

Latérites et autres sols des régions intertropicales

par Jean-Paul Legros

MOTS-CLES : pédogenèse, sols tropicaux, latérite, ferralitique, ferralsol, oxisols, altérites, bauxites, kaolinites, hématite, fronts d'altérations.

RESUME : Des sols rouges riches en fer, aluminium et kaolinite couvrent l'essentiel de la zone intertropicale. Après avoir examiné comment les Européens ont fait leur connaissance, on s'efforce de définir les principaux types puis de présenter succinctement leur mode de formation et la durée correspondante. Les régions tropicales sont particulièrement intéressantes car l'altération des roches y est plus longue, complète et perceptible qu'en milieu tempéré. La Science du sol toute entière se trouve donc éclairée par leur étude. En outre, les sols trouvés là intéressent non seulement l'agriculture mais aussi l'industrie.

INTRODUCTION

Les latérites et beaucoup d'autres sols des régions intertropicales sont situés dans des zones où il fait très chaud et où les pluies sont abondantes, soit toute l'année, soit au cours d'une saison humide. Ce sont les sols en rouge sur le schéma qui suit (Fig. 1).

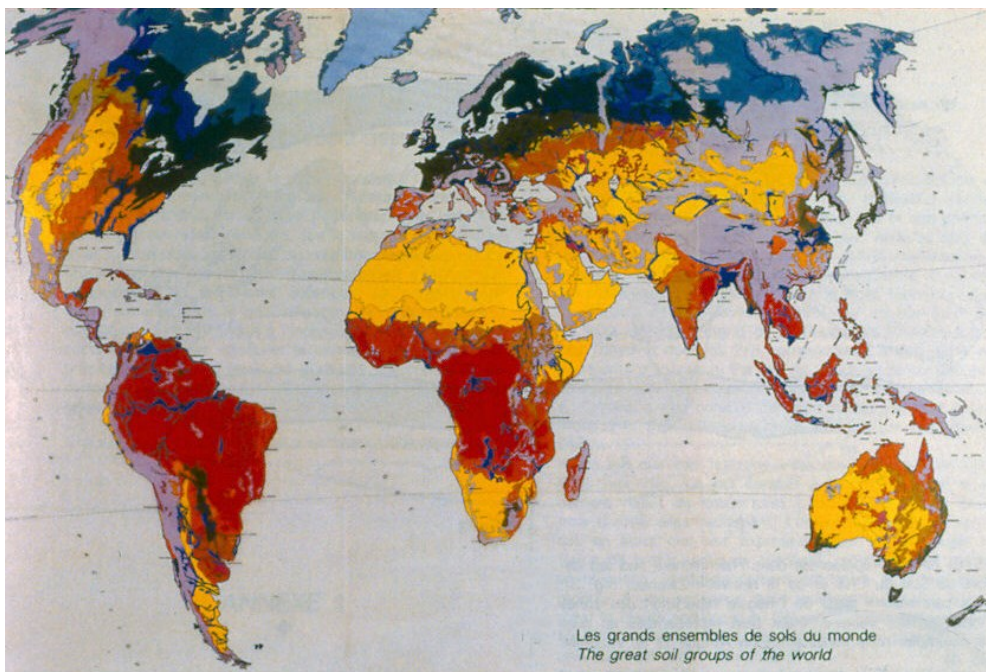


Figure 1. La répartition des sols dans le Monde ; source AFES, congrès mondial 1998).

Les roches s'altèrent donc profondément. En outre, ces régions intertropicales sont pour l'essentiel constituées de plaques tectoniques très stables où manquent les montagnes jeunes liées à des pentes fortes. Donc l'érosion latérale de surface est limitée d'autant plus que la couverture forestière est importante (Congo, Amazonie...). Bref les sols de la zone intertropicale sont les plus profonds du Monde (20 m et parfois 100 ou 200 m) ; ils sont en même temps les plus vieux du Monde et les plus fortement transformés par rapport aux roches qui leur ont donné naissance. Certes, il est difficile de connaître toutes les vicissitudes qu'ils ont subies au cours de leur longue vie. Mais ils constituent des modèles. Quand on a compris comment ils se forment et évoluent, on a saisi l'essentiel de la genèse des sols, discipline appelée *pédogenèse*. C'est la raison pour laquelle, dans les ouvrages que j'ai écrits sur les sols, le cas des régions tropicales a été traité en tête. Il est central pour aborder notre discipline [LEGROS 2007 et 2012].

Les sols dont il va être question sont communs entre tropique du Cancer et tropique du Capricorne, ceci en Amérique du Sud, au cœur de l'Afrique et aussi en Inde et dans une partie de l'Asie. Ils représentent un tiers des terres émergées et nourrissent une partie importante de l'Humanité.

Le plan de l'exposé sera le suivant : dans une première partie on envisagera les matériaux et leur évolution en milieu intertropical. C'est le passage obligé pour comprendre le reste. Pour diminuer la complexité de l'exposé, toute formule chimique est évitée. Dans une deuxième partie, on présentera la dynamique des sols, ou comme on dit dans notre jargon, la dynamique des « *profils* ». Nous verrons que ces profils sont constitués de couches superposées, distinguées par leurs natures et par leurs couleurs spécifiques. Elles sont appelées *horizons* en raison de leur horizontalité qui est le cas général, sauf sur les pentes. Dans une troisième et dernière partie, on envisagera les conséquences des observations faites, ceci aux plans scientifique, agronomique et industriel.

Le caractère compact d'une telle conférence interdit ici de reprendre toute la bibliographie utile. On la trouvera dans les différents ouvrages de synthèse cités.

I. LES MATERIAUX ET LEUR EVOLUTION

1) Un peu d'histoire

Au tout début du XIXe siècle, précisément en 1807, un Ecossais du nom de Francis Buchanan-Hamilton (15 février 1762 – 15 juin 1829) travaillait au Bengale pour le compte de la *British East India Compagny* [BOURGEOIN et GUNNELLY, 2005]. Il décrit des matériaux géologiques rougeâtres, relativement meubles et qui pouvaient être extraits à la scie ou à la hache. Les gens s'en servaient pour bâtir leurs maisons car ils avaient la propriété de durcir à l'air et constituaient donc d'assez bon matériaux de construction. Il les baptisa *latérites* du latin *later* qui veut dire brique. Notons au passage que, dans le Monde actuel, une partie très importante des habitations est encore bâtie en terre.

On s'aperçut assez rapidement, grâce aux observations et analyses, que les matériaux observés dans la zone intertropicale étaient très diversifiés (teneurs très variables en silice, fer et aluminium). Tous ne s'indurèrent pas avec le temps. En

conséquence, la signification du mot latérite s'élargit, dérive, et fut bientôt synonyme de sol tropical [MAIGNIEN, 1964]. Or ceux-ci étaient de toutes sortes de types. Les scientifiques furent donc amenés à abandonner ce terme décidément trop flou. Plus exactement, pour caractériser les matériaux durcis, et eux seuls, ils remplacèrent le mot latérite par le mot plinthite qui lui aussi veut dire brique, mais en grec cette fois. Reste que le terme latérite persista dans les ouvrages grand public.

