

PREMIERS ÉLÉMENTS D'ÉVOLUTION KARSTIQUE SOUS CONTRÔLE TECTONIQUE D'UN MASSIF CALCAIRE : LA SERRA DO RAMALHO (BAHIA, BRÉSIL)

Ana Luisa Vietti BITENCOURT¹ & Joël RODET²

(10 figures)

1. Instituto Anchietano de Pesquisas – UNISINOS, Rua Brasil, 725 – CP. 275, 93001-970, São Leopoldo (RS), Brésil, bitencou.voy@terra.com.br
2. Morphodynamique Continentale et Côtière, UMR 6143 du CNRS, Laboratoire de Géologie, Université de Rouen, 76821 Mont Saint Aignan, France, joel.rodet@univ-rouen.fr

RESUME. La Serra do Ramalho présente un karst de climat tropical à saison sèche, se développant dans les calcaires et dolomies protérozoïques du Groupe Bambuí. Son installation et son évolution polyphasée sont contrôlées par le réseau tectonique et l'épirogenèse, qui commandent le niveau de base, le recul de la couverture péliito-gréseuse et la gradation des formes. On observe ainsi une évolution des formes, du lapiaz vers l'aven, de l'aven vers le canyon. Cependant, la réduction de la couverture péliito-gréseuse, qui joue le rôle de réservoir hydrique pour le massif, lui confère une taille trop réduite pour assurer un drainage pérenne du karst. Ceci entraîne une relative fossilisation des formes qui s'atténuent par éboulisation et colluvionnement. Bien que non datée, on peut envisager un âge anté-quaternaire pour cette évolution.

MOTS-CLES : contrôle tectonique, Domaine Bambuí, karst, Zone tropicale, Brésil central.

ABSTRACT. The principal elements in the tectonically-controlled karstic evolution of the Serra do Ramalho carbonate massif (Bahia, Brazil). The karst of the Serra do Ramalho massif is developed, under a tropical climate with a dry season, on the dolomite and limestone of the Proterozoic Bambuí Group. Its initiation and polyphased evolution are controlled by tectonics: the drainage alignments being determined by the structural pattern. Epirogenic movements have provided a periodicity to the erosion of the overlying pelitic sandstone formations. These factors have controlled the multiphased karstic evolution in relation to successive reduction of the base level and are responsible incision and widening of the valleys. The progressive and probably continual destruction of the pelitic sandstone formations, which forms the hydrologic reservoir of the massif, has led to the development of a range of landforms over space and time. They range downstream from karrens to potholes, and from potholes to canyons. The progressive fossilisation of these landforms is controlled by mass movements, particular rockfalls and colluviation. Although the evolution of this system cannot be dated directly, the continued epirogeny of the South America continent that began at the end of the Cretaceous, suggests that the system began forming before the beginning of the Quaternary.

KEYWORDS: Bambuí Group, karst, tectonic control, tropics, Central Brazil.

1. Introduction

La Serra do Ramalho se situe dans le bassin hydrographique du São Francisco, bordée par les affluents Caririnha au sud et Corrente au nord, au sud-ouest de l'État de Bahia, entre 44°15' et 44°03' de longitude ouest et 13°17' et 44°19' de latitude sud (Fig.1). C'est un des principaux sites karstiques du Brésil, dans le domaine des roches précambriennes carbonatées du Groupe Bambuí, dans lequel se développent d'importantes formes polyphasées, établies à partir de la dénudation du massif ancien, du dégagement des couvertures sus-jacentes et de l'abaissement du niveau de base.

L'architecture des formes superficielles actuelles du massif (rillenkarrén, kamenitzas et spitzkarrén), résulte d'une combinaison entre l'érosion chimique sur la surface rocheuse dénudée du massif, et l'activité de l'endokarst qui évolue vers des formes héritées (dépressions, amphithéâtres et canyons). L'ensemble représente une gradation des formes les plus récentes vers les plus anciennes (héritées), influencées par les paramètres tectoniques et climatiques.

Le présent travail est une première approche de l'évolution du karst dans le secteur nord-ouest de la Serra do Ramalho, en considérant deux aspects principaux :

