

Morphologie des escarpements et des piémonts sur la marge passive équatoriale du « Nordeste » brésilien : évolution du Néogène à l'Actuel et ses facteurs

(MORPHOLOGY OF SCARPS AND PIEDMONTS OF THE EQUATORIAL PASSIVE MARGIN OF NORTHEAST BRAZIL: NEOGENE TO PRESENT EVOLUTION AND ITS FACTORS)

Jean-Pierre PEULVAST*, ***Vanda CLAUDINO SALES*****
François BÉTARD*

RÉSUMÉ. – *Des versants abrupts forment l'escarpement marginal du « Nordeste » brésilien, au-dessus d'une basse surface d'aplanissement passant vers la côte à un piémont composite. Des pédiments disséqués et des cônes d'épandage y suggèrent une activité érosive récente ou actuelle. L'analyse de types morphostructuraux choisis ne montre un contrôle tectonique apparent que sur quelques uns de ces escarpements. La plupart d'entre eux sont des formes héritées, nées lors du rifting créacé ou en réponse au soulèvement marginal ultérieur. La sédimentation détritique néogène sur les piémonts et les régions côtières reflète l'influence de périodes sèches avec des phases d'ablation poussée des sols, voire l'attaque de la roche en place dans les versants et les piémonts. Des phases de dissection sont intervenues dans des périodes plus humides et/ou de bas niveau marin. Le volume modeste de la sédimentation détritique néogène implique des taux d'érosion et de soulèvement modérés jusqu'à l'Actuel, favorables à des effets de résistance morphologique et lithologique dans les paysages.*

Mots-clés : *backwearing ; downwearing ; escarpement marginal ; résistance morphologique ; néotectonique.*

*Université de Paris-Sorbonne. Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591 CNRS.

E- mail: jean-pierre.peulvast@wanadoo.fr

** Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Fortaleza, CE, 60451-170, Brésil.

ABSTRACT. – Steep slopes form the marginal scarp of the semi-arid northern Brazilian “Nordeste”, above a low pediplain merging seaward with a coastal erosional-gradational piedmont. Dissected pediments and sparse debris fans visible at the base of some escarpments suggest recent erosive activity and possible slope retreat, although most of these forms are decoupled from major valleys. We describe the morphostructural patterns of chosen escarpments, and the morphodynamic conditions of their evolution since the Miocene. Only a few scarps show strong structural control. Most of them are mainly inherited landforms, initiated during the Early Cretaceous rifting or the later margin uplift. The Neogene clastic sedimentation on piedmonts and coastal areas mainly reflects the occurrence of dry periods inducing widespread stripping of deep soil horizons and erosion of bare rock slopes and surfaces. Dissection stages occurred in periods of more humid climate and/or low sea level. The moderate volumes of Neogene clastic sediments imply overall low uplift and erosion rates until the Present, favourable to morphological and lithological resistance effects in the landscapes.

Key words: backwearing, downwearing, marginal scarp, morphological resistance, neotectonics.

Introduction

Des versants abrupts forment l'escarpement marginal du « Nordeste » brésilien. Délimitant des reliefs d'altitudes modestes, ils dominent une basse surface d'aplanissement passant vers la côte à un large piémont d'érosion et d'accumulation. Seuls quelques uns coïncident avec des contacts géologiques et/ou des zones de faille. Leur localisation, leur tracé, ainsi que la présence ou l'absence de reliefs résiduels contribuent à éclairer leur origine et leur évolution. Localement, des pédiments disséqués et des cônes d'épandage suggèrent une activité érosive récente ou actuelle, bien que la plupart des escarpements soient découplés des vallées principales. Dans ce contexte où divers facteurs (lithologie, néotectonique, variations climatiques et eustatiques) peuvent être envisagés, la morphologie et l'évolution des escarpements sont abordées à partir de la description de types morphostructuraux représentatifs et des conditions d'évolution, en particulier au Néogène. Cette analyse permet de discuter l'origine et les modes de façonnement, de préservation ou de remaniement de systèmes d'escarpements et de piémonts en contexte de marge passive tropicale.

