

LES SOLS CALCAIRES :

LES PRINCIPAUX TRAVAUX DES PEDOLOGUES FRANÇAIS

A. RUELLAN *

Les sols calcaires sont ceux qui contiennent, sur tout ou partie de leur épaisseur, du carbonate de calcium (plus éventuellement d'autres carbonates) dans la terre fine (particules < 2 mm) ou, pour le moins, dans la fraction grossière.

Les sols calcaires existent, à travers le monde, dans toutes les grandes régions climatiques, sur des roches très diverses, calcaires et non calcaires, dans toutes sortes de positions topographiques. Les pédologues français les ont abondamment étudiés, et ceci principalement dans cinq types de régions climatiques :

- les régions montagneuses à hiver froid ;
- les régions tempérées ;
- les régions méditerranéennes ;
- les régions désertiques ;
- les régions tropicales.

Au sein des sols calcaires, on peut distinguer, sur la base d'une réflexion génétique, deux types majeurs d'horizons :

— des horizons d'altération et de départ du calcaire : le comportement essentiel du calcaire, résultat de l'action de plusieurs mécanismes, y est d'abord la dissolution, puis son transfert vers la profondeur du sol ou vers l'aval de la toposéquence pédologique ; ces horizons peuvent être en surface ou en profondeur ;

— des horizons d'accumulation de calcaire : le comportement essentiel du calcaire y est d'abord à son arrivée, en provenance des horizons situés au-dessus d'eux ou de l'amont de la toposéquence pédologique, ou encore de la nappe phréatique sous-jacente ; puis vient sa précipitation donnant naissance à des volumes très riches en calcaire qui sont discontinus ou continus ; ces horizons, quand ils sont fonctionnels dans le sens de l'accumulation, sont toujours en profondeur.

Tous les aspects de la caractérisation, de la genèse, du fonctionnement, de l'utilisation des sols calcaires ont été abordés par les chercheurs et les ingénieurs français : je ne peux évoquer ici l'ensemble de ces travaux. Cependant, trois directions de recherche marquent plus particulièrement l'originalité des travaux français :

- l'analyse structurale, à différentes échelles, des couvertures pédologiques contenant du calcaire : caractérisation macroscopique des horizons ; caractérisation, morphologie, organisation microscopique des constituants ; distribution, relations entre eux, verticalement et latéralement, des horizons et des caractères morphologiques ;
- les mécanismes de dissolution, de transfert, de précipitation des calcites ;
- les relations entre le calcaire et la plante.

L'ANALYSE STRUCTURALE DES SOLS CALCAIRES

Pendant de nombreuses années, les pédologues français travaillant dans des régions à sols calcaires se sont efforcés de les caractériser et de les comprendre à l'échelle du profil : il s'agissait de décrire la morphologie de profils de sols ; de caractériser leurs constituants ; de préciser leurs propriétés physiques et chimiques ; d'interpréter leur genèse ; de définir, à partir de ces données et interprétations, des types de sols que l'on classait et que l'on cartographiait. Ces travaux furent principalement menés dans deux types de milieux climatiques, milieu tempéré et milieu méditerranéen, et ceci, sauf exception, par des équipes différentes ayant relativement peu d'échanges entre elles sur le terrain. C'est ainsi que les sols calcaires furent étudiés selon deux filières longtemps

* Directeur général de l'ORSTOM, 24, rue Bayard, 75008 Paris - Ancien professeur de pédologie à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes.

considérées comme génétiquement différentes : celle des sols calcimagnésiques (rendzines, sols brun-calcaire, sols brun-calcaïque) et celle de l'ensemble des sols isohumiques, vertisols, sols fersialliques.

Depuis une quinzaine d'années, les préoccupations et les démarches se sont progressivement modifiées. Pédologues tempérés et pédologues méditerranéens se sont rapprochés et ils ont, les uns et les autres, un peu quitté le profil pour aller à la fois vers l'horizon et l'observation microscopique et vers l'étude des distributions latérales à l'échelle des paysages. Toute une série de travaux sur les constituants et sur les structures des sols contenant du calcium furent alors réalisés : si on situe ces travaux par rapport au contexte international, il apparaît que trois types de travaux et de résultats marquent l'originalité de la pédologie française de ces dernières années, en ce qui concerne l'analyse structurale des sols calcaires :

- la caractérisation macroscopique des horizons calcaires ;
- les distributions latérales de ces horizons : toposéquences et chronoséquences ;
- les types de cristallisation du carbonate de calcium, calcite et aragonite, dans les horizons pédologiques.

Caractérisation macroscopique des horizons calcaires

Pendant près de cinq années, de 1977 à 1981, un groupe de travail, ouvert à tous les pédologues français, s'est penché sur le problème des critères utilisables pour caractériser et classer les organisations macroscopiques des horizons calcaires.

Travaillant à partir des descriptions fournies par une trentaine de pédologues (environ 450 descriptions d'horizons concernant principalement la France, l'Afrique du Nord, le Moyen-Orient), le groupe a successivement mis au point, pour les horizons d'altération et de départ des carbonates, et pour les horizons d'accumulation :

- des fiches d'identification
- des caractères diagnostiques
- un inventaire des types d'horizons.

Les horizons d'altération et de départ du calcaire

En fonction de leur position dans le sol et en fonction de leur structure, il y a trois catégories d'horizons d'altération et de départ du calcaire :

- des horizons de surface dont la morphologie est directement influencée par la présence de la matière organique ;
- des horizons de profondeur à structure pédologique dominante ;
- des horizons de profondeur à structure lithologique dominante.

Les caractères morphologiques permettant, sur le terrain, de décrire ces horizons sont nombreux. Cependant, les critères d'usage courant permettant de distinguer et de cartographier les divers types d'horizons sont en fait peu nombreux. Le groupe de travail a, en définitive, retenu les caractères diagnostiques suivants :

- la couleur plus ou moins rouge (< 5 YR ; $= 5$ YR ; > 5 YR) ;
- la couleur plus ou moins claire et pure (clarté : $< 3,5$; $= 3,5 - 4$; > 4 ; pureté : $< 3,5$; $= 3,5 - 4$; ≤ 6) ;
- la présence ou non d'éléments grossiers carbonatés ;
- la teneur en calcaire et la distribution du calcaire dans la terre fine (très calcaire, peu calcaire, localement non calcaire, non calcaire, dolomitique) ;
- la structure, selon sa forme et sa taille (particulière, massive, arrondie, anguleuse, fine, grossière, prismatique, verticale, lamellaire) ;
- la texture (très fine, fine, grossière) ;
- la présence ou non de traits de redistribution d'argile ou de fer ;
- la présence ou non d'une structure d'origine lithologique charpentant l'ensemble de l'horizon.

Notons que, assez curieusement, le volume et la morphologie de la porosité n'ont pas pu, pour l'instant, être retenus comme critères diagnostiques, ceci parce qu'ils étaient en général mal décrits.

Enfin, le groupe a constaté que trois mesures chimiques simples permettent de préciser le diagnostic morphologique :

- le taux de carbone organique (< 1 % ; > 1 %) ;
- le pH ($< 6,5$; $> 6,5$; $> 8,5$) ;
- le rapport Ca/Mg du complexe adsorbant (< 3 ; > 3).

