LES SOLS FERRALLITIQUES

tome 1

bistorique - développement des connaissances et formations des concepts actuels



OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ET TECHNIQUE OUTRE-MER



INITIATIONS-DOCUMENTATIONS TECHNIQUES N° 20

ORSTOM

PARIS

1972

« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, « d'une part, que les " copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé « du copiste et non destinées à une utilisation collective " et, d'autre part, que les « analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, " toute « représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement « de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite " (alinéa 1° de l'arti-

« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, consti-« tuerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code « Pénal. »

Y. CHATELIN

pédologue de l'ORSTOM

LES SOLS FERRALLITIQUES

Tome 1

Historique - Développement des connaissances et formation des concepts actuels

Préface de M. Georges AUBERT, Membre de l'Académie d'Agriculture de France et de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer, Président du Comité Technique de Pédologie de l'ORSTOM

PRÉFACE

La mise en valeur d'une région nécessite l'utilisation la plus rationnelle possible de ses sols. Celle-ci n'est pleinement réalisable que si l'on connaît non seulement leurs propriétés actuelles mais aussi leur mode de formation et leur évolution. Même une expérience séculaire malgré toute sa valeur, ne peut remplacer totalement cette connaissance. Dans les pays tropicaux cette expérience n'est que très partielle, aussi l'étude scientifique de leurs sols revêt-elle une grande importance.

1° Les sols ferrallitiques, appelés précédemment latéritiques, ont été étudiés depuis longtemps. C'est au début du 19° siècle que F. Buchanan a créé le terme qui les a uniquement désignés pendant un siècle et demi et qui est encore, parfois, utilisé.

Depuis, leur étude n'a jamais cessé, plus ou moins développée ou approfondie suivant les périodes. Elle a été d'abord menée principalement par les géographes, géologues et pétrographes, parfois par les botanistes et agronomes; plus récemment par les géochimistes et surtout par les pédologues. Longtemps l'on a été tenté de classer sous ce nom tous les sols des régions tropicales non arides, et même de nombreux sols de régions subtropicales d'ailleurs qualifiés de fossiles.

Peu à peu, au cours des dernières décades, certains pédologues, tels C. R. Van der Merwe en Afrique du Sud, et d'autres en U.R.S.S., en ont séparé ceux des régions de savane à longue saison sèche. Dès 1947 puis en 1954 ces restrictions ont été quelque peu précisées avec les premières définitions des sols ferrugineux tropicaux données avec R. Maignien, des sols bruns eutrophes, dues aux pédologues belges, des andosols etc... Les sols peu évolués, salés ou hydromorphes, avaient été aussi reconnus dans ces régions, sous des noms divers, longtemps avant.

Au fur et à mesure que les prospections pédologiques ou autres en régions tropicales se font plus nombreuses, les études des échantillons prélevés plus précises et plus approfondies, les caractères des sols ferrallitiques qui paraissaient, il y a vingt ans encore, assez stricts et relativement constants, s'avèrent moins précis. En typologie les unités de sols ferrallitiques sont de plus en plus nombreuses et diversifiées, autour d'un concept central qui, comme le faisait remarquer en 1947 le P^r G. W. Robinson lors d'une réunion sur les sols tropicaux à Rothamstead, « ne s'observe pas souvent dans la nature, peut-être seulement lorsqu'il a été décrit pour la première fois ».

L'étude des sols des régions non tropicales, régions tempérées humides en particulier, se développe aussi et certains caractères admis comme spécifiques des sols ferrallitiques s'y retrouvent assez souvent sans qu'il s'agisse d'héritage de climats passés. Il a donc paru nécessaire de tenter une large synthèse de nos connaissances actuelles sur les sols ferrallitiques en cherchant à mieux définir les problèmes soulevés.

2º Depuis vingt cinq ans, de nombreux pédologues étudient les sols ferrallitiques. Après une période consacrée surtout à l'inventaire et à quelques études plus détaillées sur leur formation, leur évolution et leurs possibilités d'utilisation, un effort d'approfondissement de la recherche se réalise pour tenter non seulement de préciser nos connaissances typologiques, mais aussi de mettre en lumière les processus qui ont joué ou se développent actuellement dans ces sols, et les relations qui les unissent les uns aux autres ainsi qu'à leurs divers facteurs d'évolution. Dans le cas des sols ferrallitiques, l'impulsion de ces nouvelles

études revient à des pédologues comme, parmi ceux de nationalité française, D. Martin, R. Maignien, F. Bourgeat, Y. Chatelin etc...

Ces recherches ne sont que la continuation de celles effectuées au cours des 2 ou 3 dernières décades dont la synthèse est indispensable. Y. CHATELIN s'en est chargé. Il connaît bien les sols tropicaux depuis qu'il en a pris connaissance sur le terrain en 1958. Depuis lors il a toujours travaillé en Afrique Tropicale humide, principalement au Gabon et en République Centrafricaine. Il a donc étudié surtout les sols ferrallitiques, qui couvrent de telles étendues dans ces deux pays. Il a d'ailleurs pu observer ceux d'autres pays, Congo, Cameroun et Côte d'Ivoire en particulier. Ses recherches ont jusqu'ici porté surtout sur leur caractérisation, leur typologie et leurs relations avec leur environnement, ainsi qu'avec les autres sols du lieu.

La tâche entreprise ne peut être uniquement personnelle. Elle est un travail d'équipe où plusieurs pédologues de l'O.R.S.T.O.M. opéreront en fonction de leur spécialisation, et moimême avec eux. Y. CHATELIN est l'animateur de cet ouvrage qui paraîtra par fascicules, il en assure la coordination.

Tous, nous espérons qu'ainsi conçue cette publication permettra une mise au point des connaissances actuelles sur ces sols, non seulement de celles acquises par nos équipes mais aussi de toutes celles publiées par des chercheurs de tous autres pays dont les écrits nous sont accessibles directement ou grâce à des traductions en d'autres langues.

Elle doit aussi nous amener à une clarification de nos concepts, et à une appréciation et une expression plus précises des problèmes soulevés.

Une meilleure définition des sols ferrallitiques, de leurs caractères, de leurs processus de formation et d'évolution et de leurs relations avec leur environnement doit conduire à mieux connaître les conditions de leur utilisation.

Georges AUBERT.

Membre de l'Académie d'Agriculture de France.

et de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer.

Président du Comité Technique de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M.

REMERCIEMENTS.

En tout premier lieu, mes remerciements s'adressent à M. Georges Aubert qui a bien voulu préfacer ce premier tome consacré aux sols ferrallitiques après l'avoir analysé et commenté. M. Pierre Ségalement a été un lecteur et un critique précieux. Ma gratitude s'adresse aussi à M^{III} Marie-Hélène Perrot, bibliothécaire des Services scientifiques centraux de l'O.R.S.TO.M., qui a recherché les nombreux documents, parfois vieux d'un siècle et demi, nécessaires à l'élaboration de cet ouvrage.

Y.C.

•	
	•

AVANT-PROPOS

Devant la profusion de la littérature scientifique récente, il peut venir à l'esprit des doutes sur l'intérêt d'un ouvrage historique, et la tendance de le considérer comme une surcharge gratuite. Il est certain qu'une revue des publications des quinze ou vingt dernières années donnera un panorama complet de toutes les observations qui méritent d'être retenues, les plus anciennes de ces observations étant reprises, représentées sous des formes différentes, à l'occasion de travaux séparés dans le temps ou dans l'espace.

Mais si la science du sol réunit des déterminations concrètes qui ne prêtent pas à dialectique, elle dépend aussi dans une large mesure de concepts qui ne se sont pas toujours imposés d'évidence, mais ont résulté de certains choix, ou peut-être d'une vision incomplète de la réalité. Le pédologue qui utilise actuellement le terme de « sols ferrallitiques » de façon courante, se situe d'emblée dans une certaine lignée de travaux, et de concepts transmis sous une forme parfois peu explicite. Analyser cet héritage est une opération de clarification intellectuelle, qui peut aussi faciliter une ouverture vers d'autres modes de pensée.

Les pages qui suivent montreront combien ont été longues à disparaître certaines théories démenties par les faits, combien de temps a nécessité la généralisation de techniques nouvelles. A chacun de ne voir dans une rétrospective historique qu'un intérêt anecdotique, ou au contraire de chercher à en tirer un enseignement personnel, d'esprit critique pour des notions trop commodément admises, ou pour des méthodes qui se périment.

Il existe une autre raison de commencer un traité général sur les sols ferrallitiques en retraçant les étapes du développement de nos connaissances. La plupart des ouvrages spécialisés actuels ont un titre qui suffit à définir clairement leur objet. Par contre, les « sols ferrallitiques » ont des frontières assez indécises. Pour les situer, tout au moins dans leurs grandes lignes, il est nécessaire de voir comment se sont élaborés les concepts actuels qui définissent, pour les pédologues de l'école française, les sols ferrallitiques.

l'étude des latérites durant le 19^e siècle, et les trois premières décennies du 20^e

Il est permis de supposer que grande fut la surprise des premiers explorateurs devant les étonnantes formations superficielles des tropiques. Leur imagination en fut sans doute stimulée, et des explications très variées durent leur venir à l'esprit. Il nous en reste quelques exemples.

Ainsi l'illustre biologiste Ch. Darwin, en considérant l'épais manteau de décomposition qui couvre les régions littorales du Brésil, pensa-t-il y découvrir l'œuvre d'une hydratation ancienne dans des conditions sous-marines. C'est du moins ce que Holland (1903) a retenu des notes publiées par Darwin (1844) à la suite de son voyage sur le H.M.S. Beagle. Cette interprétation ne doit pas surprendre, elle a eu cours également parmi certains géologues des Indes qui, plus que Darwin, ont eu la possibilité d'étudier ce que nous appellerons maintenant des « latérites ». Autre exemple d'interprétation, radicalement différente et, avouons-le, aussi éloignée de la vérité, Hartt (1870) faisait intervenir les phénomènes glaciaires pour expliquer les formations superficielles brésiliennes. En 1893, Branner a consacré de longues pages à commenter, et réfuter, cette théorie.

L'étude des latérites se poursuivait en réalité depuis bien longtemps avant que Darwin, et à plus forte raison Hart, ne formulent leurs hasardeuses hypothèses. Elle était conduite par des géographes et géologues. On peut attribuer à la naissance de la science des sols tropicaux une date précise, celle de l'année 1807 qui vit publier les comptes rendus d'un voyage fait aux Indes par un géographe nommé Buchanan.

Cette première période dont le départ est donné par Buchanan et qui va couvrir le 19° et le début du 20° siècle, est celle de l'étude des « latérites » considérées plus comme des roches que comme des sols au sens où nous l'entendons maintenant. Elle se terminera aux environs de 1927, date repère qui correspond à la première réunion d'un congrès international consacré à la science du sol. A partir de 1927, vont se renouveler les techniques analytiques, et s'imposer des concepts nouveaux.

BUCHANAN ET LE TERME "LATÉRITE"

Il est fait référence à la définition donnée par Buchanan dans pratiquement tous les ouvrages qui traitent des latérites et de ce que l'on appellera plus tard les sols latéritiques ou ferrallitiques. Bien souvent cette référence est donnée sans retour au texte lui-même, et l'on a vu certains auteurs demander que l'on s'en tienne strictement à la définition initiale de Buchanan et la formuler de façon tout à fait erronée. Voici ce qu'écrivit réellement Buchanan: « What I have called indurated clay... is diffused in immense masses, without any appearance of stratification, and is placed over the granite that forms the basis of Malayala. It is full of cavities and pores, and contains a very large quantity of iron in the form of red and yellow ochres. In the mass, while excluded from the air, it is so soft, that any iron instrument readily cuts it, and is dug up in square masses with a pick-ax, and immediately cut into the shape wanted with a trovel, or large knife. It very soon after becomes as hard as brick, and resists the air and water better than any bricks that I have seen in India. » Buchanan conclut: « The most proper english name would be Laterite, from Lateritis, the appellation that may be given to it in science. »

Il est à noter que Buchanan lui-même ne semble pas attacher une importance essentielle, ni un sens trop strict, à ce néologisme, puisqu'il lui arrive également d'employer « brick-stone ». Suivant ce que rapporte Maignien (1966), ce n'est qu'à la suite des controverses nées de l'utilisation du terme que Buchanan prétend le resteindre à ne désigner que les matériaux à consistance molle et durcissant à l'air.

C'est aux Indes, dans la région de Malabar, à Angadipuram (10° 58' N, 76° 13' E, précisent Prescott & Pendleton en 1952) que Buchanan a observé le matériau type de la latérite. La description de Buchanan est sommaire, certains chercheurs ont retrouvé le site d'origine et l'ont décrit à nouveau. Il s'agit tout d'abord de Lake (1890) qui a identifié trois types de latérites, les latérites de plateau, de terrasse, de vallée. Fox (1936) confirme les descriptions de Lake et la distribution de la latérite sur plusieurs unités physiographiques, et précise que la latérite décrite par Buchanan appartient à la variété détritique (detrital laterite) occupant les vallées.

Beaucoup plus récemment, dans le but d'une comparaison avec les latérites d'Australie, Stephens (1961) observe à nouveau le site d'Angadipuram. Il donne l'image d'une région dans laquelle deux niveaux d'aplanissement anciens (flat-topped hills ... capped with laterite) surplombent une série de collines basses qui dominent elles-mêmes une plaine alluviale aménagée en rizière. Un siècle et demi après le passage de Buchanan, il existe toujours, sur ces collines de la partie basse du paysage, des carrières où l'on taille des briques que l'air et le soleil suffisent à durcir. Stephens a donné d'une coupe offerte par une carrière une description que nous traduirons et résumerons ainsi:

- 0-60 cm Limon friable, légèrement plastique, de structure vésiculaire; rouge sombre (2,5 YR 3/5 humide), plus clair (3/6) à la base; graviers latéritiques en quantités modérées, diminuant en profondeur.
- 60-170 cm Couche massive de latérite à structure vermiculaire grossière; rouge et jaune avec des taches gris clair s'accentuant en profondeur; peut être découpée à la pioche mais non au couteau.
- à 170 cm Argile tachetée apparaissant comme une transformation irrégulière et diffuse de la latérite supérieure; taches contrastées rouges (10 R 3/4 humide), jaune-brun (7,5 YR 5/6) et gris-clair.

A proximité de celui-ci, d'autres profils montrent que les horizons tachetés surmontent des horizons blanchis (pallid zone) à matrice blanche et taches très pâles jaunes et brunes.

On peut donc retenir que Buchanan a donné le nom de latérite à ce que l'on appelle maintenant des horizons tachetés et des plinthites, parfois déjà légèrement indurés en place mais toujours capables de se durcir irréversiblement à l'air, généralement intercalés entre des horizons d'altération décolorés et des horizons supérieurs pisolitiques.

Le terme créé par Buchanan a vu sa signification se modifier profondément, être élargie par les uns et puis restreinte par les autres. Il est maintenant entaché d'une ambiguïté fondamentale, bien montrée par le Compte Rendu de Recherches sur les latérites de Maignien (1966). Il peut être employé pour des matériaux ferrugineux ou alumineux, des roches ou tout au moins des sols fossilisés, pour certains horizons pédologiques, pour des sols qui sont séparés en plusieurs Ordres ou Classes suivant le système de classification employé. Cependant, jusqu'à une époque récente, « latérites », « roches latéritiques », « sols latéritiques », sont d'un usage courant dans la littérature scientifique.

LES CONNAISSANCES MINÉRALOGIQUES ET LES MÉTHODES D'ANALYSES

Pendant toute la période considérée, règne une grande confusion sur la nature des argiles, leur caractère cristallin ou amorphe. Le terme amorphe n'est généralement pas employé, et il est sous-entendu qu'un matériau « colloïdal » n'est pas cristallin.

Aux débuts de la science du sol, il est couramment admis que les argiles des sols sont constituées d'un mélange, en proportions variables, de gels amorphes de silice, d'alumine et de fer. Les découvertes des minéralogistes sont connues de certains pédologues qui, comme GLINKA (1914), admettent que les argiles des sols soient essentiellement du kaolin. Pendant très longtemps se maintiendra l'idée que la kaolinite est l'unique espèce argileuse et qu'elle est mélangée dans les sols à des matières colloïdales amorphes. En 1911, Thuggut est l'un des premiers à reconnaître plusieurs espèces cristallines dans les argiles.

Pourtant, beaucoup de ceux qui étudient les sols des régions tempérées, ou les latérites tropicales, ignorent les données récentes de la minéralogie ou ne savent pas les transposer aux matériaux qu'ils étudient. Ainsi Stremme (1911) conteste-t-il la réalité des composés kaolinitiques dans les sols, toute l'argile étant pour lui un mélange d'alumine et de silice « colloïdales ». En 1901, à propos des sols malgaches, Schloesing parle d'argile « grasse » ou « maigre ». Ces termes nous étonnent actuellement, mais ils sont à l'honneur parmi les agronomes du début du 20° siècle, bien qu'ils recouvrent à vrai dire des notions très confuses.

Ce sont les méthodes des pétrographes, l'examen au microscope et l'analyse chimique, qui sont employées pour l'étude des latérites. L'observation au microscope permet d'identifier facilement la limonite (*). Les paillettes blanches sont attribuées à l'hydrargillite (gibbsite) ou à la kaolinite en fonction de l'analyse chimique. Dans le cas de très grand cristaux, l'examen optique suffit à lever l'indétermination. Les roches altérées sont taillées en lames minces après imprégnation par le baume du Canada. On peut ainsi observer le remplacement des minéraux de la roche par de nouvelles espèces, en particulier l'épigénie des feldspaths par l'hydrargillite ou la kaolinite, la substitution de la limonite aux minéraux ferro-magnésiens. Lorsque les particules sont trop petites pour être visibles au microscope, s'appliquent les idées, plus gratuites, qui ont cours alors sur les argiles. Aussi relève-t-on souvent dans les textes de cette époque une opposition entre hydrargillite et alumine « colloïdale », ce dernier terme désignant l'alumine libre supposée amorphe des fractions très fines.

^(*) On sait actuellement que le terme « limonite » a servi à désigner différents minéraux ferrugineux, gœthite et hématite principalement, et des mélanges. Il est impossible de compenser l'insuffisance des observations anciennes. Le terme « limonite » sera mentionné ici uniquement dans la mesure où il est celui utilisé par les auteurs cités.

L'analyse chimique apparaît immédiatement comme une méthode indispensable à l'étude de matériaux malgré tout difficiles à déterminer optiquement. La plupart des chercheurs comprennent aussi la nécessité de procéder à des extractions ménagées, de façon à doser séparément les silicates et hydrates formés par altération, et les silicates primitifs des roches et surtout le quartz. C'est ce que pratique déjà, hors de la zone tropicale, BEMMELEN en 1888 : deux attaques successives lui permettent de séparer une fraction ayant la composition du kaolin d'une autre fraction de composition très variable supposée être « colloïdale ».

Plusieurs méthodes d'analyse chimique sont employées avec succès pour l'étude des latérites. Warth F. & F. J. opèrent par fusion au sulfate acide de soude qui sépare la silice combinée du quartz. Les extractions fractionnées que pratique Arsandaux (1909) sont assez complexes: une première attaque chlorhydrique solubilise le fer et une partie de l'alumine libre, une seconde attaque sulfurique met en solution les silicates et le reste de l'alumine libre, le quartz reste intact dans le résidu. Lacroix (1913) opère de même: des extractions successives par acides chlorhydrique et sulfurique séparent les produits d'altération des minéraux primitifs des roches et notamment du quartz. C'est presque la même méthode qu'emploie Harrassowitz (1926). Enfin, c'est Harrison (1910) qui a mis au point la méthode d'attaque par les trois acides chlorhydrique, sulfurique et nitrique, laissant le quartz dans le résidu insoluble, qui est encore employée actuellement, à quelques variantes opératoires près.

La plupart des travaux sur les latérites reposent sur des méthodes analytiques identiques à celles qui viennent d'être citées, ou qui leur sont très proches. Certains chercheurs cependant ont utilisé la fusion alcaline ou l'attaque fluorhydrique qui donnent une solubilisation complète. Par manque de séparation de la silice combinée et du quartz, leurs résultats ne permettent qu'une interprétation limitée. Ils ont pourtant été parfois utilisés, à tort lorsqu'il s'agit de latérites contenant des quartz, pour le calcul des rapports de la silice aux sesquioxydes.

Quant aux analyses particulières à la science du sol, fractionnement granulométrique, mesure de pH, dosage de la matière organique, elles ne sont pas utilisées. Les géologues de l'époque qui attachent leur nom à l'étude de ces latérites qu'ils considèrent comme des roches, les ignorent.

L'insuffisance des méthodes d'identification des minéraux se traduit dans la terminologie et la classification. Ainsi, pour les latérites alumineuses, LACROIX (1913) distingue-t-il les variétés gibbsitiques et bauxitiques; les bauxites sont alors considérées comme amorphes et le qualificatif bauxitique est donné à des latérites qui, au microscope, ne paraissent pas être constituées de cristallites. On peut affirmer par contre que les analyses chimiques, et particulièrement la méthode au triacide, donnent à l'étude des latérites dès son début une base génétique précieuse. Les analyses chimiques sont seules à fournir une indication pour les particules trop fines pour l'étude au microscope, et surtout leur méthode de solubilisation ménagée permet de doser séparément les composés de néoformation. Il est donc possible de préciser une tendance évolutive, un processus de formation. Ces concepts génétiques, formés très tôt, imprègnent encore les études récentes sur les sols ferralitiques.

PREMIÈRES DÉCOUVERTES SUR LA COMPOSITION FERRUGINEUSE ET ALUMINEUSE DES LATÉRITES

Dans la définition première de Buchanan, la nature ferrugineuse de la latérite est indiquée. Les oxydes et hydroxydes de fer sont faciles à identifier, leur présence dans les latérites s'impose d'autant plus facilement à l'esprit des premiers observateurs que les latérites fournissent le minerai des forges artisanales des pays tropicaux. C'est la recherche de mine-

rai de fer qui conduit les géologues des Indes à s'intéresser aux latérites. La littérature du 19^e siècle et particulièrement les publications du *Geological Survey of India* renferment de nombreuses descriptions de latérites ferrugineuses (Babington 1821, Newbold 1844, 1846, etc...).

Que les oxydes ou hydroxydes métalliques autres que ceux du fer appartiennent au même titre aux latérites a été plus long à découvrir. Certains auteurs ont pourtant eu très tôt la possibilité de réaliser l'importance de la libération de l'alumine. C'est Berthier qui découvre (1820) la nature alumineuse d'une formation de surface trouvée près des Beaux de Provence que l'on appellera, après lui, la « bauxite ». Il analyse aussi (1821) un minerai provenant du Fouta Djallon qui est une « latérite », mais BERTHIER ignore ce terme, et qui contient 2,8 % de silice, 8,6 % d'alumine, 77,2 % de fer, et 11,4 % d'eau. BERTHIER n'a pas fait de rapprochement entre les deux. Avoir fait la toute première analyse de bauxite puis l'une des premières analyses de latérite lui donne une place remarquable parmi les précurseurs de l'étude des altérations tropicales. Un demi-siècle plus tard, Meunier (1872) puis Jannettaz (1877) signalent qu'il existe en Guyane française des variétés de bauxites. Certaines offrent « l'identité la plus complète avec la bauxite du midi de la France », elles sont constituées « par l'hydrate d'alumine simplement coloré par l'oxyde de fer » (MEUNIER). Il en existe en fait plusieurs variétés: « Les unes, compactes, sont des variétés d'hydrargillite, contenant 7 à 8 % d'oxydes de fer. Les autres sont des variétés pisolithiques de peroxyde de fer et de limonite, renfermant 15 à 20 % d'alumine » (JANNETTAZ). Les communications de ces deux auteurs qui, comme Berthier précédemment, n'ont pas fait eux-mêmes les observations de terrain, sont très succintes. Des prospections minières aux Indes montrent à MALLET (1883) des couches manganésifères étroitement associées à des latérites ferrugineuses, malheureusement il donne à ces latérites une interprétation erronée qui sera exposée dans les pages suivantes. Il faut signaler également les analyses données par Lenz (1878) pour des latérites du Gabon qui sont essentiellement limonitiques, mais contiennent aussi suivant les cas un peu de silicates ou d'hydrates d'alumine. Ce sera en fait à BAUER (pages suivantes) qu'il appartiendra de mettre vraiment en évidence la libération des hydrates d'alumine par l'altération des roches dans les conditions tropicales.

C'est dans l'ignorance des travaux de Bauer qui sont antérieurs, que Schloesing (1901) et Muntz & Rousseaux (1901, 1903) au cours d'un travail en collaboration montrent que les sols de Madagascar contiennent de fortes quantités d'alumine libre et de fer appartenant en grande partie aux fractions limoneuses et sableuses. Schloesing a opéré l'extraction de l'alumine par traitement à la soude. Les quantités obtenues sont toujours restées très réduites pour les sols de France, du Mexique et de Porto-Rico; par contre les échantillons apportés de Madagascar donnent jusqu'à 11 % d'alumine et une très faible extraction de silice. Ces études sont à caractère agronomique; si elles négligent les processus d'altération, elles ouvrent par contre des perspectives nouvelles sur la structure des sols et, par la comparaison des sols de pays très éloignés, sur les effets de la zonalité climatique.

L'ALTÉRATION DES ROCHES ET LA FORMATION DES PRODUITS LATÉRITIQUES

A l'époque où va paraître la première étude de Bauer (1898), il est déjà communément admis que la latérite est un produit de la transformation des roches. Parmi les premiers à l'avoir affirmé, citons Babington (1821), et Logan (1851) qui écrit: « the ferruginous and quartzo-ferruginous rocks including laterite ... prove to be the original rock of the situs meta-

morphosed ». De même Kelaart (1853) affirme: « laterite is the product of the desintegration and decomposition of granitic rocks ».

Il y a eu bien sûr quelques interprétations fallacieuses, que réfutent Heusser (1858), Schenck (1893) et Young (1853) qui écrit en particulier « laterite cannot be supposed to be igneous, but is evidently ... of chemical origin ».

On sait donc que la latérite provient de la transformation des roches, qu'elle est ferrugineuse, et certains auteurs ont observé qu'elle peut être alumineuse, à différents degrés de pureté. Tout cela reste assez mal formulé. L'originalité du travail que va présenter Bauer réside dans l'observation directe de la transformation d'une roche silicatée en un matériau ferrugineux et alumineux.

la découverte fondamentale faite par Bauer (1898)

Les Iles Seychelles ont été parcourues en 1895 et 1896 par un zoologiste, Brauer, qui en a rapporté un certain nombre d'échantillons de roches et de latérites pour les donner à Bauer qui en confia l'analyse chimique à Busz. De ces échantillons qu'il n'a pas observé luimême en place, Bauer a donné d'excellentes descriptions. L'étude au microscope d'un échantillon prélevé sur granite montre un maintien général de la structure de la roche; les quartz sont restés intacts, à l'emplacement des feldspaths primitifs s'observent des agrégats de plaquettes décolorées, la hornblende et les micas sont remplacés par des masses ferrugineuses brun foncé. Sur diorite (sans quartz), il y a également conservation de la structure de la roche, remplacement de la hornblende par des amas ferrugineux et des feldspaths par des plaquettes blanches. Les produits ferrugineux vont parfois imprégner d'anciennes diaclases ou des vides qui se sont formés à l'emplacement des feldspaths. Ces transformations sont progressives, elles peuvent être suivies sur des boules de granite dont le noyau est encore frais et qui s'altèrent vers la périphérie.

TABLEAU I.	_	Analyses	de	deux	latérites	des	Sey chelles,	suivant	BAUER	(1898)

1	Latérite sı	ar granite	Latérite sur diorite		
	I	I II		II	
Silice	52,06	_	3,88	_	
Alumine	29,49	60,68	49,89	51,98	
Oxyde de fer	4,64	9,56	20,11	20,95	
Eau	14,40	29,76	25,98	27,07	
Total	100,59	100,00	99,86	100,00	

Echantillon sur granite:

I : Dosage de la totalité, avec le quartz.

II: Dosage après enlèvement mécanique du quartz.

Echantillon sur diorite:

I : Dosage de la totalité.

II: Composition calculée, déduction faite de la silice.

Les analyses chimiques ont été faites pour un échantillon sur granite et un échantillon sur diorite, par attaque à l'acide chlorhydrique à chaud. Dans le cas de l'échantillon provenant du granite, toute la silice dosée dans l'analyse globale (I) correspond au quartz. En effet, pour une deuxième analyse, les grains de quartz ont été enlevés en émiettant l'échantillon sous les doigts; les parties fines révèlent une composition (II) sans silice, avec les mêmes

proportions d'alumine, fer et eau que dans le dosage total. Le tri mécanique n'a pas été nécessaire pour l'échantillon sur diorite, qui ne contient que très peu de quartz (moins de 4 %). La composition de la fraction non quartzeuse a été calculée (II) en ramenant à 100 les pourcentages d'alumine, fer et eau du dosage total (I).

Déduction faite de ce qui doit entrer dans la constitution de la limonite, la teneur en eau rapportée à celle de l'alumine correspond presque à la composition de l'hydrargillite, le déficit d'eau est très léger mais peut pourtant laisser supposer, suivant BAUER, l'existence

d'un peu de diaspore.

Examen au microscope et analyse chimique se complètent, et Bauer peut conclure que la latérisation consiste en la transformation des composés alumineux de la roche en hydrates d'alumine, essentiellement en hydrargillite qui apparaît au microscope en paillettes blanches, avec perte de la totalité de la silice combinée et des composants alcalins. La structure originelle de la roche est conservée, tout au moins dans le premier stade de l'altération. Il ne semble pas y avoir de transport d'alumine, par contre le fer est mobile, mais cela ne constitue pour Bauer qu'un aspect secondaire de la latérisation. Pour lui, en effet, la latérisation consiste essentiellement en un processus de lessivage (Auslaugunsgprozess) qui laisse un résidu d'alumine.

BAUER a trouvé une grande analogie entre les compositions chimiques de ces latérites des Seychelles et les compositions d'un certain nombre de latérites du Gabon, du Fouta Djallon (cf. Berthier), de Birmanie, des Bermudes, citées dans la littérature. C'est surtout d'une comparaison avec les bauxites du massif du Vogelsberg (Allemagne) particulièrement bien étudiées par Liebrich (1891) que Bauer tirera le plus d'enseignements. En effet les bauxites en question recouvrent des roches cristallines, et il existe une similitude frappan'te entre les transformations des feldspaths en agrégats de petits cristallites blancs et des minéraux ferromagnésiens en masses ferrugineuses colorées décrites par Liebrich et celles observées par Bauer. Il s'y ajoute une complète identité de composition chimique.

LIEBRICH avait supposé l'intervention de solutions sulfuriques dans la formation des bauxites. Bien qu'il ait lui-même pensé que l'acide nitrique apporté par les eaux de pluies puisse être essentiel à la latéritisation, BAUER fait remarquer que des solutions sulfuriques acides solubiliseraient plutôt l'alumine pour laisser en place la silice et donneraient donc un résultat inverse de la bauxitisation et de la latéritisation, et laisse entendre qu'il peut y avoir action de solutions alcalines. Sur les mécanismes qui, des roches silicatées, conduisent à la formation d'hydrargillite, BAUER ne propose pas de doctrine bien définie, mais on peut retenir qu'il a formulé, sur l'action de solutions sulfuriques, nitriques ou alcalines, des hypothèses qui seront débattues bien longtemps après lui.

Dès sa première étude sur les latérites, et sans avoir fait lui-même d'observations en place, Bauer a obtenu des résultats réellement fondamentaux. Conclusion malheureusement un peu hâtive, il a suggéré l'identité des bauxites et des latérites et soutenu que la latéritisation n'est par conséquent pas exclusive des pays tropicaux. En 1898, Bauer laisse donc l'image d'un processus unique conduisant, dans les latérites tropicales comme dans les bauxites de climats tempérés, à l'accumulation d'alumine et secondairement de fer.

De nouvelles études sur des échantillons des Iles Comores, de Zanzibar, de Madagascar, (1907, 1911) montrent à BAUER qu'il peut se former aussi des silicates d'alumine dans les conditions tropicales, et que son premier schéma était donc trop strict.

Le travail de Bauer, tant par sa méthode que par ses résultats, est remarquable pour son temps, et l'on ne peut que s'associer aux éloges prononcés en 1930 par Marbut: « The chemical work of Bauer not merely drew attention to the fundamental chemical character of laterites, but left little else than details to be done by others ».

les travaux de Harrison en Guyane

Bauer a quand même laissé plus à découvrir que ne le pense Marbut. C'est l'analyse des nombreuses variations liées à des conditions locales, pétrographiques, topographiques, hydriques, qui fait l'intérêt des recherches de Harrison.

Contrairement à Bauer, Harrison a une expérience directe des régions tropicales, il a observé lui-même in-situ les latérites qu'il analyse. La Guyane Britannique lui a donné ses sujets d'études principaux. Ses premières publications sur les latérites sont des années 1908, 1910, 1911. Il a laissé des notes posthumes qui sont exploitées par Harry & Follet-Smith, sous leur propre signature, en 1931, mais éditées intégralement grâce à Harry en 1933. Cet ouvrage est particulièrement intéressant, car on y retrouve toutes les observations, les méthodes de travail, les conceptions de J. B. Harrisson sur la genèse des latérites.

Ses meilleures observations concernent l'altération, le « katamorphisme » suivant son expression, des roches basiques. L'examen au microscope montre le remplacement des feldspaths plagioclases par la gibbsite; les fissures des feldspaths sont souvent soulignées par la limonite. Les pyroxènes se transforment généralement directement en limonite, mais ils donnent parfois de la chlorite, du talc ou des micas qui disparaissent ensuite. Le passage de la roche saine à la latérite primaire est cependant toujours rapide, il s'opère en quelques millimètres. Au-dessus de roches basiques dépourvues de quartz, il existe souvent dès les premières couches d'altération du quartz qui est de néoformation.

Plusieurs coupes sont décrites par Harrison. A la roche, succède toujours la couche de latérite primaire d'épaisseur généralement réduite à quelques centimètres ou dizaines de centimètres. Elle est constituée d'hydrates d'alumine et de fer, et parfois de quartz néoformé. Au-dessus apparaissent des formations qui, contrairement à la latérite primaire, contiennent souvent de grandes quantités de silicates d'alumine (kaolinite). Ce sont des formations meubles, terres latéritiques et terres superficielles (humifères), ou indurées, croutes ferrugineuses et bauxitiques. Les tableaux 2 et 3 donnent les résultats des analyses chimiques de deux coupes sur dolérites.

Tableau II. — Analyse d'un profil sur dolérite, en position haute dans le paysage, suivant Harrison (1933)

	I	II	III	IV	V
Quartz	2,40	2,86	0,13	5,43	0,14
SiO ₂	49,60	0,50	0,71	4,37	0,62
Al ₂ O ₃	17,29	46,80	37,70	59,00	10,54
Fe ₂ O ₃	2,90	23,64	31,78	1,10	74,43
FeO	8,26	2,50	0,90	0,97	0,65
H ₂ O	0,35	22,96	24,50	28,06	9,60
TiO_2	0,53	0,69	4,18	0,70	3,91
MnO	0,05				
MgO	6,95	_			
CaO	8,80				0,02
K ₂ O	0,18		_	0,07	
Na ₂ O	2,81	_	_	0,05	
P ₂ O ₅	0,01	0,13	0,10	0,38	0,03

I — Dolérite.

II — Latérite primaire.

III — Bauxite ferrugineuse.

IV — Bauxite lessivée (en fer).

V — « Ironstone » latéritique.

Tableau III. — Analyse d'un profil sur dolérite, en position basse avec nappe phréatique, suivant Harrison (1933)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VII	IX
Quartz	1,60	13,24	12,66	11,31	11,64	12,28	47,41	48,09	0,04
SiO ₂	49,69	7,94	3,41	4,23	4,66	21,89	3,30	4,72	1,56
Al ₂ O	15,20	26,93	29,11	32,77	26,81	24,94	26,33	24,97	19,08
Fe ₂ O ₃	3,08	27,94	28,62	27,80	33,97	26,93	10,67	11,07	55,63
FeO	11,20	3,14	3,34	3,21	2,68	1,36		-	0,80
H ₂ O	0,30	17,26	20,20	19,65	18,86	11,29	11,28	10,90	17,39
TiO ₂	1,00	1,80	2,03	1,37	1,13	0,38	0,67	0,67	5,50
MgO	5,63	0,69	0,06	0,09	0,14	0,68	0,21	0,07	-
CaO	9,58	0,48	0,02	0,02	0,02		0,23	0,02	
K ₂ O	0,60	0,32	0,06	0,07	0,04	0,05	0,21	0,02	
Na ₂ O	2,09	0,78	0,05	0,07		0,02	0,14	0,16	

I Dolérite - II, III, IV, V couches successives de latérite primaire, sur moins de 8 cm d'épaisseur - VI Terre latéritique (épaisseur de 5 à 6 mètres) - VII « Sous-sol » (1 mètre d'épaisseur) -VIII Sol superficiel (25 cm) - IX « *Ironstone* » de surface.

Les roches cristallines plus acides subissent une altération différente. Il n'y a pas apparition brutale de latérite primaire comme sur les roches basiques. Les transformations sont beaucoup plus progressives, la roche devient d'abord friable, elle se blanchit lors de la désagrégation des feldspaths, puis les ferro-magnésiens se transforment en limonite. Dans les masses terreuses supérieures, loin de la roche saine, apparaissent encore souvent des débris de feldspaths et des biotites décolorées.

Dans toutes les publications de Harrison, la description des transformations minéralogiques, les analyses chimiques, nous paraissent excellentes. L'auteur a pris soin de situer ses coupes dans le paysage et par rapport aux nappes phréatiques, il suit leurs différenciations sur le plan vertical. Harrison a tenté d'établir des bilans géochimiques au sens où nous l'entendons actuellement : par référence aux éléments les plus stables, il essaie de retracer les gains et pertes de chacun des faciès latéritiques. Après avoir effectué les calculs iso-alumine, iso-titane, iso-fer, il doit conclure qu'aucun de ces trois éléments ne lui paraît parfaitement stable. A défaut de pouvoir établir des bilans stricts, les chiffres analytiques montrent cependant les mécanismes du katamorphisme, qui sont l'hydratation, l'oxydation du fer ferreux, la perte des bases et de la silice. La perte de silice est beaucoup plus forte sur roche basique que sur roche acide.

