

ASPECTS MORPHOLOGIQUES DU KARST DE NARINDA

par

G. ROSSI

La région de la baie de Narinda est située sur la côte Ouest de Madagascar, au Nord de Majunga, entre 14°40' et 15°30' de latitude Sud. C'est dans cette zone que R. Battistini (1965) a signalé l'existence d'un karst formant, sur le littoral, des pointes et des micro-falaises (Fig. 1).

Partant de cette observation, nous avons effectué depuis 1972 diverses reconnaissances (G. Rossi, 1974) qui nous ont amené à identifier et à étudier un ensemble karstique d'une grande richesse.

En effet, sur 150 km de long et sur une largeur moyenne de 15 km, on rencontre les deux principaux types de karsts tropicaux à buttes : kuppenkarst et mogotes et, fait particulièrement intéressant, de nombreuses formes de transition entre les divers types.

L'aspect général de la région est celui d'un plan incliné vers l'Ouest conformément au pendage des séries sédimentaires. Cet aspect de plan incliné est renforcé par l'existence d'une surface de remblaiement (sables roux) qui, à la fin du tertiaire, a fossilisé les points bas du relief. Cette surface est actuellement très disséquée et il n'en subsiste le plus souvent que des lambeaux formant des fragments de plateaux boisés aux rebords raides et indentés. Ailleurs, les paléoreliefs sont le plus souvent exhumés, sauf dans le Komajara, extrême pointe de la presqu'île de Narinda, où l'exhumation est incomplète.

I. — LES PRINCIPAUX ASPECTS DU MODELE

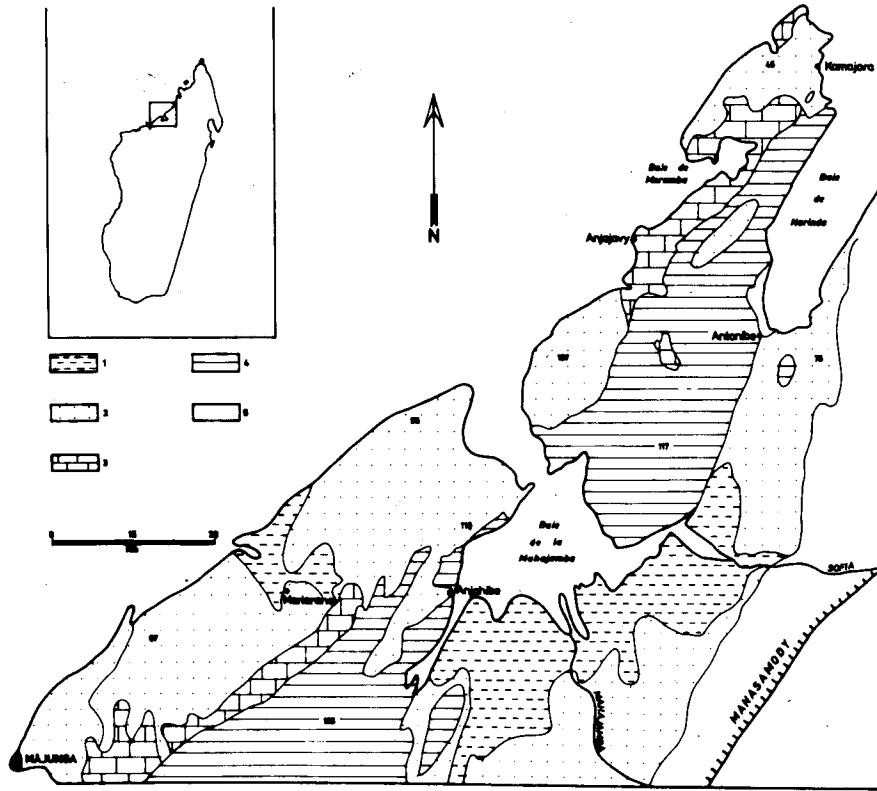
On observe dans la région deux grands types de paysages karstiques : le kuppenkarst de Mariarano et les mogotes d'Antonjbe et du Komajara.

A) *Les Kuppen de Mariarano*

Dans la région de Mariarano (45 km au Nord de Majunga), le paysage est celui d'une succession de croupes de 20 à 40 m de hauteur disposées sans aucun ordre apparent (Photo 1).

Le profil type d'une croupe est convexe avec des versants en pente assez forte à la base (15 à 20°) diminuant vers le sommet qui est souvent plat (Photo 2).

Mais on observe de nombreuses variantes en fonction de la hauteur de la butte et de la pente des versants ; dans le détail, on a ainsi toutes les formes de transition entre un cône presque parfait et une coupole surbaissée (Fig. 2).



Les ensembles géologiques de la région de Narinda.

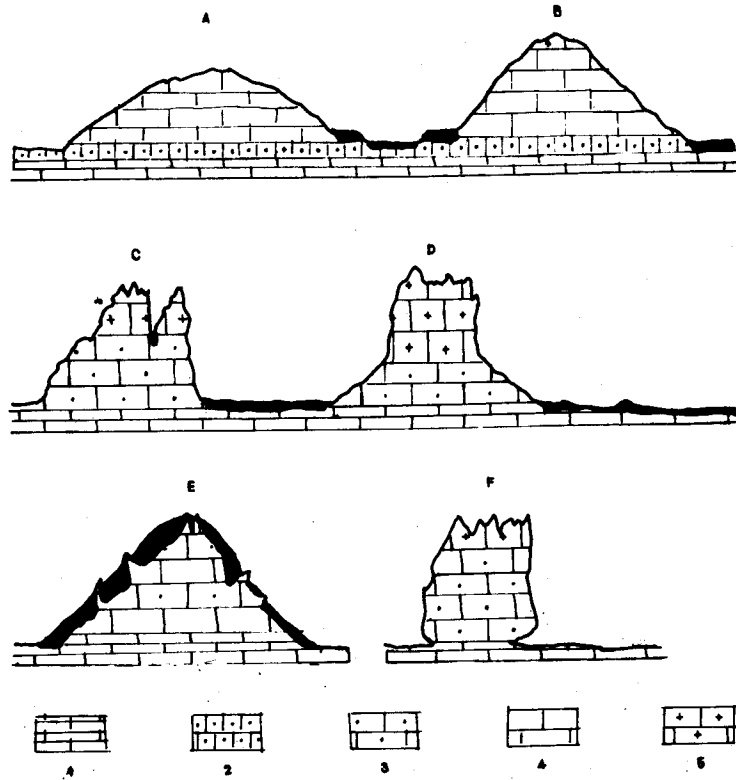


Fig. 2. - Principaux types de buttes. - 1. Calcaires purs de la base du karst. - 2. Dolomie calcaire. - 3. Calcaire dolomitique. - 4. Dolomie. - 5. Calcaires massifs. En noir : argiles de décalcification parfois mélangées à des sables roux. A et B : coupole et cône de la région de Marianano. C et D : deux types de mogotes caractéristiques du karst d'Antonibe. E : mogote enfoui sous les argiles (Kornajara). F : tour formée par dissolution au niveau de la nappe d'inondation.