1. Présentation de la région étudiée, hypothèses et remarques méthodologiques

Centrée sur l'État du Ceará, la région étudiée appartient à la marge continentale équatoriale du Brésil, née à l'Aptien. À terre, les structures du

bouclier précambrien s'organisent autour d'un vaste système de zones de cisaillement NE-SW partiellement réactivées au Crétacé inférieur par un rifting diffus antérieur à l'ouverture océanique (zone de rift Cariri-Potiguar ; fig. 1). Cette zone de rift est recoupée par la marge passive transformante dans la région du bassin Potiguar. Une mince série discordante de sédiments cénozoïques (Groupe Barreiras) forme des bas plateaux côtiers (« tabuleiros ») sur 10 à 80 km de largeur, devant deux segments désalignés d'un escarpement marginal discontinu. Légèrement disséqués, ces bas plateaux prolongent les vastes couloirs et plaines doucement inclinés vers la mer qui forment dans l'intérieur semi-aride la surface « Sertaneja », vaste aplanissement partiel développé entre des reliefs tabulaires et des crêtes ou des massifs accidentés, au détriment d'une large zone de soulèvement flexural (800 à 1200 m).

L'escarpement marginal recoupe l'épaule NW de la zone de rift Cariri-Potiguar et les vestiges érodés de l'épaule sud du rift Potiguar (fig. 1). La zone de décalage entre les deux segments correspond à une aire de subsidence post-rift, le bassin Potiguar. Cependant, aucun contrôle tectonique apparent des tracés d'escarpement n'est observé. Dans la plupart des cas, on doit envisager un façonnement et un recul par érosion à partir de structures plus ou moins éloignées, zones de faille réactivées au Crétacé ou flexure marginale (Peulvast et Claudino Sales, 2004). Des différences de sinuosité (celle-ci étant définie comme le rapport entre la longueur réelle des escarpements et la corde, mesurées ici sur les cartes topographiques à 1:500 000 publiées par DMAAC, St.Louis, Missouri, feuilles ONC M-28) pourraient refléter des différences d'âge et de vitesse de recul (Matmon *et al.*, 2002), mais aussi des contrôles structuraux locaux.

Les pentes des versants composant l'escarpement marginal et les rebords des massifs de l'intérieur sont souvent abruptes. Des knicks ou de courtes concavités les relient à des pédiments étroits ou à la surface Sertaneja légèrement ondulée ou disséquée. Il n'existe généralement pas de connexion directe entre ces versants, incisés par de courtes vallées, et les vallées principales, encaissées de 20 à 50 m dans les piémonts et les « tabuleiros » côtiers, 5 à 30 km en avant des escarpements. On peut donc s'interroger sur l'âge, l'origine et l'évolution de ces versants, et sur les durées et les facteurs de leur recul (« backwearing ») et/ou de l'abaissement érosif (« downwearing ») des piémonts, hors des principaux axes de drainage, un problème classique de la morphologie des régions tropicales. Afin de fonder la discussion sur une gamme représentative de contextes morphostructuraux, nous analysons plusieurs exemples appartenant aussi bien à l'escarpement marginal qu'à des reliefs de l'intérieur, avec différentes valeurs de sinuosité.