Ainsi des différences très importantes sont mises en évidence par Harrison suivant qu'il s'agit de l'altération de roches basiques ou acides, en position haute ou basse. L'altération des roches basiques donne une latérite primaire gibbsitique qui est surmontée généralement d'une terre latéritique partiellement silicatée. Harrison postule donc la résilicification de la gibbsite, la silice nécessaire pouvant être apportée par la nappe phréatique suivant ses mouvements verticaux ascendants. La position topographique conditionne l'intensité de l'altération. La perte de silice subie par les latérites primaires peut être de 99 % pour les positions hautes contre 93 % pour les positions basses. Les formes les plus riches en hydrates d'alumine et de fer se trouvent sur les positions hautes où les pluies sont abondantes. Sur les positions basses à drainage imparfait, et surtout si la pluviométrie est relativement réduite, il se forme davantage de silicates d'alumine secondaire, et parfois même du quartz. L'altération des roches cristallines acides se produit beaucoup plus progressivement, et elle conduit à la formation de silicate d'alumine (kaolin), ces caractères sont aussi ceux observés parfois dans les régions tempérées. Comme pour les roches basiques, l'altération est moins active dans les parties basses que dans les reliefs élevés. Les différences d'altération entre les roches peu-

vent s'expliquer au moins partiellement, par le comportement des feldspaths. Les plagioclases produisent généralement de la gibbsite, alors que les feldspaths potassiques donnent plus facilement de la kaolinite.

La silice apparaît donc comme un élément très mobile, vite solubilisé lors de la formation de la latérite primaire, mais qui ensuite se fixe sur l'alumine ou donne des néoformations de quartz. Harrison rapporte avoir très souvent trouvé du quartz dans des matériaux surmontant des roches basiques qui n'en possèdent pas du tout. La formation de quartz est fréquente surtout dans les zones basses.

Harrison a cherché dans la minéralisation des eaux une autre mesure des phénomènes d'altération. Après avoir fait le compte de ce que les pluies peuvent apporter comme poussières et sels fournis par les embruns de la mer, il retient comme chiffres moyens en mgr par litre pour les eaux du réseau hydrographique guyanais : 31,28 de silice, 2,79 de fer, 1,40 de calcium, 0,87 de magnésium, 0,68 de potassium et 3,90 de sodium. Ces chiffres s'inscrivent en confirmation de ce qui s'observe dans les résidus d'altération, le départ de la silice et des bases est manifeste, il n'y a que peu de fer dans les eaux et pratiquement pas d'alumine. Harrison a également tenté quelques expériences d'altération expérimentale. Des roches broyées sont en contact avec l'eau distillée en présence d'un indicateur coloré, le changement de couleur s'opère rapidement.

les travaux de Lacroix à Madagascar et en Guinée

L'œuvre de Lacroix est immense, elle concerne toute la minéralogie de la France et de ses colonies, particulièrement Madagascar. Malgré l'étendue des sujets étudiés, Lacroix a laissé sur les latérites un travail fondamental qui fut considéré comme tel par ses contemporains (Fermor 1915, Campbell 1917).

Les pays tropicaux parcourus par Lacroix sont Madagascar, puis la Guinée Française. Les résultats sont publiés en 1913 et 1914, pratiquement en même temps que ceux de Harrison, puis présentés à nouveau sous une perspective élargie en 1923 et 1934.

Il n'y a pas dans les altérations tropicales de stade de désagrégation physique précédant la décomposition chimique comme c'est le cas dans les pays tempérés. Lacroix remarque également que les roches nues ne s'altèrent pratiquement pas, l'altération latéritique lui semble donc liée à une couverture dont l'activité biologique ne doit pas être oubliée.

Les syénites néphéliniques des Iles de Los ont donné à Lacroix l'occasion de décrire un très bel exemple de roche altérée à structure conservée. Les feldspaths sont transformés en paillettes d'hydrargillite qui peuvent former des mâcles, mais qui ne sont jamais disposées suivant une orientation privilégiée par rapport au cristal primitif. La forme extérieure des feldspaths est conservée, il se produit donc une pseudo-morphose mais avec une structure cloisonnée qui laisse des vides correspondant à la diminution de volume due à la perte de silice et d'alcalis. Les minéraux ferromagnésiens colorés disparaissent pour être remplacés par une argile colorée par de l'oxyde de fer. Dans ces roches sans quartz, l'altération a donné un matériau poreux, conservant la structure primitive de la roche et respectant les diaclases: Lacroix nomme « faciès pain d'épice » ce type d'altération.

Remarque faite également par Harrison, l'altération des roches cristallines plus acides n'a pas la brutalité de la transformation des syénites. Ainsi des schistes micacés perdent progressivement leur cohésion pour devenir friables et onctueux s'ils sont secs, ou gluants et plastiques à l'état humide. Suivant leur nature, les minéraux libèrent fer ou alumine, composant un matériau que Lacroix décrit ainsi: « On croirait voir une gigantesque palette de peintre couverte des plus riches couleurs: ici, des taches d'un blanc éclatant, là toute une gamme de rouges rutilants, ou de jaune ou de gris, se fondant les uns dans les autres d'une façon insensible ou se montrant accolés sans transition ».

L'altération des silicates d'alumine libère de l'alumine libre qui selon les cas forme des cristallites d'hydragillite ou reste colloïdale (amorphe), elle peut aussi donner de la kaolinite ou un silicate colloïdal. Lacroix met en évidence ces deux grands modes d'altération (Tableau IV) par l'analyse d'un phéno-cristal de microcline entièrement transformé en hydrar-

gillite (I) et d'une roche feldspathique dépourvue de minéraux colorés qui s'est transformée en un mélange d'hydrargillite et de silicate (II).

Echant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	H ₂ O
I	1,34	63,02	1,03	34,61

TABLEAU IV. — Produits d'altération, de feldspaths, suivant LACROIX (1913)

Bien qu'il n'ait pas mis en évidence de filiation entre les matériaux kaolinique et alumineux examinés, Lacroix semble admettre que dans bien des cas la formation de kaolinite précède celle d'hydrargillite. Il accorde une certaine mobilité à l'alumine, l'hydrargillite paraissant pouvoir être solubilisée et se déplacer. Il existe en effet des paillettes d'hydrargillite à l'emplacement d'anciens minéraux non alumineux. La mobilité du fer est encore plus manifeste, elle s'observe très bien sur les blocs de syénites partiellement altérés. Au voisinage du noyau de roche saine, la latérite d'abord blanchie par la migration du fer se teinte progressivement vers la périphérie de rose, rouge et rouge brun. Il y a, dit Lacroix, un mouvement centrifuge du fer.

De très nombreux échantillons provenant de Madagascar et de Guinée ont été analysés. Issus de roches variées placées dans des environnements différents, ils donnent déjà un assez bon inventaire des faciès que prennent les latérites, alumineuses ou silicatées, ferrugineuses ou non, blanchies, cuirassées, ou masses terreuses rouges. Ces multiples observations permettent à Lacroix de proposer une terminologie et une classification (V. pages suivantes). Il peut aussi esquisser la répartition des latérites, et surtout des terres rouges, dans la grande île de Madagascar.

Des nombreuses analyses chimiques publiées par Lacroix, retenons celles (Tableau V) montrant le passage de syénites à des altérations kaolinitiques et gibbsitiques et à des latérites alumineuses et ferrugineuses. Les échantillons ne proviennent pas d'un même profil vertical, mais ont tous pour origine une syénite de composition régulière. Pour les sols de Madagascar en particulier, Lacroix a parfois établi, à partir de l'analyse chimique, les pourcentages des différents minéraux, kaolinite, hydrargillite, oxydes de fer hydratés ou non.

Avec les travaux de LACROIX, les différentes modalités de l'altération latéritique sont déjà bien connues: les analyses montrent clairement le départ des alcalis et de la silice, l'oxydation du fer, et suivant les cas la formation d'hydrate d'alumine ou de silicate d'alumine. L'état cristallin des produits nouveaux est reconnu au microscope, les particules trop fines sont supposées colloïdales, c'est-à-dire amorphes. Si les étapes et les produits de l'altération sont bien mis en évidence, les mécanismes de cette altération prêtent encore à des hypothèses hasardeuses. Voici ce qu'écrit Lacroix en 1923. « Bien que l'eau soit seule susceptible d'enlever des alcalis aux feldspaths, il est probable que, dans l'altération silicatée, l'acide carbonique joue un rôle prédominant en donnant naissance à des carbonates solubles. Ces carbonates, joints aux acides humiques résultant de la décomposition végétale, agissent simultanément sur les silicates originels des roches et d'autant plus énergiquement que la température est plus élevée. La chaux, la magnésie et une partie du fer (réduit à l'état de protoxyde) sont éliminés sous forme de bicarbonates solubles : la silice enlevée par les carbonates alcalins, déplace à son tour l'acide carbonique de ceux-ci ; ce dernier est mis en liberté et le cycle recommence ». LACROIX est conscient de l'insuffisance des connaissances de son temps pour expliquer l'altération et en particulier la « rupture du noyau kaolinique »; il a suggéré très justement d'aborder le problème par voie expérimentale.

BAUER, HARRISON, LACROIX ont apporté des connaissances véritablement fondamentales qui restent dans une très large mesure toujours valables, ils ont défini des méthodes de travail et suggéré de nouvelles orientations de recherche. Pour être les plus notables de leur époque, leurs travaux ne sont pas cependant les seuls et il est juste d'en citer certains autres.

I: Microcline épigénisé.

II: Altération d'une roche feldspathique. Le quartz n'a pas été solubilisé.

Tableau V. — Analyse de la syénite des Îles de Los (Guinée) et des latérites qui en dérivent, suivant Lacroix (1913)

	I	II	III	IV	V
SiO ₂	56,88	35,14	2,21	0,37	9,66
Al_2O_3	22,60	40,08	55,83	57,12	31,26
Fe ₂ O ₃	0,97	4,12	5,22	7,41	26,91
FeO	2,19	_	_		_
TiO ₂	0,29	0,70	0,12	0,90	0,63
CaO	1,33	0,45	0,24	0,17	0,37
MgO	0,56	0,21	0,19	_	0,87
Na ₂ O	8,30	_	0,49	0,26	
K ₂ O	5,57	_	0,27	0,37	_
H ₂ O	0,98	17,84	30,47	33,71	20,50
Insoluble	0,34	1,46	5,74	0,30	9,80
Total	100,09	100,00	100,76	100,61	100,00

I: Syénite intacte.

II: Zone de départ silicatée à faciès conservé.

III: Zone de départ gibbsitique.

IV & V: Cuirasse contenant des blocs compacts (IV) et un ciment ferrugineux (V).

Ces échantillons ne proviennent pas d'un seul profil, mais le massif de syénite qui les supporte est très homogène.

travaux divers sur l'altération latéritique

Dès 1903, Warth H. et F. J. publient les analyses et les formules minéralogiques d'une collection de latérites des Indes qui représentent une gamme assez complète de matériaux de composition gibbsitique à kaolinique, avec des taux de fer très variables. Leur étude apparaît comme un bon inventaire de la constitution chimique des latérites, mais elle est dénuée de toute considération génétique.

C'est encore une étude sur l'altération de roches basiques (dolérites) que présentent Chautard & Lemoine (1908). La comparaison des compositions chimiques de la roche et des produits d'altération, le calcul iso-titane, permettent à ces auteurs de bien mettre en évidence la rupture des silicates, le départ des bases et d'environ 4/5 de la silice, l'enrichissement en fer, titane et alumine accompagné d'oxydation et d'hydratation.

De 1909 à 1916, à l'époque où paraissent également les travaux de Harrison et de Lacroix, Arsandaux publie les résultats de ses campagnes au Gabon et au Soudan en faisant quelques comparaisons avec des échantillons provenant de Madagascar et du Vénézuela. Une coupe verticale observée dans une latérite du Soudan a permis à Arsandaux de montrer, grâce à des extractions fractionnées par traitements successifs aux acides chlorhydrique puis sulfurique, le développement progressif des hydrates de fer et d'aluminium libres et leur hydratation croissante de la base du sol à sa partie supérieure, et la diminution corrélative des silicates. A la base, les silicates composent presque exclusivement la fraction fine du sol, à la partie supérieure apparaissent 33 % d'hydrates libres pour 67 % de silicates.

L'altération des feldspaths donne, suivant Arsandaux, des silicates et de l'hydrargillite. Les silicates sont d'abord des matériaux micacés, muscovites presque normales qui perdent progressivement leurs alcalis et s'hydratent pour aboutir à la kaolinite. Dans le Tableau VI sont reportées les compositions attribuées aux silicates de certains sols du Gabon. Arsandaux trouve systématiquement semble-t-il, des teneurs assez élevées en silice, peut-être parce que le traitement destiné à l'enlèvement des hydrates a solubilisé un peu de l'alumine des silicates. Les taux de potassium sont aussi très élevés dans certains échantillons. Les hautes teneurs en silice et en potasse de la plupart de ses échantillons ont conduit Arsandaux a admettre un stade micacé dans l'évolution des silicates.

TABLEAU VI. — Composition	des	silicates	đе	latérites	du	Gabon	suivant	ARSANDAUX
•		(19	09)					

	I	II	III	IV	V	VI
SiO ₂	45,6	47,8	44,8	50,2	47,0	49,0
Al ₂ O ₃	36,6	34,5	38,0	34,0	34,1	33,1
TiO ₂	0,4	tr	1,0	0,8	1,2	1,0
CaO + MgO .	0,8	1,1	1,2	1,7	1,3	0,9
K ₂ O	1,2	4,0	4,4	5,3	6,4	8,3
Na ₂ O	0,4	1,0	0,6	0,7	0,7	0,7
H ₂ O	14,5	11,3	9,5	9,2	9,2	6,4
Total	99,5	99,7	99,5	101,8	99,9	99,5

Roches à l'origine des latérites :

I: Granite — II: Arkose — III: Schiste métamorphique — IV: Granulite — V: Schiste — VI: Schiste micacé et amphibolique.

Les observations de Campbell (1917) s'appuient sur une longue expérience de l'Afrique tropicale humide et quelques voyages en Asie, Amérique, Australie. On trouvera dans les pages suivantes les conclusions de Campbell quant à l'influence de la nappe phréatique et du climat. En ce qui concerne les mécanismes de l'altération, il fait intervenir les eaux carbonatées alcalines. Ainsi le fer pourrait être solubilisé comme bicarbonate ferreux. Pour les silicates, Campbell suggère une série de réactions possibles selon lui dans le milieu carbonaté alcalin naturel. On passerait ainsi d'un silicate comme la kaolinite à de la gibbsite et de l'acide silicique par les réactions :

$$Al_2O_3$$
, $2 SiO_2$, $2 H_2O + 4 Na_2CO_3 + H_2O \longrightarrow Al_2(OH)_6 + 2 Na_4SiO_4 + 4 CO_2 Na_4SiO_4 + 2 CO_2 + 2 H_2O \longrightarrow 2 Na_2CO_3 + H_4SiO_2$

La formation de kaolinite pourrait se faire à l'inverse par la réaction :

$$Al_2(OH)_6 + 2 H_4SiO_2 \longrightarrow Al_2O_3$$
, $2 SiO_2$, $2 H_2O + 5 H_2O$

Il reste à mentionner les études d'altération expérimentale entreprises par Mohr (1909), qui sont beaucoup moins sommaires que celles pratiquées par Harrison (op. cité) avec des indicateurs colorés. Pendant 18 mois, Mohr a conduit l'expérimentation suivante. Des roches broyées sont disposées dans des colonnes et soumises à l'action d'eaux de pluie, soit par remontée de l'eau dans la colonne à partir d'un plan d'eau inférieur, soit par percolation. La simple humectation produite par la remontée de l'eau n'engendre qu'une faible altération : seule l'augite est atteinte et perd sa silice. La percolation au contraire détermine une forte altération, puisque la silice et les bases de l'augite et des feldspaths calciques sont entraînées, et que de la kaolinite se substitue aux feldspaths. En ce domaine, Mohr a réalisé un travail de précurseur de grand intérêt mais qui est malheureusement resté peu connu. L'étude expérimentale des altérations ne sera reprise que longtemps plus tard.

L'ÉTUDE GÉNÉTIQUE DES LATÉRITES EN FONCTION DE LEUR ENVIRONNEMENT

Il est apparu très vite que si les latérites se forment toutes par un processus d'altéra tion, elles présentent entre elles de larges variations tant physico-chimiques que morphologiques. Bien que les géologues qui étudient à cette époque les latérites n'aient pas suivi le développement de la pédologie ni connu ses principes génétiques, ils arrivent très vite à associer à l'étude morphologique des latérites, l'analyse de ce que nous appellerions maintenant les facteurs de la pédogénèse.

la dépendance des latérites vis-à-vis du climat

Pendant longtemps les latérites apparaissent comme spécifiques des régions tropicales. Ainsi en 1848, Newbold assure qu'elles sont inconnues en Europe, et il semble bien alors que ce soit là une évidence qui ne puisse pas être démentie.

Ce postulat de l'origine des latérites est d'abord remis en question tout simplement en raison de la définition que l'on donne des latérites. De nombreux auteurs, parmi lesquels nous pouvons citer Maclaren (1906), Simpson (1912), Fox (1923-1932) affirment qu'il n'y a de latérite que sous les climats tropicaux à saisons alternées. Ils donnent en effet au terme de « latérite » un sens restrictif qui ne désigne que des formations tachetées ou indurées. Ces formations sont interprétées par des battements de la nappe phréatique, ou par des remontées capillaires, ces deux phénomènes supposent en effet de larges variations du niveau hydrostatique et une alternance de périodes sèches et humides. Walther (1916) affirme lui aussi, mais pour d'autres raisons, qu'il ne se forme pas de latérite sous les climats les plus humides. En effet, il observe dans les régions toujours humides des terres brunes alors qu'il associe le terme de latérite aux formations indurées et aux terres rouges. Il a donc affirmé péremptoirement que la forêt vierge et les précipitations importantes n'ont rien à voir avec les latérites. C'est là aussi l'opinion de Lang (1915). Par contre ceux qui accordent au terme un sens plus large reconnaissent des latérites sous les couverts forestiers où l'humidité est permanente. C'est en particulier le cas de Harrison (1910) et Mohr (1909).

Ce sont en fait les études sur l'altération des roches et sur les minéraux néoformés qui posent vraiment le problème du rôle du climat. Bauer (1898) a présenté les hydrates d'alumine comme spécifiques des latérites. En fait ses premières observations reposent sur des cas particuliers, et par la suite il a bien vite reconnu que, si les hydrates d'alumine sont fréquents et parfois prépondérants ou exclusifs, la kaolinite est elle aussi très courante et parfois prépondérante. Or, à cette époque on considère la kaolinite comme la véritable « argile » et comme le constituant essentiel des sols tempérés. D'un autre côté, plusieurs auteurs ont identifié l'hydrargillite ou le diaspore dans les produits de la transformation des feldspaths sous climats tempérés. Ce sont particulièrement Liebrich (1891), Lacroix (1890), Thugutt (1895). Il semble donc que kaolinite et hydrates ou oxydes d'alumine soient ubiquistes. C'est pourquoi Bauer (en 1907 et 1911), Harrison, Lacroix, Arsandaux, Campbell, (op. cités) expriment-ils en des termes très comparables l'opinion que les phénomènes d'altération dans les régions tempérées et tropicales sont de même nature mais se distinguent par leurs intensités.

A cette comparaison des altérations observables en régions tropicales et tempérées, vient s'ajouter l'analogie qui apparaît entre les latérites et certaines formations d'Europe. Greenough (1854) et E. de Beaumont (1855) sont les premiers à tenter un rapprochement entre les latérites asiatiques et des formations ferrugineuses d'Allemagne (trass) et d'Italie (puzzolona piperino). Mallet (1881) entreprend une comparaison très serrée entre les couches ferrugineuses associées à des basaltes en Irlande, et les latérites qui couvrent aussi des basaltes aux

Indes, et recherche une origine commune à ces deux formations. Les bauxites, dont Bauer a montré en 1898 l'analogie sinon l'identité avec les latérites, apparaissent de plus en plus répandues. On en découvre dans les régions méditerranéennes, tempérées, et même relativement froides. Walther (1916) lui aussi établit un rapprochement entre les latérites et le « ferreto » d'Italie du nord (le « ferreto » est en fait un sol rouge formé au Quaternaire ancien pendant une période interglaciaire). L'existence hors des tropiques de toutes ces formations généralement rouges, alumineuses ou ferrugineuses, amène beaucoup d'auteurs à conclure, comme Du Bois (1903) que les latérites se forment dans les régions tropicales humides et arides, et même largement hors des tropiques. Cela conduit aussi certains à rechercher des interprétations assez hasardeuses qui seront exposées dans les pages suivantes.

La dépendance de la latérisation vis-à-vis du climat, qui a paru trop évidente aux premiers observateurs, s'est donc progressivement obscurcie. C'est probablement Woolnough (1918, 1928, 1930) qui a le plus clairement exprimé l'incidence des variations climatiques des tropiques. Sous les climats les plus humides, il n'y a pas de fluctuation phréatique, la décharge des nappes se fait latéralement et de façon continue. Dans ces conditions les sols pourront être lessivés complètement de leurs éléments solubles tandis que les insolubles, quartz, gibbsite, kaolinite, s'accumulent. Avec des saisons alternées faisant se succéder saturation par l'eau et dessèchement, certains éléments qui sont lessivés dans le cas précédent, peuvent s'accumuler et donner en particulier les croutes ferrugineuses, calcaires, ou siliceuses. De tous ceux qui étudient les latérites à cette époque, Mohr (1909, 1930) est sans doute celui à l'optique la plus « pédologique ». Il montre l'opposition de la podzolisation des pays froids qui consiste en un lessivage des sesquioxydes sous l'influence d'un humus acide et de la latérisation qui s'opère par lessivage de la silice en présence d'une matière organique vite minéralisée. C'est un premier pas vers la formulation de processus d'évolution corrélatifs des climats.

les influences lithologiques

Une première explication simple aux différentes compositions des latérites est celle donnée par Warth (1903): la nature des roches est responsable de la prédominance du fer ou de l'alumine dans les latérites. Il ne s'agit là en fait que d'une hypothèse puisque la nature des roches supportant les latérites analysées n'est pas mentionnée dans le travail de Warth. Pour Woolnough (op. cités) la nature des roches est déterminante, et sous les mêmes conditions de milieu des roches différentes ont donné à la même époque en Australie des croûtes (duricrusts) ferrugineuses et alumineuses sur granites, calcaires sur roches carbonatées, siliceuses sur quartzites, grès. A propos de l'Adamaoua, Passarge (1895) écrit que basaltes, amphibolites, schistes verts, granites, produisent des latérites, alors que certains gneiss n'en donnent pas. Mais cette fois encore, la raison de cette affirmation est d'ordre terminologique, Passarge désignant comme latérites seulement les terres rouges et les matériaux tachetés ou indurés.

En fait, il s'agit de déterminer si l'alternative de la formation d'hydrates d'alumine ou de kaolinite est réglée par des causes lithologiques. BAUER a montré (1898) que, aux Seychelles, les feldspaths de roches cristallines acides comme les granites libèrent des hydrates d'alumine. Par la suite un grand nombre d'observations conduit à penser que les roches basiques libèrent de l'alumine libre, les roches acides comme le granite produisant de la kaolinite. C'est une opinion défendue principalement par Scrivenor (1909 à 1930) qui s'appuie sur ses propres observations et celles d'autres auteurs comme Blondel (1927). Ce dernier, recherchant dans les latérites d'Indochine l'indice de la nature des roches sous-jacentes, pense que les altérations sont relativement indépendantes du climat. Les terres rouges et les latérites riches en hydrates d'alumine et de fer proviendraient de roches basiques, les altérations de roches acides seraient essentiellement kaolinitiques. Scrivenor, après avoir réuni un certain nombre d'observations comme celles de Blondel, avance l'hypothèse suivante. L'Europe est surtout constituée de roches acides, alors que les roches basiques sont dominantes sous les

tropiques. La coïncidence entre la répartition des roches et la distribution des climats a permis une confusion sur le déterminisme des altérations. Selon lui, la conception de plusieurs altérations climatiques est fausse.

Une vaste expérience a permis à Lacroix (op. cités) de comprendre, mieux que ses contemporains, la complexité des facteurs de l'altération. Ainsi en Guinée, la transformation des roches basiques comme les syénites et les gabbros est brutale et elle donne de la gibbsite, mais sur les granites, gneiss, micaschistes, l'altération est progressive et les feldspaths se « kaolinisent ». Ce qui semble être une loi en Guinée est par contre complètement démenti à Madagascar où toutes les roches donnent de l'hydrargillite, ou de la kaolinite, ou un mélange. Il faut de plus envisager la possibilité de la destruction de la kaolinite qui ne représenterait plus qu'une étape transitoire dans la formation d'hydrargillite. Malgré les travaux de Lacroix, pour la plupart des auteurs de l'époque, la kaolinite caractérise l'altération des roches acides et l'hydrargillite, celle des roches basiques.

la morphologie des latérites et l'action des nappes

Dans les premières publications, les descriptions des latérites sont le plus souvent limitées à quelques phrases, l'accent étant mis sur les caractères minéralogiques des matériaux et sur les considérations génétiques. Les méthodes minutieuses de la description pédologique n'ont pas encore cours. Il paraît suffisant d'énoncer, par exemple, que l'on observe sous une croûte ferrugineuse des argiles rouges ou tachetées, puis des argiles blanches (WALTHER 1916). Ce manque de précision est en partie responsable des confusions sur les termes que nous évoquerons plus loin.

Certains auteurs ont cependant donné des descriptions de coupes verticales. MALLET (1883) présente ainsi un profil latéritique des Indes:

- a) Sol superficiel (30 cm).
- b) Débris latéritiques (30 cm).
- c) Pisolites limonitiques tendres à cassure rugueuse (40 cm).
- d) Pisolites limonitiques à cassure conchoïdale (25 cm).
- e) Ocre, limonitique, avec des pisolites à cassure rugueuse (12 cm).
- f) Pisolites limonitiques à cassure conchoïdale (10 cm).
- g) Ocre, limonitique, avec des pisolites à cassure rugueuse (12 cm).
- h) Lithomarge argileuse vue sur 25 cm.

Il apparaît rapidement que la différenciation verticale des latérites est commandée par la présence et les mouvements des eaux d'infiltration. C'est encore Lacroix (1913) qui est le premier à expliquer ainsi les profils, ou tout au moins qui est le premier à exposer clairement cette conception. Il reconnaît à la base des profils une « zone de départ » qui conserve la structure de la roche. C'est là que les eaux d'infiltration exercent principalement leur action dissolvante. Elle passe progressivement à sa partie supérieure à la « zone de concrétion » dans laquelle disparaît la structure primitive de la roche, où il peut encore se dissoudre un peu de silice, mais qui est surtout celle où les remontées capillaires viennent concentrer le fer, et l'alumine. La zone de concrétions peut ne pas exister. C'est le plus souvent le cas à Madagascar où elle cède la place au « manteau sanglant » des terres rouges.

Pour Walther (1916), les latérites se sont formées suivant un profil primitif qui comporte, au-dessus de la roche massive ou déjà ramollie, une zone lessivée, siège de dissolutions et d'entraînements, puis une zone tachetée que les remontées enrichissent en fer et qui peut se terminer par une couche de concrétions ou une croûte ferrugineuse.

Plus clairement que Lacroix et Walther, Campbell (1917) expose comment l'eau d'infiltration (vadose water) détermine la morphologie des latérites en trois zones. A la base, se trouve la zone de saturation permanente qui est la « lithomarge » blanchie et lessivée. Dans

la zone de saturation intermittente qui la surmonte, vient s'accumuler le fer dissous dans la lithomarge. Le profils peuvent se terminer par une zone de non saturation, surmontant le niveau le plus élevé atteint par la nappe phréatique.

Harrassowitz (1926, 1930) présente quelques profils qui seront longtemps considérés comme les profils latéritiques typiques. Ses descriptions confirment l'opinion que tous les sols latéritiques comportent des horizons blanchis (zersatz), et l'hypothèse des concentrations ferrugineuses produites par mouvements « per-ascensum ». Voici les deux types de profils, qui sont encore cités par Joffe en 1949:

Profil de Madagascar:

- Croute ferrugineuse (1 mètre).
- Limon rouge, riche en concrétions (2 mètres).
- Zersatz allit-siallitique (8 à 10 mètres).

Profil des Indes, sur basalte:

- Limon rouge orangé ou jaune (environ 3 mètres).
- Croute ferrugineuse avec gel d'alumine (de 0,3 à 2,5 mètres).
- Zone tachetée avec enrichissement en fer. Basalte décomposé. Siallite (de 2,5 à 7.5 mètres).
- Zersatz (zone lessivée) (de 4,4 à 15 mètres).

Il n'est pas excessif de dire que les auteurs de cette époque n'accordent pratiquement aucune attention aux horizons humifères. Même HARRISON (op. cités) qui pourtant dirige un département d'agriculture et de science du sol, ne décrit pas les horizons humifères et ne donne pas une seule analyse de la matière organique quand il traite des « latérites ».

la place physiographique des latérites

Les géologues des Indes font, dès leurs premiers travaux sur les latérites, le partage entre les « high-level laterites » et les « low-level laterites ». Lorsque se clarifient les conceptions de l'altération des roches et que s'éliminent les théories de l'origine marine ou lacustre des latérites, il est admis que la décomposition des roches en place produit les latérites des « high levels », caractérisées par une cuirasse (crust) surmontant les classiques horizons tachetés puis blanchis. La destruction de ces latérites qui sont parfois dites « primaires », leur transport et leur dépôt donnent les latérites des « low-level », qui sont formées de gravillons et que l'on appelle latérites « secondaires » ou « détritiques ». Ces formations détritiques occupent les versants des vallées, les terrasses ou les bas-fonds.

Parmi les principaux travaux qui accréditèrent cette distinction de deux grandes catégories de latérites, peuvent être cités ceux de Foote publiés entre 1864 et 1886, la synthèse de la géologie des Indes présentée par Medlicott et Blanford (1879), ceux de Mallet (1883) qui trouvent une audience dépassant largement le cadre des Indes. Plus tard, cette distinction est reprise par Fermor (1911) qui fera longtemps autorité, et se retrouve dans des traités très généraux sur les roches et leurs altérations, comme celui de Merrill (1921). Il est reconnu aussi que l'altération, ou une cimentation ferrugineuse, peuvent contribuer à façonner les dépôts détritiques de latérites des « low-levels ».

En réalité, ces « high and low levels » correspondent à des paysages caractérisés par des aplanissements anciens dominant un système de versants ou de glacis. Ces paysages ne se trouvent pas seulement aux Indes, ils sont assez communs sous les tropiques, et Walther (1916) peut décrire pour certaines régions d'Afrique et d'Australie cette disposition en « high and low levels » avec leurs latérites particulières. Les auteurs qui ont décrits ces latérites primaires et secondaires n'ont pas fait ressortir leur dépendance vis-à-vis d'unités physiographiques spécifiques. Aussi leurs conceptions ne s'appliquant pas à tous les types de reliefs ont parfois été mal comprises. Dans des paysages différents, apparaissent d'autres relations

entre reliefs et latérites (v. paragraphes suivants). HARRISON (op. cités) a pu ainsi employer l'expression de latérite « primaire » dans une acception totalement différente.

Il apparaît aussi que la topographie ne détermine pas que des transports et dépôts détritiques mais aussi des conditions particulières pour les phénomènes physico-chimiques. Dès 1903, Holland fait remarquer que les latérites des « low levels » ont moins d'alumine et plus de fer que celles des « high levels », ce qu'il interprète malheureusement par une action de triage mécanique. Pour les sols de Guyane, la notion de latérite détritique des zones basses ne paraît pas, pour HARRISON (op. cités), pouvoir s'appliquer, alors que les altérations montrent au contraire de larges différences suivant la position dans le relief. Aux basses altitudes, dit Harrison, dans des conditions de drainage imparfait, les pertes de silice et de silicates sont moins grandes qu'aux altitudes élevées dans des conditions de drainage parfait. Lorsque les différences d'altitudes s'accompagnent de variations climatiques, il apparaît que dans les régions élevées, à pluies régulières et abondantes et bon drainage, les latérites sont presque uniquement constituées d'oxydes hydratés de fer et d'alumine. Dans les zones plus basses, avec des pluies moins abondantes et plus irrégulières, lorsque le drainage devient imparfait, les latérites contiennent des silicates d'alumine et même du quartz d'origine secondaire. On ne peut que souligner la clairvoyance manifestée par Harrison, il y a un demi-siècle.

Les croûtes ou cuirasses latéritiques indurées se forment sur des topographies planes ou peu ondulées. C'est ce que remarquent en particulier LACROIX, CAMPBELL, FOX (op. cités).

L'influence de la topographie est souvent analysée suivant les concepts du cycle d'érosion et de la pénéplanation. Davis lui-même (1920), s'appuyant sur des écrits divers, cherche à adapter sa théorie géomorphologique aux pays latéritiques. Au cours d'un cycle d'érosion, il ne se forme pas selon lui de latérites dans les premiers stades, ni même dans le stade de maturité. Ce n'est que dans le stade ultime, lorsque les enlèvements mécaniques cessent que les nappes phréatiques et l'altération peuvent former de puissantes latérites. Il existe des témoins de cycles d'érosion anciens portant une couverture de latérite. Si l'on rejette le vocabulaire de Davis pour son contenu génétique, cela revient à dire plus simplement que la latérite se forme sur des surfaces très planes et non sur des reliefs accidentés. On ne peut qu'approuver cette proposition, avec nos connaissances actuelles, si Davis n'entendait désigner par latérites que les cuirasses ferrugineuses indurées, ce qui n'est pas bien défini par son texte. De ses observations en Autralie, Woolnough (1928, 1930) déduit certaines règles analogues. Woolnough adopte d'ailleurs les concepts et la terminologie de Davis. Dans les régions de relief jeune, les processus d'érosion masquent les processus chimiques, les mouvements des eaux d'infiltration se font latéralement, remontées capillaires ou fluctuations des nappes ne jouent pratiquement pas. Lorsque la pénéplanation progresse, l'érosion se ralentit et les processus chimiques prennent de l'importance. Les « duricrusts » se forment. ou se sont formées, sous des climats à saisons alternantes, dans des topographies qui correspondent aux stades les plus avancés de la pénéplanation.

l'âge des latérites

Si les latérites occupent certains sites paysagiques privilégiés, elles doivent s'associer à l'histoire de ces paysages, avoir un âge et un passé.

Parmi les indices qui permettent de montrer l'ancienneté de certaines latérites, CAMPBELL (1917) retient les changements de conditions génétiques. Ainsi des matériaux tachetés, qui se sont formés sous la dépendance d'une nappe phréatique, peuvent-ils apparaître actuellement parfaitement hors d'atteinte des fluctuations de la nappe ou des remontées capillaires possibles. Il se peut même que le fer, qui auparavant s'accumulait, soit lessivé et laisse se concentrer l'alumine. Soulignons au passage que CAMPBELL a bien saisi la formation de certaines cuirasses que l'on dira plus tard être « d'accumulation relative ».

Les latérites peuvent être situées dans le temps par des observations d'ordre géomorphologique ou stratigraphique. La formation des latérites détritiques des « low levels » réclame une certaine durée qui repousse à une période plus ancienne la formation de celles des « high levels », puisque ce sont ces dernières qui ont fourni les éléments détritiques. Foote (1868, 1873) ayant trouvé des industries lithiques cimentées dans certaines latérites peut les dire post-tertiaires. D'autres indices stratigraphiques, coulées volcaniques ou sédiments datés, sont parfois associés à des latérites. C'est ainsi que Medlicott & Blandford (1879) assignent un âge post-tertiaire aux latérites de l'est des Indes. En Australie, Woolnough (1928, 1930) considère que les surfaces résiduelles (remnants) et leurs « duricrusts » sont à attribuer à une époque pluviale du Miocène. Suivant Walther (1916), les basaltes du Crétacé supérieur des Indes sont couverts d'une terre rouge qui est absente sur les basaltes plus récents, tertiaires et quaternaires, que l'on connaît à Java. En Chine, Von RICHTOFEN (1882) découvre des latérites recouvertes par le loess. Walther (1889 à 1916) a observé de nombreuses latérites enfouies sous d'épaisses alluvions (Nil et Gange), sous des dunes (Australie), ou sous des dépôts volcaniques (Java). Les latérites se formant sous le régime des moussons (saisons contrastées), il a fallu, selon Fox (1923), que la rupture du continent de Gondwana place à la fin du Mézozoïque les Indes actuelles dans un voisinage maritime pour que les latérites commencent à s'v développer.

Certains auteurs rejettent systématiquement dans le passé la formation de toutes les latérites. Les bauxites et dépôts ferrugineux des pays tempérés, qui sont assimilés aux latérites, ont une origine manifestement ancienne. Dans les pays tropicaux, bien des indices font également reconnaître l'ancienneté des latérites. Aussi Lang (1915) et Walther (1916) en concluent que latérites, bauxites, « ferretto » et autres dépôts ferrugineux, sont complètement indépendants des conditions climatiques actuelles. Ils constituent un ensemble de roches fossiles formées, au cours d'une période « diluviale » ancienne, des régions tropicales aux pays tempérés.

remarques diverses

Quelques observations isolées sur des sujets qui prendront plus tard de l'importance méritent d'être mentionnées.

Arsandaux est, en 1916, l'un des premiers à publier une description de ce « cordon ondulé de rognons quartzeux non roulés dont les sinuosités sont à peu près parallèles à celles de la partie supérieure de la première zone d'altération ». La première zone d'altération est celle qui a conservé la structure de la roche. Les quartz proviennent de filons de quartz, et, pour Arsandaux, ils se sont concentrés en descendant progressivement en raison de leur masse dans la zone de tassement, jusqu'à leur arrêt par un niveau de résistance suffisante. Il est aussi connu des géologues des Indes que les latérites des « low levels » contiennent souvent des galets, noyés dans les produits latéritiques, ce qui contribue à accréditer l'intervention d'actions alluviales dans leur formation.

BEMMELEN (1904, 1910) est le premier à remarquer que les argiles latéritiques sont dépourvues de plasticité. Ceci est à rapporter au rôle particulier du fer qui forme le ciment de particules agrégées, les « pseudo-sables » (Deuss, cité par Vageler 1930). En combinant les séparations granulométriques et l'analyse chimique dans l'étude de terres malgaches, Muntz & Rousseaux (1901) constatent que des pourcentages équivalents de fer entrent dans la constitution des sables grossiers, sables fins et argiles.

DÉFINITIONS, TERMINOLOGIES, CLASSIFICATIONS. LES GRANDES CONTROVERSES

La plupart des auteurs déjà cités ont des conceptions très analogues sur l'origine et la constitution des latérites. C'est lorsqu'il s'agit de définir et de classer que se manifestent des divergences.

définition générale de la latérisation

L'étude de l'altération des roches a donné une bonne compréhension de ce qu'est la « latéritisation », expression à laquelle beaucoup d'auteurs préfèrent la forme simplifiée de « latérisation ». En 1908, Lemoine & Chautard écrivent : « Le phénomène de latérisation est ainsi caractérisé :

- 1º par le dégagement du fer et de l'alumine de leurs combinaisons siliceuses,
- 2º par une oxydation du protoxyde de fer qui passe à l'état de sesquioxyde,
- 3º par le dégagement de la silice de ses combinaisons diverses,
- 4º par le départ de la majeure partie de cette silice et des bases alcalines et alcalinoterreuses,
- 5° par un résidu (latérite) extrêmement enrichi en titane, en alumine et en fer ».