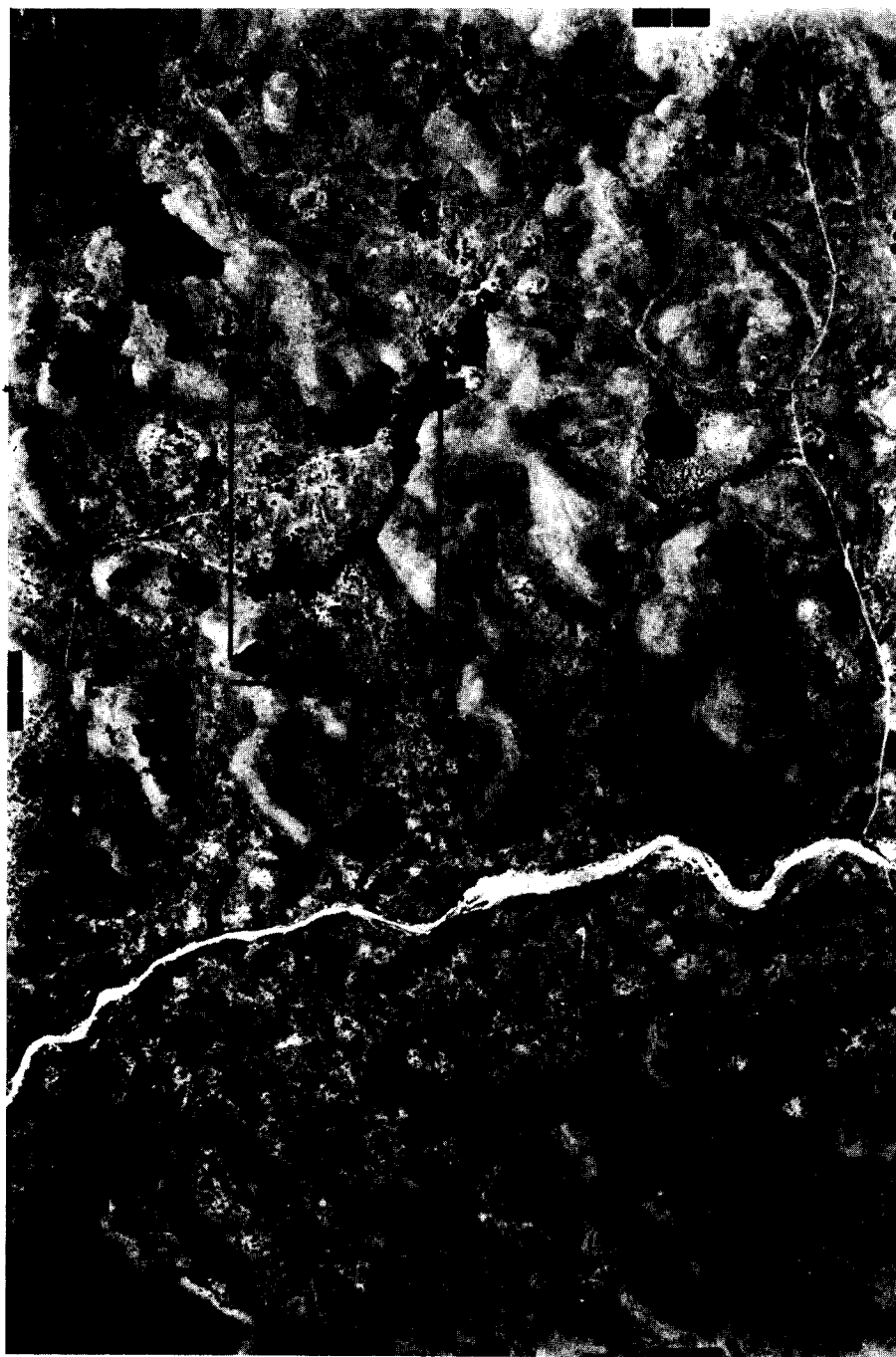


Photo 1. — *Le Kuppenkarst de Mariarano.*
Cliché I.G.N. au 1/25 000^e.
Encadré : secteur photographié sur le cliché 2.



Photo 2. — Buttes du Kuppenkarst de Marianano. Savane à *Médémia Nobilis*.



Souvent, les individus sont disposés en groupes de quelques unités, mal séparés les uns des autres par des cols plus ou moins marqués.

Pour les buttes les plus hautes, on note que les sommets plats sont d'altitude subégale. En outre, elles sont parfois surmontées de chicots lapiézés. Ceux-ci se reconnaissent très facilement car ils portent des bosquets de forêt sèche dans laquelle se rencontrent des espèces nettement xérophiles (*Pachypodium*, *Euphorbes*), tandis que les versants des buttes sont toujours recouverts d'une savane pyrophile à *Aristida* et *Hétéropogon*. Dans ce cas, les versants sont en pente plus forte que lorsque ce « chapeau » a disparu (Photo 3).



Photo 3. — Chicots lapiézés au sommet d'une butte.

Photo 4. — Pellicule d'éboulis sur les versants des buttes.



Dans tous les cas, les versants sont recouverts d'une pellicule d'éboulis provenant du démantèlement des bancs de calcaire qui constituent les buttes. Sous cette pellicule d'éboulis affleure la roche en place dont les anfractuosités et les fissures sont remplies d'argiles de décalcification (Photo 4).

Entre les buttes, le plancher constitué d'argiles sableuses rouges ou ocre est pratiquement plat. Le raccord avec les versants forme un angle net et n'est jamais colluvionné. Ce plancher est accidenté de dolines sub-circulaires de quelques dizaines de mètres de diamètre et de 3 à 5 m de profondeur. Sur leurs bords, le calcaire en place affleure et leur fond est colmaté par des argiles de décalcification noires ou grises, résultat d'une évolution par hydromorphie. Les dolines de petite taille ne sont inondées qu'en saison des pluies, les plus grandes conservent une nappe d'eau durant toute l'année. Tout autour de ces dolines se sont formées des croûtes siliceuses de plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur. Dans certains cas, ces croûtes sont discontinues et se réduisent à des blocs dont le volume excède parfois le mètre cube. Ces dépressions se repèrent aisément ; plus humides que les zones environnantes, elles entretiennent des peuplements très denses de *Médémia Nobilis*.