Les horizons d'accumulation de calcaire

Les horizons d'accumulation de calcaire n'ont été, pendant longtemps, reconnus et étudiés que dans les régions méditerranéennes. Beaucoup moins développés dans les régions tempérées et tropicales, ce n'est que depuis une quinzaine d'années qu'on découvre progressivement qu'ils y sont en fait fréquents.

Pour caractériser un horizon d'accumulation de calcaire, il faut y distinguer les deux termes principaux de sa morphologie :

- le calcaire accumulé ;
- le milieu d'accueil, c'est-à-dire le matériau, pédologique ou lithologique, au sein duquel se développe l'accumulation de calcaire.

Le travail le plus original fait, dans ce domaine, par les pédologues français concerne la caractérisation et la taxonomie des types d'accumulation de calcaire. Il a été ainsi reconnu que le calcaire accumulé peut être distribué et individualisé de trois façons différentes :

— Les distributions diffuses : le calcaire accumulé n'est présent que sous la forme de particules fines.

— Les concentrations discontinues : le calcaire est concentré d'une façon visible, en un certain nombre de points séparés les uns des autres par des zones moins calcaires à distribution diffuse, voire non calcaires. Les principales formes de ces concentrations discontinues sont les pseudo-myceliums, les revêtements, les amas friables, les nodules, les filons.

— Les concentrations continues : ce sont les encroûtements dans lesquels la concentration du calcaire est telle qu'elle fait disparaître les structures et les couleurs des sols ou des roches au sein desquels elle se développe. Les principaux types d'encroûtements sont :

- les encroûtements non feuilletés : ils peuvent être massifs ou nodulaires ;
- les encroûtements feuilletés : il peut s'agir de croûtes ou de dalles compactes ;
- les encroûtements rubanés.

Dans les régions tempérées, l'existence de toutes les formes d'accumulation de calcaire est maintenant de plus en plus souvent reconnue, avec comme originalité qu'elles y sont, beaucoup plus souvent qu'en milieu méditerranéen, plutôt présentes dans les horizons à structure lithologique, classiquement appelés horizons C : c'est,

certainement, ce qui a retardé la reconnaissance de leur présence.

Il faut, par ailleurs, signaler les nombreux travaux faits, depuis une vingtaine d'années, par les géologues français sur la présence dans les séries sédimentaires calcaires du Secondaire et du Tertiaire, de faciès comparables à ceux des accumulations calcaires des sols.

Les distributions latérales des horizons calcaires : toposéquences et chronoséquences

L'étude comparée des distributions verticales et latérales des formes d'accumulation de calcaire conduit aux constats suivants :

- Verticalement, du bas vers le haut, et latéralement, de l'amont vers l'aval d'un versant, les successions de faciès sont identiques : la concentration en calcaire augmente et, dans une série complète, on passe progressivement des distributions diffuses aux distributions discontinues, puis aux encroûtements qui sont successivement non feuilletés, puis feuilletés (fig. 1).

- De même, à l'échelle du Quaternaire, l'étude des accumulations calcaires en fonction de l'âge des sols, défini par les surfaces sur lesquelles ils se situent, montre la même succession de faciès, depuis les accumulations diffuses dans les sols les plus jeunes jusqu'aux croûtes et dalles dans les sols les plus anciens.

Les divers faciès d'accumulation de calcaire sont donc génétiquement liés ; ils le sont verticalement et latéralement, démontrant ainsi l'existence de transferts verticaux et latéraux ; ils le sont historiquement, les faciès aujourd'hui les plus différenciés, telles les croûtes et les dalles, ayant été auparavant des faciès moins différenciés (distributions diffuses, puis distributions discontinues, puis encroûtements non feuilletés).

Toposéquences et chronoséquences existent également au niveau des horizons d'altération et de départ et concernent essentiellement les teneurs en calcaire et les couleurs plus ou moins rouges. Il y a, entre les séquences d'altération et de départ et les séquences d'accumulation, de nombreuses relations dynamiques et chronologiques : les premières commandent les secondes, mais aussi, très souvent, se développent au détriment des secondes, ou bien encore, au contraire, se laissent envahir par elles, le tout pouvant être successif et alternatif.

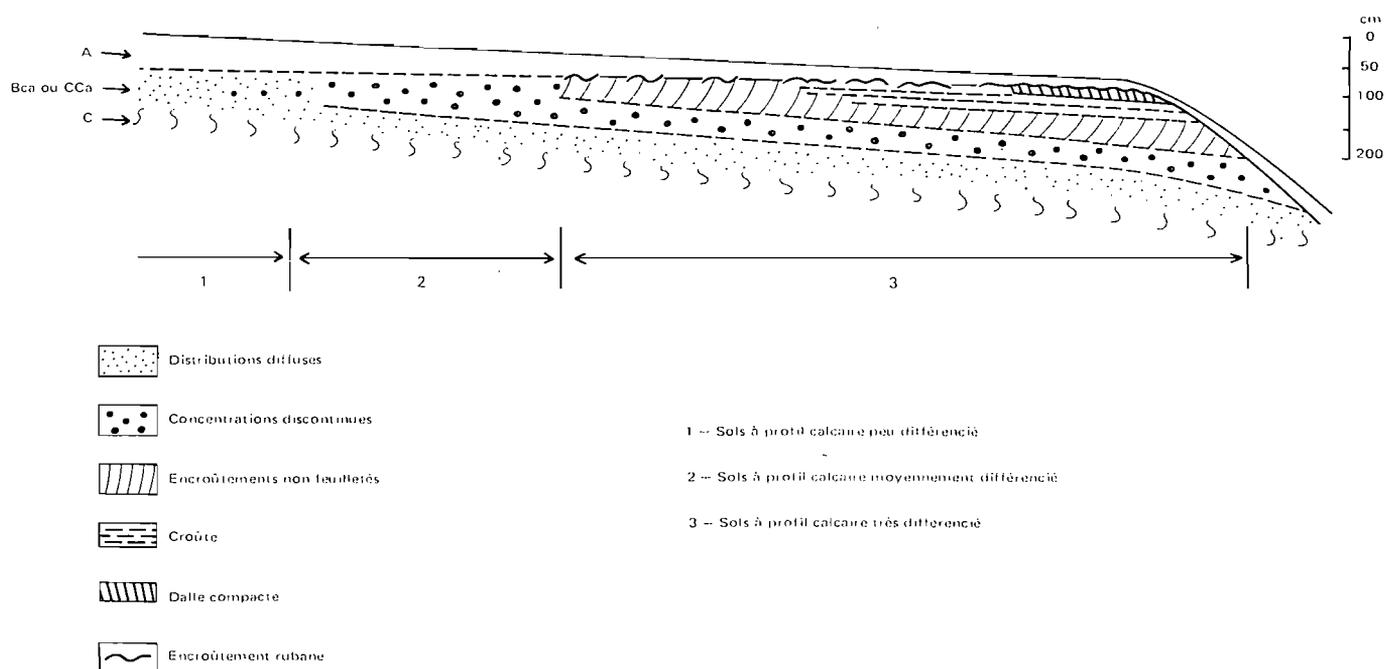


Fig. 1. — Les relations latérales et verticales entre les principaux types d'accumulation de calcaire (la longueur de la séquence est très variable : de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres) (RUELLAN, 1970)

Les horizons d'accumulation de calcaire, par leurs relations entre eux et par leurs relations avec les horizons d'altération et de départ, apparaissent donc comme étant le résultat d'un long processus, continu ou discontinu, d'apport de carbonate de calcium (et de magnésium) au sein d'une altérite ou d'un horizon à structure pédologique :

- la provenance du calcaire est fréquemment latérale, par migration sur et dans la couverture pédologique ;

- les horizons d'accumulation peuvent, à partir d'un milieu d'accueil qui est souvent peu ou non calcaire, atteindre des teneurs en carbonate de calcium supérieures à 90 %, et ceci sans modification des volumes : ceci implique des phénomènes de remplacement des minéraux préexistants par le calcaire ; les travaux conjoints d'analyse structurale macroscopique et microscopique et de géochimie, menés par des géologues et des pédologues français, ont montré qu'il s'agissait bien de phénomènes de remplacement isovolume, c'est-à-dire d'une épigénie.