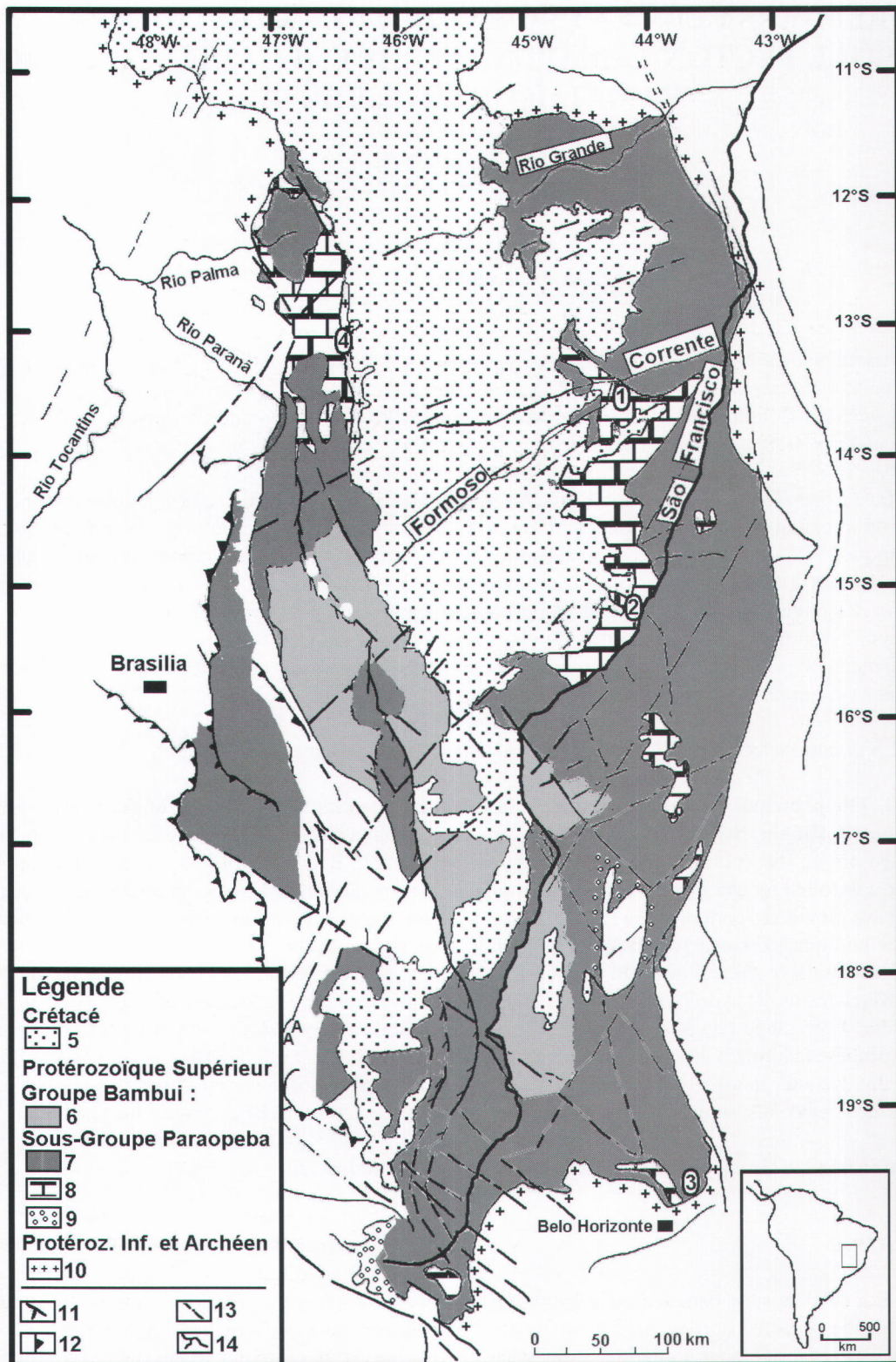


Figure 1. Localisation du site et distribution lithologique des formations du Groupe Bambuí et de la couverture gréseuse (d'après Braun *et al.*, 1990). 1) Serra do Ramalho, 2) Peruçu, 3) Lagoa Santa, 4) S.,o Domingos, 5) Formation Urucuia, 6) Formation Três Marias, 7) prédominance de calco-pélites, 8) prédominance des affleurements de calcaires, 9) conglomérats de base, 10) socle cristallin, 11) failles post Bambuí, 12) failles anté-Bambuí, 13) fractures, 14) fleuves et rivières.

*Location of the area studied and lithological distribution of the Bambuí Group and sandstone covering layer (after Braun *et al.*, 1990) 1) Serra do Ramalho, 2) Peruçu, 3) Lagoa Santa, 4) S.,o Domingos, 5) Urucuia Formation, 6) Três Marias Formation, 7) calc-pelites, 8) predominance of limestones outcrops, 9) basal conglomerates, 10) crystalline basement, 11) post Bambuí faults, 12) pre-Bambuí faults, 13 joints, 14) rivers.*

- 1- l'action combinée de la tectonique (épirogenèse) et des phénomènes morphoclimatiques comme cause des processus de la karstification du massif;
- 2- le réseau de fracturation (failles, diaclases) du massif carbonaté ancien, conditionnant l'installation et le développement du réseau endokarstique, selon les principales directions des fissures NNE-SSW et NNW-SSE, qui favorisent l'orientation et l'ouverture des canyons.

Cette première réflexion sur le contexte et le développement de la karstification dans ce secteur, doit être replacée dans le domaine relativement vaste des reliefs karstifiés du Groupe Bambuí, où, malgré les études sur les sites de Lagoa Santa (Kohler, 1989), de la vallée du Peruaçu (Piló, 1997) et de São Domingos (Guyot, 1996a), les recherches, préliminaires et ponctuelles, favorisent, notamment, les aspects spéléologiques.

2. Cadre géologique et climatique

La Serra do Ramalho présente un relief monoclinale qui appartient au domaine des roches carbonatées précambriennes du Groupe Bambuí, grande unité géologique et géomorphologique de plus de 300.000 km², distribuée entre les états de Minas Gerais, Bahia, Goiás et Tocantins (Fig. 1). Cette unité correspond à une séquence péliro-carbonatée de plateforme continentale du Protérozoïque supérieur, entre 800 et 600 Ma, qui forme le bassin sédimentaire du São Francisco (Braun *et al.*, 1990), après la stabilisation du craton éponyme (Almeida & Hasui, 1984).

Le Groupe Bambuí est constitué par les Formations : Jequitai, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade et Três Marias (Dardenne, 1978). La Formation Jequitai constitue la base du Groupe, notamment dans l'état de Minas Gerais, formée de conglomérats d'origine glaciaire. Cette Formation discontinue est absente des autres régions du domaine du Groupe Bambuí, où les contacts sont discordants sur des lithologies complexes et variées du socle cristallin, d'âge archéen à protérozoïque inférieur (Braun *et al.*, 1990). Les Formations Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré et Serra da Saudade sont regroupées dans le Sous-Groupe Paraopeba, qui représente une sédimentation de plateforme carbonatée en milieu littoral et marin. A partir de la Formation Serra da Saudade, la sédimentation devient de plus en plus détritique, représentative d'un milieu deltaïque. La Formation Três Marias possède une sédimentation essentiellement détritique, formée en milieu fluvial (Fig. 2).

Dans la Serra do Ramalho, entre 520 m et 660 m d'altitude, on observe essentiellement les calcaires noirs oolithiques et les dolomies de la Formation Lagoa do Jacaré, dans lesquels se développe le karst, ainsi que les roches phyllitiques, de la Formation Serra da Saudade, qui

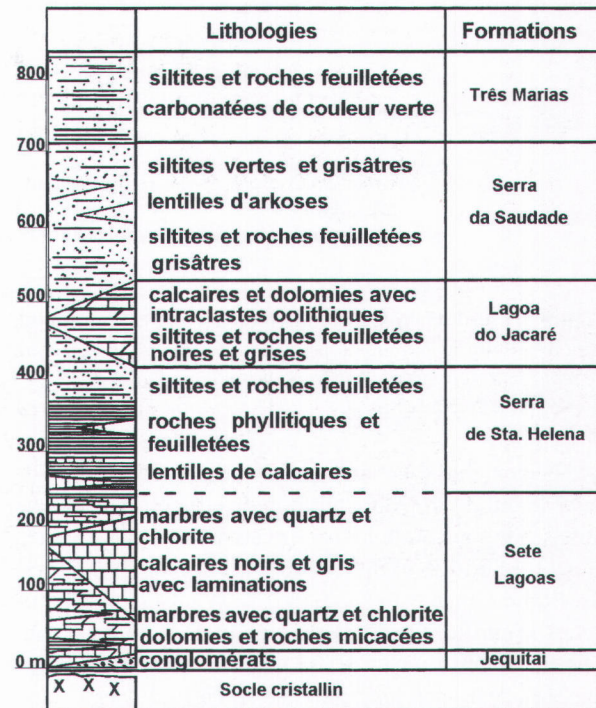


Figure 2. Lithostratigraphie du Groupe Bambuí (d'après Dardenne, 1978).

Lithostratigraphy of the Bambuí Group (after Dardenne, 1978).

les recouvrent, entre 660 et 740 m d'altitude. Les Formations Jequitai et Três Marias sont absentes de la région.

