

Modalités de la formation *in situ* de *stone lines* en zone équatoriale. Exemple d'une couverture ferrallitique d'Amazonie au Brésil

Yves LUCAS, René BOULET et Armand CHAUVEL

Résumé – L'étude d'une couverture ferrallitique d'Amazonie au Brésil montre qu'une *stone line* de nodules ferrugineux se forme *in situ* dans les sols de plateaux, au cours de leur enfouissement géochimique dans la roche-mère. Sur les versants, les conditions de formation des nodules ne sont plus réalisées, et leur dissolution est augmentée. C'est pourquoi la *stone line* s'amincit progressivement, puis disparaît au cours du recul géochimique du versant.

In situ genesis of stone lines. Demonstrative example from a lateritic cover in Brazilian Amazonia

Abstract – In plateau soils from Brazilian Amazonia, a stone line which consists of ferruginous nodules is formed *in situ* during the geochemical lowering of the profile in the protolith. On slopes, conditions of genesis and stability of the nodules do not remain and the stone line progressively gets thinner and disappears as the slope moves back.

Abridged English Version – Stone lines are horizons which are composed of coarse fragments such as quartz pebbles, lithorelics, lateritic relicts... embedded in a clayey matrix, and which are situated between horizons in which coarse fragments are absent or sparse. The abundance of the stone lines in the intertropical area has given rise to many studies ([1] to [10]), and a broad range of processes have been put forward to explain their genesis. In the catena described in this paper (Fig. 1) are identified the processes by which may form *in situ* a stone line without apparent relations with the underlying material.

The plateau soils at the upper part of the catena consist of three main levels:

- A lower level, which is a quartzo-kaolinitic weathered sediment.
- An intermediate level, in which from the bottom upward (1) the sediment structure progressively disappears, (2) a continuous nodule texture sequence ranges from soft ferruginous domains to indurated ferruginous nodules. The latter are abundant at the upper part of the level, forming a nodular stone line.
- An upper level, which is a microaggregated soft kaolinitic material.

Previous studies ([13], [14]) have shown that this profile is formed *in situ* by progressive desilicification of the sediment. All the stages of the formation of coarse fragments are observed from the base to the top of the profile, and the soil evolution is due to transformation fronts which progress downward at the expense of the underlying layers, as the soil descends in the protolith.

On the slopes, the stone line overlies horizons without any form of ferruginous concentration: there is an apparent uncomformity between the stone line and the underlying material. Nevertheless, the lateral transition between this perched stone line and the plateau stone line is very progressive. From the plateau downslope, the stone line becomes gradually thinner, and the nodules keep the same vertical lengthening and facies. In depth, the soft ferruginous domains progressively disappear, displaying microscopic features of *in situ* dissolution.

Note présentée par Georges PÉDRO.

0764-4450/90/03110713 \$ 2.00 © Académie des Sciences

This whole sequence was formed in place by pedogenetic processes. The geometry of the horizons may hardly be explained by reworking processes; the vertical lengthening of the nodules in the stone line and the perfect continuity with the plateau stone line are inconsistent with the hypothesis of an erosive cut followed by a spreading of lateritic gravels; and in depth the disappearing of the ferruginous soft domains proceeds to dissolution processes. Then, the genesis of the catena has to be considered in the frame of the descent of the soil mantle in the parent material (Fig. 2). The geochemical evolution of the landscape results in both a descent of the soil mantle in the protolith and a backward movement of the slope. In plateau soils, at the upper part of the intermediate level, the nodules formed in depth undergo two processes: a concentration in space and a dissolution. On the slope, the concentration front comes apart from the dissolution front which bends down in depth. As the slope moves backwards, the dissolution front moves laterally and affects ferruginous domains which are the more resistant to dissolution as their hematite content is high. Then, as the soft ferruginous domains have already dissolved, cemented ferruginous nodules still remain in the upper-lying stone line. Nevertheless, those nodules continue to undergo a slow dissolution, and progressively disappear downslope.