L'accumulation pédologique du calcaire est donc un puissant mécanisme d'altération : elle transforme, remplace toutes les roches, tous les minéraux. Dans les régions calcaires arides et semi-

arides, où ce mécanisme est très généralisé, il est un facteur d'homogénéisation des matériaux superficiels et, par voie de conséquence, des reliefs (formation de surfaces identiquement aplanies sur des roches très différentes les unes des autres).

Les types de cristallisation du carbonate de calcium, calcite et aragonite, dans les horizons pédologiques

Depuis une quinzaine d'années, les observations microscopiques et ultra-microscopiques, accompagnées d'analyses chimiques détaillées, des divers types d'accumulation de calcaire, se sont multipliées.

Si on situe, dans ce domaine, les travaux français par rapport aux travaux menés dans d'autres pays, trois contributions marquent plus particulièrement l'originalité des recherches françaises :

1) L'étude de la genèse, dans les encroûtements calcaires des pays arides, de phyllosilicates fortement magnésiens (attapulgite principalement)

et de calcite magnésienne. Dans ces conditions arides, l'attapulgite est géochimiquement plus stable que les silicates primaires ; elle est cependant moins stable que la calcite qui peut la remplacer.

2) La mise en évidence des phénomènes d'épigénie par la calcite, déjà cités ci-dessus (§ I-B) : sur différents types de roches (granites, gneiss, quartzite, marne, dolomie...) et sous divers climats (tropical soudanien et sahélien ; désertique ; méditerranéen aride, semi-aride et sub-humide), on observe la dissolution et le remplacement par la calcite de tous les minéraux primaires (quartz, feldspath, micas, amphiboles, dolomie...) et secondaires (argiles, hydroxydes) (fig. 2). L'épigénie des minéraux primaires est souvent précédée par une argilisation donnant naissance à des attapulgite, montmorillonite, illite-séricite. Les conditions de cette épigénie ont été vérifiées et précisées expérimentalement : il s'agit bien d'un phénomène, alternatif et répétitif, de dissolution des silicates, dans des conditions de pH très élevés créés par la calcite, puis de précipitation de calcite dans les vides laissés par la dissolution.

3) L'étude détaillée des calcites en aiguille :

- morphologie et cristallogénèse de ces calcites toujours liées à des environnements poreux : ce sont des monocristaux, à bords lisses ou à bords dentelés, s'interprétant en termes de croissance cristalline ; l'environnement chimique (présence ou non de composés organiques ou d'ions étrangers tel Mg^{++}) et climatique de la formation des aiguilles est très varié : il s'agit cependant toujours d'environnements contrastés où les précipitations se font par sursaturation rapide en $Ca CO_3$ des solutions, les sursaturations pouvant avoir pour origine l'évaporation, la succion racinaire, la cryodessiccation, etc.

- étapes préalables à la formation des calcites en aiguilles : il y a successivement formation de carbonate de calcium amorphe, puis d'une calcite désordonnée, puis d'aragonite fibreuse qui se transforme elle-même en calcite aiguille, l'étape aragonite n'étant cependant pas indispensable : sa présence, liée à celle de composés organiques, s'observe dans des échantillons prélevés en période de forte activité biologique ; les calcites en aiguilles sont ensuite incorporées au plasma calcitique par le jeu des successions de dissolutions et précipitations qui caractérisent le phénomène de l'encroûtement calcaire.

LES MECANISMES DE DISSOLUTION, DE TRANSFERT, DE PRECIPITATION DES CALCITES

Entreprise depuis une vingtaine d'années, l'étude des mécanismes de dissolution, de transfert et de précipitation des calcites dans les sols fut effectuée selon trois démarches :

- observation morphologique des calcites, et des structures auxquelles elles participent, en fonction des conditions physico-chimiques et biologiques ;

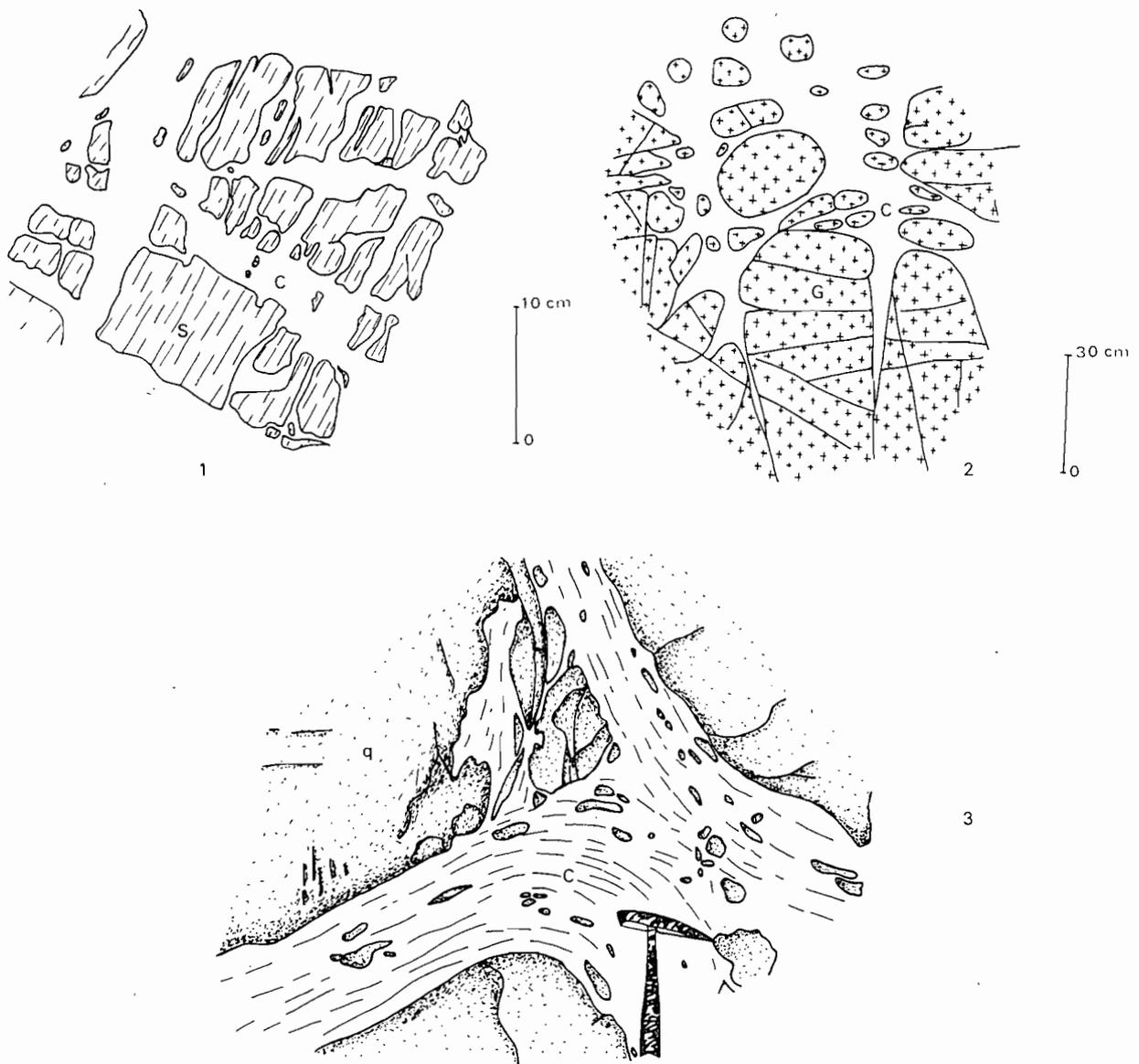
- suivi « in situ », dans des sols en place ou sur des monolithes non perturbés, des variations physiques et chimiques des phases liquides et gazeuses ;