Les séquences supérieures du Groupe Bambuí présentent des contacts discordants et érosifs sous les couvertures gréseuses du Crétacé, qui sont réunies dans la Formation Urucuia. Cette Formation recouvre une grande étendue, et peut atteindre 1 200 m d'altitude sur le plateau de la Serra Geral (Brésil central), zone de partage des eaux entre les bassins hydrographiques du São Francisco et du Paranã. Cette Formation se développe plus résiduellement dans les zones périphériques du plateau, entre 800 et 900 m d'altitude, dans les vallées du Paranã et du São Francisco, dont le secteur étudié, formant parfois des reliefs à buttes témoins ou "mesetas" (Fig. 3). La Formation Urucuia constitue un grand aquifère poreux, principale source et réserve hydrique des bassins du São Francisco et du Paranã (Guyot, 1996b). Cette formation, en raison de son épaisseur et de sa distribution spatiale, joue un rôle fondamental de réservoir et donc d'alimentation et de soutien des eaux en région karstique ; elle est plus importante dans le plateau de la Serra Geral, où elle assure un grand réservoir hydrologique continu, alors que dans les régions périphériques, elle est morcelée (Fig. 3), ce qui ne lui permet plus d'assurer une alimentation régulière (Rodet, 1995 ; Bitencourt, 1998). Dans ces conditions, le drainage du karst dépend directement des précipitations de la saison pluvieuse.

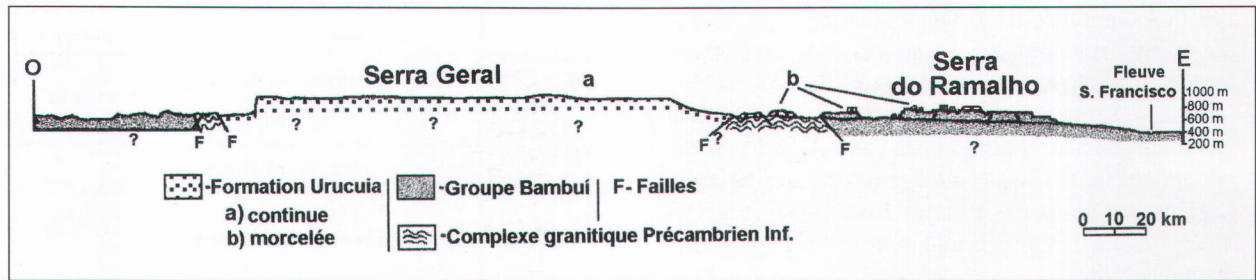


Figure 3. Profil schématique longitudinal entre la Serra Geral, la Serra do Ramalho et la vallée du S_o Francisco avec l'importance et la distribution spatiale du réservoir gréseux de la Formation Urucuia a) continue, b) morcelée (d'après RadamBrasil, 1982). *Schematic longitudinal profile between Serra Geral, Serra do Ramalho and the S_o Francisco valley with the sandstone reservoir spatial distribution of the Urucuia Formation a) unbroken, b) discontinue (after RadamBrasil, 1982).*

Le secteur étudié se situe dans une zone de transition entre le climat tropical sub-humide et le climat tropical semi-aride, qui dominent, respectivement, dans les régions du Sud-Est et du Centre-Ouest et le Nord-Est du Brésil. Le climat est chaud avec deux saisons bien marquées, contrôlées par le déplacement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) : un hiver sec (mai à septembre), avec des précipitations inférieures à 10 mm/mois, et un été pluvieux (novembre à mars), avec des précipitations supérieures à 180 mm/mois (Projeto RadamBrasil, 1982). Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 900 mm, avec d'importantes variations d'une année sur l'autre.

3. La karstification du massif : l'action combinée de la tectonique et des phénomènes morphoclimatiques

La Serra do Ramalho s'insère dans le domaine monoclinale du Groupe Bambuí et présente un système de fissuration qui suit principalement les directions générales des failles normales du cycle tectonique Brasiliano, entre 680 et 450 Ma (Dardenne, 1978a ; Braun *et al.*, 1990). Ce cycle a affecté les roches du Groupe Bambuí par des mouvements compressifs de direction SSE-NNW. Ces mouvements ont provoqué des déformations et des plis isoclinaux dans la bordure ouest du bassin (Goiás) et, dans l'extrême nord (Bahia), des failles inverses de direction ENE-WSW, avec chevauchement vers le sud. Dans la partie centrale, dominent les reliefs monoclinaux avec un réseau tectonique constitué de failles normales de direction générale NE-SW et NW-SE. Ces fissures ont été réactivées par la surrection post-Crétaïque qui affecte les massifs anciens de l'Amérique du Sud.

L'examen des photographies aériennes au 60 000ème, complété par l'interprétation de l'image TM Landsat, a permis de tracer les principaux accidents tectoniques du secteur. L'influence de la tectonique sur la karstification du massif, peut être observée à partir de la superposition de la carte des failles et des fissures, et de l'image TM Landsat (Fig. 4). Ce montage met en évidence les princi-

aux accidents tectoniques de la région, dont l'orientation préférentielle des vallées et des canyons disposés selon les principales directions de failles (NNW-SSE et NNE-SSW) du massif. Le relevé des principales directions (Fig. 5), réalisé sur le terrain, offre un éventail allant de 30°NE à 110°SE, qui contrôle le développement du karst du massif. Il en ressort deux directions préférentielles : une NNE-SSW, et l'autre NNW-SSE qui orientent les principales formes karstiques du massif (canyons, lapiaz, ...) : elles sont en conformité avec les principales directions du cycle Brasiliano. Une direction secondaire NS semble exprimer la décompression du massif. Les mesures topographiques réalisées dans le canyon du Morro Furado et dans quelques conduits souterrains qui s'ouvrent dans celui-ci, confirment cette organisation : son axe est orienté selon le système de fractures NNE-SSW, et les avens et cavités suivent la direction générale du système de fractures NNW-SSE. D'autre part, nous constatons que les lapiaz et la majorité des ravines (d'effondrement ou d'érosion) se développent aussi préférentiellement selon les mêmes directions.

Les formes endo et exokarstiques se développent selon ce maillage, offrant une gradation dans l'espace et dans le temps. Le massif exhumé présente des reliefs ruiniformes, constitués de "champs" de lapiaz, tours, pinacles et aiguilles évolués, notamment, à l'intersection des failles et/ou des diaclases (Fig. 6). Plusieurs générations de lapiaz sont observées, selon le pendage, la nature et la structure de la surface rocheuse (rillenkarren et rinnenkarren), mais aussi selon le degré de dissolution le long des fissures verticales (kluftkarren) qui souvent évoluent vers les avens ou les gouffres (Fig. 7). Quand la corrosion des fissures verticales atteint l'endokarst, les avens constituent l'un des éléments qui favorisent l'ouverture des formes endokarstiques par l'effondrement du toit des galeries et le recul progressif des parois. Cette dynamique est à l'origine de certains canyons, définis ici comme une "variété de gorges aux parois subverticales" (Nicod, 1997 : 71). L'orientation des formes majeures du karst de surface (amphithéâtres, canyons, ...) dépend de l'organisation du réseau endokarstique, selon le maillage tectonique du massif.

