

LES GRANDES SURFACES CONTINENTALES TERTIAIRES DES RÉGIONS CHAUDES SUCCESSION DES TYPES D'ALTÉRATION

Georges GRANDIN (1), Médard THIRY (1)

(1) École des Mines de Paris — Centre de Géologie Générale et Minière, 35, rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex

RÉSUMÉ

Les surfaces d'aplanissement climatiques continentales sont surtout connues par leurs témoins cuirassés, difficiles à dater.

Le cuirassement bauxitique affecte des pénéplaines au cours de périodes de climat chaud et humide. Le Tertiaire ne connaît qu'une seule période de bauxitisation généralisée qui s'achève à l'Oligocène inférieur et dont les témoins sont rencontrés jusqu'aux latitudes 40° N et 40° S.

Le cuirassement ferrugineux s'établit sur des systèmes de glacis ou des pédiplaines. Une grande période de ferruginisation affecte la zone intertropicale entre le Miocène supérieur et le Pliocène supérieur.

L'encroûtement siliceux affecte des pédiplaines qui tronquent des altérations kaoliniques et passent aux surfaces de dépôts des bassins. Deux grandes périodes de silicifications sont connues au Tertiaire, l'une à l'Éocène supérieur-Oligocène, l'autre entre le Miocène supérieur et le Villafranchien.

Cuirasses ferrugineuses et silcrètes sont des formations de climat chaud à saisons contrastées s'inscrivant respectivement dans une séquence de l'aride vers l'humide et dans une séquence de l'humide vers l'aride.

MOTS-CLÉS : Période climatique — Surface d'aplanissement — Bauxite — Cuirasse ferrugineuse — Silcrète.

ABSTRACT

THE MAJOR TERTIARY CONTINENTAL SURFACES OF WARM AREAS SUCCESSION OF THE TYPES OF WEATHERING

The climatic flatterling landsurfaces are principally known by their remnant crusts, difficult to date.

The bauxitic crust affects penepains during warm and wet periods. Only one period of generalized bauxitisation is known during the Tertiary, it ends on the early Oligocene and evidences of its are found as far as latitude 40° (north and south).

Iron crusts take up on pediments systems and pediplains. A long period of ferruginisation affects the tropical area between early Miocene and late Pliocene.

The siliceous capping takes place on pediplains which truncate kaolinic weathering profiles and extend on the deposit surface of the basins. Two major tertiary periods of silicification are recognized: the first one during late Eocene-Oligocene, the other one between late Miocene and Villafranchian.

Iron crusts and silcrete formations are typical of warm and seasonly contrasted climates, but reveal respectively an aride to wet and a wet to aride transition.

KEY WORDS : Climatic periods — Landsurfaces — Bauxite — Ironcrust — Silcrete.

РЕЗЮМЕ

ОБШИРНЫЕ ТРЕТИЧНЫЕ КОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ПРОСТРАНСТВА ТЕПЛЫХ ОБЛАСТЕЙ; ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ТИПОВ ИЗМЕНЕНИЯ

Континентальные климатические эрозионные поверхности прежде всего известны по их трудно датированным затвержденным платформам.

Образование бокситовой корки касается пенемены в периоды теплого и влажного климата. Третичный период претерпевает лишь один период обобщенной бокситизации, который кончается во время нижнего олигоцена и остатки которого встречаются до широт 40 С и 40 Ю.

Образование железистой корки имеет место на системах откосов или на педиплепах. Долгий период ожелезнения влияет на межтропическую зону от верхнего миоцена до верхнего плиоцена.

Образование кремнистой корки происходит на педиплепах, пересекающих каолиновые эрозийные почвы и касаются поверхностей осадков бассейнов. Два главных периода окремнений установились во время третичного периода, первая в течение верхнего эоцена и олигоцена, а вторая от верхнего миоцена до виллафранского.

Железистые панцыри и кремнистые корки являются формациями жаркого климата с контрастирующими сезонами, соответственно относящимися к последовательности от жара до влаги и к последовательности от влаги до жара.

Руководящие слова : Климатический период — Эрозийная поверхность — Боксит — Железистый панцырь — Кремнистая корка.

1. INTRODUCTION

Les grandes surfaces continentales, correspondant à des aplanissements d'origine climatique, sont largement développées dans les zones tropicales. Elles sont en nombre limité. Altérées, érodées, déformées, enfouies, elles laissent des témoins plus ou moins exigus dont le modelé et les matériaux associés sont rebelles à la datation absolue.

Sur les socles émergés stables, ces témoins sont restés en permanence des éléments de la surface topographique. Lorsque des matériaux indurés les protègent, lorsqu'une néotectonique positive permet à la dissection de les étager, lorsqu'une attention suffisante est portée à la reconstitution des principaux traits du réseau hydrographique à l'époque de l'aplanissement, l'identification des témoins de même génération et l'établissement d'une chronologie relative des surfaces est relativement aisée. Mais il n'y a pas de possibilité d'obtenir une datation, même imprécise. C'est le cas de la dorsale guinéenne ou du Quadrilatère Ferrifère brésilien.

Sur les marges émergées d'un bassin de la périphérie du socle, l'âge des sédiments les plus récents auxquels une surface imprime sa marque est une première référence. De même sur des épanchements volcaniques, avec l'âge des dernières coulées. Mais les matériaux de comblement ou d'épanchement offrent un modelé déjà plat aux agents atmosphériques. S'il n'y a pas de continuité topographique entre les marques observées sur ces matériaux et des témoins de la surface sur un socle pétrographiquement hétérogène, on peut ne dater qu'un épisode tardif d'un long processus, par exemple une étape d'altération d'une surface et non son aplanissement. Le problème se pose pour les altérations des trapps basaltiques du Deccan ou des phosphates de la côte sénégalaise.

Enfin, sédiments ou roches volcaniques peuvent

recouvrir une surface et les matériaux associés. Là encore, la date-limite supérieure obtenue peut être celle, non de la fin d'un processus, mais d'une étape dont la marque dans le modelé est déjà suffisante pour être observée ultérieurement sous le recouvrement. C'est seulement lorsque sont envoyés, avec la surface, les traces d'une première dissection que l'on est assuré d'un âge postérieur à la fin de la période d'aplanissement.

Nécessaire pour un réel encadrement chronologique, le cas idéal serait celui d'une surface développée à la fois sur un socle et sur une couverture sédimentaire dont des témoins jalonnaient une flexure, permettant aux plus affaissés d'entre eux d'avoir été portés sous le niveau de la mer et recouverts de sédiments. Ce cas se présente au Surinam (fig. 1), avec les bauxites exploitées d'Onverdacht formées sur des sédiments paléocènes à éocènes disséquées en bas-plateaux et recouvertes par une série miocène. A l'amont, sur les mêmes sédiments, les bauxites de Moengo sont restées en surface et se présentent en plateaux d'altitude 40 à 100 m. Dans l'arrière-pays les cuirasses bauxitiques de Backhuis entre 325 et 420 m et celles des plateaux de Nassau entre 500 et 550 m sont situées sur le socle précambrien (ALEVA, 1979).

A défaut de ce cas idéal, l'attention des auteurs se porte sur la nature des sédiments corrélatifs des événements qui marquent le continent. L'âge des formations à dominance chimique avec des carbonates, des argiles néoformées, des cherts, est utilisé pour dater des périodes d'altération profonde, sous climat chaud et humide, des socles tectoniquement stables voisins (ERHART, 1956 ; MILLOT, 1967). Par extension il est utilisé pour dater la formation des pénéplaines correspondantes, à réseaux hydrographiques ramifiés, que l'altération contribue à façonner (MICHEL, 1959). Les formations détritiques de type sidérolithique, sableuses, à kaolinite héritée,

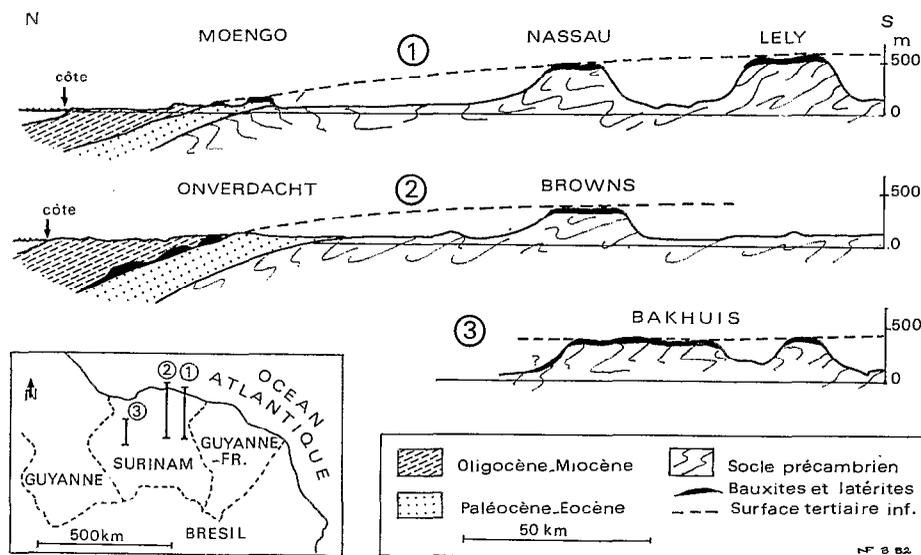


Fig. 1. — Disposition des bauxites et des latérites au Surinam (d'après ALEVA, 1979)

ferrugineuses, sont considérées contemporaines de périodes de dissection des manteaux d'altérites sous climat contrasté. A la fin de ces périodes, lorsque l'on tend vers l'aridité se développent des systèmes de glacis, zones de transit des eaux et des produits d'érosion en chenaux instables ou en nappes, associés à un réseau hydrographique réduit aux drains majeurs.

Il faut bien distinguer avec MILLOT (1980) les « immenses aplanissements des pays tropicaux et désertiques et spécialement les aplanissements des vieux socles cristallins » de « toutes sortes de surfaces aplanies qui n'ont rien à voir avec la pédogenèse » ni avec les phénomènes continentaux d'ablation. Il faut les distinguer notamment des surfaces d'abrasion marine, des grandes plaines d'accumulation sédimentaire, ainsi que des modèles polygéniques peu accusés.

