

CROUTES ET ENCROUTEMENTS CALCAIRES AU MAROC

J. WILBERT

SOMMAIRE

Définitions

Associations observées entre les diverses formes

Processus de genèse des faciès

Chronologie des croûtes

Rôle du pédoclimat dans la constitution des profils

Répartition géographique

Conséquences agronomiques

Conclusions.

La « croûte calcaire » a fait déjà l'objet d'une très importante littérature dont on trouve un aperçu substantiel dans la thèse de J. H. DURAND (1953) et le livre « Les sols rouges et les croûtes en Algérie » du même auteur (1959). Ce sont essentiellement les pédologues et les géographes qui émettent des opinions sur ce phénomène aux multiples aspects, et il semble de plus que les polémiques prennent souvent naissance dans la diversité des termes employés et aussi dans celle des acceptions d'un même terme suivant les auteurs. Le Maroc ne devait pas échapper à ces problèmes. Mais, si à l'heure actuelle il est possible d'envisager de faire le point du problème en ce pays, cela est dû à la fois au dynamisme et à l'extension des recherches sur les divers phénomènes du Quaternaire menées par une équipe de géographes de valeur, et à une certaine orientation dans l'esprit avec lequel ont été entreprises les prospections pédologiques qui tendent à couvrir l'ensemble du territoire, tout au moins du Maroc occidental, des Triffa proches de l'Algérie jusqu'au Sud marocain en passant par les plaines de la Meseta atlantique, le Tadla et le Souss. Cet esprit a poussé les pédologues à étudier non plus les seuls profils de sols mais bien les processus pédologiques qui ont donné naissance à ces profils, tant dans l'espace que dans le temps, donc la pédogenèse dans toute l'acception du terme, avec un esprit teinté par la géographie, science de synthèse. Nous verrons d'ailleurs que les conceptions exposées ci-après tiennent compte d'un ensemble complexe de facteurs, qui cherche à donner une explication de la nature des phénomènes envisagés.

DEFINITIONS

Il convient tout d'abord de préciser le sens donné aux termes utilisés dans cette étude.

Nous appelons *croûte lamellaire* (ou zonaire) une formation de calcaire très dure, souvent peu épaisse (quelques centimètres), d'aspect sublithographique et présentant une cassure rubannée, formée par la superposition de lits alternativement clairs et colorés, disposés en général suivant une direction sub-horizontale. C'est la définition de J. H. DURAND.

Nous appelons *encroûtement crayeux ou tuffeux* (le « taffeza » de BOULAINÉ), ce que DURAND nomme « formations pulvérulentes ». Il s'agit d'une formation souvent litée, composée d'un matériau très riche en calcaire, souvent très blanc, pulvérulent ou plus consistant mais d'aspect amorphe. On rencontre cette formation le plus souvent sous la croûte lamellaire.

Nous appelons *encroûtement granulaire, nodulaire ou stalactiforme* suivant la taille et la forme des éléments concrétionnés, ce que DURAND nomme « nodules concrétionnés ». En effet, il s'agit d'un horizon massif, assez cohérent, formé d'une pâte calcaro-terreuse, jaune à blanc jaunâtre, contenant de plus ou moins nombreux nodules de forme arrondie ou allongée, rarement fourchue, disposés en chapelets verticaux, visibles quand les nodules ne sont pas trop abondants, comme le long du cheminement des racines. La structure de ces nodules sciés montre une zonalité rayonnante à partir d'un canalicule central où il est exceptionnel de trouver des débris organiques végétaux. En surface, une patine jaune orange de texture plus amorphe recouvre le cœur souvent bien cristallisé (finement). Les granules sont plus petits que les nodules qui peuvent atteindre le centimètre de diamètre. Les graviers sont plus grands encore. Quant à l'encroûtement stalactiforme, il se présente dans les mêmes conditions, mais à la surface inférieure de cailloux, à la manière de petits stalactites. La face supérieure des cailloux est souvent libre de toute patine calcaire.

Nous appelons *encroûtement diffus* (de type palustre) une imprégnation par un calcaire jaune sale, d'une terre où on reconnaît facilement le tracé d'un assez abondant latices de racines fossiles soulignées par une zone périphérique rougeâtre ferrugineuse. La masse de l'horizon est faiblement concrétionnée et donc durcie. Un enrichissement en calcaire de ce faciès se marque par le blanchiment de la masse de l'horizon sans que les autres caractères changent pour autant. Contrairement aux autres formes de concrétionnement, c'est la masse du sol qui est imprégnée de calcaire.

Nous appellerons enfin, *encroûtement à taches calcaires* ce que DURAND nomme « nodules farineux ». Il s'agit d'amas de calcaire friable bien que plus ou moins dur, de couleur variant du blanc pur éclatant au jaune sale. Ils se présentent comme des taches aux contours plus ou moins nets, dont la forme peut aller de la sphère à la chandelle verticale. Les dimensions sont comprises entre quelques millimètres à vingt-cinq centimètres pour la longueur, et quelques millimètres à quelques centimètres pour l'épaisseur. Nous rattacherons à ce faciès un aspect curieux rencontré dans une terrasse fluviatile de l'Oued Ouergha, montrant des bancs de deux ou trois centimètres d'épaisseur, subhorizontaux mais ondulés, installés à la discontinuité de deux couches alluviales de texture un peu différente. Dans ce cas, ce ne sont plus des taches mais des lits de calcaire crayeux.

ASSOCIATIONS OBSERVEES ENTRE LES DIVERSES FORMES

La façon dont se présentent les divers faciès décrits, leurs associations soit verticales soit horizontales, leur mode de répartition dans la nature (cartographie) ont été déterminants pour établir cet essai de synthèse générale des encroûtements calcaires du Maroc occidental.

Bien entendu, nous rencontrons les encroûtements dans la zone d'influence des sources de calcaire, que ce soit par épandages fluviatiles, par circulation de nappes ou par remaniement sur place du calcaire des roches mères des sols étudiés. Toutefois, il convient de remarquer que certaines formes de concrétionnement du calcaire se manifestent sur des matériaux n'en contenant pas, mais susceptibles d'en former par dégradation, par exemple le basalte.

Les matériaux durs, étant souvent en relief vigoureux, ne peuvent guère porter que de la croûte lamellaire. Cette occurrence est d'ailleurs rare car, sur ces pentes, les eaux sauvages ont plus tendance à se charger du carbonate de calcium qu'à le déposer.

Par contre, les matériaux tendres, et plus précisément les alluvions et colluvions qui sont très répandues (comme en tout pays méditerranéen) sont le lieu de prédilection de ce type de pédogenèse. Par l'abondance des plaines situées sous des climats aux degrés d'aridité très divers, le Maroc offre un terrain de choix pour cette étude. Il est aisé de constater, au contraire, que les collines marneuses ne portent pratiquement pas de croûtes, sans doute du fait de leur susceptibilité à l'érosion : toutes les époques du Quaternaire y ont provoqué la formation de dépôts de pente argileux, mais pratiquement pas de ruissellements chargés de calcaire. D'autre part, les alluvions se trouvent par définition dans les zones d'épan-

dage des oueds ; ceux-ci véhiculent des eaux chargées tantôt de cailloux ou de limon, tantôt de solutions salines et notamment de carbonates alcalinoterreux. Donc, la source de calcaire domine constamment les zones d'alluvions, alors que les zones de reliefs constituent les secteurs de départ du calcaire. Nous en arrivons donc à une conception très géographique du phénomène et de sa répartition.

La liaison de certains types de croûtes avec certains reliefs est non moins évidente. Les croûtes lamellaires sont très répandues sur les hautes surfaces de piedmont des montagnes calcaires (ces surfaces peuvent, pour d'autres raisons être datées du Villafranchien). Leur épaisseur décroît quand on s'éloigne de la ligne de contact. Leur évidence vient de leur absence de couvert soit terreux soit végétal. Les cônes de déjection encroûtés appartiennent à la même période.