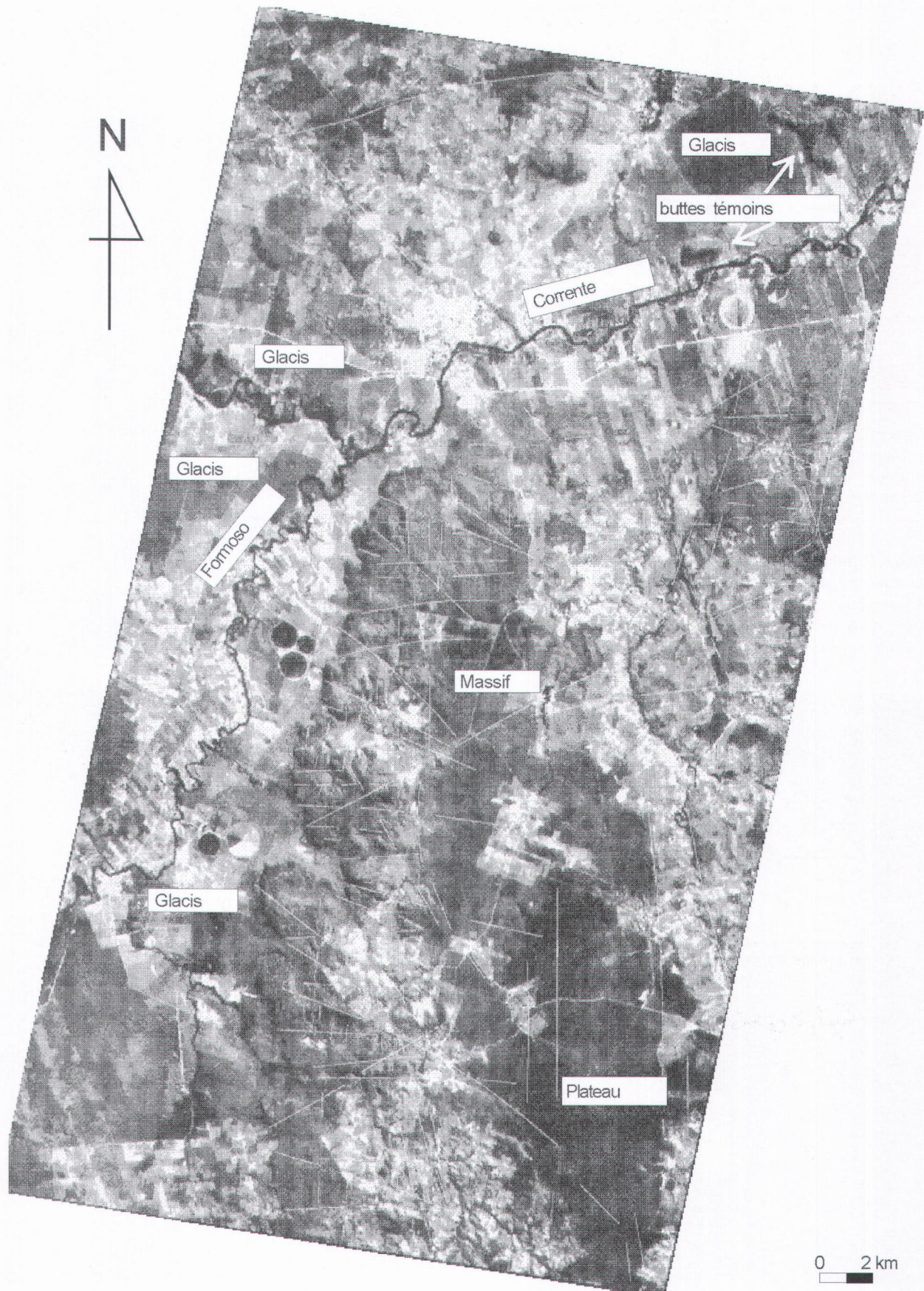


Figure 4. Image TM Landsat et le réseau tectonique du secteur nord-ouest de la Serra do Ramalho.

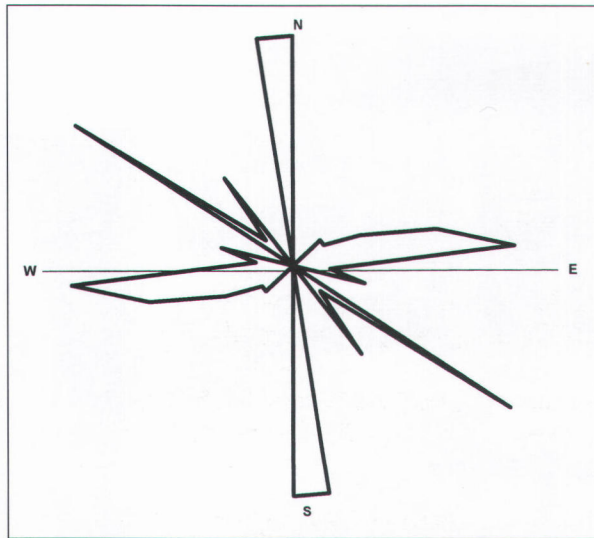


Figure 5. Diagramme avec les principales directions du réseau de fracturation du massif carbonaté.

Diagram showing the principle directions of the fracture network of the carbonate massif.

