

Evolution actuelle d'une carapace ferrugineuse en forêt de Cîteaux (Val-de-Saône)

Gérard BELLIER, François-Xavier HUMBEL, Maurice LAMOUREUX (1)

Pédologues ORSTOM - U.R. 605 - 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy.

RÉSUMÉ

L'étude d'une carapace ferro-manganique formant l'amont d'un versant développé dans une ancienne terrasse de la Saône a mis en évidence des figures de déferruginisation variées :

En zone sommitale, la carapace se présente comme une formation nodulaire armée par un réseau de veines argileuses grises, horizontales et verticales, en bordure desquelles les nodules sont soudés en « lamelles nodulaires ». Sous la veine horizontale supérieure, les lamelles nodulaires se déferruginisent (microcuvettes). Le fer libéré reprécipite immédiatement au-dessous, reconstituant d'autres lamelles. Au sein même de la carapace, les nodules à cortex ou à coiffe siliceuse se déferruginisent d'abord de l'intérieur, l'organisation générale étant conservée, puis se transforment en agrégats terreux. La base de la carapace présente un faciès sableux et friable, à structure litée, qui assure l'évacuation latérale des produits de dissolution.

Sur le pourtour de la carapace, le réseau de veines devient plus serré, la carapace s'amincit en biseau, puis se morcelle en amas relictuels par coalescence des veines.

Les horizons nodulaires, plus ou moins continus, de l'aval de la toposéquence, présentent également des figures de déferruginisation allant d'un découpage orthogonal des amas nodulaires à une disparition complète des nodules. Seuls des îlots nodulaires relictuels résistants subsistent dans les horizons meubles supérieurs de l'ensemble de la toposéquence.

L'horizon basal bicolore est lui-même soumis à une déferruginisation dont les différents stades rappellent ceux qui ont été décrits à propos des formations nodulaires.

Il semble donc que la destruction de la carapace, des horizons nodulaires et de l'horizon bicolore, se fasse à partir d'un réseau de veines orthogonales dont l'origine pourrait être le litage hérité de l'alluvion, pour les veines horizontales, et une fissuration en phase périglaciaire, pour les veines verticales.

Le colmatage des veines de la carapace par de l'argile smectitique dévie les écoulements au-delà des lamelles nodulaires, ce qui explique que la destruction de la carapace se fasse moins par élargissement que par multiplication des veines.

La carapace étudiée en forêt de Cîteaux dérive en fait d'une couche de nodules ferrugineux, constituée en profondeur dans les alluvions et amenée ultérieurement en surface par le jeu de l'érosion. Placée ainsi en conditions de déséquilibre, celle-ci se détruit non seulement par sa surface et son pourtour, mais surtout de l'intérieur. Les processus de déferruginisation et de désorganisation sont diversement associés, selon la structure nodulaire concernée.

L'induration qui justifie l'appellation de carapace n'est qu'une étape de cette destruction, due à une re-ferruginisation locale (lamelles nodulaires).

MOTS-CLÉS : Nodules — Carapace — Déferruginisation — Toposéquence.

(1) Avec la collaboration technique du personnel du laboratoire des Formations Superficielles pour les analyses et de Mme DRIFFORT pour la mise au net des diverses figures.

ABSTRACT

CURRENT EVOLUTION OF A NODULAR IRONSTONE IN BURGUNDY (THE SAONE VALLEY)

The study of a ferro-manganic ironstone situated at the upper part of a slope developed in a former terrace of the Saône river revealed diversified patterns of deferruginization :

— In the summit, the ironstone is a nodular formation consolidated by the cementation of nodules along a system of clay-loamy veins, horizontal or vertical. Under the upper horizontal vein, the nodular laminae become deferruginized from the microbasins. The iron released precipitates again immediately below, thus reconstituting other laminae. Within the ironstone, the nodules with cortex or siliceous cover become deferruginized first from within ; the general structure is preserved and is transformed into earthy aggregates. The ironstone bottom displays a sandy and friable facies with bedded structure which seems to allow the dissolution products to be released laterally. — On the periphery, the vein system becomes more dense, the ironstone is beveled and is divided into relict accumulations by coalescing veins.

The more or less continuous nodular horizons from the downstream toposequence also display some patterns of deferruginization ranging from nodular accumulations cut out orthogonally to a complete disappearance of the nodules. Only resistant relict fragments exist in the upper soft horizons of the whole toposequence.

The bicoloured basal horizon is subjected to a deferruginization whose different phases recall those which were described concerning the nodular formations.

Therefore, it seems that the destruction of the ironstone, of the nodular horizons and of the bicoloured horizon results from a system of orthogonal veins whose origin may be alluvial bedding for the horizontal veins and dehydration cracks for the vertical veins. The filling in of the crust veins with smectitic clay drifts the flows beyond the nodular laminae. Therefore the ironstone is destroyed not by extending the veins but by multiplying them.

The ironstone studied in the Cîteaux forest results from a layer of ferruginous nodules which was formed in alluvial deposits and was subsequently brought to the surface by erosion. Therefore, it is not in equilibrium and it is destroyed not only from its surface and its periphery but mainly from within. Deferruginization and disorganization processes are associated in various ways according to the nodular structure under consideration.

Induration which confirms the name of ironstone is only a stage in this destruction due to a new local ferruginization (nodular laminae).

KEY WORDS : Nodules — Ironstone — Deferruginization — Toposequence.

INTRODUCTION

Une carapace ferrugineuse, compartimentée par un réseau de veines argileuses, cela évoque à première vue des conditions de formation bien différentes de celles qui règnent actuellement dans la vallée de la Saône. C'est pourquoi la découverte d'une telle carapace lors d'un stage d'étudiants en forêt de Cîteaux a suscité l'intérêt des pédologues (BLAVET 1982, IGUE 1984, HERNANDEZ 1985, LAMOUROUX *et al.* 1985).

Cette concentration de fer est d'ailleurs connue des cultivateurs du village voisin, Gerland, dont les socs de charrue s'usent sur ces gravillons infertiles qu'ils appellent « le minerai », minerai que les forgerons de la ville gallo-romaine des Bolards, près de Nuits-St-Georges, ont semble-t-il utilisé (PLANSON et AMIOT, 1984).

Les auteurs ont considéré qu'en étudiant l'évolution actuelle de cette carapace, manifestement en cours de destruction, ils apporteraient un éclairage sur ses conditions de formation dans une terrasse datée du Pléistocène par A. CLAIR (1980), ainsi que des éléments

de comparaison avec les cuirasses latéritiques caractérisées par l'ORSTOM en régions tropicales.

I. CADRE DE L'ETUDE

La carapace ferro-manganique étudiée a la forme d'une lentille de 80 m de largeur et de 0,5 m d'épaisseur, coiffant un petit interfluve entre deux talwegs confluent, inscrits dans une terrasse ancienne d'altitude 210 m (fig. 1 et 2).

Sa surface est à 0,5 m de profondeur environ, sous des horizons gris limoneux contenant des nodules ferrugineux épars. Ces horizons fortement bioturbés et marqués par l'hydromorphie forment ce que l'on appellera « l'ensemble meuble ». La surface du sol présente un micro-relief dû aux taupinières et aux chablis.

Sous la carapace on observe un horizon argilo-sableux bicolore, acide, qu'on dénommera « basal », composé d'un réseau de veines grises déferruginisées isolant des volumes jaune-rouille. Plus en profondeur, apparaît une phase jaune plus pâle qui se présente comme le

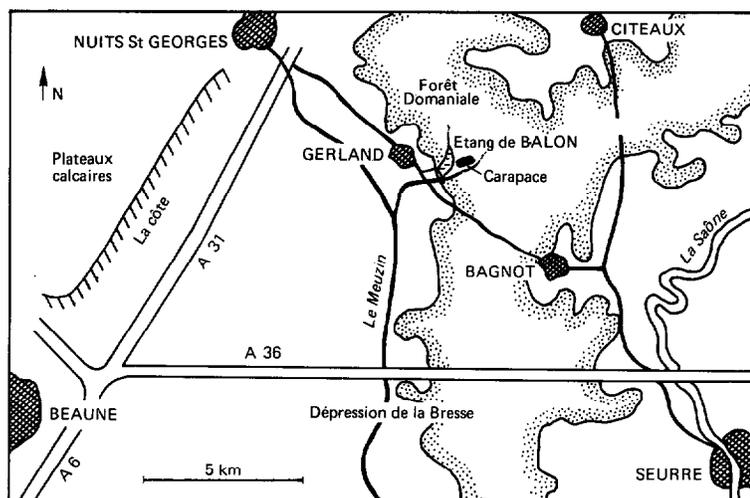


FIG. 1. — Situation géographique de la zone étudiée.