Dans les régions tropicales, aussi bien des hauts-plateaux dont la mise en relief est ancienne que des bas-pays sans inselberg peuvent résulter de l'effet de périodes successives d'aplanissement et de dissection, dont les marques sont ailleurs plus profondes ou mieux étagées. Cela mène à des interprétations divergentes (RUHE, 1958 ; LEPERSONNE, 1958 ; MICHEL, 1973 ; LEPRUN, 1979). Pour les éviter, l'étude des aplanissements gagne à être menée sur des socles pétrographiquement variés.

2. BAUXITES ET CUIRASSES BAUXITIQUES DES PÉNÉPLAINES

2.1. Paléogéographie des bauxites

Il faut distinguer deux catégories de gîtes bauxi-

tiques. La première concerne des roches mères particulières par leur faible teneur en silice, leur richesse en aluminium, leur texture vitreuse, leur porosité forte : calcaires et marnes, matériaux argileux, syénites, basaltes... En milieu bien drainé dès que la pluviométrie et les températures moyennes sont élevées, mais sans avoir besoin de conditions morphoclimatiques très spécifiques, on assiste en un temps assez bref, à la production d'altérites alumineuses avec des quantités variables d'oxydes de fer et d'argiles kaoliniques. Ces matériaux restent le plus souvent à l'état particulaire, ou peu consolidé. L'ablation les disperse facilement et la plupart de ceux qui sont observés sont récents :

— gîtes des atolls comme l'île Rennell, dans les Salomons, où une crête côtière de récifs soulevés alimente une dépression de résidus de décalcification formant des sols à 46-52 % d'alumine (DE WEISSE, 1970) ;

— gîtes sur basaltes alcalins d'Hawaii où des altérites gibbsitiques se forment, notamment sur les clinkers de refroidissement de coulées dont l'âge s'échelonne entre 10.000 ans et 1,5 millions d'années (ALLEN et SHERMAN, 1965) ;

— gîtes sur des basaltes miocènes d'Oregon (ALLEN, 1948) ou de Vogelsberg en Allemagne (CLEVERSON, 1973), altérites alumineuses intercalées entre des coulées basaltiques oligocènes à Antrim en Irlande ;

— gîtes karstiques à mur calcaire oligocène supérieur de République Dominicaine (GOLDICH et BERGQUIST, 1947).

La seconde catégorie de gîtes concerne des roches extrêmement variées, y compris des rhyolites, des granites, des schistes et des grès à forte proportion de quartz, mais elle n'apparaît qu'en un nombre discret de périodes géologiques. Il s'agit d'horizons d'altération latéritique, associés à des surfaces pénéplanées, ou de produits remaniés des altérites de telles surfaces, intercalés dans des sédiments continentaux proximaux. En marge de bassins marins, des altérations alumineuses contemporaines affectent des sédiments de hauts fonds émergés calcaires, argileux ou phosphatés (FLICOTEAUX et TESSIER, 1971).

Les accumulations correspondantes sont des masses indurées d'alumine et d'oxydes de fer pouvant atteindre des épaisseurs de 15 à 20 m et des extensions considérables. Sur les socles stables, elles se présentent généralement sous forme de cuirasses de plateaux. Cette situation en altitude a mené à attribuer leur genèse à des conditions de bon drainage. Mais de nombreux auteurs ont décrit les surfaces ondulées de ces plateaux, avec des interfluvés et des vallées, manifestant l'existence, sur les surfaces dont ils sont les témoins, de réseaux hydrographiques ramifiés de bas-pays façonnés sous des climats à forte pluviosité (PUGH, 1966 ; VALETON, 1972 ; GRANDIN, 1976 ; ALEVA, 1979). La structure pisolithique est fréquente, supposant un milieu engorgé une partie de l'année (VALETON, 1967 ; BOULANGE, 1973 et thèse en cours). Lorsque les plateaux sont assez étendus ils comportent encore souvent des zones marécageuses (Kibi au Ghana, Orumbo-Bocca en Côte d'Ivoire, Nassau au Surinam). CATE (1964) envisage la formation de bauxites anciennes guyanaises dans un marécage côtier drainé par une nappe à décharge sous-marine, en accord avec les études des sols submergés de rizières qui montrent en milieu réduit, une augmentation de la mobilité de la silice et du fer par rapport à celle de l'aluminium et la possibilité d'une désilicification. QUANTIN (1974) affirme que la permanence de l'hydratation favorise la cristallisation de la gibbsite et gêne celle des argiles et des hydroxydes de fer.

La mise en relief des cuirasses bauxitiques ne modifie guère leur composition, des encroûtements ferrugineux pouvant toutefois se former à leur partie supérieure, lorsque le profil cuirassé conserve des horizons meubles superficiels. En bordure de bassin, à l'opposé, une transgression ou un effondrement peut avoir provoqué leur enfouissement sous des sédiments, détritiques sablo-argileux. Des ressilicifications partielles sont alors observées (NICOLAS *et al.*, 1969 ; LAJOINIE et LAVILLE, 1979), elles existent parfois dans des profils bauxitiques non recouverts (GRUBB, 1963).

Dans des zones tectoniquement trop actives pour accumuler les effets de l'altération bauxitisante sur

des surfaces d'aplanissement, les gisements de bordure de bassin, altérites autochtones de sédiments émergés ou produits d'altération colluvionnés, peuvent témoigner seuls d'une période de bauxitisation.

2.2. Les surfaces bauxitisées pré-tertiaires (fig. 2 et 3)

Dans l'Europe méditerranéenne, au Crétacé Moyen, des gîtes bauxitiques se développent sur des zones émergées carbonatées (de LAPPARENT A. F., 1950 ; GUIEUX et ROUSSET, 1978 ; LAVILLE, 1981 ; BARDOSSY, 1981). Karstiques ou le plus souvent karstifiés, ils sont considérés comme para-autochtones (NICOLAS et LECOLLE, 1968 ; LAJOINIE et LAVILLE, 1979), ou comme autochtones (de LAPPARENT J., 1930 ; DENIZOT, 1961 ; COMBES, 1969 ; GUENDON, 1981). A la même époque on observe, sur les socles stables des régions tropicales et subtropicales, une surface dite gondwanienne (KING, 1967), à cuirasse alumineuse. Ses témoins sont nombreux en Afrique occidentale : Fouta-Djalon, plateau Mandingue, Monts Loma, Nimba ; ils existent au Nigeria, au Cameroun, en Ouganda et au Malawi, à Madagascar (DIXEY, 1937, 1958 ; DRESCH, 1957 ; LECLERC *et al.*, 1955 ; JAEGER, 1953 ; PUGH, 1954 ; BISHOP, 1966 ; BATTISTINI, 1968 ; BOURGEAT, 1972). Au Sénégal MICHEL (1978) attribue la formation de cette surface à la période Albien-Cénomanién inférieur.

D'autres périodes de pénéplation et de bauxitisation précèdent celles du Crétacé Moyen. Au Dévonien Inférieur, et au Carbonifère, elles ont donné des gîtes en Pologne, en U.R.S.S. (Timan méridional et Oural), en Chine, en Amérique du Nord (Pennsylvanie et Missouri) ; puis au Permian-Trias et au Jurassique Moyen en Yougoslavie, en Turquie, au Vietnam et au Cambodge, en Australie du Sud (SAURIN, 1963 ; KRICOV, 1965 ; GUTKIN *et al.*, 1969 ; De PEYRONNET, 1969 ; SINKOVEC, 1970 ; NGUYEN ANH TUAN, 1971 ; VALETON, 1972 ; DAILY *et al.*, 1974 ; BARDOSSY, 1981).

2.3. La surface bauxitique éocène (fig. 2)

Après le Crétacé Moyen, on ne connaît plus qu'une grande période d'aplanissement accompagnée de bauxitisation, au Tertiaire Inférieur. La majeure partie de la production mondiale de bauxite provient des gisements en exploitation. Des témoins de cette surface cuirassée sont présents en Afrique, au Mali, au Malawi, en Inde, en Indonésie et Malaisie, en Australie, dans les Guyanes, au Brésil, aux États-Unis, en U.R.S.S. (VAN BEMMELLEN, 1941 ; MACKENZIE *et al.*, 1952 ; HARDER, 1952 ; HILL, 1955 ; BRUCKNER, 1957 ; GORDON *et al.*, 1958 ; CHOWDHURY R., 1958 ; FRATSCHNER, 1960 ; WOLFENDEN, 1961 ; HUNTER, 1961 ; WAGRENIER, 1961 ; LEMOINE *et al.*, 1961 ; EVANS, 1965 ; GRUBB, 1963, 1970 ; PATTERSON, 1967 ;