2) Nature des matériaux dans la zone intertropicale

Dans les sols tropicaux, on trouve des oxydes de fer très rouges, de formule Fe_2O_3 , dont le nom est **hématite**. Mais il s'y observe aussi des oxydes de fer contenant des oxhydroyles OH, que l'on peut donc considérer comme hydratés (hydroxydes) et qui correspondent à la formule Fe-O-OH. Il s'agit de la **goethite**, ocre-jaune. Cette dernière se rencontre sous toutes les latitudes.

Est présente aussi la **gibbsite**, oxyde d'aluminium de formule Al_2O_3 . En principe, elle est parfaitement blanche. En réalité, elle est presque toujours associée à des oxydes de fer, dans la masse ou en concrétions individualisées, qui lui donnent une couleur rouge ou rosée. Les industriels appellent **bauxite** ce mélange dès lors qu'il est riche en aluminium.

A ces minéraux s'ajoute encore le **quartz**, de formule SiO_2 .

Si la gibbsite, l'hématite, le quartz et aussi la kaolinite que nous allons examiner plus loin sont abondants en milieu intertropical, c'est parce qu'ils sont relativement résistants à l'altération physico-chimique (le quartz) ou bien constituent les produits de cette altération (tous les autres).

Voyons la structure des principaux de ces minéraux, à l'échelle atomique, car elle permet de comprendre leurs propriétés physiques et chimiques (Fig. 2).

3) Structure et évolution des argiles et autres minéraux phylliteux

La **gibbsite** est constituée d'atomes d'oxygènes O associés à des hydrogènes H pour former des oxhydroyles OH. L'ensemble constitue deux plans superposés liés par des liaisons ioniques et enfermant des ions aluminium. La *maille* élémentaire, c'est-à-dire la structure la plus petite restant représentative de l'ensemble, est constituée d'un atome d'aluminium enserré entre six atomes d'oxygène, trois en haut et trois en bas. On ne confondra pas la « maille » avec la « molécule », entité finie qui n'a pas de signification dans le monde minéral. En effet les plans d'atomes, ici constitués d'oxygène peuvent se développer latéralement presque à l'infini. En réalité, dans le cas qui nous préoccupe, cet infini des structures cristallines est limité à quelques microns. C'est déjà considérable car cela représente une dizaine de milliers d'atomes parfaitement alignés ! Cet alignement ne se fait que dans un seul plan.

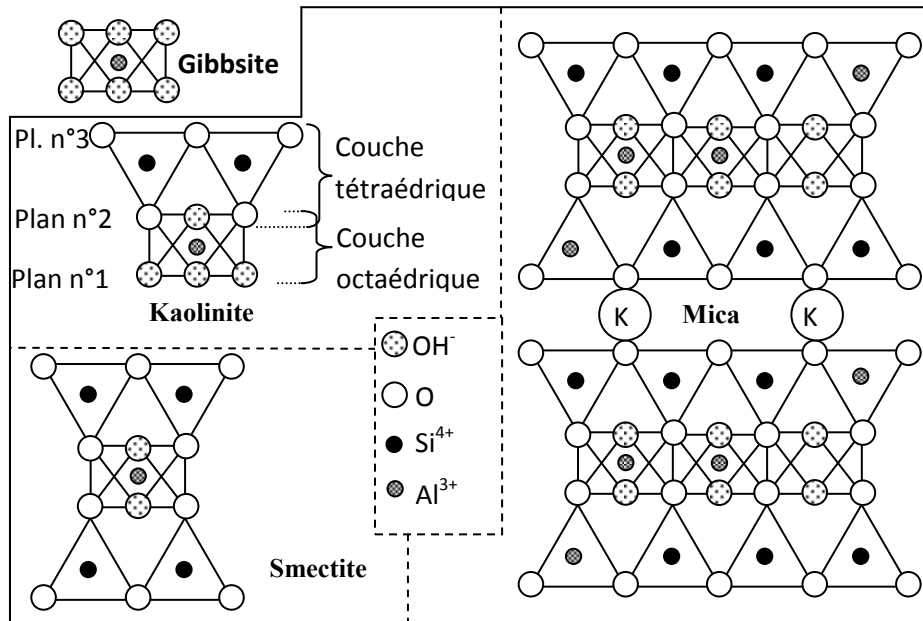


Figure 2 : Structures de la gibbsite et des principaux types d'argiles. Extrait de « Les Grands Sols du Monde », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes [LEGROS, 2007].

La kaolinite, l'argile caractéristique du milieu intertropical, est à trois couches d'atomes alignés en trois plans superposés. En conséquence, on parle de feuillets et donc de *minéral phylliteux*. Cette kaolinite peut être décrite à partir de la structure de la gibbsite sur laquelle on plante, par la pointe, des tétraèdres formés de quatre atomes d'oxygène enserrant un atome de silicium Si. Du côté de la *couche gibbsitique*, donc en bas sur le schéma, on a des oxhydyles OH et de l'autre, des oxygènes O. La kaolinite présente donc des faces différentes. En conséquence, entre deux feuillets successifs, il s'établit des liaisons hydrogène favorisant leur attraction mutuelle. On obtient des *cristallites* comprenant jusqu'à 160 feuillets collés [NAHON, 2008]. Par ailleurs, la kaolinite est électriquement neutre. Au total, elle ne retient facilement ni l'eau ni les ions que cette eau contient.

Les smectites (dont la montmorillonite définie en France à Montmorillon) sont au contraire des argiles symétriques. Elles présentent des couches de tétraèdres à la fois au-dessus et en dessous de la couche gibbsitique. Donc, sur leurs faces, on ne trouve que des oxygènes O. En conséquence, des liaisons hydrogène ne peuvent s'établir. Les feuillets ont tendance à se repousser et ils restent séparés les uns des autres. Plus exactement, ils forment des empilements limités à 10 ou 20 feuillets. Tout cela se voit au microscope électronique. Par ailleurs et de par leur composition, ces feuillets ne sont pas neutres électriquement. En conséquence, sont facilitées : l'absorption de l'eau, l'absorption d'ions chargés positivement (cations) et aussi de matières organiques ou matières grasses. Dans la région méditerranéenne, la « terre de Sommières » (dégraissante) est l'exemple caractéristique.

Il existe un troisième type d'argile. Il s'agit de la famille des illites. Elles ressemblent aux précédentes mais les feuillets sont solidement liés par des ions potassium.

Le plus important est de bien comprendre que ces minéraux peuvent dériver les uns les autres au cours de l'évolution des sols par un processus de désilification dès lors que circule de l'eau susceptible de prendre en charge de la silice. Une des deux couches de tétraèdres peut être perdue. On passe des smectites aux kaolinites. Et cette dernière peut encore perdre la couche de tétraèdres qui lui reste pour donner une gibbsite. En conséquence, les smectites sont caractéristiques des milieux les plus secs et la gibbsite est caractéristique des milieux les plus humides.