In conclusion, the presence of a stone line and the abundance of the coarse fragments in the stone line depend on the interaction of three main factors.

(1) The abundance of coarse fragments able to be accumulated. In the given example, this abundance depends on the intensity of the nodules genesis, it may also depend on the presence of weathering-resistant fragments in the saprolite.

(2) The dissolution processes of the coarse fragments in the stone line.

(3) The spacial concentration processes of the coarse fragments at a given level of the soil. In most cases ([9], [10]), this level corresponds to the disappearance of the lithic structure and the development of the pedoturbation, the concentration being probably due to a preferential dissolution of the fine matrix as well to mechanical micro-movements.

A change in the first factor during time may lead to the formation of *in situ* stone lines apparently uncomformable with the underlying horizons.

I. INTRODUCTION. — Les *stone lines* sont des horizons dans lesquels des fragments grossiers, nodules, débris de cuirasse ou de roche, sont concentrés par rapport aux horizons sus et sous-jacents. La généralisation des *stone lines* dans les zones intertropicales a motivé de très nombreuses études sur leur genèse. Les processus explicatifs qui ont été proposés peuvent être regroupés en trois ensembles : des causes biologiques ([6], [7]); des transports mécaniques à l'échelle de la toposéquence, la *stone line* est alors considérée comme allochtone ([1] à [5]); une évolution interne autochtone des profils entraînant la concentration *in situ* des fragments grossiers ([8] à [11]). La coupe présentée ici permet de décrire la mise en place *in situ* d'une *stone line* et de discuter les conditions de sa genèse et les leçons à en tirer.

II. LES SOLS DES PLATEAUX : GENÈSE DE LA *STONE LINE*. — La coupe représentée est située dans la partie centrale de l'Amazonie, à 45 km au Nord de Manaus, dans un paysage de bas-plateaux. Le climat actuel est de type Amazonien (pluviosité 2 100 mm, saison sèche peu marquée). La formation géologique sous-jacente à la couverture de sol est un sédiment quartzo-kaolinique, constitué de strates sub-horizontales alternées argileuses à sableuses, d'âge fin Crétacé [12].

Les sols des plateaux (à gauche de la figure 1) sont constitués de trois niveaux principaux, séparés par deux fronts de transformation ([13], [14]).

(1) L'ensemble inférieur est un horizon d'altération du sédiment, quartzo-kaolinitique, de couleur blanche. C'est par un front de transformation glossique (*fig. 1*) qu'il passe au niveau sus-jacent.

(2) Dans l'ensemble médian, la structure du sédiment s'efface progressivement de bas en haut par dissolution du quartz et néoformation de kaolinite, de gibbsite et d'un peu d'hématite, formant un fond meuble jaune-rougeâtre homogène. Parallèlement, on observe une séquence verticale parfaitement continue de nodules ferrugineux : à la base de l'ensemble médian, des domaines centimétriques présentent de nombreuses ponctuations rouges hématitiques; quand on monte dans le profil, la taille et l'abondance de ces ponctuations augmentent, on passe à des nodules indurés à allongement vertical; à la partie supérieure de l'ensemble médian, les nodules deviennent abondants et forment une *stone line* de nodules indurés à allongement vertical. C'est par dissolution de ces nodules et restructuration de leur matrice que cet horizon passe à l'ensemble supérieur.

(3) L'ensemble supérieur est meuble, jaune-rougeâtre, sans nodules grossiers avec de rares micronodules de taille inférieure à 2 mm. Par rapport au fond meuble de l'ensemble médian, ce matériau a une composition plus kaolinique et une structure à phase micro-agrégé développée.

III. VARIATIONS GRADUELLES SUR LES VERSANTS : DISPARITION DE LA *STONE LINE*. — Ce profil présente des variations graduelles quand on aborde le versant.