Les encroûtements nodulaires sont toujours liés à un horizon terreux superficiel rubéfié, c'est-à-dire présentant une couleur au moins rougeâtre.

Les associations verticales (en superposition) des divers faciès, traditionnel objet d'étude des pédologues, sont aussi très révélatrices. Par exemple, nous avons pratiquement toujours rencontré le faciès crayeux (ou tuffeux) en association avec la croûte lamellaire qui épouse fidèlement les moindres détails de sa surface. Cette superposition elle-même repose le plus souvent sur un limon argileux rose ou rouge à taches. L'encroûtement granulaire peut se présenter seul ou recouvrir un limon rose ou rouge argileux à taches. Par contre, nous n'avons jamais observé le limon à taches près de la surface. Il correspond à un type de pédogénèse caractéristique d'un alluvionnement ancien qui est toujours enterré.

Il semble donc y avoir des séquences de pédogénèses, toujours les mêmes, qui vont nous donner des types de profils pédologiques courants.

Les associations ou passages latéraux ne sont pas moins intéressants. Ils vont nous permettre de relier la morphologie des faciès à des facteurs d'ordre très local, mais qui peuvent aussi expliquer la répartition à grande échelle des diverses formes d'encroûtements. Ainsi, il est très fréquent d'observer d'une part la juxtaposition, plus que la transition, de l'encroûtement crayeux à l'encroûtement nodulaire ; d'autre part, l'imbrication de l'encroûtement nodulaire dans un encroûtement conglomératique à galets roulés. Il a été observé aussi, en s'éloignant de la source du calcaire, le passage de l'encroûtement tuffeux avec croûte lamellaire de surface à l'encroûtement nodulaire lâche avec les tubes de calcaire affectant la forme de racines, le tout dans un limon rouge. Ces considérations nous amènent à penser que les diverses formes d'encroûtement calcaire peuvent passer très aisément les unes aux autres sans que chacune d'entre elles ne soit précisément caractéristique d'un phénomène zonal. Ceci est très important

pour l'explication des processus de genèse. Même l'encroûtement à taches dont il n'a pas été question dans les deux précédents paragraphes, ne correspond au plus que partiellement à un processus de pédogenèse zonale, c'est-à-dire essentiellement lié au climat. C'est en réalité le « pédoclimat » qui compte et ce pédoclimat ne dépend que pour une part du « climat » des météorologistes, dont les éléments sont mesurés à un mètre cinquante de la surface du sol.

PROCESSUS DE GENESE DES FACIES

Lors de l'étude de la genèse de chacune des formes d'encroûtement, nous envisagerons tous les facteurs que nous croyons susceptibles d'y avoir joué un rôle. Ce n'est que lorsque nous aurons ainsi décomposé les divers processus élémentaires que nous pourrons étudier comment ils sont intervenus pour réaliser les aspects effectivement rencontrés dans la nature. Nous pourrons, par la même occasion, dresser un inventaire des modalités de ces actions, dans le temps et dans l'espace, dans l'état actuel de nos connaissances, en nous limitant à quelques problèmes fondamentaux et couramment répandus.

1. La croûte lamellaire

Elle se rencontre essentiellement sur des surfaces planes dans l'ensemble, parfois variées dans le détail. Ces surfaces sont généralement très proches des sources du calcaire, à savoir la montagne. Comme la croûte lamellaire recouvre uniformément de grandes surfaces sur les piedmonts, même loin du débouché des oueds actuels, et qu'elle diminue régulièrement d'épaisseur quand on s'éloigne des reliefs calcaires, on est saisi par l'ampleur du phénomène qui rappelle nettement la sédimentation géologique. Il faut faire intervenir des ruissellements plus ou moins diffus d'eaux chargées de calcaire, circulant à allure réduite et finissant par stagner en nappe mince, puis s'évaporant sur place en déposant une pellicule superficielle. Ce phénomène s'est reproduit souvent, d'où l'aspect lamellaire ou zonaire de cette croûte. DURAND l'a trouvée exempte d'éléments clastiques, par conséquent d'origine superficielle. Nous sommes de son avis. Il s'agit donc d'un dépôt de ruissellement et d'évaporation, d'allure purement géologique. G. BRYSSINE parlerait de « pédogenèse externe : apport et évaporation ».

La croûte lamellaire se rencontre aussi sur l'encroûtement tuffeux, loin parfois de tout apport allogène. Dans ce cas, il s'agit évidemment d'un remaniement presque sur place du calcaire crayeux sous-jacent avec redépôt par évaporation et cristallisation, d'où la liaison étroite avec ce type de substratum. Là aussi il s'agit d'un processus de type essentiellement

géologique. La multiplicité de feuillets minces superposés, rencontrés en liaison avec des limons farineux, peut être interprétée de la même façon : par apports successifs, sans qu'on puisse cependant écarter l'hypothèse d'écoulements d'eaux calcaires dans des fissures du substratum avec cristallisation sur les parois par un phénomène d'interface. Ces feuillets multiples qui s'entrecroisent parfois se rencontrent surtout dans les formations d'apports dunaires calcaires des régions côtières atlantiques, et dans certains dépôts de pente de même texture.

2. La croûte tuffeuse ou encroûtement crayeux

Ce type d'encroûtement peut comporter des teneurs en calcaire de 50 à 80 %. Il se présente comme une masse blanchâtre d'aspect diffus, parfois avec une certaine disposition stratifiée subhorizontale. Sa grande richesse en calcaire est en liaison avec sa répartition géographique qui la localise au pied des reliefs calcaires, donc dans les piedmonts, et aussi le long de certains cheminements préférentiels de nappes d'eau dont on arrive parfois à retracer le cours. Cet encroûtement peut caractériser de grandes surfaces.

Il se présente aussi quand la source du calcaire remanié domine le dépôt ainsi incrusté, à savoir des versants de dunes consolidées calcaires comme dans le Sahel des Doukkala, ou les dépressions interdunaires qui ont dû accumuler de façon lacustre des boues provenant de leurs rives.

Ces observations tendent déjà à orienter notre esprit vers l'hypothèse, soit d'un dépôt de type très humide et très riche en carbonate de calcium, avec structure litée, soit d'une imprégnation à partir de la surface de terrains en place où le dépôt du calcaire n'aurait pas été suivi par la cristallisation du carbonate. DURAND signale sa structure grumeleuse en plaque mince et lui attribue une origine lacustre ou tout au moins un milieu de genèse très humide. Pour notre part, nous l'avons rencontré non seulement sur des terrains en pente non tectonisés (la pente était contemporaine du dépôt), non seulement dans des dépressions à régime lacustre possible et même probable, mais aussi en passage latéral avec l'encroûtement nodulaire, et dominant ce dernier de son dôme blanc fossilisé par une croûte lamellaire. Il semblerait que l'hypothèse d'un apport très abondant de calcaire en milieu très humide, par exemple par un chenal fluvial, soit suffisante pour expliquer certaines occurrences de ce faciès.

Le manque de cristallisation de ce calcaire résulterait du milieu très humide de dépôt. Nous avons observé des fonds de dayas reposant sur des schistes primaires non calcaires, à morphologie de boue calcaire consolidée non cristallisée ; l'analogie est frappante. Il s'agirait encore ici

d'un mode de formation de nature plutôt géologique (sédimentation) que pédologique.