Quelques années plus tard (1911), Fermor s'exprime ainsi: « This rock (laterite) consists essentially of a mixture of hydrated oxides of iron and alumina, with often a considerable percentage of titania. It is also generally recognized that the formation of this type of laterite involves the disappearance, probably in solution, of the silica, lime, magnesia, and alkalies, of the original rock, with the concentration of the oxides of aluminium, iron, titanium, and sometimes manganese, to form laterite ».

C'est une définition très analogue que donne Lacroix (1913) en désignant comme latérites les roches formées par « les produits de décomposition de toutes les roches silicatées alumineuses caractérisées, au point de vue chimique, par la prédominance des hydroxydes d'aluminium et de fer, avec généralement de l'oxyde de titane, après élimination plus ou moins complète des autres éléments de la roche fraîche : alcalis, chaux, magnésie, silice ».

Harrassowitz (1926, 1930) introduit des conceptions qui seront largement développées par la suite, basées essentiellement sur la dynamique de la silice et de l'adumine, la formation de silicates ou l'accumulation d'alumine. Harrassowitz dénomme « allites » des roches essentiellement formées des hydrates ou oxydes de l'aduminium. Les « siallites » sont au contraire constituées surtout de silicates d'alumine, cristallisés ou en gels. Le rapport de la silice à l'alumine donné par l'analyse chimique permet de reconnaître les matériaux allitiques ou siallitiques. C'est là une suite logique aux travaux de Bauer (op. cités) opposant la formation d'hydrates d'alumine à celle de silicates. Bauer et Harrassowitz sont de la même nationalité, le second connaît évidemment très bien les résultats et opinions de son prédécesseur. Ceux qui adopteront la distinction des allites et siallites accorderont au fer et au titane qui ne donnent pas dans les latérites de combinaisons avec la silice, une attention moins grande que ceux qui suivront les conceptions et la classification (v. pages suivantes) de Fermor.

définition de l'altération et terminologie descriptive des latérites

Pratiquement tous les auteurs de langue anglaise adoptent le terme « weathering » défini par Merril (1897) comme l'ensemble des changements superficiels aboutissant à la destruction plus ou moins parfaite d'une roche par l'action des agents atmosphériques. Le terme français « altération » est moins spécifique, puisque c'est un terme du langage courant qui peut désigner des transformations sans rapport avec les actions atmosphériques. Il exclut la simple désagrégation physique, l'altération d'une roche ou d'un minéral implique des modifications physico-chimiques. Campbell (1917) complique la situation en désignant par « alteration » ce qui se passe sous le niveau phréatique, et par « weathering » ce qui se passe audessus. Harrison (op. cités) puis plus tard quelques auteurs comme Mohr & Van Baren (v. pages suivantes) préfèrent employer « katamorphism », terme par lequel Van Hise (1904) désignait les processus amenant la formation de produits simples à partir de corps complexes. Les auteurs de langue allemande, comme Harrassowitz (op. cités) parlent de « verwitterung ».

Des termes identiques sont parfois employés avec des nuances différentes. « Primary laterite » signifie latérite formée in-situ, quelles que soient son épaisseur et sa diversification minéralogique, « secondary laterite » désigne la latérite détritique, pour les géologues des Indes. Ce sont également les produits d'altération formés in-situ que Bauer (1898) désigne par « primare laterit ». Harrison (op. cités) dénomme « primary laterite » les premiers produits du « katamorphism », dont l'épaisseur est de l'ordre du cm ou du décimètre, qui peuvent être ensuite transformés, par resilicification, pour donner la « secondary laterite ».

La terminologie française de description des latérites a été employée dans les pages précédentes, elle a évidemment ses équivalents en langues anglaise et allemande. La zone de départ, définie par la conservation de la structure de la roche, est aussi appelée « lithomarge » (Fr., Angl., All.) et « zersatz » (All.). Comme elle est généralement décolorée, elle est aussi désignée par les termes de zone blanchie, « bleached zone » (Angl.) « bleichzone » (All.). L'altération s'accompagne d'un lessivage, « removal » ou « leaching » (Angl.), « auslaugungsprozess » (BAUER), des produits solubilisés, qui laisse un résidu d'altération que HARRASSO-WITZ (op. cités) appelle « frachtrest » ou « anreicherungskruste ». Au-dessus de la zone de départ, apparaît une zone conditionnée par des engorgements partiels et temporaires, marquée par des taches ou marbrures de couleurs vives. C'est la zone tachetée, « mottled zone » (Angl.), « fleckenzone » (All.) ou « rotgefleckte Tone » (Walther). La zone de concrétions peut comprendre des pisolithes ou oolithes, des concrétions ferrugineuses, « concretionnary ironstone » ou « lateritic ironstone » (Angl.), « eisenkonkretion » (All.). La zone de concrétions se transforme parfois en une « cuirasse ferrugineuse » (LACROIX) ou « carapace » (Ar-SANDAUX), ces termes sont encore largement utilisés. Certains auteurs français parlent de croûtes ferrugineuses ou alumineuses pour la similitude de ces termes avec le vocabulaire étranger, « crust », « ironcrust », « pan » (Angl.), « kruste » « eisenkruste » (All.), ou parfois « bankerze » (Harrassowitz). Harrison (1910) a relevé un certain nombre de noms vernaculaires désignant les « concretionnary ironstones », ce sont « kakerlogston » au Surinam hollandais, « roche à ravet » en Guyane française, « pedra de ferro » au Brésil, « moco de hierro » au Venezuela. Ajoutons-y le « bien-hoa » indochinois, tout en soulignant qu'il existe certainement encore bien d'autres noms vernaculaires. Les matériaux meubles sont appelés simplement terre rouge ou jaune, ou terre latéritique, « red or yellow earth », « lateritic earth, » « lateritic clay », « lateritic soil ». Les auteurs de langue anglaise ont parfois appelé « pipe-clay », « pot-clay », « iron-clay » des matériaux argileux qui actuellement paraissent mal définis. Kaolin est également employé.

les controverses sur la définition et la classification des latérites

Le mot créé par Buchanan en 1807 a connu une fortune extraordinaire, puisqu'il est employé dans toutes les langues et qu'il appartient aussi bien au vocabulaire scientifique qu'au vocabulaire commun. Malheureusement, ce terme a donné naissance à des controverses aussi passionnées que stériles.

« Few natural mineral products have aroused more general interest or been more provocative of discussion among geologists than that superficial rock-formation so typical of the tropics known as laterite » (FERMOR, 1911). C'est qu'en effet la définition donnée par Buchanan ne s'applique, si l'on s'en tient strictement aux termes de l'auteur, qu'à un matériau assez particulier qui ne forme qu'une petite partie des couvertures superficielles tropicales. Par la suite, le terme de « latérite » prend des significations très variables suivant les auteurs. Pour les uns, il doit garder son sens primitif, pour certains comme Newbold (1844) il acquiert au contraire une signification très élargie, tandis que d'autres prétendent ne désigner par latérite que les croûtes indurées, ou au contraire que les matériaux meubles ou non mais formés d'alumine libre. Tous les termes sont analysés et critiqués, même ceux qui ont l'apparence la plus inoffensive. Ainsi pour certains y a-t-il antinomie dans l'expression « lateritic clay », puisque « clay » ne doit désigner que des silicates d'alumine et que « lateritic » ne doit être qualificatif que de matériaux alumineux.

Il n'est pas question ici de retracer toutes les opinions émises, mais il semble intéressant de montrer que les débats concernant la terminologie et la classification ont pris une importance assez exceptionnelle dans les travaux de l'époque. Des publications entières sont consacrées à l'exégèse des différentes définitions des latérites et à la défense dialectique de l'une d'elles. Le respectable Geological Magazine, bombardé de lettres à l'éditeur et de réponses, orchestre et diffuse les débats. A la fois acteur et historiographe, Fermor relate (1911) les plus belles empoignades. « M. Crook next returns to the attack and object very strongly to M. Scrivenor's proposed misuse of the term bauxite ». Bien entendu M. Scrive-NOR contre-attaque rapidement, mais se voit bientôt menacé par une coalition: « Dr J. EVANS now comes to M. Crook's assistance to combat M. Scrivenor's suggestion... ». Les flèches tous azimuths du combattif M. Crook ont fini par atteindre HARRISON qui pourtant « has quietly held aloof from the discussion » (Fermor, dixit). C'est sur le ton de la dignité offensée que Harrison répond; « ... the recent correspondance between M. J. B. Scrivenor and M. T. CROOK, in which the latter writes somewhat scathingly of « some people », among whom I am not ashamed to be included, who use the term laterite in the wide sense it is at present largely employed by technical geologists, mining engineers, and tropical agriculturists... and I am quite unable to agree with him (CROOK) that the application of the term (laterite) to such clays, iron-ores, etc, as I used it for is « wholly unwarranted », and that my use of the term is « unscientific » and one that « cannot properly be adopted by geologists ». (Geol. Mag., 1910, 5, 7). Après un demi-siècle, il est difficile de ne pas situer sa sympathie du côté de Har-RISON qui a accompli des travaux si remarquables, et que pourtant CROOK n'a pas hésité à traiter d'esprit peu scientifique. Le mot de la fin aurait pu appartenir à Scrivenor, qui écrit en 1930: « in conclusion, I would suggest that the world laterite be used as little as possible », si son conseil avait été mieux suivi.

La première classification des latérites est celle de Warth H. & F. J. (1903) qui s'applique aux latérites des Indes. Les auteurs distinguent 4 groupes:

- Gibbsite pure,
- Bauxites contenant un peu de fer, et très peu de silice,
- Latérites formées in-situ, elles contiennent soit trop de fer, soit trop de silice combinée pour faire partie des bauxites,
- Latérites détritiques, de composition variable, souvent assez quartzeuzes, et bien entendu moins alumineuses que les bauxites.

Les classifications les plus largement admises sont celle de Fermor (1911) et celle de Lacroix (1913, 1923) qui s'est inspiré de la précédente. Fermor a retenu la possibilité d'une formation lacustre pour certaines latérites. Sa classification est souvent critiquée pour cette raison, mais elle présente par ailleurs le mérite de bien résumer les connaissances de son temps. Fermor distingue les catégories suivantes:

- Latérites typiques, qui passent des variétés purement alumineuses que sont les bauxites, à des variétés presque purement ferrugineuses,
- Latérites quartzeuses, lorsque les sables de quartz deviennent prépondérants ce sont des sables latéritiques,
- Lithomarges latéritiques, c'est-à-dire latérites contenant de la lithomarge (synonyme de kaolinite),
- Roches pisolithiques ou oolithiques,
- Latéritoïdes, qui sont des roches formées par remplacement métasomatique,
- Latérites lacustres,
- Latérites détritiques, ou « latéritites »,
- Terres latéritiques, argiles latéritiques, sols latéritiques.

La classification présentée par LACROIX est établie sur le taux des « éléments latéritiques », qui sont les hydrates et oxydes de fer, alumine, titane, manganèse. Elle ne tient pas compte du quartz qui ne joue pas de rôle actif dans la latérisation. On dirait actuellement qu'elle est d'inspiration très génétique, puisqu'elle ne prend en compte que les éléments

dynamiques. Lacroix distingue, lorsque les éléments latéritiques atteignent les taux suivants:

```
de 100 à 90 %: les latérites proprement dites,
de 90 à 50 %: les latérites argileuses,
de 50 à 10 %: les kaolins et argiles latéritiques,
moins de 10 %: les kaolins et argiles.
```

Des qualificatifs minéralogiques s'ajoutent aux termes précédents. Gibbsitique désigne les produits alumineux cristallisés, bauxitique les produits amorphes. Pour les silicates, kaolinitique indique évidemment les variétés cristallines, les variétés supposées amorphes sont qualifiées « d'argileuses ». Le fer n'est pas considéré sous son aspect qualitatif, ses phases cristallines et amorphes étant le plus souvent associées. De même que Fermor, Lacroix a retenu pour les cuirasses oolithiques la possibilité d'une origine lacustre, cette interprétation ayant été défendue par de nombreux auteurs.

Peu d'études de sols sont faites à cette époque sous des perspectives agronomiques. Assez exceptionnels paraissent donc les travaux de Muntz et Roussfaux (1901, 1903) qui présentent une carte agronomique de Madagascar. Les terres arables, sans considération du sous-sol, y sont cataloguées suivant couleur et composition chimique. Sont distinguées des terres rouges ou ocre riches en fer et alumine, des terres jaunes moins riches en hydrates métalliques, des terres violacées moins argileuses que les précédentes mais riches en potasse et magnésie, des terres sableuses. Enfin, c'est Vageler qui semble avoir introduit (publication 1930) la distinction entre les « Roterde » dans lesquels l'altération est forte et les sesquioxydes abondants, et les « Rotlehm » qui sont moins altérés et contiennent des argiles silicatées. Ces notions seront largement utilisées plus tard par les auteurs de langue anglaise sous les termes « red earths » et « red loams ».

LES THÉORIES TOMBÉES EN DÉSUÉTUDE

Il est une interprétation qui a été abandonnée par la suite et que pourtant admettent, explicitement ou implicitement, pratiquement tous les auteurs qui ont été cités jusqu'à présent, celle des mouvements « per-ascensum ». C'est probablement Hislop (1863) qui l'a clairement formulée pour la première fois. Elle est apparue comme une explication simple, presqu'évidente, de la morphologie des profils dans lesquels se succèdent la zone blanchie lessivée en fer à la base, puis la zone tachetée déjà plus ferrugineuse et la zone de concrétions. Un excellent exemple des variations des taux de fer avec la profondeur est donné par un profil étudié par Blandford (1859). Les pourcentages de Fe₂O₃ s'y répartissent ainsi:

```
24,5 % à 1 mètre
18,7 % à 2 »
15,3 % à 4 »
16,1 % à 5 »
10,0 % à 6 »
8,3 % à 8 »
4,8 % à 9 »
4,0 % à 10 »
3.8 % à 13 »
```

Peu de fer à la base, beaucoup de fer au sommet, il semble donc que cet élément suive un mouvement ascendant déterminé par les remontées capillaires de l'eau pendant les périodes sèches et chaudes favorisant l'évaporation. Le fer, mais aussi la silice, l'alumine, ou d'une façon générale tous les éléments solubilisés ou en suspension colloïdale, peuvent ainsi aller se concentrer dans les couches supérieures et même tout à fait en surface. Une confirmation indirecte semble en être donnée par l'importance prise par les concrétions ferrugineuses et cuirasese dans les régions où les saisons sèches marquées sont supposées provoquer de fortes remontées. Une cuirasse peut être considérée comme « a true efflorescence » (SIMPSON, 1912). Pour ne citer que les auteurs dont les travaux ont le plus marqué leur époque, HARRISON, LACROIX, FERMOR, CAMPBELL, WOOLNOUGH, FOX, HARRASSOWITZ, WALTHER (op. cités) admettent les phénomènes de remontée.

Il est bien sûr d'autres théories, reposant sur des bases beaucoup plus fragiles, qui n'ont pas trouvé la même audience mais qui méritent pourtant d'être relatées. La plus étonnante est peut-être celle de l'origine lacustre des latérites que l'on doit à MALLET (1881, 1883). Géologue des Indes où il étudie les latérites comme sources possibles de minerais, Mallet visite les mines d'Antrim, au nord de l'Irlande, qui consistent en des couches ferrugineuses intercalées entre des basaltes. Entre deux couches de basalte, on peut observer de haut en bas un niveau de pisolithes ferrugineux, puis le « bole » qui s'apparente à une cuirasse indurée, un matériau jaune ocre, la lithomarge bleue. Parmi les géologues qui ont étudié le gisement, Tate et Holden pensent que lithomarge, « bole » et niveau pisolithique sont issus de la transformation in-situ du basalte, suivant des processus qu'ils décrivent ainsi : « ... the addition of water to the basalte, and loss of lime, other alkaline earths, and alkalies, produced bole; the loss of water and oxygen from the ferruginous material of the bole resulted in an increased percentage of iron in the pisolitic ore ». Mais d'autres auteurs, parmi lesquels Forbes*, avancent au contraire que le minerai est d'origine lacustre en s'appuyant sur les travaux de HULL* qui aurait montré que le fer peut être lessivé dans les régions hautes pour aller précipiter dans des lacs soit sous l'action de certaines algues, soit par manque de gaz carbonique pour le maintenir en solution. Ce phénomène serait actuellement observable dans les lacs scandinaves. C'est cette théorie que Mallet retient pour le minerai d'Antrim et qu'il transpose pour les latérites des Indes. Le fer est solubilisé par l'acide carbonique et par les acides organiques, la quantité de fer mise en mouvement dépend de la luxuriance de la végétation elle-même favorisée par les climats chauds et pluvieux. Le carbonate ferreux commence à s'oxyder pendant son transport par les cours d'eau qui déversent donc dans les lacs du fer déjà oxydé qui est passé à l'état de suspension, et un reste de carbonate ferreux que les algues se chargeront de décomposer dans les lacs. Ainsi se sont formées les latérites des « high levels » qu'une sorte d'inversion de relief a placé ultérieurement en position haute. « Although now, therefore, often covering some of the highest ground, it may at the time of its formation have occupied the lowest ». Cette hypothèse de Mallet obtient un certain crédit puisqu'elle est défendue encore par Oldham (1893), Burton (1917), et que dans sa classification des latérites, FERMOR (op. cités) maintient une catégorie de latérites d'origine lacustre. Cependant, MALLET lui-même a reconnu qu'il existe aussi des latérites formées in-situ par l'altération des roches.

L'hypothèse de l'origine lacustre des latérites rappelle celle de la formation en milieu marin émise par Darwin et qui semble aussi avoir eu cours parmi certains des premiers géologues des Indes. Dans leur mise au point de 1879, Medlicott & Blandford ont fait justice de quelques théories de cette sorte.

Sur les mécanismes de l'altération, bien des hypothèses ont été émises. Rappelons tout d'abord que pour beaucoup d'auteurs, et tout particulièrement pour Scrivenor (1929, 1930), les caractères des roches déterminent les produits de l'altération. Ni fausse ni vraie, cette proposition contient une part de vérité, elle sera nuancée par la suite. Il est d'autres hypothèses plus nettement erronées. Ainsi, pour certains, la kaolinite ne peut être une formation des sols, et son origine est toujours hydrothermale. Cela a souvent été admis pour les gîtes de kaolin exploitables, et transposé pour la kaolinite des latérites par Holland (1899).

Le même Holland (1903) a ensuite avancé que les actions chimiques ne peuvent conduire à la latérisation et que ce sont les actions biologiques qui en sont responsables. Puisque certaines bactéries attaquent les sulfures, d'autres, pense-t-il, doivent être capables de détruire

^(*) cités par Mallet.

les silicates. L'auteur ajoute lui-même que cette action des bactéries sera difficile à démontrer. Cette hypothèse, envisagée aussi par Branner en 1896, paraît renforcé par les travaux de Murray & Irvine (1891) qui indiquent que les diatomées vivant dans les océans extraient la silice des particules d'argile en suspension, l'eau de mer ne contenant pas la silice qui leur est nécessaire. Cela serait confirmé par une expérience ayant fait vivre des diatomées dans une eau sans silice mais contenant de l'argile. Une expérimentation analogue a permis à VERNADSKY (1922) de mettre en évidence la libération d'alumine libre par une culture de diatomées et de bactéries dans un milieu nutritif sans silice libre mais contenant des argiles. Le texte suivant emprunté à Vernadsky montre quelles idées peuvent avoir cours à cette époque. « Toutes les argiles comme le kaolin, l'halloysite, la pyrophyllite, la montmorillonite, etc, contiennent le même noyau H2Al2 Si2O8, qui est très stable chimiquement dans la biosphère. Il ne se décompose pas sous l'action des agents chimiques prédominants à la surface terrestre, l'eau, l'oxygène, le gaz carbonique. Tous les minéraux qui contiennent ce noyau H₂ Al₂ Si₂O₈ (feldspaths, leucite, micas, zéolites, épidotes, néphéline, grenats, etc.) se transforment sous leur action en kaolin H2 Al2 Si2O8 H2O ». Pour VERNADSKY donc, seuls les microorganismes peuvent pousser plus loin les transformations en rompant ce noyau kaolinique C'est une action biologique indirecte qu'envisagent Bassalik (1912) et d'autres auteurs russes (cités par GLINKA, 1931). La décomposition des bactéries et autres micro-organismes libère du gaz carbonique, des acides organiques, des nitrites et nitrates, qui dissocient ensuite les silicates.

L'action des micro-organismes dans l'altération est invoquée bien longtemps après les premières suggestions de Holland et alors que l'étude des altérations a fait des progrès considérables. Ainsi Blondel (1929) admet une forte influence micro-biologique dans l'altération des roches en Indochine. Plus tard encore, BISHOPP (1937) écrit : « ... and since it is by no means certain that some concentrations of iron and manganese are not in part at any rate due to biochemical processes, it may well be that there is some question of biochemical equilibria bound up with these surficial concentrations... In dealing with the origin of surface deposits of manganese, iron, or aluminum, is a mechanistic or a vitalistic explanation to be preferred? Can it be said that laterites, as we know them to-day, could have formed in pre-Cambrian times, in the absence of living material? If the answer is « probably not », eccology an biochemistry must be invoked to solve the problem ».

Le rôle de la matière organique produite par la décomposition des végétaux est aussi invoqué, mais de façon contradictoire. Alors que Lacroix (op. cités) pense que la latérisation est liée à un couvert végétal important, Lang (1915) et Walther (1918) soutiennent que de grandes quantités de matière organique s'opposent à la latérisation, l'humus favorisant la réduction des sels de fer et non leur oxydation. Vageler (1930) défend cette dernière position. Des siallites se forment, selon lui, lorsque l'humus entraîne de grandes quantités de bases et surtout de sesquioxydes, en laissant la silice. A l'inverse, en l'absence d'humus, s'opère une hydrolyse alcaline qui détermine l'enlèvement de la silice et le maintien des sesquioxydes, il se forme donc des allites.

Cette hypothèse de l'hydrolyse en conditions alcalines est également défendue par Har-RASSOWITZ (1926), et l'on peut encore admettre actuellement qu'elle soit effective dans certains cas. De même peut-on reconnaître maintenant que le gaz carbonique joue un rôle certain, mais que son importance a parfois été exagérée, notamment par CAMPBELL (1917) qui pense que les eaux d'infiltration en pays tropicaux sont très fortement chargées en CO2. Par contre, l'intervention des acides sulfurique et nitrique, envisagée par certains, ne peut pas avoir une importance réelle. Dès 1898, BAUER critique l'idée émise par LIEBRICH (1891) de l'action d'acide sulfurique dans la formation des bauxites, en faisant très justement remarquer qu'un tel acide solubiliserait l'alumine au lieu de la laisser dans le résidu. Quelques années plus tard, Du Bors (1903) propose une interprétation généralisée de la latérisation par l'attaque des roches par l'acide sulfurique. Il a en effet trouvé de la pyrite dans une diabase surmontée de latérite. Les irrégularités que l'on trouve dans la répartition des latérites pourraient, selon lui, s'expliquer par la présence ou l'absence de pyrite capable de libérer de l'acide après oxydation ou d'apports hydrothermaux de solutions sulfuriques ou de gaz sulfureux. Cette interprétation est admise par CLARKE (5 th Ed. 1924) comme l'une des plus probables parmi celles qui tentent d'expliquer la formation de certaines bauxites et latérites.

D'autre part, il est connu que les eaux de pluie apportent de l'acide nitrique et, à la

suite des analyses d'eaux pluviales du Vénezuela et de la Réunion faites par Muntz et Marcano (1889), certains auteurs ont pensé que l'oxydation de l'azote au cours des orages tropicaux pouvait atteindre une très grande ampleur. Walther et Vageler (op. cités) en particulier ont défendu cette opinion. Vageler a même indiqué des quantités d'acide nitrique trouvées dans des eaux de pluies qui nous semblent actuellement plus qu'étonnantes.

Il reste à faire part d'une hypothèse assez surprenante émise par Fox (1923, 1932) qui s'appuie sur les principes d'électrophorèse ou de cataphorèse. Fox rappelle que si l'on force un liquide à passer à travers une membrane poreuse, il s'établit une différence de potentiel entre chaque face de la membrane. De même, si un solide finement divisé traverse une masse liquide, il se produit aussi une différence de potentiel. Des phénomènes de même nature se produisent lorsque l'électrolyte que constituent les eaux d'infiltration chargées d'acide carbonique et d'acide nitrique traversent la masse latéritique qui fonctionne comme une membrane poreuse. Laissons Fox s'exprimer. « It seems clear, therefore, that electro-kinetic phenomena must operate, and that the efficiency of the effect is due to the silicate minerals having broken down completely into composent sols and gels. The steady flow of water (electrolyte) down through the porous mass of decomposed rock, the induced electric potential difference between the top and bottom of this porous zone of decomposed rock, and the presence of colloidal, electrically charged particles (sols and gels) supply all the electrokinetic conditions which are necessary, in addition to the removal by solution and in suspension and upward capillarity already mentionned, for a complete separation of the various constituents. The aluminium hydrogels will remain practically stationary and function in the porous zone as impermeable membrane. The positively-charged ferric hydrogels will be actuated upward both by capillarity an under electrical attraction of the electrical (negative sign) potential of the upper part of laterite zone. The negatively charged silica, in gel or sol form, will be influenced downward both by the downward current of water and under the electrical draw from the positively charge electrical potential in the lower layer. The neutral hydrous silicate compounds will gravitate in suspension with the relatively downward flow of the percolating water, and be precipitated, where the velocity is greatly reduced, i.e. at the base of the laterite mantle ». La séparation électro-cinétique expliquerait la brutalité souvent observée dans le passage, de la base vers le haut, d'une lithomarge riche en silice, à une couche de bauxite puis à un matériau ferrugineux pisolithique. Mais, ajoute Fox, si le principe des phénomènes est clair, leur mise en évidence dans la nature est presque sans espoir (almost a hopeless task), la différence de potentiel est trop faible pour être mesurée, et les phénomènes naturels sont de plus très complexes et très longs à se développer.

De même que les latérites, les bauxites ont été attribuées à des phénomènes très variés, actions hydrothermales, vapeurs acides, action lessivante de matières organiques, transport, dépôt lagunaire. Une bonne revue des théories concernant les bauxites est donnée par CLARKE (5 th Ed. 1924).

En réalité, pour tous les auteurs de la période considérée, il existe une grande incertitude sur les mécanismes réels de l'altération. Ainsi s'expliquent les hésitations de ceux qui comme BAUER envisagent tour à tour une hydrolyse alcaline ou une attaque nitrique, ou qui passent en revue comme VAGELER les actions supposées des acides nitrique ou sulfurique, des solutions alcalines, du gaz carbonique et même de l'ozone.

LES HOMMES QUI ÉTUDIENT LES LATÉRITES AU 19^e ET AUX DÉBUTS DU 20^e SIÈCLE

Incontestablement, les géologues britanniques des Indes sont les premiers à étudier systématiquement les latérites et à débattre de leur origine. Leurs publications sur les latérites remplissent les Records et Memoirs of the Geological Survey of India, le Journal of Asiatic

Society of Bengal. Babington est l'un des premiers à lancer le mouvement, dès 1821. C'est sensiblement plus tard que des scientifiques anglais étendent ces investigations à l'Afrique (CAMPBELL), l'Australie (Woolnough) et l'Amérique tropicale (Harrison). Le Geological Magazine s'emplit, vers les années 1910, de leurs publications et, nous l'avons vu, de leurs querelles épistolaires.

C'est avec un bon retard sur les recherches faites aux Indes que des scientifiques français et allemands entreprennent l'étude du continent africain et de Madagascar. Après quelques travaux isolés pendant la plus grande partie du 19° siècle, se succèdent les recherches de BAUER, LACROIX, HARRASSOWITZ, pour ne rappeler que les plus brillantes.

Au 19° siècle et pendant les premières décades du 20°, l'étude des latérites est réellement dominée par les chercheurs des trois nationalités, anglaise, française, allemande. Les scientifiques américains restent éloignés géographiquement des principales régions latéritiques, il est significatif que les seules publications américaines citées dans les pages précédentes, sont consacrées à des généralités (Marbut, Merril, Davis). De même, les pédologues russes n'ignorent pas les latérites lorsque, comme Glinka, ils présentent un traité général de pédologie, mais ils ont peu l'occasion de les étudier par eux-mêmes. Les latérites observées par des chercheurs russes auxquels Glinka (op. cités) fait référence, sont des formations probablement fossiles ou au moins très anciennes de Géorgie.

Les événements qui bouleversent l'Europe aux débuts du 20° siècle vont avoir des répercussions très nettes, bien qu'évidemment indirectes, sur l'étude des latérites. Le Traité de Versailles qui termine la première guerre mondiale 1914-1918 aura, entre autres conséquences, celle d'écarter pour longtemps les scientifiques allemands des régions tropicales. Ainsi s'éteindra prématurément l'école allemande de pédologie tropicale qui avait fait de si beaux débuts avec notamment BAUER, WALTHER, HARRASSOWITZ, VAGELER. Les publications allemandes s'arrêteront pratiquement en 1930 avec la dernière mise au point rédigée par HARRASSOWITZ. Autre source de bouleversements, la Révolution Russe de 1918 amène certains pédologues formés à l'école de DOKUCHAIEV à s'expatrier et à contribuer ainsi à propager les principes nouveaux de la science du sol. C'est le cas d'AGAFONOFF dont on se souvient qu'il fut le premier à établir une carte des sols de France (publiée en 1935) et qui contribuera, nous le verrons plus loin, à jeter les bases de l'école française de pédologie tropicale.

Avant de quitter cette haute-époque que représente pour la pédologie la période 1807-1927, il convient sans doute de rendre un hommage aux hommes courageux qui ont consacré leur vie à l'étude des latérites tropicales. Comment ne pas dire son admiration pour Harrison par exemple, qui a vécu quarante ans sous les tropiques humides sans rien perdre, ses derniers écrits nous le montrent, de sa curiosité intellectuelle ? Ou pour le géographe allemand Walther qui laisse deviner, en relatant d'extraordinaires voyages à travers l'Asie, l'Afrique et l'Australie, un enthousiasme toujours intact ? Pour tous les autres aussi qui ont travaillé sous les climats tropicaux au siècle dernier ou au début de celui-ci, il est juste de rappeler que ce qui paraît aujourd'hui comme une découverte scientifique lointaine ou comme une théorie parfois naïve, s'est d'abord traduit pour eux par une aventure personnelle.

l'étude des sols latéritiques des années 1927 à 1949

La période précédente a été dominée par les travaux de géologues et minéralogistes sur les « latérites ». En quelques années, s'enchaînent une série d'événements qui vont marquer sa fin.

En 1927 se réunit le premier congrès international de la science du sol, qui confirme l'existence de la « *pédologie* » comme science indépendante, ou si l'on préfère, qui reconnaît la réalité de « *sols* » distincts des roches et que l'on doit étudier suivant des principes et des méthodes spécifiques.

Plusieurs communications présentées à ce congrès, et publiées en 1928, revêtent une importance considérable. Afanasieff résume le système de classification de l'école russe, avec les différents développements donnés par Dokuchaiev, Glinka, Neustrev, Gedroiz. Définitions et notations des horizons pédologiques sont traités par Zakharov et Sokolovsky. Les bases de la pédologie américaine sont exposées par Shaw et Marbut. La nomenclature employée dans l'étude des sols est analysée, et normalisée, par Shaw qui impose également la notion du « solum ». Marbut présente une classification générale des sols, comportant un groupe de « sols latéritiques ». En matière de minéralogie, Ross fait connaître les méthodes et résultats récents de l'étude des argiles.

De nombreuses publications consacrées aux sols tropicaux, faites par des auteurs que l'on peut considérer vraiment comme des « pédologues », encadrent de très près le premier congrès international. Ce sont principalement celles de Erhart (1926), Bennet & Allison (1926, 1927, 1928), Van Baren J. (1928), Agafonoff (1928, 1929).

Enfin il semble que les scientifiques qui ont le plus brillamment fait progresser les recherches de la période précédente sont conscients de la nouvelle orientation qui s'annonce, et qu'ils s'empressent de faire la synthèse de leurs travaux et de ceux de leurs prédécesseurs et contemporains. C'est ainsi que paraissent, à quelques années d'écart, les ouvrages de Harrassowitz (1930), Vageler (1930), Woolnough (1930), Fox (1932), de l'Imperial Bureau of Soil Science (1932), et de Lacroix (1934). Autour des années 1927-1928, ce sont vraiment deux écoles scientifiques différentes qui se succèdent.

Les recherches faites entre 1927 et 1949 ont apporté des résultats qui sont souvent encore valables actuellement. Dans les pages consacrées à l'historique de l'étude des sols ferrallitiques, ne seront retracées que dans leurs grandes lignes les principales découvertes de cette période. Plus d'attention peut-être sera donné aux travaux qui semblent tout de même être assez nettement dépassés qu'à ceux qui sont toujours à la base de nos recherches actuel-

les. Ainsi c'est pendant cette période que s'est élaboré probablement l'essentiel de nos connaissances actuelles sur la minéralogie proprement dite des argiles des sols, la période actuelle apparaîtra plutôt comme celle de l'étude de la genèse et de l'évolution de ces argiles. Beaucoup de découvertes dues aux années 1927-1949 se trouveront incluses dans les chapitres qui suivront celui-ci.

RÉVISION DES CONNAISSANCES ACQUISES ET PRINCIPES NOUVEAUX

Certaines hypothèses, à vrai dire assez peu fondées, tombent très rapidement en désuétude, sans avoir à donner lieu à beaucoup de discussions. Il en est ainsi pour les théories de la formation des latérites en milieu lacustre, par attaque sulfurique, par électrophorèse. D'autres par contre, plus plausibles, sont défendues plus longtemps.

Formulée en 1903, l'hypothèse de l'intervention des micro-organismes dans l'altération latéritique n'a trouvé aucune preuve, elle est restée une simple présomption combattue par beaucoup. Ainsi après avoir noté que les niveaux alumineux sont souvent très proches de la roche-mère et qu'ils sont surmontés de couches kaolinitiques, Aufrère (1937) conclut que l'on ne peut pas attribuer l'altération latéritique (libération d'alumine) à des actions bactériennes, ni même à l'action des colloïdes humiques, en raison de la grande profondeur à laquelle se produit cette altération. Les derniers défenseurs de l'origine biologique de l'altération sont Blondel (1930) et Bishop (1937).

Certains facteurs d'altération, qui ont pu autrefois paraître prépondérants voient leur importance plus justement estimée. C'est en particulier le cas pour le gaz carbonique et l'acide nitrique apportés par les pluies. De même reconnaît-on progressivement la grande variété des formations naturelles, à l'encontre des généralisations trop hâtives des premiers investigateurs. Il n'est plus question de croire à deux sortes d'altération, gibbsitique et kaolinitique, s'excluant l'une l'autre, ou de renvoyer la formation de toutes les latérites à un passé plus ou moins lointain. Il s'accomplit donc un sérieux travail d'analyse critique des observations et interprétations de la période précédente.

Les mouvements per-ascensum dans les profils de l'eau chargée d'éléments solubilisés ou en suspension colloïdale, apparaît comme un fait admis dans la plupart des travaux de la période antérieure. On leur accorde la responsabilité de la formation de toutes les accumulations ferrugineuses et alumineuses des zones tachetées, zones de concrétions et cuirasses. Le premier à réfuter ces mouvements ascendants est Mohr (1938), il est rapidement suivi par HARDY & RODRIGUES (1939), puis par Greene (1947) et Joffe (1949). En 1954, Mohr & Van BAREN refont le point de la question. Après étude expérimentale, il est apparu que l'ascension capillaire est beaucoup trop lente pour s'effectuer réellement dans les délais fixés par le cycle des saisons, et avec une amplitude correspondant à l'épaisseur généralement considérable des profils existants. Il faudrait de plus, pour que cette ascension se poursuive, que la nappe soit réalimentée afin que son niveau ne s'abaisse pas trop. Joffe fait également remarquer que des remontées capillaires suivies d'un dépôt consécutif à l'évaporation devraient apporter non seulement du fer, mais les autres éléments solubilisés pendant l'altération, silice et bases. Il faut au contraire reconnaître l'importance des mouvements latéraux. Les horizons d'accumulation sont formés par illuviation de produits apportés verticalement, mais « per-descensum », et latéralement. C'est ainsi que MILNE (1934, 1935) comprend les déplacement qui engendrent les « catenas ». Si ces interprétations se sont progressivement imposées, beaucoup d'auteurs de la période considérée continuent à interpréter les profils par des remontées capillaires. C'est le cas de Lombard (1932), Castagnol (1935), Reformatsky

(1935), TKATCHENKO (1936), E. de CHETELAT (1938), ERHART (1935, 1943), HALLSWORTH & COSTIN (1953).

A ces théories, pourtant périmées, mais qui survivent longtemps, ajoutons celles qui, pour être plus récentes, n'en sont pas moins assez éloignées de la réalité. A côté de travaux par ailleurs excellents, Scaetta (1941) est l'auteur de l'hypothèse du captage par la forêt équatoriale de poussières atmosphériques en quantités suffisantes pour assurer la « reconstitution des colloïdes argileux du sol ». Les poussières sont apportées par les alizés ou par les vents qui, en Afrique, soufflent depuis les zones sèches comme le Sahara et le Soudan, elles ont pour origine l'érosion éolienne ou les brûlis de savane. Arrivées en zone équatoriale, les poussières sont captées par les brouillards, ou par des phénomènes plus complexes qui font intervenir les micro-turbulences provoquées par le frottement du vent sur la frondaison des arbres, ou même par réaction électrique entre les organes végétaux et l'air humide chargé de poussières. Ces apports permettraient de compenser, toute au moins dans une certaine mesure, les pertes subies par le lessivage continu de l'éluvium qui forme la partie supérieure du profil. Vine (1949) semble avoir envisagé des transports aériens encore plus considérables. Les croûtes latéritiques, pour reprendre ses propres termes, « may have resulted from the deposition of clayey and ferruginous dust, these being leached downward and reassorted in the soil profile to form concretionnary sheets. Such dust would have been blown outwards from the Sahara at times when it was advancing over a zone where sufficiently humid conditions for the development of red clayey soils had prevailed ».

La période qui s'achève vers l'année 1927 a donné des résultats remarquables principalement dans l'étude des altérations et dans l'analyse de la place prise par les latérites dans leur contexte physiographique et chronologique. Mais il a manqué totalement à cette époque la notion de « sol ». Vageler (1930) en est conscient et le fait remarquer : « If ever there was a case in which lack of precise definition of an expression which seemed too simple to need one, has lead to confusion of ideas in science, it is certainly so with the term soil profile ». Les principes de la science du sol qui réussissent à s'imposer vont faire de la période suivante celle de l'étude, non plus des « latérites », mais des « sols latéritiques ».