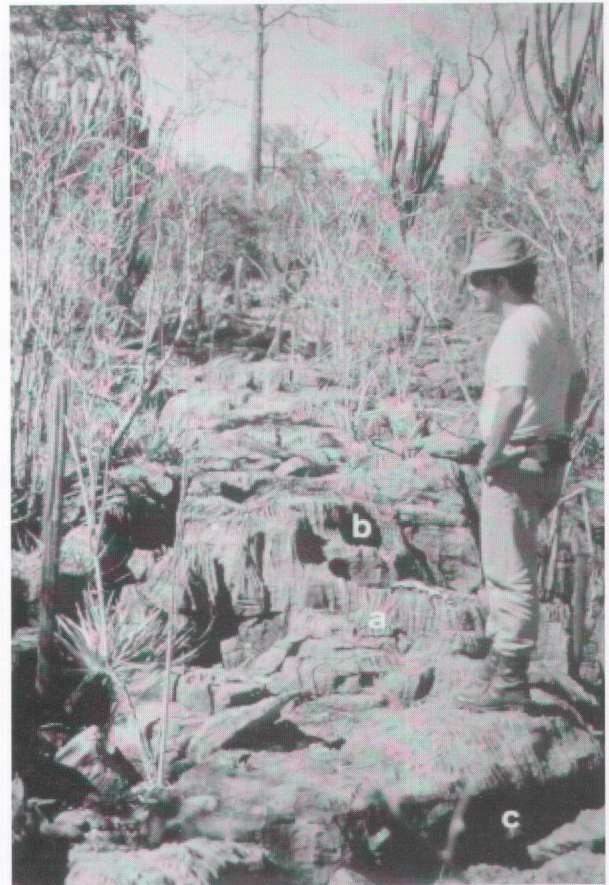


Figure 7. Influence du réseau tectonique sur le développement des lapiaz : a) spitzkarren, b) kamenitzas, c) Klufthkarren (cliché Bitencourt).

Effect of the tectonic network on the development of lapiaz: a) spitzkarren, b) kamenitzas, c) Klufthkarren (photo. Bitencourt).

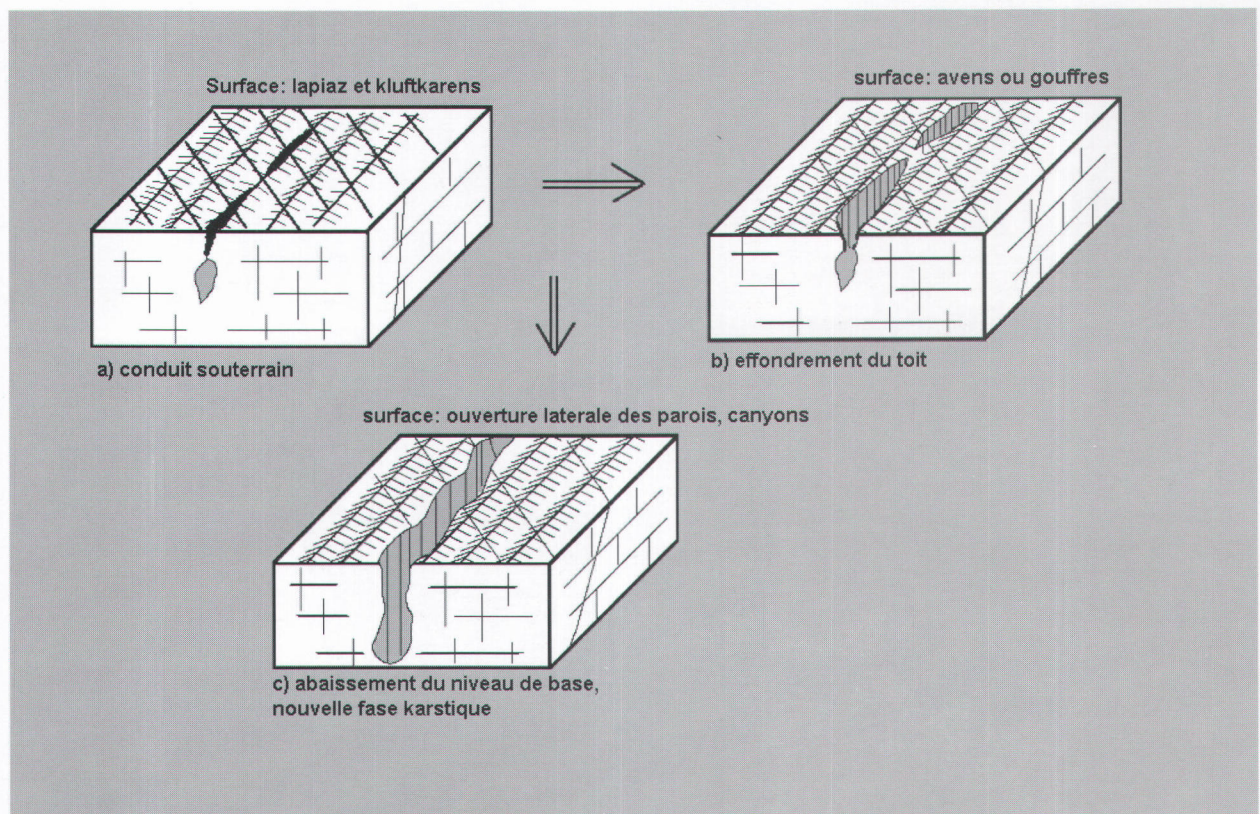


Figure 6. Exemple de l'évolution des formes majeurs du karst, guidées par le réseau de fissuration du massif.

Example of the main karst form evolution, directed by the fissure network.

Par ailleurs, il ne faut pas négliger l'importance du cadre morphoclimatique du secteur. Pendant le Quaternaire, cette région s'est installée, peu à peu, dans un contexte climatique sec à semi-aride, marquée aujourd'hui par une saison sèche de 4 à 5 mois. De ce fait, la ressource en eau est fortement dépendante des qualités-réservoir des formations : pendant la saison sèche, le drainage du massif dépend uniquement des réserves aquifères stockées dans les roches pendant la saison des pluies. La seule formation qui assure cette qualité de réservoir est celle des grès de la Formation Urucuia (Crétacé), très résiduelle dans ce secteur, qui recouvre partiellement les plateaux de la Serra. Pour cette raison, l'activation des drains karstiques et du canyon est très réduite, essentiellement limi-

tée à la saison des pluies. Il en résulte une certaine immunitisation des formes, lesquelles connaissent une lente évolution, essentiellement clastique.

Nous remarquons ainsi que les formes karstiques de la Serra do Ramalho, conditionnées par la structure tectonique du massif, évoluent dans l'espace et dans le temps.

