



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 17603

To link to this article : DOI:10.1016/0016-7061(91)90005-E
URL : [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(91\)90005-E](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(91)90005-E)

To cite this version : Kaemmerer, Michel and Revel, Jean-Claude
Calcium carbonate accumulation in deep strata and calcrete in Quaternary alluvial formations of Morocco. (1991) *Geoderma*, vol. 48 (n° 1-2). pp. 43-57. ISSN 0016-7061

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Calcium carbonate accumulation in deep strata and calcrete in Quaternary alluvial formations of Morocco

Michel Kaemmerer and Jean Claude Revel

*Laboratoire de Pédologie, Physique et Chimie du Sol, ENSAT-INP, 145 Avenue de Muret, 31076
Toulouse, France*

ABSTRACT

Kaemmerer, M. and Revel, J.C., 1991. Calcium carbonate accumulation in deep strata and calcrete in Quaternary alluvial formations of Morocco. *Geoderma*, 48: 43–57.

Morphological studies on various scales of calcium carbonate accumulation which cements the Quaternary alluvial formations of the Sebou and the Moulouya (Morocco), show that there are two types of accumulation. The first, a thin layer always found near the surface, appears to be derived from the local redistribution of calcium carbonate under the influence of pedogenetical phenomena. The second, found in deeper strata, is a homogeneous thicker layer. It develops below the water table, after a long displacement of calcium carbonate in solution. These cemented layers affect the evolution of landscapes.

RESUME

Kaemmerer, M. et Revel, J.C., 1991. Encroûtement de nappe et calcrete dans des alluvions Quaternaires au Maroc. *Geoderma*, 48: 43–57.

L'étude morphologique, à différentes échelles, des accumulations calcaires, qui consolident les alluvions quaternaires du Sébou et de la Moulouya (Maroc), montrent qu'il existe en fait deux types d'accumulation. L'une, toujours proche de la surface, peu épaisse (calcrète) paraît provenir de la redistribution locale du calcaire sous l'influence de phénomènes pédogénétiques. L'autre, profonde, très épaisse (encroûtement de nappe) est homogène; elle proviendrait de l'accumulation du calcaire dans la nappe phréatique après un long déplacement du calcium en solution. L'induration des alluvions marque l'évolution des bassins et des paysages.

INTRODUCTION

Les accumulations calcaires, indurant les formations alluviales, sont très répandues dans les régions semi-arides, notamment sur le pourtour méditerranéen. Le nombre et la diversité des travaux recensés et analysés par Goudie

(1972), Reeves (1976) et Bock (1984), montrent bien l'intérêt que soulèvent encore leur origine et leur genèse. La distinction entre les divers types d'accumulations n'a pas toujours été clairement exprimée, malgré certaines tentatives comme celles de Vogt (1983) ou de Bock (1984). Ces accumulations ont souvent été interprétées comme étant le résultat d'un phénomène unique et chacun, selon ses tenants, leur accorde une origine différente. Ainsi, au Maroc, Ruellan (1971), après une analyse des sols et des accumulations calcaires sur les alluvions de la basse Moulouya, met en évidence une filiation des diverses formes de carbonates: pseudomycelium, amas friables, nodules, encroûtement friable tuffeux et nodulaire, croûte, dalle compacte. Cette conception sous-entend une origine unique: la différenciation pédologique; mais il précise bien que cette filiation, perceptible dans les matériaux fins, l'est beaucoup moins dans les matériaux grossiers, leur hétérogénéité rendant difficile les observations et les interprétations. Cet auteur voit une redistribution oblique des carbonates dans le sens transversal des vallées, alors que Vogt (1983) les considère comme des dépôts algaires et/ou des apports de boues carbonatées. Pourtant Moreau (1981), étudiant les formations alluviales dans le bassin de l'oued Tensift (Maroc), est un des premiers à subodorer l'existence de deux origines différentes: encroûtement de nappe pour la partie profonde et calcrète (accumulations carbonatées en couches individualisées de surface) au sommet. A partir de cette idée et des faits énoncés, il convient d'abord de discuter la genèse de chaque accumulation à partir de nouvelles observations, puis d'analyser l'importance de leur rôle sur la diversité des formes du paysage quaternaire.

Pour mieux appréhender ces diversités, trois bassins ont été retenus tant pour leur originalité que pour l'extension des accumulations calcaires dans les paysages; il convient d'abord de les présenter succinctement.

MATERIEL

Le cadre de l'étude

L'étude a été menée dans les trois bassins suivants (Fig. 1).

(1) Le bassin de Fès, en amont du moyen Sébou, au climat subaride (550 mm/an, tombant surtout de novembre à mai; 17.8°C en moyenne annuelle), est étroit (large de 4,5 km) encadré par le plateau du Saïs et des croupes arrondies marneuses. Les six formations alluviales quaternaires reconnues par Laouina (1973) et Kaemmerer (1987), inégalement conservées, restent pour les plus anciennes (Pléistocène inférieur), accrochées sur les flancs de la vallée encaissée.