La région est parcourue par un réseau hydrographique mal organisé. De nombreux vallons secs en saison sèche viennent se terminer dans les dolines ; parfois se succèdent des tronçons à écoulement aérien et des tronçons à écoulement souterrain et seuls les éléments principaux, l'Ambondro et la Mariarano, ont écoulement permanent et entièrement aérien.

En direction du Sud, les buttes disparaissent peu à peu du paysage et l'on observe plus qu'un plateau monotone, doucement vallonné parsemé çà et là de petites dépressions fermées.

Vers le Nord, en direction de la baie de la Mahajamba, le paysage de Kuppen est moins apparent ; il est peu à peu remplacé par des buttes formées par les calcaires à lapiés. Alors qu'à Mariarano, les grottes sont inexistantes, les buttes de la Mahajamba sont percées de cavités parmi lesquelles les grottes d'Anjohibe (J. de Saint-Ours et R. Paulian, 1953) connues pour la beauté et la variété des concrétions. Les galeries forment un réseau anastomosé à faible profondeur sous la surface et on peut les rejoindre par de nombreux puits.

B) *Les mogotes d'Antonibe et du Komajara*

Entre la baie de la Mahajamba et la baie de Narinda s'observe une variété de formes quelque peu déconcertante. On trouve ainsi des cônes, des mogotes, des tours et parfois on passe de l'un à l'autre en quelques centaines de mètres. De plus, il existe de nombreuses formes de transition entre les types principaux.

Le paysage le plus fréquent est celui des mogotes. Il s'agit de buttes de 20 à 60 m de hauteur aux versants subverticaux ou en très forte pente. Leur diamètre varie de quelques dizaines à 200 ou 300 m (Photo 5).

Dans le cas des parois subverticales, celles-ci sont cannelées, entaillées par des lapiés et présentent des abris sous roche et des surplombs. Le raccord avec le plancher se fait à angle droit et fréquemment on observe des encoches basales du type fuschohle. Des stalactites et des enduits calcitiques les empâ-

tent. Par exagération de la hauteur des mogotes, on passe à un véritable turmkarst. Ce type ne s'observe que là où la nappe d'inondation saisonnière ou permanente baigne le pied des reliefs (Photo 6).

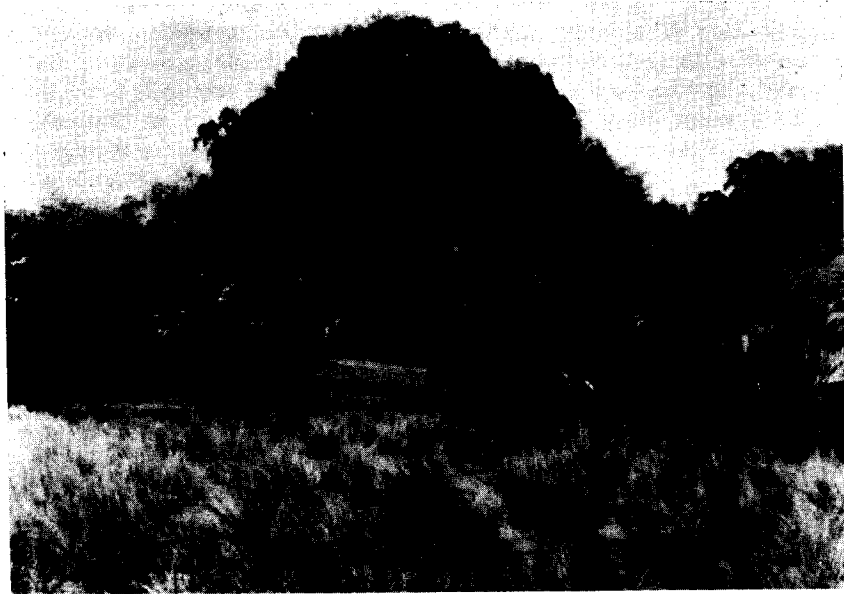


Photo 5. — *Mogote, région d'Antonibe. Savane à Hyphaen shatan.*



Photo 6. — *Mogotes passant à des tours par dissolution au niveau de la nappe d'inondation.*

Parfois, la base du mogote est formée par un talus en forte pente, irrégulier, avec mise en relief des bancs les moins sensibles à la dissolution. Comme à Mariarano, il est alors couvert d'éboulis et son raccord avec le plancher se fait suivant un angle ouvert. Les hauteurs respectives du talus et de la partie supérieure subverticale sont très variables. Dans quelques cas, le talus atteint presque le sommet et n'est surmonté que par des chicots ruiniformes ; on a alors une forme en cône plus ou moins régulier.

Dans tous les cas, la partie sommitale est lapiézée, entaillée par de nombreuses fissures verticales ouvertes, percée de puits qui donnent parfois accès à des grottes peu développées. Les fractures ouvertes les plus importantes donnent des couloirs de quelques mètres de large qui entaillent profondément le mogote, parfois jusqu'à la base.

L'évolution se fait par mise en porte à faux et éboulements successifs. On trouve souvent au pied des buttes des blocs éboulés, certains atteignant plusieurs dizaines de mètres cubes. Ce type d'évolution est particulièrement rapide dans le cas où la nappe d'inondation baigne le pied des mogotes.

Certains mogotes sont partiellement enfouis sous des résidus de décalcification et l'on a alors une colline de terre rouge brique du sommet de laquelle émergent des chicots ruiniformes, tandis que sur les versants le calcaire affleure parfois.

Enfin, il existe tous les termes de l'évolution entre la tour de plus de 60 m de commandement et le chaos de blocs résiduels emballés dans des argiles et formant un monticule de quelques mètres de hauteur, sorte de hum au milieu d'une dépression.

Les mogotes existent sous forme d'individus isolés souvent groupés en essaims ou sous forme de petits massifs dans lesquels l'individualisation est incomplète, des cols situés à différents niveaux séparant les buttes les unes des autres.