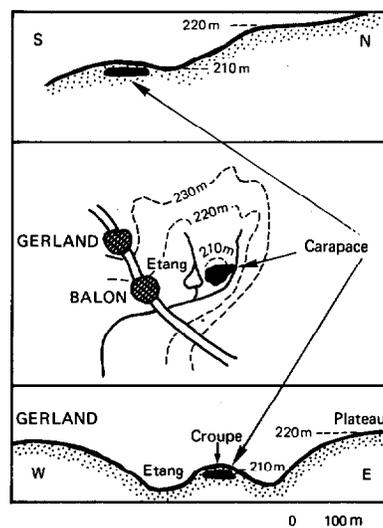


FIG. 2. — Localisation de la carapace sur la terrasse alluviale de la Saône.

matériau originel des phases grises et jaune-rouille. Sa structure alluviale est peu apparente sinon par l'orientation horizontale de certaines veines grises et, à l'examen au MEB, par l'alignement de petits grains du squelette. En outre, on observe dans la partie inférieure de la carapace des passées sableuses subhorizontales dont l'origine sera discutée.

A l'aval de la carapace, le sol présente, dans le prolongement de celle-ci, des nodules épars irrégulièrement distribués en poches et qu'on peut regrouper en deux « horizons faiblement nodulaires ». On retrouve au-dessous l'horizon bicolore basal ainsi qu'un mince aquifère sableux. Le raccord entre cet aquifère du versant et les passées sableuses de la base de la carapace n'a pas été trouvé : on suppose qu'il sinue en dehors du plan de la toposéquence étudiée.

En profondeur cet horizon bicolore basal présente des nodules carbonatés d'abord petits, puis centimétriques. La carte géologique (A. CAIR, 1980) indique d'ailleurs un substrat marneux (marnes d'Auvillars).

Un sondage géologique profond (R. FLEURY, 1976) effectué dans le plateau voisin (altitude 220 m), traverse à 6 m de profondeur une couche nodulaire épaisse de 1 m environ. On envisagera donc que la carapace étudiée corresponde à la venue en surface d'une telle formation.

On décrira d'abord l'organisation générale de la carapace avec son réseau de veines argileuses et ses deux faciès nodulaires (compact et friable), associés depuis la partie sommitale jusqu'au bord biseauté de la carapace, puis on précisera comment se déferruginisent et se désorganisent ces différentes composantes : nodules ferrugineux avec ou sans coiffe siliceuse, lamelles nodulaires en paroi de veines, amas nodulaires du biseau péri-

phérique. Les figures de déferruginisation observées dans le reste de la toposéquence seront décrites ensuite, en distinguant l'ensemble meuble sus-jacent à la carapace, l'horizon bicolore basal et le sol de l'aval. Enfin on discutera des traits originaux de cette carapace et de son évolution actuelle.

II. ORGANISATION GÉNÉRALE DE LA CARAPACE

L'étude a été faite dans des fosses ou tranchées alignées suivant une toposéquence radiale de direction SE (fig. 2 et 3). Dans la zone sommitale la pente du toit de la carapace est de 1 % et conforme à la surface topographique ; elle augmente à 2,5 % dans la zone latérale. La carapace disparaît en biseau dans la zone périphérique. A ce biseau correspond, en surface, une légère rupture de pente et un approfondissement des horizons meubles de surface.

La carapace est composée de 2 faciès, l'un compact, l'autre friable (fig. 3). Ce dernier s'inscrit dans des passées sableuses qui peuvent être soit le matériau d'accueil de la ferruginisation, soit au contraire le résultat d'une déferruginisation du faciès friable. De même la forme contournée et progressive du contact entre faciès compact et faciès friable évoque une relation de filiation. L'étude de ces contacts doit renseigner sur ces relations génétiques possibles.

1. Réseau de veines et nodules lamellaires associés (fig. 4)

Un réseau principal de veines orthogonales divise la zone sommitale en compartiments de largeur demi-métrique ; les veines horizontales sont plus nombreuses

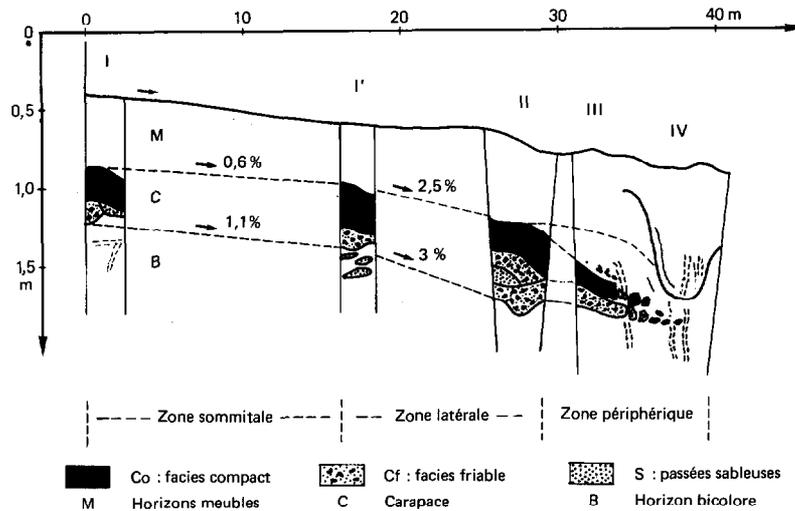


FIG. 3. — Organisation de la carapace (toposéquence radiale de direction SE).

et rapprochées dans la zone latérale. Chaque veine présente une partie centrale gris clair, déferruginisée, avec un pore planaire axial irrégulier, en partie revêtu de cutanes. Elle est bordée d'un liseré rouille, millimétrique, plus ou moins déferruginisé et d'une ou plusieurs couches litées de nodules lamellaires, cimentés secondairement. La veine horizontale supérieure de chaque cellule est bombée, formant entonnoir à la jonction des veines verticales.

La désorganisation de la carapace est très marquée à sa partie supérieure en relation avec une multiplication de veines horizontales secondaires. Cette désorganisation est également accentuée à la base de la carapace, au droit des « entonnoirs » ou de veines verticales secondaires.

2. Faciès compact

Le faciès compact, très développé dans la zone sommitale, (fig. 4-I), se caractérise par de gros nodules noirs, centimétriques, emballés dans une matrice argilo-limono-sableuse, représentant 30 à 50 % de la masse. Ce faciès est associé principalement à des veines verticales.

Les nodules, simples ou complexes, ont souvent un cortex blanc, siliceux, ne recouvrant pas la totalité des nodules. Ils comportent :

- un squelette, essentiellement quartzeux : 55 % de quartz dans le noyau des nodules et jusqu'à 80 % dans le cortex ;
- une teneur de 20 à 30 % en argiles 2/1, surtout smectitiques ;
- des teneurs en sesquioxydes de fer variables : 8 %

dans les cortex pour 18 % dans les noyaux des nodules ; — le manganèse (2 à 3 %) colore en noir tous les nodules ; il est très mobile ; il revêt par ailleurs les surfaces d'agrégats, de fissures et autres vides.

3. Faciès friable

Le faciès friable apparaît toujours à la base de la carapace et se développe particulièrement dans les zones latérale et périphérique (fig. 4-II, III). Sa structure est litée et lenticulaire. Il est associé principalement à des veines horizontales, souvent sableuses. Il est formé de nodules plus petits, à cassure brun-rouge, emballés dans une matrice sableuse. Ces nodules peuvent également présenter un cortex blanc, siliceux. Ils diffèrent des nodules du faciès compact par leur moindre teneur en Fe_2O_3 ; cortex (9 à 12 %) et noyau (7 à 13 %).