(2) Le bassin de Skoura, sur le haut Sébou semi-aride chaud (350 mm/an,

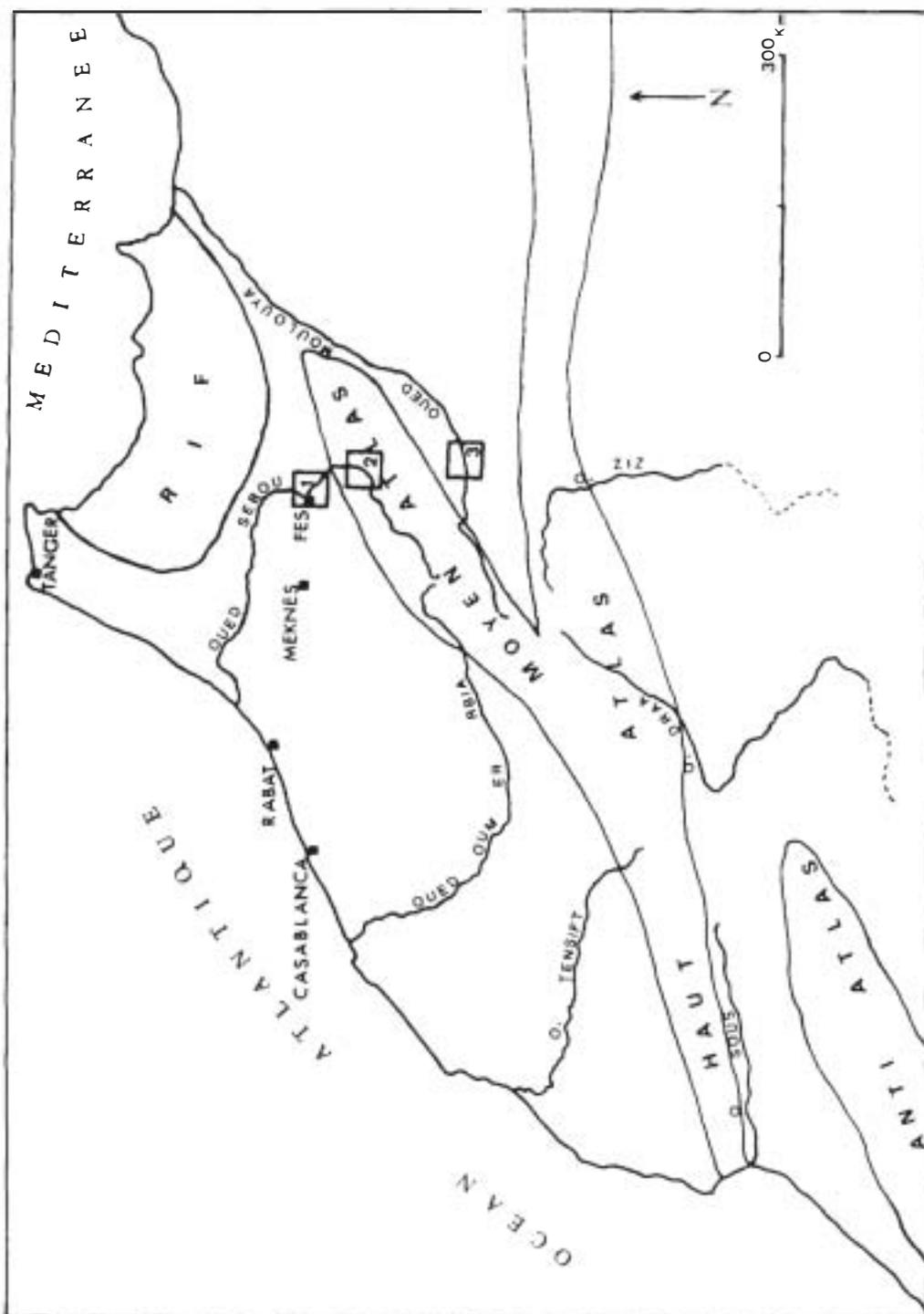


Fig. 1. Zone d'étude: (1) Bassin de Fès; (2) Bassin de Skoura; (3) Bassin de Ksabi.

avec un maximum en avril; 19°C en moyenne annuelle), est limité par des chaînes du Moyen-Atlas; la largeur moyenne de la vallée est de 10 km. Aux deux niveaux de glacis emboîtés anciens (Pléistocène inférieur et moyen) succèdent, près du fleuve, trois niveaux de terrasses plus récentes (Pléistocène moyen et supérieur, Holocène) étagées, étroites et mal conservées (Martin, 1981).

(3) Le bassin de Ksabi, au climat aride (150 mm/an, concentrées sur avril; 15.5°C en moyenne annuelle), forme un couloir intra-atlasique, largement ouvert (45 km de large). En rive gauche du fleuve moulanya, il existe six niveaux sédimentaires détritiques (Raynal, 1961; Lefevre, 1985) parfaitement étagés et appartenant au fleuve et à ses affluents.

Les formations alluviales

La constitution et l'induration des terrasses est variable suivant l'âge et le lieu. Plus généralement, ce sont des dépôts caillouteux (épais de 5 à 12 m) soit seuls et indurés du Pléistocène inférieur au Pléistocène supérieur dans le bassin de Ksabi, indurés ou non indurés du Pléistocène inférieur au Pléistocène moyen dans celui de Fès; soit indurés à non indurés surmontés de limons de couverture, très épais dans le bassin de Fès, peu épais dans celui de Skoura et très réduits à Ksabi. Lorsque ces limons sont absents, en surface affleure la pellicule rubanée (laminar horizon de Gile et al. (1965)) qui marque le sommet de la formation. De nombreux travaux, repris par Vogt (1983), puis par Bock (1984), lui attribuent de multiples origines: pédologique, éolienne, sédimentaire, biologique, mais la discussion à ce sujet sort du cadre de cette étude.