3. L'encroûtement nodulaire

Ce faciès s'observe fréquemment dans les sols sous la forme d'un horizon sous-jacent à un horizon terreux « agricole ». Comme nous l'avons déjà signalé, dans le cas le plus simple, les nodules se présentent comme des concrétions dures, presque sphériques ou franchement allongées, à structure concentrique ou rayonnée autour d'un canalicule, qu'avec un peu de chance on peut trouver vide ou avec quelques débris organiques végétaux. Les nodules sont disposés en chapelets, parfois ramifiés comme des racines. Les nodules peuvent présenter de multiples excroissances qui semblent indiquer qu'ils occupaient alors non plus un trou de racine mais une cavité du sol. Les nodules en place semblent en effet résulter d'un phénomène d'interface, le calcaire de la solution du sol, ou d'une nappe d'origine superficielle, se déposant sous l'action de la température et du dégagement du CO_2 dans des cavités du sol : trous de racines, tunnels d'animaux fousseurs, pores, fissures résultant du foisonnement et du retrait des mottes. Le milieu serait caractérisé par des alternances de périodes humides coïncidant avec l'apport du calcaire au sein d'une nappe temporaire, et de périodes sèches qui résulteraient soit du drainage par les racines, soit de la dessiccation à partir de la surface, toutes les argiles foisonnant ne serait-ce que faiblement. Or il existe des illites gonflantes, et parfois ce milieu alcalin est favorable au développement de la montmorillonite. Il est vraisemblable que les deux phénomènes, biologique avec les racines, physique avec le phénomène d'interface, ont dû jouer de façon concomitante. En particulier, la présence de nombreuses racines semble montrer que, à l'époque, la structure était meilleure que maintenant, avec une plus intense fissuration et une plus forte porosité, et même une plus forte action de la pédofaune. Les observations suivantes nous amènent à conclure à un enrichissement en calcaire par apport.

Ce ne sont pas les sols les plus profonds qui donnent l'encroûtement le plus intense. Sur de grandes surfaces, ces encroûtements sont moyens à faibles, quand ils sont profonds, et à condition qu'il s'agisse de nodules en place et non pas jouant le rôle de cailloutis de base pour le dépôt où s'est développé le sol. Par contre, les encroûtements très intenses que l'on trouve parfois sur des épaisseurs considérables, comme pour le sol rouge d'Aoulouz dans le Souss, sont toujours liés à des cheminements d'eau, soit dans des zones d'épandage d'oueds, soit à proximité de ces derniers, l'apport pouvant être dû dans une certaine mesure à une nappe d'oued. Pour ces encroûtements sur de grandes épaisseurs, il faut faire intervenir d'ailleurs une succession d'apports sur lesquels la pédogenèse crée à chaque

fois, sous une certaine épaisseur de terre (20 à 40 cm environ) l'encroûtement au niveau des radicelles de la végétation.

Les épaisseurs de terre, qu'il s'agisse de sols actuels ou récents sur encroûtement nodulaire ou de sols plus anciens, même en tenant compte de l'érosion des horizons superficiels riches en matière organique, ne sont jamais considérables. Les coupes des deux puits de CAVALLAR dans la plaine des Angad et des Triffa le montrent pour le courant du Villafranchien. Des coupes de berges d'oued (Bouchane, dans les Abda Doukkala, et Nekeil, dans le Souss) le montrent pour le Tensiftien par exemple. On peut même parfois observer, sans décalcarisation complète du limon rose superficiel, un enrichissement médian en calcaire total suivi d'un fléchissement en profondeur. Il est intéressant de noter par la même occasion que la courbe des chlorures suit celle du calcaire total, mais avec un décalage vers le haut du profil, lorsqu'on considère la courbe du calcaire de la terre fine (CONCARRET dans le Haouz de Marrakech, comm. or.). Or, une eau chlorurée dissout nettement plus de calcaire qu'une eau pure. On peut donc envisager une descente dans le sol d'une solution aqueuse de chlorures et de carbonate de calcium, un dépôt des chlorures (avec alcalisation de l'argile interstitielle ?), une diminution de solubilité du calcaire qui se déposerait alors sur place et un peu plus bas, spécialement dans les cavités et au niveau de succion des racines. Il peut y avoir enrichissement progressif, nourrissage des concrétions calcaires qui cristallisent finement et durcissent, car le milieu n'est pas aussi humide que précédemment. Cette hypothèse complexe rend assez bien compte de la répartition de ce faciès en relation avec une nappe perchée temporaire, soit d'underflow, soit locale à l'occasion d'une hétérogénéité de texture du substratum.

Il n'en est pas moins vrai que nombre d'« encroûtements nodulaires » correspondent à un cailloutis de base d'un dépôt alluvial postérieur ayant remanié les nodules d'un sol à encroûtement antérieur. Il est d'autant plus difficile de faire la part des nodules-cailloux remaniés et des nodules pédogénétiques en place, que souvent ces deux types se mélangent dans le résultat global que nous observons actuellement. Tout ce que nous pouvons dire, c'est que beaucoup de sols à encroûtement nodulaire enterrés sont minces, rubéfiés, très nettement calcaires, et, enfin, peu argileux. Donc la pédogenèse qui a conduit aux sols à concrétions calcaires est d'abord légèrement décalcarisante, rubéfiante, peu argilifiante, rapide dans son développement, et a, la plupart du temps, donné des sols à couche terreuse peu profonde. L'horizon encroûté peut présenter, surtout en climat semi-aride à aride, une certaine salinisation sinon une certaine alcalisation du complexe absorbant.

4. L'encroûtement stalactiforme

Ce faciès a été rencontré jusqu'à présent dans le Haouz de Marrakech et dans le Tadla, accessoirement dans la basse vallée de la Moulouya et la région de Guercif. Il s'agit d'un dépôt cristallisé, mais moins nettement que dans le cas précédent, donnant des petites stalactites fixées sous des cailloux dont la surface supérieure n'est généralement pas atteinte par le processus de recouvrement calcaire. Visiblement, il s'agit d'un dépôt allo-gène (par nappe sans doute) de calcaire sous une forme « travertineuse » dans la zone de sol protégée d'une trop intense dessiccation par les cailloux. Quand l'apport de calcaire continue, on voit ces divers encroûtements se rejoindre et finir par former une masse de structure mi-caverneuse mi-poreuse, faciès observable fréquemment dans le Tadla. Il semble d'ailleurs que cette consolidation prenne une ampleur presque « géologique » et qu'il s'agirait alors d'un dépôt de nappe circulante dans des traînées ou des lentilles caillouteuses particulièrement filtrantes.

5. L'encroûtement de type diffus (faciès « palustre »)

Ce faciès a été rencontré notamment dans le Souss et dans les Doukala, ainsi que dans la plaine de Berrechid. Il s'agit là d'anciennes dépressions ou tout au moins de zones de stagnation de l'eau le long des talwegs anciens. Leur morphologie est caractéristique. La masse terreuse est peu consolidée par le calcaire qui, selon son abondance, en imprégnant l'argile jaune ou rose, donne une couleur jaune sale ou blanche à la masse de l'horizon. Les traces de racines sont nombreuses et particulièrement nettes; elles sont soulignées, au contraire de l'encroûtement nodulaire, par un liseré tantôt argileux rubéfié, tantôt ferrugineux, provenant certainement, dans ce dernier cas, de l'oxydation d'anciennes zones de fer réduit le long des racines. Nous sommes donc là très près de l'aspect « gley » des milieux palustres, mais avec des manifestations surtout calcaires qui vont jusqu'à la bigarrure de la coloration de l'imprégnation calcaire. Ceci doit d'ailleurs être en relation avec les oxydes de fer dispersés dans ce milieu. Nous avons ici un exemple de certaines analogies entre les manifestations du calcaire et du fer dans le sol.

Ce faciès est donc à rapprocher de la consolidation d'une boue calcaire en fond de daya ou de marécage. La description de la coupe des deux sols hydromorphes fossiles superposés du chabâa près de Talan'Tiout dans le Souss, faite par J. CL. RENON, montre même la présence des taches rouille au sein de l'horizon d'accumulation calcaire à taches diffuses. A Guercif, l'auteur a pu observer certains horizons engorgés à pseudogley, d'aspect analogue.