4) Structure et évolution des oxydes de fer

Le fer, sous forme d'hématite, a une structure voisine de la gibbsite. Simplement, alors que dans la gibbsite les couches d'oxygène renferment des atomes d'aluminium, dans l'hématite les couches d'oxygène enserrent des atomes de fer. L'hématite est un minéral insoluble. Toutefois, dans les sols gorgés d'eau en permanence, l'hématite s'hydrate, se transforme en goëthite qui est soluble. Le sol jaunit (en relation avec la couleur de la goëthite), voire blanchit complètement quand tous les oxydes de fer sont éliminés.

Dans ces conditions, les sols des milieux équatoriaux saturés d'eau, sont blancs, dépourvus de fer et souvent riches en gibbsite comme nous venons de le voir. Au contraire, les sols des milieux tropicaux avec saison sèche sont rouges et contiennent de grandes quantités de fer associé à de la kaolinite.

5) Incroyable variétés des matériaux résultant de l'altération

Nous voici maintenant face un schéma tout à fait essentiel (Fig. 3). Il peut sembler compliqué ; il est très simple en réalité. Prenons un granite, un gneiss ou un schiste qui contient systématiquement de la silice SiO_2 , de l'aluminium Al_2O_3 , du fer Fe_2O_3 , et des cations tels que magnésium, potassium, calcium, sodium. Avec le temps, la nature peut extraire séparément ou bien en combinaison ces différents éléments.

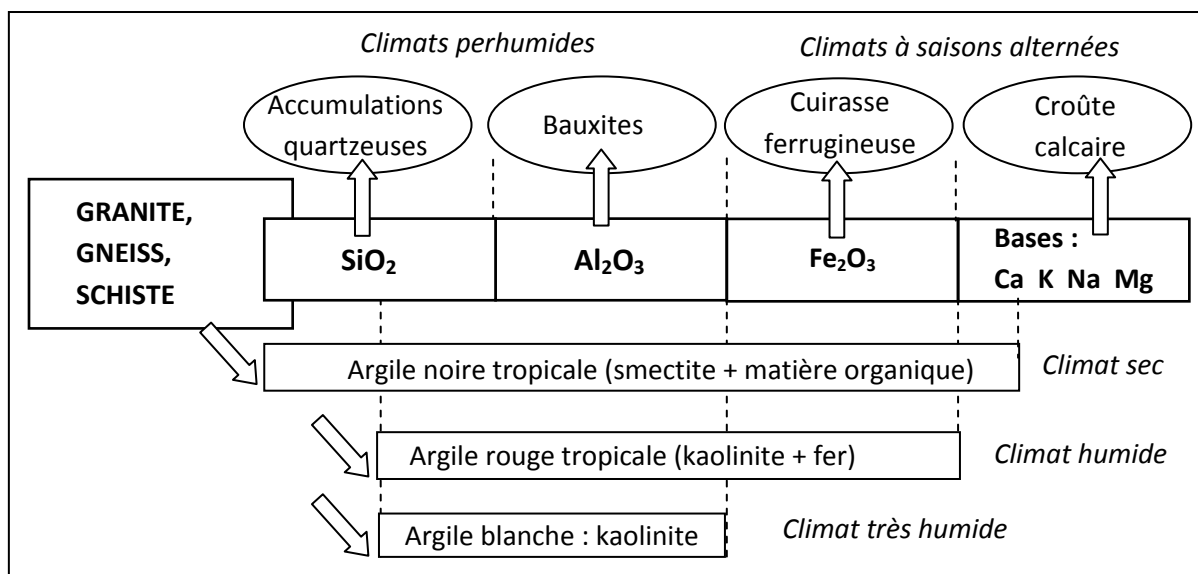


Figure 3 : Diversité des produits d'altération fournis par les roches du socle.

Les résultats sont donc très variés. Quand la roche contient du quartz, il peut finir par se concentrer. On obtient un sable siliceux et parfois un grès siliceux comme à Fontainebleau par exemple. Si c'est l'aluminium ou plus exactement l'alumine Al_2O_3 qui reste seule on obtient une bauxite, en Calédonie en particulier. Si le fer est davantage concentré sur place, on se retrouve avec une accumulation de ce métal sous forme de cuirasse voir de mine de fer. Nous y reviendrons. Dans quelques situations exceptionnelles les cations peuvent être conservés ; plus exactement, ils sont évacués vers des marigots où ils se concentrent par évaporation. Dans ces cas-là, on obtient une croûte calcaire, voire un dépôt salin comme dans les chotts du sud de la Tunisie, ceci même dans un contexte de roches acides.

Mais, il y a des cas plus complexes et d'ailleurs plus fréquents mettant en cause des associations d'éléments chimiques : lorsque subsistent à la fois de la silice, de l'aluminium, du fer et un peu de cations, on obtient une argile tropicale de type smectite. En général, elle est noire, parce qu'elle piège de la matière organique entre ses feuillets. Elle est commune dans les zones chaudes et sèches, en Afrique sub-saharienne par exemple. Lorsque la quantité de silice est plus faible l'argile résiduelle est une kaolinite sur laquelle s'accroche du fer. C'est un cas très courant qui donne leurs allures argileuses et rougeâtres à tant de paysages tropicaux. Mais, dans certaines situations exceptionnelles, en milieu hyper humide, la kaolinite est débarrassée de tout fer résiduel; elle est alors parfaitement pure et blanche.

Les facteurs principaux qui sont susceptibles de concentrer localement tel ou tel matériau d'altération plus tôt que tel ou autre sont le climat et la topographie. Ils agissent ensemble : les climats humides concentrent sur place les éléments insolubles dans l'eau (aluminium, fer oxydé), et évacuent en bas de pente les éléments solubles (cations et silice en particulier. Il s'en suit d'importantes variations locales de pH ce qui a un effet de feedback et renforce la différenciation du fonctionnement chimique selon la position topographique. En bref : ici on retient tel ion, là on l'élimine. Au total, la variabilité des altérites, sur un même matériau est considérable d'un bout à l'autre de la Planète. Dans un tel contexte, les scientifiques ont choisi d'appeler *Sols ferrallitiques* (classification française de 1967) les sols tropicaux particulièrement riches en fer et en aluminium. Ultérieurement, les mêmes sont devenus des *Ferralsols* dans la classification mondiale WRB. Mais les américains, qui ont un système de classement des sols très particulier [LEGROS, 2011], ont préféré ranger ces sols dans les *Oxisols* c'est-à-dire dans les sols riches en oxydes (sous-entendu de fer et d'aluminium). C'est la même chose quant au fond.

Au total, ici ou là sur la Planète, une incroyable variété de produits d'altération, peut apparaître sur le même type de roche, un granite par exemple. À partir d'un matériau unique, la Nature se plaît donc à créer de la diversité (Fig. 4) !