L'étude, présentée ici, concerne uniquement les accumulations calcaires qui se différencient dans les formations grossières (cailloutis). Un seul exemple sera détaillé dans la terrasse du Pléistocène moyen du bassin de Ksabi (Lefevre, 1985), car celui-ci est bien représentatif des variations morphologiques (induré à non induré) précédemment citées. Il se situe à l'Est du village de Ksabi (32° 54' N, 4° 18' W).

METHODES

Macromorphologie

La macromorphologie est étudiée sur des échantillons bruts et sur des échantillons sciés, à l'oeil nu et à l'aide de la loupe binoculaire.

Micromorphologie

Des lames minces sont taillées dans des blocs imprégnés de résine afin d'exclure tout risque d'éclatement au cours des diverses phases de fabrication. Elles sont observées en lumière naturelle et en lumière polarisée.

Résidu insoluble

Le résidu insoluble, après attaque à l'acide chlorhydrique dilué ($N/50$), est analysé par diffraction des rayons X (cathode Cu) sur quatre lames (normale, chauffée, éthylène-glycol et hydrazine) et sa composition chimique déterminée par une microsonde d'émission (Tracor Northern TN 171).

RESULTATS

On distingue au niveau de la coupe (Fig. 2):

- (1) un niveau conglomératique très dur, homogène, à galets, graviers et sables, épais d'une dizaine de mètres;
- (2) surmonté d'un ensemble de graviers et galets emballés dans des sables non indurés, épais de 0,60 m au maximum;

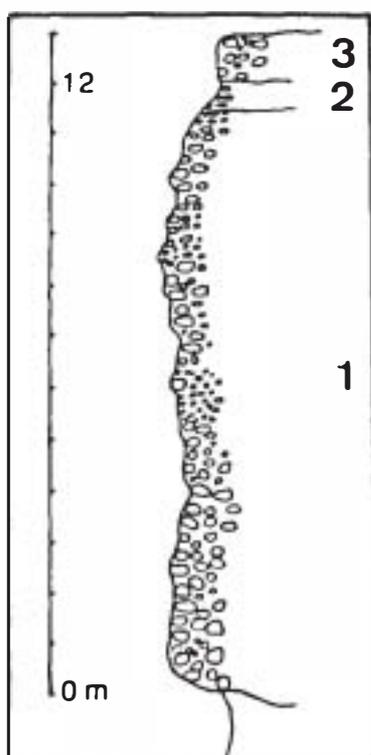


Fig. 2. La terrasse du Pléistocène moyen (bassin de Ksabi): (1) conglomérat de base; (2) cailloutis sans accumulation de carbonate; (3) niveau supérieur induré.

(3) sur lequel repose, au sommet, un niveau à éléments grossiers enrobés par un ciment calcaire, épais de 1,40 m.

Les deux niveaux indurés sont superposés, bien individualisés et doivent être décrits en détail.

LE NIVEAU SUPERIEUR

Le niveau supérieur est un encroûtement peu épais (inférieur à 1.50 m quelle que soit la formation étudiée) présentant une succession de lits centimé-

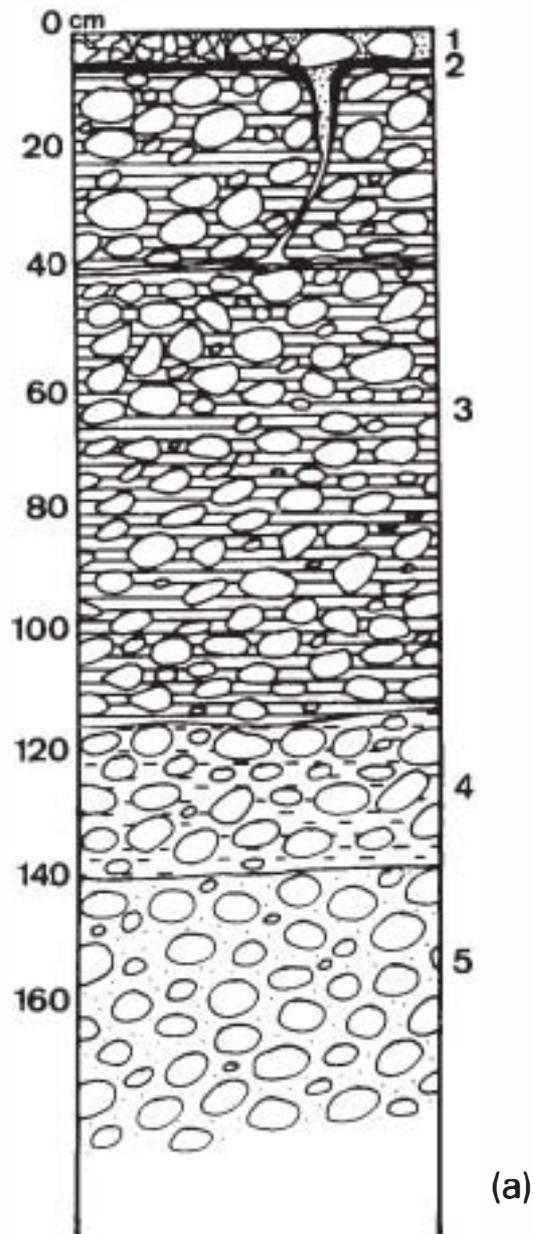
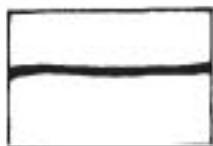


Fig. 3. Représentation schématique du niveau supérieur induré du Pléistocène moyen.