4. Du réseau endokarstique à l'ouverture des canyons : le contrôle du réseau de fracturation

La mise en place de la karstification d'un massif carbonaté précambrien, évoque les idées de mouvements tectoni-

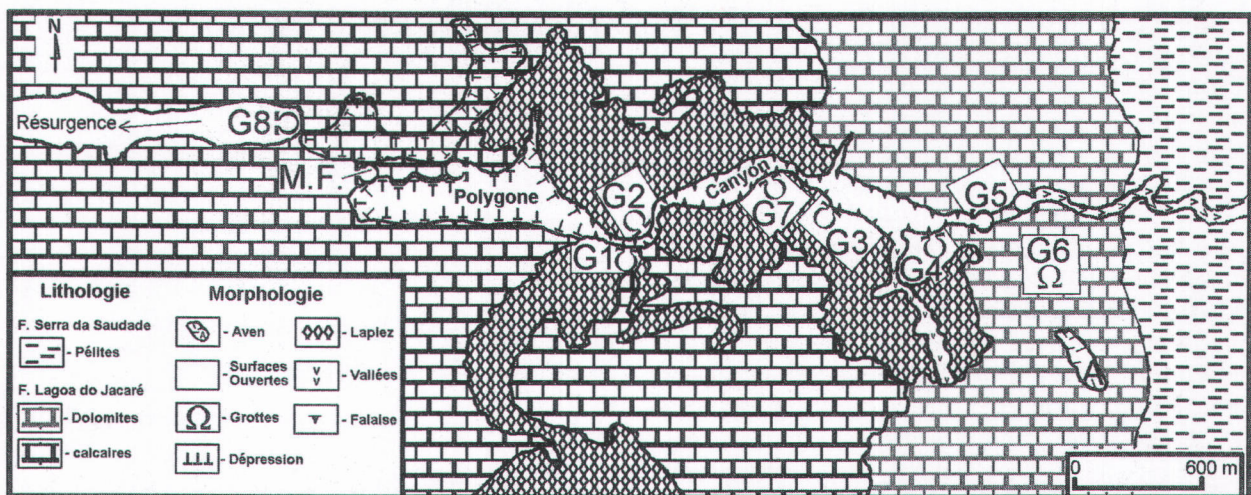


Figure 8 a. Plan du canyon du Morro Furado et les principaux éléments morphologiques.
Plan of the Morro Furado canyon and the principal morphological elements.

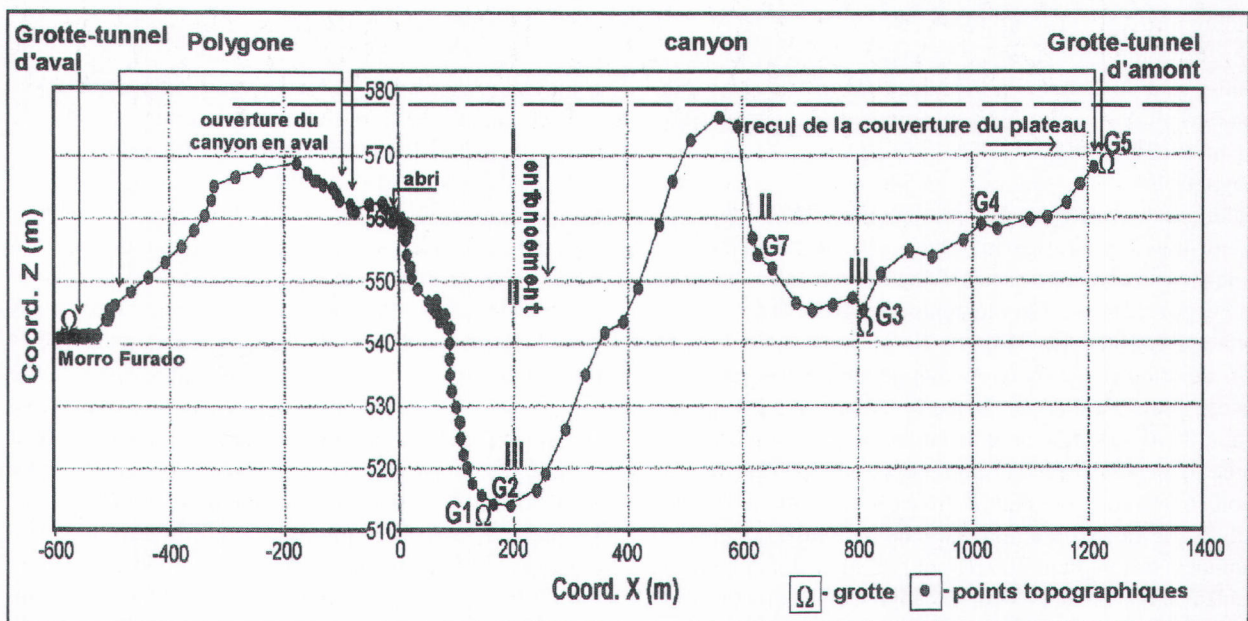


Figure 8 b. Profil du canyon du Morro Furado et les phases d'enfoncement (I, II et III).
Profile of the Morro Furado canyon and the phases of incision (I, II and III).

ques, d'exhumation, de surfaces d'érosion, de dégagement des couvertures, associées à la notion de variations du niveau de base.

Dans une région de domaine continental, éloignée de plus de 1 000 km du littoral, le niveau de la mer ne joue plus dans l'établissement du profil d'équilibre ; les variations des océans ne s'imposent guère sur les changements de niveau de base local. Le profil d'équilibre est guidé par le niveau de la rivière principale, et, dans ce cas, les variations du niveau de base local peuvent être contrôlées par des mouvements tectoniques de soulèvement du massif concerné ou par des variations climatiques imposant une rythmicité due aux différences de morphogénèse, qui se superposent à un soulèvement épirogénique (Quinif, 1989).

Dans la région étudiée, ces idées sont mises en évidence à partir de l'exemple de l'évolution du canyon du Morro Furado, où trois principales phases d'enfoncement sont observées (Fig. 8A et 8B). Un premier niveau, vers 565-570 m d'altitude, entre la grotte-tunnel du Morro Furado et le débouché aval du canyon, détermine une surface plane de 1,5 km², suspendue et défoncée vers l'ouest, qui ressemblerait à un paléo-polje (le Polygone). Cette surface est limitée par des parois verticales dégagées latéralement par des reculs successifs.

Un deuxième niveau se développe vers 560 m, dans la partie aval du canyon, et est matérialisé par un abri sous roche et une cavité comblée et suspendue. Ce niveau souligne une première étape d'enfoncement du niveau de base sous le Polygone, et vraisemblablement en direction de la galerie-tunnel du Morro Furado (Fig. 8 : I). Nous n'avons pas identifié d'élément appartenant à cette première phase dans la partie amont du canyon : il semblerait que celle-ci soit plus récente.

Un troisième niveau vers 545 m se développe dans la partie aval du canyon où il est exprimé par deux replats topographiques. Dans la partie amont, on peut attribuer à ce niveau, un replat inscrit vers 552 m. Ceux-ci accompagnent le niveau perché (vers 540 m d'altitude) de la galerie-tunnel du Morro Furado, longue de 152 m (Fig. 9). Cette grande galerie (30 m de haut, 50 m de large) a fonctionné en résurgence, avant d'être déconnectée du drainage, puis perchée. Ces éléments soulignent la deuxième phase d'enfoncement (Fig. 8 : II).