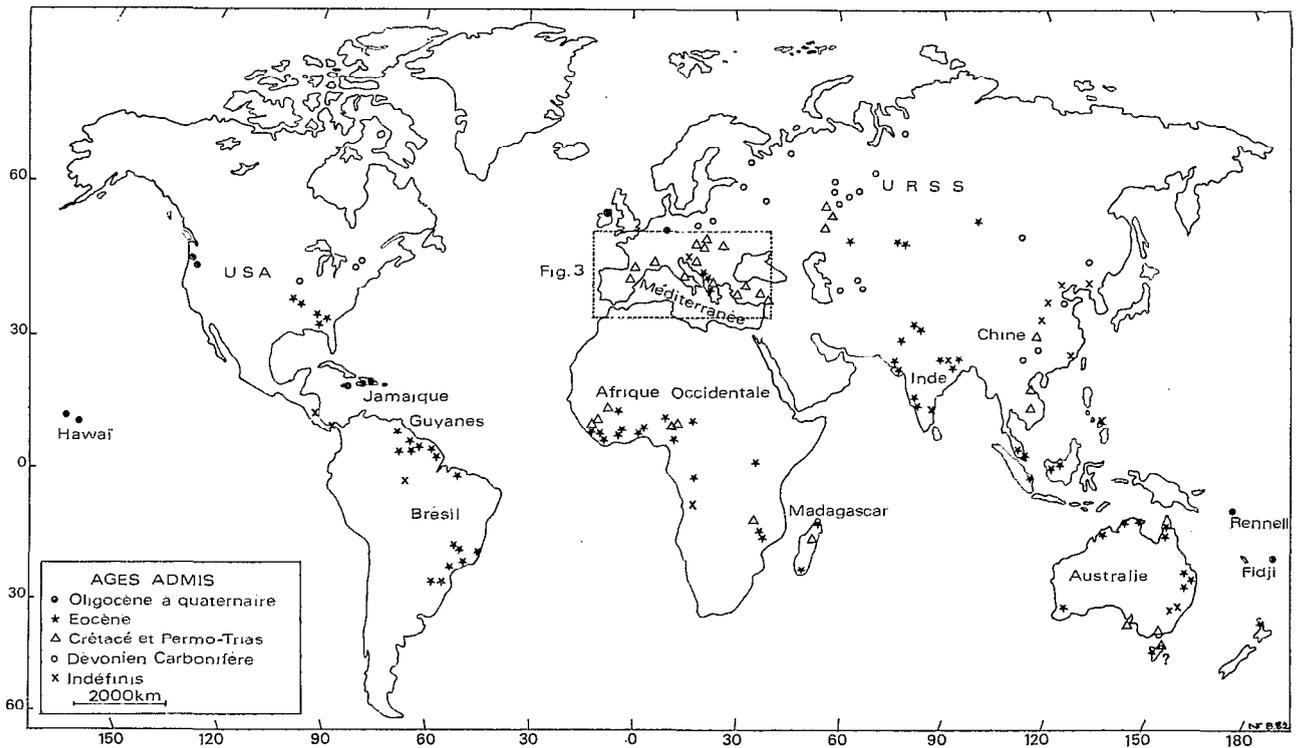


FIG. 2. — Distribution des bauxites dans le monde

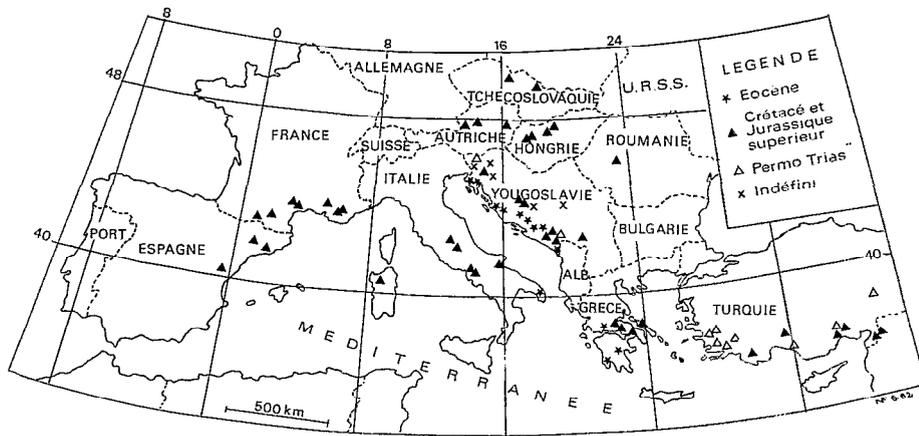


Fig. 3. — Distribution des bauxites en Europe alpine (d'après VALETON, 1973)

STRAKHOV, 1967 ; VALETON, 1967 ; BOULANGE, 1970 ; MICHEL, 1978 ; GRAS, 1970 ; ALEVA, 1981). Leur répartition se fait dans un intervalle de latitude de 40 à 50°, débordant la zone tropicale actuelle vers le nord en Amérique (35° N en Arkansas) et vers le sud en Australie (plus de 40° S en Tasmanie). Des

gisements formés sur des sédiments éocènes comme les gisements sur calcaires de la Jamaïque qui n'épousent pas une surface karstique irrégulière, correspondent à la même période climatique.

Il faut noter toutefois que la plupart des cuirasses bauxitiques de la surface éocène ne sont pas exploi-

tables soit parce qu'elles contiennent trop d'oxydes de fer (SABOT, 1954), soit parce que leur tonnage est trop faible ou leur situation géographique défavorable. La distribution spatiale des gisements formés à une époque ne donne ainsi qu'une limite inférieure de l'extension de la surface d'aplanissement correspondante. A cette époque les climats tropicaux s'étendent jusqu'aux latitudes élevées. En Europe, ils sont à saisons contrastées et correspondent durant l'Éocène Inférieur et Moyen à la mise en place du Sidérolithique avec son énorme tonnage d'argiles kaoliniques remaniées (en Aquitaine, Bassin de Paris, Jura soleurois et bavarois, Hesse...) ainsi que les gisements de fer de type bohnerz et les grandes masses de sables (FLEURY, 1909 ; KULBICKI, 1956 ; STEINBERG, 1968 ; BUHMANN, 1974 ; THIRY, 1981).

Les bauxites amazoniennes du Brésil, notamment celles de Trombetas avec leur milliard de tonnes de réserve, sont une exception au fait que les gisements d'alumine postérieurs au Tertiaire Moyen sont des sols ou des altérites non indurés formés sur des roches particulières (première catégorie de gisements précédemment décrite). Les bauxites de Trombetas se sont formées sur des sédiments argilo-sableux considérés comme pliocènes. Elles occupent des plateaux d'alti-

tude 130-180 m. Leur profil est épais et diversifié avec 10 m d'horizons supérieurs kaoliniques, 2 à 6 m de cuirasse alumineuse exploitable sous un horizon pisolithique induré ferrugineux et plusieurs dizaines de mètres de matériaux kaolinisés (GRUBB, 1979 ; ALEVA, 1981). On s'étonne de ne trouver aucune bauxite de cet âge sur les terrains anciens du bouclier guyanais et d'observer un profil évolué, sur des plateaux ayant subi une dissection profonde. L'âge de la série détritique qui sert de roche-mère (série Barreiras) pourrait être à remettre en question.

3. CUIRASSES FERRUGINEUSES ET SYSTÈMES DE GLACIS

3.1. Dissection de la surface bauxitique de l'Oligocène au Pliocène Inférieur

Dans l'intervalle de temps qui va du début de l'Oligocène au Pliocène Inférieur inclus, une ample érosion mécanique a lieu, sous l'effet de soulèvements tectoniques et de périodes de climats à saisons contrastées. Sur les socles anciens la surface éocène bauxitisée est disséquée en plateaux. Des versants

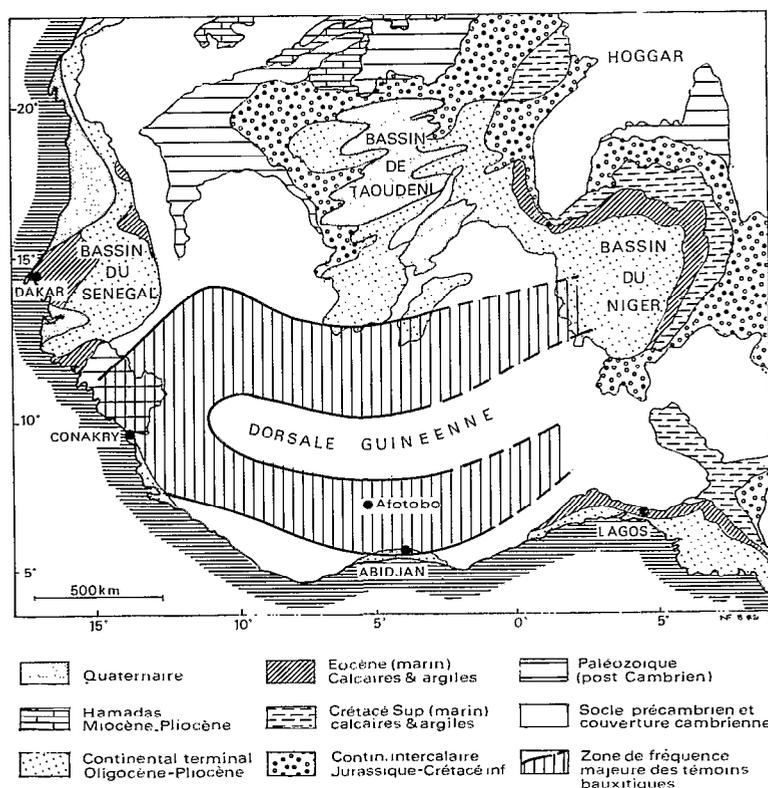


FIG. 4. — Décharges détritiques autour du bouclier ouest africain et disposition des cuirasses bauxitiques

rectilignes de 30 à 40 % de pente, atteignant 100 à 150 m de dénivellation et couverts d'éboulis bauxitiques localement cimentés en cuirasse bréchique par des oxydes de fer de l'alumine et des argiles, sont observés en Afrique, en Inde, en Guyane (CHUBERT, 1957; TRICART, 1961; NICOLAS et BELINGA, 1969; ESCHENBRENNER et GRANDIN, 1970). A la périphérie des socles, des décharges détritiques de type sidérolithique se mettent en place. En Afrique c'est le Continental terminal (fig. 4), sablo-argileux avec des concrétions ferrugineuses, voire des oolithes au Niger oriental (FAURE, 1962). Deux termes discordants sont souvent distingués (RADIER, 1959; SLANSKY, 1962) l'un oligocène, l'autre plus grossier mio-pliocène, connu au Sénégal sur le Miocène marin. Le climat est à saisons contrastées sans que le détail de son évolution soit bien connu. Dans certains massifs intérieurs, des climats assez humides subsistent, permettant la formation d'un modelé diversifié

d'érosion de la surface éocène, avec des croupes convexes où se poursuit une altération bauxitisante. Un événement oligocène supérieur à miocène inférieur semble assez général : discordance entre les deux décharges du continental terminal africain, surface d'aplanissement oligocène supérieur du Brésil et de Guyane, silicifications oligocènes d'Australie.