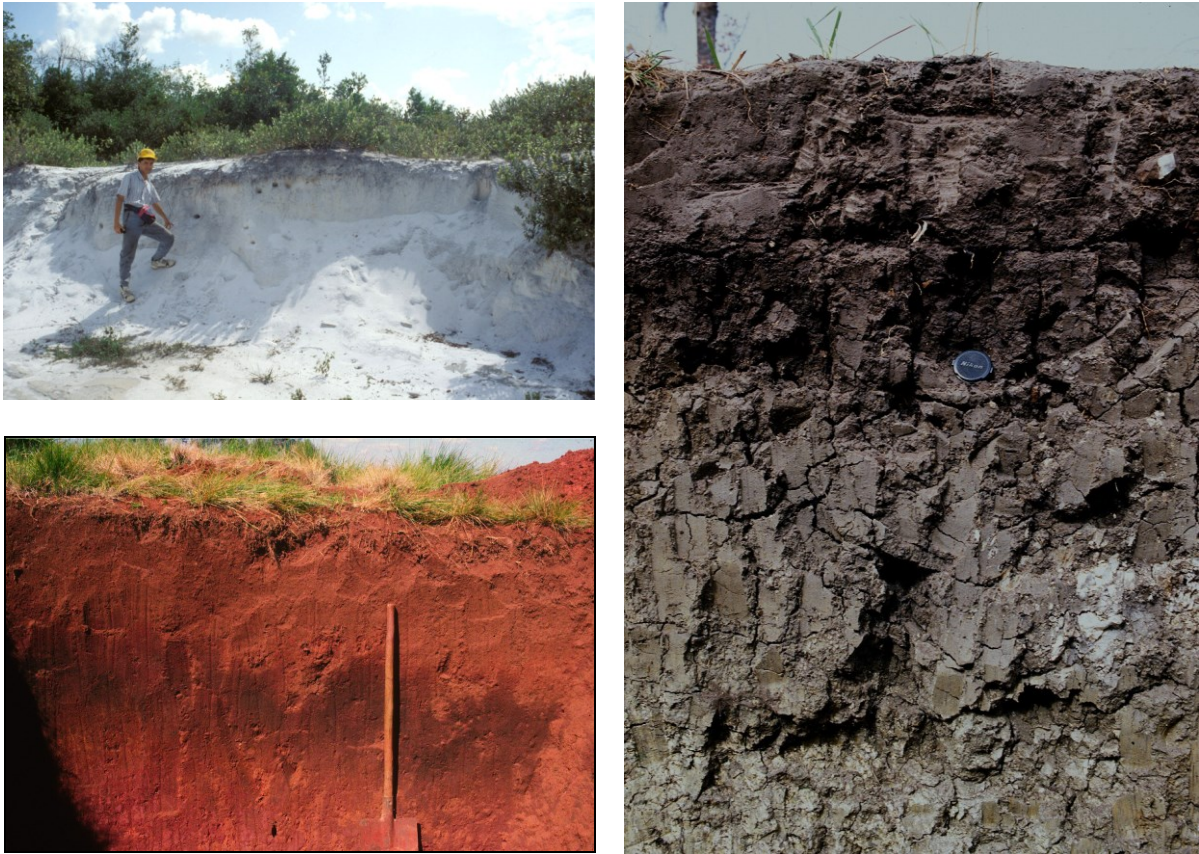


Fig. 4 : Echantillons de la diversité des couches d'altération en milieu tropical. En haut : sable quartzueux résiduel au Congo (Podzol géant), photo Pascal Podwojewski, IRD ; en bas : argile rouge tropicale au Burundi (Ferralsol), photo auteur; à droite : argile noire tropicale au Burundi (Vertisol), photo auteur.

II. LA DYNAMIQUE DES SOLS

1) Le profil de Walther

Venons-en à la partie centrale de l'exposé qui est la dynamique des sols. Pour l'examiner nous prendrons comme exemple le profil caractéristique des seules régions présentant une saison sèche. Il s'agit du profil de Walther, du nom du premier descripteur, en Australie, en 1915. Ce sol représente environ 20 m d'épaisseur (Fig. 5).

À la base nous avons la roche non altérée avec une densité qui peut tourner autour de 2,7 (granite et roches voisines).

Au-dessus de cette roche saine, on observe une couche de plusieurs mètres dans laquelle les minéraux semblent intacts, lorsqu'on les observe de loin. En réalité ils sont profondément altérés et corrodés. Un couteau pénètre. La densité tombe à 1. Le matériau a donc déjà perdu par dissolution plus de la moitié de sa masse. C'est la roche pourrie, la *saprolithe*.