- expérimentation en colonne sur matériau de sol calcaire.

Les principaux résultats récents de ces travaux peuvent être ainsi résumés :

1) L'évolution des fractions carbonatées des sols suit un rythme qui est réglé par la dynamique de l'eau, cette dynamique étant elle-même conditionnée par les variations, quotidiennes, saisonnières, interannuelles du climat, de l'activité biologique, des systèmes de porosité. Cette évolution est donc cyclique, selon des cycles emboîtés.

2) La dissolution de la calcite s'effectue dès la surface du sol. Elle est principalement conditionnée par le gaz carbonique, les nitrates, les flux hydriques. L'activité biologique, végétale et animale, la décomposition de la matière organique, les variations climatiques de pluviosité et de température, les variations morphologiques des systèmes poreux du sol, jouent donc des rôles clés dans les phénomènes de dissolution. On a ainsi pu mettre en évidence les variations de la dissolution de la calcite selon que l'on est sous gazon (rôle important du CO_2 , mais aussi des composés organiques solubles et des sulfates), sous forêt (rôle majeur des nitrates et des composés organiques), sous sol nu (rôle majeur des nitrates et du CO_2) ; mais aussi selon que l'on est en milieu plus ou moins riche en calcaire (rôle variable du pH et de la nature de la calcite) et plus ou moins riche en certains minéraux argileux : il semble en effet que la nature physique des phases solides, calcites et argiles, contrôle la solubilité de la calcite. Il a été par ailleurs montré qu'en milieu calcaire la désilicification est simultanée, quoique beaucoup plus lente, que la décarbonatation. Signalons enfin les travaux menés



- 1 — Schistes verts de la série d'Anzi (30 km E de Tiznit). Epigénie calcaire en grille des schistes (S). L'orientation des fragments et de la schistosité est conservée. Les reliques conservées dans les faux filons de calcaire (C) n'ont pas tourné.
- 2 — Granite de Messti (environs d'Ifni). Réseau de diaclases délimitant des files de polyèdres de granite (G). Epigénie calcaire des polyèdres, remplacés par la calcite (C) sur leurs flancs et leurs "coins". On parvient à des boules de granite dans l'encroûtement.
- 3 — Quartzites de Bou Izakarne. Epigénie calcaire de polyèdres de quartzite (q) attaqués par leurs flancs et leurs "coins". Les reliques de quartzite ont conservé leur orientation d'origine dans une matrice calcaire orientée (C) selon les fissurations successives.

Fig. 2 — Quelques exemples d'épigénie dans les horizons d'accumulation de calcaire (MILLOT et al., 1977)

sur les relations entre les calcites et les constituants organiques de certains sols calcaires, ces travaux étant cependant plus tournés vers la caractérisation des produits organiques que vers celle des calcites.

3) La reprécipitation de la calcite est due en partie au dégazage des solutions. Elle résulte cependant surtout de la concentration de la solution par évapotranspiration : l'intensité de l'évapotranspiration commande l'abondance des néoformations et leur localisation qui peut, à certaines périodes de l'année, être très proche de la surface du sol.

On a pu, dans certains cas, préciser les conditions de formation de certaines néoformations récentes et actuelles : en pays tempéré, les nodules polycristallins transparents se forment lentement, en équilibre avec la solution, par évaporation de la solution de mai à octobre (température du sol de 1°C à 25°C). En revanche, les aiguilles résulteraient d'une cristallisation rapide hors de l'équilibre isotopique : elles se formeraient en été, sous l'influence d'une évapotranspiration intense ; elles sont toujours très récentes, donc régulièrement renouvelées (fig. 3).

Il a enfin été montré expérimentalement que les niveaux d'accumulation de calcaire se forment de façon discontinue, dans le temps et dans l'espace : la géométrie de l'espace poreux joue un rôle clé, par son influence sur la diffusion du gaz carbonique en milieu insaturé d'eau, et par l'existence de discontinuités (sites d'accueil).

RELATIONS ENTRE LE CALCAIRE ET LA PLANTE

Deux axes de recherches ont été abordés dans le cadre de l'étude des relations sols-plantes en milieu calcaire :

- Le rôle des racines, et plus généralement de l'activité biologique, dans l'évolution et la dynamique des carbonates du sol. Par leur fonction d'excrétion et d'absorption des éléments, les racines, et d'une manière générale les cellules végétales, sont capables soit de dissoudre activement les carbonates, soit de les concentrer dans leurs vacuoles ou sur les parois. Nous avons évoqué ce sujet dans le paragraphe précédent. Parmi les travaux les plus récents, signalons encore la démonstration qui vient d'être faite du rôle des racines dans la néogénèse des sables calcaires : la calcification des cellules des racines est à l'origine de sables « cytomorphes » qui constituent jusqu'au

quart de la phase du sol au voisinage de la surface.

- Le rôle des structures et du fonctionnement hydrique du sol sur le fonctionnement de la plante, et en particulier sur la manifestation du phénomène de chlorose : les travaux français les plus récents démontrent les relations étroites qui existent entre ces phénomènes de chlorose d'une part, l'organisation morphologique des sols aux différentes échelles d'autre part. En particulier : la morphologie des systèmes poreux, qui intervient sur les dynamiques hydriques verticales et latérales ; la nature plus ou moins calcitisée, et selon des formes diverses, des parois des vides qui sont en contact direct des racines ; la morphologie des surfaces des particules calcaires ; les divers types de cristallisation de la calcite ; tous ces aspects doivent être maintenant pris en compte si l'on souhaite comprendre les incohérences des relations chlorose-« calcaire actif ».

EN GUISE DE CONCLUSION : QUEL AVENIR POUR LA RECHERCHE FRANÇAISE SUR LES SOLS CALCAIRES

Les succès récents des chercheurs français qui étudient conjointement, en milieu calcaire, les morphologies aux différentes échelles spatiales, les variations de ces morphologies aux différentes échelles de temps, les dynamiques plus ou moins rapides des dissolutions, transferts, précipitations en fonction des structures des systèmes poreux, de constituants ; qui étudient aussi le rôle des facteurs biologiques sur l'ensemble des mécanismes des milieux calcaires ; ces succès tracent la voie.