Les mogotes sont particulièrement bien développés au Sud de l'embouchure de l'Antsangabe et dans la plaine d'Amboaboaka. Au Nord de l'embouchure, l'alignement des couloirs principaux le long des fractures a pour corollaire l'alignement des mogotes suivant quelques directions préférentielles et l'on observe une topographie comparable à celle du karst chenillé décrit à la Guadeloupe par A. Lasserre ou aux pépinos de Porto-Rico.

Au Nord de l'Ambondro Ampasy, les orientations des couloirs ont tendance à disparaître et l'on a une topographie très confuse de mogotes ou groupes de mogotes isolés par des dépressions en ruelles tortueuses du type karstgassen, l'ensemble donnant un paysage chaotique de « karst labyrinthe ».

A plusieurs reprises (Est Anjavy, Ouest Sarodrano), les karstgassen disparaissent ou se réduisent à des séries de dépressions fermées ; le paysage est celui d'un plateau défoncé par des dolines en entonnoir et par des ouvalas, du type Cockpict Country à la Jamaïque (M.M. Sweeting, 1958).

Dans la presqu'île du Komajara, de nombreux mogotes sont entièrement noyés dans les résidus de décalcification. La forme est alors celle d'un tronc de

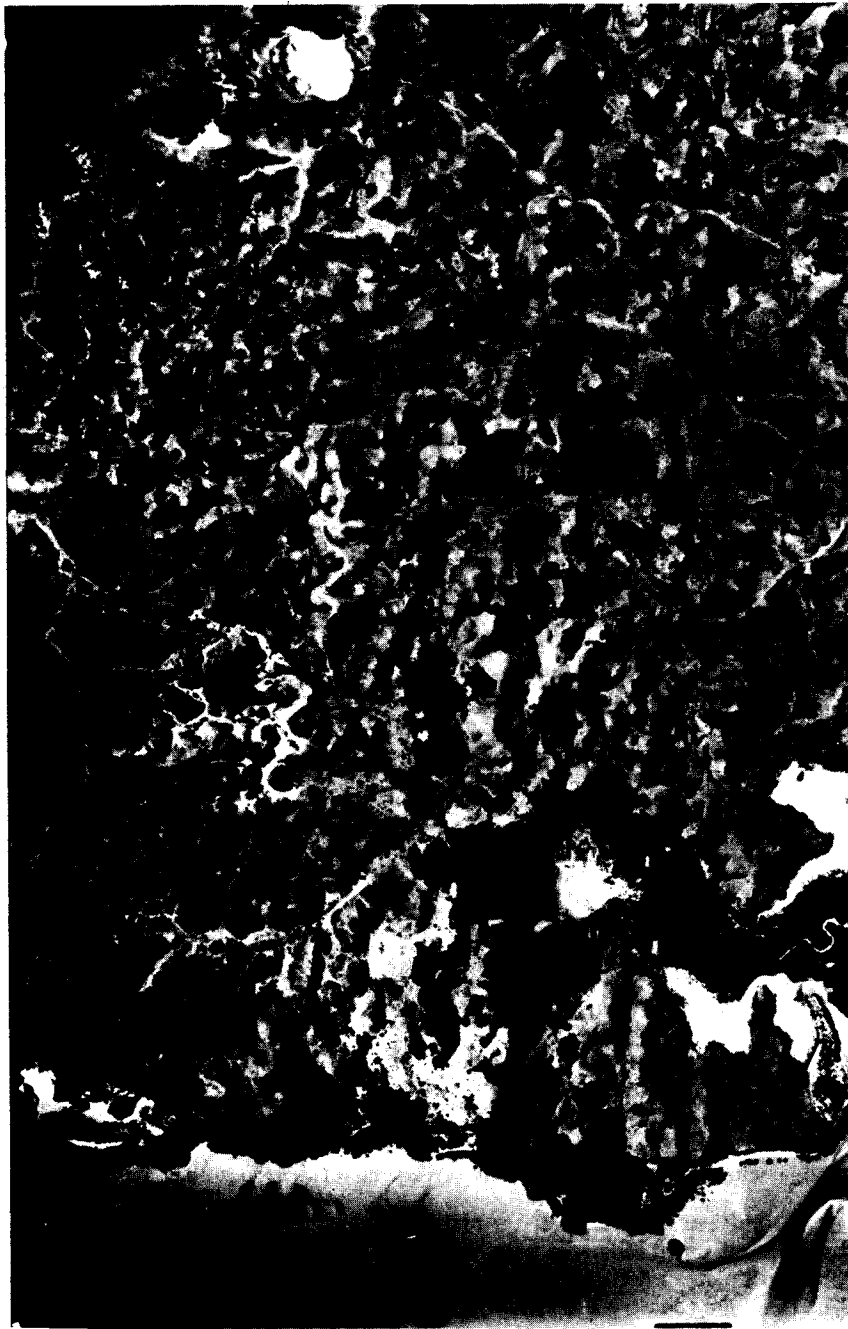


Photo 7. — *Le Kegelkarst de la baie de Moramba.*



Photo 8. — *Les mogotes de la baie de Moramba.*

cône plus ou moins régulier et le calcaire n'affleure plus que rarement au sommet ou sur les versants. C'est ce paysage de pseudo-Kegelkarst que l'on observe à l'Est de la baie de Moramba (Photo 7).

Localement, il semble que le karst ait été également fossilisé sous les épandages sableux, de la surface fini-tertiaire. En effet, dans l'Est de la presqu'île on observe des fragments de plateaux formés de sables argileux ou d'argiles sableuses. On pourrait penser qu'il s'agit de résidus de décalcification des calcaires, mais la présence de nombreux petits galets de quartz et de graviers ferrugineux oblige à admettre l'existence d'épandages. Or, les seuls affleurements qui ont pu fournir ces galets se trouvent 15 km à l'Est, de l'autre côté de la baie de Narinda. Il faudrait donc admettre que celle-ci résulte d'un effondrement pliocène ou peut-être même quaternaire. Quoi qu'il en soit, les argiles sableuses qui fossilisent le karst dans l'Est du Komajara sont en partie d'origine allochtone.

Sur la côte, les mogotes arrivent au niveau de la mer et, comme l'a écrit R. Battistini, donnent les caps et les falaises du littoral et les îlots de la baie de Moramba dont la profondeur n'excède pas 5 à 6 mètres (Photo 8).