C'est bien ainsi que, à l'occasion du deuxième congrès international de la science du sol (1930), Marbut juge les travaux du passé: « (the) field work as has been done seems to have been done by geologists or chemists ». « It is apparent that the existing litterature contains no record of a normally developped wholly undisturbed soil profile examined, described, and interpreted by a student well trained in pedologic methods and equiped with the pedologic point of view. » Marbut définit l'orientation nouvelle à prendre: « The pedological work, covering morphology and relation to environment... must be quarried out in the field and require special training ». Ancien professeur de pédologie dans une université russe, Agafonoff (1929) définit pour ceux qui étudient les sols des colonies françaises les principes et méthodes de travail à appliquer.

LES ÉTUDES MINÉRALOGIQUES

la minéralogie des argiles

De nouvelles techniques vont déterminer un progrès considérable, en poussant les investigations dans le domaine des particules très fines que le microscope ne peut pas déterminer. La méthode d'étude des structures cristallines par diffraction des rayons X a été élaborée par Laue et Bragg puis mise au point par Debye & Scherrer (1916) et par Hull (1917).

Les toutes premières publications donnant des analyses d'argiles par rayons X sont des

années 1923 et 1924 (d'après GRIM 1968), mais la première étude qui va influencer directement les études pédologiques est celle présentée par Ross en 1928. Bien qu'il ait travaillé beaucoup par méthode optique et assez peu avec les rayons X, Ross a identifié suffisamment d'espèces minérales pour présenter déjà une classification des argiles. Ce travail de qualité exceptionnelle est suivi par les publications de Mauguin (1928, 1930), Hendricks & Fry (1930), Pauling (1930), Ross & Kerr (1934), Grim, Bray & Bradley (1937), Brindley & coll. (1946, 1948) qui utilisent largement la diffraction des rayons X.

La première publication de Ross en 1927 conserve un intérêt historique. L'auteur distingue deux groupes d'argiles, celui de la kaolinite et celui de la montmorillonite. Pour Ross, la kaolinite semble assez rare dans la nature, la principale argile des sols paraissant être la beidellite, du groupe de la montmorillonite. Les modes principaux de formation des argiles sont l'altération des minéraux, la cristallisation de matériel colloïdal, la précipitation à partir de solutions, la réaction de solutions et de minéraux. Les argiles naissent de ces processus dans des conditions hydrothermales ou dans le milieu d'altération de surface.

Les méthodes d'analyses thermiques ont été ébauchées par Le Chatelier dès 1887, mais ce n'est que longtemps après lui qu'elles sont vraiment mises au point et vulgarisées. A la suite des travaux d'Orcel, principes et appareillages à utiliser sont exposés dans les publications de Agafonoff & coll. (1933, 1934), Orcel & coll. (1933, 1935).

C'est aussi pendant cette période que la microscopie électronique fait son apparition. Elle reste pourtant encore peu utilisée pour les sols, une des rares publications qui puissent être citées à ce sujet est celle de Marshall, Humbert & Shaw (1942).

Une méthode originale de détermination des argiles, inventée par Schmelev (1928) est transposée par Hardy (1931) pour l'étude des sols latéritiques. Elle repose sur l'adsorption d'un réactif coloré, l'alizarine. Le fer libre à l'état naturel adsorbe l'alizarine, mais l'adsorption ne se produit plus après chauffage. C'est l'inverse qui se produit pour l'alumine qui ne donne d'adsorption qu'après ignition. Hardy considère que les mesures qu'il a réalisées par cette méthode sont équivalentes à celles données par les analyses quantitatives conventionnelles. Raychaudhuri & Sulaiman (1940) trouvent au contraire que l'adsorption d'alizarine donne des résultats sans corrélation avec les dosages chimiques du fer et de l'alumine libres. Toujours est-il que cette méthode d'adsorption n'a pas été généralisée.

Grâce aux rayons X et aux analyses thermiques, il devient donc courant d'identifier qualitativement et même quantitativement parmi les argiles des sols, les sesquioxydes cristallisés, la kaolinite, les micas et illites, les montmorillonites.

les altérations

Si l'inventaire des argiles des sols latéritiques est sérieusement entrepris dès 1927, l'étude de la transformation des roches dans l'altération in-situ semble par contre ne plus guère progresser. Parmi les travaux qui méritent cependant d'être mentionnés figurent ceux de J. de Lapparent (1939) sur l'altération de granite en Guinée. Dans le site étudié, des boules de granite altéré sont emballées dans une arène. Il s'agit, suivant l'auteur, de l'imbrication de deux faciès d'altération. En effet, dans les boules, les feldspaths potassiques, micas noirs et quartz ne sont pas corrodés, alors que les plagioclases sont remplacés par une multitude de fines paillettes de gibbsite. L'arène s'altère très différemment, puisqu'elle contient de 37 à 47 % de kaolinite, pas du tout de gibbsite, et que les micas noirs y libèrent leur fer. Les boules à gibbsite et l'arène kaolinitique sont interprétées par J. de Lapparent comme des altérations distinctes liées aux conditions hydriques différentes de deux épisodes climatiques. La formation de gibbsite correspond au climat humide actuel, l'arène kaolinitique s'est au contraire formée pendant une phase antérieure qui a « arénisé » les roches sur une grande ampleur des régions humides actuelles au désert saharien.

Les conditions locales sont aussi causes de différenciations marquées. De Lapparent et Hocart (1939) découvrent que les couches alumineuses se développent toujours au-dessus du niveau des eaux et surmontent souvent des matériaux silicatés pourtant issus de la même

roche. Dans certains profils latéritiques qu'ils ont étudié, se superposent de haut en bas des bauxites puis des argiles à « leverrièrite ». Ce dernier minéral est considéré comme un édifice epitaxique associant des feuillets de kaolinite et de muscovite. Malgré cette interprétation minéralogique douteuse, l'observation des profils dans lesquels se succèdent bauxites et silicates est du plus grand intérêt.

Ces travaux sur l'altération en Guinée s'intègrent dans une œuvre exceptionnellement étendue qui, suivant Millot (1964), a permis à J. de Lapparent d'être l'un des premiers, sinon le tout premier, à saisir les grandes règles de la répartition des argiles des roches et des sols.

L'étude de Martin & Doyne (1927, 1930) sur l'altération de norites en Sierra Leone mérite aussi d'être rappelée. La norite qui a un rapport silice/alumine de 4,69 passe brutalement à un matériau blanchâtre dans lequel ce rapport tombe à 0,30. En fonction des mouvements de l'eau, le fer peut être totalement éliminé et il se forme alors une bauxite, ou peut se redistribuer en donnant naissance à des latérites (indurées) vésiculaires rouges.

L'altération des roches silicatées alumineuses a été étudiée abondamment depuis les premiers travaux de Bauer (op. cités). Il semble bien que ce soient Bennet & Allison (1928) qui, les premiers, examinent les transformations d'une roche silicatée magnésienne très peu alumineuse. Il s'agit de serpentinites de Cuba qui portent des sols rouges constituant la Série « Nipe Clay » qui sera très souvent étudiée dans l'avenir par les auteurs des U.S.A. Il se produit (Tableau VII) un départ massif de silice et de magnésium qui sont les deux constituants essentiels de la roche, dès le début de l'altération. Les matériaux d'altération et le sol proprement dit sont constitués essentiellement de fer et d'alumine. Malgré le taux très faible d'alumine de la roche, le sol en contient de notables quantités sous forme libre et très peu de silicates sont présents.

Tableau VII. — Analyse d'un profil sur serpentinite, d'après Bennett et Allison (1928)

	I	II II	III	IV	V
SiO ₂	41,93	1,55	1,83	2,25	3,38
Al_2O_3	2,00	14,66	12,36	11,13	18,46
Fe ₂ O ₃	7,84	68,10	71,12	69,56	63,04
${ m TiO}_2$	0,05	0,80	0,80	0,26	0,80
MnÕ	0,12	0,47	0,38	0,28	0,42
MgO	34,02	0,60	0,64	0,48	0,33
CaO	1,50	0,15	9,01		0,12
K ₂ O	0,08	0,05	0,02	0,08	0,06
Na ₂ O	0,36	0,39	0,48	0.30	0,47
P_2O_5		_	<u> </u>	Property	0,03
$\ddot{\mathrm{H_2O}}+\ldots$	11,75	12,74	12,33	12,38	12,74

- I: Serpentinite.
- II: Matériau friable, poreux, rouge, jaune et noir, de 230 à 480 cm.
- III: Horizon jaune, de 100 à 230 cm.
- IV: Horizon brun-rouge, de 65 à 100 cm.
- V: Horizon de surface, rouge, avec quelques « gravillons » ferrugineux, de 0 à 65 cm.

Des sols formés sur roches calcaires et dolomitiques après dissolution des carbonates sont étudiés par Bennet & Allison (op. cités) et Van der Merwe en Afrique du Sud (1935).

Certains auteurs comme Van der Merwe (op. cité) et Robinson (1949) portent leur attention sur les éléments solubilisés et évacués par les eaux. La silice et les bases dosées dans les cours d'eau confirment la réalité du lessivage et le differential enrichment (Bishopp 1937) des sols en sesquioxydes. Il faut reconnaître que ces premières études des eaux d'altération ne sont que l'amorce d'une nouvelle voie de recherches. Elles sont encore loin de prétendre à des bilans quantitatifs comme ceux obtenus dans l'étude des résidus d'altération.

Pour l'étude de l'altération des roches dans la nature, la période commencée en 1926-1928 apporte d'intéressantes confirmations aux études antérieures, mais assez peu d'éléments nouveaux.

Par contre, l'étude expérimentale de l'altération va véritablement trouver sa voie. Elle avait été timidement entreprise par Daubree (1879) puis par les expériences déjà relatées de Mohr et Harrison. L'étude des altérations par méthode expérimentale va vraiment être lancée par Correns et les chercheurs de son école. Daubree et Harrison ont opéré en milieu « fermé ». C'est la méthode du système « ouvert », dans lequel il y a renouvellement des solutions, qui avait déjà été employée dans les colonnes à percolation de Mohr, que Correns imposera par la suite. Il procède à ce renouvellement par des extractions successives par centrifugation ou dialyse. Les solutions utilisées peuvent être de l'eau pure ou chargée de gaz carbonique ou sulfureux, d'acides ou de bases. Les résultats obtenus suivant ces principes par Correns, Tamm, Hope, Bohmeke entre 1930 et 1950 restent valables, ils devront être examinés dans un chapitre suivant.

la formation des argiles

Le premier à présenter une doctrine complète de la formation des argiles est probablement Mattson (1925 à 1935) dont les idées ont été assez largement admises par ses contemporains. Les argiles se forment selon lui par co-précipitation de « sols » électro-positifs d'alumine et de « sols » électro-négatifs de silice. Mattson a dressé la courbe expérimentale de la composition des co-précipités alumine-silice, en fonction du pH. Il opère avec du chlorure d'aluminium et du silicate de soude, et règle le pH du milieu par de l'acide chlorhydrique ou de la soude. En milieu basique, la silice est fortement ionisée, alors que les sesquioxydes ont une solubilité très réduite, les précipités qui se forment dans ces conditions contiennent beaucoup de sesquioxydes pour peu de silice. Beaucoup d'auteurs ont vu là une confirmation de l'hypothèse déjà ancienne d'une première phase alcaline lors de la formation des latérites, les solutions du début de l'altération solubilisant la silice, alors que les « sols » d'alumine et de fer précipitent au contraire. Dans un milieu de pH égal à 5,8, Mattson obtient un précipité qui a la composition de la kaolinite.

Les textes de Mattson sont volumineux et difficiles à suivre. Kelley a très utilement consacré un article à les résumer et à les expliciter. Ces travaux sont actuellement bien dépassés, ils n'apportent pas beaucoup d'éléments à la compréhension de la formation des argiles telles que nous les connaissons actuellement. Il semble en particulier que Mattson n'ait pas tenu compte du caractère cristallin des argiles, et qu'il ait assimilé ses précipités non stoïchiométriques de silice et d'alumine aux constituants habituels des sols. Certains contemporains de Mattson n'admettent pas ses conclusions et lui opposent des observations contradictoires. Ainsi Mohr (1938), Hardon & Faverjee (1939), Edelman (1946) sont-ils conduits à suggérer, ou même à affirmer clairement, que les milieux alcalins déterminent la formation de montmorillonite au lieu de laisser un résidu de sesquioxydes, et que la genèse de la kaolinite se fait en milieu acide.

C'est aussi en faisant intervenir des interactions entre « sols » ou gels chargés électriquement que Erhart (1926, 1935) interprète la formation des argiles. L'originalité de sa théorie réside dans l'importance primordiale donnée à la présence ou à l'absence des colloïdes humiques. Les argiles se forment normalement en présence ou en l'absence de bases, par coagulation de « gels » ou de « sols » électro-positifs et négatifs d'hydrates d'alumine et de silice. L'humus intervient dans ces réactions de la matière minérale, en jouant suivant son état, des rôles très différents.

Lorsqu'il est désaturé, l'humus se comporte comme un système colloïdal très stable qui exerce une action protectrice sur les colloïdes de fer et d'alumine qui par eux-mêmes sont instables et coagulent facilement. Ainsi protégées, les dispersions colloïdales de fer et d'alumine unies à l'humus ont la possibilité de migrer, elles ne se fixent donc pas. La présence d'humus désaturé interdirait donc la formation de latérite qui consiste en une immobilisa-

tion des sesquioxydes. ERHART pense donc que la condition indispensable à la formation de latérite est l'absence presque complète d'humus. Cette condition se réalise sous les climats humides et chauds qui font que les résidus végétaux se décomposent si rapidement qu'il ne peut se former d'humus. ERHART affirme d'ailleurs que les sols forestiers de Madagascar ont une couche végétale « composée presqu'uniquement de débris végétaux en voie de décomposition rapide », sans « humus au sens habituel du mot ». La « latérisation à outrance », c'està-dire la formation d'une cuirasse, est la suite logique de la destruction de la végétation, par les feux notamment, qui amène les taux d'humus à des valeurs « infimes ».

Par contre, si l'humus existe et est saturé, il coagule et n'exerce plus d'action protectrice, l'acide silicique et l'hydrate d'alumine réagissent entre eux. ERHART affirme que les gisements de kaolin qui se présentent accidentellement au milieu des terrains latéritisés de Madagascar ont toujours une couverture humifère à humus saturé.

Cette théorie d'ERHART a le mérite d'entrevoir les interactions fer-complexes organiques, qui seront plus tard parfaitement reconnues et démontrées, mais elle accorde une importance exagérée à la présence ou à l'absence d'humus pour l'altération et les néoformations. Quant à l'absence d'humus dans les sols forestiers de Madagascar, il semble difficile de croire qu'il s'agisse d'un fait d'observation réelle. Reconnaissons au passage l'analogie des conceptions de ERHART et de celles formulées bien auparavant par LANG et WALTHER (op. cités).

L'ANALYSE MORPHOLOGIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE DES SOLS LATÉRITIQUES

l'étude morphologique, le solum et le profil géologique

Après avoir remarqué l'absence dans le passé de méthodes de travail vraiment pédologiques, Marbut (op. cité) souligne que les publications de Harrassowitz ont fait croire, à tort, à l'existence d'un schéma morphologique général des latérites, comportant toujours une cuirasse ou un horizon tacheté, et en profondeur un horizon blanchi. Ce type de profil est sans doute assez répandu, il en existe dans le bassin de l'Amazone que Marbut & Manifold (1926) décrivent ainsi:

- 1. Sol.
- 2. Horizon d'oxyde de fer, poreux et d'aspect scoriacé.
- 3. Horizon tacheté.
- 4. Horizon gris.
- 5. Sable et argile non consolidés.

Bennet (1928) a observé en Amérique Centrale des profils semblables, qui se composent ainsi :

- 1. Horizon de surface, dans lequel la matière organique assombrit le sol rouge.
- 2. Argile rouge uniforme.
- Argile rouge avec trainées ou marbrures de matériau jaunâtre, bleu-gris, blanchâtre ou crème, souvent en mélange avec un matériel rocheux partiellement décomposé.

Mais il existe d'autres sols latéritiques complètement dépourvus de cuirasse et horizons blanchis. Marbut en donne comme exemple les sols de la série « Nipe Clay », étudiés à Cuba

par Bennet & Allison (op. cité). Les analyses d'un profil de cette série ont été reproduites dans les pages précédentes comme illustrant l'altération d'une roche magnésienne (serpentinite): elles montrent clairement la forte désilicification, l'enrichissement en fer, les rapports silice/alumine de 0,20 à 0,30 environ. Ces sols découverts par Bennett & Allison ont soulevé beaucoup d'intérêt, puisqu'ils seront encore cités par Robinson (1932, 1949), Mohr & Van Baren (1954). Quant à Marbut, il résume leurs caractères morphologiques ainsi:

- 1. Horizon de matériel rouge à grain fin, ou d'argile mêlée à de petites concrétions rondes d'oxyde de fer (perdigon). Moins de 30 cm d'épaisseur.
- 2. Argile rouge profonde, avec « perdigon », de 1,5 à 1,8 m d'épaisseur, sans aucune structure apparente. Transformation par degrés vers :
- 3. Argile rouge-jaune sans autre structure que, à la base, un arrangement mal défini en bandes parallèles à la surface de la roche. Cette dernière n'est pas plane mais irrégulière. A la partie inférieure, boulders de décomposition de plusieurs « feet » de diamètre.

De cette diversité des constitutions morphologiques des sols latéritiques, MARBUT tire les conclusions suivantes :

Les sols du type « *Nipe Clay* » sont manifestement latéritiques, ainsi qu'en témoigne leur constitution minéralogique. Ils doivent être considérés comme des sols « normaux », formés dans des conditions de bon drainage interne. Ils se forment dans les régions montagneuses, ou tout au moins bien disséquées, sans intervention de nappes phréatiques. Par contre les sols à horizons de profondeur blanchis, et horizons tachetés, se forment dans les régions assez planes, dans lesquelles le réseau hydrographique est peu encaissé, et où les nappes phréatiques se développent puissamment. Il en est de même pour les sols cuirassés, puisque, selon lui, la cuirasse résulte de la transformation des matériaux tachetés.

En plus de cette mise au point sur la morphologie générale des latérites, on doit à Mar-BUT d'avoir clarifié les deux conceptions que l'on peut avoir du « profil » des sols latéritiques. Il est possible de ne considérer que le « solum » ou « soil profile », ou d'envisager le profil d'altération dans son ensemble que Marbut appelle « geological profile », Mohr (1938) exprime aussi cette distinction entre le solum d'une part qui comprend les horizons organiques et éluviaux et les horizons illuviaux qui leur font immédiatement suite, et les matériaux qui sont plus des roches que des sols. Robinson (1932, 1949) quant à lui propose de distinguer le solum du « régolithe », qui est le profil d'altération. Ce terme de régolithe et celui de « régogénèse » qui en dérive, seront largement utilisés dans l'avenir par certains pédologues. ROBINSON souligne qu'il est souvent difficile de donner une limite au solum : « The A, B and C nomenclature used in the description of soils of temperate regions has not been used so frequently by students of tropical soils. Indeed, in many cases considerable uncertainty may exist as to the depth of the solum, for there may be little apparent change below the top few inches. It might be justifiable to regard soils developped over deep layers of weathered material as secondary in that the process that have formed them from the parent rock date back in many cases through geological time, whereas soil profile development is mainly contemporary ».

D'autres auteurs continuent à envisager les « sols latéritiques » de la même manière que l'on considérait auparavant les « latérites », c'est-à-dire jusqu'à la roche saine. S'ils emploient parfois le terme « solum » pour désigner les horizons supérieurs, ils ne font cependant pas de distinction fondamentale entre un profil pédologique et un profil géologique. C'est le cas de SCAETTA (1940) qui donne, croquis à l'appui, la description d'un profil observé à Yapo en Côte d'Ivoire et que l'on peut résumer ainsi :

- 1. Horizon organique et humicole de 10 à 13 cm d'épaisseur,
- Horizon gravéoleux, de 40 à 50 cm d'épaisseur, qui avec le précédent constitue, selon SCAETTA, le solum,

- 3. Masse concrétionnée d'oxydes de fer et d'hydrates d'alumine avec des enclaves kaolineuses et des veines de quartz. C'est une « eisenkruste » en formation. Epaisseur de 2,20 à 2,30 m,
- 4. Lithomarge formée d'une masse kaolineuse avec des trainées latéritiques qui paraissent formées d'après les plans primitifs de schistosité. Cette couche évoluera en fusionnant avec l'horizon superposé. Epaisseur de 2,20 à 2,30 m.
- 5. Lithomarge moins évoluée que la précédente. Elle contient des veines de quartz, comme la précédente. Epaisseur de 2,65 m,
- 6. « Zersatz »: schiste arkosique.

Castagnol & coll. (1934, 1935, 1936), Tkatchenko (1936), considèrent que le profil des sols est produit par les mouvements de l'eau qui reolassent les éléments libérés par l'altération, et principalement les sesquioxydes. Ce reclassement s'opère en fonction de la nappe phréatique et de ses fluctuations, par mouvements descendants et ascendants. Le profil ne peut donc être compris qu'en l'étudiant dans sa totalité, il comprend le plus souvent « deux horizons éluviaux, l'un superficiel (couche de surface lessivée), l'autre profond reposant directement sur la roche (zone de départ). Ces deux horizons comprennent entre eux une zone illuviale plus ou moins enrichie en sesquioxydes » (Castagnol). L'horizon éluvial de surface est généralement jaune, la zone éluviale inférieure est grise par suite d'une moindre oxydation. A côté de ces profils complets, il existe des terres rouges superficielles qui représentent un horizon illuvial reposant directement sur l'horizon éluvial de départ. Il n'y a plus d'horizon éluvial superficiel, mais seulement un horizon illuvial alimenté par un horizon éluvial profond. Les profils étudiés sont donc très épais. Ткатсненко décrit des sols gris latéritiques qui atteignent facilement 6 ou 7 mètres. Agafonoff (1928) envisage les profils de la même manière. Lorsqu'il étudie les terres rouges formées sur basalte, il poursuit ses observations et prélèvements pour analyse jusqu'à une dizaine de mètres de profondeur.

Les études de Castagnol, Agafonoff, Tratchenko, ont montré la grande variété des sols latéritiques. La couleur rouge est loin d'être exclusive, il existe aussi des terres superficielles jaunes ou grises, les accumulations de sesquioxydes, les « bien-hoa », ne sont pas non plus générales, et lorsqu'elles existent elles se situent à des positions variables dans les profils. Il n'est pas inutile de souligner encore que ces pédologues de langue française qui travaillent en Indochine continuent, sans rupture, les travaux de leurs devanciers comme Lacroix, à l'école de qui ils se sont plus ou moins directement formés : ils conservent la même conception du profil.

le lessivage ou éluviation

Le déplacement des sesquioxydes dans les profils suivant des mouvements descendants ou ascendants est défini par les termes « éluviation » ou « lessivage », et « illuviation » ou « accumulation ». Le lessivage peut transformer des sols primitivement rouges qui prennent alors une couleur jaune (Afanasieff 1931). Dans le cas de sols sur roches basiques, Hardy & Follet-Smith (1931) remarquent la constance de la composition texturale et du rapport silice/sesquioxydes jusqu'à la surface du sol. Par contre dans les sols sur roches acides, le rapport silice/sesquioxydes s'élève en surface, il se produit une accumulation (relative) de quartz. « The chief process affecting the topsoil is a mechanical washing action by water whereby finely divided kaolin is transported to the lower layers », de même qu'il y a « loss of sesquioxydes through leaching ».

Ce lessivage vertical descendant fait se succéder un horizon peu coloré et de texture légère, et un horizon coloré plus argileux. La plupart des auteurs de langue anglaise étendent la signification du terme « podzolique » aux sols qui acquièrent cette morphologie. Comme MARBUT (1932), ils reconnaîtront donc des profils podzoliques sur des matériaux latéritiques.

Pour les pédologues français, ces sols seront dits lessivés, la podzolisation conservant son sens restreint. Pour expliquer le déplacement du fer, Castagnol (1935), Aubert (1941), soulignent que seule la forme réduite est mobile, ceci rend bien compte de l'enlèvement du fer de la zone de départ que la nappe phréatique place dans des conditions réductrices.

les caractérisations analytiques

Les descriptions de profils sont généralement complétées par une caractérisation analytique faite suivant les méthodes de la science du sol. Mesures de pH, analyses granulométriques, dosages de la matière organique et surtout de l'azote, dosages du phosphore et de la potasse, font partie des méthodes employées par ERHART (1926, 1947), CASTAGNOL et coll. (1932 à 1936), TKATCHENKO (1936), AGAFONOFF (1928). Ces analyses permettent de confirmer (CASTAGNOL op. cité, MARTIN & DOYNE 1927, 1930) l'existence de pseudo-sables et de montrer que très souvent les pourcentages de fer sont croissants avec la taille des particules, de l'argile aux limons puis aux sables. Les minéraux résiduels et altérables peuvent être séparés par densimétrie puis déterminés. C'est notamment ce que font Glangeaud (1941), Raychaudhuri et coll. (1942). Ces déterminations permettent à Glangeaud de proposer un « coefficient d'éluviation » qui est le rapport du taux de quartz d'un certain horizon à celui de la roche-mère, et un « coefficient de décomposition » calculé de la même manière mais avec les minéraux altérables.

Pour interpréter la genèse des sols et établir les classifications, les critères les plus importants restent ceux donnés par l'analyse chimique totale et les rapports moléculaires de la silice à l'alumine et à la totalité des sesquioxydes.

Martin & Doyne (1927, 1930) considèrent que le meilleur critère est celui du rapport silice/alumine de la fraction argileuse. La composition des argiles qui ne sont constituées que par des produits de néoformation leur semble plus significative que celle du sol total qui n'est pas toujours interprétable parce qu'il peut y avoir mélange de minéraux néoformés et résiduels. Le rapport silice/alumine a l'avantage de fournir au moins une valeur repère qui ne soit pas arbitraire, celle qui correspond à la composition de la kaolinite. Martin & Doyne séparent donc les « latérites » dont les argiles ont un rapport silice/alumine inférieur à 1,33 (valeur arbitraire), des « sols latéritiques » pour lesquels ce rapport est compris entre 1,33 et 2 (valeur caractérisant la kaolinite).

Pour d'autres auteurs, la position prise par Martin & Doyne donne à l'évolution des silicates d'alumine une importance excessive, puisqu'elle conduit à négliger les autres hydroxydes métalliques. Ils préfèrent donc utiliser comme critère de classification le rapport de la silice combinée à la totalité des sesquioxydes. C'est en particulier le point de vue de Robinson (1932, 1949), Hardy & Follet-Smith (1931). Ils s'appuient en particulier sur le fait que les roches les plus riches en minéraux ferro-magnésiens donnent nécessairement des sols dans lesquels le fer est largement prédominant par rapport aux silicates d'alumine ou à l'alumine libre. C'est, rappelons-le, le cas des sols « Nipe Clay » formés sur serpentinite, étudiés dans les pages précédentes.

Le calcul des rapports silice/alumine et silice/sesquioxydes, soit de l'argile, soit de la terre totale, se généralise largement. Parmi les études pédologiques importantes qui n'ont pas trouvé à être mentionnées dans les pages précédentes, signalons celles des sols des Indes (RAYCHAUDHURI et coll., 1940 à 1943), et de l'Afrique du Sud (Van der MERWE 1935, 1941) qui utilisent largement ce moyen de caractériser les sols.

L'ÉVOLUTION DES SOLS LATÉRITIQUES DANS LE CONTEXTE ÉCOLOGIQUE ET PHYSIOGRAPHIQUE

sols latéritiques et climats, le principe de zonalité

Que la latérisation, cette « maladie tropicale des roches » suivant la formule imagée de Geze (1942), soit réellement un processus zonal a été largement discuté et admis grâce aux études de la période précédente. Reifenberg (1933) situe très bien les sols latéritiques dans l'ensemble mondial des sols par l'établissement, à partir des chiffres cités dans la littérature, des valeurs moyennes des rapports silice/sesquioxydes (tableau VIII). Pour les sols tropicaux comme pour ceux des autres régions climatiques, les minéraux de néoformation doivent être considérés comme des « indices climatiques » (Aufrère, 1931). Aux deux extrêmes des régimes climatiques tropicaux, il se forme suivant Greene (1945) sur de mêmes roches cristallines acides des « limons rouges » kaolinitiques sous les fortes pluviosités, et des argiles foncées à montmorillonite sous les climats plus secs.

Tableau VIII. — Rapports silice/sesquioxydes des principaux Groupes de sols, suivant Reifenberg (1933)

Sols gris désertiques	3,62	Podzols	2,84
Sols rouges désertiques	2,08	Terra rossa	2,43
Sols halomorphes	3,01	Sols bruns	1,98
Sols de prairie et chernozems	3,17	Terres rouges tropicales	1,73
	•	Sols latéritiques	1,28

L'analyse de l'influence des climats peut être poursuivie à l'intérieur même du groupe des sols latéritiques, principalement en suivant les variations du rapport silice/alumine. Les relations entre ce rapport et la pluviosité ne sont pas toujours évidentes et paraissent parfois s'inverser par rapport à ce qui semble être la normale, c'est-à-dire un rapport d'autant plus bas que le climat est plus humide. Ainsi en analysant les échantillons rapportés par Scaetta d'Afrique Occidentale, GLANGEAUD (1941) trouve-t-il un accroissement de l'alumine libre en passant des régions de climat équatorial très humide, aux régions plus sèches de régime climatique soudanais. Il existe donc suivant GLANGEAUD une « province des allito-siallites » et une « province des allites ». La raison de ces deux pôles de différenciation chimico-minéralogique pourrait être recherchée, selon lui, dans l'influence des oscillations climatiques du Quaternaire. De même, ROBINSON W. O. & HOLMES (1924) trouvent ils, en traitant statistiquement les analyses d'une trentaine d'échantillons de sols des U.S.A., une corrélation positive entre pluviométrie et rapport silice/alumine + fer. Reprenant ces mêmes chiffres par la suite, Crowther (1930) montre que l'analyse des relations entre température et pluviométrie fait réapparaître les corrélations que l'on attendait normalement, négatives avec la pluviosité, positives avec la température. A partir de données de cases lysimétriques, Crowther cherche à établir la relation entre température, pluviosité et drainage du sol. Une augmentation de la pluviosité annuelle de 4 cm est compensée, vis-à-vis du drainage, par un accroissement de la température moyenne de 1° C.

C'est sans ambiguïté que les travaux de Martin & Doyne (1927, 1930) montrent l'abaissement du rapport silice/alumine avec la pluviosité. En Sierra Leone, les argiles d'une gamme de sols graveleux rouges révèlent des rapports silice/alumine de 1,49, puis 1,30 et enfin 1,10 pour des pluviosités passant de 2.300 à 2.800 puis 3.700 mm annuels. Des moyennes obtenues sur les sols de plusieurs pays africains établissent plus sûrement encore cette relation (Tableau IX).

TABLEAU IX. — Relation entre pluviosité annuelle et rapport silice/alumine des argiles des sols de pays africains, suivant Martin & Doyne (1930)

	Pluviosité annuelle	Rapport mol. silice/alumine
Soudan	$\frac{< 625 \text{ mm}}{625 \text{ à } 1250 \text{ mm}}$	3,65
Ghana, Zaïre, Nigéria	1 250-2 000 mm	2,07
Sierra Leone, Guinée, Cameroun	> 2 000 mm	1,55

Les variations climatiques qui accompagnent les différences d'altitude ont le même effet que celles liées aux différentes latitudes. Aux Indes, Raychaudhuri & Chakravorty (1943) reconnaissent l'abaissement du rapport silice/alumine avec les fortes pluviosités qui caractérisent certaines régions d'altitude élevée. L'Ile Maurice a donné à CRAIG & HALAIS (1934) l'occasion d'une excellente étude des variations non seulement des rapports silice/alumine mais aussi des autres caractères des sols. L'île est constituée essentiellement de basaltes doléritiques non quartzeux à rapport silice/alumine de 5,8. La pluviométrie y varie entre 600 et 3.700 mm annuels. Les sols sont répartis en deux catégories, les sols jeunes et les sols mûrs, les comparaisons se font à l'intérieur de chaque catégorie. Avec l'accroissement de la pluviosité, les sols jeunes voient leurs rapports silice/alumine passer de 2,34 à 1,32, pour les sols mûrs les valeurs correspondantes sont de 1,87 à 0,43. Pour les sols jeunes comme pour les sols plus anciens, le taux de matière organique s'accroît avec l'humidité du climat, par contre bases échangeables, capacité d'échange, taux de saturation s'abaissent fortement. En ce qui concerne les caractères morphologiques, les sols jeunes sont très hétérogènes et ne montrent pas de variations régulières. Par contre les sols mûrs se modifient progressivement en fonction du climat. Pour des pluviométries croissantes, la couleur passe du rouge au brun-rouge puis au rouge violacé, le nombre des cailloux et graviers (débris de basalte) décroît, le taux d'argile diminue au profit des fractions sableuses qui sont en fait formées de fines concrétions. L'homogénéité des roches mères placées sous des climats variant largement a donc permis à CRAIG & HALAIS une étude assez complète de l'influence climatique. Une autre illustration de la dépendance sols-climats est donnée à Puerto-Rico par HARDY (1949) qui reconnaît une bonne liaison entre les paramètres climatiques et la répartition des Séries de sols, bien que cette liaison soit assez souvent masquée par l'influence de roches et de topographies variées.

Il se confirme que le cuirassement ferrugineux est dans une large mesure lié aux climats à saisons alternantes. En Afrique occidentale, SCAETTA (1941) reconnaît une zone privilégiée pour le cuirassement, entre 10° et 14° de latitude nord, où s'étalent d'immenses plateformes latéritiques. Au sud du 10° parallèle, en régions forestières humides, le cuirassement devient plus discret, il s'établit en profondeur et non en surface des profils. Climat et végétation interviennent dans ces différenciations. En 1948, Humbert défend également la dépendance du cuirassement par rapport aux alternances de périodes humides et sèches.

Le principe de zonalité a cependant certaines limites. Camargo & Vageler (1937) s'élèvent contre l'importance souvent exagérée qui lui est donnée, principalement dans les cartes mondiales des sols. Plus que le climat actuel, les facteurs décisifs sont pour eux l'histoire géologique et géomorphologique, la morphologie du paysage. Greene (1947) souligne lui aussi que l'influence de la topographie estompe souvent l'importance du climat. Erhart (1947) abonde dans le même sens. « Il importe de bien se rendre compte que la zonalité des sols en Afrique ne peut correspondre qu'à une pure vue de l'esprit. En pratique et dans la nature on ne la trouve que rarement réalisée .. La plupart des sols ont été formés sous des climats et sous des végétations antérieurs et différents de ceux de l'époque actuelle ».

Catena, toposéquence, chaîne de sols

La notion de « catena », qui s'est très rapidement généralisée, a pris jour dans les études de MILNE (1934, 1935, 1936, 1947) consacrées à des sols tropicaux. MILNE en donne la définition suivante : « The catena is a grouping of soils which, while they fall wide apart in a natural system of classification on account of fundamental genetic and morphological differences, are yet linked in their occurence by conditions of topography and are repeated in the same relationship to each other wherever the same conditions are met with ». Lorsque le matériau originel est homogène, la « catena » s'organise en fonction des conditions de drainage, du lessivage, transport et éventuellement reprécipitation des constituants chimiques mobiles, et du transport du matériel érodé. Dans l'Est Africain, s'observe souvent une « catena » de sols rouges en haut de pente et de sols gris, sableux, à taches et concrétions, vers les zones basses. La « catena » se complique lorsqu'elle s'établit à travers des formations géologiques différentes, ou lorsqu'elle inclut les « denuded remnants » de latérites anciennes. Dans la définition donnée par MILNE, la « catena » peut associer des sols jeunes et anciens, des matériaux homogènes ou mélangés.

Les successions de sols décrites par Baeyens (1938) au Congo Belge répondent à la définition de la « catena ». Elles réunissent des sols « autochtones », terme qui pour Baeyens n'exclut pas les matériaux colluviaux, et des sols formés sur apports alluviaux anciens et récents. La séquence suivante est observée dans le bassin du Kwilu. En haut de pente, le sol comprend :

- a) Un horizon épais de 25 à 30 cm, plus ou moins sableux, humifère, noirâtre.
- b) Une zone de transition de 30 à 50 cm avec infiltration d'humus.
- c) Un horizon assez argileux, de teinte jaune foncé, de 30 cm à plusieurs mètres d'épaisseur. La partie inférieure est parfois mouchetée de points rouges, ou contient des concrétions ferrugineuses.

Du milieu au bas de pente, il lui succède un sol dont la partie supérieure est formée « de colluvium, c'est-à-dire de produits d'érosion ou de solifluxion venant des hauteurs » :

- a) De 0 à 30 cm, un horizon plus ou moins sableux, humifère, noir.
- b) De 30 à 50 cm, une zone de transition, argileuse, de couleur jaune foncé.
- c) Un lit de débris de quartz, mélangé d'argile. On peut y trouver des concrétions ferrugineuses.
- d) Les zones constituées par la roche-mère en altération, identiques à celles du profil précédent.

Dans les vallées, apparaît ce type de sol :

- a) Un horizon superficiel, sablo-argileux, noir, de 0 à 30 cm de profondeur.
- b) Une zone de transition de 30 à 50 cm avec infiltration d'humus, et plus argileuse que l'horizon a.
- c) Un horizon sous-jacent, argileux, jaune, compact, moucheté ou marbré de rouge vers la base et mêlé de nodules de limonite.

La séquence se termine par les alluvions récentes de la plaine d'inondation (sols alluviaux hydromorphes).

Alors que la séquence décrite par Baeyens semble s'être différenciée principalement en fonction de transports mécaniques, EDELMAN (1946) met en évidence un type de « catena » beaucoup plus dépendant du mouvement des éléments solubilisés. Sur les édifices volcaniques de Java, des sols latéritiques rouges à kaolinite se forment sur les parties hautes bien drainées, la nappe phréatique apporte de la silice aux zones basses dans lesquelles se forment des terres noires à montmorillonite (Fig. 1).

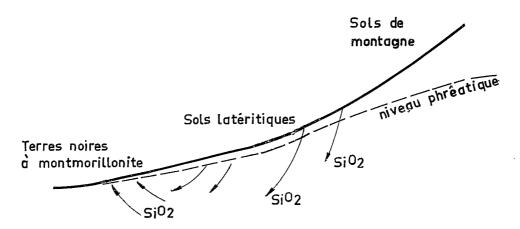
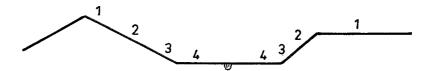


FIGURE 1. — Répartition des sols sur un volcan de Java, d'après Edelman (1946).