Le sol calcaire, du fait du comportement chimique et minéralogique du calcaire, du fait en particulier de la rapidité des phénomènes de dissolution et de précipitation, est un objet de choix pour avancer dans la compréhension des mécanismes d'organisation et de transfert dans les sols.

Le milieu pédologique se définit d'abord par l'organisation de ses constituants, c'est-à-dire par ses structures dont il faut comprendre les origines et les futurs, et en fonction desquelles on doit mesurer et comprendre les propriétés et les fonctionnements physico-chimiques ainsi que les comportements biologiques. L'avenir est dans cette démarche de pédologie « intégrée » : les sols calcaires, à cinétique rapide, facilitent la réalisation de cette démarche.

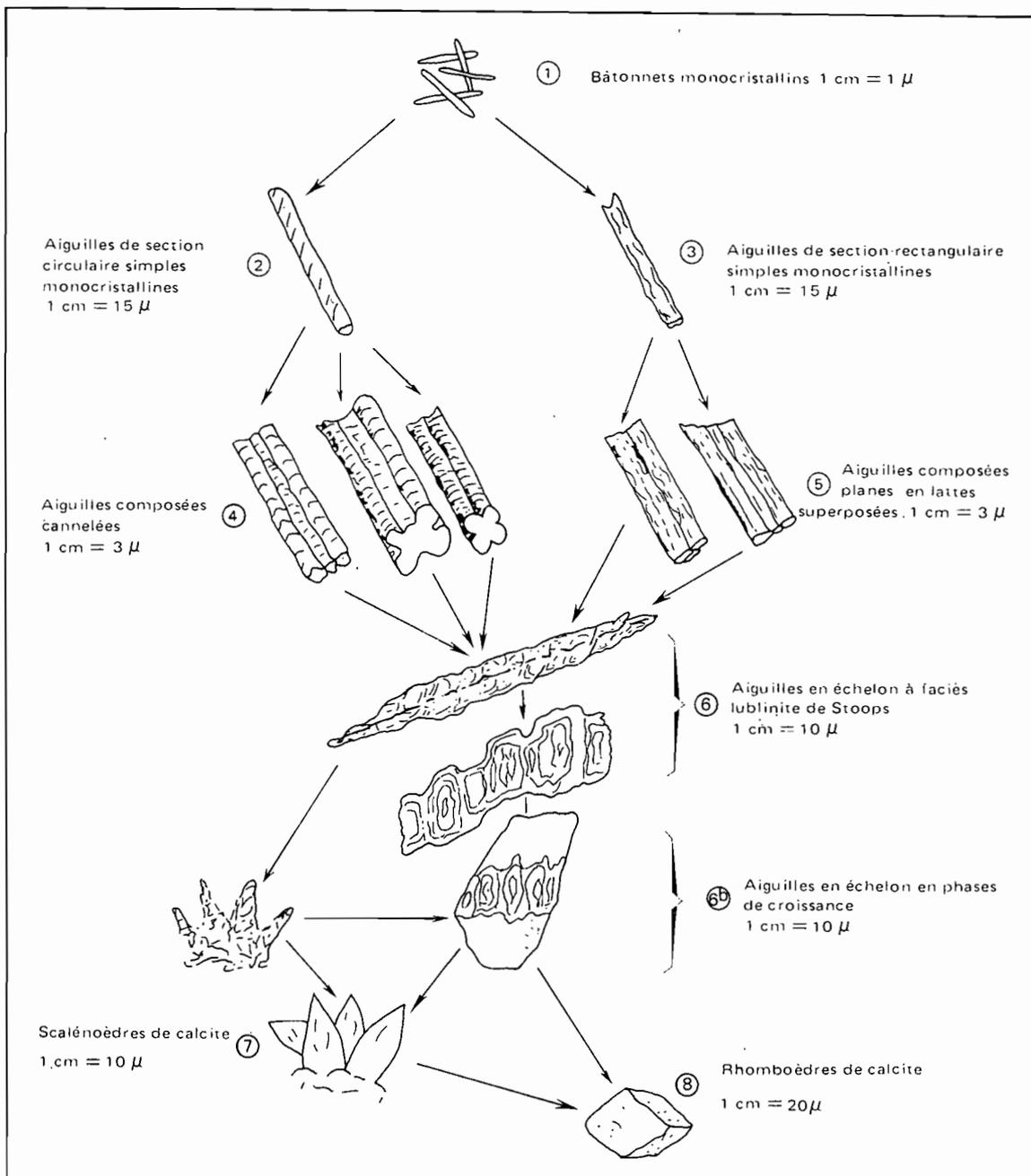
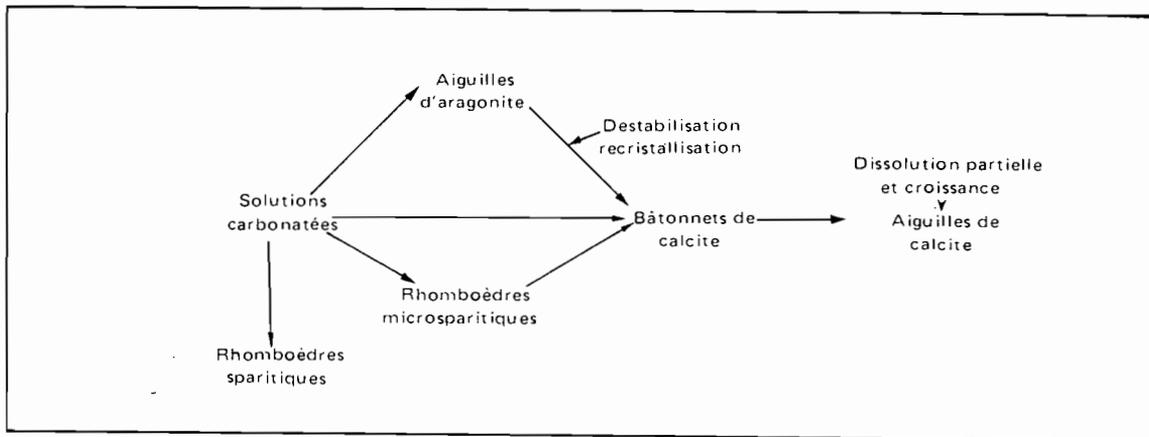


Fig. 3. — Exemples de séquences évolutives de cristallisations de carbonates dans les sols (BUTEL, 1982)