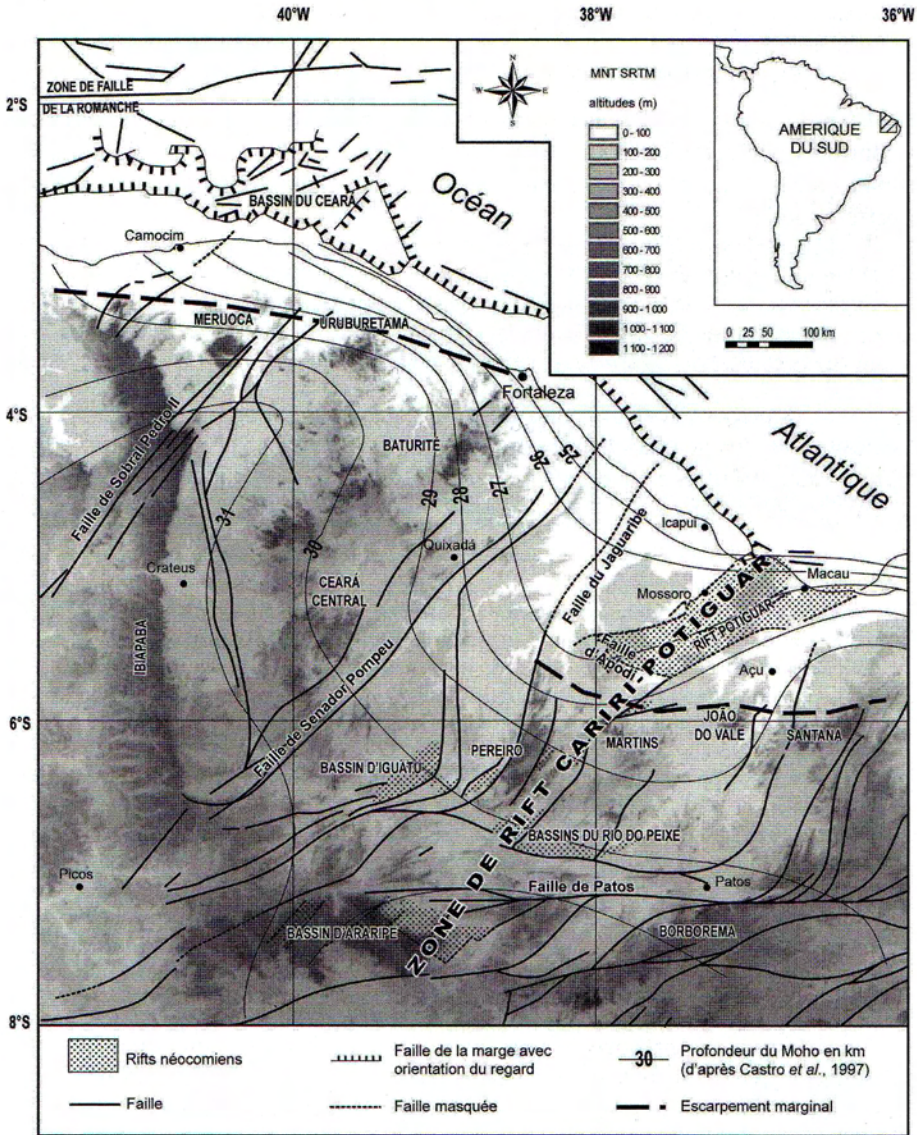


Figure 1 – Carte de localisation de la région étudiée.
Le trait discontinu épais indique la position de l'escarpement marginal.

2. Données géomorphologiques

2.1 Types morphostructuraux

L'étude porte sur des escarpements déjà choisis pour l'étude d'éventuels contrôles néotectoniques sur leur évolution récente (Peulvast *et al.*, 2006 b), mais aussi sur d'autres escarpements plus clairement dus à l'érosion différentielle :