Les observations de Edelman sont longuement commentées par Mohr & Van Baren (1954) qui y trouvent une confirmation de leurs propres travaux sur les massifs volcaniques d'Indonésie, montrant les interactions des conditions de drainage et de la nature des matériaux originels sur la formation des sols. Mohr & Van Baren ont observé sur une même roche des sols rouges (latéritiques) en des sites bien drainés, proches de cours d'eau encaissés, et des sols noirs (vertisols) en des sites à écoulement difficile. D'autres cas montrent que, en des positions topographiques tout à fait comparables, à drainages externes équivalents, il se forme des sols rouges ou noirs suivant que les roches constituent un matériau poreux ou au contraire peu perméable.

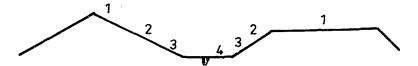
Greene (1945) a également mis en évidence que la silice et les bases lessivées des « Pedalfers » des positions élevées vont s'accumuler dans les « Pedocals » des zones basses. En deux croquis (Fig. 2), il résume les principales différenciations, en fonction de la topographie, de la couleur des sols, de l'érosion et de l'accumulation détritique, ainsi que de leur caractère acide ou alcalin. Les cas considérés envisagent les climats à pluviosité forte ou réduite, les reliefs montagneux à larges plaines (partie gauche des croquis), et les reliefs (partie droite) qui ont conservé des aplanissements anciens (pénéplaine Miocène de l'Est Africain) en cours de dissection.



- 1. Roche nue.
- 2. Sol squelettique rouge légèrement alcalin.
- 3. Sol brun faiblement alcalin.
- 4. Sol gris calcaire.

- 1. Cuirasse ferrugineuse.
- 2. Accumulation détritique rouge.
- Accumulation détritique claire avec imprégnations ferrugineuses à la base.
- Accumulation détritique fine, lessivée puis à imprégnations ferrugineuses. La partie inférieure est alcaline.

Même sans apport des parties hautes des « catena » vers les parties basses, il se produit une différenciation des sols suivant leur position topographique et leur relation avec la nappe phréatique. L'altération qui a paru longtemps énigmatique parce qu'elle conduit à la forma-



- 1. Roche et limon rouge acide à horizon supérieur brun.
- Limon rouge acide à horizon supérieur noir.
- 3. Limon argileux jaune faiblement acide à horizon supérieur noir.
- 1. Limon rouge avec concrétions ferrugineuses.
- 2. Sols tronqués à cuirasse détritique.
- 3. Sol clair, plastique, à imprégnations ferrugineuses.
- 4. Sol à gley.

FIGURE 2. — Les « catena » en fonction du climat et du relief, suivant Greene (1945)

- I. Dans les climats à précipitations pluviales réduites
- II. Dans les climats à précipitations pluviales élevées.

tion de silicate ou d'alumine libre, est en fait commandée par les conditions hydriques. Mohr (1938) a été sans doute l'un des premiers à le comprendre. Mohr & Van Baren l'ont bien exprimé par la suite: « one and the same type of rock can alter into kaolinite clay in one case, and into a gibbsitic clay in another, some explanation is certainly due. This explanation, which, it is emphasized, is a rather hypothetical one for the time being, can only be that it is the result of the drainage process, which is most probably governed, in turn, by the topography of the landscape » (1954).

Le fer est aussi très dépendant des conditions topographiques et hydriques. Greene (1947) indique que dans les sites bien drainés, il s'oxyde et précipite très rapidement, sur place ou à faible distance de son lieu d'origine. Dans les endroits moins bien drainés, il a davantage la possibilité de migrer, sous forme réduite.

le "modelé latéritique"

C'est à E. de Chetelat (1928, 1933, 1938) que l'on doit la première étude détaillée de l'évolution d'un paysage largement cuirassé, observé par l'auteur en Guinée Française.

E. de Chetelat est très fortement influencé par les travaux de Lacroix auquel il doit la croyance dans les mouvements « *per ascensum* » du fer, et une bonne partie de sa terminologie. Il adopte pour les « cuirasses » la classification suivante, dérivée de celle de Lacroix :

- Cuirasses alumineuses ou bauxitiques (bauxites latéritiques et latérites bauxitiques).
- 2. Cuirasses latéritiques normales (bauxites ferrugineuses et latérites ferrugineuses).
- 3. Cuirasses éminemment ferrugineuses.

Ses descriptions morphologiques des cuirasses sont excellentes. En plus des variations de couleur, il distingue la structure massive, nodulaire, bréchoïde, scoriacée, schisteuse, gréseuse, conglomératique, reconnaissant que « dans un même échantillon, voire dans une même plaque mince, on peut reconnaître plusieurs textures et structures, et des teneurs différentes ».

Le « bowal », nom vernaculaire guinéen, désigne une surface tabulaire ou légèrement ondulée couverte par une cuirasse latéritique continue. E. de Chetelat distingue (Fig. 3) les

hauts « bowé », dans un état de dégradation plus ou moins avancée, qui constituent des buttes témoins d'une formation ancienne, et les bas « bowé » de pénéplaine.

Parmi les latérites, il faut distinguer celles qui sont « actives », c'est-à-dire qui évoluent actuellement, celles qui sont « dormantes », dont l'évolution est arrêtée, et celles dites « finales » qui ne peuvent plus évoluer parce qu'elles ne sont composées que d'éléments latéritiques. Les cuirasses se forment au-dessus de la nappe phréatique. Lorsque le relief est incisé, la nappe s'enfonce, et il se peut alors que la cuirasse se développe vers le bas sur des épaisseurs considérables. Si l'enfoncement des vallées est plus rapide, la latérite de sommet n'est bientôt plus alimentée par la nappe, elle devient « dormante ». D'une façon générale, les périodes de calme orogénique et les pénéplaines, sont favorables à la formation des cuirasses. Une remarque analogue a été faite par Lombard (1937) en Afrique centrale : les cuirasses latéritiques paraissent se former dans les reliefs atténués, et être absentes des reliefs les plus accidentés.

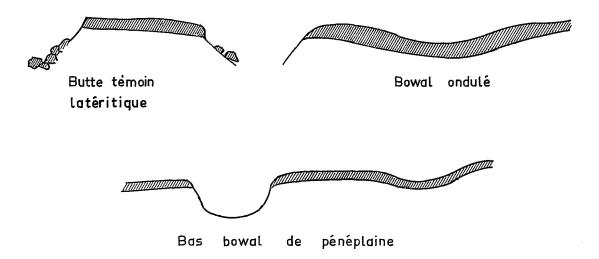


Figure 3. — Le modelé latéritique d'après E. de Chetelat (1938)

Après pénéplanation et cuirassement, une reprise de l'orogenèse telle que E. de CHETE-LAT la voit se manifester dans la pénéplaine soulevée de Youkounkoun, déclenche une érosion régressive. Le découpage de l'ancienne pénéplaine isole les bowé dont les débris jonchent les pentes des « vallées d'éboulement ». L'érosion qui s'exerce sur une cuirasse produit d'abord la polygonation par un réseau de fissures, puis l'effritement. Le ruissellement peut ensuite transporter et trier les poussières et sables latéritiques, « pseudo-gravillons ferrugineux ou grenailles », « pseudo-graviers latéritiques » (de 1 à 10 cm), « chaos latéritiques ».

Il faut tenir compte aussi du fait que la fragmentation des cuirasses n'exige pas toujours l'intervention d'un ruissellement très puissant, elle peut se produire sans transport appréciable, pratiquement sur place. C'est ce qui se passe sur la surface tabulaire des *bowé* qui ne favorise pas les déplacements de matériaux, mais où l'on observe beaucoup de ces grenailles et chaos latéritiques.

Les infiltrations d'eau traversent très souvent les cuirasses qui ne sont que rarement imperméables. Les dissolutions peuvent se poursuivre activement sous les cuirasses, c'est ainsi qu'il se forme des grottes qui contribuent à l'éboulement des bowé, ou au contraire, si les dissolutions sont plus régulières, que les bowé s'abaissent progressivement tout en paraissant rester tabulaires et intacts.

Le travail de E. de Chetelat est essentiellement géomorphologique, il ne comporte que peu d'analyses minéralogiques ou chimiques. Sur les phénomènes d'altération, il n'a guère

apporté que quelques bonnes observations sur la fragmentation, la corrosion et la dissolution des quartz. Par contre son étude géomorphologique de reliefs tabulaires et cuirassés est originale pour son époque. C'est avec beaucoup moins de détails que ses contemporains décrivent les reliefs figés par le cuirassement (LOMBARD 1932, 1937, par exemple), ou la destruction des cuirasses après reprise d'érosion (GREENE 1950).

Il faut remarquer que la plupart des études concernant les « catena », le modelé et d'une façon générale les sols latéritiques, concernent les régions de savanes à saisons alternées. Les régions équatoriales forestières très humides sont, alors, beaucoup moins connues.

autochtonie et allochtonie des sols

L'évolution du modelé s'accompagne de l'arrachement de certains matériaux qui ne sont pas tous éliminés du paysage, mais qui peuvent être simplement déplacés. MILNE (op. cité) en tient déjà compte dans la définition de la caténa. Une attention plus grande encore est donnée aux remaniements avec la distinction des sols « autochtones » formés *in-situ*, et des sols « allochtones » qui comportent des matériaux apportés.

Scaetta (1940) a donné de bonnes définitions de ces termes. Un sol autochtone, ou « endogène », est caractérisé par un « profil dont toute ou presque toute l'épaisseur est dérivée de sa zone de départ et dont la différenciation des horizons est le résultat de l'évolution du complexe endogène sans qu'il y ait apport de matériaux étrangers ». Toujours suivant Scaetta, parmi les profils allochtones ou remaniés doivent être distingués ceux qui correspondent à une alluvion, et ceux formés par une « éluvion », c'est-à-dire par un apport dû au ruissellement. Lorsqu'ils ne contiennent pas de produits grossiers comme ceux libérés par la destruction des cuirasses, les sols allochtones peuvent avoir un profil homogène. Lorsqu'il y a stratification au contraire, l'examen des profils doit permettre, pense Scaetta, de reconstituer la succession des phases alternées d'apports ou de décapages.

L'examen des minéraux résiduels provenant de la roche-mère, principalement le quartz, doit permettre suivant Glangeaud (1941) de différencier les sols autochtones des sols allochtones qui ont reçu des apports « exogènes ». Dans un profil normalement évolué sur place, l'éluviation, qui est un proccessus normal et continu, doit donner des horizons supérieurs très enrichis en quartz. Lorsqu'il ne semble pas se produire d'éluviation, que le quartz paraît constant ou même moins abondant en surface, on peut conclure à un apport de produits de décomposition, les sols sont allochtones ou semi-allochtones.

La caténa décrite par Baeyens (v. pages précédentes) montre aussi l'importance des colluvions et apports fluviatiles. Baeyens utilise le terme « autochtone » dans un sens assez élargi, puisqu'il l'applique à des sols dont la partie supérieure est formée de colluvions. Sans doute considère-t-il qu'il n'y a dans ce cas pas de transport lointain, puisqu'il souligne l'étroite dépendance des sols et des roches sous-jacentes.

Si les apports éoliens considérables imaginés par Scaetta ou Vine (op. cités) paraissent peu vraisemblables, il faut par contre accorder plus d'attention à l'observation faite par Agafonoff (1932) sur certains sols rouges du Brésil. Ces sols, formés sur des basaltes non quartzeux, contiennent pourtant des quantités notables de quartz que Agafonoff suppose apporté par les eaux « ou peut-être par le vent ». Des travaux modernes sur des sols formés eux aussi sur des roches sans quartz, aux îles Hawaï, ont conduit à admettre également une légère sédimentation éolienne.

Tandis que les pédologues des régions tropicales commencent à reconnaître les mouvements de masse qui ont contribué à l'édification des sols, KAY (1931), SHARPE (1938), découvrent et décrivent aux U.S.A. les « stone-layers », « stone-lines », « pebble-bands », dont on ne tardera pas à trouver des équivalents dans les sols latéritiques.

le développement des sols au cours du temps

De nombreux édifices volcaniques, en Indonésie, aux Antilles, aux Hawaï, sont constitués de coulées ou projections datées dont les plus anciennes remontent au début du Tertiaire et même à la fin du Crétacé. Ces formations qui ont commencé une évolution pédologique à une date bien définie, ont beaucoup contribué à situer dans le temps la formation des sols latéritiques. Ainsi Van Baren J. (1931) observe les transformations qui ont affecté des projections volcaniques déposées 50 ans auparavant. Les analyses montrent que les transformations chimiques sont encore peu perceptibles.

Монк (1938, 1944) puis Moнк & Van Baren (1954) distinguent 5 stades successifs dans l'évolution des sols. Ce sont :

- 1. Le stade initial le matériau « originel » inaltéré.
- 2. Le stade juvénile l'altération a débuté, mais la plupart du matériau originel est encore inaltéré.
- 3. Le stade « viril » la plus grande part des minéraux facilement altérables a été décomposée, le taux d'argile a augmenté et l'ameublissement est perceptible. La teneur en minéraux moins susceptibles de s'altérer est encore importante.
- Le stade sénile la décomposition arrive à un stade avancé, seuls les minéraux les plus résistants ont survécu.
- 5. Le stade final le développement du sol est complet, le sol est altéré suivant les conditions prédominantes.

Ceci suppose donc en fin d'évolution une sorte d'équilibre statique, le sol ne se transformant plus, tout au moins de façon perceptible. Il faut aussi noter l'imagerie anthropomorphique que beaucoup d'auteurs emploient pour désigner différents « stades » dans une évolution pédologique supposée continue.

A propos de sols des Antilles formés sur des roches volcaniques étagées du Miocène à la période actuelle, Hardy & Rodrigues (1941) ont acquis des conceptions analogues et schématisent la formation des sols en trois stades, « juvénile », « adolescent », « senile ». Dans le passage des sols les plus récents aux sols rouges les plus anciens, on peut observer la disparition progressive des minéraux altérables au bénéfice de l'argile qui, absente des lithosols, devient exclusive dans les sols les plus anciens. Le pH suit cette évolution en passant de 7 à 4.5.

Beaucoup d'auteurs reconnaissent plus simplement deux stades dans l'évolution des sols. les sols relativement peu altérés sont dits « jeunes » ou « *immature* », les sols les plus évolués sont les sols « mûrs », ou « anciens », ou « *mature* ». Ces distinctions sont faites en particulier par Robinson (1932, 1949), Milne (1935), Craig & Halais (1934), Baeyens (1938) Seelye & coll. (1938), Edelman (1946). Stephens (1947) parle de sols « *senescent* ». Tous ces auteurs ont aussi donné de bonnes indications sur les variations de couleur, texture, rapport silice/sesquioxydes, saturation, taux de pseudo-sables, entre sols jeunes et anciens. La notion de sols « mûrs » s'apparente à celle des sols « normaux » développés par Marbut (v. pages suivantes).

Tandis que les pédologues par leurs propres méthodes font une approche de chronologie relative, les géomorphologues reconnaissent dans beaucoup de régions tropicales l'existence de vastes surfaces d'aplanissement auxquelles il est possible d'assigner des âges tout au moins approximatifs. D'excellents travaux sont publiés sur le continent africain notamment par Du Toit (2° Ed. 1939), Wayland (1934), Veatch (1935), Willis (1936), Dixey (1938, 1943, 1946), Urvoy (1935, 1942), Dresch (1945, 1947), Cahen & Lepersonne (1948), King (1948, 1949). Préhistoire et stratigraphie permettent à Whitehouse (1940) pour l'Australie et Brooks (1931) pour l'Afrique, de retracer les variations climatiques du Quaternaire et du Tertiaire. Il apparaît que se sont succédées des périodes pluviales et interpluviales plus sèches.

Ainsi se confirme l'opinion déjà souvent exprimée que beaucoup de sols latéritiques non seulement sont très anciens puisqu'ils occupent des surfaces elles-mêmes très vieilles, mais qu'ils ont pu se constituer sous des actions climatiques différentes de celles de l'époque

actuelle. Geze (1942) conduit plus loin encore ses investigations et parvient à retracer la succession de plusieurs épisodes de latérisation au Cameroun. Les repères chronologiques sont donnés par les dépôts sédimentaires qui contiennent des éléments latéritiques (latérite pré-existante à la sédimentation) et par les latérites formées sur des roches volcaniques en particulier, d'âge connu (phase de latérisation postérieure à la formation des roches). Ainsi Geze distingue-t-il trois épisodes de latérisation. Le premier, d'âge Crétacé, est indiqué par l'abondance des débris latéritiques que l'on retrouve dans les sédiments formés du Crétacé inférieur au Turonien. Le deuxième épisode est Paléogène, il affecte les hauts-plateaux formés de laves et granito-gneiss. Le dernier épisode, beaucoup moins intense que les précédents, s'est situé à la fin du Tertiaire et au début du Quaternaire.

Les latérites observées dans la vallée du Niger donnent à ERHART (1943) l'occasion de tenter une reconstitution paléogéographique. Dans la partie moyenne de cette vallée abondent les produits latéritiques qui « représentent le résidu d'altération des roches silicatées alumineuses qui s'est accumulé dans le bassin d'alimentation du Paléo-Niger au cours d'une très longue période antérieure, sous une couverture épaisse et sous un climat tropical très humide. La période en question embrasse probablement au moins tout le Tertiaire, sinon le Crétacé, ou plus encore ». Ultérieurement, une modification du climat vers le froid ou vers l'aridité a entraîné la disparition de la forêt et le déclenchement d'une érosion active qui a répandu dans les plaines et cuvettes les matériaux latéritiques que l'on observe actuellement. Il y a eu « rupture d'équilibre climatique », et cela non seulement dans cette région du Niger mais sur l'ensemble du globe. L'alluvionnement des matériaux latéritiques, qui sont kaolinitiques ou bauxitiques, a été suivi de transformations par apport de silice colloïdale ou par cuirassement ferrugineux.

La conférence pédologique méditerranéenne, réunie en 1947, consacre la reconnaissance de sols ayant vécu plusieurs épisodes d'évolutions différentes. Geze qui a étudié les sols de « terra rossa » les définit comme « polygéniques », Aubert & Maignien dénomment « sols complexes » ceux observés au Sénégal.

LES PREMIÈRES CLASSIFICATIONS PÉDOLOGIQUES

Les classifications d'intérêt local sont nombreuses, et ne méritent pas d'être toutes retracées. Un exemple de classification régionale des sols peut être trouvé dans l'étude de Baeyens (op. cité) qui retient comme critères principaux la nature des roches-mères et l'autochtonie ou l'allochtonie des sols. C'est aussi sans prétendre établir un système général de classification que Edelman (op. cité) distingue à Java les sols jeunes, les sols de montagne, les sols latéritiques, les sols rouges sur calcaire. Les critères retenus dans ces classifications à vocation régionale sont la couleur, la nature de la roche-mère, la présence de cuirasse, la composition chimique, la jeunesse ou la maturité du sol, et parfois, (Besairie 1937) la nature du couvert végétal. Certains auteurs s'attachent à la recherche d'un critère de classification particulièrement significatif, comme le font Martin & Doyne (op. cité) pour le rapport silice/alumine.

La classification qui distingue « red earths », « red loams », « laterite soils » trouve par contre plus qu'un intérêt local, puisqu'elle réussit à être appliquée par des auteurs différents en des pays variés. Elle est déjà assez ancienne, puisqu'elle est admise ou discutée par Vageler (1930), Kuron (1939), Dietrich (1941), Raychaudhuri (1941), Greene (1945, 1947). Les « red loams » sont des sols argileux, plastiques, structurés, qui se forment dans les régions toujours humides. Les « red earths » correspondent à des sols formés sous des climats à longues saisons sèches, poreux, friables, contenant souvent des sesquioxydes concrétionnés.

Les « laterite soils » sont définis suivant les auteurs soit par un fort pourcentage d'alumine libre, soit par la présence de latérite concrétionnée. Il semble y avoir une certaine correspondance entre ces trois catégories de sols et celles de la classification américaine (Baldwin & coll., v. pages suivantes). Pour les « laterite soils » elle est évidente, pour les deux autres groupes elle est difficile à affirmer actuellement en se basant sur les définitions conservées dans les textes publiés.

Les pages précédentes ont montré que les pédologues français ont abordé l'étude des sols latéritiques en conservant les mêmes perspectives générales que leurs devanciers, et que LACROIX en particulier. Cette influence de LACROIX (op. cités) est manifeste dans la classification présentée par AUBERT (1941) qui conserve comme principal critère de distinction le taux des « éléments latéritiques », c'est-à-dire des hydrates de fer, alumine et titane. Cette classification établit trois grandes catégories :

- 1. Les « latérites proprement dites » contiennent plus de 50 % d'éléments latéritiques. Il convient d'y rattacher les latérites à cuirasse, connues sous les noms vernaculairés de « bowé » en Guinée et de « tampekotsa » à Madagascar.
- 2. Les « terres latéritiques », ou « sols d'argiles latéritiques », qui contiennent moins de 50 % d'éléments latéritiques, mais qui comportent souvent des concrétions. Ces terres latéritiques se subdivisent en :
 - « Terres grises », forestières, à l'horizon éluvial accentué.
 - « Terres rouges » dont l'horizon éluvial est très restreint.
 - « Terres noires » à nappe phréatique peu profonde.
 - « Terres jaunes » contenant moins de 10 % d'éléments latéritiques.
- 3. Les « sols alluviaux latéritiques ».

La classification établie par AUBERT a une portée générale. Elle intègre des considérations purement pédologiques, sur la matière organique, la couleur, l'éluviation. Mais elle conserve une position prédominante dans la hiérarchie des critères aux éléments latéritiques, expressions de ce que l'on appellera plus tard le « processus fondamental d'évolution ».

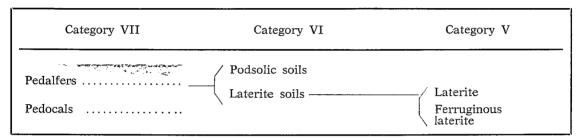
Pour la période considérée, les pédologues des U.S.A. sont les seuls à faire en matière de classification une œuvre vraiment nouvelle. MARBUT en 1928 établit les principes généraux qui guideront pendant longtemps le système de classification américain, en imposant en particulier la distinction du « solum » et du « geological material ». L'échelon le plus élevé de sa classification définit les « Pedocals » et « Pedalfers ». Ces derniers sont subdivisés en « Podsolic soils » caractérisés par le départ des sesquioxydes de la partie supérieure et leur accumulation à la base du solum, et « Lateritic soils » qui « are those in which sesquioxvdes accumulate on all the upper horizons of the soil profile through the removal from the profile of part or all the other constituents and in some cases through actual transfer of these constituents from a lower horizon to a higher. The essential characteristic of the soils of the lateritic group is the absence or low percentage of silica, alkalies and alkaline earths ». Le niveau suivant de classification partage les « Lateritic soils » en « Laterites » formées à partir de roches feldspathiques contenant peu de minéraux ayant du fer, et en « Ferruginous laterites » développées au contraire sur des roches riches en minéraux ferro-magnésiens. MARBUT pense qu'il faudra probablement ajouter à ces deux groupes une unité particulière pour les sols qui ont « an indurated slag-like layer of iron concentration » à faible profondeur. De tels sols se sont développés sur roches riches en fer avec une nappe phréatique agissant au niveau de la cuirasse.

En 1928, Marbut n'a trouvé pour inventorier et subdiviser les sols latéritiques que peu de renseignements d'ordre vraiment pédologique. Aussi ses unités de classification ont des définitions basées sur l'accumulation plus ou moins grande de sesquioxydes, qui sont encore très proches de celles données dans les classifications des latérites de la période antérieure. Les successeurs de Marbut arriveront par contre très vite à des caractérisations beaucoup plus pédologiques.

MARBUT rejette la méthode de l'école russe qui consiste selon lui à définir les sols en exprimant les causes présumées de leur formation, mais il transpose implicitement le principe de zonalité en donnant sa définition des sols « normaux » et « anormaux ». Les sols à

profil normal se trouvent en des sites où l'érosion n'est pas active et où le drainage est tel que la nappe phréatique permanente soit nettement située sous le solum. Ils ont atteint un stade de développement avancé, à la faveur d'une longue période de stabilité, dans des reliefs généralement faiblement ondulés. Ce sont les « so-called mature soils ». Les sols anormaux n'ont pas suivi le même développement parce qu'ils sont sous l'influence d'une nappe, ou que l'érosion leur interdit d'accéder à la maturité, ou pour toute autre raison qui les place dans des conditions particulières. Dans les pages précédentes, des exemples ont été donnés de ce que Marbut considère comme sols latéritiques normaux (« Nipe Clay ») ou « anormaux » (sol à nappe phréatique du bassin de l'Amazone).

TABLEAU X. — Schéma de classification, suivant MARBUT (1928)



A la classification de Marbut fait suite celle présentée en 1938 par Baldwin, Kellogg & Thorp, qui abandonne la notion de sols normaux ou anormaux au profit de la définition de sols zonaux (comprenant pédocals et pedalfers), intrazonaux et azonaux. La classification s'établit ainsi, en ce qui concerne les sols latéritiques :

1. Ordre: Pédalfers (sols zonaux). Sous-ordre: Sols latéritiques.

Grands groupes:

- Sols latéritiques brun-jaunâtre,
- Sols latéritiques brun-rougeâtre,
- Sols de latérite.
- 2. Ordre: Sols zonaux.

Sous-ordre : Sols hydromorphes. Grand groupe : latérite de nappe.

Chaque Grand groupe est défini avec le plus de précision possible, non par un processus unique comme ce sera le cas de certaines classifications, mais par la réunion des caractères morphologiques principaux, des conditions générales de l'environnement, de l'indication, du ou des processus d'évolution principaux. Voici comment Baldwin, Kellogg & Thorp définissent les grands groupes latéritiques :

— Sols latéritiques brun-jaunâtre:

Argile ou limon argileux brun friable, sur argile lourde mais friable brun-jaunâtre. Acide à neutre.

Végétation naturelle : forêt sempervirente ou décidue, savane tropicale.

Climat tropical humide-sec. Pluviosité élevée à modérée.

Drainage externe bon, drainage interne bon ou excessif.

Processus de développement du sol : latéritisation et un peu de podzolisation.

— Sols latéritiques brun-rougeâtre:

Sol argileux, friable, granuleux, brun-rougeâtre ou brun-rougeâtre foncé, sur argile profonde, rouge, friable, granuleuse. Substratum profond tacheté et réticulé.

Végétation naturelle : forêt tropicale humide, jusqu'à la limite de la savane.

Climat tropical, humide-sec. Pluviosité modérée.

Drainages externe et interne bons.

Processus de développement du sol : latéritisation avec ou sans podzolisation légère.

- Sols de latérites :

Sol de surface brun-rougeâtre. Horizon B rouge profond. Matériau « parental » rouge ou tacheté et réticulé. Très profondément altéré.

Climat tropical, humide-sec. Pluviosité élevée à modérée.

Drainage externe bon, drainage interne bon ou excessif.

Processus de développement du sol : latéritisation et un peu de podzolisation.

— Latérites de nappe:

Horizon de surface gris ou brun-grisâtre, sur A_2 lessivé gris-jaunâtre, avec « hard-pan » induré tacheté et réticulé à 30 cm ou plus. « Hardpan » ou horizons concrétionnés riches en fer et aluminium et parfois en manganèse d'une épaisseur de plusieurs « pieds ». Le matériel originel est latéritique. Concrétions dans tout le profil.

Végétation naturelle : forêt tropicale.

Climat chaud et humide. Saisons humides et sèches.

Facteurs de développement : drainage faible et âge considérable

Processus de développement du sol : podzolisation et latéritisation.

La définition du Sous-ordre des sols latéritiques reste basée sur le processus de latérisation, c'est-à-dire l'enlèvement de la silice et des bases et l'accumulation des sesquioxydes. La subdivision des sols latéritiques en Grands groupes n'a ensuite plus de rapport avec les anciennes classifications des latérites. Les horizons de surface humifères, les horizons B, les caractères structuraux, le drainage, sont devenus les critères à considérer.

LES ÉQUIPES DE RECHERCHE

Les pédologues du « Soil Survey Staff of the United States Department of Agriculture » ont fait une entrée en force, non seulement dans la science du sol en général, mais dans l'étude de certains sols tropicaux. Sur le plan des généralités, rappelons la première classification américaine établie par Marbut (1928), le premier « Soil Survey Manual » présenté par Kelloge en 1937. Puerto-Rico, les Hawaï, les Antilles, sont parmi les pays à sols latéritiques ceux qu'étudient le plus les pédologues U.S., notamment Bennett & Allison (1926, 1928), Bonnet (1939) Roberts (1936), Cline (1939). Ces îles volcaniques situées sous des latitudes élevées ne présentent pas la gamme complète des sols latéritiques que l'on connaît par ailleurs dans les pays tropicaux. L'expérience des pédologues américains reste donc limitée à certains sols, particulièrement bien étudiés, mais qui ne sont pas représentatifs de tous les sols latéritiques. Quelques publications montrent pourtant que certains scientifiques du Soil Survey Staff élargissent leur champ d'action, avec des études en Amérique centrale (Bennett 1926), Amérique du Sud (Marbut 1926), Chine (Thorp 1935), Thaïlande et Indes (Pendleton 1942, 1946, 1947), Afrique (Marbut 1923). Relevons également le traité général publié par Joffe (1949).

Après la floraison abondante de leurs études sur les latérites au cours de la période précédente, les scientifiques anglais semblent se détacher des Indes dans leurs recherches sur les sols. C'est en effet en Afrique que les pédologues anglais, ou de langue anglaise, réalisent le plus de travaux. Beaucoup ont été cités dans les pages précédentes, rappelons encore les noms de Greene, Milne, Martin, Doyne, du Sud-Africain Van der Merwe, qui ont tous travaillé sur le continent africain. Hardy & coll. (1931, 1939, 1941) ont étudié aussi les sols de Guyane et des Antilles. Rappelons enfin l'ouvrage de pédologie générale présenté par Robinson (1932, 1949).

Il est juste aussi de rappeler les pédologues néerlandais Mohr, Van Baren J., Van Baren F. A., Edelman, peu nombreux à avoir été cités dans les pages précédentes, mais dont les études sont tout à fait remarquables.

Quant aux pédologues français, leurs travaux ont été abondamment mentionnés, et parfois même analysés longuement dans les pages précédentes, il ne semble pas nécessaire de les rappeler à nouveau. Remarquons simplement que c'est essentiellement en Indochine, à Madagascar, en Afrique tropicale, que se déroulent leurs recherches. Contrairement aux équipes américaines, assez tard venues à l'étude des sols latéritiques, ou anglaises dont les activités se réduisent et changent de domaine géographique, les scientifiques français, depuis le début du siècle et jusqu'à la période actuelle, poursuivent une œuvre régulière et dans un domaine géographique assez stable.

Des organismes scientifiques à vocation tropicale se sont constitués pendant la période que nous considérons, dans lesquels se forment les équipes pédologiques qui prendront une part considérable à l'étude des sols ferrallitiques pendant la période qui va suivre. Ce sont l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (France), l'Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo (Belgique), la *Junta de Investigações do Ultra-Mar* (Portugal).

En effet, sans mésestimer les recherches d'autres écoles, on peut avancer que l'étude des sols ferrallitiques, qu'ils soient désignés par ce vocable « ferrallitique » ou par un autre, est dominé pendant la période moderne par les équipes animées par Aubert (O.R.S.T.O.M.), Sys (I.N.E.A.C.), Botelho Da Costa (*Junta Invest. Ultra-Mar*), et par l'équipe du *Soil Survey Staff* U.S. Les places prééminentes prises par les quatre organismes en question dans l'étude des sols « ferrallitiques », ou « ferralliticos », ou « kaolisols », ou « oxisols », se traduit par le fait que ce sont leurs terminologies et classifications qui sont les plus employées. Ceci bien sûr ne s'applique qu'au domaine des sols ferrallitiques, pour d'autres sols du monde il faudrait retenir d'autres écoles pédologiques.

FIN DE LA PÉRIODE "HISTORIQUE" ET DÉBUT DE LA PÉRIODE MODERNE

Les années 1948-1949 sont riches en événements scientifiques, réunions internationales et publications, qui sanctionnent un nouveau départ, sur des bases différentes, de l'étude des sols tropicaux.

1949, c'est tout d'abord la publication du livre de Robinson qui va imposer les termes « sols ferrallitiques » et « ferrallitisation », alors qu'auparavant n'était employé, et pratiquement universellement, que l'expression « sols latéritiques ». Des ouvrages généraux autres que celui de Robinson paraissent également en 1949 (Joffe) ou un peu plus tard (Mohr & Van Baren 1954). Ces trois ouvrages seront les derniers à accorder lorsqu'ils traitent des sols tropicaux une part encore prépondérante à des travaux de l'époque de Harrison et Harrassowitz.

Toujours en 1949, paraissent une nouvelle « approximation » de la classification U.S.D.A. présentée par Thorp & Smith, et l'étude de Kellogg & Davol sur les sols du Congo basée sur une nouvelle terminologie (latosols) et une nouvelle classification.

C'est l'année précédente, en 1948, que se sont réunies deux conférences internationales consacrées aux sols tropicaux : la Conférence sur les sols tropicaux et sub-tropicaux, à Rothamstead (G. B.) et la Conférence Africaine des sols, à Goma, au Kivu.

Pour porter un jugement sur la période 1927 à 1949, nous dirons qu'elle apparaît comme une époque de transition. La science des sols tropicaux (et avec elle peut-être toute la science des sols) semble y chercher sa voie, dans la définition de ce qu'est le « sol», dans la recherche de critères spécifiques et de terminologies nouvelles. Les concepts du passé sont jugés, certains d'entre eux abandonnés plus ou moins progressivement. Les nouvelles techniques se généralisent, principalement celles de l'étude minéralogique des argiles.

Vers 1927-1928 s'est produite une prise de conscience de la nécessité d'envisager les formations latéritiques non seulement comme des roches, mais aussi comme des sols. Vingt ans après, c'est véritablement une science des sols tropicaux qui s'épanouit. Les options prises pendant cette période de transition qui conduit de 1927 à 1949 auront des conséquences considérables sur l'avenir de la science des sols. La pédologie en effet ne parvient pas à s'unifier, plusieurs écoles s'affirment, avec leurs concepts directeurs, leurs classifications, leurs langages. Les pages précédentes ont surtout voulu montrer la pédologie tropicale française trouvant ses premières bases dans les anciennes analyses géologiques des latérites. Il ne faut pas perdre de vue que les grandes écoles pédologiques, russe ou soviétique, américaine, et celles qui s'en inspirent, se développent pendant cette période. Elles sont déjà apparues, ou ne tarderont pas à se manifester, sur la scène tropicale.

les concepts actuels sur les sols ferrallitiques

On ne parlera ici de sols ferrallitiques que dans l'acception donnée par des pédologues français. Ce sont des définitions sensiblement différentes qui ont été données sous le même vocable par les pédologues portugais (Botelho da Costa, 1959) et par le Service pédologique Interafricain (d'Hoore, 1964). Beaucoup de termes utilisés en science du sol voient leur signification évoluer au cours du temps, et souvent suivant des voies divergentes prises par des auteurs différents. On a vu ce qu'il en était du terme « latérite ». La situation est moins compliquée pour les sols ferrallitiques, encore faut-il savoir par qui, et à quelle date, un sol est défini ferrallitique pour savoir quels caractères lui attribuer.

Il peut sembler étonnant que, à l'heure actuelle, on éprouve la nécessité d'analyser les concepts qui définissent la ferrallitisation, ou les sols ferrallitiques. Des définitions nombreuses en ont été données, ex-cathedra, ou à l'occasion de travaux régionaux. A lire les publications et surtout à consulter les cartes de sols, il semblerait que les pédologues avancent avec certitude parmi des sols ayant une identité incontestable. Ce n'est malheureusement pas toujours le cas, et les sols sont souvent catalogués après un débat incertain dans lequel jouent les opinions personnelles de chaque pédologue.

Le concept central des sols ferrallitiques est bien établi, c'est à lui que se rapportent les définitions mentionnées plus loin. Mais énoncer un concept central est insuffisant, les sols à caractères marginaux sont peut-être plus fréquents que les orthotypes. Définir véritablement une catégorie de sols, c'est lui assigner des limites discernables. Pour situer la nature des questions à résoudre à propos des sols ferrallitiques, donnons-en l'exemple suivant. Les sols ferrallitiques sont formés, dit-on, par une altération puissante, ce qui suppose des percolations importantes d'eau. Mais on reconnaît des sols ferrallitiques peu désaturés, et une faible désaturation accompagne généralement des pédo-climats assez secs. Comment ces deux caractères peuvent-ils se concilier dans une même classe de sols ?

difficultés. Il n'est pas aisé d'exprimer sans ambiguité et en un texte relativement court ce difficultés. Il n'est pas aisé d'exprimer sans ambiguité et en un texte relativement court ce qui peut réunir dans un même groupement des corps complexes comme les sols. Il s'y ajoute bien entendu le fait que le progrès des connaissances peut entraîner des révisions dans la signification de chaque terme. Le cas des andosols en est un exemple. Ils ont été définis primitivement (Thorp & Smith, 1949) comme des sols à profils A-C très riches en matière organique. La tendance actuelle est de les définir par les allophanes qu'ils contiennent. Il en a été de même pour bien d'autres sols, en particulier pour les podzols.

Mettre à jour les tendances actuelles des conceptions sur les sols ferrallitiques oblige à tenir compte d'opinions échangées en dehors des publications régulières, ce qui ajoute à la difficulté présentée par le manque de recul par rapport au sujet étudié. Il semble pourtant nécessaire de tenter une mise au point plus circonstanciée que ce qui peut être donné dans une brève définition.

QUAND IL S'AGIT DE SOL FERRALLITIQUE, QU'EST-CE QUE LE SOL ?

Pour le sol en général, de multiples définitions ont été données. On peut dire du sol qu'il est un complexe dynamique formé à partir d'une roche-mère (qui peut être un matériau meuble) par l'action des facteurs du milieu (Duchaufour, 1965), ou qu'il est « le produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent » (Aubert & Boulaine, 1967), ou plus simplement « soil is the collection of natural bodies on the earth's surface, containing living matter, and supporting or capable of supporting plants » (U.S.D.A. 1960). On peut dire de ces expressions qu'elles sont équivalentes, en ce sens qu'elles situent sans ambiguïté un même objet, mais l'on peut remarquer combien différemment elles sont formulées.

Il est un point pourtant qui doit être précisé, c'est celui de la profondeur à laquelle s'arrête le sol, car plusieurs interprétations sont possibles. Lors du premier congrès international de la science du sol, Marbut (1928) prend une position que sera adoptée par tous les pédologues U.S. « The soil consists of the outer layer of the earth's crust usually unconsolidated, ranging in thickness from a mere film to a maximum of somewhat more than ten feet... The material beneath this regardless of how it was accumulated, whether by the process of rock decay, or by several processes of natural transportation and redeposition is not soil, but is geological material ». Ceci a été confirmé par le « Soil Survey Manual » de 1937, puis par la 7th Approximation de 1960 où il est précisé « soil grades at his lower margin to hard rock or to earthy material essentially devoid of roots ».