1. Dans le fond meuble jaune-rougeâtre de l'ensemble médian apparaissent des volumes millimétriques brun très pâle à faces structurales ocre. Au contact de ces volumes, les domaines à ponctuations rouges ainsi que les nodules peu indurés montrent les traits microscopiques d'une dissolution : transitions finement interpénétrées; remplacement de l'hématite par la goéthite, recouplement des structures ferrugineuses par le matériau meuble. Vers l'aval, les volumes brun très pâle deviennent plus abondants et la dissolution des domaines à ponctuations et des nodules peu indurés s'accroît jusqu'à leur disparition complète selon la limite Fd (*fig. 1*). Les volumes brun très pâle sont de 20 à 50 % appauvris en fer par rapport au fond meuble jaune-rougeâtre, et peuvent être considérés comme l'indice d'une hydromorphie modérée.

2. La *stone line* de nodules indurés s'amincit progressivement, jusqu'à moins de 5 cm d'épaisseur, puis disparaît 150 à 200 m à l'aval de la disparition des domaines à ponctuations rouges. On remarque que les nodules conservent leur forme allongée à orientation verticale jusqu'à la disparition de la *stone line*.

IV. CARACTÈRE *IN SITU* DE L'ÉVOLUTION DE LA *STONE LINE*. — Les sols des plateaux montrent une séquence verticale continue de formation des nodules. Ceux-ci sont formés *in situ* au fur et à mesure de l'enfoncement du profil dans la roche-mère, et s'accumulent relativement en même temps qu'ils commencent à être dissous à la partie supérieure de l'ensemble médian. Sur le versant, les nodules de la *stone line* n'ont plus de relations visibles avec les matériaux sous-jacents; il y a donc une discontinuité dans la séquence verticale des nodules. Cette discontinuité peut-elle être l'indice d'une allochtonie, qui serait due soit à une entaille érosive ancienne suivie d'un recouvrement sédimentaire, soit à un fauchage par des mouvements mécaniques de type *creeping*? Deux faits permettent d'écarter ces deux hypothèses. (1) Les nodules ferrugineux peu indurés disparaissent vers

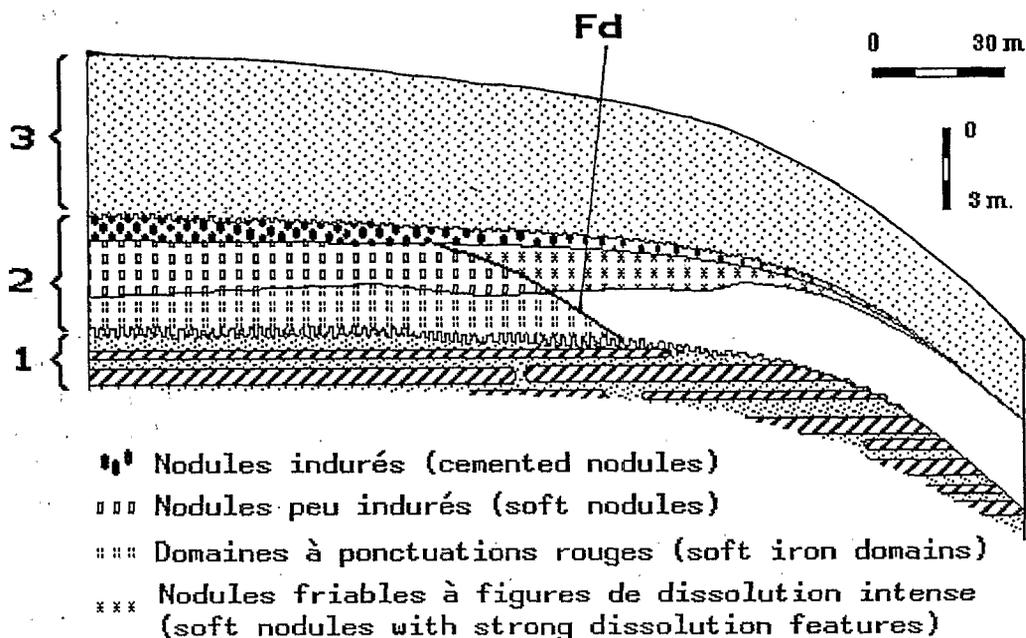


Fig. 1. - Schéma de la coupe de route. (1) ensemble inférieur; (2) ensemble médian; (3) ensemble supérieur.
 Fd : disparition aval des domaines à ponctuations rouges.