- le rebord ouest du massif granitique de Pereiro, escarpement rectiligne et continu de 120 km de longueur et 400 à 500 m de hauteur (sinuosité $S = 1,1$), dominant le plancher légèrement disséqué de la dépression du bas Jaguaribe (fig. 2).
- l'escarpement SE rectiligne du massif granitique de Meruoca, dominant de 600 m le couloir du fleuve Acarau, excavé le long de la grande zone de cisaillement Sobral-Pedro II ($S = 1,1$).
- l'escarpement discontinu, coiffé d'un entablement gréseux, qui forme le rebord nord de l'alignement de buttes et d'éperons situé au sud du bassin Potiguar (Serra do Martins et massifs voisins). Il domine la Chapada do Apodi, un bas plateau dont la surface tronque des calcaires marins turoniens, au-delà d'une large dépression périphérique où affleure le socle exhumé. Cet escarpement de faille résiduel a reculé depuis des failles éloignées (failles de Carnaubais et d'Apodi), enfouies sous la couverture post-rift que des rejeux récents déforment légèrement.
- l'escarpement subméri dien de 500 à 600 m de hauteur qui forme le rebord est des massifs de Baturité et d'Aratanha, au sud de Fortaleza. La plupart des pics, crêtes culminantes et abrupts sont façonnés dans les quartzites plissés qui arment ces massifs de roches supracrustales et de migmatites. Aucune ligne de faille n'est identifiée le long de cet escarpement sinueux aux embayments multiples qui se situe à 50 km au NW de la zone de cisaillement de Senador Pompeu et du fleuve Choró ($S = 2,6$). Son tracé, de même que celui de l'escarpement plus rectiligne du massif d'Aratanha, plus au nord, résulte de l'érosion différentielle.
- le massif granitique triangulaire d'Uruburetama, plus à l'ouest, dont les rebords sinueux, les promontoires, les groupes d'inselbergs et les embayments montrent des contrôles locaux par les contacts entre le granite et l'encaissant, ainsi que par des zones de fractures et de faille ($2 < S < 3$). Les knicks sont plus marqués du côté ouest, sous le vent, que dans les versants E et N plus humides. Aucune faille maîtresse n'est identifiée entre les « tabuleiros » et le massif, un vaste relief résiduel façonné dans la zone de soulèvement flexural de la marge.

Une formation précoce d'une partie au moins des escarpements est démontrée par l'identification de paléosurfaces d'âge pré-Néogène à crétacé dans les parties distales ou même proximales de la surface Sertaneja (Peulvast et Claudino Sales, 2004). Dans les deux premiers cas, la coïncidence avec les contacts intrusifs suggère une contribution de l'érosion différentielle liée au développement de cette surface. Les deux escarpements granitiques sont séparés des vallées principales creusées le long de leurs failles maîtresses (Jaguaribe et Acarau) par des pédiments de 5 à 15 km de largeur (fig. 2, premier plan). Malgré la présence locale de vallées suspendues et de facettes triangulaires semblables à celles d'escarpements de faille actifs, des reliefs résiduels significatifs les précèdent sur les compartiments opposés, ce qui

suggère que ces escarpements, calés sur des contacts lithologiques rectilignes coïncidant plus ou moins avec les failles, sont plus liés à l'érosion différentielle qu'à la tectonique. Ce contrôle explique leur faible sinuosité.

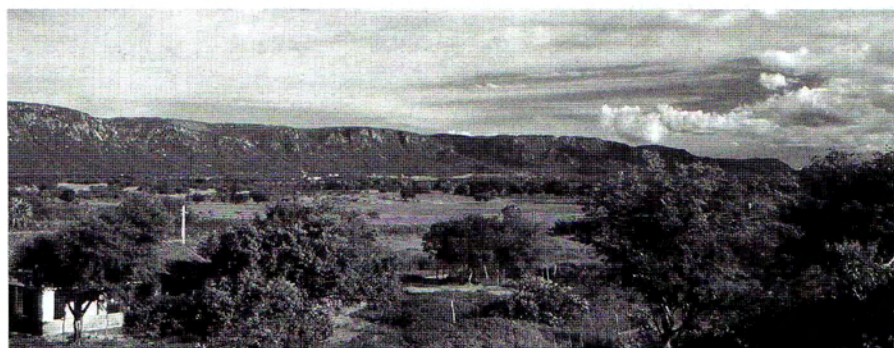


Figure 2 – L'escarpement de faille de Pereiro, vu vers le SE depuis la BR 116 entre Icó et Jaguaribe. Escarpement rectiligne coïncidant aussi avec la limite externe d'une intrusion granitique synorogénique. Présence de courtes vallées suspendues et de petits cônes de déjection. Pédiment gneissique au premier plan. Cl. J.P. Peulvast.