Cette conception du sol trouve une autre expression dans la notion de « solum » et de « pedon », qui sont définis en des termes variés mais imposant toujours une limitation vers la profondeur. Le solum comprend les horizons de maximum d'activité biologique et d'éluviation, et les horizons d'illuviation, mais non le matériau originel d'altération (Soil Survey Manual, 1951). Lorsque le profil ne permet pas de relever des caractères de différenciation suffisants, on retient comme limite inférieure soit la profondeur de l'enracinement habituel des plantes pérennes du lieu (7th Approximation 1960, Johnson, 1962) ou même une limite arbitraire « in some soils their lower limit can be set only arbitrarily, say at 6 feet or 2 meters, or at the lower limit of plant roots » (Soil Survey Manual, 1951).

Ceci conduit à distinguer les « soil-forming processes » qui agissent dans le solum et les « geological processes ». Ces derniers consistent principalement dans les processus d'altération. Dans le solum, l'altération peut être active, elle fait alors partie des processus pédologiques ; dans le cas de profils anciens et profonds, l'altération n'a plus de prise sur le solum, les processus pédologiques sont essentiellement ceux conditionnés par la matière végétale et les organismes vivants, et par le déplacement (lessivage et accumulation) de certaines particules.

Les pédologues belges, (Sys 1959, 1961) ont appliqué dans l'étude des sols tropicaux, cette position de l'école américaine. Ils distinguent donc la « regogénèse », ensemble des

phénomènes d'altération souvent anciens qui ont fourni le matériau parental du sol proprement dit, différencié à la partie supérieure du régolithe par la « pédogénèse sensu-stricto ». Sys (1959) a souligné lui-même la parenté des écoles belges et américaines : « Le Soil Survey Manual... nous a servi de guide et d'exemple pour la rédaction de ce texte qui, dans une certaine mesure, peut être considéré comme une adptation de ce manuel aux conditions du Congo. La classification a été inspirée par les approximations successives de l'U.S.D.A. ». Il a été montré par ailleurs (Chatelin, 1967) comment cette conception limitative des profils s'articulait avec la compréhension et l'interprétation des formations superficielles et de l'évolution générale des paysages ferrallitiques.

Il n'est pas inutile de rappeler que l'école de la science du sol aux U.S.A. a été largement motivée par des considérations agronomiques et par la perspective de la conservation des terres dans les régions soumises à des érosions dévastatrices. Cela explique que le profil pédologique ait trouvé sans contestation sa définition dans ses rapports avec le développement des plantes.

Il en est tout autrement pour les pédologues français des régions tropicales qui, rappelons-le encore, sont les successeurs directs des scientifiques européens ayant découvert et analysé les latérites, et qui sont particulièrement influencés par l'enseignement de Lacroix. Aussi, lorsque Erhart, Castagnol, Tkatchenko, Aubert, Agafonoff (op. cités) décrivent des sols latéritiques, ils envisagent comme leurs devanciers des profils complets dont la différenciation est étudiée depuis la roche saine, à travers les matériaux d'altération à structure conservée, les horizons tachetés, les cuirasses ou carapaces, jusqu'à la surface.

En 1954, Aubert entérine cette position de l'école française de pédologie tropicale en définissant les « Sols latéritiques ou ferrallitiques ». Le profil choisi pour les représenter a été observé en Côte d'Ivoire sous forêt ombrophile. Développé sur plus de 10 mètres de profondeur, il comporte un horizon humifère, un horizon meuble mais fortement gravillonnaire, une carapace, un horizon tacheté et des horizons d'altération très épais. Il s'agit donc d'un profil réunissant un grand nombre des caractères morphologiques que l'on peut rencontrer dans les sols ferrallitiques. Aussi a-t-il pu représenter pendant longtemps pour beaucoup de pédologues le sol ferrallitique le plus typique.

Cette conception du profil pédologique a été réaffirmée par la suite. Au Symposium sur la classification des sols de Gand (1962, publ. 1965), Aubert rappelle que le sol doit être défini par « les caractères morphologiques, physiques ou chimiques de son profil total, depuis la roche dont les produits d'altération ont contribué à sa formation, jusqu'à sa surface ». Cette conception du profil est manifestement celle de Segalen (1966) lorsqu'il définit les horizons du sol ferrallitique. A propos de l'horizon C, il indique que « dès le niveau de la roche-mère commencent les processus d'altération... Cet horizon est caractérisé par le fait que les différents minéraux ont gardé leur forme, parfois leur couleur, et leur mode d'assemblage général ». Les cuirasses formées dans ces profils sont des horizons d'accumulation qui sont à considérer comme horizons pédologiques de diagnostic, ce qui n'est pas le cas dans la classification belge. Les principes donnés par Aubert se trouvent appliqués dans les études françaises sur les sols ferrallitiques. Citons par exemple les études des sols de Guyane (Levèque, 1967), du Gabon (Chatelin, 1966), du Cameroun (Martin, 1966) dans lesquelles les sols sont observés, dans la mesure du possible, jusqu'à la roche saine.

Il existe une difficulté pratique dans l'observation des sols ferrallitiques, due à leur très grande profondeur. C'est probablement pourquoi Maignien (1969), pense qu'il faut « poser le problème de la partie qui peut être considérée comme un sol ». Il propose de revenir à une conception limitative du sol : « Même si l'on étudie les sols ferrallitiques les plus différenciés, sols ferrallitiques lessivés en particulier, l'épaisseur des profils excède rarement 120-150 cm ». Si cette interprétation paraît être isolée parmi les positions prises par les pédologues, elle est par contre partagée par certains géomorphologues français. Tricart & Cailleux (1965) prétendent aussi que le sol doit être limité aux horizons supérieurs dans lesquels se situe le maximum de l'activité biologique. Les « altérites » épaisses qui dans les paysages ferrallitiques séparent le sol, domaine du pédologue, de la roche, domaine du géologue, sont des formations dont l'étude relève donc de la géomorphologie.

Il s'affirme de plus en plus que les travaux pédologiques sur les sols ferrallitiques, en plus de l'établissement de la typologie et de la classification de sols, tendent vers deux objectifs principaux. Le premier est d'établir des bilans géochimiques. Ces bilans ne peuvent être

atteints simplement par l'étude des altérations de roches. Ils doivent tenir compte des enlèvements préférentiels et des redistributions dans toute l'épaisseur des sols. Ainsi pour établir le bilan du fer dans un paysage ferrallitique, il est insuffisant d'examiner l'altération des minéraux ferro-magnésiens des roches, il faut aussi suivre les différenciations des horizons tachetés, concrétionnés, cuirassés, etc. Le deuxième objectif concerne la dynamique actuelle des reliefs, mais aussi la reconnaissance des paléopédogénèses, la datation des unités surfaces-sols, la reconstitution des mouvements de masse. Tout ceci ne peut s'accomplir que par l'étude de profils complets. La conception du profil admise jusqu'à présent semble donc non seulement acceptée par presque tous les pédologues français, mais semble aussi trouver une justification dans l'orientation prise actuellement par la pédologie tropicale en général.

Il n'empêche que l'étude pédologique ne peut pas toujours être conduite par l'examen de profils atteignant la roche-mère. Aux difficultés pratiques s'ajouterait le fait que cette méthode n'aurait qu'un intérêt limité dans des études à caractère agronomique. On verra dans un chapitre ultérieur comment il est tenté de résoudre ce dilemne par la reconnaissance, dans le sol compris au sens large, de deux entités distinctes.

LES DÉFINITIONS DES SOLS FERRALLITIQUES

Il a déjà été dit que la paternité du terme « ferrallitique » revient à Robinson (1949). Voici en quels termes Robinson s'est exprimé. « The clearest distinction is between clays with high silica-sesquioxide ratios and clays with moderate or low silica-sesquioxide ratios. H. Harrassowitz suggests the term siallite for soils with clay fractions having medium or high silica-alumina ratios, and allite for soils with clay fraction of markedly aluminous character. This suggestion has gained a certain amount of acceptance and we may conveniently speak of siallitic clay for the former type, and allitic, or, preferably, ferrallitic for the latter type. Any attempt to indicate a critical limit is necessarily provisionnal, but there is some justification for considering a molecular silica-sesquioxyde ratio of 2.0 as significant ». Robinson ajoute un peu plus loin: « it would appear desirable to restrict the terms siallitic, allitic, and ferrallitic to the description of soils as materials rather than as profiles ».

Ces quelques phrases de Robinson sont noyées dans un ouvrage volumineux, et il semble que leur auteur n'y ait pas attaché une importance considérable. Néanmoins, le terme ferrallitique a été adopté quelques années plus tard, par Botelho da Costa et Aubert.

La première définition des sols « latéritiques ou ferrallitiques » a été donnée par AUBERT en 1954. L'accent est mis sur le processus d'altération des roches et l'évolution de la matière minérale.

« Le processus de latéritisation — ou de ferrallitisation — qui définit les Sols Latéritiques est constitué par un ensemble de phénomènes qui aboutissent à une altération extrêmement poussée de la roche-mère du sol, et à une individualisation des éléments tels que silice et oxydes ou hydroxydes et hydrates métalliques, en particulier de fer, d'aluminium, de manganèse et de titane; ces derniers se maintiennent ou s'accumulent dans un horizon de surface ou de faible profondeur, la silice étant, au moins en partie, entraînée à la base hors du profil.

Ce processus de latéritisation peut être suivi, ou il peut s'accompagner, d'autre processus pédogénétiques tels qu'entraînement des hydroxydes de la surface vers un horizon de demi-profondeur; durcissement, en concrétions ou en carapace ou cuirasse, des hydroxydes métalliques précédemment individualisés et, parfois, accumulés; ségrégation des éléments d'un horizon par hydromorphie, etc. Ces divers phénomènes peuvent être considérés comme

résultant directement de la latérisation elle-même qui provoque d'une part l'individualisation des éléments susceptibles d'être entraînés ou de durcir, et d'autre part une différenciation d'horizons dont ceux de profondeur, plus compacts, donneront plus facilement lieu à des actions d'hydromorphie ».

AUBERT complète cette définition en ajoutant que ces sols sont aussi caractérisés par la décomposition rapide de la matière organique qui ne s'y trouve en général qu'en faible quantité. Il est considéré que le rapport silice/alumine ne dépasse pas 2.

La classification générale présentée par Aubert & Duchaufour en 1956 place les sols ferrallitiques dans une Classe. Les sols ferrallitiques sont à profil A-B-C ou B-C, à horizon B ferrallitique à individualisation de fer et d'alumine. Ils sont subdivisés suivant les valeurs du rapport silice/alumine qui est au plus égal à 2. La matière organique peut dépasser le taux de 5 % dans l'horizon À de certains sols qui sont alors dits « humifères ». Cette définition est très succincte.

En 1962, Aubert définit une Classe de « sols à sesquioxydes fortement individualisés et à humus de décomposition rapide. L'humus de ces sols a été souvent appelé « mull » et dans certains cas « crypto-mull ». Il paraît plus exact de ne pas donner de nom à cet humus et d'indiquer seulement qu'il est bien évolué et provient d'une décomposition rapide de la matière organique ». Cette Classe comprend les sols méditerranéens, ferrugineux tropicaux et ferrallitiques, qui se différencient par l'intensité de l'altération d'une part, et par la nature des liaisons des sesquioxydes libres avec les autres éléments du sol. Cette étape marquée par la définition de 1962 traduit deux préoccupations : celle de caractériser la matière organique, ce qui s'avère difficile, et celle d'indiquer ce qui dans les sols ferrallitiques fait la spécificité des hydroxydes de fer par rapport aux autres sols qui sont nombreux à en contenir.

Une caractérisation plus précise des sols ferrallitiques est donnée par Aubert en 1965. « Sols le plus souvent très profonds, caractérisés par une évolution très rapide de la matière organique, une décomposition très poussée des minéraux, même du quartz, et une forte teneur en sesquioxydes de fer accompagnés de sesquioxydes d'aluminum. En dehors de ces composés, les minéraux argileux ne comportent que de la kaolinite. La valeur de SiO₂/Al₂O₃ y est inférieure ou au plus égale à 2. Le complexe absorbant est très désaturé, la capacité d'échange basse, la teneur en limon très faible. La structure en éléments nettement individualisés, en général assez fins, de forme polyédrique ou nuciforme, parfois grenue (farineuse), confère aux horizons (B) ou B une grande friabilité, lorsqu'ils ne sont pas indurés en carapace ou cuirasse ». Une certaine dérogation par rapport à cette définition générale est reconnue aux sols ferrisoliques qui peuvent contenir de l'illite ou d'autres silicates altérables, et avoir une structure accusée. Autre dérogation semble-t-il, certains sols ferrallitiques sont très riches en humus, ce qui semble s'opposer à une évolution rapide de la matière organique. Il se produit donc un certain élargissement, par rapport au concept central, des sols qui sont considérés comme ferrallitiques. A l'inverse, les Andosols ne sont plus inclus comme auparavant dans les sols ferrallitiques, bien qu'ils aient des rapports silice/alumine souvent très bas.

La dernière en date des définitions des sols ferrallitiques est de 1966. Formulée par AUBERT & SEGALEN, elle est plus explicite mais reste en fait proche de la précédente. C'est dans la subdivision des sols ferrallitiques que sont intervenues d'importantes modifications. La définition générale est la suivante : « Sols à profil A-(B)-C ou A-B-C, le plus souvent très épais présentant généralement une décomposition poussée de la matière organique, alors très liée à la matière minérale, et une très forte altération des minéraux résultant d'une libération importante de sesquioxydes de Fe, Mn et même, assez souvent, Al ; élimination poussée de la silice, d'où un rapport silice/alumine < 2 ; minéraux argileux constitués, en plus de sesquioxydes de Fe, Al, etc..., de kaolinite et parfois, de traces d'illite ; présence possible de minéraux hérités résiduels ; matériau originel (horizon C) constitué de minéraux très altérés s'écrasant facilement ; capacité d'échange faible ; degré de saturation le plus souvent faible ou moyen, rarement élevé en B ou (B) ; structure variable de B, parfois peu nette, mais friabilité élevée de cet horizon. »

Cette définition élargit plus que la précédente la gamme des sols considérés comme ferrallitiques. Elle décrit en réalité un orthotype et reconnaît que certains sols s'en écartent par les variations de caractère comme l'épaisseur des profils, la décomposition de la matière organique, la présence ou l'absence d'alumine libre et de minéraux altérables, le degré de saturation, la structure.

Caractériser en quelques lignes une catégorie de sols aussi importante par son extension géographique que les sols ferrallitiques, c'est évidemment risquer de donner une définition trop restrictive par rapport aux sols qu'elle doit représenter, ou au contraire pas assez spécifique de ces sols. Pour appréhender vraiment l'ensemble des sols ferrallitiques, il faudra donc tenir compte des sols qui sont habituellement considérés comme tels sans correspondre parfaitement peut-être à la définition générale. Il faudra aussi considérer que si un sol doit être écarté de la catégorie des sols ferrallitiques, il doit trouver une autre place dans la classification. En réalité, il n'est pas possible de concevoir une catégorie de sols en toute abstraction de la classification générale. Si la notion de sol ferrallitique s'est progressivement élargie, cela provient peut-être de ce que les unités voisines de la classification et en particulier celle des sols ferrugineux tropicaux, ont au contraire restreint leurs définitions.

Il n'entre pas dans les propos des pages suivantes d'apporter des modifications à ces définitions et classifications, mais d'essayer de mettre en évidence ce qui fait l'unité réelle du groupement des sols ferrallitiques. Ce peut être un ou plusieurs caractères spécifiques, ou la réunion de caractères ubiquistes qui deviennent spécifiques en raison de leur agencement, ou l'appartenance de ces sols à un contexte génétique commun.

LE CONCEPT CENTRAL ET SES LIMITES

D'une définition à l'autre, se trouve affirmée l'intensité de l'altération. C'est ce que l'on trouve dans les définitions des latérites données par Bauer, Harrison, Fermor, Lacroix (op. cités), dans celles formulées pour les sols latéritiques par Erhart (1935) et Aubert (1941), puis dans celles énoncées récemment pour les sols ferrallitiques par Aubert, Duchaufour, Segalen (op. cités).

Le processus de latérisation ou de ferrallitisation est généralement présenté comme l'ensemble des mécanismes de l'altération au sens large, englobant la destruction des minéraux primaires, le partage des éléments entraînés ou maintenus, la nature des produits néoformés. Cette altération ferrallitique procède à l'enlèvement de la totalité ou d'une grande partie de la silice et des bases des silicates primaires, elle s'accompagne du maintien des sesquioxydes métalliques qui donnent aux sols des colorations vives. Le seul silicate qui puisse se former est la kaolinite. Gibbsite et kaolinite peuvent être exclusives, ou se présenter en un mélange de toutes les proportions possibles. La dernière définition des sols ferrallitiques (1966) maintient que le rapport silice/alumine est inférieur ou au plus égal à 2. Par contre la valeur exacte de ce rapport a perdu la signification qui lui était accordée auparavant. Du fait que la gibbsite peut être silicifiée et se transforme donc en kaolinite, ces deux minéraux sont considérés par Aubert & Segalen comme de signification génétique égalle. La prédominance de l'un ou l'autre ne peut plus prétendre représenter l'intensité de la ferrallitisation.

Ce concept central de la ferrallitisation a fait preuve de pérennité en se maintenant jusqu'à nos jours, ce qui peut être considéré comme un gage de validité. Cependant le type d'altération qu'il suppose n'est pas toujours, et exclusivement, spécifique des sols ferrallitiques.

Il a déjà été dit, dans les pages consacrées à l'historique, que l'on a très vite trouvé dans les pays méditéranéens et tempérés, des formations comparables aux latérites. Ces premières découvertes concernaient généralement des formations anciennes que l'on a dû par la suite rattacher à des paléoclimats de type tropical. Mais l'on a aussi progressivement découvert dans ces mêmes pays que l'altération des roches dans certaines conditions libère actuelle-

ment, non seulement de la kaolinite, mais assez fréquemment de l'alumine libre. C'est ce qu'ont montré les premiers Lacroix, Liebrich, Thugutt (op. cités), puis Edwards (1914), Goldschmidt (1928) Baver & Scarseth (1930), Alexander & coll. (1942). A l'heure actuelle, de nombreuses publications confirment ces premières données. En France, Dejou & coll. (1967, 1968) montrent qu'il existe des arènes granitiques dans lesquelles les argiles en formation contiennent des gels alumino-siliciques à bas rapport silice/alumine, ou de la gibbsite jusqu'à 40 ou 50 %. Tardy (1969) en donne aussi confirmation. L'individualisation d'alumine n'est donc pas spécifique des sols ferrallitiques, l'individualisation du fer encore moins.

Il est admis que les sols ferrallitiques peuvent s'écarter du concept central en possédant quelques minéraux altérables ou des argiles micacées héritées. En ce qui concerne ces argiles illitiques, il est reconnu qu'elles se maintiennent à l'état de traces, ou tout au moins de très faibles quantités, dans des sols qui ont par ailleurs tous les caractères d'une altération intense. C'est pourquoi Aubert & Segalen admettent que les sols ferrallitiques puissent contenir un peu d'illite. Mais il est apparu (Chatelin 1964, 1966) qu'il existe en régions équatoriales humides et dans des positions topographiques de drainage normal, des sols dans lesquels les argiles micacées, illite et micas hydratés, sont très largement dominantes et portent le rapport silice/alumine à des valeurs supérieures à 2, atteignant parfois 3. Ces sols sont relativement bien développés, leurs horizons B atteignent parfois plusieurs mètres. Ils ont aussi d'autres caractères classiques des sols ferrallitiques de forêts humides, en particulier ceux qui concernent la matière organique et la désaturation avancée du complexe d'échange. Il se manifeste dans ces sols une altération de type ferrallitique : gibbsite et kaolinite s'y forment, mais en quantités qui sont encore très faibles par rapport aux argiles micacées héritées des roches mères. Evolutivement, ces sols peuvent être dits en voie de ferrallitisation, mais leur composition minéralogique actuelle est très éloignée de celle des orthotypes ferrallitiques. Ils ont été classés parmi les sols ferrallitiques, en raison de leur tendance évolutive, de leur matière organique et de leur désaturation, et, il faut le souligner, parce que aucune autre place ne pouvait leur être donnée dans la classification. Ces sols ne sont pas exceptionnels, ils s'observent sur schistes, pélites, marnes micacées, dans des reliefs relativement récents. Ce sont des sols qui ont un bon développement morphologique. Parmi ceux que l'on qualifie de « pénévolués », il en existe également beaucoup qui ajoutent à un développement morphologique plus réduit que pour les précédents, des silicates hérités qui leur donnent un rapport silice/alumine élevé. En réalité donc, il a fallu admettre parmi les sols ferrallitiques des sols à composition minéralogique assez différente de celle prévue dans le concept central.

A l'inverse de ces sols dans lesquels la dynamique actuelle est véritablement ferrallitique mais a eu encore peu de prise sur un matériau resté siallitique, il existe des sols à matériaux typiquement ferrallitiques mais dont l'évolution actuelle n'a plus rien de ferrallitique. Il s'agit de sols placés sous des latitudes assez élevées, formés lors de périodes pluviales du Quaternaire ancien ou du Tertiaire. Ils ont conservé les principaux caractères, minéralogiques et morphologiques, des sols ferrallitiques, mais leur complexe d'échange peu désaturé, leur matière organique, sont en équilibre avec les conditions écologiques actuelles. L'altération, lorsqu'elle trouve encore des minéraux altérables pour s'exercer, n'est plus de type ferrallitique. Certains auteurs (Maignien 1968) tentent alors de les assimiler à des sols ferrugineux tropicaux se développant sur d'anciens sols ferrallitiques.

Il existe des sols développés sur des matériaux détritiques très fortement quartzeux, dont le peu de silicates (kaolinite) et sesquioxydes qu'ils contiennent est issu d'une pédogénèse antérieure à leur dépôt. Il n'y a pas actuellement d'évolution de type ferrallitique de la matière minérale. Ces sols sont pourtant considérés comme ferrallitiques (de Boissezon 1965), et parfois placés dans un groupe particulier de sols psammo-ferrallitiques (Chatelin 1966).

Ainsi sont considérés comme ferrallitiques des sols qui n'ont pas la composition chimique de ferrallites, mais dans lesquels l'évolution se fait vers la ferrallitisation. D'autres sols qui ont la composition requise sont écartés du groupe des sols ferrallitiques parce que les variations climatiques induisent un nouveau type d'altération. La limite à partir de laquelle ces paléo-ferrallites sont rejetées du groupe des sols ferrallitiques est difficile à préciser, probablement est-ce avec l'apparition d'un climat semi-aride. D'autre part, certains sols

psammitiques qui pourraient aussi être considérés comme des paléo-ferrallites, sont classés dans les régions humides comme sols ferrallitiques.

La recherche d'explications génétiques a conduit souvent à mettre en regard la tendance évolutive, ou si l'on préfère le « processus » d'évolution, et la composition statique actuelle du matériau. Il semble, d'après les cas précédents, que l'on classe certains sols comme ferrallitiques parfois en raison du processus évolutif, parfois en raison de leur composition.

LES CARACTÈRES NON SPÉCIFIQUES OU SECONDAIRES

Il peut paraître abusif d'avoir réduit le concept central des sols ferrallitiques aux processus d'altération, ou à l'existence des minéraux formés généralement par ces processus. En effet dans toutes les définitions des sols ferrallitiques qui ont été citées précédemment, matière organique et morphologie générale des profils sont mentionnées en général avant l'altération. Il semble malheureusement que cela corresponde plus à une déclaration d'intention qu'à l'indication de critères précis.

En ce qui concerne la matière organique, elle est définie suivant des termes qui sont reconnus peu satisfaisants. S'il ne s'agissait que d'une difficulté de formulation, cela serait de peu d'importance. Mais il ne semble guère y avoir d'unité réelle entre les matières organiques de tous les sols ferrallitiques. Les sols des forêts sempervirentes reçoivent annuellement 10 ou 15 tonnes de matière végétale par hectare, l'évolution de cette matière végétale est rapide. Il existe réellement sous ces forêts humides un type de matière organique vraiment spécifique, mais quelle peut être sa parenté avec la matière organique des sols ferrallitiques moyennement et faiblement désaturés? Avec les savanes qui couvrent ces derniers sols, la matière organique provient surtout de la décomposition des racines du couvert graminéen, la rapidité de l'évolution de la matière végétale et organique du sol est sans commune mesure avec celle caractérisant les sols forestiers. Il existe pour la matière organique des sols ferrallitiques faiblement désaturés, plus d'analogie avec celle des sols ferrugineux tropicaux ou fersiallitiques qu'avec celle des sols ferrallitiques des forêts équatoriales. Des sols ferrallitiques de régions où l'érosion est active et la végétation ravagée par les feux de brousse, on a souvent dit qu'ils ont « la couleur et fertilité de la brique », expression imagée qui fait comprendre combien les horizons humifères y sont réduits. A l'opposé de ceux-ci, on reconnaît des sols ferrallitiques humifères, dans lesquels la matière organique s'accumule. Leur contenu humifère s'apparente parfois plus à celui des andosols qu'à celui des sols ferrallitiques peu désaturés couverts d'une maigre savane. Il ne semble donc pas que l'on puisse pratiquement trouver dans leur matière organique des caractères qui constituent la spécificité des sols ferrallitiques.

La morphologie générale des profils est aussi censée contribuer à définir les sols dès le plus haut niveau de classification. Il a donc été dit que les sols ferrallitiques ont un profil A-B-C ou A-(B)-C. C'est le cas de beaucoup de sols du monde. Sans pousser très loin l'analyse morphologique des sols ferrallitiques, il apparaît que ce schéma général recouvre une variété considérable de types de profils. Le paragraphe précédent permet déjà d'entrevoir une gamme étendue d'horizons humifères A. On sait également que les horizons B peuvent être meubles ou transformés en cuirasses. Quant aux horizons d'altération notés C, ils sont presque inexistants sur les roches dont la transformation est très brutale. Les caractères morphologiques rapprocheront un sol ferrallitique pénévolué d'un sol brun eutrophe, un sol ferrallitique hydromorphe d'un sol ferrugineux tropical, un sol ferrallitique humifère d'un andosol. Probablement sera-t-il plus difficile de montrer la parenté morphologique de ces sols ferrallitiques entre eux et avec les sols ferrallitiques typiques. S'il existe malgré

tout des caractères morphologiques qui confèrent une unité certaine au groupement des sols ferrallitiques, il reste à les mettre en évidence.

Le complexe d'échange, par sa capacité d'échange de bases et son taux de saturation, donne une bonne caractérisation pour beaucoup de sols ferrallitiques. Mais là encore, de trop nombreux sols s'écartent des valeurs les plus typiques pour que le complexe d'échange apporte à la définition des sols ferrallitiques des critères indiscutables.

AUBERT & SEGALEN (1966) ont indiqué quels sont les plus fréquents des processus non spécifiques qui peuvent participer à la formation des sols ferrallitiques. Ce sont l'accumulation de matière organique, l'hydromorphie, l'appauvrissement et le lessivage des argiles et hydroxydes, les remaniements mécaniques. Il n'en sera pas question davantage, puisqu'ils ne peuvent contribuer à identifier les sols à étudier ici.

VERS UNE CONCEPTION ZONALE DES SOLS FERRALLITIQUES

Il a été reconnu sous les tropiques humides une catégorie de sols, moins répandus que les sols ferrallitiques, mais qui sur le plan de l'interprétation pédo-génétique et sur celui de la classification a une importance comparable. Il s'agit des sols ferrugineux tropicaux, identifiés morphologiquement par AUBERT & MAIGNIEN (1947) puis intégrés sous ce nom dans la classification générale des sols tropicaux (AUBERT, 1954).

Primitivement, les pédologues français ont considéré que sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux représentaient deux types d'évolution que ne séparait aucune barrière climatique, et qui pouvaient donc voisiner sous forêts humides comme dans les régions à saison sèche. Les sols tropicaux se partageaient en ferrallitiques pour des rapports silice/alumine inférieurs à 2, et ferrugineux pour des rapports plus élevés. C'est ainsi qu'ont été classés les sols de Madagascar (Ségalen, 1957). Au Gabon, région typiquement équatoriale, Vigneron (1959) appliquait les mêmes principes.

Une autre tendance (documents inédits, CRACCUS, Brazzaville, 1958) consistait à considérer comme ferrugineux tropicaux les sols sur matériaux essentiellement quartzeux (psammo-ferrallitiques) situés dans les régions équatoriales, dans lesquels aucune évolution de la matière minérale ne paraissait pouvoir être qualifiée de ferrallitique.

Ces deux conceptions étaient difficilement compatibles et il aurait probablement fallu que l'une s'élimine au profit de l'autre. Mais elles avaient en commun la conséquence de rompre la dominance exclusive des sols ferrallitiques dans les régions les plus humides.

Par la suite, Maignien (1961, 1964) a donné une définition plus limitative des sols ferrugineux tropicaux, basée sur des caractérisations morphologiques et analytiques précises. Les sols des régions les plus humides, qu'ils soient à rapport silice/alumine un peu supérieur à 2 ou formés sur matériaux quartzeux, ont ainsi été écartés de la catégorie des sols ferrugineux tropicaux. La définition des sols ferrallitiques a dû s'élargir d'autant, pour inclure en particulier tous les sols pénévolués, ou sols jeunes, à minéraux altérables ou argiles micacés, qui ont été progressivement découverts et dont on peut assurer qu'ils ne correspondent pas aux conceptions primitives des sols latéritiques ou ferrallitiques.

Plus récemment, ont été reconnus des sols rouges, à argiles montmorillonitiques, à saturation élevée, formés dans des climats à longue saison sèche (Martin & coll. 1966). Ils ont été dénommés sols fersiallitiques rouges (Ségalen, 1967). Tels qu'ils sont définis actuellement, ils ne peuvent inclure aucun des sols rouges, toujours fortement désaturés, des régions équatoriales. Les sols rouges fersiallitiques n'interrompent donc pas la couverture ferrallitique des régions les plus humides, ils n'apparaissent qu'à la limite de cette couverture, en inclusions parmi des sols ferrallitiques moyennement ou faiblement désaturés.

Les sols ferrallitiques, ferrugineux, fersiallitiques, sont dans la classification française les seuls sols tropicaux qui soient formés en conditions de drainage normal ou tout au moins assez peu influencés par l'hydromorphie, c'est-à-dire qui soient si l'on préfère ces expressions, « automorphes » ou « semi-automorphes », ou encore « ectodynamomorphes » ou « méso-ectodynamomorphes ». En fonction des définitions actuelles de ces trois catégories de sols, on ne trouve dans les régions les plus humides que des sols ferrallitiques. En limite de leur répartition, à l'approche des régimes climatiques à longue saison sèche, il se produit une certaine imbrication avec les deux autres catégories de sols. Malgré cette limite un peu indécise, les sols ferrallitiques ont une répartition franchement zonale.

On peut bien entendu définir des sols sur leurs caractères intrinsèques et constater en établissant leur cartographie qu'ils ont une répartition zonale. Dans le cas des sols ferrallitiques, il semble par contre que ce soit une conception zonale des sols qui se soit progressivement développée. Elle est la conséquence des définitions données aux catégories de sols voisines, qui d'un côté ont amené leur exclusion des régions les plus humides (sols ferrugineux tropicaux), et qui d'autre part ont retiré aux ferrallites anciennes de régions devenues assez sèches l'identité de sols ferrallitiques.

La formation progressive d'un concept zonal des sols ferrallitiques, assez contraire aux principes généraux de la classification française qui veut s'appuyer autant sur les caractères intrinsèques des sols que sur des considérations génétiques, s'est accompagnée d'un élargissement de leur définition. Le concept central de l'altération ferrallitique ne paraît plus spécifique et exclusif des sols ferrallitiques.

Dans l'état actuel de la classification française, en dehors de la frange incertaine qui les limite vers les climats plus secs, la répartition des sols ferrallitiques n'est plus interrompue que par des andosols et, bien entendu, les sols hydromorphes.

Il est important de souligner que cette dérive vers la zonalité du concept ferrallitique n'est pas le fait du classificateur (Aubert, op. cités) qui a cherché à conserver une définition assez stricte. Elle s'est produite à l'occasion de travaux localisés dont les auteurs ont accordé ou refusé l'identité ferrallitique à certains sols, ainsi que cela a été vu dans les paragraphes précédents.

CONCLUSION

Le principe de zonalité est l'un des sujets les plus débattus de la pédologie, il n'est pas question de reprendre ici son exégèse. Une seule remarque sera faite, qui s'applique au cas des sols ferrallitiques.

Un groupement zonal des sols permet d'établir une unité de classification dont les sols ont en commun une série de caractères qui échappent souvent à l'analyse, caractères liés au pédoclimat, à l'activité biologique, à la matière organique insuffisamment caractérisée par les méthodes analytiques actuelles, etc. On peut penser qu'une unité zonale pourrait aussi être recomposée par un agencement logique des variables liées ou indépendantes, spécifiques ou non des sols concernés, si toutes ces variables pouvaient être véritablement étudiées. Cela peut être le cas pour les sols ferrallitiques dont beaucoup de caractères sont mal connus, en particulier ceux concernant le pédoclimat et l'activité biologique, et pour lesquels devraient entrer en compte beaucoup plus de caractères différents que dans la plupart des autres classes de sols.

Ce premier tome a essayé d'éclaircir, par l'enchaînement des connaissances progressivement acquises et par l'édification des concepts majeurs de la pédologie tropicale française, ce que sont les sols ferrallitiques. Depuis sa création en 1954, la catégorie des sols ferrallitiques a vu ses contours se modifier. La formulation d'une définition est apparue délicate. Si le concept central de la ferrallitisation s'exprime facilement, il est plus malaisé de mettre en évidence les caractères spécifiques qui justifient la réunion de certains sols marginaux aux orthotypes ferrallitiques.

Les sols constituent un « continuum » dans lequel on place des limites qui paraissent toujours un peu arbitraires et donc sujettes à révision. La pédologie tropicale est en évolution, elle n'a pas encore de règles consacrées par une longue pratique. Voïlà sans doute deux raisons qui font qu'un ouvrage spécialisé consacré aux sols ferrallitiques ne peut pas fixer d'emblée, avec précision et certitude, quel est son sujet. Les chapitres qui vont suivre devront s'efforcer de fixer des frontières aux sols ferrallitiques.

BIBLIOGRAPHIE

PREMIER ET DEUXIEME CHAPITRES: HISTORIQUE

- IMPERIAL BUREAU OF SOIL SCIENCE, 1932. Laterite and laterite soils-Techn. comm. 24. Harpenden, 30 p.
- AFANASIEFF (J.), 1927. Soil classification problems in Russia. Intern. Congr. Soil Sci. 1. 1927. Washington, 4, pp. 498-501.
- Afanasieff (J.), 1931. Fundamental features of the earth's soil surface-Belorus. Akad. Nauk. Minsk.
- AGAFONOFF (V.), 1928. Sur quelques sols rouges de Cochinchine. C.R. Ac. Sci., 187, pp. 428-431.
- AGAFONOFF (V.), 1929. Sur quelques sols rouges de Bien-Hoa de l'Indochine. Rev. Bot. appl. Agric. trop., 9, 89, pp. 16-23 & 90, pp. 120-126.
- AGAFONOFF (V.), 1929. L'étude des sols des Colonies françaises. Rev. Bot. appl. Agric. trop., 9, 95, pp. 434-440.
- AGAFONOFF (V.), 1932. Sur quelques sols latéritiques rouges et jaunes du Brésil. Soil Res., 3, pp. 13-20.
- AGAFONOFF (V.), PAVLOVITCH (S.), 1933. L'analyse thermique appliquée à l'étude des sols. C.R. Ac. Sci., 197, pp. 166-168.
- AGAFONOFF (V.), JOURAVSKY (G.), 1934. L'analyse thermique des sols de Tunisie. C.R. Ac. Sci., 198, pp. 1356-1358.
- ARSANDAUX (H.), 1909. Contribution à l'étude des latérites. C.R. Ac. Sci., 149, pp. 682-685.
- Arsandaux (H.), 1909. Contribution à l'étude des formations latéritiques. C.R. Ac. Sci., 149, pp. 1082-1084.
- Arsandaux (H.), 1910. Nouvelle contribution à l'étude des latérites. C.R. Ac. Sci., 150, pp. 1698-1701.
- Arsandaux (H.), 1916. Contribution à l'étude de l'altération des roches silicatées alumineuses dans les régions intertropicales. Bull. Soc. fr. Mineral., 36, pp. 70-110.
- AUBERT (G.), 1941. Les sols de la France d'Outre-Mer. Imp. nat., Paris, 90 p.
- AUBERT (G.), MAIGNIEN (R.), 1947. Les sols du Sénégal au Nord de la Gambie britannique. Conf. Pédol. Médit., 1947. Alger-Montpellier. Ass. fr. Et. Sol, Paris, pp. 358-370.
- Aufrere (L.), 1931. La signification de la latérite dans l'évolution climatique de la Guinée. Bull. Ass. Geogr. Fr., 46, pp. 95-97.
- Aufrere (L.), 1936. La géographie de la latérite. C.R. Soc. Biogéogr., nº 106, pp. 3-11.
- AUFRERE (L.), 1937. L'origine de la silice de la mer. Bull. Soc. océanogr. Fr., 17, 95, pp. 1645-1648.
- Babington (B.), 1821. Decomposition of hornblende and feldspaths in laterite formation. Trans. Geol. Soc., 5, pp. 328-329.