Entre les massifs de buttes, le plancher à peu près plat est formé par les résidus de décalcification ; il est accidenté de dolines peu marquées dont les plus grandes gardent une nappe d'eau durant toute la saison sèche. Mais on observe aussi de véritables poljés de plusieurs centaines de mètres de diamètre qui entourent de petits groupes de mogotes. Le plus important se trouve de part et d'autre de l'Antsangabe, dans la région d'Amboaboaka. Transformé en plaine rizicole de 5 km de longueur sur 3 km de largeur moyenne, il y subsiste quelques mogotes résiduels. Il s'agit là d'une plaine de corrosion karstique développée aux dépens du massif calcaire qui borde la plaine au Nord et au Sud. Son évolution privilégiée est liée à l'existence de la rivière, niveau de base local,



Photo 9. — *La plaine de corrosion d'Amboaboaka. Argiles colmatant le fond des dolines.*

qui entraîne la submersion de toute la plaine en saison des pluies et permet l'exportation rapide des substances dissoutes. Autour de ces différentes dépressions, il est fréquent d'observer des cuirasses ferrugineuses liées au battement de la nappe. Leur fond est colmaté par les sols argileux hydromorphes, mais le calcaire lapiézé affleure souvent à travers les argiles (Photo 9).

Il existe dans la région d'Antonibe un réseau hydrographique aérien hiérarchisé qui provient des régions marneuses et sableuses situées plus à l'Est. Les différents éléments se réunissent dans la plaine d'Amboaboaka pour former l'Antsangabe. Mais il faut remarquer qu'il n'existe dans le karst lui-même que de courts vallons secs venant se perdre dans des dépressions fermées dont certaines sont de véritables puits de quelques dizaines de mètres de diamètre qui contiennent de l'eau toute l'année (Est Anjajavy, Bejabora).

Ces observations sont valables également pour l'Est du Komajara ; tandis que l'Ouest de la presqu'île est parsemé d'étangs situés au niveau de la mer. Celle-ci a envahi lors du maximum transgressif flandrien des dépressions côtières qui donnent aujourd'hui jusqu'à plusieurs kilomètres dans l'intérieur de vastes étendues de marécages aux eaux plus ou moins saumâtres (présence de palétuviers) débouchant sur la mer par un chenal de marée encombré par la mangrove. Ces dépressions forment la plaine marécageuse de l'Amborona (30 km²) au milieu de laquelle s'élèvent plusieurs mogotes résiduels ; elle peut s'interpréter comme une ancienne baie peu profonde peu à peu colmatée à la fois par des apports fluviaux et marins (Photo 10).



Photo 10. — Mogotes au milieu de l'ancienne baie d'Amborona.

Au Sud de l'Amborona, les étangs correspondent à l'affleurement de la nappe dans les espaces compris entre les mogotes plus ou moins fossilisés par les épandages et les résidus de décalcification. C'est ainsi qu'au centre du plus important d'entre eux, le lac Masiloka (6 km²) s'élève un îlot de 30 m de hauteur formé par un groupe de mogotes.

Dans toute la région, les véritables grottes sont peu nombreuses. Dans la majorité des cas, il s'agit de simples porches de quelques mètres de longueur. Cependant, de véritables grottes s'ouvrent dans les mogotes à l'Ouest d'Amboaboaka. Les plus accessibles sont celles d'Ambalatsingy, 25 km au Nord d'Antonibe. Ce sont des galeries hémi-circulaires de petite taille (une dizaine de mètres de diamètre au maximum) qui se ramifient rapidement en plusieurs couloirs dont la plupart se réduisent vite à de simples fractures ouvertes. Les salles d'entrée sont encombrées de concrétions avec, en particulier, de très belles séries de vasques étagées (Photo 11).



Photo 11. — *La grotte d'Ambalatsingy.*

En résumé, de Majunga à Narinda, on observe le passage progressif d'un paysage de Kuppenkarst dominant au Sud de la Mahajamba à un karst à mogotes et à cônes qui donne entre la Mahajamba et Narinda des paysages très variés. En fait, en 150 km sont réunis pratiquement tous les types de karst tropicaux à buttes.

Cette extraordinaire variété s'explique essentiellement par les conditions structurales.

II. — LES FORMES ET LA STRUCTURE

A) *Les données géologiques*

La région de Narinda appartient au Nord du bassin sédimentaire de Majunga. On y observe une succession de terrains de plus en plus récents vers l'Ouest en direction du Canal de Mozambique. Ils sont affectés d'un pendage Ouest faible. Dans le Crétacé sédimentaire sont interstratifiés des épanchements basaltiques rapportés au Turonien.

Au Nord de la Mahajamba, la base du karst est formée par des calcaires marneux, des marnes crayeuses du Maestrichien-Danien et par des calcaires crayeux paléocènes.

Le karst lui-même correspond à l'affleurement des calcaires éocènes (Ypresien et Lutétien). Mais dans cette série, les variations de faciès et d'épaisseur sont très nombreuses. On a des alternances de calcaires divers : cristallins, dolomitiques, gréseux parfois un peu marneux, bancs de dolomie et de marnocalcaires. L'épaisseur totale de la série est en moyenne de 130-140 m, son pendage vers l'Ouest est de l'ordre de 2° à 3°.

Au Sud de la Mahajamba, le plancher du karst est formé par le Danien marneux passant vers le haut à des marnes crayeuses puis à des calcaires crayeux.

C'est dans le Paléocène et l'Ypresien que s'est développé le karst lui-même. Il s'agit de calcaires variés et de dolomies dont la puissance moyenne est d'une centaine de mètres.

B) *La tectonique*

Le schéma tectonique de la région fait intervenir, dans ses grandes lignes, deux directions principales.

D'une part, la direction de subsidence N. 30° à 45° E. C'est la direction de l'importante flexure qui oriente la côte depuis Majunga jusqu'à Narinda. C'est aussi la direction des côtes Ouest et Est de la baie de Narinda qui correspondent selon nous à des escarpements de failles qui se poursuivent jusqu'à la baie de la Mahajamba (escarpements de Manara et de Mahadroka). C'est enfin plus à l'Est la direction des escarpements du Manasamody et du Bongolava qui dominent la dépression périphérique sur 180 km entre Ambondromamy et Antsohihy.

D'autre part, la direction N. 30° W. à 45° W. perpendiculaire à la direction de subsidence et que l'on peut interpréter comme celle des fractures de réajustement. Interférant avec la direction de subsidence, elle donne le caractéristique tracé en escalier de la côte Ouest de la baie de Narinda, ainsi que des escarpements du Manasamody et du Bongolava.