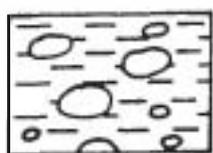
(b)



Pellicule rubanée
Laminar calcrete



Dalle calcaire
Massive calcrete



Encroûtement calcaire
Chalky calcrete



Sédiments grossiers
Coarse sediments



Sédiments fins
Fine sediments

triques, fragilisés par de nombreuses fissures horizontales ou obliques. Ainsi, le profil pris en exemple se divise de la manière suivante (Fig. 3).

(1) De 0 à 7 cm: un ensemble constitué de galets de tailles moyennes (jusqu'à 10 cm d'axe principal), épars, à patine désertique, fragmentés et anguleux, microkarstifiés ou fissurés.

(2) De 7 à 8 cm: pellicule rubanée faite d'une succession de lits millimétriques beiges et bruns. Les rares éléments détritiques sont des sables quartzeux subanguleux. Observée au M.E.B. (microscope électronique à balayage), la calcite des lits tendres et beiges est sous forme de fins bâtonnets (Fig. 4a) dont l'agencement en 'nid de pie' pourrait, d'après Pouget (1980), être lié à la présence de matières organiques. Dans les lits plus compacts et bruns, à côté des bâtonnets apparaissent la calcite micritique (Fig. 4b) et les amas argiloferriques. Ces lits peu protégés par les éléments susjacentes, sont soumis à la corrasion, la gélifraction, la corrosion et tendent à disparaître.

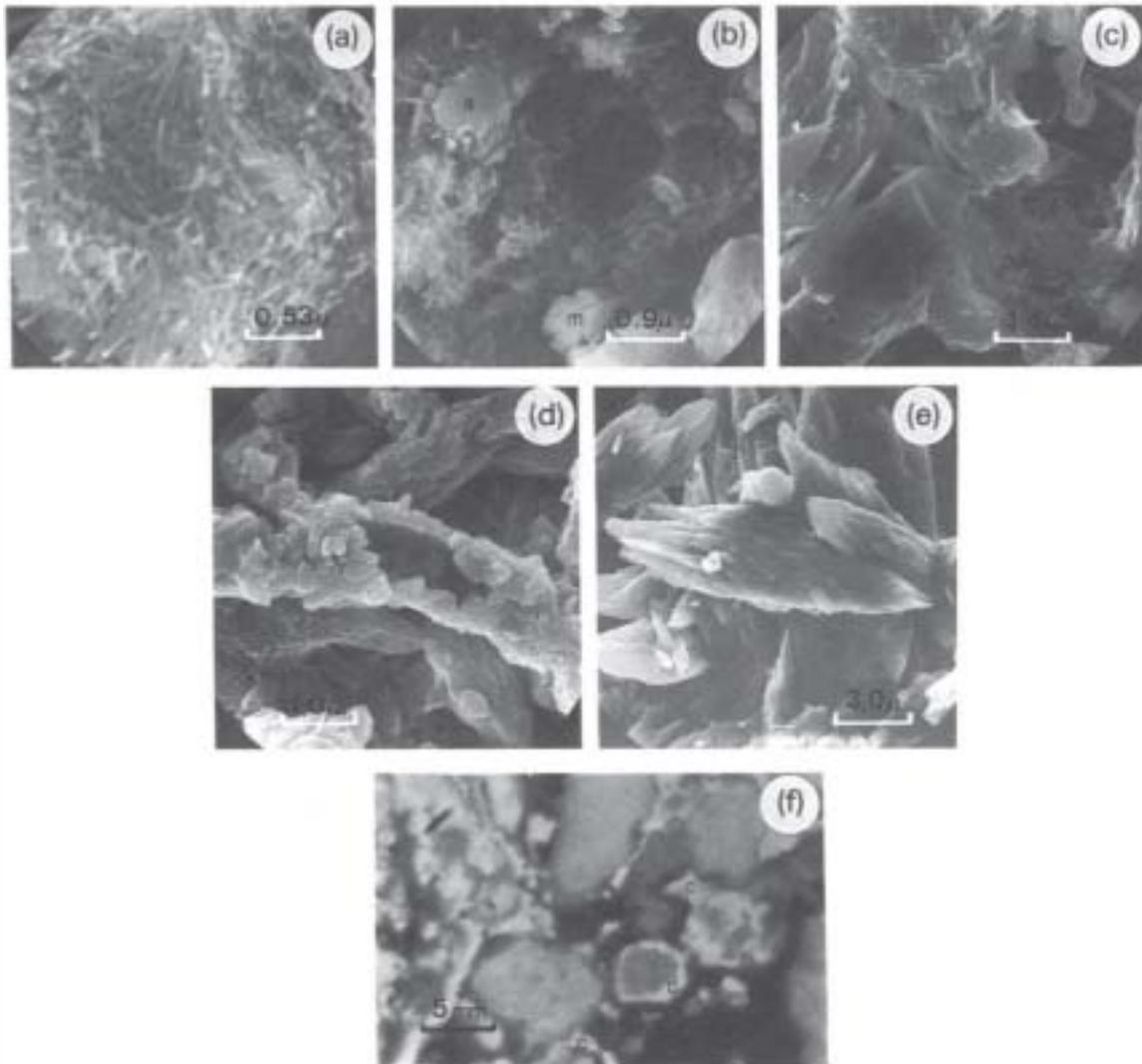


Fig. 4. (a) Calcite en bâtonnets (lits beiges). (b) Calcite en bâtonnets, micrite (m); amas ferrugineux (a) (lits bruns). (c) Voile argileux enveloppant la micrite et la microsparite. (d) Microcristaux de calcite constituant les 'navettes'. (e) Microsparite couvrant les parois des pores tubulaires. (f) Microsparite entourant les éléments grossiers (conglomérat de base).