4. Relations entre les 2 faciès

Le faciès friable est à l'évidence lié à des passées sableuses alluviales lenticulaires. Mais cette texture plus grossière de la matrice extra-nodulaire peut avoir été accentuée par un départ préférentiel des éléments fins et des solutions par soutirage latéral (fig. 4 II).

Les passages entre le faciès compact supérieur et le faciès friable sous-jacent, sont parfois, mais rarement, très nets ; le plus souvent c'est à l'intérieur même du faciès compact qu'apparaissent des plages de faciès friable, où le passage de l'un à l'autre se fait progressivement.

5. Biseau périphérique de la carapace (fig. 4 III)

A ce niveau, les deux faciès, qui subsistent à l'aval

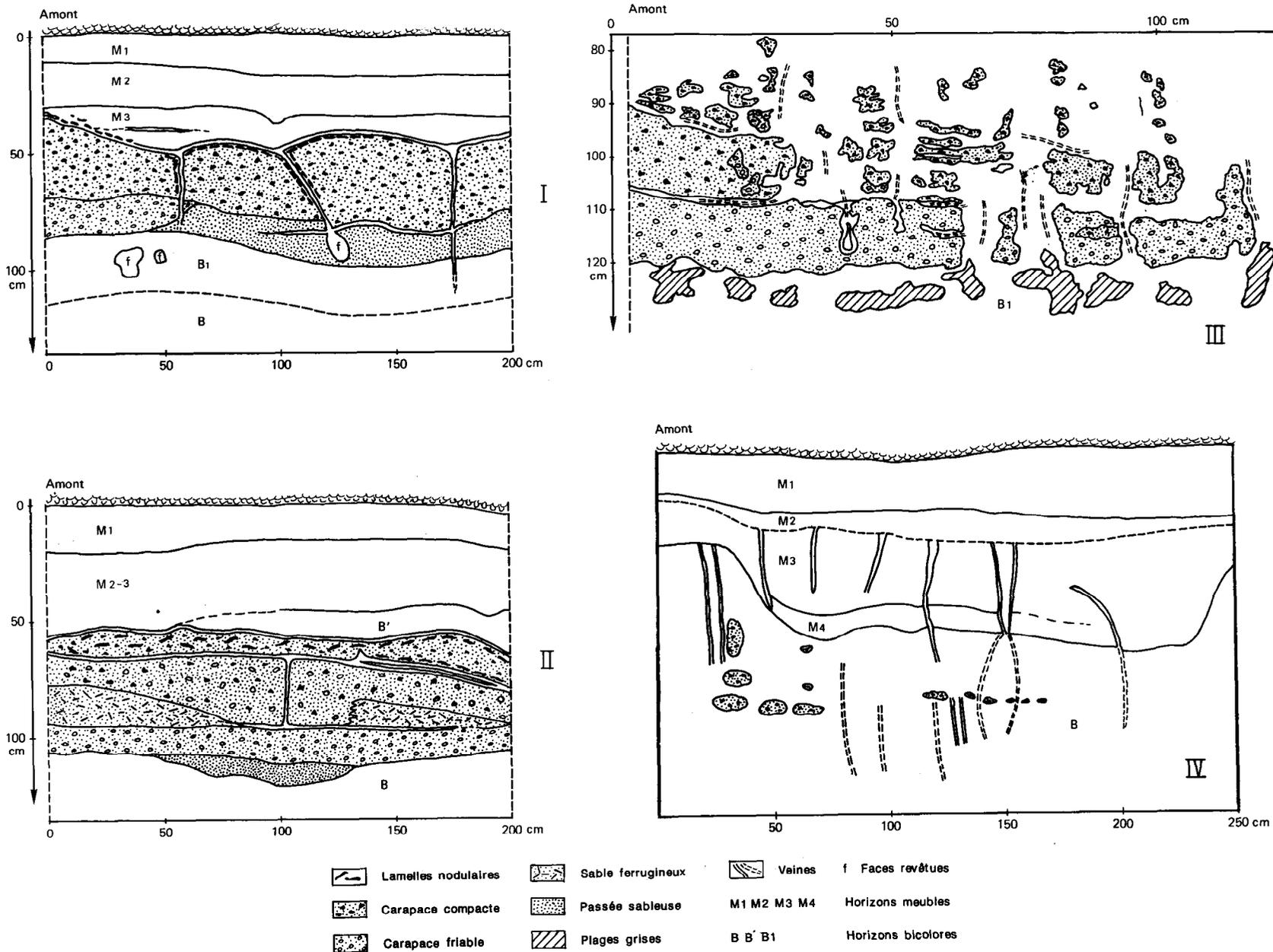


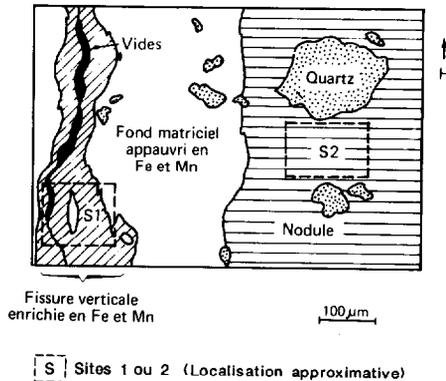
FIG. 4. — Coupe schématique des fosses I II III et IV.

sur 30 cm d'épaisseur, séparés par une large veine horizontale, sont progressivement découpés par un réseau de veines à mailles de plus en plus serrées. Les blocs relictuels d'abord prismatico-cubiques, puis à net allongement vertical ne subsistent plus à l'aval qu'en filots alignés horizontalement.

On observe dans les horizons meubles sus-jacents aux filots relictuels du biseau de la carapace, de nombreuses veines grises verticales, bordées d'un liseré ocre-rouille, durci, de 0,5 à 1 cm d'épaisseur. Ces veines pourraient être les témoins relictuels d'une extension antérieure de la carapace.

III. DÉGRADATION DE LA CARAPACE

Les observations de terrain indiquent que la carapace est le siège d'une déferrugínisation associée principalement au réseau de veines : ainsi, la veine horizontale



supérieure, le débouché des « entonnoirs » et la zone périphérique où la maille du réseau se rétrécit, correspondent à des fronts principaux de déferrugínisation. Toutefois la cimentation des nodules en bordure des veines indique qu'il peut y avoir des figures de recimentation associées.

Les données obtenues aux niveaux microscopiques permettent de préciser ces différentes figures liées à la déferrugínisation. Elles montrent aussi que celle-ci peut affecter des nodules éloignés de veines principales, au sein du faciès compact comme du faciès friable.

1. Figures de déferrugínisation des nodules, hors veines principales

1.1. DANS LE FACIÈS COMPACT (PARTIE SUPÉRIEURE)

On y constate une désorganisation des nodules par départ de sesquoxydes et d'argile en bordure de fissures ou de petites veines verticales (fig. 5) ; ce type de désorganisation est le plus fréquemment observé dans ce faciès. Le site 2, au sein du nodule n'est pas ou peu altéré. La répartition du manganèse (1) en lits parallèles, à l'intérieur de fissures horizontales témoigne d'un début de mobilisation de cet élément guidée par la structure litée héritée du matériau alluvial. Le site 1 montre une concentration du manganèse dans une fissure verticale voisine de la matrice extra nodulaire.