Ces deux directions déterminent donc un étroit quadrillage de fractures dont le rejeu récent peut être mis en évidence.

Nous avons déjà évoqué le problème des épandages à galets de quartz du Komajara. La seule zone d'alimentation possible étant située de l'autre côté de la baie, il faut admettre que l'effondrement dont elle résulte est postérieur aux épandages qui correspondent à la surface de remblaiement fini-tertiaire.

Mais nous avons une autre preuve du rejeu récent de ce système de fractures dans le Manasamody. Toute cette région était considérée jusqu'ici comme étant formée de basaltes turoniens, mais nous y avons découvert en 1972 un volcanisme quaternaire couvrant près de 500 km², caractérisé par des cônes stromboliens, des pointements basaltiques et par un système de dykes recou-



pant les basaltes créacés altérés (G. Rossi, 1975). Le système fissural a donné de vastes galettes basaltiques très peu altérées. En certains points, il s'agit de surfaces de coulées originelles, régulièrement prismées, sans sol d'altération notable (Photo 12).



Photo 12. — *Pustules volcaniques sur le Manasamody.*

Les lignes directrices de ce volcanisme sont la direction de l'escarpement du Manasamody N. 30° W. à Nord et la direction N. 30° E. à N. 45° E. qui détermine en outre une série de grabens et de horsts perpendiculaires à l'escarpement.

Ces phénomènes sont la preuve indiscutable d'une importante activité tectonique au cours du Quaternaire.

C) *Les relations du karst et de la structure*

Afin d'étudier les rapports entre les formes et les types de roches, nous avons prélevé systématiquement des échantillons à différents niveaux des buttes. Nous disposons ainsi de 44 analyses qui permettent d'entrevoir ces relations.

Le Kuppen de Mariarano présente la structure la plus simple. Le plancher du karst sur lequel coulent les rivières est formé de calcaire franc (99,1 % de CaCO_3 + 0,9 % de résidu insoluble argileux) massif, à grain très fin, homogène. Sa porosité est assez élevée : 15,8 %.

Ces calcaires sont surmontés de bancs de dolomie calcaire (62,1 % CaCO_3 + 30,2 % MgCO_3) dans lesquels se sont développées les dolines. Le résidu insoluble est essentiellement siliceux. La porosité est voisine de 5 %.

Les coupoles correspondent à des dolomies (56,4 % CaCO_3 , 40,2 % MgCO_3) dont la porosité est très élevée : 27,5 %.

Enfin, les chicots lapiézés qui coiffent les buttes sont formés de calcaires légèrement dolomitiques (76 % CaCO_3 + 18,6 % MgCO_3 ; résidu insoluble siliceux 5,4 %) dont la porosité est faible : 3,4 %.

Quant aux buttes lapiézées dans lesquelles s'ouvrent les grottes d'Anjohibe, il s'agit de dolomies plus ou moins calcaires (62 % CaCO_3 , 37 % MgCO_3) de faible porosité : 3,3 %.

Les coupes effectuées sur les mogotes d'Antonibe donnent des résultats comparables.

La base du karst auquel correspondent les plaines de corrosion et les planchers lapiézés, est formée de calcaires très purs (98 % au moins de CaCO_3) sans trace de dolomie, avec un résidu insoluble siliceux. Les porosités sont assez variables, allant de 1 % à 3 % dans le cas des plaines de corrosion jusqu'à 8 % — 10 % dans le cas des planchers à dolines.

La partie supérieure des mogotes correspond à des dolomies calcaires et à des dolomies (de 55 à 67 % de CaCO_3 et de 31 à 40 % de MgCO_3). Les mogotes d'Ambalatsingy sont constitués de dolomie pure : 54 % CaCO_3 , 45,3 % MgCO_3 . La porosité est fonction du faciès de la roche. Ainsi, les dolomies d'aspect crayeux d'Ambalatsingy ont une porosité très élevée (37 %), tandis que pour les dolomies calcaires massives de Moramba, celle-ci n'est que de 3,3%. La première roche donne un versant en pente modérée couverte d'éboulis, la seconde une paroi irrégulière.

La partie sommitale subverticale, lapiézée des mogotes est constituée par des calcaires francs (toujours plus de 99 % de CaCO_3) compacts, dans lesquels la dolomie est absente. Leur porosité est de l'ordre de 5 %.

En résumé, il semble que les formes en coupoles ou en tronc de cône soient liées à des dolomies ou dolomies calcaires d'aspect crayeux, poreuses ou très poreuses, tandis que les mogotes à parois subverticales et les chicots lapiézés qui coiffent les buttes correspondent à des calcaires ou dolomies calcaires compacts, peu ou très peu poreux.

Dans ce cas, il est net que l'apparition des divers types de formes est étroitement dépendante de la sédimentation et, en particulier, des conditions de la dolomitisation, processus d'intensité variable dans le temps et dans l'espace. C'est ainsi que l'on peut expliquer le passage rapide d'une forme à l'autre et la grande variété des formes de transition observées. J. Nicod (1971), dans une importante note consacrée à la dissolution des dolomies, a déjà attiré l'attention sur ce problème et ses conséquences morphologiques.

Outre l'existence de bancs de calcaires francs au-dessus des dolomies, un caractère constant est l'apparition de croûtes au sommet des buttes. A Mariano, on observe dans les bancs sommitaux lapiézés une structure vacuolaire avec des amas de calcite recristallisée. A Antonibe, ce sont de véritables carapaces de plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur formée de couches

successives de calcite recristallisée qui recouvrent la partie sommitale des mogotes. Parfois, deux couches de calcite prennent en « sandwich » une croûte brechoïde ferrugineuse de quelques centimètres d'épaisseur.

A l'échelle des massifs calcaires, les influences tectoniques apparaissent nettement sur les photographies aériennes. Dans la région comprise entre Antonibe et la baie de Moramba, c'est-à-dire du karst chenillé et du karst labyrinthe, les Karstgassen adoptent surtout les deux directions principales de failles, mais on peut distinguer aussi, subordonnée, l'influence de la direction méridienne. Ailleurs, c'est-à-dire aussi bien dans la région du cockpit au Sud de l'Antsan-gabe, que dans le Komajara ou à Mariarano, aucune orientation préférentielle des dépressions ou des buttes ne peut être mise en évidence.

