souterraines de Madagascar. *Ann. de Spéléologie*, t. 25, fasc. 2.
- DERRUAU (M). — 1956 — Précis de Géomorphologie. *Masson*, édit. Paris, 393 p.
- DUFLOS (J) — 1966 — Bilan des explorations spéléologiques pour l'année 1965 *Madagascar Revue de Géographie*, n° IX, pp. 234-252.
- DUFLOS (J) — 1968 — Bilan des explorations spéléologiques pour l'année 1966 *Madagascar Revue de Géographie*, n° XII, pp. 121-129.
- ERHART (H). — 1967 — La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Esquisse d'une théorie géologique et géochimique. Biostasie et rhéostasie. *Masson*, édit., Paris.
- FENELON (P). — 1968 — Phénomènes karstiques. *Coll. Mémoires et documents CNRS*, Paris, 335 p., photos et cartes.
- HERVIEU (J). — 1967 — Géographie des sols malgaches. *Cah. ORSTOM*, sér. pédologie, vol. V, n° 1, 1967, 82 p., 5 cartes.
- LAMOUREUX (M). — 1965 — Observations sur l'altération des roches calcaires sous climat méditerranéen humide (Liban). *Cah. ORSTOM*, sér. pédol. 3, pp. 21-42.
- PACHOUD (A). — 1954 — Etude de l'Eocène entre l'Onilahy et le Mangoky. S.P.M. *Doc. n° 200*.
- PLAISANCE (G) et CAILLEUX (A). — 1958 — Dictionnaire des sols. *La Maison Rustique*. Edit. Paris, 605 p.
- RIQUIER (J). — 1967 — Carte pédologique de Madagascar à l'échelle du 1 000 000, *ORSTOM*, Tananarive, 3 feuilles.
- RUELLAN (A). — 1970 — L'histoire des sols : quelques problèmes de définition et d'interprétation. *Comm. Symp. on the age of parent materials and soils*. Amsterdam.

- SAINT-OURS (J. de). — 1953 — Etude des grottes d'Andranoboka. *Trav. du Serv. géol.*, n° 43, 14 p. et cartes, Tananarive.
- SAINT-OURS (J. de). — 1959 — Les phénomènes karstiques à Madagascar, *CNRS. Ann. de spéléologie*, 14 (3-4), pp. 275-291, et *Bull. de Madagascar* (sept. 1959), n° 60, pp. 743-762.
- SOURDAT (M). — 1969 — Notes de climatologie descriptive. Région du Sud-Ouest de Madagascar (Préfecture de Tuléar). *ORSTOM Tananarive*, multigr. 27 p., 22 tableaux et 18 graph. bibliogr.
- SOURDAT (M). — 1970 — Sur deux témoins des épandages continentaux pliocènes et de la topographie fini-tertiaire sur les plateaux karstiques de la région de Tuléar. *ORSTOM Tananarive*, multigr. 14 p. et *C.R. Sem. Géol. Tananarive*, Imp. Nat.
- SOURDAT (M). — 1971 — Carte pédologique au 1/100 000, Tuléar-Ambohimahavelona, feuille IGN CD 58, 1 feuille en couleur et notice explicative. *ORSTOM Tananarive*, à paraître.

RESUME

— Cette étude concerne le relief karstique des plateaux calcaires du Sud-Ouest de Madagascar, au Sud et au Nord du canyon de l'Onilahy. Les principaux éléments du relief karstique sont passés en revue (canyons, avens, réseau hydrographique souterrain, dolines, poljés, lapiaz et lapiés) ainsi que les conditions locales de la karstification, liées aux variations du niveau marin, des climats, à la nature des roches, et à l'existence d'une couverture meuble.

— L'accent est mis sur la distinction entre les formes d'érosion façonnées dans les calcaires au sein de la couverture meuble (lapiaz), et les ciselures façonnées à l'air libre (lapiés). D'épaisses formations de décalcification rubéfiées sont liées à des paléoclimats plus humides que le climat actuel ; cet « héritage » permet la continuation, sous ces sols épais, des processus évolutifs primordiaux aboutissant à la formation de lapiaz, dans une région où le climat actuel, trop sec, ne permettrait plus ni décalcification, ni rubéfaction des roches brutes.

SUMMARY

This essay deals with the Karst relief of the limestone plateaus in S. W. Madagascar, to the South and North of the Onilahy canyon.

The main characteristics of Karst relief are examined (canyons, ponore, underground drainage network, dolines, polja, lapiaz and lapiés) as well as the local conditions of Karstification which are linked to the variations of sea level, of climates, to the nature of the rocks, and to the existence of a loose top.

The essay emphasizes the distinction between the relief features due to erosion in limestone where there is a covering of loose surface soil (lapiaz) and in cases of direct exposure (lapiés). Thick reddened formations of carbonation-solution were linked to palaeoclimates more humid than the present day climate : this « heritage » allows the continuation, under this thick surface soil, of primordial évolutive processes, which results in the formation of lapiaz in a region where the too dry climate now prevailing would permit neither carbonation nor rubefaction of unweathered rocks.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Untersuchung befaßt sich mit dem Karstrelief der Kalkplateaus südlich und nördlich des Onilahy-Kastentals in SW Madagaskar. Die wichtigsten Elemente im Formenschatz des Karstrelief (Kastental, Karstschlote, unterirdisches Entwässerungsnetz, Dolinen, Poljen, « lapiaz », « lapiés » Karren) sowie die örtlichen Bedingungen der Verkarstung, die an die Schwankungen des Meeresspiegels, des Klimas, an die Art der Gesteine und an das Vorhandensein einer lockeren Deckschicht gebunden sind, werden genau untersucht.

Der Schwerpunkt wird auf die Unterscheidung von Abtragungsformen gelegt, die sich auf bedecktem Kalkstein (lapiaz) und unbedecktem Kalkstein herausgebildet haben. Entkalkte, rubefizierte Deckmassen von größerer Mächtigkeit sind an Paläoklimate gebunden, die feuchter als das heutige Klima waren ; dieses « Erbe » an tiefgründigen Böden ermöglicht die Fortsetzung der ursprünglichen Entwicklungsprozesse, die zur Bildung der « lapiaz » in einem Gebiet führen, dessen heutiges Klima zu trocken ist und somit weder eine Entkalkung der Böden noch eine Rubefizierung der Gesteine ermöglichen würde.

RESUMEN

Este estudio concierne el relieve Karstico de la mesetas calcareas del sudoeste de Madagascar, al sur y al norte del cañon del Onilahy. Se pasa revista a los principales elementos del relieve Kárstico (cañones, chimeneas, red hidrografica subterranea, dolinas, « poliés », « lapiaz » y « lapiés ») así como a las condiciones locales de la Karstificacion, relacionadas con las variaciones del nivel maritimo, de los climas, con la naturaleza de los rocas, y con la existencia de una capa de tierra muelle.

Se insiste especialmente en la distinción entre las formas de erosión producidas en las calizas dentro de la capa de tierra muelle (lapiaz) y los cortes producidos al aire libre (« lapiés »).

Espesas formaciones de descalcificacion rubificadas estan relacionadas con los climas paleoliticos más humedos que el clima actual : esta « herencia » permite la continuación, bajo esos suelos espesos, de los procesos evolutivos primordiales que desembocan en la formacion de los « lapiaz », en una region cuyo clima actual, demasiado seco ya no permitiría la descalcificacion ni la rubificacion de las rocas brutas.