Un quatrième niveau se développe vers 515 m dans la partie aval, marqué par la grotte de base (G 1, 2 m de haut, 20 m de longueur et de largeur), fortement encombrée de dépôts argileux, qui recoupe une petite circulation souterraine. On peut attribuer à ce même niveau le talweg de la partie amont du canyon, entre la galerie-tunnel G 5 (longueur 200 m, pour 40 m de diamètre) qui réalise la liaison du plateau au canyon, et la perte G 3 (30 m de profondeur). Avec la grotte G 2, explorée sur plus de 500 m, ces cavités soulignent un niveau de base en liaison avec l'exsurgence actuelle du secteur (G 8, cavité



Figure 9. Galerie-tunnel perchée du Morro Furado (cliché Bitencourt).

The Morro Furado perched tunnel-gallery (photo. Bitencourt).

inexplorée). Ces éléments matérialisent la troisième phase d'enfoncement du canyon (Fig. 8 : III).

Les phases observées sont guidées par des changements significatifs du niveau de base et par l'installation durable du drainage selon la direction des fissures du massif, ce que démontre l'exploration des cavités reconnues.

Les variations du niveau de base local ont vraisemblablement été causées par l'action interactive des mouvements de surrection du massif, notamment depuis la fin du Crétacé (Clapperton, 1993), favorisant systématiquement la karstification selon le réseau tectonique déjà établi, et par des cycles d'érosion du Tertiaire-Quaternaire (King, 1956), générant des surfaces successives étagées. RadamBrasil (1982) identifie, pour les régions du Brésil central, trois surfaces ou reliefs plats, situés entre 1 200-1 400 m, 1 000-1 200 m, et 600-800 m d'altitude (fig. 3). Dans la Serra do Ramalho, la surface la plus ancienne correspond à l'étagement de 800 m d'altitude, qui s'étend dans les grès, formant des reliefs résiduels de type "mesetas". A partir de cette surface, l'ensemble karstifié se développe en direction du niveau de base actuel, matérialisé par le Rio Formoso, autour de 460 m d'altitude.

Le modèle évolutif du canyon du Morro Furado illustre parfaitement le mécanisme de karstification du massif ; chaque nouvelle phase remplace une antérieure, provoquant l'ouverture du canyon et l'enfoncement du drainage qui systématiquement reste dépendant de la fissuration. Ce modèle est accompagné par des variations entre le climat tropical sub-humide et le climat subtropical, pendant le Quaternaire, soulignant des périodes d'aridité prolongées (Clapperton, 1993).

Ce modèle illustre le mécanisme de succession de phases épirogéniques dont l'activité est exprimée par un abaissement du niveau de base et une érosion efficace des couvertures, tandis que les périodes "isostatiques" permettent la stabilisation du niveau de base et le développement du drainage karstique, tout en favorisant l'aplanissement des surfaces. Ceci permet d'identifier une évolution liée au dégagement des couvertures en amont, en au moins trois épisodes distincts, illustrés par les étapes suivantes (Fig. 10) :

- 1 - l'exhumation du massif est accompagnée du dégagement des grès du plateau de la Serra do Ramalho, à partir de l'aplanissement de la surface de 800 m (S1), permettant l'introduction des eaux dans les calcaires du massif et le développement supposé d'un karst phréatique sous couverture. Cette étape reste hypothétique car nous n'avons pas identifié les témoins karstiques correspondants;
- 2 - le recul de la couverture péliito-gréseuse, à partir d'une surface d'aplanissement intermédiaire (S2), vers 560 m, marquant principalement la surface des buttes-té-

moins du secteur nord de la Serra do Ramalho, a favorisé l'exhumation d'une partie du massif calcaire. Nous pensons que cette couverture était suffisamment importante pour maintenir un drainage pérenne, dans les conditions climatiques d'alors, et permettre le développement d'un fluviokarst, à l'image des sites actuels (Fig. 1) du Peraçu (Minas Gerais) et de São Domingos (Goiás). Nous associons à ce niveau de base général, la phase 1 de la formation du canyon, avec les éléments morphologiques situés entre 560 et 570 m d'altitude, incluant la surface suspendue du polygone et les remplissages résiduels d'une ancienne grotte;

- 3 - La descente jusqu'à la troisième et la plus récente des surfaces (S3), marquée par le niveau actuel de 460 m des rivières Formoso et Corrente (400 m sur la plaine du São Francisco), s'est effectuée en plusieurs épisodes, soulignés par des crans successifs et des déplacements des émergences karstiques.

Dans la phase II de l'évolution du canyon (Fig. 8 : II), le niveau 540-550 m est souligné par la galerie-tunnel du Morro Furado (ancienne émergence), marquant une nouvelle organisation du réseau hydrologique selon le système de fissuration du massif. Cette phase est accompagnée par l'individualisation des buttes-témoins de la partie septentrionale du massif, et l'évolution d'un glacis sur la périphérie du massif, entre 480 et 520 m d'altitude.

Durant la phase III, un nouvel abaissement du niveau de base individualise les galeries-tunnels qui, par absence de drainage, connaissent un morcellement (Fig. 9). A ce stade, la couverture gréseuse est trop réduite pour assu-