A l'échelle des buttes, l'influence des diaclases verticales apparaît nettement dans les calcaires ; c'est suivant ce réseau de fractures que le sommet du mogote est découpé. De la même façon, les joints de stratification sont mis en valeur, beaucoup moins toutefois que dans les calcaires cristallins de l'Ankarana (G. Rossi, 1973). Mais dans les dolomies, il est difficile de repérer une quelconque influence des diaclases et d'observer le dégagement de joints de stratification qui, souvent, n'existent pas.

III. — L'EVOLUTION DU MODELE

A) *Les facteurs structuraux de la genèse et de l'évolution des formes*

Dans le cas du karst de Narinda, l'apparition des différents types de mogotes et leur localisation est directement liée aux variations de la lithologie, elle-même conséquence du caractère irrégulier de la sédimentation et de la dolomitisation.

La direction et la densité des fractures déterminent les lignes suivant lesquelles la dissolution va progresser de façon préférentielle, en donnant les karstgassen. Mais toutes les dépressions ne sont pas alignées sur les fractures, beaucoup paraissent correspondre à la mise en creux de zones lithologiquement plus sensibles à la dissolution. C'est un phénomène du même ordre qui a été observé en Indonésie par Th. Verstappen (1969).

La porosité intervient également. Ainsi, les calcaires peu poreux (1 à 2 %) donnent des lapiés et des parois, les dolomies compactes de faible porosité (5 à 10 %) donnent des versants subverticaux ou en forte pente et c'est dans les dolomies pulvérulentes très poreuses (20-40 %) qu'apparaissent les coupoles.

La présence de bancs calcaires au sommet des buttes est un facteur important d'explication des formes. En effet, ces calcaires purs se montrent moins sensibles à la dissolution que les dolomies sous-jacentes et, à Mariarano, tant que subsiste au sommet des buttes un « chapeau » de calcaire, les versants dolomitiques restent raides et reculent parallèlement à eux-mêmes. On a alors un cône. Ce n'est que lorsque ce « chapeau » a disparu que les versants s'abaissent et que l'on obtient une forme en coupole plus ou moins surbaissée.

De la même façon, la présence au sommet des mogotes de croûtes de calcite recristallisée nous semble jouer, toute proportion gardée, le même rôle. En effet, là où ces croûtes existent les reliefs sous-jacents paraissent protégés et forment des pinacles. Mais elles ne sont pas assez continues pour intervenir dans la protection de l'ensemble du mogote (Photo 13).

Une fois le plancher du karst atteint par des dépressions linéaires ou subcirculaires, l'évolution se fait par dissolution à la base du versant au niveau de la nappe d'inondation et éboulement, mais aussi par dissolution à partir du sommet avec élargissement des fissures, formation de cavités, éboulements. Il y a donc non seulement recul des versants, mais aussi réduction de la hauteur et du volume interne. Le terme de l'évolution étant un chaos de bloc de quelques mètres de haut tel que nous en avons observé à plusieurs reprises dans la plaine de corrosion d'Amboaboaka.

Au total, du point de vue structural, l'apparition du Kuppenkarst de Mariarano est due à l'existence d'une série dolomitique homogène reposant sur un niveau imperméable et recouverte par des bancs de calcaires très purs et compacts. Les mogotes d'Antonibe et leurs différentes formes sont essentiellement dues aux nombreuses et importantes variations latérales et verticales de faciès à l'intérieur d'une série à tendance dolomitique reposant sur des calcaires massifs imperméables, ainsi qu'à l'existence d'une trame tectonique dense.

Le rôle de la structure dans la détermination du type de relief paraît donc fondamental ; il n'en reste pas moins qu'il s'agit de reliefs d'érosion différentielle et que le rôle de la dissolution est tout aussi important.

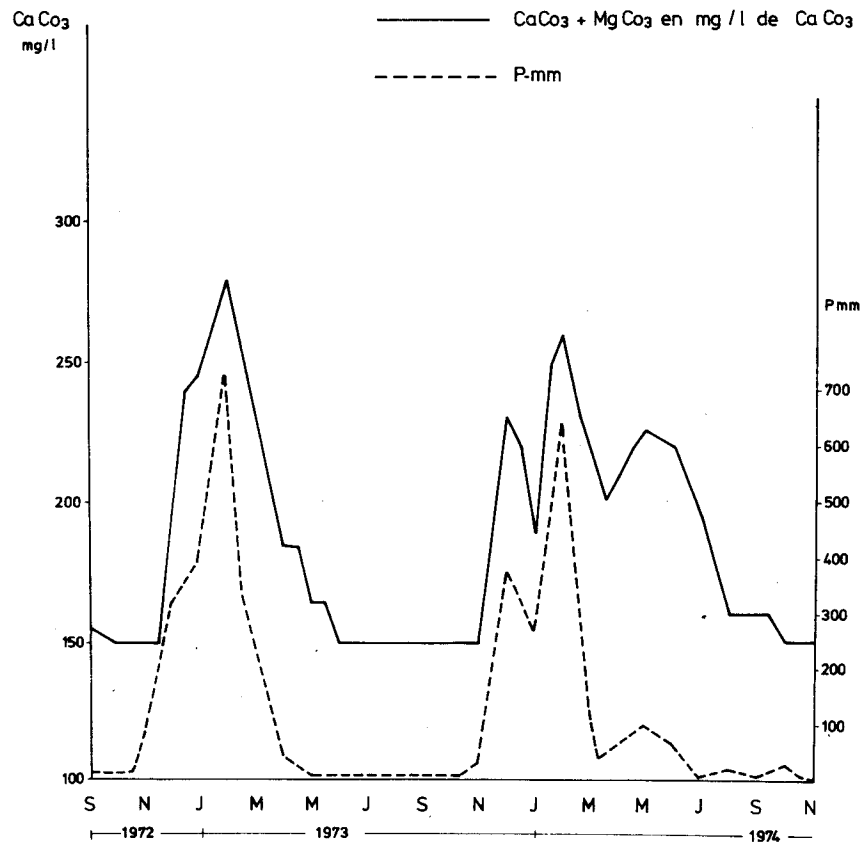
B) *L'importance de la dissolution sous climat tropical*

L'importance de la dissolution des calcaires sous climat tropical fait toujours l'objet de discussions. Pour essayer d'y voir plus clair, nous effectuons tous les 15 jours depuis deux ans des prélèvements sur une résurgence du karst de l'Ankarana, 200 km au nord de Narinda.

Les carbonates (calcium et magnésium) ont été déterminés par complexométrie (EDTA).