3.2. Les glacis cuirassés (fig. 5)

Ce n'est qu'à la fin de cette période de dissection, au Pliocène Inférieur, que la tendance aride s'accroît, menant à la pédiplanation. Des glacis se développent sur les piémonts des reliefs bauxitisés. Ils passent en continuité à la surface supérieure du Continental terminal au Niger (GAUUD, 1967). L'ensemble constitue le système d'aplanissements intermédiaire. Il ne s'agit plus d'une pénéplaine à réseau hydrographique ramifié, mais d'un système

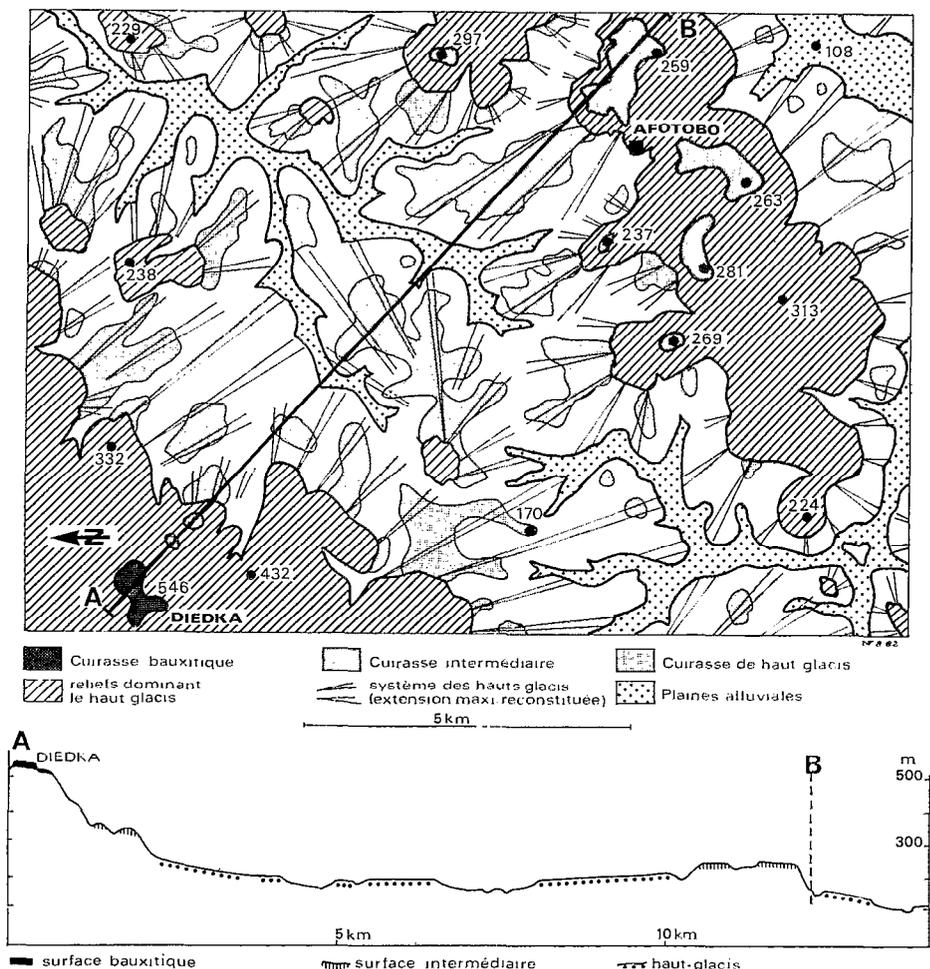


FIG. 5. — Afotobo (Côte d'Ivoire centrale). Les surfaces d'aplanissement cuirassées

de glaciaires, zones d'épandage et de transit des eaux ruisselées et des matériaux arrachés aux versants (DRESCH, 1957 ; TRICART, 1969), dans un paysage à couverture végétale discontinue, où le réseau hydrographique est réduit aux drains majeurs. Seconde et dernière grande surface tertiaire, le système d'aplanissements intermédiaire, avec le retour de climats plus humides au Pliocène Moyen, est cuirassé par des oxydes de fer. La cuirasse intermédiaire se distingue, par ses faciès, des cuirasses ferrugineuses postérieures (GAYAUD, 1967 ; BOULET, 1970 ; BOULVERT, 1971 ; GRANDIN, 1976). Elle est souvent décrite sans que sa spécificité soit indiquée, par exemple en Inde (FERMOR, 1909 ; VALETON, 1967).

La période humide est suffisamment longue pour provoquer une altération kaolinique profonde, transformant les roches en lithomarge argileuse jusqu'à une vingtaine de mètres sous la surface.

Le début du Quaternaire verra de nouvelles phases d'aridification menant à la constitution d'un autre système de glaciaires, nommé haut-glaciaire en Afrique

occidentale (VOGT, 1959 ; MICHEL, 1959), cuirassé et altéré à son tour. Près de Dakar, une cuirasse de ce haut-glaciaire est recouverte par une coulée de basanite dont l'âge est d'un million d'années (NAHON et DEMOULIN, 1970). Un système d'aplanissements à cuirasses ferrugineuses considéré comme quaternaire ancien est également décrit dans d'autres régions tropicales, au Nigeria ou au Gabon, au Cambodge ou en Australie (RUHE, 1956 ; MULCAHY, 1960 ; VOGT, 1962 ; DE SWARDT, 1964 ; HERVIEU, 1970 ; FRITSCH, 1978 ; CARBONNEL, 1972). Il correspond à la dernière grande surface d'aplanissement climatique dont la marque soit assez générale dans la zone tropicale des divers continents.

4. LES ENTABLEMENTS SILICIFIÉS

Des silicifications pédologiques sont connues sur d'importantes surfaces continentales au Tertiaire.

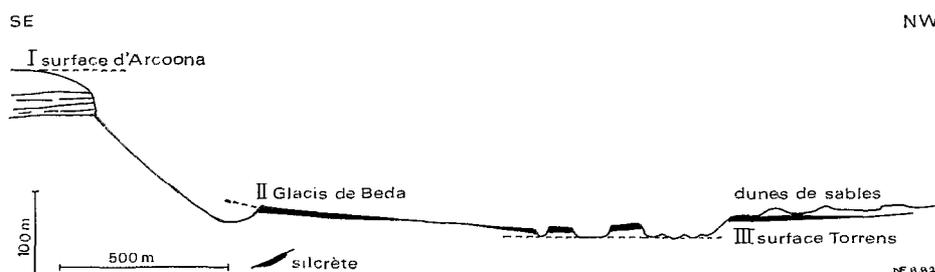


FIG. 6. — Bada Valley (Australie du Sud). Disposition des silerètes sur le glaciaire pédiplané de Bada (d'après HUTTON *et al.*, 1972).

Elles affleurent bien dans les régions arides actuelles, en raison de conditions favorables à leur dénudation. Ce sont les silerètes d'Australie, les silicifications sahariennes, les silerètes d'Afrique du Sud, enfin divers grès et conglomérats lustrés, quartzites et meulière de l'Europe du nord-ouest. Trois aspects méritent d'être examinés avec plus de détail : les conditions géomorphologiques, les climats et les époques de leur mise en place.

4.1. Place géomorphologique des silicifications de surface

Des silicifications affectent très souvent des formations kaoliniques. En Australie ce sont soit des profils d'altération sur des roches cristallines ou des sédiments créacés, soit des sédiments sablo-argileux kaoliniques (LANGFORD-SMITH et DURY, 1965 ; WOPFNER, 1978). Ces silerètes sont liés à une surface pédiplanée ancienne (fig. 6), recoupant les profils

d'altération ; ils seraient préférentiellement installés dans des zones mal drainées, fonds de vallée et raccords aux interfluviaux (STEPHENS, 1971 ; HUTTON *et al.*, 1972 ; BARNES et PITT, 1976 ; WOPFNER, 1978). Les levés récents des cartes géologiques au 1/250.000 des régions arides de l'intérieur ont mis en évidence l'association des silerètes avec la bordure des bassins sédimentaires continentaux et les surfaces d'épandage qui leur sont liées (WOPFNER, 1974 ; BARNES et PITT, 1976 ; CALLEN, 1982). En Afrique du Sud, ce sont les « quartzites de surface » de la région côtière du Cap (FRANKEL et KENT, 1938 ; SMALE, 1973 ; SUMMERFIELD, 1981). Les faciès y sont tout à fait similaires à ceux d'Australie, ils surmontent souvent une profonde altération kaolinique et sont quelquefois associés à des encroûtements calcaires. Les silicifications couronnent une surface pédiplanée, qui recoupe les formations créacées. En Europe, les silicifications associées aux formations kaoliniques sont surtout bien représentées dans le Bassin de Paris.

Ce sont des quartzites et des conglomérats lustrés qui se mettent en place sur des glacis d'épandage détritiques, dans des paysages plats, à drainage ralenti, de bordure de bassin sédimentaire (THIRY *et al.*, 1983). Ces silicifications s'étendent aussi sur les marges des autres bassins tertiaires d'Europe du nord-ouest, sur la bordure du bassin d'Aquitaine (DANIOU, 1983), les Ardennes (BARROIS, 1878 ; GOSSELET, 1888, les hauts-plateaux des massifs schisteux de l'Eifel et du Westerwald (LANGE, 1912 ; FREYBERG, 1926), et enfin la basse vallée du Rhin et aux Pays-Bas (SCHUNEHANN, 1958 ; VAN DER BROEK et VAN DER WAALS, 1967) ; également dans le bassin de Londres (KERR, 1955 ; SUMMERFIELD et GOUDIE, 1980). En Amérique du Nord, dans le Wisconsin et en Minnesota, sont décrits des entablements disposés suivant une pédiplaine à laquelle sont associées de profondes altérations (HUGUES, 1963 ; DURY et HABERMANN, 1978).

D'autres types de silicifications sont plus ou moins étroitement associées à des formations carbonatées. Les premières reconnues ont été celles d'Afrique du Sud. C'est dans le désert de Kalahari qu'ont été décrits pour la première fois des paysages silicifiés,

reconnus ensuite en Zambie et Namibie (KALKOWSKY, 1901 ; LAMPLUGH, 1907 ; STORZ, 1928 ; KAISER, 1928). L'étude de ces formations a été reprise au Kalahari par SUMMERFIELD (1982) ; ce sont surtout des silicifications associées de plus ou moins près à des calcrètes. Les relations géomorphologiques indiqueraient une mise en place dans les points bas de paysages très stables. Au Sahara, ce sont les silicifications des Hamadas (AUZEL et CAILLEUX, 1949 ; ALIMEN et DEICHA, 1959). Elles sont établies le long des réseaux hydrographiques installés sur le vaste piémont, faiblement penté, adossé à la chaîne atlasique et qui occupe toute la marge septentrionale de la plate-forme africaine stable (CONRAD, 1969). Il s'y rattacherait les silicifications disposées suivant de grandes surfaces qui recourent les unités géologiques du Fezcha (MULLER-FEUGA, 1954).

En Europe, des silicifications de surface sont associées à des plate-formes structurales de calcaires lacustres, ce sont les meulière du bassin d'Aquitaine (MOULINE, 1983) et du bassin de Paris (THIRY *et al.*, 1983). Dans le bassin de Paris des silicifications affectent en même temps les formations argilo-sableuses disposées dans la même surface (fig. 7).