Fig. 1. - Sketch of the road cut. (1) lower level, (2) intermediate level, (3) upper level.
 Fd: downslope disappearance of the soft iron domains.

l'aval parce qu'ils sont progressivement dissous. La limite de leur disparition ne correspond donc pas à une entaille érosive, mais à un front de dissolution progressant de l'aval vers l'amont parallèlement au versant. (2) La parfaite continuité de la variation latérale de la *stone line* ainsi que le maintien de l'orientation verticale des nodules sont contradictoires avec les hypothèses de remaniement mécanique à l'échelle de la coupe. On peut donc conclure que l'ensemble de cette coupe est différencié strictement en place, et que l'évolution pédo-géochimique du versant est au moins aussi rapide que son recul par érosion mécanique.

V: SCHÉMA DE L'ÉVOLUTION DES PROFILS ET DES VERSANTS. - 1. Ces constatations amènent à proposer le schéma interprétatif de l'évolution du versant (fig. 2). La couverture de sol évolue par enfoncement géochimique dans la roche-mère [14]. Dans les profils de plateau, la *stone line* nodulaire est le résultat de deux processus antagonistes, l'un qui concentre les nodules formés dans les horizons sous-jacents, l'autre qui les dissout : il y a à la partie supérieure de l'ensemble médian un front de concentration des fragments grossiers (Fc) joint à un front de dissolution des nodules (Fd). Sur les versants, il y a un inflexion vers l'aval, à peu près parallèlement à la surface du sol, de la *stone line*, donc du front de concentration des nodules. Cependant, le front de dissolution des nodules se disjoint de la *stone line* et s'infléchit en profondeur, comme le montre la disparition progressive des nodules peu indurés. Au cours du recul du versant, du temps T au temps T+t, le système non seulement s'enfonce, mais recule également (fig. 2 b). Le recul du front de dissolution des nodules affecte donc les formes nodulaires de profondeur, qui sont d'autant moins résistantes que leur teneur en hématite est faible. La *stone line* se trouve ainsi séparée de l'ensemble médian jaune-rougâtre qui fournissait les nodules,