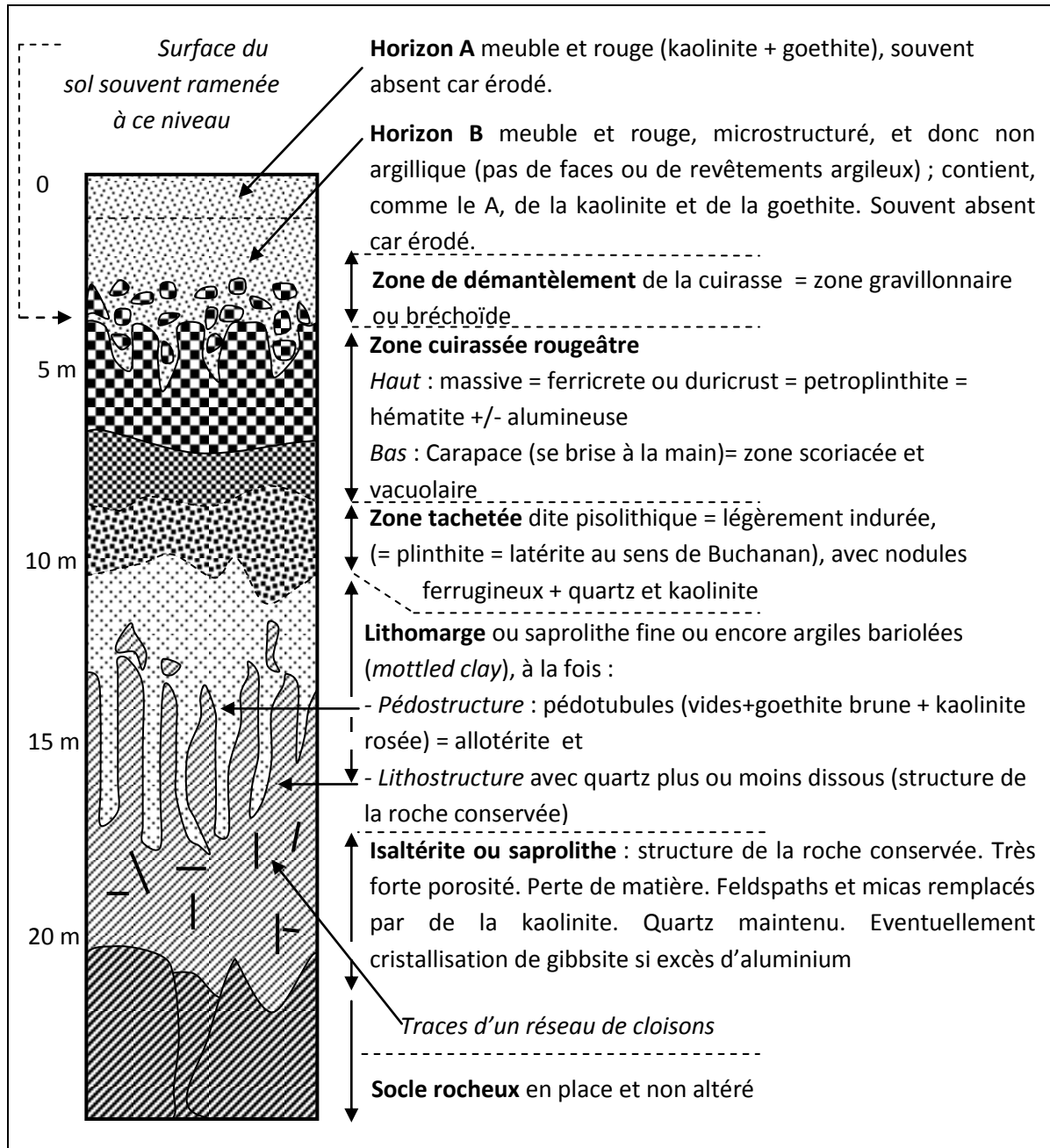


Figure 5 : Profil typique de Ferralsol, dit « profil de Walther ». Pour chaque couche, on donne les synonymes utilisés dans la littérature. In : *Les grands Sols du Monde*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes [LEGROS, 2007].

Plus haut encore dans le profil, l'évolution est telle que les minéraux de la roche ne sont plus clairement visibles sauf dans quelques poches. C'est la limite de la roche, la *lithomarge*. Son allure typique est bariolée.

Encore plus haut dans le sol, les oxydes de fer dominent en trois couches successives. A la base, ils apparaissent en taches ; c'est la *zone tachetée*. Plus haut, le fer est suffisamment abondant pour lier entre eux les minéraux présents, les masquer par enrobage et former au total une *cuirasse* résistante dont la densité dépasse 2. Mais elle contient encore au moins 25% de kaolinite [BOEGLIN, 1990].

Encore plus haut, la cuirasse apparaît en blocs séparés. C'est la zone de *démantèlement*.

Tout en haut du profil de sol, on observe en général une couche d'argile de type kaolinite, riche en fer et donc de couleur rougeâtre. Lorsque cette couche meuble et rougeâtre est éliminée par érosion - ce qui est fréquent - la cuirasse sous-jacente est portée à l'affleurement (Fig. 6). Elle sert alors d'armature au paysage, en zone tropicale sèche en particulier. Elle détermine des plateaux facilement repérés sur les photographies aériennes par leur relief et leur couleur plus sombre.

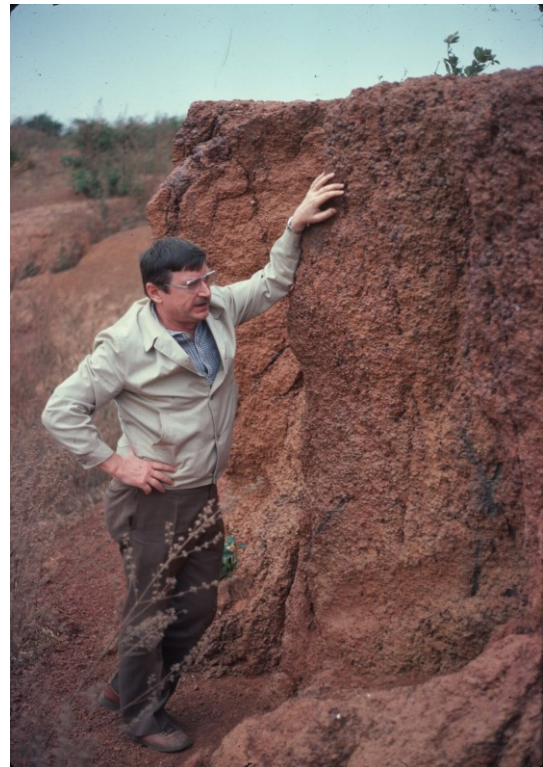


Figure 6 : Cuirasse affleurant au Sénégal, échelle : Roger Maignien, inspecteur général ORSTOM-IRD, auteur d'une thèse sur la question (voir bibliographie), photo auteur (1976).

2) La différenciation in situ

Au total les horizons successifs du sol sont incroyablement contrastés : roche grisâtre, niveaux bariolés et meubles, accumulations ferrugineuses sombres et massives, argile rouge. Pourtant les spécialistes des sols pensent presque unanimement que tout cela ne correspond pas à une superposition de matériaux différents et d'origine géologique variée mais à l'altération et à la réorganisation de la même roche d'origine. En particulier, les cuirasses sont généralement « lithodépendantes » ; en d'autres termes, elles présentent des impuretés (métaux ou minéraux) que l'on retrouve dans les roches saines qui sont dessous. Mais ce n'est plus vrai pour les plus vieilles dont les constituants sont moins identifiables.

L'unanimité s'arrête là. Pour expliquer la différenciation en horizons, les chercheurs de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, les français de métropole en particulier, faisaient appel à des transferts de matière d'un horizon à l'autre. Et il est bien vrai que des particules de fer, d'argile ou de matière organique peuvent se déplacer à l'état solide dans les pores du sol comme dans de fins tuyaux. Cela se voit lors d'observations microscopiques sur lame mince. Par ailleurs, pour rendre compte de l'accumulation de fer en couches très denses, certains faisaient intervenir, depuis les points hauts du paysage, des transferts latéraux c'est-à-dire des apports

en solution au profit du sol observé, puis une cristallisation in situ [BOURMAN et OLLIER, 2002].

Mais ces conceptions se heurtent à plusieurs difficultés, en particulier :

- Faire venir le fer des points hauts du paysage ne résout pas réellement la question de son origine ; en effet, cela voudrait dire qu'à quelques hectomètres du lieu considéré, il y a un mécanisme d'altération qui concentre le fer jusqu'à pouvoir l'exporter. C'est donc reculer pour mieux sauter car la question reste : pourquoi et comment s'accumule le fer qui dans la roche d'origine ne représente que 2 à 4% ?
- Surtout, dans la plupart des cas, les investigations c'est-à-dire les analyses, les calculs et les simulations, ne décèlent pas la présence d'un excès de fer, de silice ou d'aluminium c'est-à-dire une accumulation absolue, par rapport à ce que la roche est susceptible de fournir. Au contraire, on démontre souvent que l'accumulation est relative : le fer est dominant dans la cuirasse parce qu'une bonne partie des autres éléments chimiques a disparu en solution !
- Enfin, les analyses réalisées sur toute la hauteur du sol montrent une continuité au plan chimique qui n'apparaît pas au plan minéralogique ou à l'œil ; de bas en haut les teneurs en fer, aluminium et silice évoluent assez progressivement. Par exemple, le niveau cuirassé est certes très riche en fer, ce qui lui donne sa cohésion, mais il contient toutes sortes d'autres choses : alumine et kaolinite en particulier.