Dans les autres cas, un important recul d'escarpement a accompagné l'aplanissement partiel, peut-être favorisé par la flexuration marginale post-rift qui a réduit vers la côte et les bassins l'épaisseur de la tranche de roche à enlever. Cependant, la sinuosité élevée, >2 , paraît moins associée à l'ancienneté qu'à la mise en valeur de contrôles structuraux plus complexes, dans les lithologies variées. Partout, ces caractéristiques excluent l'influence d'une activité néotectonique significative.

2.2 Données morphodynamiques : Actuel

Alors que la plupart des escarpements granitiques présentent des parois redressées et nues, fréquemment façonnées en dômes ou en aiguilles (Pereiro, Uruburetama), ou en facettes à profil rectiligne (Aratanha, Meruoca SE), la morphologie est plus irrégulière dans les escarpements sinueux taillés dans les roches métamorphiques (Baturité). Cependant, des cônes colluviaux non coalescents de petite taille existent à la base des deux types de versants, au débouché de courts ravins en forte pente (fig. 2). En plusieurs endroits, surtout dans les parties les plus sèches et les moins végétalisées des massifs granitiques (ouest du massif d'Uruburetama, versants nord du massif de Meruoca), on trouve des formes et dépôts récents de coulée de débris, activés épisodiquement lors de saisons pluvieuses particulièrement intenses. Leur distribution éparse reflète celle des zones de fractures ou des replats où des

volumes significatifs d'altérites (arènes, blocs) ont pu être retenus temporairement dans ces parois avant d'être mobilisés.



Figure 3 – L'embayment de Baturité, vu vers l'est depuis le couvent de jésuites. Large rentrant ouvert dans le flanc est du massif, avec un plancher disséqué se raccordant à la surface Sertaneja surmontée de quelques inselbergs (à droite : Pedra Aguda, microgranites). Vestiges de pédiments au pied de l'escarpement sinueux, disséqués par un des cours d'eau issu des vallées suspendues du massif.

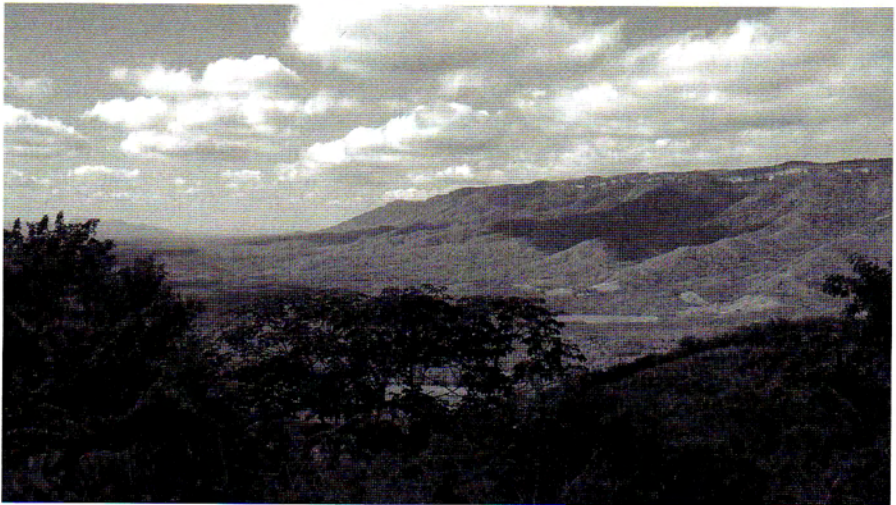


Figure 4 – La Serra da Ibiapaba au-dessus de Freicheirinha, vers le sud. Glint dans lequel les grès paléozoïques du bassin Parnaíba (Formation Serra Grande) forment la corniche sommitale au-dessus de la concavité de raccord et des pédiments taillés dans les sédiments tendres du fossé molassique d'Ubajara. Dissection des pédiments sans recul significatif de la corniche. Cl. J.P. Peulvast.