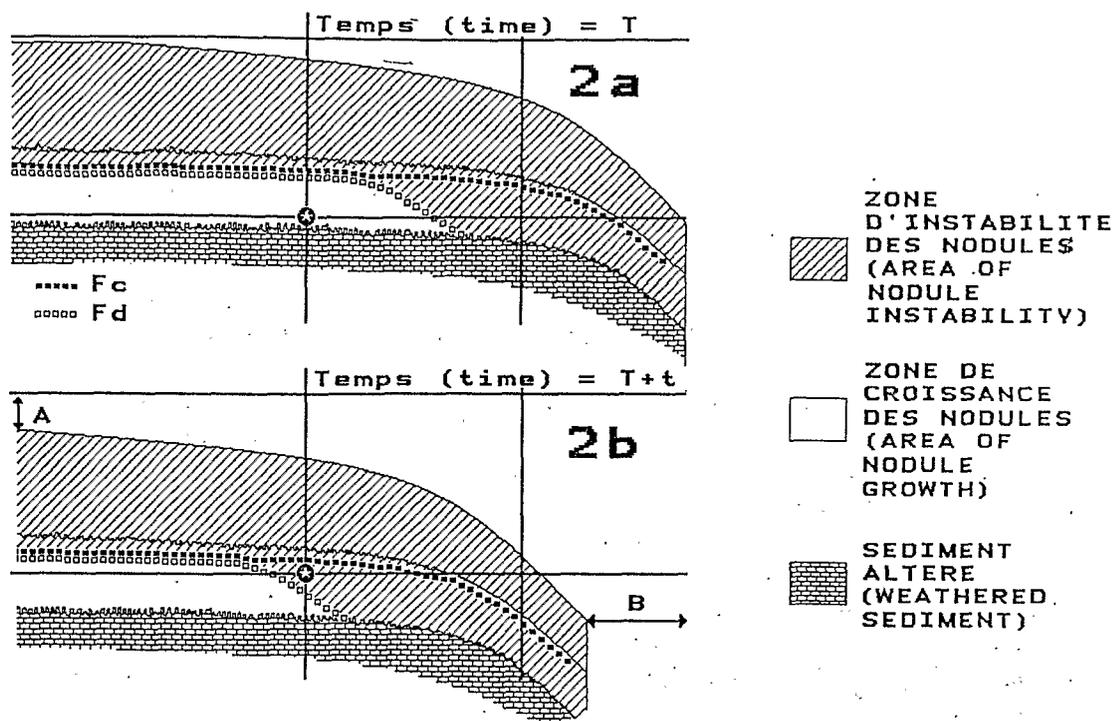


Fig. 2. — Schéma de l'évolution de la couverture pédologique, les axes sont référés au sédiment A : enfoncement de la couverture de sol; B : recul du versant, Fc : front de concentration des éléments grossiers; Fd : front de dissolution des nodules. Le matériau repéré par l'étoile se trouve au temps T dans la zone de croissance des nodules, puis au temps $T+t$ dans la zone d'instabilité des nodules.

Fig. 2. — Sketch of the soil cover evolution, axes refer to the sediment level. A: descent of soil cover; B: backward movement of the slope, Fc: coarse element concentration front; Fd: nodule dissolution front. The star-marked point is at time T in the area of nodule growth and at time $T+t$ in the area of nodule instability.

puisque cet ensemble s'est transformé en fond meuble brun pâle dans lequel les nodules sont dissous : elle n'a plus de relations génétiques apparentes avec les matériaux immédiatement sous-jacents. La *stone line* n'étant plus alimentée en nouveaux nodules, mais restant soumise à dissolution, s'amincit progressivement vers l'aval et disparaît.

2. La discussion des processus de formation et de dissolution des nodules dépasse largement le cadre de cette Note, et nous nous bornerons à souligner que le front de dissolution des nodules peut être attribué, sur le versant, à une modification du régime hydrique de l'horizon (apparition d'une hydromorphie modérée). La concentration des fragments grossiers peut être due à plusieurs causes : dissolution préférentielle du fond meuble, remontée biologique de la fraction fine, ou micro-mouvements liés à la pédoturbation, que celle-ci soit d'origine biologique ou non. Dans l'exemple considéré, la *stone line* se situe au niveau d'une modification de composition (augmentation de la teneur en kaolinite) et de structure (apparition d'une phase microagrégée) du fond meuble, sans qu'aucun trait d'activité biologique ne soit apparent. Ces faits suggèrent l'action conjointe d'une dissolution préférentielle du fond meuble et de micro-mouvements liés à une pédoturbation d'origine géochimique.

VI. CONCLUSIONS. — Dans le problème très étudié de l'origine des *stone lines*, cette couverture amazonienne permet la démonstration géométrique de l'origine autochtone et

interne d'une *stone line*. De ce cas particulier, on peut déduire d'une manière plus générale les différents facteurs qui déterminent la présence et les caractéristiques d'une *stone line*.

(1) Les fragments grossiers présents en profondeur s'accumulent à un niveau préférentiel sous l'effet d'un front de concentration au cours de l'enfoncement géochimique du sol dans la roche mère. Dans le cas présent, les fragments grossiers sont des nodules formés *in situ* par des processus pédologiques. Dans de nombreux cas, ce sont des fragments lithorelictuels ayant résisté à l'altération, tels des morceaux de quartz.