6. Conglomérats calcaires

Il s'agit d'une extension de la notion d'encroûtement calcaire qui s'impose par sa continuité ou son interstratification avec des horizons à nodules calcaires (exemples dans le Souss, le Tadla, les Doukkala ; sans oublier les dalles de « calcaire lacustre » qui couronnent les terrasses de la moyenne et haute Moulouya dans le Maroc oriental). Ils résultent essentiellement d'une active circulation d'eaux chargées de calcaire dans ce milieu poreux que sont les accumulations de cailloutis roulés fluviaux, ce qui produit un dépôt finement et fortement cristallisé d'un ciment calcaire généralement dur entre les galets. ICOLE et VELLUTINI travaillant dans le Tadla ont montré l'existence de véritables trottoirs conglomératiques, par exemple larges de deux mètres et épais de trente centimètres, dont le tracé suivait exactement le cheminement d'anciens lits caillouteux de thalwegs fossiles (d'époque tensiftienne). Les interstratifications de conglomérats avec des limons à nodules montrent la consolidation des lentilles caillouteuses résultant d'alluvionnements torrentiels du piedmont du Grand Atlas (radier de l'Oued Lemdad sur la route de Ouarzazate dans le Souss). Les deux phénomènes, nodules et conglomérat, furent donc pratiquement contemporains, l'encroûtement datant donc du courant du Pluvial.

Quant aux dalles couronnant les terrasses de la Moulouya, en climat semi-aride à aride, il s'agit de la consolidation d'une phase terminale d'alluvionnement de régime intermittent et brutal (torrentiel) par des ruissellement d'eaux chargées de calcaire, donc phénomène géologique aérien rappelant étroitement, à la présence des cailloux près, le mode de formation de la croûte lamellaire qui d'ailleurs dans ces pays arides peut atteindre une épaisseur considérable, de l'ordre du mètre.

7. L'encroûtement en taches de calcaire pulvérulent

Il s'agit ici d'un phénomène purement pédologique à l'instar de la formation des nodules calcaires.

Partons du dépôt du sédiment argileux légèrement calcaire, de pH alcalin. Le milieu est suffisamment humide (précipitations d'où résulte une nappe perchée temporaire ou percolation verticale) pour que les mouvements de l'eau soient actifs. Il commence par se produire une décalcification par la surface, ce qui entraîne, avec l'aide d'une température suffisante, la rubéfaction ou apparition de la teinte rouge dans l'argile. Le milieu humide, tiède et alcalin, avec l'aide de solutions salines qui percolent, favorise la formation d'argiles gonflantes comme les montmorillonites par exemple. L'alternance de dessiccations et d'humectations provoquent la formation de fissures verticales et même horizontales, par où l'air pénètre

dans la masse du sol derrière l'eau. Des phénomènes d'interface se déclenchent alors ; entre autres, les solutions qui ont dissout le calcaire circulent dans ces fissures et déposent en milieu relativement humide une espèce de craie. Aux époques anciennes, comme le Villafranchien, l'intensité des phénomènes était telle que cette ségrégation du calcaire a pu être complète et donner lieu à des dépôts de calcaire presque pur, très blanc, en masses verticales de vingt, vingt-cinq centimètres de haut et de quelques centimètres de diamètre. Aux époques postérieures, notamment l'Amirien (qui présente quelques points communs, quant au climat, avec le Villafranchien), les cavités furent plus réduites, et plus ramassées de forme ; mais les taches furent souvent constituées d'un calcaire tout aussi pur. Pour le Tensiftien, ce faciès, plus rare, est encore plus réduit ; la couleur en est franchement jaunâtre (calcaire souillé de fer), la rubéfaction plus faible. En somme, ce faciès exige pour se développer une certaine humidité, non permanente, en milieu d'argile gonflante, et une certaine quantité de chaleur pour les manifestations du fer, à commencer par la rubéfaction.

Un phénomène annexe est l'alcalisation, non pas nécessaire mais fréquente, de l'argile rose ou rouge. Elle s'explique par le fait que si le calcaire des taches résulte fréquemment de la décalcarisation complète de l'argile de l'horizon médian à taches, il vient pour une part (surtout dans les couches supérieures de ce même horizon à taches) d'apports de nappe ou de ruissellement. Ces eaux contiennent non seulement du calcaire, mais aussi des sels, dont le chlorure de sodium qui va réaliser une réaction d'échange avec le complexe absorbant de l'argile. Cette alcalisation, qui a dû se faire petit à petit avec élimination de l'ion chlorure, a produit un microphénomène de constitution de plaquettes argileuses : une motte immergée avec précaution se délite en ces plaquettes, l'eau restant limpide, puis, si l'on agite l'eau, les plaquettes elles-mêmes se désagrègent et troublent l'eau.

Nous avons envisagé la genèse des divers faciès de croûtes et encroûtements calcaires. Nous avons aussi étudié un passage latéral par juxtaposition pratiquement synchrone d'un encroûtement nodulaire et d'une consolidation conglomératique de galets. Géologie du Quaternaire (sédimentologie) et pédologie prenaient chacune leur place dans l'explication du paysage.

Nous voudrions maintenant montrer la constitution du plus vieil encroûtement, du plus complet aussi, l'encroûtement Villafranchien-Moulouyen. Partout, les hautes surfaces alluvionnaires du Quaternaire, en pays calcaire, comportent la superposition de la croûte lamellaire (1) sur l'encroûtement tuffeux (2) qui peut passer latéralement, comme déjà dit, à l'encroûtement nodulaire (3). Cet ensemble (1)/(2) ou (1)/(3) repose sur le limon encroûté à taches (7). La coupe du trou bordant, sur le plateau

de sols rouges à l'ouest de Sidi Bennour, la route de Zemamra (dans les Doukkala), montre bien le passage de (1)/(2) à (3) et parfois (1)/(3). Par contre, c'est en Chaouïa, dans un trou au nord de la route de Berrechid à Khouribga, que se révèle la superposition, de nature alluviale, de l'ensemble (1)/(2) ou (1)/(3) sur (7), et cela par un très conforme cailloutis de base à galets roulés. D'ailleurs, l'horizon correspondant à (2) comprend souvent des « galets mous » d'argile rouge très dure, et un litage plus ou moins net. La ségrégation du calcaire dans les fissures a souvent provoqué en (7) une décalcarisation complète sur certaines plages qui se sont alors intensément rubéfiées, parfois même, comme dans les environs de Safi, jusqu'à donner des oxydes de fer pulvérulents sur du sable. Il y a aussi formation de pellicules blanc bleuâtre d'une argile non calcaire qui s'est révélée être de la kaolinite, toujours dans le (7). L'interprétation avec les datations est la suivante : le (7), avec la pédogenèse décrite, est le dépôt proprement villafranchien avec une pédogenèse de type sahélien à soudanien, semi-aride ou sub-tropical, témoignant donc d'une combinaison des facteurs humidité \times température (facteurs du pédoclimat) autrement active que maintenant. Le (2) et le (3) correspondent à une reprise d'érosion et d'alluvionnement plus brutale, mais avec des dépôts plus chimiques (loin de la montagne dans les Doukkala, et entièrement calcaire pour la Chaouïa). Cette période de climat, plus tempérée, se terminant par une phase de ruissellement diffus d'eaux incrustant la surface du sol, surtout près des sources de calcaire, c'est le Moulouyen et sa dalle. Localement, il y a eu refaçonnement de la surface des dépôts villafranchiens et incrustation du relief ainsi créé.

Signalons enfin que nous devons rattacher aux encroûtements du type (7) les taches farineuses qui marquent fréquemment la base des profils de tirs développés souvent sur des dépôts récents mais avec, curieusement, le même type de pédogenèse humide dans un milieu alcalin d'argiles gonflantes et avec la même alcalisation, donnant la même réorganisation en plaquettes qui se manifeste ici par une structure plane gauchie, de règle dans les profils complets de tirs, comme celle signalée dans les Triffa par RUELLAN, et fréquemment observée dans le Gharb et le Prérif par PAJOT.

CHRONOLOGIE DES CROUTES

Sans entrer dans les détails, et surtout pour montrer que les conclusions de J. H. DURAND, quant à la chronologie des faciès et quant à l'application de la théorie de la biorhexistasie, cadrent assez mal avec les observations faites au Maroc, voici un tableau des époques du Quaternaire marocain, avec les faciès rencontrés, leur processus de genèse et leur fréquence par étage, le tout sur alluvions.