(3) De 8 à 115 cm: dalle calcaire conglomératique au ciment calcaire rose à brun, à zonations blanchâtres. Elle se subdivise en deux.

(a) De 8 à 40 cm, très indurée; elle montre un ensemble de galets, (4–5 cm de grand axe, en moyenne) calcaires, partiellement dissous. Dans les vides de dissolution apparaissent souvent des concrétions blanchâtres en 'choux-fleurs' et en 'microstalactites'. A la face inférieure des galets, on distingue le calcin, fine pellicule blanchâtre (épaisse d'environ 1 mm) presque toujours présente, constitué de calcite concrétionnée. Le ciment enveloppant les galets est rose saumon à brun rouge, ponctué de taches millimétriques, beige clair, blanchâtres à grisâtres. Il est parcouru par un réseau peu important de fins pores tubulaires (diamètre inférieur à 1 mm).

Au microscope optique, la calcite constituant les concrétions blanchâtres est essentiellement micritique et microsparitique; la calcite concrétionnée du calcin apparaît sous forme de micrite. Le ciment est fait de micrite translucide englobant de nombreux amas argilo-ferriques dont les analyses par diffraction des rayons X. et à la microsonde couplée au M.E.B. révèlent la présence d'attapulгите et d'illite (Fig. 4c); les tâches millimétriques claires sont formées de micrite avec peu ou pas d'amas argiloferriques et les pores tubulaires sont limités par la microsparite et tapissés de calcite en aiguilles (lublinite).

(b) De 40 à 115 cm: elle se distingue par des galets généralement sains, montrant pour certains un microkarst très fin à leur face supérieure. Le ciment ne montre pas les taches beige clair observées précédemment.

(4) De 115 à 140 cm: zone à matrice fragile, blanchâtre et friable, enveloppant quelques éléments détritiques identiques aux précédents. Localement elle apparaît plus indurée; les galets n'y sont pas dissous, même partiellement; le ciment beige à brun clair, à forte microporosité tubulaire, observé au M.E.B., montre un ensemble de cristaux de calcite micritique englobant des granules bruns et des cristaux sparitiques en 'navette' (Fig. 4d) et localement une calcitisation de tissus végétaux pouvant être, à cette échelle, des myceliums, des radicelles, des rhizoïdes, des poils absorbants (Fig. 4e).

(5) De 140 à 200 cm: ensemble d'éléments grossiers détritiques non consolidés.

Les traits essentiels du niveau supérieur sont: (1) sa faible épaisseur, inférieure à 1,50 m; (2) un ensemble de lits bien distincts ayant chacun des caractères spécifiques; (3) la dissolution de la face supérieure des galets et la présence de calcin à leur base, constituant une polarité; (4) des phénomènes de dissolution et de précipitation (occupation des vides texturaux et de dissolution des galets par du ciment).

Ce niveau supérieur, s'il reste modeste de par son épaisseur, est en fait une formation extrêmement complexe.

LE CONGLOMERAT DE BASE

Le conglomérat de base est observé dès l'Holocène dans le bassin de Ksabi et persiste jusqu'au Pléistocène inférieur. Dans les bassins de Fès et de Skoura, il est souvent discontinu et partiellement absent, mais les témoins des formations alluviales anciennes ne sont souvent que des lambeaux des extrémités latérales des terrasses.

Les niveaux alluviaux du bassin de Ksabi montrent, entre 2 et 12 m de profondeur, un ensemble d'éléments détritiques grossiers sains (de tailles moyennes avoisinant les 10 cm), emballés ou non dans des sables grossiers à

fins, subanguleux. Ils laissent une forte macro et microporosité vésiculaire. Observée au microscope optique, la calcite forme autour des éléments détritiques, une couronne de cristaux sparitiques ou microsparitiques blanc grisâtre, assemblés en mosaïque (Fig. 4f). La surface de cette couronne montre les extrémités libres des faces cristallines. Au voisinage des points de contact des galets, ces couronnes sont coalescentes, permettant l'induration du dépôt. L'ensemble possède encore une forte porosité texturale.

Les traits caractéristiques du conglomérat de base, retrouvés dans les autres formations, sont: (1) un dépôt homogène, d'une grande puissance, avoisinant souvent 10 m; (2) une absence de dissolution des éléments détritiques qui conservent un état sain et des contours nets; (3) une absence de polarité dans les précipitations carbonatées; (4) la régularité de l'épaisseur du dépôt de calcite en un endroit donné; (5) l'absence d'inclusion d'argile dans les précipitations carbonatées; (6) sa situation à la base des dépôts alluviaux, au dessus du substratum imperméable.

INTERPRETATION - DISCUSSION

Les deux accumulations se distinguent donc par leur situation (sommet et base de la terrasse), la dissolution polarisée et les amas argileux dans un cas, leur absence dans l'autre, la complexité des formes de calcite précipitée d'une part et la monotonie d'autre part. Tous ces faits montrent qu'il existe deux entités différentes. La difficulté pour les distinguer apparaît avec la complexité des situations, notamment lorsque les accumulations deviennent adjacentes ou imbriquées, en particulier, lorsque les sédiments sont peu épais. Ces deux entités correspondent peut-être à des origines différentes que nous allons essayer de définir.