- Baeyens (J.), 1938. Les sols de l'Afrique centrale et spécialement du Congo belge. T. 1, Le Bas-Congo. I.N.E.A.C.. Bruxelles. 375 p.
- Baldwin (M.), Kellogg (C. E.), Thorp (J.), 1938. Soil classification. In Soils and Men, U.S.D.A. Yearbook of agriculture. 1938. Washington, pp. 979-1001.
- Ball (V.), 1874. On the building of ornamental stones of India. Rec. geol. Surv. India, 7, pp. 98-122.
- Ball (V.), 1875. The Raigarh and Hingir coal-field. Rec. geol. Surv. India, 8, pp. 102-121.
- Ball (V.), 1877. On the geology of the Mahanadi basin and its vicinity. Rec. geol. Surv. India, 10, pp. 167-186.
- Ball (V.), 1877. Geology of the Rajmehal Hills. Mem. geol. Surv. India, 13, pp. 155-248.
- Ball (V.), 1880. On the Auranga and Hutar Coalfields and the Iron Ores of Palamow and Toree. Mem. geol. Surv. India, 15, pp. 1-127.
- Ball (V.) 1881. Geology of the districts of Manbhum and Singhbhum. Mem. geol. Surv. India, 18, pp. 61-150.
- BAUER (M.), 1898. Beitrage zur Geologie der Seyschellen, insbesondere zur Kenntniss des Laterits. Neues Jahrb. f. Min., 2, pp. 163-219.
- BAUER (M.), 1898. Uber die Natur des Laterits. Peterm. Mitt., 44, pp. 280-283.
- BAUER (M.), 1907. Beitrag zur Kenntniss des Laterites, insbesondere dessen von Madagascar. Neues Jahrb. f. Min., Festband zur Feier des 100 jährigen Bestehens, pp. 33-90.
- BAUER (M.), 1911. Gesteinsproben der Witu Inseln, vom Zanzibar Archipel von den Comoren, Madagascar, Ceyon, usw. Nagele & Sproesser, Stuttgart, 89 p. (Sonderabdruch aus: Voeltzkow Reise in Ostafrika in den Jahren 1903-1905, Bd. 1, Abt. 2).
- BEAUMONT (E. de), 1855. Sur la géologie de l'Inde, d'après M.G.B. Greenough (Note traduite du journal anglais l'*Athenaeum* du 14 octobre 1854, p. 1242, par Elie de Beaumont). C.R. Ac. Sci., 40, pp., 40, pp. 347-352.
- Bennett (H. H.), 1926. Some comparisons of the properties of humid-tropical and humid-temperate american soils; with special reference to indicated relations between chemical composition and physical properties, *Soil Sci.*, 21, pp. 349-374.
- Bennett (H. H.), 1927. The important types of Cuban soils profiles. Intern. Congr. Soil. Sci. 1. 1927. Washington, 4, pp. 367-382.
- Bennett (H. H.), Allison (R. V.), 1928. The soils of Cuba. Trop. Plant. Research Foundation, Washington, 409 p.
- Berthier (P.), 1820. Examen du fer forgé par les nègres du Fouta-Djallon (Haut-Sénégal) et des minerais desquels ils le retirent. *Ann. Mines*, 5, pp. 129-134.
- Berthier (P.), 1821. Analyse de l'alumine hydratée des Beaux, département des Bouchesdu-Rhône. Ann. Mines, 6, pp. 531-534.
- BESAIRIE (H.), 1937. Les sols de Madagascar. Soil Research, 5, 3, pp. 200-221.
- Besairie (H.), 1937. L'altération des roches et la formation des sols de Madagascar. Chron. Mines Colon., 60, pp. 171-174.
- BISHOPP (D. W.), 1937. The formation of laterite. Geol. Mag., 74, pp. 442-445.
- Blanford (W. T.), 1859. Note on the laterite of Orissa. Mem. geol. Surv. India, 1, pp. 280-294.
- Blanford (W.T.), 1861. On the geological structure and relations of the Raniganj Coalfield, Bengal. *Mem. geol. Surv. India*, 3, pp. 1-196.
- Blanford (W.T.), 1868. Notes on route from Poona to Nagpur, via Ahmednuggur, Jalna, Loonar, Yeotmahal, Mangali and Hingunghat. Rec. geol. Surv. India, 1, pp. 60-65.
- Blanford (W. T.), 1869. On the geology of the Taptee and lower Nerbudda valleys, and some adjoining districts. *Mem. geol. Surv. India*, 6, pp. 163-394.
- Blanford (W.T.), 1872. Description of the sandstones in the neighbourhood of the first barrier on the Godavari, and in the country between the Godavari and Ellore. *Rec. geol. Surv. India*, 5, pp. 23-28.

- Blanford (W. T.), 1872. Sketch of the geology of Orissa. Rec. geol. Surv. India, 5, pp. 56-65.
- Blanford (W. T.), 1872. Sketch of the geology of the Bombay Presidency. Rec. geol. Surv. India, 5, pp. 82-102.
- BLONDEL (F.), 1927. Sur les terres rouges et les phénomènes d'altération des roches en Indochine française. C.R. Ac. Sci., 185, pp. 73-75.
- BLONDEL (F.), 1930. Les altérations des roches en Indochine française. Pac. Sci. Congr. 4. 1929. Batavia & Bandoeng, 2 B, pp. 635-643.
- Bonnault (D.), 1938. Le rôle de la latérite dans les formes du relief des environs de Bondoukou (Côte d'Ivoire). Bull. Serv. Mines A.O.F., Dakar, 2, pp. 51-52.
- Bonnet (J. A.), 1939. The nature of lateritization as revealed by chemical, physical and mineralogical studies of a lateritic soil profile from Puerto Rico. *Soil Sci.*, 48, pp. 25-40.
- Branner (J. C.), 1893. The supposed glaciation of Brazil. Journ. Geol., 1, pp. 753-772.
- Branner (J. C.), 1896. Decomposition of rocks in Brazil. Bull. geol. Soc. Amer., 7, pp. 255-314.
- Brindley (G. W.), Robinson (K.), 1946. The structure of kaolinite. Min. Mag., 27, pp. 242-253.
- Brindley (G. W), Robinson (K.), Goodyear (J.), 1948. X-ray studies of halloysite and metahalloysite. *Min. Mag.*, 28, pp. 393-428.
- Brooks (C. E. P.), 1931. The correlation of pluvial periods in Afrika with climatic changes in Europe. In Leakey (L. S. B.) Stone age culture of Kenya colony, Cambridge Univ. Press. Appendix B, pp. 267-270.
- Buchanan (F.), 1807. A journey from Malabar through the countries of Mysore, Canara and Malabar. East Indian Co, London, 2, pp. 440-441.
- Burton (R. C.), 1917. On the origin of the laterite of Seoni, Central Provinces. *Rec. geol. Surv. India*, 48, pp. 204-218.
- Bushnell (T. M.), 1944. The story of Indiana soils, describing general soils regions and the key to Indiana soils. Purdue Univ. agric. Exp. Station, La Fayette, 52 p.
- Bushnell (T. M.), 1949. Soil profile formulae (abstracts). Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 14, p. 329
- Bushnell (T. M.), 1951. Soil profile formulae. Manuscrit, Purdue Univ. La Fayette, Indiana.
- Cahen (L.), Lepersonne (J.), 1948. Notes sur la géomorphologie du Congo occidental. Ann. Musée Congo Belge, Tervuren, sér. in 8°. Sci. Geol. 1, 95 p.
- Caillère (S.), Henin (S.), 1947. Application de l'analyse thermique différentielle à l'étude des argiles des sols. *Ann. agron.*, 17, pp. 23-72.
- CAMARGO (T.), VAGELER (P.), 1937. Probleme der tropischen und subtropischen Bodenkunde. Bodenk. Pfl. Ernähr., 4, pp. 137-161.
- CAMPBELL (J. M.), 1917. Laterite: its origin, structure and minerals. *Min. Mag.*, 17, pp. 67-77, 120-128, 171-179, 220-229.
- Castagnol (E. M.), 1935. Propriétés et caractères fondamentaux des sols du Tonkin et du Nord-Annam. Bull. ec. Indoch., 38, 2, pp. 333-348.
- Castagnol (E. M.), 1935-1936. Principes et méthodes de l'étude moderne des sols. C.R. Trav. Inst. Rech. agron. for. Indoch., 2, pp. 31-64.
- Castagnol (E. M.), Le Viet Khoa, Pham Gia Tu, 1934. Relation du pouvoir de dispersion et de la capacité d'absorption des sols vis-à-vis de la composition du complexe absorbant. C.R. Trav. Inst. Rech. agron. for Indoch., pp. 123-127.
- Chautard (J.), 1905. Etude sur la géographie physique et la géologie du Fouta-Djallon et ses abords orientaux et occidentaux (Guinée et Soudan français). H. Jouve, Paris, pp. 136-152.

- Chautard (J.), Lemoine (P.), 1908. La latéritisation. Ses relations avec la genèse de quelques minerais d'aluminium et de fer, et de certains gîtes aurifères des régions tropicales. Bull. Soc. ind. Mineral., 4° sér., 9, pp. 305-337.
- Chautard (J.), Lemoine (P.), 1908. Sur la genèse de certains minerais d'alumine et de fer. Décomposition latéritique. C.R. Ac. Sci., 146, pp. 239-242.
- Chetelat (E. de), 1928. Notes d'un voyage géologique au Dahomey et en Haute-Volta. Rev. Géogr. phys. Géol. dyn., 1, 2, pp. 71-87.
- CHETELAT (E. de), 1933. Recherches géologiques et morphologiques dans le nord-ouest de la Guinée française. Rev. Géogr. phys. Géol. dyn., 6, 2, pp. 91-112.
- CHETELAT (E. de), 1938. Le modelé latéritique de l'ouest de la Guinée française. Rev. Géogr. phys. Géol. dyn., 11, 1, 120 p.
- CLARKE (F. W.), 1924. The data of geochemistry. 5th ed. U.S. Geol. Surv., Bull. 770, 841 p.
- CLINE (M. G.), 1955. Soil survey of the territory of Hawaii. U.S. Dept. Agric., Soil Surv. Ser. 1939, no 25, 20, 644 p.
- Correns (W.), 1961. The experimental chemical weathering of silicates. *Clay Minerals Bull.*, 26, 4, pp. 249-264.
- CRAIG (N.), HALAIS (P.), 1934. The influence of maturity and rainfall on the properties of lateritic soils in Mauritius. *Emp. Journ. exp. Agric.*, 2, pp. 349-358.
- CROOK (T.), 1909. On the use of the term laterite. Geol. Mag., Dec. V, vol. 6, pp. 524-526.
- CROOK (T.), 1910. The use of terms « laterite » and « bauxite ». Geol. Mag. new ser., dec. V, vol. 7, pp. 233-235.
- Crowther (E. M.), 1930. Climate, clay composition and soil type. Int. Congr. Soil Sci. 2. 1930. Leningrad-Moscou, 5, pp. 15-23.
- DARWIN (C.), 1844. Geological observations on the volcanic island and parts of South America visited during the voyage of H.M.S. Beagle-Smith, Elder & Co, London, 7, 176 p.
- Daubree (M.), 1857. Recherches expérimentales sur le striage des roches dû aux phénomènes erratiques et sur les décompositions chimiques produites dans les actions mécaniques. C.R. Ac. Sci., 44, pp. 997-1 000.
- DAUBREE (M.), 1867. Expériences sur les décompositions chimiques provoquées par les actions mécaniques dans divers minéraux tels que le feldspath. *C.R. Ac. Sci.*, 64, pp. 339-345.
- Daubree (M.), 1879. Etudes synthétiques de géologie expérimentale. Dunod, Paris, 2 vol., 828 p.
- Davis (W. M.), 1920. Physiographic relations of laterite. Geol. Mag., 57, pp. 429-431.
- Debye (P.), Scherrer (P.), 1916. Interferenzen an regellos orientierten Teilchen im Röntgenlicht. *Physikal. Zeitsch.*, 17, pp. 277-282.
- DIETRICH (W. G.), 1941. Cité par Greene. 1947.
- DIXEY (F.), 1938. Some observations on the physiographical development of central and southern Africa. *Trans. Geol. Soc. South Afr.*, 61, pp. 113-171.
- DIXEY (F.), 1943. Erosion cycles in central and southern Africa. Trans. Geol. Soc. South. Afr., 65, pp. 151-183.
- Dixey (F.), 1946. Erosion and tectonics in the east african Rift System. Quart. Journ. Geol. Soc., London, 102, pp. 339-388.
- DOYNE (H. C.), WATSON (W. A.), 1933. Soil formation in southern Nigeria (The Ilepa profile). Journ. agric. Sci., 23, pp. 208-215.
- Dresch (J.), 1946. Notes de géomorphologie congolaise. Bull. Ass. Geogr. Fr., nº 181-182, pp. 116-125.
- Dresch (J.), 1947. Pénéplaines africaines. Ann. Geogr., 302, pp. 125-137.
- Du Bois (G. C.), 1903. Beitrag zur Kenntniss der surinamischen Laterit und Schutzrindenbildung. Min. Petr. Mitt., 22, pp. 1-61.
- Dunstan (W. R.). 1908-1909. Laterites from the Central Provinces. Rec. geol. Surey India, 37, pp. 213-220.

- Du Toit (A. L.), 1939. The geology of South Africa. 2nd éd. Oliver & Boyd, London, 12, 539 p.
- EDELMAN (C. H.), 1946. Les principaux sols de Java. Rev. int. Bot. appl. Agric. trop., 26, n° 287-288, pp. 505-511.
- Erhart (H.), 1926. L'influence de l'origine géologique et des facteurs extérieurs sur la formation et la valeur culturale des terres latéritiques de l'est de Madagascar. Larose, Paris, 112 p.
- ERHART (H.), 1929. Sur la nature et l'origine des sols de Madagascar. C.R. Ac. Sci., 188, pp. 1561-1563.
- ERHART (H.), 1935-1937. Traité de pédologie. T. 1, Pédologie générale. T. 2, Pédologie agricole. Inst. Pédol. Strasbourg, 2 vol. 260 + 203 p.
- ERHART (H.), 1943. Les latérites du Moyen Niger et leur signification paléoclimatique. C.R. Ac. Sci., 217, pp. 323-325.
- ERHART (H.), 1947. Les caractéristiques des sols tropicaux et leur vocation pour la culture des plantes oléagineuses. *Oléagineux*, 2, n° 6, pp. 293-303 et n° 7, pp. 360-368.
- Fermor (Sir L. L.), 1906. On the association of gibbsite with manganese ore from Talevadi, Belgaum district, and on gibbsite from Bhekowli, Satara district. *Rec. geol. Surv. India*, 34, pp. 167-171.
- FERMOR (Sir L. L.), 1909. The manganese ore deposits of India. Part. 2. Geology. *Mem. geol. Surv. India*, 37, pp. 232-405.
- FERMOR (Sir L. L.), 1911. What is laterite. *Geol. Mag.*, dec. V, vol. 8, pp. 454-462, 507-516, 559-566.
- FERMOR (Sir L. L.), 1913. Contributed remarks on M. Goodchild's paper on laterisation in Minas Geraes, Brazil. *Trans. Inst. Min. Met.*, 23, pp. 26-30.
- Fermor (Sir L. L.), 1915. The work of Professor Lacroix on the laterites of French Guinea. *Geol. Mag.* new ser., dec. VI, vol. 2, pp. 28-37, 77-82, 123-129.
- Fermor (Sir L. L.), 1915. On hematite crystals of corundiform habit from Kajlidongri, Central India. *Rec. geol. Surv. India*, 45, pp. 239-247.
- FERMOR (Sir L. L.), 1916. Discussion by L. L. FERMOR, in vol. 9; no 1 of your journal appears an article by M. D. C. Wysor, entitled: Aluminium hydrates in the Arkansas bauxite deposits... *Econ. Geol.*, 11, pp. 686-690.
- FERMOR (Sir L. L.), 1919. The mineral resources of the Central Provinces (India). Rec. geol. Surv. India, 50, pp. 268-302.
- FERMOR (Sir L. L.), 1921. The mineral resources of Bihar and Orissa. Rec. geol. Surv. India, 53, pp. 239-319.
- FOOTE (R. B.), 1866. On the occurrence of stone implements in various parts of the Madras and north Arcot districts. *Mad. Journ. Lit. Sc.*, 3rd ser., part 2, pp. 1-35.
- FOOTE (R. B.), 1868. On the distribution of stone implements in southern India. Quart. Journ. geol. Soc., London, 24, pp. 484-495.
- Foote (R. B.), 1870. Notes on the geology of the neighbourhood of Madras. Rec. geol. Surv. India, 3, pp. 11-17.
- Fermor (R. B.), 1873. On the geology of parts of the Madras and north Arcot districts lying north of the Palar river, and included in Sheet 78 of the Indian Atlas. *Mem. geol. Surv. India*, 10, pp. 1-188.
- FOOTE (R. B.), 1876. The geological features of the southern Mahratta country and adjacent districts. *Mem. geol. Surv. India*, 12, pp. 1-268.
- FOOTE (R. B.), 1879. On the geological features of the northern part of Madura district, the Pudukotai State, and the southern parts of the Tanjore and Trichinopoly districts included within the imits of Sheet 80 of the Indian Atlas. *Rec. geol. Surv. India*, 12, pp. 141-158.
- FOOTE (R. B.), 1879. Sketch of the geology of North Arcot district. Rec. geol. Surv. India, 12, pp. 187-208.

- FOOTE (R. B.), 1883. On the geology of the Madura and Tinnevelly districts. *Mem. geol. Surv. India*, 20, pp. 1-103.
- FOOTE (R.B.), 1886. Notes on the geology of parts of Bellary and Anantapur districts. Rec. geol. Surv. India, 19, pp. 97-111.
- Fox (C. S.), 1922. The bauxite resources of India. Min. Mag.
- Fox (C. S.), 1922. Aluminium, the world's output and producers. Min. Journ.
- Fox (C. S.), 1923. The bauxite and aluminous laterite occurences of India. *Mem. geol. Surv. India*, 49, 1, 288 p.
- Fox (C. S.), 1932. Bauxite and aluminous laterite. 2nd ed. The Techn. Press, London, 32, 312 p.
- Fox (C. S.), 1933. Laterite and laterite soils. The Indian Forester, 59, pp. 630-635.
- Fox (C. S.), 1936. Buchanan's laterite of Malabar and Kanara. Rec. geol. Surv. India, 69, pp. 389-422.
- Geze (B.), 1942. Observations sur les sols du Cameroun occidental. *Ann. agron.*, 12, pp. 103-131.
- GEZE (B.), 1947. Le Congrès international de Pédologie méditerranéenne. Notes et réflexions. *Ann. Ec. nat. Agric.* Montpellier, 27, pp. 289-313.
- GLANGEAUD (L.), 1941. Evolution des minéraux résiduels et notamment du quartz dans les sols autochtones en Afrique occidentale française. C.R. Ac. Sci., 212, pp. 862-864.
- GLANGEAUD (L.), 1942. Etude statistique de l'action du bioclimat sur les caractères chimicominéralogiques des sols de la Côte d'Ivoire (rapport silice/alumine). C.R. Ac. Sci., 215, pp. 360-362.
- GLINKA (D. K.), 1914. Die Typen der Bodenbildung. Brontraeger Brothets, Berlin, 365 p.
- GLINKA (D. K), 1927. The great soil groups of the world and their development. Transl. from german by C. F. Marbut, Edwards Brothers, Ann. Arbor, 235 p.
- GLINKA (D. K.), 1931. Treatise on soil science. 4th ed. transl. 1963. National Science Foundation, Washington, 674 p.
- Greene (H.), 1945. Classification and use of tropical soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 10, pp. 392-396.
- GREENE (H.), 1947. Soil formation and water movement in the tropics. Soils and Fertil., 10, 3, pp. 253-256.
- Greene (H.), 1950. So-called irreversible laterisation. Int. Congr. Soil. Sci. 4. 1950. Amsterdam, 2, pp. 175-177.
- Greenough (G. B.), 1854. On the geology of India. Athenaeum, p. 1242.
- GRIM (R. E.), Bray (R. H.), Bradley (W. F.), 1937. The mica in argillaceous sediments. Amer. Min., 22, pp. 813-829.
- Guichard (F.), 1933. Les terres du Cameroun. Note de présentation de E. Roux. C.R. Ac. Agric. Fr., 19, 2, pp. 921-925.
- Hallsworth (E. G.), Costin (A. B.), 1953. Studies in pedogenesis in New-South Wales. 4. The ironstone soils. *Journ. Soil. Sci.*, 4, pp. 24-47.
- HARDON (H. J.), FAVERJEE (J. C. L.), 1939. Quantitative analysis of the clay fraction of the principal soil types of Java. *Meded. Landbouwhogesch.*, Wageningen, 43, pp. 55-59.
- HARDY (F.), 1931. Studies in tropical soils. I. Identification and approximate estimation of sesquioxyde components by adsorption of alizarin. *Journ. agric. Sci.*, 21, pp. 150-166.
- HARDY (F.), 1934. Studies in tropical soils. 3. The shrinkage of lateritic and kaolinitic soils. Journ. agric. Sci., 24, pp. 59-71.
- HARDY (F.), 1949. Soil classification in the Caribean region. A review. Comm. Bur. Soil Sci., Techn. Comm. 46, Harpenden, pp. 64-75.
- HARDY (F.), FOLLET-SMITH (R. R.), 1931. Studies in tropical soils. 2. Some characteristic igneous rock soil profiles in British Guiana, South America. *Journ. agric. Sci.*, 21, pp. 739-761.

- HARDY (F.), RODRIGUES (G.), 1939. Soil genesis from andesite in Grenada, British West Indies. Soil Sci., 47, pp. 361-384.
- HARDY (F.), RODRIGUES (G.), 1941. Soil genesis from fragmental volcanic rocks in the lesser Antilles. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 6, pp. 47-51.
- HARRASSOWITZ (H.), 1924. Aluminium Lagerstätten. Metall. und Erz., 21, (N.F. 12), 14, pp. 325-328.
- HARRASSOWITZ (H.), 1926. Laterit, Material und Versuch erdegeschichtlicher Auswertung. Fortschr. Geol. Paleont. Bd. 4, 14, pp. 253-266.
- HARRASSOWITZ (H.), 1927. Bauxitestudien. Metall. und Erz., 24, (N.F. 15), 8, pp. 181-183.
- HARRASSOWITZ (H.), 1927. Die weltwirtschaftlich wichtigste Bauxitausbildung. Metall. und Erz., 24, (N.F. 15), 24, pp. 589-591.
- Harrassowitz (H.), 1927. Deutsche Aluminiumrohstoffe. Handelsblatt d. chemiker Ztg., n° 103, p. 1009.
- HARRASSOWITZ (H.), 1929. Allit, (Bauxit) Lagerstätten der Erde. Naturwissenchaften, 17, pp. 928-931.
- HARRASSOWITZ (H.), 1930. Böden der tropischen Region. Laterit und allitischer (lateritischer) Rotlehm. In Handbuch der Bodenlehre von E. Blanck. J. Springer, Berlin, 3 Bd., pp. 387-436.
- HARRISON (J. B.), 1898. Reports on the geology of British Guiana.
- HARRISON (J.B.), 1908. Geology of the gold fields of British Guiana. Dulau & C°, London, 320 p.
- HARRISON (J. B.), 1919. Reports and correspondance relative to the bauxite of British Guiana.
- HARRISON (J. B.), 1933. The katamorphism of igneous rocks under humid tropical conditions. *Imp. Bur. Soil Sci.*, Harpenden, 79 p.
- HARRISON (J. B.), REID (K. D.), 1910. The residual earths of British Guiana commonly termed laterite. *Geol. Mag.*, dec. V, vol. 7, pp. 439-452, 488-495, 553-562.
- HARRISON (J. B.), REID (K. D.), 1911. Formation of a laterite from a practically quartz-free diabase. *Geol. Mag.*, dec. V, vol. 8, pp. 120, 355, 477.
- HARTT (C. F.), 1870. Scientific results of a journey in Brazil by L. AGASSIZ and his travelling companions. Geology and physical geography of Brazil by C. F. HARTT-FIELDS, Osgood & Co. Boston, 23, 620 p.
- Hendricks (S. B.), 1929. Diffraction of X-radiation from some crystalline agregates. Zeitschr. Kristallogr., 71, pp. 269-273.
- HENDRICKS (S. B.), FRY (W. H.), 1930. The results of X-ray and mineralogical examination of soil colloids. Soil Sci., 29, pp. 457-476.
- HENRY (Y.), 1931. Les terres rouges et noires basaltiques de l'Indochine. Leur mise en valeur. Gouv. Gén. de l'Indoch., Hanoï, 210 p.
- HEUSSER (H.), 1858. Beitrag zur Kenntniss des brasilianischen Küstengebirges. Zeitschr. Dtsch. Geol. Gesellsch., 10, pp. 412-422.
- HISLOP, 1863. Journ. Ass. Soc. Bombay, V, 63. Cité par Lacroix (1913).
- HOLLAND (T. H.), 1899. A contribution to the discussion on rock-weathering and serpentinization. Geol. Mag., dec. IV, vol. 6, pp. 540-547.
- HOLLAND (T. H.), 1903. On the constitution, origin and dehydration of laterite. *Geol. Mag.*, dec. IV, vol. 10, pp. 59-69.
- Holland (T. H.), 1905. The occurrence of bauxite in India. Rec. geol. Surv. India, 32 ,pp. 175-184.
- HOLLAND (T. H.), 1907. Imp. Gaz. India, 1, pp. 101-102.
- Holland (T. H.), 1907. Discusses J. M. Campbell's paper on the laterite of West Africa. Trans. Inst. Min. Met., 19, pp. 453-457.

- Holland (T. H.), Tipper (G. H.), 1913. Indian geological terminology. Mem. geol. Surv. India, 43, pp. 1-148.
- Hull (A. W), 1917. A new method of X-ray crystal analysis. Phys. Review, 10, pp. 661-696.
- HUMBERT (R. P.), 1948. The genesis of laterite. Soil. Sci., 65, pp. 281-290.
- Jannettaz (E.), 1877-1878. M. Jannettaz fait connaître la composition chimique de matières envoyées de la Guyane française à l'Exposition permanente des Colonies comme argiles ou comme minerai de fer. Bull. Soc. géol. Fr., 3° sér., 6, p. 392.
- Jannettaz (E.), 1878. Gibbsite et bauxite de la Guyane française. Bull. Soc. minéral. Fr., 1, pp. 70-71.
- Joffe (J. S.), 1949. Pedology. 2nd ed. Pedol. Publ. New-Brunswick (N. J.), 662 p.
- KAY (G. F.), 1931. Origin of the pebble-band on Iowan till. Journ. Geol., 39, 4, pp. 377-380.
- Kelaart (E. F.), 1853. Notes on the geology of Ceylan. Laterite formation. *Edinb. new Philos. Journ.* 54, pp. 28-35.
- Kelley (W. L.), 1943. Mattson's papers on the laws of soil colloidal behaviour. Review and comments. Soil Sci., 56, pp. 443-456.
- KELLOGG (C. E.), 1937. Soil survey manual. 1st ed. U.S. Dept. Agric., Misc. Publ. 274, 136 p.
- Kellogg (C. E.), 1949. Preliminary suggestions for the classification and nomenclature of great soil groups in tropical and equatorial regions. *Comm. Bur. Soil Sci.*, Techn. Comm. 46. Harpenden, pp. 76-85.
- Kellogg (C. E.), Davol (F. D.), 1949. An exploratory study of soil groups in the Belgian Congo. Publ. I.N.E.A.C., sér. sci., 46. Bruxelles, 73 p.
- King (W.), 1880 reprint 1930. The gneiss and transition rocks and other formations of the Nellore portion of the Carnatic. Mem. geol. Surv. India, 16, pp. 109-194.
- King (W.), 1882. General sketch of the geology of the Travancore State *Rec. geol. Surv. India*, 15, pp. 87-93.
- King (W.), 1882. The Warkilli beds and reported associated deposits at Quilon, in Travancore. Rec. geol. Surv. India, 15, pp. 93-102.
- KING (W.), 1885. Sketch of the progress of geological work in the Chattisgarh division of the Central Provinces. *Rec. geol. Surv. India*, 18, pp. 169-200.
- King (W.), Foote (R.B.), 1864. On the geological structure of portions of the districts of Trichinopoly, Salem and South Arcot, Madras, included in sheet 79 of the Indian Atlas. Mem. geol. Surv. India, 4, pp. 218-387.
- KING (L. C.), 1948. Landscape studies in Southern Africa. Proc. Geol. Soc. South Afr., 50, pp. 23-55.
- KING (L. C.), 1949. On the ages of African landsurfaces. Quart. Journ. geol. Soc., London, 104, pp. 439-459.
- Kuron (H.), 1939. Cité par Greene, 1947.
- LACROIX (A.), 1893-1913. Minéralogie de la France et de ses Colonies. Béranger, Paris, 5 T., 723 + 804 + 816 + 923 + 501 p.
- LACROIX (A.), 1913. Les latérites de la Guinée et les produits d'altération qui leur sont associés. *Nouv. Arch. Mus.*, 5° sér., 5, pp. 255-356.
- Lacroix (A.), 1914. Les produits d'altération des roches silicatées alumineuses et en particulier les latérites de Madagascar. C.R. Ac. Sci., 159, pp. 617-622.
- LACROIX (A.), 1923. Minéralogie de Madagascar. 3. Lithologie. Soc. Ed. Géogr. marit. colon., Paris, 450 p.
- LACROIX (A.), 1934. Les phénomènes d'altération superficielle des roches silicatées alumineuses des pays tropicaux : conséquences au point de vue minier. In : Introduction aux études minières coloniales. *Publ. Bur. Etudes géol. min. colon.*, 2, pp. 19-47.
- LAKE (P.), 1890. The geology of South Malabar between the Beypore and Ponnani rivers. Mem. geol. Surv. India, 24, pp. 201-246.

- Lang (R.), 1915. Die klimatischen Bildungsbedingungen des Laterits. *Chem. der Erde*, Bd 1, Heft 2, pp. 134-155.
- LAPPARENT (J. de), 1939. La décomposition latéritique du granite dans la région de Macenta (Guinée française). C.R. Ac. Sci., 208, pp. 1767-1769.
- LAPPARENT (J. de), 1939. L'arénisation prétropicale et prédésertique en Afrique occidentale française et au Sahara. C.R. Ac. Sci., 209, pp. 7-9.
- LAPPARENT (J. de), Hocart (R.), 1939. La leverriérite des formations latéritiques de l'Afrique occidentale française. C.R. Ac. Sci., 208, pp. 1465-1467.
- LE CHATELIER (H.), 1887. De l'action de la chaleur sur les argiles. Bull. Soc. fr. Minéral., 10, pp. 204-211.
- LENZ, 1878. Verhandl. d.k.k. Geol. Reichsanstalt, p. 35. Cité par Du Bois (1903).
- LIEBRICH (A.), 1891. Beitrag zur Kenntniss des Bauxites von Vogelsberg. Inaug. Diss. W. Keller, Giessen, 42 p.
- Logan (J. R.), 1851. Notices of the geology of the straits of Singapore. Quart. Journ. geol. Soc., London, 7, pp. 310-344.
- LOMBART (J.), 1923. Remarques sur la structure des latérites en Oubangui-Chari (Afrique Equatoriale française). Chron. Min. Colon., 1, pp. 288-289.
- LOMBART (J.), 1937. Les altérations superficielles en Afrique Equatoriale française. Chron. Min. Colon., 60, pp. 168-171.
- Maclaren (M.), 1906. On the origin of certain laterites. *Geol. Mag.*, dec. V, vol. 3, pp. 536-547.
- MAIGNIEN (R.), 1966. Compte rendu de recherches sur les latérites. U.N.E.S.C.O., Recherches sur les ressources naturelles. 4. Paris, 155 p.
- MALLET (F. R.), 1879. On pyrolusite with psilomelane occurring at Gosalpur, Jabalpur district. Rec. geol. Surv. India, 12, pp. 99-100.
- MALLET (F. R.), 1881. On the ferruginous beds associated with the basaltic rocks of North-Eastern Ulster, in relation to Indian laterite. *Rec. geol. Surv. India*, 14, pp. 139-148.
- MALLET (F. R.), 1883. On the iron ores and subsidiary materials for the manufacture of iron in the North-Eastern part of the Jabalpur district. *Rec. geol. Surv. India*, 16, pp. 94-115.
- Mallet (F. R.), 1883. On lateritic and other manganese ore occurring at Gosalpur, Jabalpur district. *Rec. geol. Surv. India*, 16, pp. 116-118.
- MARBUT (C. F.), 1923. The soils of Africa. In: The vegetation and soils of Africa. Shantz H. L. and Marbut, C. F. Nat. Res. Council & Am. geogr. Soc., New-York, pp. 115-221.
- MARBUT (C. F.), 1927. A scheme for soil classification. Int. Congr. Soil Sci. 1. 1927. Washington, 4, pp. 1-31.
- MARBUT (C. F.), 1930. Morphology of laterite. Int. Congr. Soil Sci. 2. 1930. Leningrad-Moscou, 5, pp. 72-80.
- MARBUT (C. F.), MANIFOLD (C. B.), 1926. The soils of the Amazon valley. Geogr. Rev., 15, 3, pp. 414-442.
- MARSHALL (C. E.), HUMBERT (R. P.), SHAW (B. T.), 1942. Studies of clay particles with the electron microscope. Soil Sci., 54, pp. 149-158.
- Martin (F. J.), Doyne (H. C.), 1927. Laterite and lateritic soils in Sierra Leone. *Journ. agric. Sci.*, 17, pp. 530-547.
- MARTIN (F. J.), DOYNE (H. C.), 1930. Laterite and lateritic soils in Sierra Leone. *Journ.* agric. Sci., 20, pp. 135-143.
- MARTIN (F. J.), DOYNE (H. C.), 1930. Notes on West African soils. Gold Coast D/A Bull. 20, 2, 2nd Conf. West. Afr. Officers, Pap. 7, pp. 104-118.
- Mattson (S.), & al. The laws of colloidal behaviour. Soil Sci., 1929 (28) pp. 179-220; 1929 (28) pp. 373-409; 1930 (30) pp. 459-495; 1931 (31) pp. 311-331; 1931 (32) pp. 343-365; 1932 (33) pp. 301-323; 1932 (34) pp. 209-240 & pp. 459-483; 1933 (36) pp. 229-244; 1934 (38) pp. 229-313; 1935 (39) pp. 75-84; 1937 (43) pp. 421-452; 1940 (49) pp. 109-151.

- MAUGUIN (C.), 1928. Etude des micas au moyen des rayons X. Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristall., 51, pp. 285-332.
- MAUGUIN (C.), 1930. La maille cristalline des chlorites. *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristall.*, 53, pp. 279-299.
- MEDLICOTT (H. B.), 1859. On the Vindhyan rocks and their associates in Bundelcund. *Mem. geol. Surv. India*, 2, pp. 1-95.
- MEDLICOTT (H. B.), 1868. The boundary of the Vindhyan series in Rajpootana. *Rec. geol. Surv. India*, 1, pp. 69-72.
- Medicott (H. B.), Blanford (W. T.), 1879. A manual of the geology of India. 1. chap. 15. Peninsular area. Laterite or iron clay and lithomarge. Geological Survey Office, Calcutta, pp. 348-370.
- MERRILL (G. P.), 1897. A treatise on rock-weathering and soils. 1st éd. Macmillan & Co, New-York, 411 p.
- MEUNIER (S.), 1872. Sur l'existence de la bauxite à la Guyane française. C.R. Ac. Sci., 74, pp. 633-634.
- MILLOT (G.), 1964. Géologie des argiles. Masson, Paris, 499 p.
- MILNE (G.), 1934. Some suggested units of classification and mapping particularly for East-African soils. Soil Res., 4, 2, pp. 183-198.
- MILNE (G.), 1935. Composite units for the mapping of complex soils associations. Congr. Int. Sci. Sol. 3, 1935, Oxford, 1, pp. 345-347.
- MILNE (G.), 1936. Normal erosion as a factor in soil profile development. *Nature*, 138, pp. 548-549.
- MILNE (G.), 1936. A provisional soil map of East Africa. East Afr. agric. Res. Stat., *Amani Memoirs*, 34 p.
- MILNE (G.), 1947. A soil reconnaissance journey through parts of Tanganyka territory. Journ. Ecol., 35, pp. 192-265.
- Монк (E. C. J.), 1909. Yellow laterite and its parent rock. Bull. Dept. Agric. Indies Neerland, 28, pp. 1-12.
- Монк (E. C. J.), 1938. De bodem der tropen in het algemeen en die van Nederlandsch. Indië in het bijzonder. Med. Kon. Ver. Kol. Inst. Amsterdam, 31, 2 vol., 1151 р.
- Монк (E. C. J.), 1944. The soils of equatorial regions. E. Brothers, Ann Arbor, Michigan. 765 p.
- Mohr (E. C. J.), Van Baren (F. A.), 1954. Tropical soils. Interscience Publ., London, New-York, 498 p.
- Muntz (A.), 1903. Carte agronomique de Madagascar. Bull. Econ. Madagascar et Dept., 3, 3, pp. 251-285.
- Muntz (A.), Marcano (V.), 1889. Sur la proportion de nitrates contenus dans les pluies des régions tropicales. C.R. Ac. Sci., 108, pp. 1062-1064.
- Muntz (A.), Rousseaux (E.), 1900. Etude sur la valeur agricole des terres de Madagascar. Bull. Min. Agric., 19, pp. 910-1123.
- Muntz (A.), Rousseaux (E.). Etude sur la valeur agricole des terres de Madagascar. Ann. Sci. agron., 2° sér., 17, 1, pp. 1-98, 152-253, 296-398.
- MURRAY (J.), IRVINE (R.), 1891. On silica and the siliceous remains of organisms in modern seas. *Proc. r. Soc.* Edinburg, 18, pp. 229-250.
- Newbold (T. J.), 1844. Notes, chiefly geological, across the peninsula from Masulipatam to Goa, comprising remarks on the origin of regur and laterite. *Journ. asiatic. Soc. Bengal*, 13, pp. 984-1004.
- Newbold (T.J.), 1845. On the alpine glacier, iceberg, diluvial and wave translation theories, with reference to the deposits of Southern India, its furrowed and striated rocks and rock basin. *Journ. asiatic. Soc. Bengal*, 14, 1, no 159, pp. 217-246.
- Newbold (T. J.), 1846. Summary of the geology of Southern India. 6. Laterite. *Journ. royal asiatic Soc.*, 8, pp. 227-240.