(2) L'abondance des fragments grossiers dans la *stone line* dépend d'une part de l'abondance dans les horizons sous-jacents des fragments susceptibles d'être accumulés, et d'autre part de la sensibilité de ces fragments aux processus de dissolution auxquels ceux-ci restent soumis dans la *stone line*.

(3) Le niveau de concentration des fragments grossiers est ici dû au remplacement de structures compactes par une structure microagrégée. Ce cas s'ajoute à d'autres ([6] à [11]) pour vérifier que les *stone lines* naissent à un niveau de modification profonde des structures (pédoturbation), avec disparition complète des structures lithorelictuelles et le plus souvent apparition d'une phase microagrégée.

(4) La couverture d'altération s'étant enfoncée dans le paysage, elle a pu balayer plusieurs roches-mères, accumulant des reliques d'origines variées. Dans le cas d'une accumulation de fragments d'origine pédogénétique (nodules, blocs de cuirasse), les conditions de genèse de ces fragments ont pu changer au cours du temps. Ceci explique comment une *stone line* coupée de ses origines, mais correspondant à une longue histoire, peut contenir des fragments « étrangers » qui n'ont plus de filiation génétique apparente avec les matériaux actuellement sous-jacents. Dans l'exemple présenté, la *stone line* observée sur les versants a été coupée de ses origines par l'évolution autonome du système pédo-géomorphologique.

(5) Enfin, l'existence de telles *stone lines* démontre que l'ablation chimique a été supérieure à l'ablation mécanique au cours de la formation du sol.

Ce travail, mené dans le cadre de l'ORSTOM (accord CNPq - C.N.R.S.) et de l'U.R.A. n° 132, C.N.R.S. (Marseille), a bénéficié de l'appui de l'I.N.P.A. (Manaus, Brésil) et du programme PIRAT de l'I.N.S.U.-C.N.R.S.

Note remise le 23 avril 1990, acceptée après révision le 4 juillet 1990.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. V. RUHE, *Soil Sci.*, 97, 1959, p. 223-231.
- [2] A. N. AB'SABER, *Bull. Univ. Panama, Inst. Geol. Geogr. Fis.*, 2, 1962, 32 p.
- [3] J. VOGT et P. L. VINCENT, *Bull. B.R.G.M.*, 4, 1966, p. 1-111.
- [4] P. SEGALIN, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VII, n° 1, 1969, p. 113-127.
- [5] J. RIQUIER, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VII, n° 1, 1969, p. 71-111.
- [6] P. P. GRASSÉ, *Rev. Int. Bot. Appl.*, 337-338, 1950, p. 549-554.
- [7] V. ESCHENBRENNER, *T.D.M.*, n° 19, ORSTOM, Paris, 1988, 14 microfiches.
- [8] P. LECOMTE, *J. Geochem. Expl.*, 30, 1988, p. 35-61.
- [9] G. LAPORTE, *MC 119, I.R.S.C.-ORSTOM*, Brazzaville, 1962, 149 p.
- [10] J. COLLINET, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VII, n° 1, 1969, p. 1-42.
- [11] J. C. LEPRUN, *Sci. Géol., Mém.* n° 58, 1979, 224 p.
- [12] H. PUTZER, *Monographiae Biologicae*, 56, 1984, p. 15-46.
- [13] Y. LUCAS, A. CHAUVEL et J. P. AMBROSI, *Proc. 1° Int. Symp. on Geoch. of the Earth Surface*, Granada, 1986, p. 288-299.
- [14] Y. LUCAS, R. BOULET et A. CHAUVEL, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 306, série II, 1988, p. 1395-14000.

Y. L., R. B. et A. C. : ORSTOM, Unité de Recherche I G :
« Analyse structurale et géochimique des formations supergènes »
et U.R.A. 132 du C.N.R.S.;

Y. L. et R. B. : U.S.P., *Inst. Geociências*, CP 20.899-CEP 01499, São Paulo (SP) Brésil;
A. C. : *Laboratorio de Ecologia*, CP 478-CEP 69060, Manaus (AM) Brésil.