

Relation entre dynamique de l'eau et organisation morphologique d'un sol calcaire

B. JAILLARD *

SOMMAIRE

Les relations entre dynamique de l'eau et organisation pédomorphologique sont envisagées dans le cas d'un sol carbonaté, au niveau d'une tache de chlorose et à l'extérieur de cette tache. Ces deux sites constituent des sous-systèmes dont les trajectoires d'évolution divergent — dynamique actuelle de décarbonisation pour l'un, de recarbonatation pour l'autre. Le système, qui les englobe, est dans son ensemble en cours de décarbonatation.

Les phénomènes hydrodynamiques sont des phénomènes cycliques de courte période, dont les effets longtemps répétés conditionnent l'évolution du sol. Mais, par rétroaction, le fonctionnement hydrodynamique du sol s'en trouve modifié. Dynamique de l'eau et organisation pédomorphologique évoluent simultanément. Aussi, déterminer l'influence d'une dynamique hydrique actuelle sur la réorganisation morphologique d'un sol pose un problème méthodologique certain.

Dans la présente publication, nous abordons le sujet à partir de l'étude spatiale d'une tache de chlorose ferrique en milieu carbonaté. Les **carbonates** sont un traceur présentant à la fois une dynamique relativement rapide et une certaine inertie morphologique. Constituants parmi les plus solubles des sols, ils présentent des structures micro- et macro-morphologiques caractéristiques des modalités d'évolution du sol.

La chlorose ferrique en milieu calcaire est une maladie physiologique induite par une absorption excessive de calcium. Ce phénomène entraîne un trouble de métabolisme du fer qui se manifeste extérieurement par la dépigmentation des limbes. Les processus tant physiologiques que pédologiques sont encore mal connus. Une relation statistique entre apparition de la maladie et taux de réactivité des carbonates du sol est reconnue depuis fort longtemps (F. HOUDAÏLLE et L. SEMICHON, 1894 ; G. DROUINEAU, 1942). De plus, le rôle joué par les conditions climatiques et l'humidité du sol a été établi par de nombreux auteurs (R. GUENNELON, 1962 ; B. RIBOUR, 1970 ; C. JUSTE et R. POUGET, 1980), qui supposent en conséquence une influence du fonctionnement hydrique du sol sur le développement de la maladie. G. CALLOT **et al.** (1978) montrent

* Laboratoire de Science du Sol - I.N.R.A., C.R.A.M.-E.N.S.A.M., 9, place Viala, 34060 MONTPELLIER.

que, en milieu carbonaté, le pH de la solution du sol peut atteindre localement des valeurs élevées de l'ordre de 9-10 unités. Tandis que L. SALSAC (1980) observe expérimentalement une absorption élevée du calcium par les racines pour des pH de cet ordre de grandeur.

Quoi qu'il en soit, ces données permettent de penser qu'une tache de chlorose ferrique, aisément repérable, peut être considérée comme révélatrice d'une hétérogénéité pédologique et d'un fonctionnement hydrodynamique particulier.

1. LOCALISATION ET ENVIRONNEMENT PEDOLOGIQUE.

Le sol étudié est situé sur le territoire de la commune de Saint-Just (Hérault), dans la plaine dite de Mauguio. Le climat est de type méditerranéen à déficit hydrique estival marqué. La pluviométrie annuelle moyenne (P) est de 700 mm pour une évapotranspiration potentielle Penmann (ETP) de 1.100 mm, soit un déficit hydrique annuel de l'ordre de 400 mm. La période déficitaire s'étend de mars à septembre (P = 340 mm ; ETP = 940 mm). Remarquons que la violence des précipitations accentue encore ce déficit théorique.

La plaine de Mauguio s'étend de la limite sud-est des garrigues jusqu'aux étangs littoraux. Il s'agit d'un vaste pédiment quaternaire reposant sur des formations astiennes (sables et marnes d'origine marine) et villafranchiennes (formations caillouteuses continentales).

Cet ensemble a été cartographié au 1/5.000^e (H. ARNAL, 1965). Au cours du quaternaire récent, l'érosion différentielle d'une couverture fersiallitique villafranchienne est à l'origine de la distribution régionale des sols. Du piémont des garrigues aux étangs littoraux, on rencontre successivement :

- des sols fersiallitiques,
- des sols bruns calcaïques, à accumulation calcaire ;
- des sols bruns calcaires, à accumulation calcaire ;
- des sols alluviaux.

La surface expérimentale appartient à une unité cartographique de sols limoneux de type brun calcaire à accumulation calcaire. Les matériaux limoneux au sein desquels se sont développés ces sols reposent sur des marnes calcaires, à 1,50 - 2,00 m de profondeur. Le toit d'une nappe phréatique fluctue entre 4 et 6 m de profondeur.