- OLDHAM (R. D.), 1886. Preliminary note on the geology of northern Jesalmer. Rec. geol. Surv. India, 19, pp. 157-160.
- OLDHAM (R. D.), 1893. Manual of the geology of India. Chap. 15. Laterite. 2nd ed., Geological Surv. Off., Calcutta, pp. 369-390.
- OLDHAM (T.), 1854. Notes upon the geology of the Rajmahal Hills, being the result of examinations made during the cold season of 1852-53. *Journ. asiatic Soc. Bengal*, 23, n° 3, pp. 263-283.
- OLDHAM (T.), 1856. Preliminary notice on the coal and iron of Talcheer in the tributary mehals of Cuttack. *Mem. geol. Surv.* India, 1, pp. 1-31.
- ORCEL (J.), 1935. L'emploi de l'analyse thermique différentielle dans la détermination des constituants des argiles, des latérites et des bauxites. C.R. Congr. Int. Min. Met. Geol. appl. Paris, pp. 359-373.
- ORCEL (J.), CAILLÈRE (S.), 1933. L'analyse thermique différentielle des argiles à montmorillonite (bentonite). C.R. Ac. Sci., 197, pp. 774-777.
- Passarge (L.), 1895. Uber Laterite und Rotherden in Africa und Indien. *Intern. Geogr. Kong.* 6. 1895. London, (réf. Jahrb. für Min. Geol. u. Pal., 1897, 2, pp. 471).
- Passarge (S.), 1895. Adamaua. Mericht über die Expedition des deutschen Kamerun Komitees in den Jahren 1893-94. Geographische Verlagshandlung Dietrich Reimer, Berlin, 20. 574 p.
- Passarge (S.), 1896. Uber seine Reisen in Transvaal. Vehr. d. Ges. f. Erdk., Berlin, nº 9-10, p. 492.
- Passarge (S.), 1901. Zur Kenntniss der Geologie von britich Betschuanaland. Zeitschr. d. Gesellsch. f. Erdk., 36, pp. 20-68.
- Pauling (L.), 1930. The nature of the micas and related minerals. *Proc. Nat. Ac. Sci.*, 16, pp. 123-129.
- PECHUEL-LŒSCHE (Е.), 1882. Die Loango Expedition. 3 te Abt., Iste Hafte. Verl. P. Frohberg, Leipzig, 304 р.
- PECHUEL-LOESCHE (E.), 1884. Westafrikanische Laterite. Ausland nr 21, pp. 401-407; nr 22, pp. 422-428.
- РЕСНUEL-LOESCHE (Е.), 1885. Südafrikanische Laterite. Ausland nr 26, pp. 501-504.
- PECHUEL-LŒSCHE (E.), 1886. Die Vegetation am Kongo bis zum Stanley Pool. Ausland nr 20, pp. 381-385; nr 21, pp. 405-410.
- PECHUEL-LŒSCHE (E.), 1887. Kongoland. H. Costenoble, Iena, 40-521 p.
- Pendleton (R. L.), 1947. Soils of India: four soil surveys in Gwalior State. Soil Sci., 63, pp. 421-435.
- Pendleton (R. L.), 1947. The laterite soils of Siam. Ann. Ass. amer. Geogr., 37, pp. 50-51.
- Pendleton (R. L.), 1949. Classification and mapping of tropical soils. Comm. Bur. Soil. Sci., Techn. Comm. 46, Harpenden, pp. 93-97.
- Pendleton (R. L.), Sharasuvana (S.), 1942. Analyses and profile notes of some laterite soils and soils with iron concretions of Thailand. Soil Sci., 54, pp. 1-26.
- Pendleton (R. L.), Sharasuvana (S.), 1946. Analyses of some Siamese laterites. Soil Sci., 62, pp. 423-440.
- Prescott (J. A.), Pendleton (R. L.), 1952. Laterite and lateritic soils. Comm. Bur. Soil. Sci., Techn. Comm. 47, Harpenden, 51 p.
- RAYCHAUDHURI (S. P.), 1941. Studies on Indian red soils. 3. General morphological characteristics of some profiles. *Ind. Journ. agric. Sci.*, 11, pp. 220-235.
- RAYCHAUDHURI (S. P.), CHAKRAVORTY (J. N.), 1943. Studies of Indian red soils. 7. Influence of rainfall and altitude above sealevel on the chemical composition of clay fractions of soil types. *Ind. Journ. agric. Sci.*, 13, pp. 252-254.
- RAYCHAUDHURI (S. P.), MUKHERJEA (K. C.), 1942. Studies in Indian red soils. 6. Determination of mineralogical composition. *Ind. Journ. agric. Sci.*, 12, pp. 323-335.

- RAYCHAUDHURI (S. P.), SULAIMAN (M.), 1940. Studies on the chemical constituants of Indian lateritic and red soils. 1. Determination of free sesquioxide components. *Ind. Journ. agric. Sci.*, 10, pp. 158-163.
- Reformatsky (N.), 1935. Quelques observations sur les latérites et les roches ferruginisées de l'Ouest de la colonie du Niger français. Bull. Soc. géol. Fr., 5° sér., 5, pp. 575-581.
- Reifenberg (A.), 1933. Die Klassifikation der Böden auf Grund der Zusammensetzung ihrer Kolloidfraktion. 5. Versuch einer allgemeiner Bodenklassifikation. Zeit. Pflanz. Düng. Bodenk. 31 A, pp. 287-303.
- RICHTOFEN (F. von), 1882. China. 2ter Bd. Das nordliche China. D. Reimer, Berlin, 24, 792 p.
- ROBERTS (R. C.), 1942. Soil Survey of Puerto Rico. U.S. Dept. Agric., Soil. surv. ser. 1936, no 8, 503 p.
- ROBINSON (G. W.), 1949. Soils, their origin, constitution and classification. 3rd ed., T. Murby & Co, London, 573 p.
- ROBINSON (W. O.), HOLMES (R. S.), 1924. The chemical composition of soil colloids. U.S. Dept. Agric., Depart. Bull. 1311, 42 p.
- Ross (C. S.), 1927. The mineralogy of clays. Int. Congr. Soil Sci. 1. 1927. Washington, 4, pp. 555-561.
- Ross (C. S.), Hendricks (S. B.), 1945. Minerals of the montmorillonite group. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 205-B, pp. 23-77.
- Ross (C. S.) KERR (P. F.), 1931. The clay minerals and their identity. *Journ. sedim. Petrol.*, 1, pp. 55-65.
- Ross (C. S.), Kerr (P. F.), 1931. The kaolin minerals. U.S. Geol. Surv. prof. Pap., 165-E, pp. 151-176.
- Ross (C. S.), KERR (P. F.), 1934. Halloysite and allophane. U.S. Geol. Surv. prof. Pap., 185-G, pp. 135-148.
- SCAETTA (H.), 1936. Sur la genèse et l'évolution des cuirasses latéritiques (recherches préliminaires de pédo-écologie en Afrique occidentale française). C.R. Soc. Biogéogr., 13, pp. 14-18.
- Scaetta (H.), 1936. Recherches préliminaires de pédo-écologie. 2. Rôle des cuirasses latéritiques dans l'évolution ultérieure des sols sous-jacents. 3. Les cuirasses sub-aériennes. C.R. Soc. Biogéogr., 13, pp. 26-29.
- Scaetta (H.), 1939. Sur un phénomène d'expurgation allitique du sol tropical en Afrique occidentale. C.R. Ac. Sci., 208, p. 912-914.
- Scaetta (H.), 1940. Observations sur l'origine et la constitution des sols de l'Afrique occidentale française. *Ann. agron.*, 10, 1, pp. 101-126.
- Scaetta (H.), 1940. Résultats pédo-agronomiques de la mission Scaetta en A.O.F. 1937-1939. Rev. Bot. appl. Agric. trop., 20, 221, pp. 1-10.
- SCAETTA (H.), 1941. L'évolution des sols et de la végétation dans la zone des latérites en Afrique occidentale. C.R. Ac. Sci., 212, pp. 169-171.
- SCAETTA (H.), 1941. Rôle de la forêt humide en Côte d'Ivoire dans la captation des poussières atmosphériques et la reconstitution des colloïdes argileux du sol. *C.R. Ac. Sci.*, 212, pp. 273-276.
- Scaetta (H.), 1941. Amendements à apporter aux sols tropicaux dégradés pour la régénération de leur fertilité. C.R. Ac. Sci., 212, pp. 869-870.
- Scaetta (H.), 1941. Sur la régénération des allites intertropicales. Principes nouveaux sur la reconstitution minérale des sols des pays chauds. C.R. Ac. Sci., 212, pp. 445-447.
- Scaetta (H.), 1941. Limites boréales de la latéritisation actuelle en Afrique occidentale. C.R. Ac. Sci., 212, pp. 129-130.
- Schenck (A.), 1893. Gebirgsbau und Bodengestaltung von Deutsch Südwest afrika. Deutschen Geographentag. 10. 1893. Stuttgart, pp. 155-172.
- Schloesing (T.), 1901. Recherches sur l'état de l'alumine dans les terres végétales. C.R. Ac. Sci., 132, pp. 1203-1211.

- Schemelev (L. A.), 1928. A method of determining free aluminium oxide in silicate mixture and its application to the study of clays. *Trans. Ceram. Res. Inst. Moscou*, 14, pp. 1-24
- Scrivenor (J. B.), 1909. The use of the word laterite. *Geol. Mag.* new. ser., dec. V, vol. 6, pp. 431-432.
- Scrivenor (J. B.), 1909. The use of the term laterite. *Geol. Mag.* new ser., dec. V, vol. 6, pp. 574-575.
- Scrivenor (J. B.), 1910. The use of the term laterite. *Geol. Mag.* new ser., dec. V, vol. 7, pp. 139-140.
- Scrivenor (J. B.), 1910. The term laterite. Geol. Mag. new ser., dec. V, vol. 7, pp. 335-336.
- Scrivenor (J. B.), 1910. Laterite and bauxite. *Geol. Mag.* new ser., dec. V, vol. 7, pp. 382-384.
- Scrivenor (J. B.), 1929. Laterite. Malay. agric. Journ., 17, pp. 454-459.
- Scrivenor (J. B.), 1930. Laterite. Geol. Mag., 67, pp. 24-28.
- Scrivenor (J. B.), 1930. Laterite. (Letter to editor), Geol. Mag., 67, pp. 382-384.
- SEELYE (F. T.), GRANGE (L. I.), DAVIS (L. H.), 1930. The laterites of Western Samoa. Soil Sci., 45, pp. 23-31.
- SEN (A.), DEB (B. C.), BHATTACHARJI (P. B.), CHAKRAVORTY (J. N.), 1941. Studies on laterite and red soils of India. 5. The silica/sesquioxide ratio of the clay fraction. *Ind. Journ. agric. Sci.*, 11, pp. 646-651.
- SHARPE (C. F. S.), 1938. Landslides and related phenomena. Columbia Geomorphic Studies II. Columbia Univ. Press. New-York, 15-139 p.
- SHAW (C. F.), 1927. A uniform international system of soil nomenclature. Intern. Congr. Soil Sci., 1. 1927. Washington, 4, pp. 32-37.
- SIMPSON (E. S.), 1912. Notes on laterite in Western Australia. Geol. Mag., dec. V, vol. 9, pp. 399-406.
- SMYTH (C. H.), 1913. The relative solubilities of the chemical constituents of rocks. *Journ. Geol.*, 21, pp. 105-120.
- Sokolovsky (A. N.), 1930. The nomenclature of the genetic horizons of soils. Intern. Congr. Soil Sci. 2. 1930. Leningrad. Moscou, 5, pp. 153-154.
- Stephens (C. G.), 1947. Functional synthesis in pedogenesis. *Trans. roy. Soc. Sci. Austr.*, 71, pp. 168-181.
- Stephens (C. G.), 1961. Laterite at the type locality, Angadipuram, Kerala, India. *Journ. Soil Sci.*, 12, 2, pp. 214-217.
- Stremme (H.), 1911. Allophan, Halloysit und Montmorillonit sind in der That nur Gemenge von Tonerde und Kieselsauregel. Zentralblatt f. Min. Geol. Pal., pp. 205-211.
- Thorp (J.), 1935. Geographic distributions of the important soils of China. *Bull. Geol. Soc. China*, 14, pp. 119-146.
- THORP (J.), 1935. A provisional soil map of China with notes on Chinese soils. Intern. Congr. Soil. Sci. 3. 1935. Oxford, 1, pp. 275-276.
- THORP (J.), BALDWIN (M.), 1938. New nomenclature of the higher categories of soil classification as used in the Department of Agriculture. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 3, pp. 260-268.
- THORP (J.), BALDWIN (M.), 1940. Laterite in relation to soils of the tropics. Ann. Ass. amer. Geogr., 30, pp. 163-194.
- THORP (J.), SMITH (G.D.), 1949. Higher categories of soil classification: order, suborder and great soil group. Soil Sci., 67, pp. 117-126.
- THUGUTT (S. J.), 1895. Zur Chemie einiger Alummonosilicate. Neues Jahrb. f. Min. Geol. Pal., 9, pp. 554-623.

- THUGUTT (S. J.), 1911. Sind wirklich Allophan, Halloysit und Montmorillonit einfach nur Gemenge von Tonerde und Kieselsauregel. Zentralblatt für Min. Geol. Pal., pp. 97-103.
- TKATCHENKO (B.), 1936. Remarques sur le processus de latéritisation en terres grises. Bull. écon. Indoch., 39, h.-s., pp. 167-181.
- ULPIANI (C.), 1912. Lateritisation of soils in arid climates. Staz. Sper. Agr. Ital., 45, pp. 629-653.
- URVOY (Y.), 1935. Terrasses et changements de climat quaternaires à l'est du Niger. Ann. Geogr., 64, pp. 254-263.
- Urvoy (Y.), 1942. Les bassins du Niger, étude de géographie physique et de paléogéographie. Mém. Inst. fr. Afr. noire, nº 4, Larose, Paris, 143 p.
- VAGELER (P.), 1930. Grundris der tropischen und subtropischen Bodenkunde. Verlagsgesellschaft für Ackerbau, Berlin, 218 p.
- VAGELER (P.), 1933. An introduction to tropical soils. MacMillan & Co, London, 240 p.
- Van Baren (J.), 1927. Profiles of limestones soils from the tropics. Intern. Congr. Soil Sci. 1. 1927. Washington, 4, pp. 173-193.
- Van Baren (J.), 1928. Microscopical., physical and chemical studies of limestones and limestone soils from the east Indian Archipelago. Comm. Geol. Inst. Agric. Univ. Wageningen, 14, 195 p.
- Van Baren (J.), 1931. Properties and constitution of a volcanic soil, built up in 50 years in the East Indian Archipelago. Comm. Geol. Inst. Agric. Univ. Wageningen, 17, pp. 1-29.
- Van Bemmelen (J. M.), 1877. Das Absorptionsvermögen der Ackererde. Landw. Vers. Stat., 21, pp. 135-191.
- Van Bemmelen (J. M.), 1888. Die Absorptionsverbindungen und das Absorptionsvermögen der Ackererde. *Landw. Vers. Stat.*, 35, pp. 67-136.
- Van Bemmelen (J. M.), 1904. Beitrage zur Kenntniss der Verwitterungs Produkte der Silikate in tonvulkanischen und laterit Boden. Zutsch. Anorgan. u. Allg. Chem., 42, pp. 265-314.
- Van Bemmelen (J. M.), 1910. The various kinds of weathering of the silicate rocks of the earth's crust. Zutsch. Anorgan. u. Allg. Chem., 56, pp. 322-357.
- Van Der Merwe (C. R.), 1935. Laterites and lateritic red earths in the Union of South Africa. Intern. Congr. Soil. Sci. 3. 1935. Oxford, 1, pp. 297-300.
- VAN HISE (C. R.), 1904. A treatise on metamorphism. U.S. Geol. Surv., Monogr. 47, 286 p.
- Veath (A. C.), 1935. Evolution of the Congo basin. Geol. Soc. Amer., Mem. 3, Washington, 183 p.
- Vernadsky (W. J.), 1922. Sur le problème de la décomposition du kaolin par les organismes. C.R. Ac. Sci., 175, pp. 450-452.
- VINE (H.), 1949. Nigerian soils in relation to parent material. Comm. Bur. Soil Sci., Techn. Comm. 46, Harpenden, pp. 22-29.
- Walther (J.), 1889. Bericht über die Resultate einer Reise nach Ost-Indien im Winter. Vehr. Gesellsch. Erdk., 16, pp. 318-328.
- Walther (J.), 1890. Report of a journey through India in the winter of 1888-89. Translated from the german by R. Bruce Foote. Rec. geol. Surv. India, 23, pp. 110-120.
- Walther (J.), 1891. On veins of graphite in decomposed gneiss (laterite) in Ceylon. Translated by R. Bruce Foote. *Rec. geol. Surv. India*, 24, pp. 42-45.
- Walther (J.), 1912. Das Gesetz der Wüstenbildung, in Gegenwart und Vorzeit. 4° ed., Quelle und Meyer, Leipzig.
- Walther (J.), 1915. Der Laterit in West Australien. Zeitschr. dtsch. Geol. Gesellsch. 67. Monatsber. 4, pp. 113-140.
- Walther (J.), 1916. Das geologische Alter und die Bildung des Laterits. Peterm. Mitt. Geogr., 62, nr 315, pp. 1-7; nr 318, pp. 46-53.

- Warth (H.), Warth (F. J.), 1903. The composition of Indian laterite. Geol. Mag., dec. IV, vol. 10, pp. 154-159.
- Wayland (E. J.), 1934. Peneplains and some other erosional platforms. Geol. Surv. Uganda, *Ann. Rept.*, pp. 77-79.
- WHITEHOUSE (F. W.), 1940. Studies in the late geological history of Queensland. 1. The lateritic soils of Western Queensland. Univ. Queensl. Pap. Dept. Geol., 2, 1, pp. 1-22.
- Willis (B.), 1936. East African plateaus and rift valleys. Carnegie Inst. Publ. 470, Washington, 10, 358 p.
- Woolnough (W. G.), 1918. The physiographic significance of laterite in Western Australia. *Geol. Mag.* new ser., dec. VI, vol. 5, pp. 385-393.
- Woolnough (W. G.), 1928. Origin of white clays and bauxite and chemical criteria of peneplanation. *Econ. Geol.*, 23, 8, pp. 887-894.
- Woolnough (W. G.), 1930. The influence of climate and topography in the formation and distribution of products of weathering. *Geol. Mag.*, 67, pp. 123-132.
- Young (C. B.), 1853. A few remarks on the subject of the laterite found near Rangoon. Journ. asiatic Soc. Bengal, 22, pp. 196-201.
- ZAKHAROV (S. A.), 1930. On the nomenclature of soil horizons. Intern. Congr. Soil Sci. 2. 1930. Leningrad-Moscou, 5, pp. 150-152.

TROISIEME CHAPITRE: LES CONCEPTS ACTUELS SUR LES SOLS FERRALLITIQUES

- ALEXANDER (L. T.), HENDRICKS (S. B.), FAUST (G. T.), 1942. Occurrence of gibbsite in some soil forming materials. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 6, 1, pp. 52-57.
- AUBERT (G.), 1941. Les sols de la France d'Outre-Mer. Impr. Nat., Paris, 90 p.
- Aubert (G.), 1954. Les sols latéritiques. Congr. Intern. Sci. Sol. 5. 1954. Léopoldville, 1, pp. 103-118.
- AUBERT (G.), 1954. La classification des sols utilisée dans les territoires tropicaux de l'Union française. Conf. Interafr. Sols. 2. 1954. Léopoldville, 2, pp. 705-708.
- Aubert (G.), 1960. Classification et cartographie des sols. Observations à la suite du VII^e Congrès International de la Science du Sol. C.R. Ac. Agric., 46, pp. 901-903.
- AUBERT (G.), 1963. La classification des sols. La classification pédologique française. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., 3, 3, pp. 1-7.
- AUBERT (G.), 1964. La classification des sols utilisée par les pédologues français en zone tropicale ou aride. Sols Africains, 9, 1, pp. 97-105.
- Aubert (G.), 1964. Les sols tropicaux. Intern. Congr. Soil. Sci. 8. 1964. Bucarest, 1, pp. 213-229.
- AUBERT (G.), 1965. La classification pédologique utilisée en France. Symposium sur la classification des sols, Gand 1962. *Pédologie*, n° sp. 3, pp. 25-56.
- AUBERT (G.), 1965. Classification des sols. Tableaux de classes, sous-classes, groupes et sous-groupes utilisés par la section de pédologie de l'O.R.S.T.O.M. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol. 3, 3, pp. 269-288.
- AUBERT (G.), BOULAINE (J.), 1967. La pédologie. P.U.F., Coll. Que sais-je?, 352, Paris, 127 p.
- Aubert (G.), Duchaufour (P.), 1956. Projet de classification des sols. Congr. Intern. Sci. Sol. 6. 1956. Paris, E, pp. 597-604.
- Aubert (G.), Maignien (R.), 1947. Les sols du Sénégal au Nord de la Gambie britannique. Conf. Pédol. Méditer. 1947. Alger-Montpellier., Ass. fr. Et. Sol, Paris, pp. 358-370.
- Aubert (G.), Segalen (P.), 1964. Note sur les unités de la classification des sols. *Bull. Bibl. Pédol.* O.R.S.T.O.M., 13, 4, pp. 7-11.
- Aubert (G.), Segalen (P.), 1966. Projet de classification des sols ferrallitiques. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., 4, 4, pp. 97-112.

- BAVER (L. D.), SCARSETH (S. D.), 1930. Subtropical weathering in Alabama as evidenced in the Susquehanna fine sandy loam profile. Soil Res., 2, pp. 288-307.
- Boissezon (P. de), 1965. Les sols de la savane des plateaux Batéké. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., 3, 4, pp. 291-298.
- Chatelin (Y.), 1964. Notes de pédologie gabonaise. 3. Examen de quelques caractères physico-chimiques de sols typiques du Gabon. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., 2, 4, pp. 17-28
- Chatelin (Y.), 1966. Essai de classification des sols ferrallitiques du Gabon. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., 4, 4, pp. 45-60.
- Chatelin (Y.), 1967. Influence des conceptions géomorphologiques et paléoclimatiques sur l'interprétation de la genèse et la classification des sols ferrallitiques d'Afrique centrale et australe. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, *sér. Pédol.*, 5, 3, pp. 243-255.
- Costa (J. V. Botelho da), 1959. Ferrallitic, tropical fersiallitic and tropical semi-aride soils definitions adopted in the classification of soils of Angola. Congr. Interafr. Sols. 3. 1959. Dalaba, 1, pp. 317-319.
- Dejou (J.), Guyot (J.), Chaumont (H.), 1967. Présence de gibbsite et de gels aluminosiliciques dans la fraction argileuse extraite de quelques arènes et sols du massif de granite à deux micas de La-Pierre-Qui-Vire (Yonne, Nièvre). C.R. Ac. Sci., 264, 16, pp. 1973-1976.
- Dejou (J.), Guyot (J.), Pedro (G.), Chaumont (H.), Antoine (H.), 1968. Nouvelles données concernant la présence de gibbsite dans les formations d'altération superficielle des massifs granitiques. C.R. Ac. Sci., 266, 18, pp. 1825-1827.
- Dejou (J.), Pedro (G.), 1967. Note sur l'évolution superficielle des granites. A propos de la formation des arènes dans les pays tempérés et de la présence de kaolinite au sein de la zone d'altération. Bull. Ass. fr. Et. Sol, 1, pp. 9-12.
- D'Hoore (J.), 1964. La carte des sols d'Afrique au 1/5.000.000°. C.C.T.A. Publ. n° 93, Lagos, 209 p.
- Duchaufour (P.), Précis de pédologie. 2e éd. Masson, Paris, 482 p.
- EDWARDS (M. G.), 1914. The occurrence of aluminium hydrates in clays. *Econ. Geol.*, 9, pp. 112-121.
- ERHART (H.), 1935-1937. Traité de pédologie. 1. Pédologie générale. 2. Pédologie agricole. Inst. Pédol., Strasbourg, 2 vol. 260 + 203 p.
- Goldschmidt (V. M.), 1928. The formation of laterite as a weathering product of norvegian labradorite. Festkr. til H. Sorlie, Oslo.
- Jonhson (W. D.), 1963. The pedon and polypedon. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 27, 2, pp. 212-215.
- Levêque (A.), 1967. Les sols ferrallitiques de Guyane française. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, nº 3 D, Paris, 168 p.
- MAIGNIEN (R.), 1961. Le passage des sols ferrugineux tropicaux aux sols ferrallitiques dans les régions sud-ouest du Sénégal. Sols Africains, 6, 2-3, pp. 113-171.
- Maignien (R.), 1964. Les sols ferrugineux tropicaux. Intern. Congr. Soil Sci. 8. 1964. Bucarest, 5, pp. 569-575.
- Maignien (R.), 1968. Les sols ferrugineux tropicaux. Unités pédologiques. O.R.S.T.O.M., Yaoundé, 34 p. multigr.
- MAIGNIEN (R.), 1969. Evolution de la notion sol au cours des vingt années d'études pédologiques en Afrique. O.R.S.T.O.M., Yaoundé, 15 p. multigr.
- MARBUT (C. F.), 1927. A scheme for soil classification. Intern. Congr. Soil. Sci. 1. 1927. Washington, 4, pp. 1-31.
- Martin (D.), 1966. Etudes pédologiques dans le Centre-Cameroun (Nanga Eboko à Bertoua). *Mem. O.R.S.T.O.M.*, nº 19. Paris, 91 p.
- Martin (D.), Sieffermann (G.), Vallerie (M.), 1966. Les sols rouges du Nord-Cameroun. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Péaol., 4, 3, pp. 3-28.

- ROBINSON: (G. W.), 1949. Soils, their origin, constitution and classification. 3rd ed. Murby & Co, London, 573 p.
- Segalen (P.), 1957. Etude des sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. Mem. Inst. sci. Madagascar, sér. D, 8, pp. 1-195.
- Segalen (P.), 1967. Les facteurs de formation des sols ferrugineux tropicaux. O.R.S.T.O.M., Paris, 13 p. *multigr*.
- Sys (C.), 1959. Cartographie et classification régionale des sols au Congo belge. Conf. Interafr. Sols. 3. 1959. Dalaba, 1, pp. 291-302.
- Sys (C.), 1959. La classification des sols congolais Conf. Interafr. Sols. 3. 1959. Dalaba, 1, pp. 303-312.
- Sys (C.), 1961. La cartographie des sols au Congo. Ses principes et ses méthodes. I.N.E.A.C. Publ. sér. Techn., n° 66, Bruxelles, 149 p.
- Soil Survey Staff, 1937. Soil survey manual. 1st. ed. U.S. Dept. Agric., Misc. Publ. 274, 136 p.
- Soil Survey Staff, 1951. Soil survey manual. 2nd ed. U.S. Dept. Agric., Agric. Handbook 18, 503 p.
- Soil Survey Staff, 1960. Soil classification. A comprehensive system. 7th approximation. U.S.D.A., Washington, 265 p.
- Tardy (Y.), 1969. Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse, Strasbourg, 274 p. multigr.
- THORP (J.), SMITH (G. D.), 1949. Higher categories of soil classification: order, suborder and great soil group. Soil Sci., 67, pp. 117-126.
- TRICART (J.), CAILLEUX (A.), 1965. Traité de géomorphologie. 1. Introduction à la géomorphologie climatique. 5. Le modelé des régions chaudes, forêts et savanes. S.E.D.E.S., Paris, 1. 306 p., 5. 322 p.
- Vigneron (J.), 1959. Premières études de sols dans le territoire du Gabon. O.R.S.T.O.M., Brazzaville, 96 p. multigr.

	,		
		,	

INDEX DES NOMS D'AUTEURS

Tous les auteurs cités dans le texte sont répertoriés ci-après, avec les numéros des pages correspondantes. Il en est de même pour les co-auteurs, bien que souvent leurs noms aient été remplacés par « & coll. ». Dans ce dernier cas, l'index indique une page ou n'apparaît pas le nom en question, mais grâce au nom de l'auteur principal la liste bibliographique permettra de vérifier facilement à quel ouvrage il est fait référence. Quelques publications n'ont pas été mentionnées dans le texte mais sont cependant incluses dans la liste bibliographique. Dans l'index, les noms de leurs auteurs sont suivis d'un astérique.

A

Afanasieff (J.), 39, 47.
Agafonoff (V.), 37, 39, 41, 42, 47, 55, 65.
Alexander (L. T.), 69.
Allison (R. V.), 39, 43, 46, 60.
Antoine (H.), 69.
Arsandaux (H.), 14, 22, 23, 24, 29, 31.
Aubert (G.), 48, 57, 58, 61, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 72.
Aufrere (L.), 40, 49.

В

Babington (B.), 15, 37. BAEYENS (J.), 51, 55 à 57. BALDWIN (M.), 58, 59. BALL (V.), *. BAREN (Van J.), 39, 56, 61. Bassalik, 35. BAUER (M.), 15 à 18, 21, 25, 30, 35, 36, 68. Baver (L. D.), 69. BEAUMONT (E. de), 24. BENNETT (H. H.), 39, 43, 45, 46, 60. BERTHIER (P.), 15, 17. BESAIRIE (H.), 57. BISHOPP (D. W.), 35, 40, 43. BLAKE (G. S.), * BLANDFORD (W. T.), 27, 29, 33. BLONDEL (F.), 25, 35, 40. Вонмеке, 44. Boissezon (P. de), 69. BONNAULD (D.), * BONNET (J. A.), 60. BOULAINE (J.), 64. Bradley (W. F.), 42. BRAGG, 41. Branner (J. C.), 11, 35. BRAUER, 16. BRAY (R. H.), 42. Brindley (G. W.), 42. Buchanan (F.), 5 à 14, 31.

BURTON (R. C.), 34. BUSHNELL (T. M.), *. BUSZ. 16.

\mathbf{C}

CAHEN (L.), 56. CAILLERE (S.), 42. Cailleux (A.), 65. CAMARGO (T.), 50. CAMPBELL (J. M.), 20, 23, 24, 26, 28, 30, 34, 35. CASTAGNOL (E. M.), 40, 47, 48, 65. CHAKRAVORTY (J. N.), 50. CHATELIN (Y.), 65, 69. CHAUMONT (C.), 69 CHAUTARD (J.), 22, 30. CHETELAT (E. de), 41, 53, 54. CLARKE (F. W.), 35, 36. CLINE (M. G.), 60. Costa (Botelho Da), 61, 63, 66. COSTIN (A. B.), 41. CORRENS (W.), 44. CRAIG (N.), 50, 56. CROOK (T.), 32. CROWTHER (E. M.), 49.

D

Darwin (C.), 11, 34.

Daubree (A.), 44.

Davis (L. H.), 56.

Davis (W. M.), 28, 37.

Davol (F. D.), 61.

Deb (B. C.), *.

Debye (P.), 41.

Dejou (J.), 69.

Deuss, 29.

D'hoore (O.), 63.

Dietrich (W. G.), 57.

Dixey (F.), 56.

Dokuchaiev (V. V.), 37, 39.

Doyne (H. C.), 43, 48, 50, 57, 60.

Dresch (J.), 56. Du Bois (G. C.), 25, 35. Duchaufour (P.), 64, 67, 68. Du Toit (A. L.), 56.

E

EDELMAN (C. H.), 44, 51, 52, 56, 57, 61. EDWARDS (M. G.), 69. ERHART (H.), 39, 41, 45, 48, 50, 57, 65, 68.

F

FAUST (G. T.), 69.
FAVERJEE (J. C. L.), 44.
FERMOR (L. L.), 20, 27, 30, 31, 32, 34, 68.
FOLLET-SMITH (R. R.), 18, 47, 48, 60.
FOOTE (R. B.), 27, 29.
FORBES, 34.
FOX (C. S.), 12, 24, 28, 29, 34, 36, 39.
FRY (W. H.), 42.

G

GEDROIZ (K. K.), 39.
GEZE (B.), 49, 57.
GLANGEAUD (L.), 48, 49, 55.
GLINKA (D. K.), 13, 35, 37, 39.
GOLDSCHMIDT (V. M.), 69.
GOODYEAR (J.), 42.
GRANGE (L. I.), 56.
GREENE (H.), 40, 49, 50, 52, 53, 55, 57, 60.
GREENOUGH (G. B.), 24.
GRIM (R. E.), 42.
GUICHARD (F.), *.
GUYOT (J.), 69.

H

HALAIS (P.), 50, 56. HALLSWORTH (E. G.), 41. HARDON (H. J.), 44. HARDY (F.), 18, 40, 42, 47, 48, 50, 56, 60. HARRASSOWITZ (H.), 14, 27, 30 à 39, 45, 61. HARRISON (J. B.), 14, 17 à 20, 22 à 28, 30 à 34, 37, 44, 61, 68. HARTT (C. F.), 11. HENDRICKS (S. B.), 42, 68. HENRY (Y.), *. HEUSSER (H.), 16. HISLOP, * HOCART (R.), 42. HOLDEN, 34. HOLLAND (T. H.), 11, 28, 34, 35. HOLMES (R. S.), 49. Норе, 44. HULL, 34, 41. HUMBERT (R. P.), 42, 50.

I

IRVINE (R.), 35.

J

Jannettaz (E.), 15. Johnson (W. D.), 64. Joffe (J. S.), 40, 60, 61. Jouravsky (G.), 42.

K

KAY (G. F.), 55. KELAART (E. F.), 16. KELLEY, 44. KELLOGG (C. E.), 59 à 62. KERR (P. F.), 42. KING (L. C.), 56. KING (W.), *. KURON (H.), 57.

L

LACROIX (A.), 14, 20 à 22, 24 à 28, 30 à 35, 37, 39, 47, 53, 58, 65, 68.

LAKE (P.), 12.

LANG (R.), 24, 29, 35, 45.

LAPPARENT (J. de), 42, 43.

LAUE, 41.

LE CHATELIER (H.), 42.

LEMOINE (P.), 22, 30.

LENZ (O.), 15.

LEPERSONNE (J.), 56.

LEVEQUE (A.), 65.

LE VIET KHOA, 47, 48.

LIEBRICH (A.), 17, 24, 35, 69.

LOGAN (J.R.), 15.

LOMBARD (J.), 40, 54, 55.

M

MACLAREN (M.), 24. MAIGNIEN (R.), 12, 13, 57, 65, 69, 71. MALLET (F. R.), 15, 24, 26, 27, 34. MANIFOLD (C. B.), 45. MARBUT (C. F.), 17, 37, 39, 41, 45 à 48, 58 à 60, 64. MARCANO, 36. MARSHALL (C. E.), 42. MARTIN (D.), 65. MARTIN (F. J.), 43, 48, 50, 57, 60. MATTSON (S.), 44. Mauguin (C.), 42. MEDLICOTT (H. B.), 27, 29, 34. MERRILL (G. P.), 27, 30, 37. MEUNIER (S.), 15. MILLOT (G.), 43. MILNE (G.), 40, 51, 55, 56, 60. Mohr (E. C. J.), 23, 30, 40, 44, 46, 52, 53, 56, MUKHERJEA (K. C.), 48. MUNTZ (A.), 15, 29, 34, 36. MURRAY (J.), 35.

\mathbf{N}

Neustrev (S. S.), 39. Newbold (T. J.), 15, 24, 31. 0

OLDHAM (R. D.), 34. ORCEL (J.), 42.

P

Passarge (L.).
Passarge (S.), 25.
Pauling (L.), 42.
Pavlovitch (S.), 42.
Pechuel-Loesche (E.), *.
Pedro (G.), 69.
Pendleton (R. L.), 12, 60.
Pham Gia Tu, 47, 48.
Prescott (J. A.), 12.

\mathbf{R}

RAYCHAUDHURI (S. P.), 42, 48, 50, 57.
REFORMATSKY (N.), 40.
REID (K. D.), (V. Harrison).
REIFENBERG (A.), 49.
RICHTOFEN (F. Von), 29.
ROBERTS (R. C.), 60.
ROBINSON (K.), 42.
ROBINSON (G. W.), 43, 46, 48, 56, 60, 61, 66.
ROBINSON (W. O.), 49.
RODRIGUES (G.), 40, 56, 60.
ROSS (C. S.), 39, 42.
ROUSSEAUX (E.), 15, 29.

S

SCAETTA (H.), 41, 46, 49, 50, 55.
SCARSETH (S. D.), 69.
SCHENCK (A.), 14.
SCHERRER (P.), 41.
SCHLOESING (T.), 13.
SCHMELEV (L. A.), 42.
SCRIVENOR (J. B.), 25, 32, 34.
SEELYE (F. T.), 56.
SEGALEN (P.), 65, 67, 68, 71, 77.
SEN (A.), *.
SHARPE (C. F. S.), 55.
SHAW (C. F.), 39, 42.
SIEFFERMANN (G.), 65.
SIMPSON (E. S.), 24.
SMITH (G. D.), 61, 63.
SMYTH (C. H.), *.

SOKOLOVSKY (A. N.), 39. STEPHENS (G. C.), 12, 56. STREMME (H.), 13. SULAIMAN (M.), 42, 48. SYS (C.), 61, 64.

T

TAMM, 44. TARDY (Y.), 69. TATE, 34. THORP (J.), 58 à 63. THUGGUTT (S. J.), 13, 24, 69. TKATCHENKO (B.), 41, 47, 65. TRICART (J.), 65.

U

ULPIANI (C.), *. URVOY (Y.), 56.

${f v}$

VAGELER (P.), 29, 35 à 39, 41, 50, 57. VALLERIE (M.), 65. VEATCH (A. C.), 56. VERNADSKY (W. J.), 35. VIGNERON (J.), 71. VINE (H.), 41, 55. VAN BAREN (F. A.), 30, 40, 52, 53, 56, 61. VAN BEMMELEN (J. M.), 14, 29. VAN HISE (C. R.), 30. VAN MERWE (C. R.), 43, 48, 60.

W

Walther (J.), 24 à 29, 31, 34, 35, 36, 37, 45. Warth (H.) & (J. F.), 14, 22, 31, 32. Wayland (E. J.), 56. Whitehouse (F. W.), 56. Willis (B.), 56. Woolnough (W. G.), 25, 28, 29, 34, 37, 39.

 \mathbf{Y}

YOUNG (C. B.), 16.

 \mathbf{Z}

ZAKHAROV (S. A.), 39.

•		
	•	

SOMMAIRE

Préface	
AVANT-PROPOS	ç
Chapitre premier. — L'étude des latérites durant le 19e siècle et les trois premières décades du 20e	
1.1. Buchanan et le terme «latérite»	12
1.2. Les connaissances minéralogiques et les méthodes d'analyses	13
1.3. Premières découvertes sur la composition ferrugineuse et alumineuse des latérites	14
14.1. La découverte fondamentale faite par BAUER	15 16 17 20 22
15.1. La dépendance des latérites vis-à-vis du climat 15.2. Les influences lithologiques 15.3. La morphologie des latérites et l'action des nappes 15.4. La place physiographique des latérites 15.5. L'âge des latérites	24 24 25 26 27 28
1.6. Définitions, terminologies, classifications. Les grandes controverses	29 30 30 31
1.7. Les théories tombées en désuétude	33
1.8. Les hommes qui étudient les latérites au 19° et au début du 20° siècle	36
Chapitre deuxième. — L'étude des sols latéritiques des années 1927 à 1949	39
_	40
	41

22.1. La minéralogie des argiles	41 42 44
2.3. L'analyse morphologique et physio-chimique des sols latéritiques	45 45 47 48
2.4. L'évolution des sols latéritiques dans le contexte écologique et physiographique 24.1. Sols latéritiques et climats, le principe de zonalité 24.2. Catena, toposéquence, chaîne de sols 24.3. Le « modelé latéritique » 24.4. Autochtonie ét allochtonie des sols 24.5. Le développement des sols au cours du temps	49 49 51 53 55 56
2.5. Les premières classifications pédologiques	57
2.6. Les équipes de recherche	60
2.7. Fin de la période « historique » et début de la période moderne	61
Chapitre troisième. — Les concepts actuels sur les sols ferrallitiques	63
3.1. Quand il s'agit de sol ferrallitique, qu'est-ce que le sol?	64
3.2. Les définitions des sols ferrallitiques	66
3.3. Le concept central et ses limites	68
3.4. Les caractères non spécifiques ou secondaires	70
3.5. Vers une conception zonale des sols ferrallitiques	71
3.6. Conclusion	72
Bibliographie	75
INDEX DES NOMS D'AUTEURS	93

O.R.S.T.O.M.

Direction générale :

24, rue Bayard, PARIS-8e

Services Scientifiques Centraux:

Service Central de Documentation :

70-74, route d'Aulnay - 93 - BONDY

O.R.S.T.O.M. Éditeur I.T.Q.A.-CAHORS. — 20.099 Dépôt légal : 4* trim. 1972