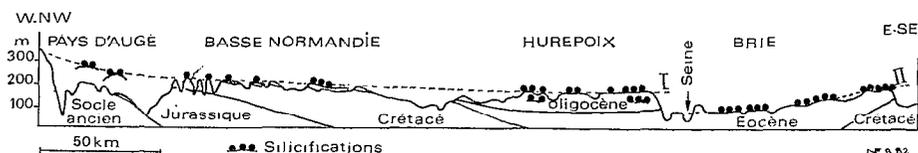


Fig. 7. — Bassin de Paris. Silicifications liées à l'épisode des meulière, disposées sur une surface polygénique dans l'Ouest et sur les plates-formes structurales des calcaires de Beauce (Hurepoix) et de Brie dans l'Est du bassin

Les tables de grès disposées au sein des sables, et liées à des niveaux de nappes phréatiques sont étudiées beaucoup moins souvent. C'est le cas des grès associés aux sables du Stampien du bassin de Paris (THIRY *et al.*, 1983) et vraisemblablement des silicifications liées aux affleurements des formations du Continental terminal au Sud du Sahara (RADIER, 1959 ; SOUGY, 1959). Elles sont parfois disposées en système de rides arquées, parallèles aux positions successives d'un rivage de lac, comme en Australie Centrale (AMBROSE et FLINT, 1981).

Enfin, il faut mentionner les silicifications liées aux affleurements des roches ultrabasiques, qui semblent montrer une certaine spécificité. Elles paraissent associées aux profondes altérations latéritiques des roches ultrabasiques, et sont connues en Afrique orientale (BASSETT, 1954) et au Brésil (MELFI *et al.*, 1980).

Il ressort de cet inventaire que les entablements silicifiés du Tertiaire correspondent à des paysages

plats, des marges de bassins sédimentaires. Souvent ces surfaces sont intercalées dans la série sédimentaire elle-même. Cette disposition, en concordance avec des dépôts sédimentaires ou en relation avec des surfaces d'altérations lessivantes profondes, indiquerait que les silicifications n'élaborent pas elles-mêmes les surfaces plates, mais qu'elles s'installent dans des paysages plats hérités.

4.2. Périodes de silicification et climats

C'est là une question délicate. Pour certains auteurs, l'âge des silcrètes est fixé à partir des critères géomorphologiques et leur présence utilisée comme indicateur climatique. Pour d'autres au contraire, l'époque de la silicification est fixée en fonction de l'évolution générale des climats au cours du Tertiaire. Très souvent les climats évoqués sont « spéculatifs » parce que basés sur des hypothèses concernant la genèse des silicifications, car on ne connaît pas de

silicifications dont le fonctionnement actuel soit démontré. Néanmoins, la plupart des auteurs s'accordent pour reconnaître la nécessité d'un climat alterné, la saison humide expliquant les structures d'illuviation et la mise en solution de la silice, et la saison sèche, la fixation de la silice par concentration des solutions sous l'effet de l'évapotranspiration.

En Australie, la reconnaissance de la série tertiaire et la systématisation des datations palynologiques ont permis de mettre en évidence l'interstratification de silicrètes dans des séries sédimentaires datées. On est ainsi amené à distinguer en Australie du Sud, outre une première période de silicification située dans l'intervalle Crétacé Supérieur-Paléocène, deux autres périodes majeures ; l'une entre l'Éocène Supérieur et l'Oligocène, l'autre entre le Miocène Supérieure et le Pléistocène Inférieur (BARNES et PITT, 1976 ; CALLEN, 1982). Ces deux périodes s'inscrivent dans 2 séquences climatiques connues par ailleurs à partir des études sédimentologiques et paléontologiques. Ce sont des climats chauds et humides à l'Éocène Inférieur (sédimentation à lignite et kaolinite) avec apparition d'une saison sèche marquée dès l'Éocène Supérieur (WOPFNER *et al.*, 1974). Au Néogène, une séquence similaire avec climats chauds et humides au Miocène Inférieur, apparition de périodes sèches dès le Miocène Moyen (sédimentation à dolomite et attapulgite), aboutit à une vraie aridification au Pléistocène (CALLEN, 1977).

Au Sahara, CONRAD (1969) rapporte les silicifications hamadiennes les plus importantes au Plio-Villafranchien et corrèle celles-ci avec un climat tropical à nuances sub-arides au passage d'une période à climat tropical assez humide vers un climat tropical semi-aride.

En Afrique du Sud, SUMMERFIELD (1981) s'appuie sur différents travaux pour corréliser la surface silicifiée de la région du Cap avec des sédiments marins et attribue un âge Mio-Pliocène à la silicification. En Amérique du Nord, les silicifications du Minnesota, Wisconsin et du bassin du Mississipi sont rattachées au Tertiaire Supérieur (DURY et HABERMANN, 1978). Au Brésil, des silicifications associées à l'altération des roches ultrabasiqes sur la surface Sud-Américaine se seraient mises en place lors d'un épisode climatique assez sec au Tertiaire inférieur (MELFI *et al.*, 1980).

En Europe, la chronologie des silicifications est bien établie au centre du Bassin de Paris. On y reconnaît au moins 2 épisodes majeurs (THIRY *et al.*, 1983) : une première silicification à l'Éocène qui apparaît paroxysmale à la limite entre Éocène Moyen et Supérieur ; un second épisode au Plio-Quaternaire à l'origine des meulière, et qui peut éventuellement débiter dès le Miocène. Le premier épisode s'inscrit dans une évolution climatique allant vers l'aridification avec climat chaud relativement humide, mais

périodes sèches déjà marquées (sédimentation détritique à kaolinite-smectite à caractère rhexistasique, lignites et encroûtements calcaires) (THIRY, 1981) passant à des climats toujours chauds mais plus arides (sédimentation calcaire, dolomite, gypse à attapulgite et sépiolite) (TRAUTH, 1977 ; CHÂTEAUNEUF, 1979). L'épisode éocène est également connu en bordure du Bassin d'Aquitaine (MOULINE, 1982) et il faut y rapporter les phénomènes d'opalisation dans les bassins rhodaniens (VALLERON, 1981). Enfin le second épisode serait également connu en bordure du Bassin d'Aquitaine (MOULINE, 1983 ; MEYER et CROUZEL, 1983), dans la basse vallée du Rhin et aux Pays-Bas (SCHUNEMANN, 1958 ; VAN DER BROEK et VAN DER WAALS, 1967).

De cet inventaire qui reste incomplet, il ressort deux grandes périodes de silicification au Tertiaire dans le monde, l'une au Paléogène Supérieur, l'autre au Néogène Supérieur. Si l'individualisation d'un nombre discret de périodes est remarquable, l'inscription de ces silicifications dans des séquences climatiques allant de l'humide vers l'aride l'est tout autant. Ce fait est particulièrement bien marqué par l'association très fréquente des grands entablements siliceux avec des roches mères kaoliniques, soit sédimentaires, soit issues de profondes altérations lessivantes conservées en place. Fréquemment, ces silicifications sont suivies, voire envahies par des encroûtements calcaires et des calcaires lacustres (SUMMERFIELD, 1981, 1982 ; THIRY, 1981), qui s'inscrivent dans une même dynamique climatique.

5. LES SURFACES CUIRASSÉES TERTIAIRES. CONCLUSIONS

L'observation des socles stables, si elle montre une séquence d'aplanissements étagés, identique dans de vastes espaces, ne montre en revanche un développement systématique de cuirasses bauxitiques que sur les plus anciennes générations d'aplanissement de cette séquence. C'est au Tertiaire Inférieur que se forme et se cuirasse la dernière surface bauxitisée intercontinentale. Elle est contemporaine d'altérations aluminieuses de sédiments émergés paléocènes et éocènes en Arkansas ou au Sénégal, recouverte de sédiments éocènes au Gujerat en Inde, disséquée en plateaux puis recouverte de sédiments miocènes au Surinam. Là où elle n'a pas été interrompue par des mouvements tectoniques ou des transgressions, sa formation a pu se poursuivre jusqu'au début de l'Oligocène.

Il s'agit d'un événement majeur dans l'histoire géomorphologique de la terre. Dans toute la zone tropicale nous en observons la résultante : une vaste pénéplaine dont subsistent de nombreux

témoins, coiffés de puissantes cuirasses alumineuses. En Europe, les climats de la période correspondante ne permettent plus la bauxitisation (sinon très localement) ; chauds mais plus secs, ils manifestent l'existence d'un gradient humide-aride encore loin de l'actuel mais plus affirmé qu'au Crétacé Moyen où la bauxitisation régnait des régions méditerranéennes à l'Afrique méridionale.

Un marqueur géochimique correspond toutefois aux bauxites tropicales éocènes. Ce sont les amples silicifications connues à l'Éocène Moyen et Supérieure à la périphérie du Bassin Parisien et du Bassin d'Aquitaine. Plus près des zones bauxitisées, les silicifications australiennes sur le Crétacé kaolinisé ou sur des sédiments kaoliniques éocènes sont légèrement postérieures, un âge éocène supérieur à oligocène étant admis. Les silicifications semblent ainsi postérieures aux altérites de climat humide dans les zones où celles-ci se développent et contemporaines de la formation de ces altérites dans les zones de latitude plus élevée, ce qui s'accorde avec une extension des régions sèches au détriment des régions humides. Ces hypothèses restent à confirmer par l'établissement (dans des régions suffisamment connues où les observations seraient complétées à cette fin) de cartes paléogéographiques indiquant l'extension des différents matériaux formés à une époque, leur remaniement éventuel et les éléments utilisés pour leur datation.

Avec le système de glacis intermédiaire, ses cuirasses ferrugineuses et ses altérites kaolinites pliocènes, de nouvelles silicifications semblent se corrélérer. Présentes en Afrique méridionale et en Australie, sur le Continental Terminal d'Afrique occidentale, sur le piémont atlasique, dans le bassin parisien, en Poitou et en Périgord, leur âge reste souvent mal défini, mio-pliocène à quaternaire.

Entre cuirasses ferrugineuses et silcrètes une différence apparaît : le cuirassement ferrugineux s'exprime sur des glacis façonnés sous climat tropical sec à sub-aride, lors d'un retour vers des climats plus humides. Il suit le maximum d'aridité et précède une période d'altération kaolinique. Les silcrètes, moins spécifiques d'une forme de relief, cantonnés préférentiellement à la périphérie des bassins sédimentaires, se forment avant le maximum d'aridité,

sous un climat chaud à saisons contrastées, s'inscrivant dans une séquence de l'humide vers l'aride. Ils sont précédés d'une période d'altération lessivante.

Après la fin du Tertiaire, l'installation de climats humides et froids dans les régions dites tempérées, entraîne la rétraction des zones arides vers les basses latitudes. Les grandes concentrations supergènes indurées disparaissent en Europe, sauf quelques encroûtements calcaires lorsque la dominance géochimique du milieu s'y prête. Ces encroûtements se développent largement sous les climats méditerranéens liés au nord et sud de l'Afrique. En zone intertropicale, le cuirassement ferrugineux reste actif. Les climats perhumides se réduisent à quelques îlots équatoriaux instables et les surfaces d'aplanissement climatiques sont des systèmes de glacis qui ne forment de vastes pédiplaines qu'aux marges des régions arides où dominent les climats contrastés.