Dans le dépôt alluvial à éléments grossiers, où les pores centimétriques sont fréquents, dans la zone non saturée, l'eau circule suivant la gravité, du haut vers le bas. Dans ce cas, Avias (1956) a montré que les éléments grossiers calcaires présentent alors une dissolution partielle à leur face supérieure et une accumulation de carbonates sous forme de calcin localisée à leur base (zone à drainage vertical avec départ de l'eau gravitaire et persistance de l'eau capillaire). Ici, l'absence de polarité implique une absence de circulation verticale, donc de gravité, ce qui amène à conclure que les carbonates ont précipité et cristallisé dans un milieu saturé en eau, c'est-à-dire dans une nappe circulant librement dans les alluvions grossières. Or, actuellement tous ces cailloutis ne contiennent aucune nappe, exceptée celle du lit mineur. On doit donc admettre que la précipitation de calcite se produit quand les alluvions sont déposées, mais avant que le fleuve n'ait commencé à recreuser sa vallée. Ce type d'accumulation est alors interprété comme étant un encroûtement de nappe.

Ces précipitations carbonatées paraissent conditionnées par:

(1) Le climat. Courty et al. (1987) considèrent que les ciments spartiques, au sein des cailloutis, se forment sous des climats à précipitations assez élevées, mais à forte évaporation. Ceci ne peut s'appliquer que si le cours d'eau n'a que quelques kilomètres de long, car si le cours du fleuve a plusieurs centaines de kilomètres (Draa, Ziz, Moulouya, etc.... (Fig. 1), l'amont montagnard peut être soumis à de fortes précipitations alors que l'aval saharien reste très évaporant. Dans ce dernier cas, il y a disjonction spatiale et non plus seulement temporelle puisqu'il s'agit de deux zones climatiques différentes.

(2) La topographie. Dans les bassins de Fès et de Skoura, les extrémités latérales des terrasses anciennes ne sont pas indurées. Or les dépôts alluviaux ont une forte pente transversale et les zones les plus éloignées du fleuve sont, sans doute, plus élevées que le toit de la nappe (Fig. 5). Il n'y a donc pas accumulation de CaCO_3 et l'induration par la calcite ne concerne que la zone proche du cours d'eau. D'ailleurs Ruellan (1971) avait déjà constaté des accumulations d'autant plus importantes que l'on se trouvait dans la zone transversale la plus aval des différentes terrasses.

L'origine des carbonates doit donc être recherchée dans la partie amont des bassins versants; ce qui implique une origine éloignée de leur lieu de précipitation. Autrement dit, les solutions carbonatées subissent un transport faiblement oblique, longitudinal par rapport à la vallée, sur des distances kilométriques.

Le calcrète est caractérisé par: (1) La polarité des galets; celle-ci implique des circulations verticales des solutions carbonatées et donc un milieu non saturé au-dessus de la nappe; (2) la présence, jusque dans les niveaux ou horizons inférieurs, de pores tubulaires et d'organes souterrains de végétaux calcifiés; ils montrent que la végétation (macro et microflore) a colonisé le substrat sédimentaire (limons de couverture et cailloutis) avant l'induration complète des lits inférieurs. Il n'est pas rare de rencontrer des végétaux qui, pour s'adapter aux rigueurs climatiques, développent un système racinaire important. Ainsi Pouget (1980), dans l'Atlas algérien, cite comme exemples des plantes vivaces (*Helianthemum hirtum* spp. *ruficomum*, *Arthrophytum scoparium*, etc...), ayant des racines capables d'explorer des horizons à plu-

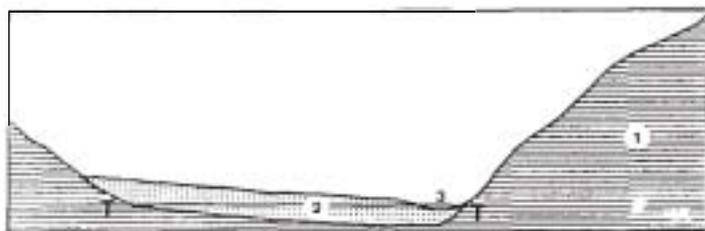


Fig. 5. Coupe schématique de la vallée du Sébou montrant: (T) niveau de surface de la nappe phréatique; (1) marnes; (2) alluvions; (3) Sébou.

sieurs mètres de profondeur, avec un réseau particulièrement dense de racines. Cette végétation, selon Ruellan (1971), Pouget (1980) et Phillips et al. (1987), serait à l'origine même des accumulations carbonatées. L'induration des horizons profonds modifiant les conditions du milieu (en particulier la réserve hydrique), la végétation peut laisser place à un sol nu dont la partie meuble sera facilement décapée par l'érosion.

Nous admettons donc comme probable, dans le cadre de notre étude, l'hypothèse de l'origine pédologique du calcrète. Les carbonates en solution précipitent et s'accumulent dans la zone d'adsorption racinaire et au sein même des racines (Jaillard, 1987), mais le transport en milieu non saturé (il n'existe pas de pseudogley) ne peut être que vertical et donc de l'ordre du mètre. Cette dynamique des carbonates est aussi modulée en fonction:

(1) de l'âge de la formation alluviale – les formations récentes ne montrent pas de calcrète et les plus anciennes (Pléistocène moyen à inférieur) ont un calcrète démentelé, érodé;

(2) du climat – dans le bassin de Ksabi, les calcrètes, du Pléistocène supérieur au Pléistocène inférieur, se sont toujours parfaitement développées, mais subissent actuellement une phase de dégradation. En accord avec Pouget (1980), on constate que dans les régions où la pluviométrie est inférieure à 200 mm, la dynamique des carbonates, dans la partie supérieure, est bloquée (Fedoroff et Courty, 1989). Dans le bassin de Fès, les précipitations sont sans doute trop importantes (supérieures à 500 mm) et entraînent les carbonates en solutions hors du bassin. C'est dans le bassin de Skoura, avec une pluviométrie de 350 mm, que cette dynamique doit être la plus active, comme le remarque également Dumas et Hotyat (1986) à partir d'observations faites dans une zone du Sud-Est espagnol.