1.2. DANS LES NODULES À COIFFE, À LA BASE DE LA CARAPACE (Planche I)

Les nodules y sont surmontés d'une formation litée où alternent des passées argileuses, limoneuses et finement sableuses. Sous cette coiffe, on observe différents

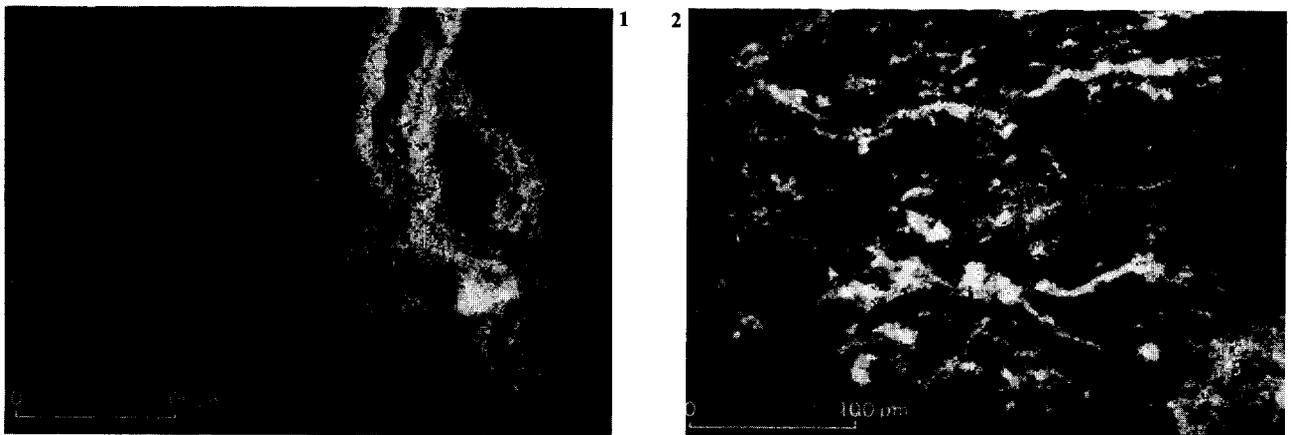


FIG. 5. — Désorganisation des nodules (faciès compact).
Photos 1-2 : Distribution du Mn sur les sites 1 et 2 (étude à la microsonde).

(1) Le fer présente une évolution comparable.

stades de déferruginisation d'un nodule à l'autre (photo 4). Au stade ultime, le nodule est transformé en un agrégat terreux, arrondi pouvant conserver une partie de la coiffe et un ou plusieurs noyaux ferruginisés (photo 3). La différenciation de la coiffe aux dépens du nodule donne souvent à celui-ci une forme en poire (photos 3 et 4).

De nombreuses observations faites au MEB ont montré que des litages de la coiffe avaient des formes ondulées (photo 5). Ces litages ondulés présentent une fissure centrale et sont formés de microcristaux de quartz cimentés par de la silice. Les coiffes protègent partiellement les nodules qui sont altérés par leur base et leur réseau fissural interne. Elles peuvent subsister, plus ou moins nettes, alors que les nodules sont totalement déferruginisés et sont remplacés par des agrégats terreux, arrondis (photo 6).

1.3. DANS LES NODULES DU FACIÈS FRIABLE (Planche I)

La déferruginisation affecte à la fois les nodules et leur matrice.

— dans les nodules elle progresse à partir du centre (voie centrifuge) ; le pourtour du nodule, partiellement protégé par un cortex siliceux, résiste mieux (photo 7) ;
— la matrice extranodulaire est formée d'un squelette quartzueux grossier (0,2 à 0,5 mm) et d'un plasma presque totalement déferrifié (assemblage squelsepique).

La forme du contact (sinuosité, progressivité, reliques) indique que le faciès friable C_f progresse aux dépens du faciès compact C_o (photo 8).

2. Figures de déferruginisation associées aux veines principales (Planche II)

2.1. EN ALLANT DU NODULE VERS LA VEINE (photo 9)

On constate que le nodule brun foncé, ferromanganique, inclut des papules brun rouge, témoins d'anciennes illuviations. Puis il passe progressivement, parfois brusquement, à un liseré brun-rouille où l'organisation du nodule est encore reconnaissable (squelette, multiples papules), mais de plus en plus appauvri en manganèse, puis en fer. Enfin la veine est grise, déferruginisée, formée principalement d'argile smectitique et de quartz très fin, et parcourue de nombreux pores planaires (surtout à la partie inférieure de la carapace). Ces pores peuvent être par points revêtus de cutanes.

Des analyses ponctuelles à la microsonde ont donné, pour Fe_2O_3 , 13 à 15 % dans les nodules, 3 à 6 % dans le liseré, 0,1 % dans la veine.

En conclusion, le liseré correspond à un front de déferruginisation des nodules. Ce processus libère des argiles et du squelette quartzueux qui forment la veine grise. L'argile de celle-ci est également l'objet de transfert (cutanes du vide axial).

2.2. CUVETTES SOUS LA VEINE HORIZONTALE SUPÉRIEURE

Ces cuvettes sont de tailles variées : décimétrique à mil-

limétrique (photo 10). La carte de répartition du fer dans une micro-cuvette (photo 11) souligne à la fois l'élimination de cet élément de la cuvette et sa concentration périphérique dans le nodule. La pellicule d'arrachement (accusée par le séchage) témoigne d'un processus d'altération pelliculaire. Mais la concentration du fer en bordure indique aussi une redistribution à courte distance.

2.3. RELATIONS VEINES-NODULES

Une figure fréquemment observée est la *cimentation en paroi des veines*. La paroi des veines est formée de nodules allongés (lamellaires) qui résultent de la cimentation, à cet endroit, de plusieurs nodules de la carapace (photos 12 et 13). Cette cimentation secondaire est attestée en lame mince par l'inclusion de papules et de cutanes témoins d'illuviation antérieure.

Les vides, à l'intérieur des veines et/ou les fissures, sont totalement ou partiellement dépourvus de cutanes (partie supérieure de la carapace, photo 12, veine verticale profonde photo 14), ou recouverts transitoirement d'abondants cutanes (argilo-ferrimanganés) (photo 15).

IV. FIGURES DE DEFERRUGINISATION DANS LE RESTE DE LA TOPOSÉQUENCE

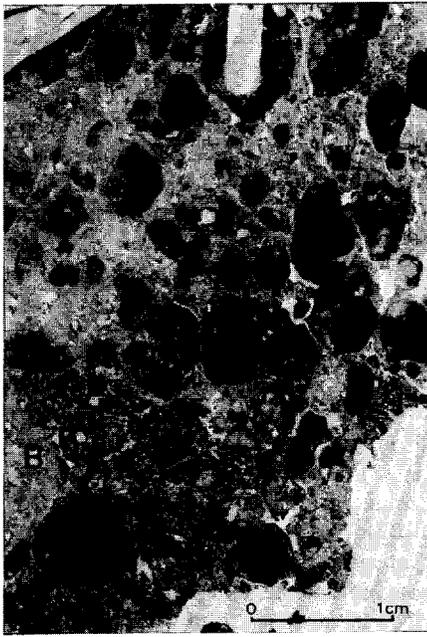
On observe aussi des nodules ferrugineux dans les horizons sus-jacents à la carapace, ainsi qu'à l'aval de la toposéquence et dans l'horizon bicolore basal (fig. 6). On constate également une redistribution profonde de l'argile.

1. Nodules épars dans les horizons meubles sus-jacents à la carapace (Planche III - Photo 21)

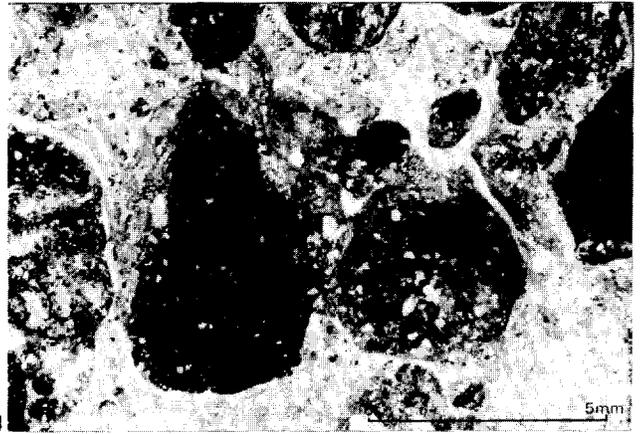
On a vu précédemment que le sommet de la carapace se présente comme un front de déferruginisation, marqué de microcuvettes, où la carapace se transforme en un matériau sablo-argileux gris formant la veine horizontale supérieure. Au-dessus, le sol est meuble et différencié en trois horizons gris contenant quelques nodules épars, de moins en moins abondants vers le haut. Localement, juste au-dessus de la veine supérieure horizontale, on observe la superposition de deux ou trois lamelles nodulaires de plus en plus désagrégées vers le haut, attestant de l'enfoncement du front de désorganisation de la carapace.