« In der Tertiärzeit, in der Zeit der alten Tropenerde reichten Varianten des der Rumpfflächens Bildung günstigen tropischen Savannen Klimas im Eozän noch bis in Subpolargebiet, später, im Miozän und älteren Pliozän noch bis Mittel Europa. Aus dieser Zeit sind fast auf den ganzen Erde die älteren Relief Generationen des heutigen Formbildes in Gestalt fossiler Rumpfflächen oder Restriedel von solchen erhalten » (1) (BÜDEL, 1965). Ces grandes surfaces climatiques dont sont issues, selon BÜDEL, les formes de relief actuelles de presque toute la terre, c'est bien en zone tropicale qu'il faut les rechercher d'abord, là où l'épaisseur et l'induration de leurs cuirasses permettent de mieux les conserver (Afrique occidentale, Inde, Australie, Brésil). Il apparaît alors qu'il n'y a pas une multitude d'aplanissements formés au cours du Tertiaire au gré de nombreux cycles climatiques, mais, pour toute cette période de « l'ancienne terre tropicale » seulement deux grandes surfaces intercontinentales dissemblables, emboîtées sur les vieux socles et superposées sur les marges des bassins périphériques : une pénéplaine formée entre le Paléocène et le début de l'Oligocène ; une pédiplaine formée au Mio-Pliocène.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.,
le 8 octobre 1982.*

(1) « Au Tertiaire, à l'époque de l'ancienne Terre tropicale, des variétés de climats tropicaux de savane, favorables à la formation des surfaces d'aplanissement, atteignaient encore à l'Éocène le domaine sub-polaire, plus tard au Miocène et au Pliocène inférieur ils atteignaient encore l'Europe moyenne. De cette époque sont héritées, sur presque toute la terre, les plus anciens éléments des formes actuelles du relief, sous forme de surfaces fossilisées ou de témoins de ces surfaces ».

BIBLIOGRAPHIE

- ALEVA (G. J. J.), 1979. — Bauxitic and other duricrusts in Suriname. A review. *Geol. Mijnbouw*, 58 : 321-336.
- ALEVA (G. J. J.), 1981. — Bauxitic and other duricrusts on the Guiana shield, South America. Laterites and lateritization processes, 1st Symp. IGCP project 129, New Delhi Oxford and I.B.H. Pub. Co. : 261-269.
- ALEVA (G. J. J.), 1981. — Essential differences between the bauxite deposits along the Southern and Northern edges of the Guiana shield. *Econ. Geol.*, 76, 5 : 1142-1152.
- ALIMEN (H.) et DEICHA (G.), 1959. — Observations pétrographiques sur les meulière pliocènes. *Bull. Soc. Géol. Fr.* (6), 8 : 77-90.
- ALLEN (V. T.), 1948. — Formation of bauxite from basaltic rocks of Oregon. *Econ. Geol.*, XLIII, n° 8 : 619-625.
- ALLEN (V. T.) et SHERMANN (G. D.), 1965. — Genesis of Hawaiian bauxite. *Econ. Geol.*, 60, 1 : 89-99.
- AMBROSE (G. J.) et FLINT (R. B.), 1981. — A regressive Miocene lake system and silicified standlines in northern South Australia : implications for regional stratigraphy and silcrete genesis. *J. Geol. Soc. Austl.*, 28 : 81-94.
- AUZEL (M.) et CAILLEUX (A.), 1949. — Silicifications Nord-Sahariennes. *Bull. Soc. Géol. Fr.* (5), 19 : 553-559.
- BARDOSSY (G.), 1981. — Les bauxites européennes, leur géologie, prospection et valorisation économique. *Chron. Rech. Min.*, 49, 459 : 5-21.
- BARNES (L. C.) et PITT (G. M.), 1976. — Silcrete, sediments and stratigraphy. Dept. of Mines South Australia, Rept. BK n° 76/119, 32 p.
- BARROIS (Ch.), 1878. — Sur l'étendue du système tertiaire inférieur dans les Ardennes et sur l'argile à silex. *Ann. Soc. Géol. Nord*, VI, 1878-79 : 340-376.
- BASSETT (H.), 1954. — Silicification of rocks by surface water. *Am. J. of Science*, 252 : 733-735.
- BATTISTINI (R.), 1968. — Problèmes morphologiques du Sud du Malawi. *Ann. Géogr. Fr.*, 77, n° 422 : 431-451.
- BEMMELN (R. W.) (Van), 1941. — Origin and mining of bauxite in Netherland India. *Econ. Geol.*, 36, 6 : 630-640.
- BISHOP (W. W.), 1966. — Stratigraphical geomorphology : a review of some east Africa landforms. In : Dury G. H. *Essays in Geomorphology*. Elsevier : 139-176.
- BOULANGE (B.), 1970. — Le massif basique de l'Orumbo Bocca (Côte d'Ivoire) et sa cuirasse bauxitique. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, vol. II, n° 2 : 185-204.
- BOULANGE (B.), 1973. — Influence de la géomorphologie sur la genèse des bauxites latéritiques. ICSOBA, C.R. 3^e Congrès Intern. Nice : 215-221.
- BOULET (R.), 1970. — La géomorphologie et les principaux types de sols en Haute-Volta septentrionale. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 3 : 245-271.
- BOULVERT (Y.), 1971. — Un type de modelé cuirassé : la série métamorphique de Kouki en République Centre Africaine. Sols et géomorphologie. *Rapport O.R.S.T.O.M.*, Bangui, *multigr.*, 67 p.
- BOURGEAT (F.), 1972. — Sols sur socle ancien à Madagascar. Type de différenciation et interprétation chronologique au cours du Quaternaire. Thèse Sci. Strasbourg (1970), *Mém. O.R.S.T.O.M.*, n° 57, 335 p.
- BRUCKNER (W. D.), 1957. — Laterite and bauxite profiles of West Africa as an index of rhythmical climatic variations in the tropical belt. *Eclogae Geol. Helv.*, 50, 2 : 238-256.
- BÜDEL (J.), 1965. — Die Relieftypen der Flächenspülzone Süd-Indiens am Ostabfall Dekans gegen Madras. Colloquium Geographicum Vorträge des Bonner Geog. koll., 8, 100 p.
- BUHMANN (D.), 1974. — Die Tonmineralzusammensetzung in den Sedimenten der Niederhessischen Senke als Indikator festländischer Verwitterung und brackisch mariner Tonmineralneubildung. Dissert. Erlang. des Doktorgrades Math-Naturw. Fak. Georg. August Uni., Göttingen, 83 p.
- CALLEN (R. A.), 1977. — Late Cainozoic environments of part of Northeastern South Australia. *J. Geol. Soc. Austral.*, 24, 3 : 151-169.
- CALLEN (R. A.), 1982. — Silcretes in South Australia. Nature age and depositional environment. *J. Geol. Soc. Austral.*, à paraître.
- CARBONNEL (J. P.), 1972. — Le Quaternaire cambodgien. Structure et stratigraphie. Thèse Paris et *Mém. O.R.S.T.O.M.*, n° 60, 248 p.
- GATE (R. B.), 1964. — New data on the chemistry of submerged soils : possible relation to bauxite genesis. *Econ. Geol.*, 59 : 161-162.
- CHATEAUNEUF (J. J.), 1979. — Palynostratigraphie et paléoclimatologie de l'Éocène supérieur et de l'Oligocène du Bassin de Paris (France). Thèse Doct. ès Sci., Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, et *Mém. B.R.G.M.* 116, 360 p.
- CHOUBERT (B.), 1957. — Essai sur la morphologie de la Guyane. *Mém. Carte Géol. Fr.*, 48 p., 31 pl. h.-t.
- CLEVERSON (C.), 1973. — Die tertiäre laterite der westlichen Vogelsberges und ihre Eignungen als Steine und Erdrohstoffe. *Clausthales Geol. abh.*, 16, 153 p.
- COMBES (P. J.), 1969. — Recherches sur la genèse des bauxites dans le N.-E. de l'Espagne, le Languedoc et l'Ariège (France). Thèse Sci. Montpellier, et *Mém. Centre Ét. Rech. Géol. Hydrogéol. Montpellier*, 3, 4, 342 p.