BIBLIOGRAPHIE

- ADOLPHE J.P. - 1972 - Obtention d'encroûtements carbonatés par gel expérimental. C.R. Acad. Sc., 274, pp. 1139-1142.
— 1975 - Rôle des microorganismes dans les concrétionnements calcaires continentaux. C.R. Coll. types de croûtes calcaires et leur répartition régionale. Strasbourg, pp. 71-75.
- AUBERT G. - 1947 - Les sols à croûtes calcaires. Conf. Pédolog. méditer., Montpellier-Alger, pp. 330-332.
— 1960 - Les sols de la zone aride, étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation. Actes Coll. UNESCO de Paris sur les problèmes de la zone aride, pp. 127-150.
- BEAUDET G., MAURER G., RUELLAN A. - 1967 - Le Quaternaire marocain : observations et hypothèses nouvelles. Rev. Géogr. phys. Géol. dyn., IX, 4, pp. 269-309.
- BONNEAU M., SOUCHIER B. - 1979 - Pédologie. 2 : constituants et propriétés du sol. Masson, Paris, 459 p.
- BONVALLOT J., DELHOUME J.P. - 1978 - Etude de différentes accumulations carbonatées d'une toposéquence du Centre tunisien. 103^e Congrès national des sociétés savantes, Nancy. Sciences, fasc. IV, pp. 281-292.
- BORNAND M. - 1978 - Altération des matériaux fluvio-glaciaires, genèse et évolution des sols sur terrasses quaternaires dans la moyenne vallée du Rhône. Thèse univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 329 p.
- BOTTNER P. - 1972 - Evolution des sols en milieu carbonaté. La pédogenèse sur roches calcaires dans une séquence méditerranéo-alpine du sud de la France. Thèse univ., Strasbourg, Sci. géol., Mém. 37, 155 p.
- BOULAIN J. - 1957 - Les sols des plaines du Chélif. Thèse univ., Alger. S.E.S., 582 p.
— 1961 - Sur le rôle de la végétation dans la formation des carapaces calcaires méditerranéennes. C.R. Ac. sci., 253, pp. 2568-2570.
— 1966 - Sur les relations entre les carapaces calcaires et les sols isohumiques de climat xérothermique. Science du sol, 1, pp. 3-14.
— 1978 - Les sols calcaires. Cah. ORSTOM, série Pédol., vol. XVI, n° 3, pp. 265-291.
— 1982 - Typologie pédologique. Bull. Dép. Sols INAPG, n° 9.
- BOULET R. - 1974 - Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta : équilibres dynamiques et bioclimats. Thèse univ., Strasbourg, Mémoire ORSTOM n° 85, 272 p.
- BRESSON L.M. - 1974 - Rubéfaction récente en climat tempéré humide. Thèse de 3^e cycle, Univ. Paris VI et INAPG.
- BUTEL P. - 1982 - Formes et mécanismes de l'accumulation carbonatée dans les sols de la plaine poitevine. Thèse de 3^e cycle, n° 871, Univ. Poitiers, 123 p.
- CABIDOUCHE Y.M. - 1979 - Contribution à l'étude des sols de haute montagne. Analyse des relations sols-milieu dans les Pyrénées-Orientales cristallines et calcaires. Thèse doctorat 3^e cycle Agronomie-Pédologie, Montpellier, 160 p. et annexes.
- CALLOT G. - 1970 - Etude pédologique du bassin de la Charente non domaniale. INRA, Service d'Etude des Sols, Montpellier, 195 p.
— 1976 - Analyse d'un système géo-pédologique régional : étude sédimentologique et cartographique des sols et formations superficielles sur plateforme calcaire peu déformée (région Nord-Aquitaine). Thèse doctorat ès sciences, Montpellier, 107 p. et planches : l'atlas.
— 1981 - Modification des microstructures du sol dans l'environnement racinaire. C.R. 6^e Intern. Working Meeting Micromorphology, Londres, 1981.
- CALLOT G., CHAMAYOU H., DUPUIS M. - 1978 - Variations du pH de la solution de matériaux calcaires en relation avec la dynamique de l'eau. Eléments d'analyse d'un système carbonaté. Ann. Agron., Vol. 29 (1), pp. 37-57.
- CALLOT G., CHAMAYOU H., MAERTENS C., SALSAC L. - 1983 - Mieux comprendre les interactions sols-racines ; incidence sur la nutrition minérale. INRA, 325 p.
- COMMISSION DE PEDOLOGIE ET DE CARTOGRAPHIE DES SOLS, CPCS - 1967 - Classification des sols. Lab. de Péd.-Géol. de l'ENSA de Grignon, multigr., 87 p.
— 1977-1981 - Travaux du groupe de travail sur la caractérisation et la classification des organisations, des horizons et des sols calcaires (groupe animé par A. RUELLAN).
- CRAHET M. - 1967 - Le pH des sols calcaires. Bull. Assoc. fr. Et. Sol, 4, pp. 17-34.
- CROS P., FREYTET P. - 1981 - Sédimentologie. Importance paléogéographique des croûtes calcaires et siliceuses continentales, en place et remaniées, dans le Carnien des Alpes italiennes méridionales. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 292 (2 mars 1981), n° 9, série II, pp. 737-740.
- CROUZEL F., MEYER R. - 1975 - Encroûtements calcaires dans l'Oligo-Miocène du bassin d'Aquitaine. C.R. Soc. Géol. fr., 1975, XVII, 4, pp. 112-114.
- DELHOUME J.P. - 1980 - L'épigénie calcaire en milieu méditerranéen semi-aride (Djebel Semmama, Tunisie centrale). Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates. Univ. de Bordeaux III, C.R. pp. 163-171.
- DEVER L., DURAND R., FONTES J.C., VACHIER P. - 1982 - Géochimie et teneurs isotopiques des systèmes saisonniers de dissolution de la calcite dans un sol sur craie. Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 46, pp. 1947-1956.
— 1983 - Etude pédogénétique et isotopique des néoformations de calcite dans un sol sur craie. Caractéristiques et origines. Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 47, pp. 2079-2090.
- DUCHAUFOR P. - 1983 - Pédogenèse et classification. Masson, Paris, 491 p.
- DUCLOUX J., BUTEL P. - 1981 - Micromorphology of calcretes in a slope deposit in the Poitevine Plain, France. C.R. 6^e Intern. Working Meeting Micromorphology, Londres, 1981.
- DUCLOUX J., DUPUIS T., BUTEL P., NAHON D. - 1984 - Carbonates de calcium amorphe et cristallisés dans les encroûtements calcaires des milieux tempérés. Comparaison des séquences minérales naturelles et expérimentales. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 298, série II, n° 4, pp. 147-149.
- DUMONT J.L. - 1975 - Les croûtes calcaires. Présentation, de modèles expérimentaux. C.R. Acad. Sci., série D, t. 280, p. 2073.
— Les croûtes calcaires ; cimentation de sable par dépôt de calcaire. C.R. Coll. Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale, Strasbourg, pp. 65-70.
— 1980 - Sur la solubilité du calcaire d'un sol. Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates. Univ. de Bordeaux III, C.R. pp. 173-179.
— Cimentation artificielle de sable par du calcaire. Utilisation de la radiographie X comme méthode d'observation non destructive. Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates. Univ. de Bordeaux III, C.R. pp. 181-187.
— 1983 - Etude expérimentale de la précipitation de carbonate de calcium dans du sable. Revue de l'Institut Français du Pétrole, vol. 38, n° 1, pp. 35-61.
- DUMONT J.L., BONVALLOT J., DELHOUME J.P. - 1983 - Etude expérimentale de la mobilisation des carbonates sur un sol calcaire. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XX, 1, pp. 3-25.
- DURAND J.H. - 1953 - Etude géologique, hydrologique et pédologique des croûtes en Algérie. Thèse univ., Alger. SES, 209 p.
— 1959 - Les sols rouges et les croûtes en Algérie. SES, Alger, 188 p.
— 1963 - Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie : formation et âge. Bull. Soc. Géol. France (7), 5, pp. 959-968.