Les nodules épars dans ces horizons meubles ont des formes ramassées, un cœur noir, un cortex brun jaune (10 YR 5/6) et un contact net avec la terre fine, parfois par l'intermédiaire d'une auréole brune. Ils contiennent peu de Fe_2O_3 (6 %) et de MnO_2 (2 %).

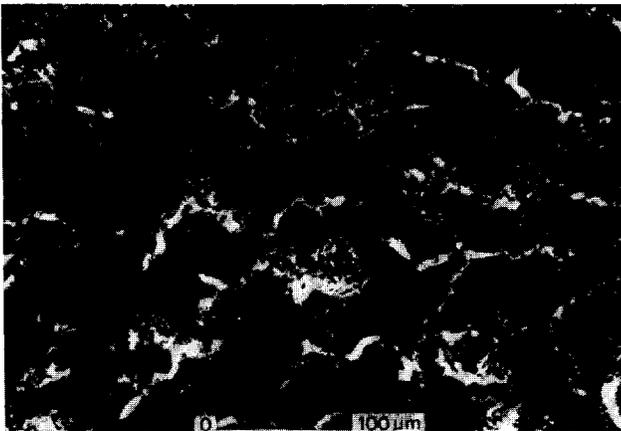
L'abondance des taupinières et surtout des chablis remontant des nodules arrachés aux lamelles supérieures de la carapace (observation de l'enracinement au niveau des souches) indique que ces nodules ne sont pas dans leur structure originelle. Ils sont en cours de



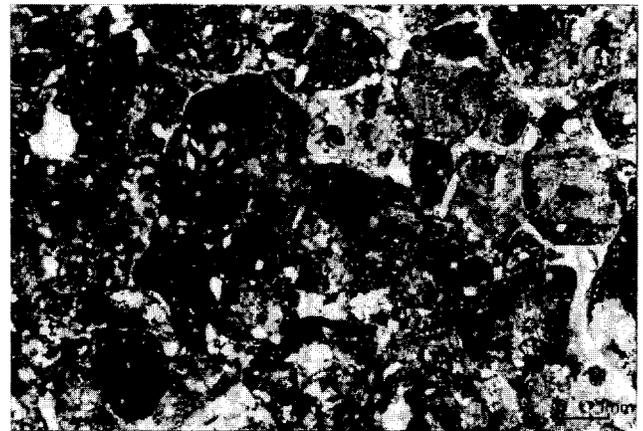
3



4



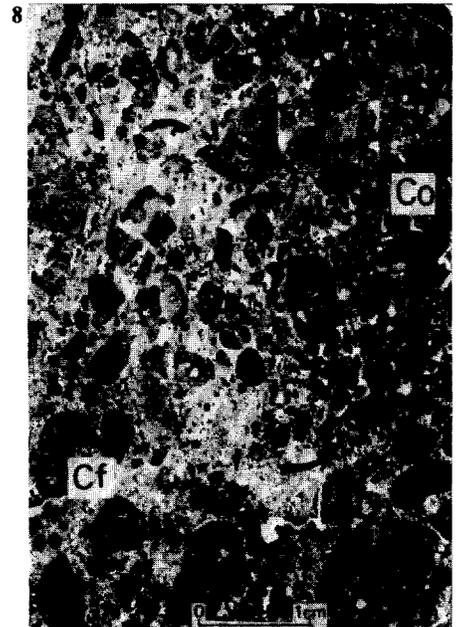
5



6



7



8

PLANCHE I

Nodules à coiffe en cours de déferrugination

PHOTO 3. — Contact carapace (C) - horizon bicolore (B). PHOTO 4. — Nodules à coiffe plus ou moins déferruginisés. PHOTO 5. — Coiffe vue au MEB : litages ondulés siliceux. PHOTO 6. — Agrégats terreux à noyaux ferrugineux.

Faciès friable (cf) de la carapace

PHOTO 7. — Altération centrifuge d'un nodule du faciès friable emballé dans sa matrice déferrifiée et grossièrement quartzeuse. PHOTO 8. — Progression du faciès friable (cf) aux dépens du faciès compact (Co).

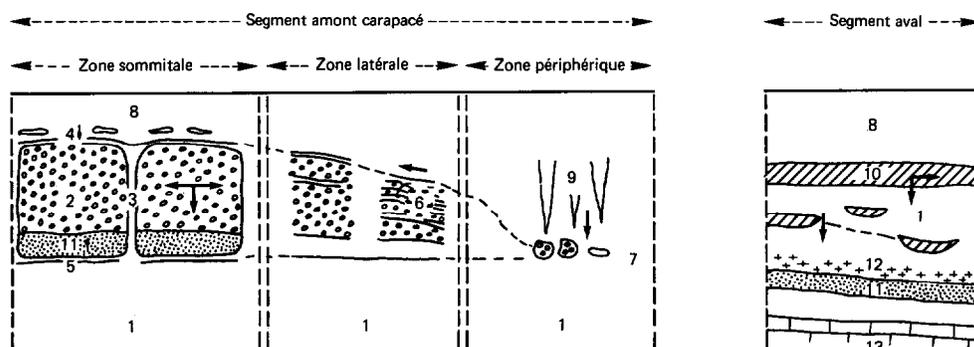


FIG. 6. — Coupe schématique de la toposéquence.

- | | |
|--|---|
| (1) = horizon bicolore | (8) = horizons meubles |
| (2) = faciès compact et faciès friable | (9) = horizons meubles à veines relictuelles |
| (3) = veines verticales et lamelles nodulaires | (10) = horizon ou poches nodulaires |
| (4) = veine horizontale supérieure | (11) = passées sableuses |
| (5) = ségrégations ferromanganiques | (12) = limite supérieure des nodules carbonatés |
| (6) = réseau de veines en bordure de la carapace | (13) = matériau carbonaté profond |
| (7) = amas nodulaires de la zone périphérique | — fronts de déferruginisation |

déferruginisation périphérique dans ces horizons meubles où il ont été remontés (gain de potentiel gravitaire pour le fer) par des actions biologiques qui les placent dans des conditions de destruction accélérée (pédoclimat contrasté avec drainage des éléments solubilisés).

2. Horizons nodulaires de l'aval de la toposéquence (Planche III)

Les nodules épars ou en amas dans ces horizons présentent des figures de dégradation caractéristiques des phases des mêmes processus de déferruginisation et de désorganisation des nodules.

a) *Fissuration des (amas de) nodules* par un réseau orthogonal (photo 16) les débitant en petits cubes (0,1 à quelques millimètres de côté). Les fissures verticales de ce réseau prolongent celles de la matrice extranodulaire et peuvent présenter un tracé en baïonnette à la traversée des fissures horizontales. Celles-ci, plus larges et plus continues, se prolongent également dans le fond matriciel environnant. Ce réseau de fissures est le siège d'un appauvrissement en sesquioxydes et en argile (septarisation).

b) *Individualisation* par les fissures précédentes, de nodules plus petits, allongés horizontalement ou verticalement (photo 17).

c) *Déferruginisation de ces petits nodules*, centripète à partir du cortex (photo 18) ou au contraire centrifuge à partir des fissures internes (photo 19). Dans les deux cas on observe des halos glébulaires en lignes successives allant vers les vides périphériques extranodulaires.

d) *Désorganisation complète* du nodule initial ne laissant subsister dans la matrice que des très petits nodules

(comme à la base de la carapace et dans les horizons meubles) (photo 20).

3. Ségrégation du fer dans l'horizon basal bicolore (Planche IV)

L'horizon basal de la toposéquence présente localement au MEB une structure très finement litée horizontalement qui hérite, et atteste, de son origine alluviale.

En profondeur (4 m) cet horizon argilo-limoneux est jaune (10 YR 5/6) parcouru seulement par quelques minces cloisons verticales grises (5 YR 7/1) sinueuses et anastomosées, avec une bordure brun rouille (7,5 YR 5/6). Plus haut, la phase brun rouille se développe, ainsi que la phase grise, par épaissement et multiplication de cloisons verticales et horizontales (photos 22-23). Par contre, la phase jaune s'amenuise et l'horizon devient bicolore. Dans l'horizon B1, la phase grise représente jusqu'à 30 à 50 % du volume.