Les résultats apportent d'intéressantes précisions. Ce qui frappe en premier lieu, c'est la différence de teneurs entre saison des pluies et saison sèche. Contrairement aux théories admises, c'est en saison des pluies et non pas en saison sèche que s'observent les plus fortes concentrations. Il existe une relation directe entre les variations de la pluviométrie, c'est-à-dire du débit de la résurgence, et les variations des teneurs. Ce n'est pas à l'étiage mais en période de crue que les concentrations sont les plus fortes.

Or, c'est en se fondant uniquement sur des mesures de saison sèche que l'on a établi les valeurs absolues de la dissolution sous climat tropical. Les teneurs moyennes ayant été de ce fait sous-estimées, la valeur absolue théorique de la dissolution a été également minorée. Rappelons que ces valeurs, calculées par la formule de J. Corbel $m' = \frac{4 ET}{100}$, vont de 16 mm/millénaire pour le climat



Courbe de variation des teneurs en carbonates des eaux de l'Ankarana.



Photo 13. — *Croûte de calcite au sommet d'un mogote de la région d'Antonibe*

tropical à longue saison sèche du Yucatan (1 000 — 1 300 mm) (J. Corbel, 1959) à 99 mm/millénaire à Java (3 700 mm de précipitations) (N. Balazs, 1971). Calculée de la même façon, la valeur de la dissolution dans l'Ankarana (1 800 mm efficaces, 6 mois de saison sèche) est, sur l'ensemble des deux années, de 135 mm/millénaire. Mais si nous n'avions utilisé pour ces calculs que les teneurs moyennes de saison sèche, ce chiffre n'aurait plus été que de 95 mm/millénaire.

Un autre point à considérer est celui de la quantité mensuelle de précipitations. De mai à octobre, les précipitations sont insignifiantes ; il s'en suit que la quantité de calcaire dissout et exporté est pratiquement nulle durant la saison sèche car à de faibles teneurs s'ajoute l'absence d'eau disponible pour la karstification. Nos calculs indiquent que théoriquement 96 % du calcaire dissout l'est de novembre à avril ; en réalité, on peut considérer que cette proportion est de 100 % car les brèves pluies de saison sèche sont entièrement évaporées. C'est en saison des pluies, et à ce moment-là seulement, que s'exerce effectivement la dissolution.

Aussi, la formule de J. Corbel faisant intervenir les teneurs moyennes sur l'année et le total annuel de précipitations aboutit à minorer sensiblement la valeur de la dissolution. En fait, les résultats sont plus précis en calculant la tranche érodée pour chaque mois de saison des pluies à partir des teneurs moyennes mensuelles observées et de la tranche d'eau écoulée durant le mois considéré.

On obtient ainsi en moyenne 157 mm/millénaire pour les saisons des pluies 1972-73 et 1973-74. Statistiquement, ces résultats n'offrent pas grande valeur car il faudrait plusieurs dizaines d'années d'observations pour obtenir une valeur significative ; ils donnent cependant des indications précieuses.

La courbe fait également apparaître un phénomène de seuil. En effet, en saison sèche, les teneurs sont constantes et voisines de 150 mg/l. Ces teneurs correspondent à des périodes où la résurgence n'a qu'un écoulement très faible, ou nul.

Enfin, il existe un décalage dans le temps entre les variations de pluviométrie et les variations de même sens des teneurs. On peut considérer que ce décalage, particulièrement net au début et à la fin de la saison des pluies, correspond au retard avec lequel le débit de la résurgence enregistre les variations des précipitations.

CONCLUSION

L'étude du karst de Narinda permet d'entrevoir un aspect des relations complexes qui existent entre la nature des roches carbonatées et les familles de forme. Les influences structurales sont déterminantes, mais nos mesures montrent que l'importance de la dissolution n'est pas aussi réduite qu'on a pu le supposer.

Bien entendu, ces différents résultats demandent confirmation. D'autres travaux de terrain, d'autres analyses de laboratoire sont nécessaires pour préciser les rapports entre les formes et la structure. On ne peut exclure a priori l'hypothèse suivant laquelle la résurgence de l'Ankarana constituerait un cas particulier.

Ce sont ces différents éléments que nous avons entrepris de déterminer par l'étude systématique de quelques grands types de reliefs karstiques de l'Ouest malgache et par des séries de mesures sur d'autres résurgences.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BALAZS D. - 1971. — Intensity of the tropical karst development based on cases of Indonesia — *Karszt és Bãrlangkutãtãs*, Budapest.
- BATTISTINI R. - 1966. — Le littoral du Paléokarst de la presqu'île de Narinda — *Bull. A.G.F.* N° 346-347.
- CORBEL J. - 1959. — Karsts du Yucatan et de la Floride — *Bull. A.G.F.* N° 282-283.
- LASSERRE G. - 1961. — *La Guadeloupe, étude géographique* — Thèse.
- NICOD J. - 1971. — Quelques remarques sur la dissolution des dolomies — *Bull. A.G.F.*, N° 389-390.
- ROSSI G. - 1973. — Problèmes morphologiques du karst de l'Ankarana — *Revue de Géographie de Madagascar*, N° 23.
- ROSSI G. - 1974. — Note préliminaire sur le Kegelkarst de la presqu'île de Narinda — *Comm. Congrès Soc. Sav.*, Besançon.
- ROSSI G. - 1975. — Sur la découverte d'une nouvelle région de volcanisme quaternaire à Madagascar — *Bull. A.G.F.*, N° 426.
- SAINT-OURS J. de et PAULIAN R. - 1953. — Les grottes d'Andranoboka — Publications O.R.S.T.O.M., Tananarive.
- SWEETING M. - 1958. — The karst land of Jamaica — *Géogr. Jour.* Londres.
- VERSTAPPEN Th. - 1969. — The state of karst research in Indonesia — *Problems of the karst denudation*, Brno.

R E S U M E

L'auteur étudie les karsts tropicaux à buttes de la région de Narinda (Kuppenkarst, Kegelkarst, Mogotes) et les met en relation avec les différents types de roches rencontrées.

L'étude met en évidence d'étroites relations entre les formes et la lithologie elle-même, conséquence d'une sédimentation irrégulière. Les résultats de deux ans de mesures de teneurs en CaCO_3 sur une résurgence font apparaître que la dissolution sous climat tropical n'est pas aussi faible qu'on a pu le penser. Cela est dû essentiellement au fait que les teneurs augmentent considérablement en saison des pluies et que c'est en période de crue et non pas à l'étiage que s'observent les plus fortes concentrations en CaCO_3 .