3) L'enfoncement progressif des fronts d'altération

Depuis leurs observations en Afrique du temps de la colonisation, les géologues de Strasbourg et les spécialistes des sols de l'ORSTOM-IRD soutiennent la conception qui suit : dans ces sols et de bas en haut, chaque couche apparaît comme le résidu de l'altération de la couche située immédiatement en dessous et matérialise le fait que cette couche du dessous contenait des minéraux instables qui se sont transformés par altération ou bien ont été simplement dissous et exportés par l'eau. De bas en haut dans le sol, on passe d'une roche à un résidu puis à un résidu de résidu, etc... Donc, d'un seul regard, on observe à la fois toutes les étapes de l'altération et on embrasse toute l'histoire du sol. Les transferts de matière à l'état solide du haut en bas ou latéralement en solution avec cristallisation finale existent mais ne jouent pas un rôle prépondérant dans la répartition des masses de matières au sein des sols et n'expliquent donc pas, à eux seuls, la différenciation des profils en horizons superposés.

On peut le redire autrement : tout se passe comme s'il y avait, dans les profils, des fronts d'altération qui progressent vers le bas chacun ayant pour tâche de transformer le matériau qui le précède en dessous en celui qui le suit immédiatement au-dessus. Le résidu d'un front est le matériel que traite le suivant. Dans un article publié dans la revue *Pour la science* [LEGROS, 2008] on a proposé, à l'usage du grand public, la notion de *file d'horizons cannibales* : chacun mange l'arrière de celui qui le précède vers le bas du sol tandis que lui-même est mangé en même temps par celui qui le suit par derrière.

Ces idées ont été détaillées dans deux ouvrages, un en français, l'autre en anglais [LEGROS, 2007 et 2012]. On y montre que l'enfoncement progressif des fronts d'altération constitue un modèle adéquat, cohérent avec beaucoup de faits d'observation et permettant de mieux comprendre la genèse des sols et leur organisation interne en horizons superposés.

Evidemment, un modèle scientifique ne peut être retenu et préféré à un autre que s'il a un pouvoir explicatif plus grand. Or l'enfoncement des fronts d'altération rend compte de phénomènes essentiels :

-a : D'abord, le modèle éclaire la genèse de toutes sortes de sols bien développés et aux horizons contrastés observés un peu partout dans le monde et pas seulement en zone intertropicale ; c'est exposé dans les livres cités.

-b : Chaque couche étant le résidu de la couche qui se trouve dessous, le processus d'altération représente une perte considérable de matière de bas en haut du sol par des solubilisations successives. Donc la surface du terrain descend avec le temps. C'est un type d'érosion chimique, insidieux et invisible, mais souvent aussi important que l'érosion mécanique qui s'en va porter les particules terreuses de surface jusqu'aux rivières [SOLER et LASAGA, 2000]. On estime que, dans les paysages tropicaux d'Amérique du Sud, la descente de la surface peut présenter 80 à 100 m sur les derniers millions d'années. Dans la vallée du Rhône, dans les cailloutis calcaires très solubles, c'est autant !

-c : Les vitesses des réactions chimiques dépendent de toutes sortes de facteurs internes (ex : type de matière organique) ou externes (ex : climat). En d'autres termes, il n'est pas garanti que chacun des fronts d'altération descende vers le bas à la même vitesse dans tous les sols d'une région géologique et climatique déterminée. Un horizon peut s'élargir ici parce que son front arrière prend du retard sur son front avant ou au contraire disparaître là car son front arrière rattrape son front avant (Fig. 7). En conséquence, dans une famille déterminée de sols, une nuance locale dans la vitesse d'une seule transformation chimique, provoque finalement des variations considérables de morphologie. Nous l'avons déjà dit : avec une économie de moyens, la Nature crée de la diversité !

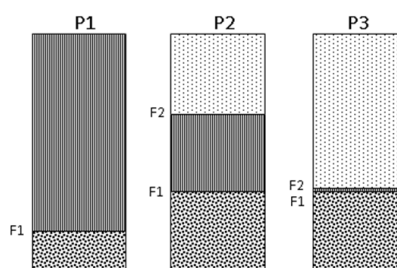


Figure 7 : Trois profils très différents mais résultant du même type d'évolution : dans P1 le front F2 n'est pas encore apparu alors que dans P3 il a rattrapé F1.

-d : Les pertes considérables de matière, fortement ou même faiblement solubles, impliquent la concentration sur place, avec le temps, des résidus métalliques complètement insolubles ; nous y reviendrons plus loin.

Au passage, on note qu'un sol doit s'étudier de bas en haut, compte tenu de son mode de formation, même si les premiers pédologues du 19^{ème} siècle ont fait le contraire, et identifié les horizons de haut en bas, ceci par les premières lettres de l'alphabet ! Surtout, un sol doit s'étudier en s'intéressant, pas seulement à ce que

l'on voit, mais aussi à tout ce qui est parti en solution ou suspension et qui représente souvent la majorité pondérale des matériaux en cause. D'où l'intérêt des calculs de bilans de matière.



Un cas d'école mérite une mention spéciale. C'est celui de l'évolution poussée, en milieu très humide, sur les roches qui contiennent du quartz. Celui-ci est largement solubilisé mais il réussit quand même à se maintenir partiellement jusqu'à la surface du sol sous la forme d'un sable blanc et fin (Fig. 8). C'est le cas déjà mentionné sur la figure 3.

Figure 8 : *Podzol tropical de Guyane; photo Robert Bouzigues, INRA-Montpellier*

Cette accumulation résiduelle et finale peut parfois atteindre 10 m d'épaisseur (revoir photo n°4 en haut, dans cet article). Les premiers observateurs s'y sont trompés et ont cru identifier un dépôt géologique particulier sans percevoir que cette couche-là était génétiquement liée à tout ce qui se trouve dessous jusqu'à la roche saine, 20 mètres ou 50 mètres plus bas. En d'autres termes, les *podzols tropicaux géants*, dont la couche sableuse n'est, si l'on peut dire, que le sommet blanchi de leur tête de vieillard, ont été longtemps ignorés. Pourtant on avait les pieds dessus ! En Amazonie, ils couvrent une surface grande comme la France [NAHON, 2008].