- CONRAD (G.), 1969. — L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien (Saoura, Erg Chergu-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir). Centre de Recherches sur les zones arides, Géologie, n° 10, C.N.R.S., Paris, 527 p.
- DAILY (B.), TWIDALE (C. R.), MILNES (A. R.), 1974. — The age of the lateritized summit surface on Kangaroo island and adjacent areas of South Australia. *J. Geol. Soc. Austral.*, 21, 4 : 387-392.
- DANIOU (P.), 1983. — Sidérolithisations et silicifications dans le Tertiaire continental des Charentes. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1, à paraître.
- DENIZOT (G.), 1961. — La composition et la genèse des bauxites de Provence et de Languedoc. *Bull. B.R.G.M.*, 2 : 35-46.
- DE SWARDT (A. M. J.), 1964. — Lateritization and landscape development in parts of Equatorial Africa. *Z. Geomorphol. Dtsch.*, 8 : 313-333.
- DIXEY (F.), 1937. — The early cretaceous and miocene peneplains of Nyassaland and their relations to the rift valley. *Geol. Mag.*, 74, n° 872 : 49-67.
- DIXEY (F.), 1958. — Observations sur les surfaces d'érosion à Madagascar. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 247 : 944-947.
- DRESCH (J.), 1957. — Pediments et glacis d'érosion, pédiplaines et inselbergs. *Inform. géogr.* : 183-196.
- DURY (G. H.) et HABERMANN (G. M.), 1978. — Australian silcretes and northern-Hemisphere correlatives. In: Silcrete in Australia. Langford-Smith (ed.), Publ. Dep. Geogr., Univ. New-England : 223-259.
- ERHART (M.), 1956. — La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Masson, Paris, 83 p.
- ESCHENBRENNER (V.) et GRANDIN (G.), 1970. — La séquence de cuirasses et ses différenciations entre Agnibilékrou et Diébougou (Haute-Volta). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, vol. II, n° 2 : 205-246.
- EVANS (H. J.), 1965. — Bauxite deposits of weipa. In: « Geology of Australian ore deposits », 8th Commonwealth Min. Met. Conf. 1 : 396-401.
- FAURE (H.), 1962. — Reconnaissance géologique des formations sédimentaires post-paléozoïques du Niger oriental. Thèse Sci., Paris et *Mém. B.R.G.M.*, 1966, 632 p.
- FERMOR (L. L.), 1909. — The manganese ore deposits of India. *Mem. of the Geol. Surv. of India*, 37, vol. I et II, 1294 p.
- FLEURY (E.), 1909. — Le sidérolithique suisse. Contribution à la connaissance de l'altération superficielle des sédiments. *Mém. Soc. fribourgeoise de Sc. Nat.*, 6, 260 p.
- FLICOTEUX (R.) et TESSIER (F.), 1971. — Précisions nouvelles sur la stratigraphie des formations du plateau de Thiès (Sénégal Occid.) et sur les altérations. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 272, D : 364-367.
- FRANKEL (J. J.) et KENT (L. E.), 1938. — Grahams-town surface quartzites (silcretes). *Trans. Geol. Soc. S. Africa*, 40 : 1-42.
- FRATSCNER (W. T.), 1960. — Die laterite der südöstlichen Boé (Portugiesisch Guinea). *Geol. en Mijnb.*, 39 : 500-511.
- FREYBERG (B.) (Von), 1926. — Die Tertiärquarzite Mitteldeutschlands. Verlag Ferd. Enke, Stuttgart, 242 p.
- FRITSCH (P.), 1978. — Chronologie relative des formations cuirassées et analyse géographique des facteurs de cuirassement au Cameroun. In: Géomorphologie des reliefs cuirassés dans les pays tropicaux chauds et humides. *Trav. et Doc. de géogr. tropicale CEGET*, 33 : 113-132.
- GAYAUD (M.), 1967. — Esquisse de l'histoire des sols au Niger centre et ouest méridional. *Bull. ASEQUA*, 14-15 : 24-27.
- GOLDICH (S. S.) et BERGQUIST (H. R.), 1947. — Aluminas lateritic soils of the Sierra de Bahoruco area, Dominican Republic. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 953-c : 53-84.
- GORDON (M.), TRACEY (J. J.) et ELLIS (M. W.), 1958. — Geology of the Arkansas bauxite region. *U.S. Geol. Surv. Prof. papers*, 299, 268 p.
- GOSSELET (J.), 1888. — L'Ardenne. *Mém. Serv. Exp. Carte Géol. dét. Fr.*, 881 p.
- GRANDIN (G.), 1976. — Aplanissements cuirassés et enrichissements des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. Thèse Strasbourg (1973), *Mém. O.R.S.T.O.M.*, n° 82, 275 p.
- GRAS (F.) 1970. — Surfaces d'aplanissement et remaniement des sols sur la bordure orientale du Mayombe (Congo-Brazzaville). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 3 : 273-294.
- GRUBB (P. L.), 1963. — Critical factors in the genesis, extent and grade of some residual bauxite deposits. *Econ. Geol.*, 58 : 1267-1277.
- GRUBB (P. L.), 1970. — Mineralogy, geochemistry and genesis of the bauxite deposits in the Gore and Mitchell plateaus, northern Australia. *Miner. Depos.*, 5 : 248-272.
- GRUBB (P. L. C.), 1979. — Genesis of bauxite deposits in the lower Amazon basin and Guianas coastal plain. *Econ. Geol.*, 74 : 735-750.
- GUENDON (J. L.), 1981. — Le paleokarst du Coulon (Vaucluse, France). Sédimentation et altération d'une série détritico-siliceuse sur substratum carbonaté : karstification sous couverture, accumulation de gibbsite, paléosols. Thèse 3^e cycle, Univ. Marseille, 179 p., 9 pl. h.-t.
- GUIEUX (G.), ROUSSET (C.), 1978. — Structures, paléostructures, paléogéographie et genèse des bauxites de Provence. *Bull. Rech. Géol. Min. (B.R.G.M.)*, série 2, sect. II : 311-322.
- GUTKIN (E. S.), KHRUSTALEVA (A. D.) et MOZHERIN (I. G.), 1969. — Gisements de bauxite de Mugaj de l'Oural. *Sovetsk. Geol.*, 1969, 12, n° 4 : 82-96.
- HARDER (E. C.), 1952. — Examples of bauxite deposits illustrating variations in origin. In: Problems of clay and laterite genesis. Sympo. A.I.M.M.E., St Louis, 1951 : 35-64.
- HERVIEU (J.), 1970. — Influence des changements de climats quaternaires sur le relief et les sols du Nord Cameroun. *Bull. ASEQUA*, 25 : 97-105, et *Ann. Géogr. Fr.*, 433 : 386-398.
- HILL (V. G.), 1955. — The mineralogy and genesis of bauxite deposits of Jamaica. *Am. Mineralogist*, 40 : 676-688.
- HUGUES (J. R.), 1963. — A geologic investigation of some residual orthoquartzite boulders in the Lower Eocene of Southwestern Union Country, Mississippi. *J. Sed. Petrol.*, 33 : 53-63.

- HUNTER (J. M.), 1961. — Morphology of a bauxite summit in Ghana. *Geogr. J.*, London, 127 : 469-476.
- HUTTON (J. T.), TWIDALE (C. R.), MILNES (A. R.) et ROSSER (H.), 1972. — Composition and genesis of silcretes and silcrete skins from the Beda Valley, Southern Arcoona Plateau, South Australia. *Journ. geol. Soc. Austral.*, 19 : 31-39.
- JAEGER (P.), 1953. — Contribution à l'étude de modelé de la dorsale guinéenne. Les monts Loma (Sierra Leone). *Rev. Geomorpho. dyn.*, 4 : 105-113.
- KAISER (1928). — Die chemische Gesteinsaufbereitung in der Südlichen Namib In: Die Diamantenwüste Südwestafrikas, Dietrich Reimer, Berlin, ch. 26 : 283-316.
- KALKOWSKY (E.), 1901. — Die Verkieselung der Gesteine in der nördlichen Kahahari. *Abh. Naturwiss. Ges. Isis, Dresden* : 55-107.
- KERR (M. H.), 1955. — On the occurrence of silcretes in Southern England. *Proc. Leeds Phil. Soc.*, 6 : 328-337.
- KING (L. C.), 1967. — Morphology of the earth. Olivier and Boyd, London, 725 p.
- KRIVCOV (A. J.), 1965. — Nouvelles données sur les bauxites mésozoïques de l'Oural — en russe —. *Litol. polezn. Iskopaem. SSSR*, 4 : 138-152.
- KULBICKI (G.), 1956. — Constitution et genèse des sédiments argileux sidérolithiques et lacustres du Nord et Nord-Est de l'Aquitaine. *Sci. de la Terre, Mém.*, 4 : 5-101.
- LAJOINIE (J. P.) et LAVILLE (P.), 1979. — Les formations bauxitiques de la Provence et du Languedoc. Dimensions et distribution des gisements. *Mém. du B.R.G.M.*, 100, 145 p.
- LAMPLUGH (G. W.), 1907. — The geology of the Zambezi Basin around the Batoka Gorge (Rhodesia). *Qual. Journ. Geol. Soc.*, London, v. 63 : 162-216.
- LANGE (O.), 1912. — Ueber Silikatsteine für Martinofen. *Stahl und Eisen*, 32^e an., n° 42, p. 1731.
- LANGFORD-SMITH (T.) et DURY (G. H.), 1965. — Distribution, character and attitude of the duricrust in the northwest of the New South Wales. *Amer. J. Sci.*, 263 : 170-190.
- LAPPARENT (A. F.) (de), 1950. — Types variés de plis de couverture dans la Basse-Provence orientale. *Bull. Soc. Géol. Fr.* (5), 20 : 323-333.
- LAPPARENT (J.) (de), 1930. — Les bauxites de la France méridionale. *Mém. Carte Géol. Fr.* (5), 66, 187 p.
- LAVILLE (P.), 1981. — La formation bauxitique provençale. Séquence des faciès chimiques et paléomorphologie crétacée. *Chron. rech. minière*, 461 : 51-68.
- LECLERC (J. C.), RICHARD-MOLARD (J.), LAMOTTE (M.), ROUGERIE (G.), et PORTERES (R.), 1955. — La chaîne du Nimba. Essai géographique. *Mém. IFAN*, Dakar, 43, fasc. 3, 271 p.
- LEMOINE (R. C.), ROCH et ZANS (V. A.), 1961. — Genèse des bauxites Caraïbes. *C. R. Acad. Sci.*, D, Fr., 1961, 252 p. : 3302-3304.
- LEPERSONNE (J.), 1958. — Mise au point concernant la note de M. R. V. RUHE intitulée « Erosion surfaces of the Ituri, Belgian Congo. Reply to J. Lepersonne ». *Bull. Acad. Roy. Sci. Colon.*, Bruxelles, 4, 2 : 384-407.
- LEPRUN (J. C.), 1979. — Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse, transformation. Dégénération. Thèse Sci., Strasbourg et *Sci. Géol., Mém.*, 58, 224 p.
- MACKENZIE (G.), YOSHUA (I.) et TRACEY, 1952. — Origin of the Arkansas bauxite deposits. In: Problems of clay and laterite genesis, Symp. A.I.M.E., New-York : 12-34.
- MAIGNIEN (R.), 1958. — Le cuirassement des sols en Guinée (Afrique occidentale). *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 16, 235 p.
- MELFI (A. J.), TRESCASES (J. J.), BARROS DE OLIVEIRA (S. M.), 1980. — Les « laterites » nickélicifères du Brésil. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. géol.*, 11 : 15-42.
- MEYER (R.) et CROUZEL (F.), 1983. — Faciès silicifiés d'origine météorique dans le Miocène Continental de l'Armagnac. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1, à paraître.
- MICHEL (P.), 1959. — L'évolution géomorphologique des bassins du Sénégal et de la Haute-Gambie. Les rapports avec la prospection minière. *Rev. Géomorph. Dyn.*, 5-6 à 11-12 : 117-143.
- MICHEL (P.), 1973. — Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie, étude géomorphologique. Thèse Lettres Strasbourg (1970), et *Mém. O.R.S.T.O.M.*, n° 63, 752 p.
- MICHEL (P.), 1978. — Cuirasses bauxitiques et ferrugineuses d'Afrique Occidentale. Aperçu chronologique. In « Géomorphologie des reliefs cuirassés dans les pays tropicaux chauds et humides ». *Trav. et Doc. de géogr. trop. du CEGET* (Bordeaux), 33 : 11-32.
- MILLOT (P.), 1967. — Signification des études récentes sur les roches argileuses dans l'interprétation des faciès sédimentaires (y compris les séries rouges). *Sedimentology*, 8 : 259-280.
- MILLOT (G.), 1980. — Les grands aplanissements des socles continentaux dans les pays subtropicaux, tropicaux et désertiques. In: « Livre jubilaire du cent-cinquantième 1830-1980 », S.G.F., *mém. hors série* 10 : 295-305.
- MOULINE (M.), 1983. — Les accidents siliceux dans les calcaires lacustres du Castrais et de l'Albigeois. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1, à paraître.
- MULCAHY (M. J.), 1960. — Laterites and lateitic soils in S.W. Australia. *J. Soil. Sci.*, 2 : 206-225.
- MULLER-FEUGA (R.), 1954. — Contribution à l'étude de la géologie, de la pétrographie et des ressources hydrauliques et minérales du Fezzan. *Mém. Ann. Mines et Géol.*, Tunisie, 12, 354 p.
- NAHON (D.) et DEMOULIN (D.), 1970. — Essai de stratigraphie relative des formations cuirassées du Sénégal occidental. *C. R. Acad. Sci., Paris*, 270, D : 2764-2767.
- NGUYEN ANH TUAN, 1971. — On the age of bauxite containing sediments in the western part of Caobang province. Dia Chât.
- NICOLAS (J.), HIERONYMUS (B.), KOTSCHOUBEY (B.), 1969. — Kaolinisation et formation d'argiles « flint » par resiliification et deferrification de la bauxite du Var sous l'influence des toits sableux et gréseux du Valdo-Fuvélien. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 268, D : 2862-2864.
- NICOLAS (J.) et LECOLLE (M.), 1968. — Essai de reconstitution paléogéographique de la Provence au Crétacé Supérieur. Position et âge possibles de la roche mère de la latérite