L'horizon d'accumulation calcaire, non induré, présente des veines brunes peu carbonatées. Les teneurs en carbonates de cet horizon sont de l'ordre de 30 %, valeur relativement faible pour un horizon d'accumulation calcaire.

Cette unité de sol est à l'interfluve de deux secteurs alluviaux d'axe nord-sud, les vallées des Dardailons. Les dénivelées sont faibles, de l'ordre de 1,00 m entre le sommet de l'interfluve et les secteurs alluviaux.

1.1. CARTOGRAPHIE DETAILLEE DE L'UNITE DE SOL.

Nous avons cartographié à l'échelle du 1/1.000^e cette unité de sol. Reposant sur la distribution et la forme des carbonates dans les horizons supérieurs (forme nodulaire ou diffuse, degré de réactivité à H/Cl N/2), la carte proposée distingue 5 sous-types de sol (cf. fig. 1). La distribution spatiale des sols répond à une logique, mise en évidence par l'existence d'une certaine symétrie par rapport à l'axe de l'interfluve. Du centre de l'interfluve vers les secteurs alluviaux, nous rencontrons successivement :

- des sols bruns calcaires ;
- des sols bruns calcaïques, plus ou moins recarbonatés ;
- des sols bruns calcaires, en bordure des dépôts alluviaux.

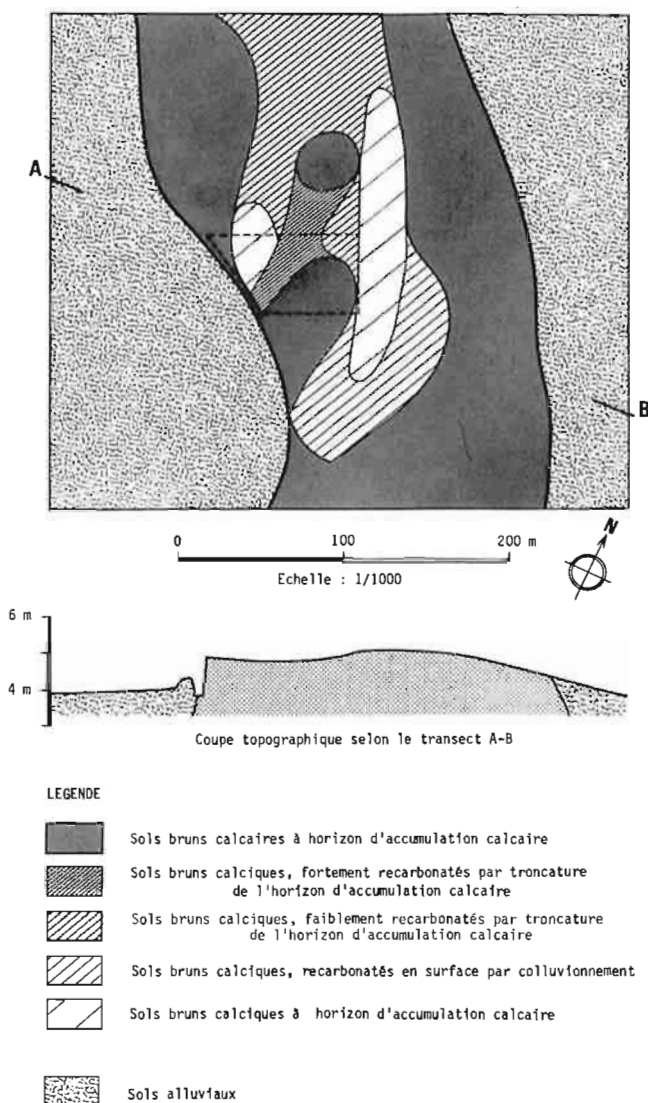


FIGURE I. — *Carte détaillée des sols*
Detailed soil map

L'unité cartographique s'avère finalement relativement complexe, mosaïque ordonnée de variantes du sol brun calcaire à accumulation calcaire qui définit cet ensemble. Cette carte semble d'ailleurs présenter la précision ultime que l'on puisse attendre des méthodes classiques de prospection de terrain.

1.2. TACHE DE CHLOROSE ET HETEROGENEITE PEDOLOGIQUE.

La parcelle expérimentale, d'une superficie de 3.000 m², recouvre l'axe de symétrie de distribution des sols. Il s'agit d'un verger de pêchers 'Dixired/Franc', porte-greffe résistant moyennement à la chlorose ferrique. Ce verger comprend une tache de chlorose, qui atteint du tiers à la moitié des arbres.