Seuls quelques uns de ces ravins et dépôts sont connectés aux drains de la basse surface environnante. La plupart des cônes colluviaux sont construits ou conservés sur des racines de pédiments non disséqués. Cependant, certaines vallées montagnardes se prolongent entre les vestiges disséqués de ces pédiments, principalement en avant des escarpements sinueux, même loin de la côte (80 à 120 km : Baturité, Serra do Martins, glint d'Ibiapaba : fig. 3, fig. 4), montrant qu'une certaine incision verticale a pu se produire dans les parties proximales des piémonts, après des stades tardifs de pédimentation.

2.3 Dépôts corrélatifs plus anciens : le legs du Néogène

Des vestiges de dépôts détritiques plus étendus et plus anciens reposent sur la surface Sertaneja, à distance des escarpements. Des sables et des cailloutis argileux, souvent ferrugineux, ont été cartographiés près des massifs sur de basses surfaces légèrement disséqués (Baturité). On trouve aussi des dépôts épars de galets et cailloutis grossiers de quartz et de quartzite, de plusieurs mètres d'épaisseur, vestiges de cônes, de terrasses et de couvertures de pédiments disséqués (périphérie du massif de Baturité, sud du bassin Potiguar). Tous reflètent l'intervention de périodes d'érosion active des versants et de construction de cônes sur les parties proximales des basses surfaces. Un léger encaissement des vallées place ces dépôts épars en situation d'interfluves, entre 20 et 30 m au-dessus des fonds actuels et les coupe de leurs régions-sources, escarpements ou inselbergs situés jusqu'à 20-30 km en amont. Cette dissection, similaire à celle des sédiments Barreiras, peut suggérer une corrélation stratigraphique et génétique entre les deux ensembles de dépôts.

Les sédiments Barreiras reposent sur le socle altéré du piémont côtier, mais recouvrent aussi en discordance les sédiments d'âge Crétacé supérieur du bassin Potiguar. Réduits à de larges vestiges disséqués et déconnectés de leurs régions-sources, ces dépôts continentaux ou marins d'âge Néogène (Arai, 2005) et d'épaisseur limitée (10-80 m) sont doucement inclinés vers la mer. Dans l'intérieur, des couches de sable argileux rougeâtres à blancs contiennent des cailloutis quartzeux en quantité limitée, surmontant des lits plus argileux. Dans les falaises côtières, plusieurs affleurements montrent aussi des dépôts grossiers, surtout aux environs des embouchures actuelles des fleuves et des montagnes proches de la côte (ouest de Fortaleza).

Ces dépôts appartiennent à un système de piémont dont le profil amont, façonné dans le socle, se prolonge par la surface des « tabuleiros ». Le substrat altéré de ces derniers, parfois exposé sur la côte et au fond des vallées principales, est souvent plat, mais il peut aussi être irrégulier, avec des collines arrondies et des inselbergs dépassant de la couverture. La surface composite ainsi définie, dont le façonnement final s'est accompagné de l'épandage des dépôts Barreiras sur les parties distales, est diachronique. Cette géométrie

implique que cette surface, déjà largement inscrite dans la retombée continentale flexurée avant le Néogène, ait subi une évolution ultérieure en régime acyclique, telle qu'on peut la décrire dans les parties distales des zones de soulèvement flexural où l'interaction entre un soulèvement lent et les variations du niveau de base ne permet qu'une regradation par « éch-planation » et reste insuffisante pour déclencher l'encaissement des cours d'eau jusqu'à une dissection finale liée à d'autres conditions (Peulvast et Claudino Sales, 2005).