- d'où provient la bauxite. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 266, D : 445-448.
- NICOLAS (J.) et BELINGA (S.), 1969. — Contribution à l'étude de l'origine et de l'évolution des bauxites de l'Adamaoua (Cameroun). *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 268, D : 1157-1160.
- PATTERSON (S. M.), 1967. — Bauxite reserves and potential aluminium resources of the world. *Geol. Surv.*, Washington, 1228, 176 p.
- PEYRONNET (Ph. de), 1969. — Origine des bauxites d'Alanya (Turquie méridionale). *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 268, D : 1001-1003.
- PUGH (J. C.), 1954. — High level surfaces in the eastern highlands of Nigeria. *S. Afr. geogr. J.*, 36 : 31-42.
- PUGH (J. C.), 1966. — The landforms of the low latitudes. In: « Dury G. H. : Essays in geomorphology », Elsevier N. Y. : 121-138.
- QUANTIN (P.), 1974. — Hypothèses sur la genèse des andosols en climat tropical. Évolution de la « pédogenèse initiale » en milieu bien drainé, sur roches volcaniques. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. *Pédol.*, 12, 1 : 3-12.
- RADIER (H.), 1959. — Le Précambrien saharien au Sud de l'Adrar des Iforas. Le bassin crétacé et tertiaire de Gao. Contribution à l'étude géologique du Soudan oriental. Thèse Sci., Strasbourg (1957), et *Bull. Serv. Prosp. Min.*, A.O.F., 26, 556 p.
- CHOWDHURY (R.), 1958. — Bauxite in Bihar Pradesh, Vindinya Pradesh, Madhya Bharat and Bopal. *Mém. Geol. Surv. India*, 85, 271 p.
- RUHE (R. V.), 1956. — Landscape evolution in the high Ituri (Belgian Congo). Publ. INEAC, Bruxelles, *Sér. scient.*, 66, 91 p.
- RUHE (R. V.), 1958. — Erosion surfaces of the Ituri, Belgian Congo. Reply to J. Lepersonne. *Bull. Acad. roy. Sci. Colon.*, 4 : 360-383.
- SABOT (J.), 1954. — Les latérites. *XXX Cong. Géol. Intern.*, Alger, 21, ASGA, 2^e partie : 181-192.
- SAURIN (E.), 1963. — Bauxites marines au Cambodge. *C. R. Séances Soc. Géol. Fr.*, 2 : 53-55.
- SCHUNEMANN (H. W.), 1958. — Zur Stratigraphie und Tektonik des Tertiärs und Altpleistozäns am Südrand der Niderrheinischen Bucht. *Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf.*, 2 : 457-472.
- SINKOVEC (B.), 1970. — Geology of the triassic bauxites of Lika (Yugoslavia). *Pirodoslovba istrazivanja Kwjiga* 39.
- SLANSKY (M.), 1962. — Contribution à l'étude géologique du bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo. Thèse Sci., Nancy (1959), et *Mém. B.R.G.M.*, 11, 270 p.
- SMALE (D.), 1973. — Silcretes and associated silica diagenesis in southern Africa and Australia. *J. Sedim. Petr.*, 43 : 1077-1089.
- SOUGY (J.), 1959. — Les formations crétacées du Zemmour Noir (Mauritanie septentrionale). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1 : 166-182.
- STEINBERG (M.), 1968. — Contribution à l'étude des formations continentales du Poitou (sidérolithique des auteurs). Thèse Doct. ès Sci., Paris, 415 p.
- STEPHENS (C. G.), 1971. — Laterite and silcretes in Australia : a study of the genetic relationships of laterite and silcrete and their companion materials, and their collective significance in the formation of the weathered mantles, soils, relief and drainage of the Australian Continent. *Geoderma*, Amsterdam, 5 : 5-52.
- STORZ (M.), 1928. — Zur petrogenesis der Sekundären Kieselgesteine in der Südlichen Namib. In: Kaiser E., Die Diamantenwüste Südwest-afrikas, Dietrich Reimer Berlin, ch. 25 : 254-282.
- STRAKHOV (N. M.), 1967. — Principles of lithogenesis. Olivier et Boyd, London, vol. 1, 245 p. et vol. 2, 609 p.
- SUMMERFIELD (M. A.), 1981. — The nature and occurrence of silcrete, Southern Cape Province, South Africa. *Research Papers*, Oxford, 28, 36 p.
- SUMMERFIELD (M. A.), 1982. — Distribution, nature and probable genesis of silcrete, in arid and semi-arid southern Africa. In: Dan Yaalon H. (ed) — Aridic Soils and Geomorphic Processes. *Catena supplement 1.*, Braunschweig : 37-65.
- SUMMERFIELD (M. A.), GOUDIE (A. S.), 1980. — The Sarsens of southern England : their paleoenvironmental interpretation with reference to other silcretes. In: the Shaping of southern England (Jones E.K.C. ed), Inst. Br. Geogr. *Spec. Publ.*, n° 11 : 71-100.
- THIRY (M.), 1981. — Sedimentation continentale et altérations associées : calcitisations, ferruginisations et silicifications. Les Argiles Plastiques du Sparnacien du Bassin de Paris. *Sci. Géol. Mém.*, 64, 173 p.
- THIRY (M.), DELAUNAY (A.), DEWOLF (Y.), DUPUIS (Ch.), MENILLET (F.), PELLERIN (J.) et RASPLUS (L.), 1983. — Les périodes de silicification au Cénozoïque dans le Bassin de Paris. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1, à paraître.
- TRAUTH (N.), 1977. — Argiles évaporitiques dans la sédimentation carbonatée continentale et épicontinentale tertiaire. Bassin de Paris, de Mormoiron et de Salinelles (France), Jbel Ghassoul (Maroc). *Sci. Géol., Mém.*, 49, 195 p.
- TRICART (J.), 1961. — Le modelé du Quadrilatère Ferrifère, au Sud de Belo Horizonte (Brésil). *Ann. de Géogr. Fr.*, 70 : 255-272.
- TRICART (J.), 1969. — Le modelé des régions sèches. SEDES, Paris, 472 p.
- VALETON (I.), 1967. — Bauxitführende Laterite auf dem Trappbasalt Indiens als fossile, polygenetisch veränderte Bodenbildung. *Sedim. Geol.*, 1 : 7-56.
- VALETON (I.), 1972. — Bauxites. *Develop. in soil Sc.*, Elsevier, 226 p.
- VALLERON (M. M.), 1981. — Les faciès calcaires du Lutétien à Planorbis pseudoammonius dans le Bas-Languedoc. Argilocénèse et silicifications associées aux encroûtements calcaires. Thèse 3^e cycle, Univ. Louis-Pasteur, Strasbourg, 108 p.
- VAN DEN BROEK (J. M. M.) et VAN DER WAALS, 1967. — The late tertiary peneplain of south Limbourg (The Netherlands) Silicifications and fossil soils ; a geological and pedological investigation. *Geologie en Mijnbouw*, 46, 9 : 318-332.
- VOGT (J.), 1959. — Aspects de l'évolution morphologique récente de l'Ouest africain. *Ann. Géogr., Fr.*, 68, 367.

- VOGT (J.), 1962. — Une vallée soudanaise, la moyenne Bagoé. *Rev. Géomorph. Dyn.*, 13 : 2-9.
- WAGRENIER (P.), 1961. — Mission de recherche de bauxite au Logone et au Moyo-Kébi (Tchad). *Bull. Inst. Équat. Rech. Él. Géol. Min.*, 14 : 37-42.
- WEISSE (J. G. de), 1948. — Les bauxites de l'Europe centrale. Thèse Université de Lausanne, *Mém. Soc. Vaudoise Sc. Nat.*, n° 58, 162 p.
- WEISSE (J. G. de), 1970. — Bauxite sur un atoll du Pacifique. *Mineral. Deposita*, 5, 2 : 181-183.
- WOLFENDEN (E. B.), 1961. — Bauxite in Sarawak (Malaysia). *Econ. Geol.*, 56 : 972-981.
- WOPFNER (H.), 1974. — Post-Eocene history and stratigraphy of northeastern south Australia. *Trans. Roy. Soc. S. Aust.*, 98 : 1-12.
- WOPFNER (H.), 1978. — Sileretes of Northern South Australia and adjacent regions. In: *Silerete in Australia*. Langford-Smith T. (ed), Publ. by depart. Geogr. Univ. New-England : 93-141.
- WOPFNER (H.), CALLEN (R.) et HARRIS (W. K.), 1974. — The lower tertiary Eyre Formation of the Southwestern Great Artesian basin. *J. Geol. Soc. Australia*, 21, 1 : 17-51.