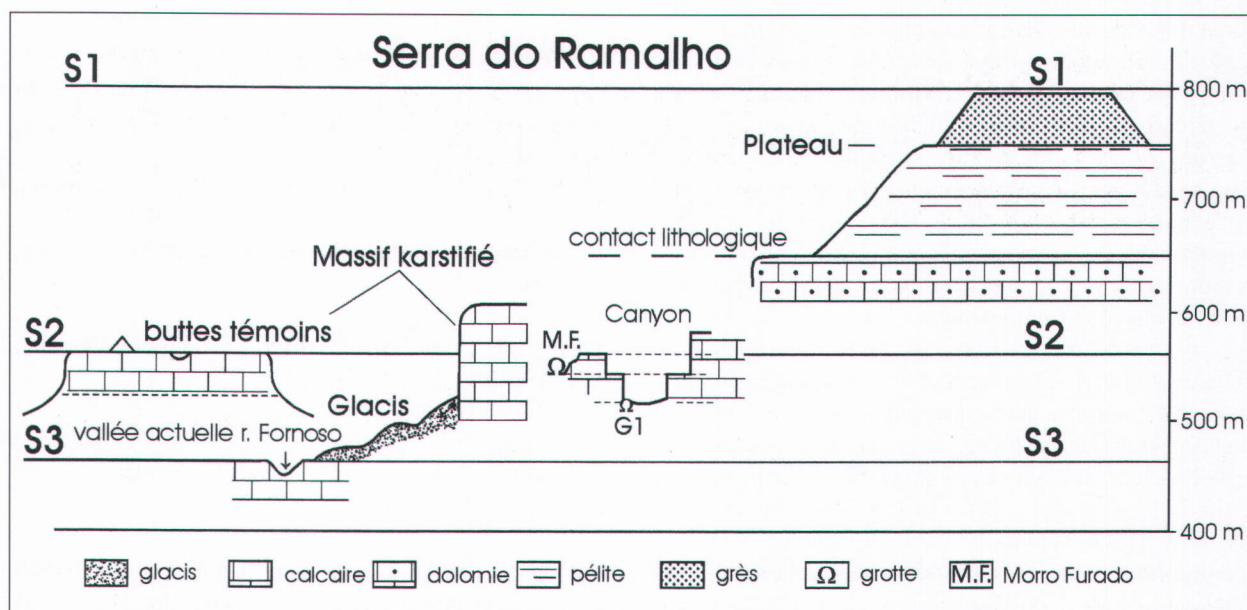


Figure 10. Modèle synthétique d'évolution du karst du massif carbonaté de la Serra do Ramalho à partir de phases épirogéniques, de l'abaissement du niveau de base, de l'érosion de la couverture péliito-gréseuse du massif et de l'aplanissement des surfaces (S1, S2 et S3). *Synthetic model showing the evolution of the karst of the Serra do Ramalho carbonate massif, beginning from the epirogenic phase, the progressive deepening of the base, the erosion of the pelitic sedimentary cover of the massif and the planation of the surfaces (S1, S2, and S3).*

rer l'alimentation pérenne du massif, qui n'est plus drainé que pendant les précipitations de la saison pluvieuse.

L'évolution actuelle du karst est très ralentie ; les émergences sont suspendues dans le haut du glacis qui se développe sur les calcaires et est déformé par des phénomènes actuels de pertes, résurgences et formation de dolines.

5. Conclusion : Adaptation et évolution des formes karstiques

Le karst de la Serra do Ramalho offre un exemple d'évolution polyphasée en milieu tropical à saison contrastée, guidée par le maillage tectonique du massif ancien et par des variations morphoclimatiques. L'influence de la tectonique se traduit par l'organisation du réseau de drainage, installé systématiquement sur la fissuration, et par le dégagement de la couverture périto-gréseuse, rythmé par l'épirogenèse du massif. Celle-ci commande l'évolution polyphasée du karst, en fonction des modifications successives du niveau de base local, et cause les approfondissements et les élargissement des vallées (canyons).

Cette évolution est marquée par une érosion graduelle et probablement continue, favorisant l'exhumation du massif carbonaté en aval, avec exposition de la surface rocheuse, et le dégagement des couvertures périto-gréseuses sus-jacentes en amont, accompagné du recul des têtes de vallons (canyons). Ceci marque ainsi une progression des formes karstiques dans l'espace et dans le temps ; les lapiaz évoluent vers les avens, et les avens vers l'ouverture des canyons par décapitation des galeries-tunnels de l'endokarst, selon le réseau tectonique. Cette évolution a une conséquence : comme la couverture gréseuse assure la fonction de réservoir hydrique, et donc le drainage des formes endokarstiques, sa réduction en dessous d'un seuil ne permet plus le drainage pérenne du karst, lequel ne connaît plus de phases actives que lors des précipitations de la saison des pluies, et donc une relative immunisation des formes qui évoluent lentement par ébouilisation et colluvionnement.

Cette évolution n'est pas datée, mais on peut raisonnablement l'envisager anté-quadernaire, puisque Clapperton (1993) indique que les régions à massifs précambriens de l'Amérique du Sud subissent un soulèvement depuis la fin du Crétacé. Ce schéma évolutif est observé dans plusieurs régions à massifs calcaires, dans un contexte géomorphologique similaire de marges passives, dont l'exemple du karst du Bas-Zaïre (Quinif, 1985) donne une illustration.

A ce stade de la recherche, il est nécessaire de préciser la chronologie des phases observées et de réaliser des corrélations du contexte étudié avec d'autres régions karstiques du domaine du Groupe Bambuí.

6. Remerciements

La Capes (Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior) du Ministère de l'Education du Brésil, a partiellement financé cette recherche par l'attribution d'une bourse de recherche.

7. Références

- ALMEIDA, F. & HASUI, Y., 1984. *O Pré-Cambriano do Brasil*. Ed. Edg. Blücher, São Paulo, 378 p.
- BITENCOURT, A.L.V., 1998. *Morphogenèse, Quaternaire et Archéologie : le site du Morro Furado (Serra do Ramalho, Bahia, Brésil)*. Thèse de l'Université de Caen, 240 p.
- BRAUN, O., MELLO, U. & DELLA PIAZZA, H., 1990. Bacias proterozóicas brasileiras com perspectivas exploratórias para hidrocarbonetos. In: De Raja-Gabaglia & Milani (eds.), *Origem e evolução de bacias sedimentares*, Petrobrás : 115-132.
- CLAPPERTON, C., 1993. *Quaternary geology and geomorphology of South America*. Elsevier, 779 p.
- DARDENNE, M.A., 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil central. *Anais XXX Congr. Brasil. Geol.*, Recife, 2 : 597-610.
- GUYOT, J.-L., ed., 1996a. *Goiás 94-95 - Carste / karst de São Domingos, Goiás, Brasil*. Expéditions Spéléologiques Franco-Brésiliennes, Brasília, 257 p.
- GUYOT, J.-L., 1996b. Hydroclimatologie de la région. *Goiás 94-95 - Carste / karst de São Domingos, Goiás, Brasil*, Expéditions Spéléologiques Franco-Brésiliennes, Brasília : 43-51.
- KING, L.C., 1956. A geomorfologia do Brasil Oriental. *Rev. Brasil. Geogr.*, 18 : 186-263.
- KOHLER, H.C., 1989. Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa - MG. Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, 113 p.
- NICOD, J., 1997. Les canyons karstiques "nouvelles approches de problèmes géomorphologiques classiques" (spécialement dans les domaines méditerranéens et tropicaux). *Quaternaire*, 8 (2-3) : 71-89.
- PILO, L.B., 1997. Caracterização regional do carste do Vale do Rio Peruaçu. *O-Carste*, 9 (2) : 22-29.

QUINIF, Y., 1985. Une morphologie karstique typique en zone intertropicale : les karsts du Bas-Zaïre. *Karstologia*, 6 : 43-52.

QUINIF, Y., 1989. La notion d'étages de grottes dans le karst belge. *Karstologia*, 13 : 41-49.

PROJETO RADAMBRASIL, 1982. Levantamento de recursos naturais, folha 1/1.000.000 SD.23 - Brasília. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, 29 : 645 p.

RODET, J., 1995. Un paléokarst tropical de zone semi-aride : les cavités de São Raimundo Nonato (Piauí, Brésil). *Akten 10. Nation.Kongr.Höhlenf.*, Breitenbach (Suisse) : 371-380.

Manuscrit reçu le 31 mars 1998 et accepté pour publication le 02 juillet 1999.