Cette succession verticale (de bas en haut) correspond à des stades successifs de transformation du matériau lité jaune, par déferruginisation et redistribution du fer :

a) Réseau lâche de fissures verticales orientant les infiltrations profondes.

b) Différenciation de veines à cœur gris déferrié et liseré brun rouille, d'abord verticales puis en réseau orthogonal de plus en plus serré.

c) Coalescence des veines grises par élargissement de larges glosses isolant des reliques brun rouille (photo 24). Plus haut la bioturbation efface cette structure orthogonale et bouleverse les îlots relictuels brun-rouille qui se déferruginisent : transformation en horizons meubles supérieurs, comme au-dessus de la carapace.

4. Distribution du fer et de l'argile (tableau I)

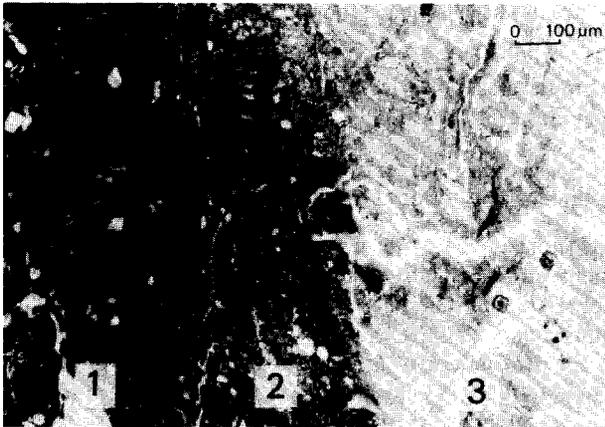
Les horizons meubles pédoturbés sont nettement appauvris en argile et en fer, ainsi que la partie supérieure de l'horizon bicolore (absence de cutanes). Au contraire, la partie médiane de cet horizon bicolore (0,7 à 2 m) est nettement enrichie et on y observe de nombreux cutanes argileux et sesquioxydiques. Il y a donc une importante illuviation à ce niveau.

Dans la partie supérieure de l'horizon bicolore (40 à 70 cm), appauvrie en éléments fins, la phase grise est aussi peu argileuse que la phase rouille mais nettement déferruginisée. De 70 à 150 cm, la phase rouille est nettement enrichie en fer (4,4 %), relativement aux horizons profonds (3 %). Par contre la phase grise est

déjà nettement appauvrie en fer (2,5 %) mais enrichie en argile smectitique.

Ces sols présentent donc un *système éluvial-illuvial* qui témoigne de l'importance du processus de lessivage et où l'accumulation du fer et celle de l'argile se produisent au même niveau (entre 0,7 et 2 m de profondeur) mais dans des domaines séparés : l'argile dans les veines, le fer en dehors (phase rouille).

Ainsi les données analytiques confirment les observations micro et macro-morphologiques qui mettent en évidence l'intervention profonde de processus pédogénétiques dans l'horizon bicolore. Le matériau originel de ces sols, dans la mesure où il a été conservé, est donc à rechercher plus profondément.



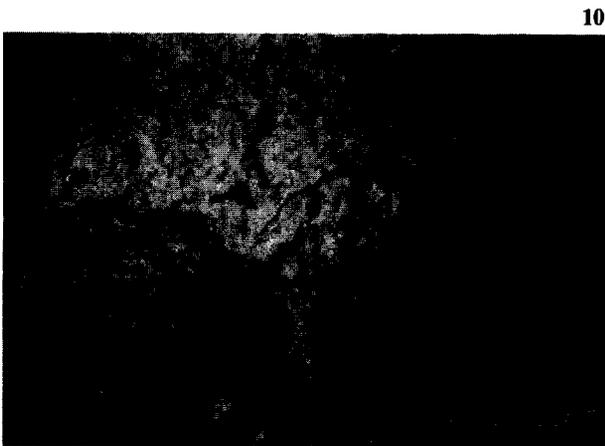
9

PLANCHE II

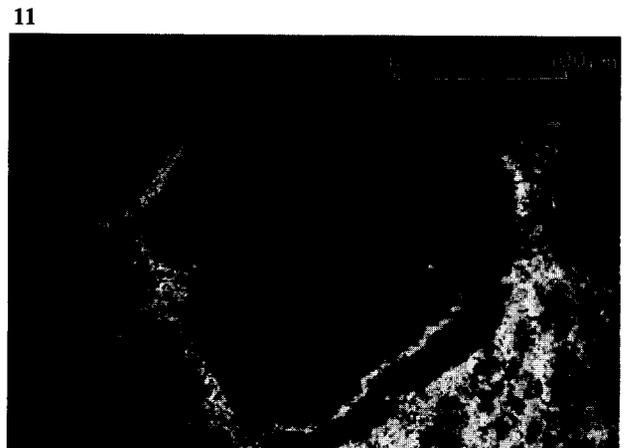
PHOTO 9. — Transec nodule (1) - liseré (2) - veine (3).
 PHOTO 10. — Cuvette de largeur décimétrique en surface de la carapace. Nodules lamellaires bordant les veines.
 PHOTO 11. — Distribution du fer autour d'une microcuvette en surface de la carapace. Veine horizontale de surface et lamelles sous-jacentes.
 PHOTO 13. — Vue agrandie d'une lamelle.
 PHOTO 14. — Veine verticale interne.
 PHOTO 15. — Veine horizontale interne.

Significations des symboles :

V = veine — i = liseré — Co = faciès compact — M = hor. meuble — cf = faciès friable — Cl = lamelle nodulaire.



10



11

V. DISCUSSION

1. Différentes figures de déferruginisation

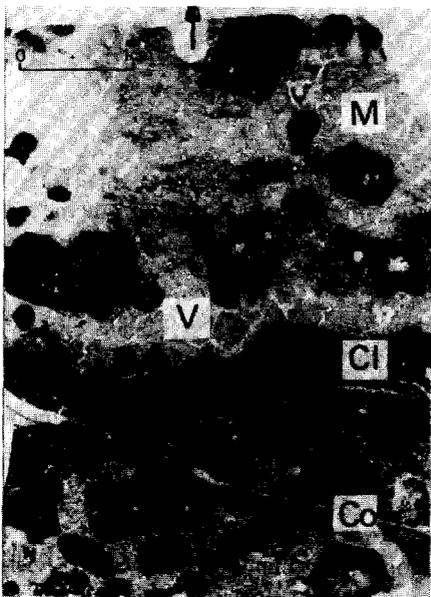
La couverture de sol étudiée en forêt de Cîteaux présente d'importantes figures de ségrégation du fer sous forme d'une carapace continue au sommet de la toposéquence et d'horizons nodulaires sur le versant. Des nodules s'observent aussi dans les horizons supérieurs bioturbés ainsi qu'au sommet de l'horizon basal bicoloré.

L'étude à différents niveaux de ces ségrégations variées a montré que celles-ci étaient globalement en cours de *déferruginisation*, entraînant leur *désagrégation*. Cependant ces deux mécanismes s'associent

diversement selon le niveau considéré et les conditions du milieu :

Dans les nodules au sein de la carapace, la déferruginisation progresse de l'intérieur (elle est centrifuge) là où le cortex est protégé par une pellicule ou une coiffe résistante (lits siliceux). Cette pellicule retarde la désorganisation, mais semble favoriser la déferruginisation (milieu réducteur à porosité fine). Les argiles et le squelette quartzeux libérés peuvent se réorganiser sur place. C'est le cas à la base du faciès compact où les nodules ferrugineux se transforment, sous leur coiffe, en agrégats terreux arrondis (comme en milieu tropical, cf. G. BOCQUIER *et al.*, 1984) (Pl. I - Photo 7).