4) Les durées de genèse des sols

De toute évidence, les évolutions examinées prennent un temps considérable. Mais il est délicat de parler d'âge des sols. En effet, depuis les origines de la Terre, les roches sont surmontées de pellicules d'altération et il y a une sorte d'éternité des sols comme le montre bien le mécanisme de fonctionnement des fronts d'altération ! Dans les zones protégées de l'érosion mécanique, c'est-à-dire à plat et sous forêt, les sols pourraient même s'enfoncer lentement sans jamais changer de morphologie, en s'érodant physiquement et chimiquement par le haut et en se reconstituant chimiquement par la base aux dépens de la roche. Cependant, lorsqu'une roche fraîche vient à l'affleurement, elle n'est surmontée au départ d'aucune couche d'altération. Donc, il y a toujours une date de naissance pour un sol. Celui-ci peut parfois mourir, c'est-à-dire disparaître par érosion complète. Alors, la pédogenèse repart de zéro.

Pour fixer les idées, on peut calculer au moins deux types de paramètres. L'un est la vitesse de déplacement du premier front d'altération, celui qui correspond au recul vers le bas de la roche saine. L'autre est la mesure du temps qu'il faut pour

obtenir, à partir d'une roche, un sol bien développé d'un type déterminé. Transposé à au règne animal, c'est le temps nécessaire pour devenir adulte.

Les méthodes de caractérisation de l'âge des sols ont été développées progressivement. Elles sont très nombreuses. Il y a d'abord tous ces éléments radioactifs qui se décomposent lentement au cours du temps et sont des horloges d'une extraordinaire précision. Il y a aussi les mesures de la direction de l'aimantation des cristaux qui signe l'époque pendant laquelle ils se sont formés dans le champ magnétique terrestre dès lors qu'on possède des tables caractérisant ce dernier au cours du temps. On a développé aussi la thermoluminescence de certains minéraux. Mesurée au laboratoire, elle augmente avec la durée d'exposition aux particules cosmiques. En plus, on peut utiliser la méthode géochimique. Il s'agit d'estimer le temps qu'il a fallu pour transformer la roche en sol, compte tenu de leur différence de composition chimique et de la vitesse avec laquelle les ions soustraits à cette occasion sont exportés dans les rivières. Il y a enfin des méthodes indirectes consistant à déterminer l'âge des formations sur lesquelles les sols sont installés ou sous lesquelles ils sont enfouis : terrasses fluviales, terrasses marines, coulées basaltiques...

Aucune de ces méthodes n'est parfaitement fiable et toutes sortes de pièges attendent les observateurs, expérimentateurs et interpréteurs. Mais, concernant les sols tropicaux, elles permettent de dégager deux informations. Elles sont certainement exactes à force d'être confortées par toutes sortes de mesures indépendantes :

- La vitesse de recul de la surface de la roche à la base des sols est de l'ordre de 10 à 20 mètres, voire 40 m par million d'années, soit donc quelques mm tous les cent ans.
- Le temps nécessaire à la différenciation d'un sol tropical typique avec argiles bariolées et cuirasse sus-jacente (profil de Walther) représente plusieurs millions d'années, sans doute une dizaine.

Ces chiffres appellent au moins deux observations :

- Les durées sont telles qu'on ne peut plus considérer l'altération comme intervenue à climat constant. A l'échelle de temps considérée, même la tectonique des plaques doit être prise en compte. En faisant glisser l'Afrique et l'Amérique du Sud sous l'Equateur, elle a déplacé du même coup les régions arrosées et celles qui sont soumises à de grandes sécheresses. Peut-être donc qu'argiles bariolées d'une part et cuirasse ferrugineuse d'autre part, matérialisent, dans un seul profil, des changements climatiques. On voit la complexité des observations face à la durée des temps géologiques.
- Lorsque les sols font en moyenne deux mètres d'épaisseur, en France par exemple il faut moins de 2000 ans pour les raboter par érosion anthropique et plus de 100 000 ans pour avoir l'espoir de les voir renaître par pourrissement des roches situées dessous. A l'échelle humaine les sols représentent un capital non renouvelable !

III. CONSEQUENCES SCIENTIFIQUES, AGRONOMIQUES ET INDUSTRIELLES

1) Reconnaissance des paléoclimats

L'association « kaolinite + bauxite + oxydes de fer » étant typique de l'altération en milieu tropical humide, on peut suspecter l'influence de paléoclimats chauds partout où on la trouve. C'est le cas en France, dans le Midi en particulier. Les carrières d'ocre de la vallée d'Apt, dont le *Colorado de Rustrel* est un exemple, matérialisent le passage de la chaude époque tertiaire. Et n'oublions pas que le mot « bauxite » a été choisi pour caractériser un matériau qui a d'abord été trouvé aux alentours du village des Baux-de-Provence (Fig. 9).



Figure 9 : Trace de sol ferralitique en France

2) Découverte de la porcelaine

Pour fabriquer la porcelaine, il y avait un secret : chauffer assez (1200°) pour que les objets initialement modelés en argile se vitrifient partiellement à la cuisson. On se souvient de l'histoire romancée de Bernard Palissy brûlant ses meubles pour tenter d'y arriver entre 1536 et 1556 ! Mais cela ne suffit pas. Il faut encore utiliser une argile qui ne se rétracte pas au chauffage et donc n'éclate pas. C'est le cas de la kaolinite par suite de sa structure et de sa neutralité électrique faisant qu'elle retient mal l'eau. Les Chinois, dont le sud du pays est constitué de régions tropicales, étaient donc bien placés pour inventer la porcelaine ! On note au passage que le mot kaolin/kaolinite vient de « Gaoline » (orthographe phonétique) qui veut dire grosse colline en Chinois, en référence au premier gisement trouvé dans ce pays. En France, vers 1765-1768, on a fini par découvrir, dans le Massif Central, des poches de kaolinite qui sont elles aussi des résidus de climats tropicaux tertiaires. Cela fit la fortune de Limoges...

3) Concentrations métalliques

L'évolution des sols telle que nous l'avons expliquée, implique une perte de matière provoquant la concentration in situ des éléments très résistants, en particulier les métaux. Insistons : cette concentration s'effectue bien au sein du sol. Les mines d'exploitation correspondent donc à des raclages très superficiels. C'est évident sur les photographies (voir Google). Les facteurs de concentration s'évaluent facilement. Ils correspondent à l'augmentation de la proportion de métal entre la roche et le sol. Pour l'or c'est jusqu'à 10 fois [BANDYAYERA, 1997], d'où la présence d'orpailleurs dans les sols de Guyane. Les *terres rares* ont des teneurs très augmentées et, pour elles, on frise des records (concentration jusqu'à 400 fois) [même source]. Compte tenu du fait que le sol a une densité environ deux fois moindre que la roche, cela signifie que l'épaisseur fondue peut représenter jusqu'à 200 fois l'épaisseur actuelle, donc 4000 mètres pour un sol observé ayant 20 mètres de développement. Aux vitesses d'enfoncement données plus haut, il a fallu des dizaines de millions d'années pour obtenir cela. En d'autres termes et encore une fois : ces sols résiduels exploités pour leurs métaux sont d'époque Tertiaire.