ROLE DU CALCRETE ET DE L'ENCROUTEMENT DE NAPPE DANS LA DYNAMIQUE ET LA MORPHOGENESE DES BASSINS

Dans le cadre de l'hypothèse proposée, où le calcrète est d'origine pédologique, il n'affleure en surface qu'après la disparition de la végétation et des horizons meubles par l'érosion (bassin de Ksabi et, partiellement, bassin de Skoura). Mais de par sa position sommitale, sa faible épaisseur et la relative fragilité des lits fracturés, il n'aura qu'un rôle secondaire sur la morphogenèse des bassins. Résistant, il protège le substratum de l'impact des gouttes d'eau et freine l'action érosive des rares pluies à caractère orageux. Il est quand même peu à peu démantelé.

Le rôle de l'encroûtement de nappe est de toute autre importance. La puissance du dépôt, l'homogénéité des cailloutis, la résistance du conglomérat font tenir à cet encroûtement un rôle de protection vis-à-vis des matériaux tendres tertiaires, qui se traduit dans le paysage par des formes régulières, plates, souvent massives et imposantes.

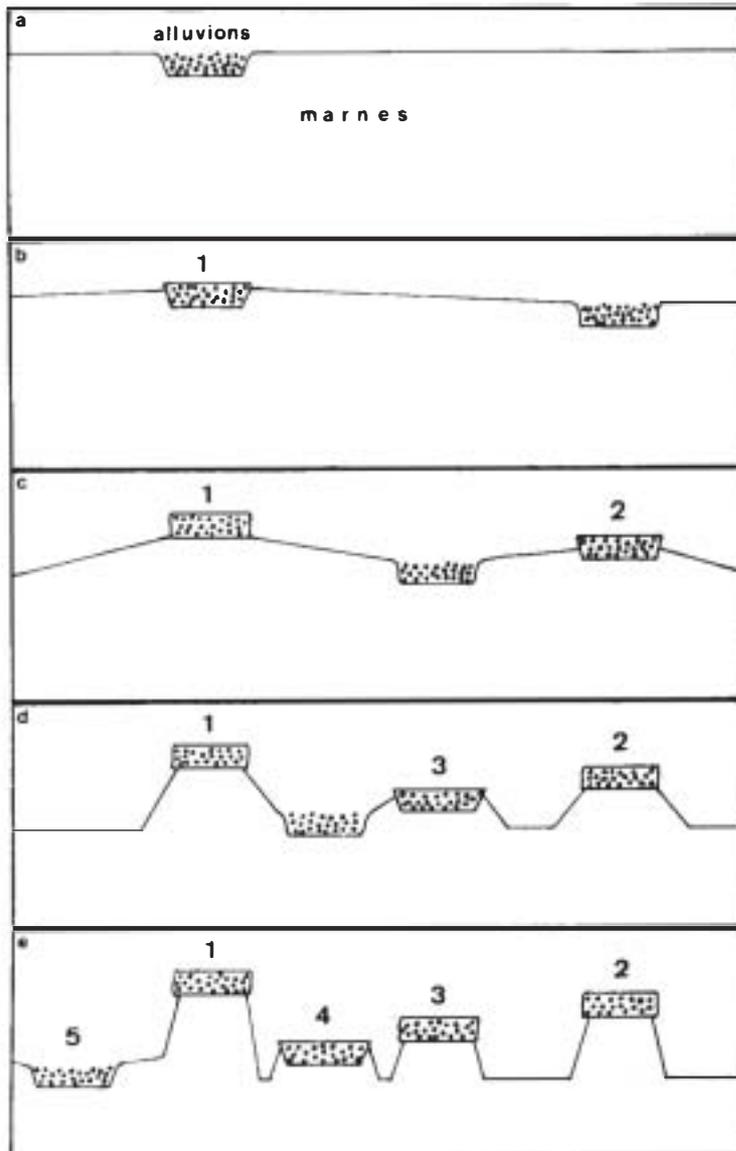


Fig. 6. Façonnement schématique des différents niveaux quaternaires. (1) et (2) terrasses du Pléistocène ancien; (3) et (4) terrasses du Pléistocène moyen; (5) la Moulouya durant le Pléistocène récent.