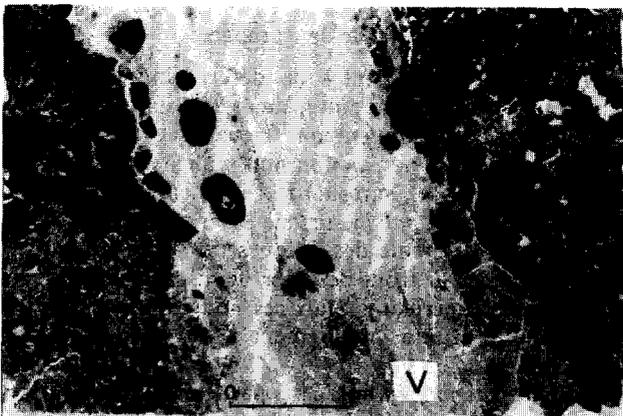
L'argile peut aussi alimenter des argilanes dans les



12



13



14



15

TABLEAU I
Teneurs en argile et en fer à différents niveaux
R = phase rouille et G = phase grise

Localisation	Prof. (cm)	Phase	Argile %	Fer %	
				tot.*	lib.**
• Horizons supérieurs • Veine de la carapace	0-30		10	1,3	0,9
				3	0,1
• Horizons bicolores	40-70	R	19	3,2	2,2
		G	17	1,8	1,1
	70-100	R	30	4,3	2,8
		G	35	2,4	1,1
	130	R	33	4,4	
	200 à 400	G	43	2,5	
R		30	3,0		
	400	G	32		

* extraction avec HCl

** méthode DEB

vides sous-jacents, vides créés par les redistributions du fer (nombreuses papules intra-nodulaires).

Dans la carapace mais près des veines principales horizontales et verticales, les nodules se cimentent en lamelles formant les parois de ces veines ; la cimentation de la carapace apparaît alors comme une phase transitoire de sa destruction.

La veine horizontale supérieure se présente comme un front de déferruginisation, progressant par coalescence de micro-cuvettes, ce qui libère quelques nodules qui échappent alors en partie à la déferruginisation.

Dans les veines la déferruginisation est totale et l'argile smectitique s'accumule de façon relative (argile libérée) ou absolue (illuviation, néoformation).

Les nodules conservés lors de la traversée de la veine supérieure et ceux qui sont arrachés par chablis se trouvent rapidement placés dans des horizons bioturbés (horizons supérieurs) où les conditions sont alternativement réductrices et drainantes : ils se détruisent par déferruginisation périphérique (auréole).

Les nodules du versant se déferruginisent, soit sur leur périphérie, soit à partir d'un réseau de fissures interne, donc alors par voie centrifuge comme les nodules de la carapace. Ils sont ensuite désorganisés et disparaissent dans les horizons bioturbés sus-jacents. La superposition de deux horizons nodulaires (peu concentrés) sur le versant suppose un enfoncement du modelé qui a amené une redistribution du fer de l'horizon supérieur dans l'horizon inférieur (déferruginisation par accentuation du contraste saisonnier d'oxydo-réduction,

comme pour les nodules des horizons supérieurs). L'horizon nodulaire inférieur peut être lui-même en cours de déferruginisation au profit de l'aquifère sous-jacent (ségrégations brunes diffuses, non consolidées dans celui-ci).

Les îlots brun-rouille qui s'individualisent progressivement de bas en haut de l'horizon bicolore basal, à partir d'un réseau orthogonal de veines, correspondent au contraire à un mode de formation possible de nodules. Le fer qui s'y concentre peut provenir à la fois du matériau originel jaune et d'apports liés à la déferruginisation de nodules placés à l'amont des flux (carapace, horizons nodulaires, nodules isolés).

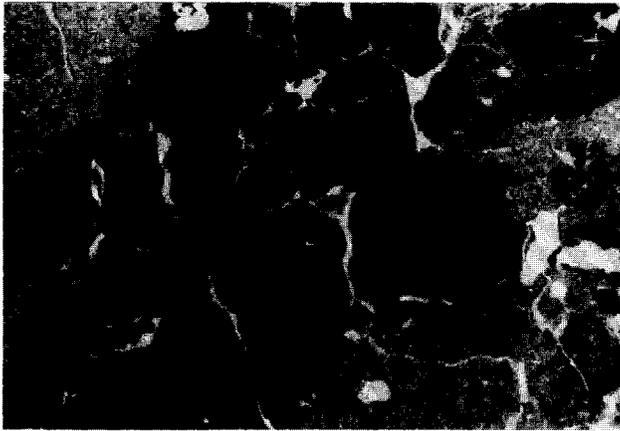
Selon les conditions qui règnent au sommet de l'horizon bicolore, ces ségrégations disparaissent ou se transforment en nodules.

2. Evolution actuelle de la carapace

Les figures précédentes de déferruginisation et de désorganisation des nodules, amas nodulaires et lamelles nodulaires, indiquent que la carapace est globalement en cours de destruction non seulement par sa surface mais aussi et surtout de l'intérieur.

La destruction par la surface est incomplète puisque des nodules et même des reliques de lamelles nodulaires échappent au front de déferruginisation de la veine horizontale supérieure. Mais ces nodules relictuels disparaissent ensuite rapidement dans les horizons sus-jacents.

La destruction interne est particulièrement active. Dans la zone périphérique la forme du biseau indique



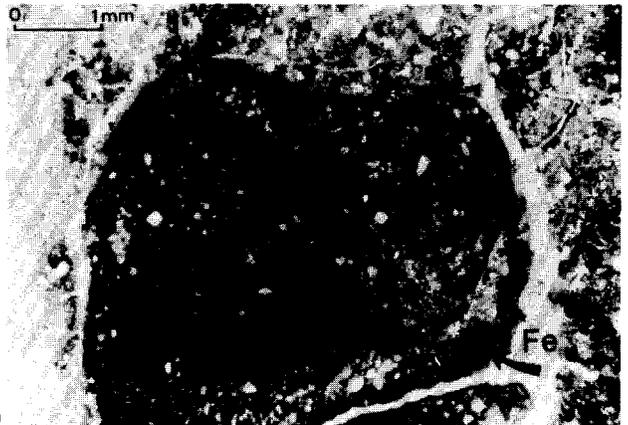
16



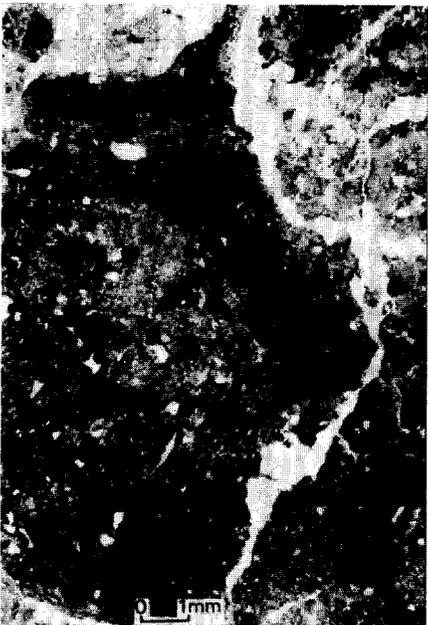
17



18



19



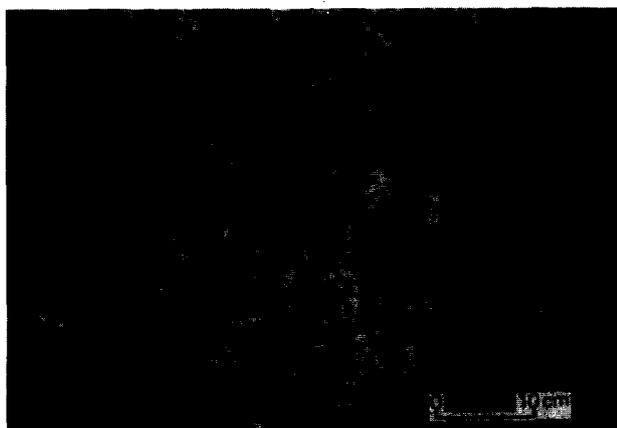
20



PLANCHE III

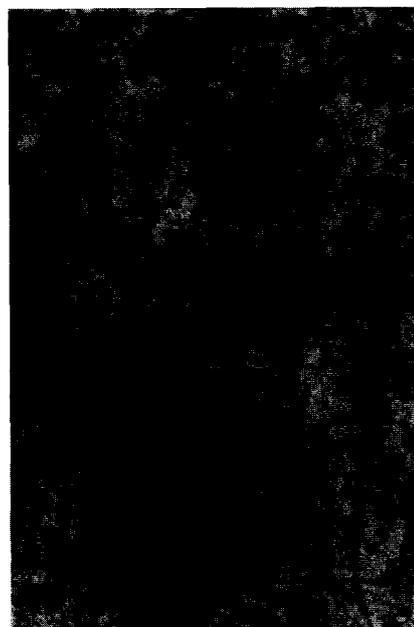
Déferruginisation des amas nodulaires et des nodules isolés

PHOTO 16. — Fissuration en réseau orthogonal. PHOTO 17. — Allongement vertical. PHOTO 18. — Déferruginisation d'un nodule. PHOTO 19. — Départ du fer vers les fissures (ferranes, subferranes). PHOTO 20. — Amas nodulaires désorganisés à la base des horizons meubles. PHOTO 21. — Nodules reliques au sommet des horizons meubles.