4) Spécificités agronomiques

Il est enfin important d'examiner ces sols tropicaux du point de vue de leur fertilité agronomique. Lavés par les pluies pendant des millions d'années, ils sont, la plupart du temps, dépourvus de calcium, magnésium et potassium. Ils sont donc très pauvres au point de vue chimique. Or, dans le cadre d'une agriculture traditionnelle, il n'est pas question d'acheter des engrais puis de les faire transporter sur des milliers de km. Alors, les paysans africains ou d'Amazonie, recourent aux cultures sur brûlis. C'est que le bois de la forêt contient l'essentiel du capital des cations du milieu naturel. Donc on brûle (fig. 10).



Figure 10 : Brûlis en zone tropicale ; photo Alain Ruellan, coll. AFES.

Les cendres, extrêmement riches en calcium, magnésium et autres éléments utiles, fertilisent le sol pendant quelques années. Elles remontent aussi son pH ce qui bloque l'aluminium lequel est toxique pour les végétaux. Cela permet des cultures avec des rendements qui, tout en restant faibles, paraissent suffisants dans le cadre de ce type d'agriculture. Evidemment cela ne dure pas car une couche de cendre n'est que l'équivalent d'un gros épandage d'engrais tel que pratiqué en Europe. Donc, il faut bientôt abandonner la place et laisser la forêt se reconstituer. La reprise prend des décennies compte tenu de la pauvreté du milieu, encore accrue par le passage de l'homme et l'exportation des cations sous forme de végétaux consommés. Concrètement, il faut que les racines des arbres atteignent à nouveau la base des sols, à 20 m ou plus, pour y puiser les réserves minérales indispensables. Le système est donc fragile : si la population augmente et si le retour du brûlis se fait à un rythme trop rapide, le milieu se dégrade inexorablement. En clair, la forêt ne se reconstitue plus à l'identique ; s'installent alors des essences ligneuses nouvelles, plus résistantes et moins productives. A la limite apparaît la savane. Pour en savoir beaucoup plus, on consultera des textes adéquats [GANRY *et al*, 2005...].

D'un autre côté, les sols tropicaux présentent souvent des propriétés physiques très favorables. Quand elles n'ont pas été éliminées par érosion, les argiles rouges tropicales de surface sont organisées en petites boulettes de terre qui sont passées dans les intestins des termites. On les appelle pseudo-sables. Ils sont particulièrement meubles et pénétrables par les racines. Si l'on ajoute à cela que les plantes bénéficient de beaucoup d'eau et de fortes températures, la productivité potentielle, en matière verte à l'hectare, est 3 ou 4 fois plus grande qu'en Europe. Concrètement, on peut aller jusqu'à 3 ou 4 récoltes par an. Mais, le plus souvent, capitaux, connaissances techniques et stabilité politique font défaut pour faire de ces régions les paradis agricoles qu'ils devraient être.

Comme la population de ces contrées ne peut qu'augmenter dans le futur, il n'y a que deux solutions pour la nourrir : soit défricher des surfaces sans cesse plus grandes (cas actuel en Amazonie), soit accroître les rendements à l'hectare au travers de la promotion d'une agriculture moderne et productive (cas de l'Indonésie). Donc, il faut bien réfléchir et savoir ce que l'on veut. Les grandes exploitations qui, avec des capitaux étrangers décriés, s'installent un peu partout dans la zone intertropicale, vont peut-être sauver la forêt. On rappelle qu'en France la forêt est avant tout protégée par les forts rendements agricoles qui dispensent de la défricher pour accroître les surfaces cultivées.

CONCLUSIONS

Les sols tropicaux représentent une incroyable diversité : bauxites blanches, argiles de type kaolinite blanches ou rouges, profils cuirassés par le fer, podzols sableux et aussi argiles tropicales noires dans les zones plus sèches. Ensemble, ils constituent donc un puzzle qui, reconstitué, a permis progressivement de décrypter les mécanismes de leur mise en place. En plus, le développement vertical considérable de certains niveaux d'altération - jusqu'à 200 m au-dessus de la roche saine - permet de détailler une évolution chimique et minéralogique qui est beaucoup

moins nette ailleurs dans le Monde. Comme les lois de la physique et de la chimie sont partout les mêmes, les enseignements apportés par les sols tropicaux et par les géologues qui les ont étudiés, constituent un apport fondamental à la discipline « Science du sol » même en zone tempérée.

Pauvres, faute d'engrais et de moyens de mise en valeur, ils n'en représentent pas moins un capital pour l'humanité. Presque partout, leurs rendements agricoles pourraient être multipliés par 10 et ceci en fort peu de temps.

Au plan minier, ils représentent aussi une richesse considérable. Ils renferment nos réserves mondiales de nickel, de fer, de bauxites, de kaolinites et de différents métaux précieux.

Au plan de la diversité biologique, ils constituent aussi d'extraordinaires réserves. Le monde des termites, à lui seul, mériterait toute une conférence.

BIBLIOGRAPHIE

- BANDYAYERA D., 1997. Formation des latérites nickélifères et mode de distribution des éléments du groupe du platine dans les profils latéritiques du complexe de Musongati, Burundi, Thèse, Univ. De Québec, 495 p.
- BOUGEON G., GUNNELL Y., 2005. *La latérite de Buchanan*, Étude et Gestion des Sols, Volume 12, 2, pp. 87 à 100.
- BOEGLIN J.L., 1990. Evolutions minéralogique et géochimique des cuirasses ferrugineuses de la région de Gaoura (Burkina Faso). Thèse, Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 188p.
- BOURMAN R.P. et OLLIER C.D., 2002, A critique of the Schellmann definition and classification of 'laterite', *Catena* 47 (2002) 117– 131.
- GANRY F., BARTHES B., GIGOU J., 1986. Les difficultés du maintien de la fertilité des sols tropicaux. In : *Sols et environnement*. DUNOD pp. 583-607.
- LEGROS J.P., 2007. *Les Grands Sols du Monde*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne, 574 p.
- LEGROS J.P. ; 2008. Comment se forment les sols. *Pour la Science*, n°d'avril, pp. 74-79.
- LEGROS J.P., 2011. *A l'aube de la Science du Sol*. Acad. Sci. et Lettres de Montpellier, Séance du 28/11/2012. Bull. de l'Acad. (résumé), tome 42, pp. 381-383. In extenso sur Internet : http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/academie_edition/fichiers_conf/LEGROS2011.pdf
- LEGROS J.P., 2012. *Major Soil Groups of the World*, Science Publishers and Taylor & Francis Group, 464 p.
- MAIGNIEN R., 1964. Compte-rendu des recherches sur les latérites. Document UNESCO-ORSTOM, 241 p + bibliographie 24 p.
- NAHON D., 2008. L'épuisement de la terre, l'enjeu du XXI^e siècle. Odile Jacob, 235 p.
- SOLER J.M., LASAGA A.C., 2000. The los Pijiguaos bauxite deposit (Venezuela) : a compilation of field data and implications for the bauxitization process. *Journal of South American Earth Science*, 13, 47-65.