- DURAND R. - 1979 - La pédogenèse en pays calcaire dans le Nord-Est de la France. Thèse univ., Strasbourg. Sci. Géol., Mém. 55, 198 p.
- La dissolution de la calcite et le transfert du calcium en milieu crayeux. Migrations organo-minérales dans les sols tempérés. Nancy, Coll. Intern. CNRS, pp. 383-392.
 - 1980 - L'évolution d'une rendzine encroûtée sur la craie de Champagne. Science du Sol (3), pp. 201-216.
 - Variations saisonnières de la concentration des solutions et des gaz du sol en milieu crayeux. Science du Sol (3), pp. 217-230.
- DURAND R., DUTIL P. - 1971 - Premiers résultats sur l'altération expérimentale de roches calcaires et dolomitiques. Ann. Agron., 1971, vol. 22 (4), pp. 397-424.
- 1972 - Contribution à l'étude de l'évolution des sols en milieu calcimagnésique. Science du Sol, n° 1, pp. 25-36.
- ELLOY R., THOMAS G. - 1981 - Dynamique de la genèse des croûtes calcaires (calcrètes) développées sur séries rouges pléistocènes en Algérie nord-occidentale. Contexte géomorphologique et climatique. Pétrographie et géochimie. Bull. Centres de Recherches Exploration. Production Elf-Aquitaine, vol. 5, 1, pp. 53-112.
- FEDOROFF N. - 1961 - Les croûtes et les encroûtements calcaires dans le Midi méditerranéen français. Rev. Géogr. phys. Géol. dyn., IV, 1, pp. 43-49.
- 1975 - Classification micromorphologique des carbonates dans les sols. Colloque Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale, Strasbourg, pp. 35-40.
- FREYTET P. - 1971 - Paléosols résiduels et paléosols alluviaux hydromorphes associés aux dépôts fluviaux dans le Crétacé supérieur et l'Eocène basal du Languedoc. Rev. Géogr. phys. Géol. dyn., 13, pp. 245-268.
- FREYTET P., PLAZIAT J.C. - 1978 - Les redistributions pédogénétiques (nodules, croûtes, « calcrètes ») : les deux types principaux d'environnements favorables à leur développement. C.R. Acad. Sci., Paris, série D, t. 286, pp. 1775-1778.
- GAUCHER G. - 1947 - Les sols rubéfiés et les sols à croûtes du Bas-Chélif et des basses plaines oranaises (régions d'Inkermann, de Relizane, de Perregaux et de Saint-Denis du Sig). C.R. Acad. Sci., 225, pp. 133-135.
- 1948 - Sur certains caractères des croûtes calcaires en rapport avec leur origine. C.R. Acad. Sci., Paris, 227, pp. 154-156.
 - Sur quelques conditions de formation des croûtes calcaires. C.R. Acad. Sci., Paris, 227, pp. 215-217.
- GRAS F. - 1975 - Les sols très calcaires du Liban Sud ; évolution et mise en valeur. Thèse Doct. Ing., Strasbourg, Multigr., 210 p.
- HALITIM A., ROBERT M., BERRIER J. - 1981 - A microscopy study of quartz evolution in arid areas. Soil micromorphology, 2, pp. 615-621.
- 1983 - Etude expérimentale de l'interaction de la calcite et du gypse avec la montmorillonite. Conséquences sur le rôle de ces deux minéraux dans le comportement de matériaux argileux et l'amendement des sols. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 296, série II, pp. 1459-1464.
- HALITIM A., ROBERT M., PEDRO G. - 1983 - Etude expérimentale de l'épigénie calcaire des silicates en milieu confiné ; caractérisation des conditions de son développement et des modalités de sa mise en jeu. Actes du Colloque International de Pétrologie. CNRS, Paris, 1983 (sous presse).
- INRA Maroc - 1966 - Congrès de Pédologie méditerranéenne. Excursion au Maroc. Livret-guide. Cah. Rech. agron., 24, 380 p., et 25, 327 p.
- JACQUIN F., CHOULIARAS N. - 1976 - Evolution de la matière organique dans une rendzine et son interférence sur une classification génétique des humus. Bull. Ass. Franç. Et. des Sols, 1976, n° 4, pp. 241-246.
- JACQUIN F., MALLOUHI N., SCHIAVON M. - 1979 - Quantification d'une recarbonatation biologique. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 288, série D, pp. 1279-1282.
- JAILLARD B. - 1980 - Fonctionnement hydrique d'un sol carbonaté. Incidences sur la chlorose ferrique. Thèse de 3^e cycle, Montpellier, INRA, 132 p.
- 1982 - Relation entre dynamique de l'eau et organisation morphologique d'un sol calcaire. Sci. du Sol, 1, pp. 31-52.
 - 1983 - Mise en évidence de la calcitisation des cellules corticales de racines de Graminées en milieu carbonaté. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 297, série II, pp. 293-296.
 - 1984 - Mise en évidence de la néogenèse de sables calcaires sous l'influence des racines : incidence sur la granulométrie du sol. Agronomie, 4 - 1, pp. 91-100.
- JUSTE C., POUGET R. - 1982 - Appréciation du pouvoir chlorosant des sols par un nouvel indice faisant intervenir le calcaire actif et le fer facilement extractible. Applications au choix des porte-greffes de la vigne. C.R. Acad. d'Agri., 58, pp. 352-357.
- LAMOUREUX M. - 1972 - Etude de sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse fersiallitique au Liban. Thèse univ. Strasbourg, Mém. ORSTOM, n° 56, 266 p.
- LANG J., LUCAS G. - 1975 - Contribution de l'étude pétrographique à l'analyse de quelques croûtes de la région de Bamyán (Afghanistan central). Colloque Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale, Strasbourg, pp. 14-17.
- LEPRUN J.C., MARIUS J.C., PERRAUD E. - 1976 - Caractérisation de la pédogenèse durant le dernier millénaire sur les amas coquilliers des îles du Saloum (Sénégal). ASEQUA Bull. Liaison, Sénégal, n° 49, pp. 13-25.
- MATHIEU C. - 1978 - Influence de l'irrigation sur l'évolution de quelques caractères fondamentaux des sols argileux des plaines du Maroc oriental. Science du Sol (2), pp. 95-112.
- MAUCORPS J., GIRARD M.C. - 1976 - Essai de classement de sols calcaires par traitement statistique. Comparaison avec la classification française. Pédologie, XXVI, 3, pp. 225-254.
- MENILLET F. - 1975 - Niveaux calcaires finement rubanés en milieu continental, hydromorphe et confiné, à paléogéographie simple ; l'exemple des calcaires de Beauce (Stampien supérieur, Aquitainien du Bassin de Paris). C.R. Coll. Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale, Strasbourg, pp. 18-21.
- MILLOT G., PAQUET H., RUELLAN A. - 1969 - Néof ormation de l'attapulgitite dans les sols à carapaces calcaires de la Basse Moulouya (Maroc oriental). C.R. Acad. Sci. (Paris), D 268, pp. 2771-2774.
- MILLOT G., NAHON D., PAQUET H., RUELLAN A., TARDY Y. - 1977 - L'épigénie calcaire des roches silicatées dans les encroûtements carbonatés en pays subaride. Anti-Atlas, Maroc, Sci. Géol., Bull., 30, pp. 129-152.
- MOREAU R. - 1980 - Matériaux superficiels et paléogenèse dans la région de Marrakech (Maroc). Trav. et Doc. ORSTOM, n° 139, 273 p.
- MORLAT R., DUPONT J., SALETTE J. - 1980 - Aspects écologiques de la manifestation de la chlorose ferrique en année sèche, chez la vigne, dans les sols calcaires de la moyenne vallée de la Loire. Ann. Agron., 31 (2), pp. 219-238.
- MULLER J.C., VEDY J.C. - 1978 - Morphoscopie et fractionnement des matières organiques des rendzines sur craie. Bull. Ass. Franç. Et. des Sols, 1978, n° 2, pp. 129-144.
- NAHON D. - 1976 - Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : géochimie, structures, relais et coexistence. Thèse univ. Marseille, Sci. Géol. Mém., 44, 232 p.
- NAHON D., DUCLOUX J., BUTEL P., AUGAS G., PAQUET H. - 1980 - Néof ormation d'aragonite, première étape d'une