22

23



24

PLANCHE IV

Différenciations observées dans l'horizon bicolore basal
 PHOTOS 22-23. — Réseau orthogonal de veines.
 PHOTO 24. — Coalescence des veines grises.

qu'elle est plus efficace dans le faciès compact qui disparaît le premier. Elle procède par multiplication et élargissement des veines. Dans la zone latérale et la zone sommitale la transformation du faciès compact en faciès friable est associée à la multiplication des veines et à la déferruginisation avec ou sans désorganisation des nodules. Dans les nodules à coiffe la désorganisation est retardée mais la déferruginisation complète aboutit à une transformation en agrégats terreux. Enfin les passées sableuses associées au faciès friable pourraient même correspondre, non pas seulement à des variations dans la sédimentation du matériau alluvial originel, mais aussi à un stade ultime de déferruginisation (et de désaragilisation) de la carapace.

Cette destruction rapide de la base de la carapace nécessite une évacuation latérale des solutions, ce qui suppose un raccord avec un aquifère ayant un exutoire à l'aval. Cet aquifère existe sous le versant (mais son raccord avec la base de la carapace n'a pas été observé dans la toposéquence étudiée).

3. Formation de la carapace

La tendance évolutive actuelle étant à la destruction de la carapace, les conditions de formation de celle-ci ont été évidemment différentes. Une des causes de cette destruction est la proximité de la surface, point de départ de produits humiques complexants et où alternent des conditions réductrices et oxydantes.

Dans ses conditions de formation, la carapace était donc plus éloignée de la surface du sol, dont elle s'est rapprochée depuis progressivement par le jeu normal de l'érosion. Ce dernier a aussi amélioré le drainage latéral des produits dissous issus de la carapace, en plaçant celle-ci en position de commandement. Il n'est donc pas nécessaire de faire intervenir d'autres raisons pour expliquer qu'il y ait successivement formation puis destruction de la carapace.

La couche de gravillons ferrugineux, épaisse d'1 m environ, rencontrée en profondeur (altitude 215 m) dans les sondages profonds effectués à proximité sur le plateau (R. FLEURY, 1976), et fréquemment signalés

ailleurs par A. CLAIR, 1980, pourraient représenter le matériau originel de la carapace étudiée.

La venue de celle-ci près de la surface peut aussi résulter d'un recreusement par reprise d'érosion locale, liée à une action tectonique par exemple, ce qui expliquerait la direction E-W de l'affluent du Meuzin qui draine cette zone.

CONCLUSION

L'étude de la carapace observée en forêt de Cîteaux amène à proposer les étapes suivantes de sa formation, puis de sa destruction en cours :

- Dépôt ou individualisation d'une couche nodulaire en profondeur dans une terrasse alluviale acide.
- Amenée en surface de cette couche par le jeu normal de l'érosion, ou recreusement local, mettant cette formation ferrugineuse globalement en conditions de destruction : milieu réducteur ou complexant, évacuation latérale des solutions facilitée.
- Déferruginisation et désorganisation internes et superficielles des ségrégations ferrugineuses décrites aux différents niveaux d'organisation (nodules, amas nodulaires, lamelles, carapace). Cette destruction s'accompagne localement (paroi des veines) d'une recimentation transitoire (lamelles nodulaires). C'est cette reci-

mentation qui justifie l'appellation de carapace pour cette formation nodulaire « armée ».

Ces processus conduisent du faciès compact de la carapace au faciès friable, puis aux passées sableuses. Ils s'exercent à partir d'un réseau orthogonal de veines principales, complété par des veines secondaires irrégulières. Ils procèdent beaucoup plus par multiplication des veines que par élargissement de celles-ci.

Le tracé du réseau de veines principales pourrait être guidé, pour les veines horizontales par le litage hérité de l'alluvionnement et pour les veines verticales par des fissures de déshydratation. Cette région a en effet subi les variations climatiques du Quaternaire, ce qui expliquerait la profondeur atteinte par la pédogenèse (5 m).

En bref, les hypothèses principales proposées pour expliquer l'évolution actuelle de cette carapace sont les suivantes :

1. Sa destruction est une conséquence de son rapprochement de la surface par érosion.
2. Sa cimentation n'est qu'une étape de sa destruction.
3. Cette destruction se fait surtout de l'intérieur, par densification d'un réseau de veines.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 12 mars 1987.

BIBLIOGRAPHIE

- BLAVET (D.), 1982. — Aspect de la distribution des oxydes de fer et de manganèse dans les sols hydromorphes dits « lessivés » de la forêt de Cîteaux. Problèmes de la contribution de la pédogenèse à la différenciation verticale de ces sols. ORSTOM, inédit.
- BOCQUIER (G.), MULLER (J.P.), BOULANGÉ (B.), 1984. — Les latérites. Connaissances et perspectives actuelles sur les mécanismes de leur différenciation. AFES Livre jubilaire du cinquantenaire : 123-138.
- CHRÉTIEN (J.), 1976. — Carte pédologique de la France à 1/100 000 feuille de Dijon, INRA-SESCPF - carte et notice 218 p.
- CLAIR (A.), 1980. — Carte géologique de la partie Nord de la Bresse au 1/250 000. INRA - Science du Sol. Chambre régionale d'Agriculture de Bourgogne, 43 p.
- CLAIR (A.) et LENEUF (N.), 1971. — La plaine de la Saône. Données morphologiques, tectoniques et stratigraphiques. *Bull. AFES* n° 4.
- CLAIR (A.) et VERMI (P.), 1975. — Formations superficielles de la Bresse entre la Côte et la Saône. Notice et carte géopédologique à 1/150 000, INRA Dijon.
- FLEURY (R.), 1976. — Fiches de sondages en forêt de Cîteaux.
- FRITSCH (E.), 1984. — Les transformations d'une couverture ferrallitique en Guyane française. ORSTOM, Paris, 190 p.
- HERNANDEZ (J.-M.), 1985. — Etude morphologique à différentes échelles du segment aval d'une séquence de sols en forêt de Cîteaux. Mémoire de DEA — Université de PARIS VII, INA Paris-Grignon, ORSTOM, 54 p. *multigr.*
- IGUE (A.M.), 1984. — Etude d'une cuirasse ferro-manganique en forêt de Cîteaux : différenciation verticale et latérale. Mémoire de DEA. Université de PARIS VIII, INA Paris-Grignon — ORSTOM, 105 p. *multigr.*

LAMOUREUX (M.), BELLIER (G.), HUMBEL (F.X.), VEILLON (L.), 1985. — Structure et évolution actuelle d'une carapace ferro-manganique en forêt de Cîteaux (Bourgogne). Programme et livret guide de l'excursion pré-Congrès. Réunion Internationale de Micromorphologie des sols. Paris, 1985.

PLANSON (E.) et AMIOT (M.), 1984. — Un petit atelier de métallurgie d'époque romaine à proximité du sanctuaire des Bolards (Nuits-St-Georges, Côte-d'Or) 109^e Congrès national des Sociétés Savantes, Dijon. Histoire des

Sciences et des Techniques, p. 23-24.

TROUCHE (G.), 1981. — Aspects agronomiques et hydrodynamiques du drainage des sols à profil différencié du Val-de-Saône. Thèse Doct. Ingénieur, Univ. de Dijon, 201 p.

VIZIER (J.F.), 1982. — Contribution à l'étude des phénomènes d'hydromorphie dans les sols des régions tropicales à saisons contrastées — dynamique du fer et différenciation des profils. Thèse Univ. Dijon et *Trav. et Doc.*, n° 165, ORSTOM, 294 p.