Dans les bassins de Fès et de Skoura, on ne retrouve que quelques buttes isolées des terrasses anciennes consolidées. Le Sébou est encaissé (Skoura) ou même très encaissé (Fès) et le substratum souvent marneux a été sapé sous les terrasses anciennes par le fleuve pérenne. Des restes d'encroûtement de nappes anciennes se retrouvent dans le lit du fleuve et dans ses dépôts récents; au contraire, dans le bassin de Ksabi, toutes les terrasses consolidées occupent et semblent figer le paysage. Dans ce bassin, les oueds affluents de la Moulouya ont joué un rôle de bâtisseurs de formations alluviales aussi important que le fleuve lui même. Au Pléistocène inférieur, ces oueds coulaient peu encaissés dans les marnes tertiaires et ont tapissé le fond de leur lit d'élé-

ments grossiers venant des Jbels périatlasiques (Fig. 6a). Durant la phase de creusement postérieure, ce sont les marnes plus tendres qui ont été recreusées et non pas les alluvions caillouteuses déjà cimentées, donc résistantes. La faible ampleur du relief, le régime hydrique des oueds, et la fragilité de l'encaissant miocène ont favorisé un cours divaguant, ne s'appuyant pas nécessairement contre les alluvions plus anciennes. Entre les dépôts peuvent alors subsister de grandes étendues de marnes qui seront entaillées lors d'épisodes postérieurs du Quaternaire, les conglomérats issus de l'encroûtement de nappe se retrouvant haut perchés dans le paysage (Fig. 6b-e).

CONCLUSION

Nous distinguons, au sein des formations alluviales quaternaires de trois bassins marocains, des encroûtements aux origines différentes:

(1) un encroûtement superficiel, peu épais, hétérogène et complexe, d'origine pédologique: le calcrète;

(2) un encroûtement profond, très épais, homogène et simple, d'origine hydrologique: l'encroûtement de nappe.

L'origine du calcium précipité est également différente:

(1) dans les calcrètes, il provient des horizons supérieurs meubles; il subit un transport vertical et métrique;

(2) dans les encroûtements de nappe, il est amené avec les eaux souterraines sursaturées par un transport oblique, dans le sens longitudinal par rapport à la vallée.

Les conglomérats issus des encroûtements de nappe ont un rôle plus essentiel que les calcrètes plus modestes, dans la dynamique des bassins, car leur résistance à l'érosion et au sapement latéral du fleuve va permettre la conservation des dépôts alluviaux hauts perchés dans le paysage.

BIBLIOGRAPHIE

- Avias, J., 1956. Sur les phénomènes de corrosion et de concrétionnement polarisés de galets des formations alluviales et de calcaires en plaquettes de l'Est de la France. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 6(6): 275-288.
- Bock, L., 1984. L'intégration chronospaciale des accumulations calcaires. Approche morpho-pédologique et géochimique dans un paysage semi-aride de l'Atlas tellien (Algérie). Thèse en Sci. Agron. de l'Etat à Gembloux, Belgique, 448 pp.
- Courty, M.A., Dhir, R.P. et Raghavan, H., 1987. Microfabrics of calcium carbonate accumulations in arid soils of western India (Rajasthan). Acte VIIe Réunion Internationale Micromorphologie des Sols, Paris, pp. 227-234.
- Dumas, B. et Hotyat, M., 1986. Interactions entre couvert steppique et écoulements générateurs de glacis actifs dans le Sud-Est de l'Espagne. *Rev. Géogr. des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 56(4): 12-24.
- Fedoroff, N. et Courty, M.A., 1989. Indicateurs pédologiques d'aridification. Exemple du Sahara. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 8, V(1): 43-53.

- Gile, L.H., Peterson, F.F. et Grossman, R.B., 1965. The K horizon. A master soil horizon of carbonate accumulation. *Soil Sci. (Baltimore)*, 99(2): 74–82.
- Goudie, A.S., 1972. The chemistry of world calcrete deposits. *J. Geol.*, 80: 449–463.
- Jaillard, B., 1987. Les structures rhizomorphes calcaires: modèle de réorganisation des minéraux du sol par les racines. Thèse Sc., Univ. des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 219 pp.
- Kaemmerer, M., 1987. Etude des sols et des encroûtements calcaires sur les formations alluviales Quaternaires du Sébou de la moyenne Moulouya (Maroc). Thèse Sc., Toulouse III, 318 pp.
- Laouina, A., 1973. Observations géomorphologiques dans la région du Moyen Sébou, en amont de Fès. *Rev. Géogr. Maroc*, 23–24: 95–122.
- Lefevre, D., 1985. Les formations plio-pléistocènes du bassin de Ksabi (Moyenne Moulouya, Maroc). Thèse 3e cycle, Univ. Bordeaux, I, 243 pp.
- Martin, J., 1981. Le Moyen Atlas central. Etude géomorphologique. Editions du Service Géologique, du Maroc, Rabat. Notes et mémoires du Service Géologique, 258b: 445 pp.
- Moreau, R., 1981. Matériaux superficiels et paléogénèse dans la région de Marrakech (Maroc). *Trav. Doc. ORSTOM*, 139: 237 pp.
- Phillips, S.E., Milnes, A.R. et Foster, R.C., 1987. Calcified filaments: an example of biological influences in the formation of calcrete in South Australia. *Aust. J. Soil Res.*, 25: 405–428.
- Pouget, M., 1980. Les relations sol–végétation dans les steppes sud-algéroises. *Trav. Doc. ORSTOM*, 116: 555 pp.
- Raynal, R., 1961. Plaines et piedmonts du bassin de la Moulouya. Etude morphologique. Thèse Univ. Rabat, 618 pp.
- Reeves, C.C., 1976. Caliche; Origin, Classification, Morphology and Uses. Estacado Books, Kubbock, 233 pp.
- Ruellan, A., 1971. Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes: les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse Moulouya (Maroc oriental). *Mém. ORSTOM*, 54.
- Vogt, T., 1983. Types et genèse de croûtes calcaires: France méditerranéenne, Afrique du Nord. Thèse Univ. P. et M. Curie, Paris, 253 pp.