3. Interprétation et discussion

3.1 Des dépôts corrélatifs des derniers stades d'évolution des escarpements et des piémonts

Les dépôts du Groupe Barreiras constituent la partie émergée d'un prisme détritique et carbonaté d'âge Miocène supérieur et plus récent (Pessoa Neto, 2003). Mesurée sur un profil synthétique tracé dans le bassin Potiguar, l'épaisseur moyenne de ce prisme (environ 150 m, sur une bande de 100 km de largeur) représente au maximum 50 m d'érosion verticale si on en rapporte la source à une bande de 300 km de largeur (largeur moyenne de la surface Sertaneja, avec ses diverticules intérieurs, dans le bassin-versant du Jaguaribe) (Peulvast *et al.*, 2006 a). La tranche érodée est probablement plus mince dans les régions côtières et à l'ouest de Fortaleza. Ces chiffres modestes, également suggérés par l'identification de paléosurfaces d'âge pré-Barreiras à pré-Cénomaniens sur certaines parties de la basse surface, impliquent des taux d'érosion et sans doute de soulèvement restés comparables aux valeurs moyennes mesurées sur l'ensemble des temps post-crétacés.

Cependant, des accroissements temporaires de l'érosion, enregistrés par la prédominance de faciès détritiques dans la sédimentation néogène, ont pu être induits par des facteurs climatiques, tectoniques ou eustatiques. De nombreuses fluctuations climatiques de courte durée, essentielles pour la regradation des basses surfaces par éch-planation et leur extension vers l'intérieur (Peulvast et Claudino Sales, 2004), se sont produites depuis le Miocène (Harris et Mix, 2002). L'identification de cônes de débris grossiers sur les pédiments disséqués, en contrebas de hauts escarpements portant les marques d'une érosion profonde et d'une forte démolition des corniches rocheuses (fig. 4), ainsi que la présence d'épaisses terrasses caillouteuses le long des cours moyens et inférieurs des fleuves reflètent probablement l'occurrence de périodes favorables à une ablation poussée des horizons profonds des sols et même à une érosion des versants et surfaces planes de roche nue. Il en résulte un abaissement (« downwearing ») généralisé, quoique modéré, et localement des phénomènes de recul (« backwearing »).

3.2 Conditions d'évolution récente des escarpements et des piémonts

De tels événements ont pu se produire en conditions de sécheresse, avec des couvertures végétales discontinues, permettant l'intervention de coulées de débris et de crues torrentielles. Ils ont été suivis de stades de dissection dans des périodes de climat plus humide et/ou de bas niveau marin. La diversité des combinaisons de séquences, déjà soupçonnée dans l'origine des dépôts Barreiras (Pessoa Neto, 2003), reflète une histoire environnementale complexe au Cénozoïque supérieur. Bien que les baisses de niveau marin répétées du Pléistocène expliquent probablement la dissection finale des piémonts (Peulvast *et al.*, 2006 a), cette complexité et la courte durée des oscillations climatiques et eustatiques n'ont pas été favorables à une érosion régressive continue jusqu'aux escarpements, dans des roches dures et faiblement altérées, ce qui explique la déconnexion fréquente par rapport aux vallées principales.