MOULOUYEN	Croûte lamellaire	ruissellement + évaporation	
	tuf nodules	imprégnation et concentration crist.	très répandu
VILLAFRANCHIEN	limon à taches	ségrégation <i>in situ</i>	
	limon rose	roche mère	
SALÉTIEN	conglomératique très dur	ruissellement + évaporation	pays arides
	diffus jaunâtre	imprégnation de nappe	pays semi-arides localement
AMIRIEN	taches pulvérulentes	ségrégation <i>in situ</i>	faciès typique
	diffus type palustre	imprégnation	faciès fréquent
	nodules	imprégnation et concentration crist.	local, dans le semi-aride
TENSIFTIEN	nodules	imprégnation et concentration crist.	faciès typique
	conglomératique	imprégnation, ruissellement + évap.	local, dans le semi-aride et l'aride
	taches friables pulvérulentes	ségrégation <i>in situ</i>	rare
	diffus palustre	imprégnation	rare, local
SOLTANIEN	nodules	imprégn. et concent.	rare (pourtors Gharb)
	taches pulvérulentes	ségrégation <i>in situ</i>	assez rare
GHARBIEN	taches pulvérulentes	ségrégation <i>in situ</i>	base des tirs.
	plaquettes	ségrégation <i>in situ</i>	rare, pourtors Gharb

Ce tableau nous montre que le Villafranchien a reproduit successivement toutes les phases du phénomène, depuis la pédogenèse « humide » des taches jusqu'à celle plus « sèche » des nodules. Le Salétien n'a pratiquement pas d'encroûtement dans les pays humides, car la décalcification s'effectue sous le climat humide et froid de la montagne. L'Amirien qui a répété, en plus atténué, les conditions d'humidité tiède du Villafranchien

a reproduit la pédogenèse « humide » des taches (qui est la plus typique pour cette époque). Dans les zones plus arides, l'eau éprouva des difficultés d'écoulement, stagna fréquemment et donna alors l'encroûtement du type « diffus palustre ». Le Tensiftien tendrait à reproduire les conditions du Moulouyen et donc la pédogenèse « sèche » des nodules. Ce n'est que dans les secteurs de forte chaleur et de forte humidité que le Soltanien peut donner un encroûtement, plutôt du type sec (ou nodules) que du type humide (ou taches pulvérulentes). Les pourtours du Gharb répondent à ces conditions, même durant cet interpluvial chaud et sec qu'est l'Actuel. Quant au Gharbien, qui est l'époque optimum tant climatique (grandes surfaces et toutes formes de relief) que locale (dépressions, zones d'accumulation de l'eau) de la tirsification, nous avons vu que nous retrouvons, d'ampleur bien moindre mais curieusement analogue, une pédogenèse « humide » à taches pulvérulentes.

ROLE DU PEDOCLIMAT DANS LA CONSTITUTION DES PROFILS

S'il existe une chronologie des encroûtements, du moins à grande échelle, il faut bien constater que ce sont les conditions intrinsèques du milieu qui orientent la pédogenèse, à savoir la nature de la roche mère, les possibilités d'approvisionnement en calcaire, la susceptibilité géographique aux apports fluviatiles lents ou brutaux, le régime hydrique du profil et, bien entendu, aussi les données météorologiques classiques. Le « pédoclimat » local est déterminant. Par exemple, au pied de la crête calcaire qui court de Sidi Kacem à Dar bel Amri, au Sud du Gharb, un ravin d'érosion nous donne la coupe du piedmont. Celui-ci, du type courant au Maroc, comprend un façonnement essentiellement villafranchien à croûte lamellaire, recouvert par le salétion essentiellement argileux ici, puis l'emboîtement dans cette haute surface de la superposition Gharbien/Soltanien (tirs)/Tensiftien/Amirien. La coupe dans cette superposition nous montre les trois limons anciens, tensiftien, amirien et villafranchien, identifiés par leur contact ravinant souligné de galets. Près de la source du calcaire, sur pente bien alimentée en eau et répondant donc quant au régime hydrique aux fluctuations des climats quaternaires, tous les limons montrent, sauf le villafranchien amputé de sa partie supérieure, une phase initiale à taches calcaires pulvérulentes, ici toutes rondes, grosses pour le villafranchien, petites mais aussi blanches pour l'amirien, de même taille mais jaunâtres pour le tensiftien. Cette phase initiale est suivie, parfois visiblement en superposition ravinante, de la phase à nodules. On n'observe pas la phase tuffeuse ou lamellaire qui est réservée au limon villafranchien-moulouyen. Ainsi donc, cette coupe nous montre que dans des conditions favorables, chacune des périodes du Quaternaire, au lieu d'être caractérisée par un

type, « zonal » dirions-nous, d'encroûtement, les présente tous successivement, comme le fait seul, habituellement, le couple Villafranchien-Moulouyen. On observe même la pénétration des nodules dans les horizons à taches, ce qui traduit bien la notion de superposition et de surimposition des pédogenèses.

REPARTITION GEOGRAPHIQUE

Une esquisse géographique de la répartition des divers types de croûtes est intéressante :

— la croûte lamellaire est répartie sur les piedmonts des reliefs calcaires, et dans les pays arides où elle tend à devenir la forme presque exclusive du phénomène ;

— la croûte tuffeuse se trouve essentiellement près des sources de calcaire, à savoir les piedmonts et les dunes calcaires, consolidées ou non ;

— la croûte nodulaire (et sa variante stalactiforme) est un phénomène pédogénétique, de répartition quasi universelle dans les sols des zones allant de l'aride au sub-humide « méditerranéen » (donc à été sec) ;

— l'encroûtement à taches pulvérulentes caractérise beaucoup de dépôts amiriens, et bien entendu les dépôts villafranchiens proprement dits ;

— l'encroûtement diffus de type palustre est essentiellement local, dû à des particularités de l'hydrologie superficielle.

CONSEQUENCES AGRONOMIQUES

L'incidence agronomique de ces divers faciès n'est pas identique.

La grosse croûte lamellaire, suivant son épaisseur, peut être arrachée quand son substratum paraît utilisable, par des arbres par exemple, ou bien elle doit être abandonnée. La croûte tuffeuse paraît chlorosante a priori mais peut servir de support aux arbres dont les racines se nourrissent en profondeur dans l'argile. La croûte nodulaire, malgré la présence sporadique de sels et d'alcalisation, paraît peu gênante, sauf quand elle est épaisse et superficielle. L'encroûtement à taches est le plus souvent profond. En pays aride, la salure et l'alcalisation peuvent être un inconvénient majeur pour la mise en valeur, surtout pour l'irrigation (cf. RUELLAN).

CONCLUSIONS

Cette étude fait apparaître le côté géographique du phénomène polymorphe de l'encroûtement calcaire envisagé au Maroc. Ce phénomène, parfois purement pédologique (nodules et taches) prend des aspects sédimentologiques qui rapprochent sur ce point la pédologie de la géologie. Sans doute les préoccupations cartographiques de l'auteur ne sont-elles pas étrangères à la genèse de cette conception. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue l'équilibre qui existe en pays « méditerranéen » entre la géologie (mise en place des sédiments) et la pédologie (modifications de la répartition des éléments physiques et chimiques).

Décembre 1961.

ملخص

يحاول المؤلف تنعيم دراسة تحليلية لمختلف أشكال التكوين الكلسي في الاراضي شارحا وواصفا الظواهر تحت زاربية علم الشربة وخرائط الارض ان تطورات التقشرات تظهر غالبا في الاراضي الرسوبية الطموية، وان تقدها متمما للكلس في الاراضي الرسوبية عموما لا بد منه في تكوينها «هيئة رسوبية» ان يصل الكلس دون تدخل الحالات الكيميائية والميكانيكية والصلابية الهرة ظاهرة لقياس الكشافة، وفي بعض الاحيان يعذ ظاهرة تشريرية «هيئة علمية للتربة»

RÉSUMÉ

L'auteur tente d'effectuer une étude analytique des diverses formes d'accumulation du calcaire dans les sols, en expliquant et décrivant le phénomène sous l'angle du pédologue cartographe.