- suite minéralogique évolutive dans les encroûtements calcaires. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 291, série D, pp. 725-727.
- NAHON D., PAQUET H., RUELLAN A., MILLOT G. - 1975 - Encroûtements calcaires dans les altérations des marnes éocènes de la falaise de Thiès (Sénégal). Organisation morphologique et minéralogique. Sci. Géol. Bull., 28, 1, pp. 29-46.
- PAQUET H. - 1969 - Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées. Thèse Sci., Strasbourg, Sci. Géol., Mém. n° 30, 210 p.
— 1983 - Stability, instability and significance of attapulgite in the calcretes of Mediterranean and tropical area with marked dry season. Actes du Colloque de Pétrologie. CNRS, Paris, juillet 1983 (sous presse).
- PEDRO G. - 1968 - Contribution expérimentale à l'étude du rôle du calcaire dans l'évolution géochimique des sols. 9^e Congrès Intern. de Sci. du Sol, vol. IV, pp. 511-522.
— 1970 - Sur l'altération des matériaux calcaires en conditions « latéritiques » : étude expérimentale de l'évolution d'une marne illitique. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 270, série D, pp. 36-38.
— 1972 - Les sols développés sur roches calcaires. Nature, originalité et cadre général de leur évolution à la surface du globe. Bull. Assoc. Fr. Etud. Sol, Sci. Sol, numéro spécial, pp. 5-18.
- PLET-LAJOUX C. - 1971 - Recherches expérimentales sur la formation des encroûtements calcaires. Bull. Ass. Fr. Etud. Sol, n° 5, pp. 7-10.
- POUGET M. - 1980 - Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. Trav. et Doc. ORSTOM, 116, 555 p.
— Les sols à croûte calcaire dans les steppes algériennes : quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XVIII, n° 3-4, pp. 235-246.
- POUGET M., RAMBAUD D. - 1980 - Quelques types de cristallisation de calcite dans les sols à croûte calcaire (steppes algériennes). Apport de la microscopie électronique. Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates. Univ. Bordeaux III. C.R. pp. 371-378.
- QUANTIN P., TEJEDOR SALGUERO M.L., FERNANDEZ CALDAS E. - 1977 - Climato-séquence de la région méridionale de l'île de Ténérife (Iles Canaries). 1^{re} partie : Ecologie, morphologie, caractéristiques physico-chimiques. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XV, n° 4, pp. 391-407.
- QUANTIN P., FERNANDEZ CALDAS E., TEJEDOR SALGUERO M.L. - 1978 - Séquence climatique des sols récents de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canaries). 2^e partie : Caractéristiques minéralogiques. Interprétation et classification. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XVI, n° 4, pp. 397-412.
- REVEL J.C. - 1982 - Formation des sols sur marnes. Etude d'une chronoséquence et d'une toposéquence complexe dans le Terrefort toulousain. Thèse INP ENSAT, Toulouse, 250 p.
- RICHE G., RAMBAUD D., RIERA M. - 1982 - Etude morphologique d'un encroûtement calcaire. Région d'Irecê, Bahia, Brésil. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XIX, 3, pp. 257-270.
- ROBERT M., VENEAU G., BERRIER J. - 1980 - Action des composés organiques sur la dissolution des carbonates. Science du Sol, n° 3, pp. 231-245.
— Solubilité comparée des silicates, carbonates et hydroxydes en fonction des conditions du milieu. Bull. Min. 103, pp. 324-329.
- RUELLAN A. - 1970 - Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes : les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse-Moulouya (Maroc oriental). Thèse univ., Strasbourg, Mém. ORSTOM, 54, 302 p.
— 1976 - Synthèse et perspectives : migrations et accumulations des carbonates. Bull. Soc. Géol. France, 7^e série, t. XVIII, pp. 41-44.
— 1980 - L'accumulation du calcaire dans les sols. Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates. Univ. Bordeaux III. C.R. pp. 401-411.
- RUELLAN A., BEAUDET G., NAHON D., PAQUET H., ROGNON P., MILLOT G. - 1979 - Rôle des encroûtements calcaires dans le façonnement des glacis d'ablation des régions arides et semi-arides du Maroc. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 289, série D, pp. 619-622.
- SALSAC L. - 1980 - L'absorption du calcium par les racines des plantes calcicoles ou calcifuges. Science du Sol (1), pp. 45-77.
- TEDALDI B. - 1982 - Analyse statistique des horizons calcaires en vue de leur classification. Sols, INAPG, 6, pp. 87-94.
- TRUC G. - 1975 - Sols à profil calcaire différencié et pellicules rubanées dans le Paléogène du sud-est de la France. C.R. Coll. Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale, Strasbourg, pp. 108-113.
- VALLERON M.M., DULAU N., POURZAED P., SAUGRIN T. - 1983 - Calcitisations et opalitisations dans l'Eocène du sud-est de la France. Comparaison avec des faciès analogues d'Alsace et de Touraine. Bull. Soc. Géol. France (7), t. XXV, n° 1, pp. 11-18.
- VAUDOUR, CLAUZON - 1976 - Les croûtes calcaires ont-elles toutes une origine pédologique ? Méditerranée 1976, n° 1.
- VERGES V. - 1982 - Contribution à l'analyse et à la représentation cartographique des formations pédologiques en moyenne montagne calcaire (Mont Ventoux, France). Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VII, 226 p.
- VERGES V., MADON M., BRUAND A., BOCOQUIER G. - 1982 - Morphologie et cristallogénèse de microcristaux supergénés de calcite en aiguilles. Bull. Minéral., 105, pp. 351-356.
- VOGT T. - 1975 - Croûtes calcaires et sols rouges en France méditerranéenne : trois exemples. Recherches géomorphologiques n° 12, pp. 13-23.
— 1982 - Sur la présence d'algues d'eau douce dans une croûte calcaire quaternaire d'Afrique du Nord. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 295, série II, pp. 703-707.
— 1983 - Types et genèse de croûtes calcaires : France méditerranéenne, Afrique du Nord. Thèse univ. Pierre-et-Marie-Curie, Paris.
- WILBERT J. - 1962 - Croûtes et encroûtements calcaires au Maroc. Al Awamia, Rabat, 3, pp. 175-192.

Association Française pour l'Etude du Sol

LIVRE JUBILAIRE DU CINQUANTENAIRE

1934



1984

PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS

- DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE,
- DE L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE,
- DE L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (O.R.S.T.O.M.), et
- DE LA MISSION INTERMINISTERIELLE DE L'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE (MIDIST).