Comme le montre la position des dépôts d'âges variés qui reposent sur les piémonts et les surfaces exhumées près des escarpements, le recul est aussi resté limité dans la même période, même à la tête ou au niveau des knick-points des rares gorges connectées aux vallées encaissées dans la basse surface (Baturité). Les principaux stades de recul à partir des failles ou flexures maîtresses ont dû se produire plus tôt, ce qui suggère que la plupart des escarpements étudiés, rectilignes ou sinueux, contrôlés ou non par des structures locales, sont principalement des formes héritées, nées pendant le rifting créacé ou plus tard (ouverture océanique, soulèvement flexural ultérieur), localement enfouies puis exhumées (épaule sud du rift Potiguar) ou maintenues, retravaillées ou exagérées au cours d'un soulèvement lent et persistant depuis le Crétacé supérieur. Les différences de sinuosité reflètent plus des facteurs structuraux que des différences d'âge. La distribution des paléosurfaces sur les piémonts, en particulier dans les régions côtières, s'explique par les conditions morphotectoniques (soulèvement modéré), favorables à la modération de la dissection et des reculs d'escarpements après le rifting, et aux phénomènes de résistance morphologique (Brunsden, 1993) liés au découplage entre escarpements et axes de drainage récemment encaissés dans les piémonts.

Conclusion

Seuls quelques uns des escarpements étudiés, escarpements de faille résiduels ou escarpements de ligne de faille, montrent de forts contrôles structuraux. La plupart d'entre eux, rectilignes ou sinueux, plus ou moins contrôlés par des structures locales, sont essentiellement hérités du rifting créacé ou d'événements ultérieurs. Suivie d'une dissection peu poussée et d'une activité érosive épisodique dans les escarpements, la sédimentation détritique néogène reflète probablement l'occurrence de périodes sèches ayant

permis l'ablation poussée de sols épais et l'érosion de versants et de surfaces de roche nues. Les stades de dissection sont intervenus dans des périodes de climat plus humide et/ou de bas niveau marin. Seul un recul modéré ou local a pu affecter ces escarpements, associé à un « downwearing » également modéré sur les basses surfaces. La modestie des volumes de sédiments néogènes implique des vitesses de soulèvement et d'érosion restées faibles jusqu'à l'Actuel, et favorables à des effets de résistance morphologique et lithologique des paysages.

BIBLIOGRAPHIE

- ARAI M., 2005. – « A grande elevação eustática do Mioceno: a verdadeira origem do Grupo Barreiras ». X Congresso da Abequa, *Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*, Guarapi (ES), 9 a 16 de outubro de 2005, 6 p.
- BRUNSDEN D., 1993. – « The persistence of landforms ». *Z. für Geomorphologie*, Suppl.-Bd. 93, pp. 13-28.
- HARRIS S.E., MIX A.C., 2002. – « Climate and tectonic influences on continental erosion of tropical South America, 0-13 Ma ». *Geology*, 30, 5, pp. 447-450.
- MATMON A., BIERMAN P., ENZEL Y., 2002. – « Pattern and tempo of great escarpment erosion ». *Geology*, 30, 12, pp. 1135-1138.
- PESSOA NETO O.C., 2003. – « Estratigrafia de seqüências da plataforma mista neogênica na Bacia Potiguar, margem equatorial brasileira ». *Rev. Bras. Geociências*, 33, 3, pp. 263-278.
- PEULVAST J.-P., CLAUDINO SALES V., 2004. – « Stepped surfaces and palaeolandforms in the northern Brazilian 'Nordeste': constraints on models of morphotectonic evolution ». *Geomorphology*, 62, pp. 89-122.
- PEULVAST J.-P., CLAUDINO SALES V., 2005. – « Surfaces d'aplanissement et géodynamique ». *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, pp. 249-274.
- PEULVAST J.-P., CLAUDINO SALES V., BÉTARD F., 2006 a. – « Reconstruindo a evolução de uma margem continental passiva: um estudo morfogenético do Nordeste brasileiro ». In: J. Borzachiello da Silva, L.C. Lima., D.Elias (dir.), *Panorama da geografia brasileira*, Annablume, São Paulo, pp. 277-317.
- PEULVAST J.-P., CLAUDINO SALES V., BEZERRA H., BÉTARD F., 2006 b. – « Landforms and neotectonics on a passive margin: the equatorial side of northeastern Brazil ». *Geodinamica Acta*, 19/1, pp. 51-71.