C'est surtout sur limons alluviaux que se développent les encroûtements, un apport complémentaire de calcaire dans le limon étant généralement indispensable à leur formation (aspect sédimentologique). La ségrégation du calcaire, dans laquelle interviennent les propriétés chimiques et mécaniques des argiles, est un phénomène hydromorphe et parfois biologique (aspect pédologique).

Les climats du Quaternaire, caractérisés par l'alternance d'humidité de la saison froide et de sécheresse de la saison chaude, ont été à l'origine de la diversification des encroûtements, des séquences pédologiques (verticales et horizontales) et de la répartition chronologique des faciès.

RESUMEN

El autor intenta hacer un estudio analítico sobre las diversas formas de los depósitos calizos en los suelos, explicando y describiendo el fenómeno, desde el punto de vista del cartógrafo de suelos.

Es sobre todo en limos aluviales que se desarrollan las toscas, siendo generalmente necesario un aporte complementario de caliza (aspecto sedimentológico). La segregación de caliza, en la cual intervienen las propiedades químicas y mecánicas de las arcillas, es un fenómeno hidromorfo y a veces biológico (pedogénesis).

El origen de la variación de las toscas, de las secuencias de la pedogénesis (verticales y horizontales) y del reparto cronológico de las facies, podemos encontrarlo en los climas del cuaternario, caracterizados por la alternación de humedad en la estación fría y de sequía en la estación caliente.

J.G.

SUMMARY

The author presents a tentative analytical study of the various forms in which calcium carbonate accumulates in soils; he describes and explains the phenomenon from the standpoint of the mapmaking soil-scientist.

Calcareous crusts develop mostly on alluvial silts, complementary deposits of calcium carbonate being generally essential to their formation (sedimentological standpoint).

The calcium carbonate segregation is a hydromorphous and sometimes biological phenomenon in which the chemical and mechanical properties of clays interfere (soil-science standpoint).

The climates of the of the quaternary, characterized by the alternation of a moist cold and a dry hot season, have diversified the crusts, the (vertical and horizontal) soil sequences and the chronological distribution of the facies.

BIBLIOGRAPHIE

- BOULAINÉ, J.L. — 1957. Etude des sols des plaines du Cheliff. — Thèse, Alger, 527 p. (avec bibliographie).
- BRYSSINE, G. — 1955-1956. Réflexions sur la classification des sols. — Travaux de la Section de Pédologie de la Soc. des Sc. Nat. et Phys. du Maroc, Rabat ; 10-11, pp. 83-101.

- CHOURBERT, G., F. JOLY, M. GIGOUT, J. MARÇAIS, J. MARGAT & R. RAYNAL. — 1956. Essai de classification du Quaternaire continental du Maroc. — C.R. Ac. Sc., Rabat ; t. 243, 5, séance du 30 juillet 1956.
- CONCARET, J. — 1960. Etude des sols du périmètre de Feitout (Haouz de Marrakech). — O.R.S.T.O.M., Dir. de la Mise en Valeur et du Génie Rural, Marrakech ; 29 p.
- DURAND, J.H. — 1953. Etude géologique, hydrologique et pédologique des croûtes en Algérie. — Pub. du Gouvernement Général de l'Algérie. Dir. du S.C.H. Service des Etudes Scientifiques, Pédologie 1 ; Birmandreis (Alger) ; thèse d'ingénieur-docteur (avec bibliographie).
1959. Les sols rouges et les croûtes en Algérie. — Dir. de l'hydraulique et de l'équipement rural, Service des études scientifiques ; Clairbois, Birmandreis (Alger) ; Pédologie 7, 182 p.
- ICOLE, M. — 1960. Etude des sols de l'Extension du Périmètre irrigué des Beni-Amir. — SO.GE.T.I.M. et Direction de la Mise en Valeur et du Génie Rural, Rabat ; notice ronéotypée, diffus. limitée, 151 p.
- RENON, J. C. — 1960. Etude des sols du périmètre de l'Oued Lemdad (Souss). — SO.GE.T.I.M. et Dir. de la Mise en Valeur et du Génie Rural, Rabat ; notice ronéotypée, diffus. limitée, 119 p.
- RUELLAN, A. — 1958-1959. Les sols salés et alcalisés de la plaine du Zebra. — Travaux de la Section de Pédologie de la Soc. des Sc. Nat. et Phys. du Maroc, Rabat ; 13-14, pp. 159-164.
- VELLUTINI, D. — 1961. Protection du Canal G. Rapport pédologique. — SO.GE.T.I.M. et Division de la Mise en Valeur et du Génie Rural, Rabat ; notice ronéotypée, diffusion limitée, 147 p.
- WILBERT, J. — 1958-1959. Sols-types des Doukkala et leurs relations. — Travaux de la Section de Pédologie de la Soc. des Sc. Nat. et Phys. du Maroc, Rabat ; 13-14, p. 19.
- 1958-1959. Liste d'ouvrages et articles concernant l'étude des sols et ses divers aspects au Maroc et en Afrique du Nord. — Travaux de la Section de Pédologie de la Soc. des Sc. Nat. et Phys. du Maroc, Rabat ; 13-14, pp. 205-231.

CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS CALCAIRES AU MAROC

PLANCHES

Note: La localisation des sites où ont été prises les photos se rapporte aux cartes topographiques I. G. N. et est précisée par des indications présentées dans l'ordre suivant :

Région (ex.: Chaouïa) — nom de la carte (ex.: Ouled Ziane), coordonnées Lambert système Nord Maroc exprimées en kilomètres (ex.: $x=309,000$; $y=304,000$).

Le piochon représenté sur les photos a une longueur de 25 cm; il est disposé tête en haut et manche en bas.

FIG. 1: Superposition de deux encroûtements de types différents.

De haut en bas, on observe un encroûtement essentiellement nodulaire du limon rose tensiftien (avec cailloutis de base en calcaire jurassique) avec à sa base un horizon à taches calcaires petites et jaunes; puis un encroûtement à taches rondes très blanches dans un limon amirien plus rouge. La superposition est marquée par le cailloutis ravinant entre le tensiftien assez caillouteux et l'amirien plus argileux.

Gharb-El Kansera ($x=466,250$; $y=398,500$).

CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS CALCAIRES AU MAROC



Al Awamia 3, avril 1962

FIG. 2 : Croûte lamellaire (ou zonaire).

Poche de dissolution dans un vieux limon très calcaire (en bordure d'un collecteur de drainage des eaux), fossilisée par plusieurs lamelles de croûte de ruissellement et d'évaporation (phénomènes s'étant produits à l'air libre). Comblement ultérieur par un limon rouge apporté par ruissellement.

Doukkala-Boulaouane ($x=249,250$; $y=250,200$).

CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS CALCAIRES AU MAROC

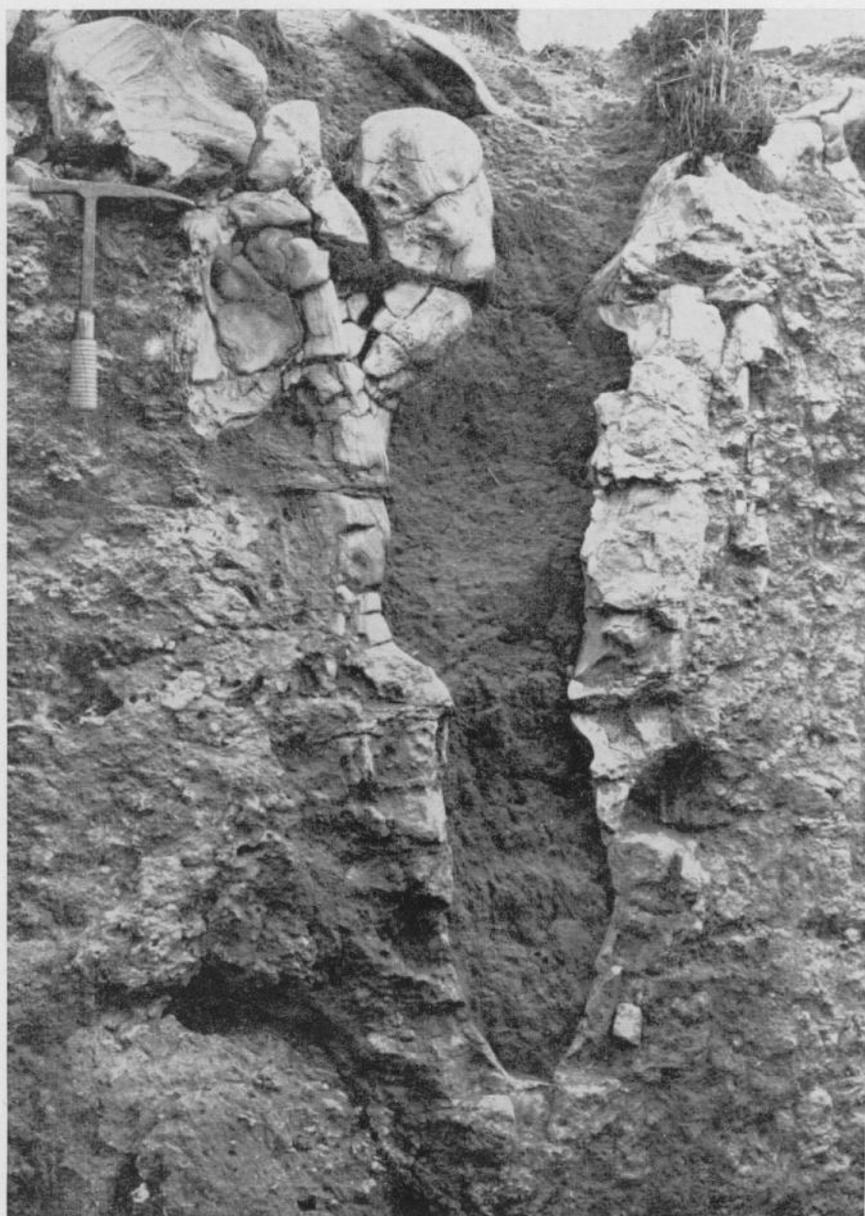


FIG. 3 : Caractère alluvionnaire des apports de calcaire favorisant l'encroûtement.

Sur un substratum quartzitique (donc non calcaire), on observe le cailloutis de base (dans le même matériel) de l'alluvionnement villafranchien très calcaire, à structure stratifiée, avec galets mous (argileux) puis feuillets superposés de croûte lamellaire de plus en plus durcis vers la surface. A gauche, observer une poche de dissolution fossilisée par un croûte lamellaire.

Chaouïa-Berrechid (x=293,000; y=315,500).

CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS CALCAIRES AU MAROC

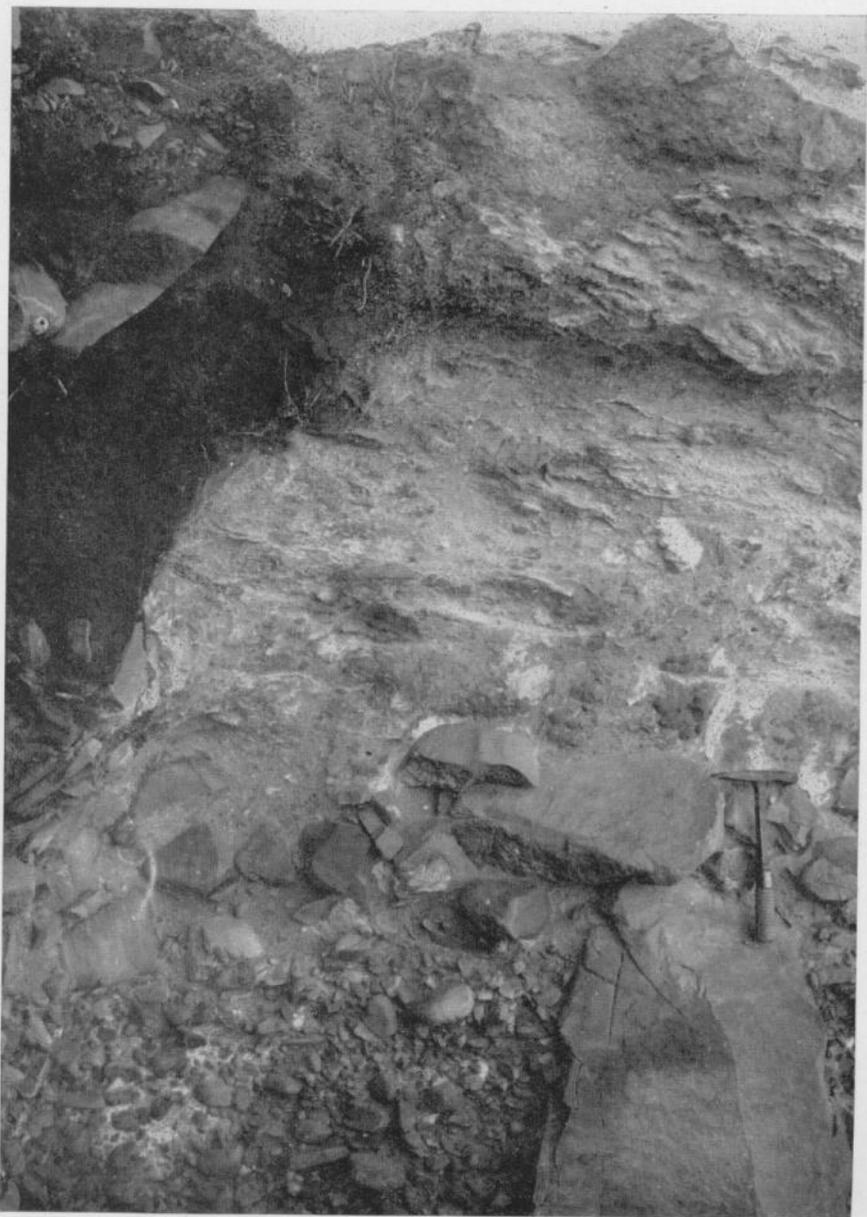


FIG. 4: Encroûtement de type diffus (« palustre »).

Un limon sableux soltanien rouge recouvre une argile tensiftienne à taches calcaires qui se superpose à une grande épaisseur de limon jaunâtre (amirien) très calcaire traversé de fissures comblées de terre rouge. Le substratum est constitué de grès dunaire calcaire pliocène.

Doukkala-Zemamra (x=187,250; y=231,250).

CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS CALCAIRES AU MAROC



FIG. 5 : Encroûtement en taches de la base des tirs.

On observe ici une nette disposition verticale le long des fissures de l'argile. Souvent, la disposition ci-dessus est beaucoup moins visible.

Chaouïa-Benahmed ($x=311,000$; $y=295,980$).

CROÛTES ET ENCRÔTEMENTS CALCAIRES AU MAROC

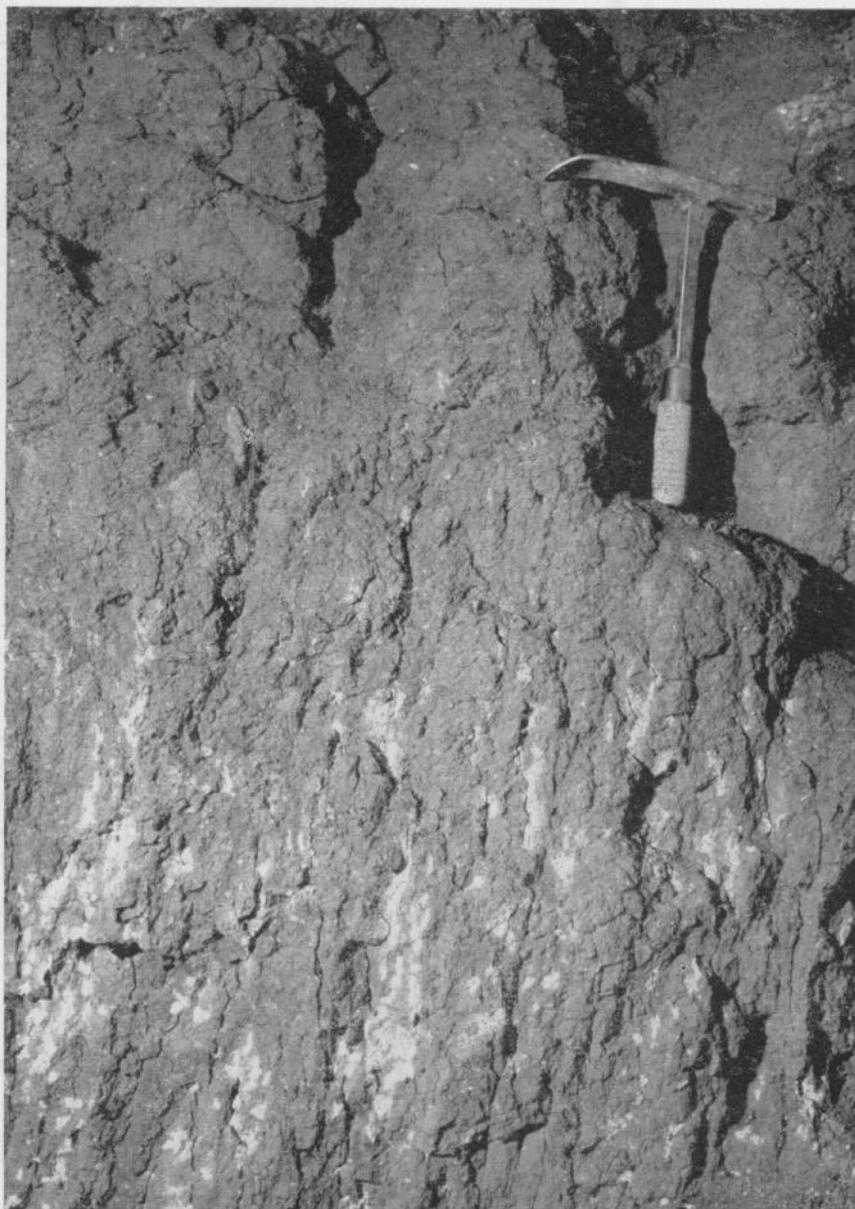


FIG. 6 : Superposition de feuillets de croûte lamellaire.

Sous le piochon, on observe la partie supérieure de l'encroûtement à feuillets multiples villairanchien. Remarquer la stratification du calcaire de l'horizon « crayeux », ainsi que la ségrégation en amas cylindriques verticaux.

Le piochon se trouve dans l'épaisseur d'un sol constitué d'un alluvionnement argileux postérieur à la croûte, alluvionnement qui remanie des débris de croûte (au centre) et s'infiltre au sein d'une croûte probablement « soufflée » par cryotur-
bation (à droite). Formation d'un sol tirsifié « rendziniforme ».

Chaouïa-Ouled Ziane ($x=309,000$; $y=304,000$).

CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS CALCAIRES AU MAROC



FIG. 7 : Croûte stalactiforme.

Cette photo représente un type qui n'est pas le plus caractéristique de cet encroûtement, en particulier par l'absence de cailloux sous lesquels devraient pointer les petites stalactites.

Chaouïa-Ouled Ziane ($x=399,000$; $y=304,000$).

CROÛTES ET ENCRÔTEMENTS CALCAIRES AU MAROC

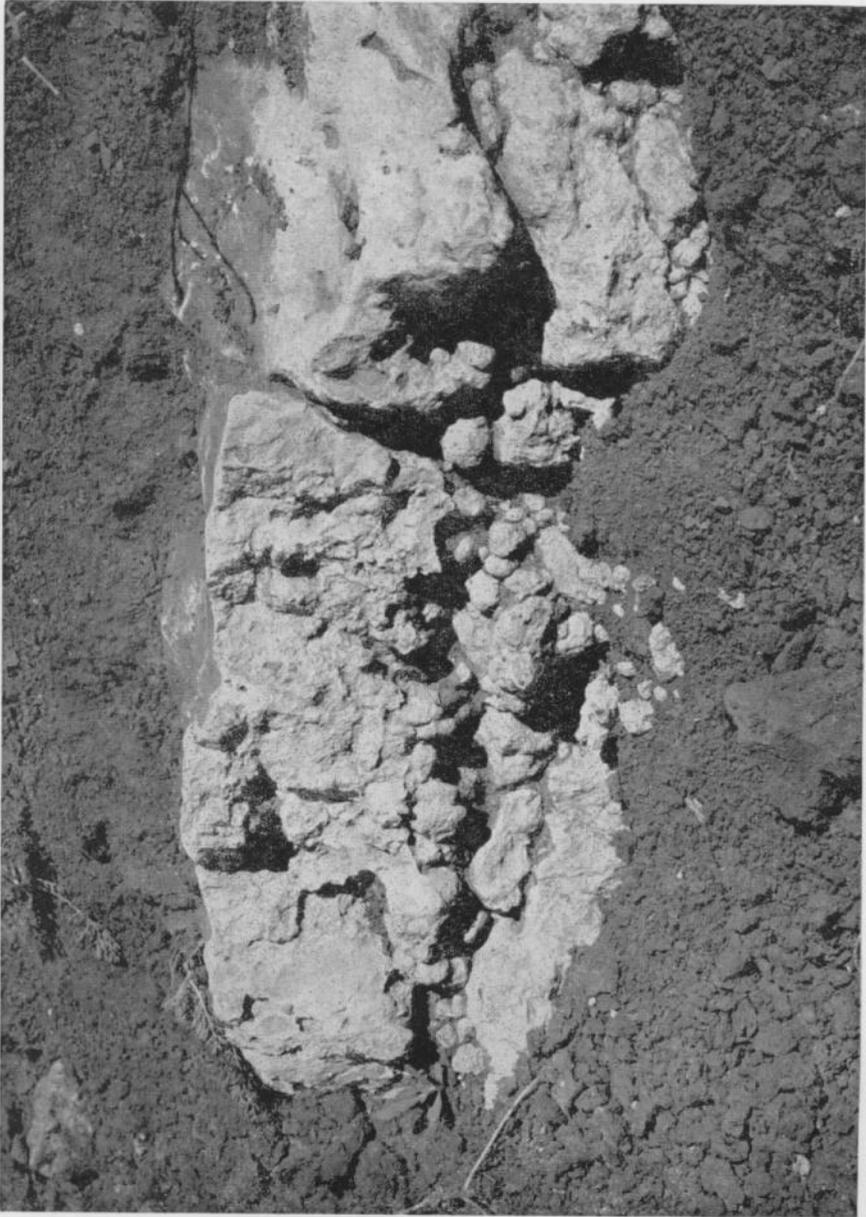


Fig. 8: Encroûtement complet (villafanchien).

Une croûte lamellaire (zonaire) recouvre un dépôt crayeux (ou « tuffeux ») stratifié, contenant quelques petits galets mous (argileux). Cet ensemble repose sur un limon argileux à grandes taches calcaires qui ont subi le phénomène du « fauchage » par solifluxion sur la pente (de droite à gauche). L'ensemble représente le « Moulouyen » reposant sur le limon strictement villafanchien. Par dessus le tout, dépôts du pluvial « Salétien ».

Chaouia-Berrechid ($x=302,250$; $y=318,750$).

CROÛTES ET ENCRÔTEMENTS CALCAIRES AU MAROC



FIG. 9 : Encroûtement nodulaire.

Il est essentiel de noter la disposition en chapelets verticaux de ces nodules en place dans un limon imprégné de calcaire.

Chaouïa-Ouled Ziane ($x=309,000$; $y=304,000$).

CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS CALCAIRES AU MAROC