Deux cartes phyto-physiologiques ont été dressées pour l'année 1978, année « peu chlorosante », et pour l'année 1979, où les conditions climatiques se sont avérées défavorables, entraînant une importante extension de la maladie. Ces cartes (cf. fig. II-a) révèlent l'existence d'une zone centrale, fortement chlorosée et chlorosant chaque année ; et d'une zone périphérique, ne chlorosant que certaines années défavorables, mais ne présentant ni réduction de croissance des arbres, ni baisse de rendement.

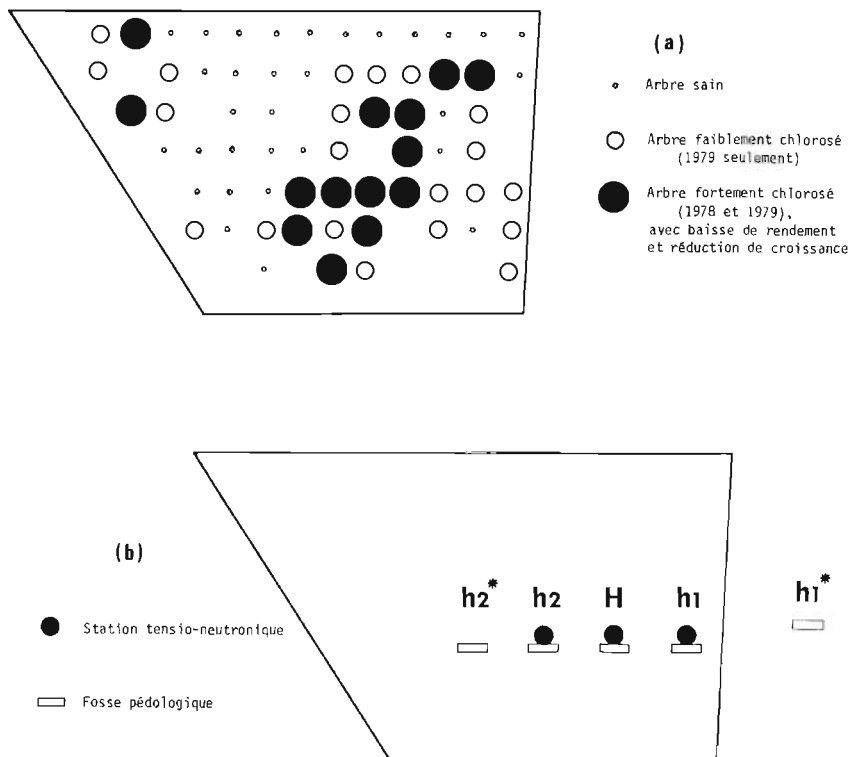


FIGURE II. — Carte de la tache de chlorose pour les années 1978 et 1979. Localisation des sites d'observation hydrodynamique et pédomorphologique.

Map of the chlorosis spot for the years 1978 and 1979. Location of the hydrodynamic and soil morphological observation places.

La résolution des cartes phyto-physiologiques correspond à la distance de plantation entre arbres, soit 6 m. A cette échelle, l'approche cartographique qualitative doit être prolongée par une approche quantitative : mesure de paramètres et tracé de courbes d'isovaleur. Pour obtenir une résolution des cartes paramétriques du même ordre de grandeur, 22 points de prélèvement, espacés de 12 m (maille de 4 plants), sont déterminés à partir de la grille de plantation. En chaque point, deux échantillons de terre sont prélevés dans l'horizon cultural et dans l'horizon d'accumulation, respectivement à 30 cm et 80 cm de profondeur.

L'étude granulométrique met en évidence :

- l'homogénéité de la composition granulométrique de l'horizon cultural, qui s'oppose à :
- une relative variabilité de composition granulométrique de l'horizon d'accumulation ;

- l'importance quantitative de la fraction limons fins 2-20 μm dans cet horizon d'accumulation ;
- enfin et surtout, une distribution spatiale cohérente des teneurs en limons fins de l'horizon d'accumulation, ces dernières variant de 15-20 % à 30-35 % de la terre fine.

De même, les teneurs en carbonates totaux et en calcaire actif présentent une distribution spatiale cohérente dans l'horizon cultural et dans l'horizon d'accumulation. Ces cinq paramètres sont statistiquement liés (coefficients de corrélation tous significatifs au seuil de probabilité 0,05), ce qui révèle

- d'une part, l'existence d'une hétérogénéité pédologique bien définie, associée à la tache de chlorose ;
- d'autre part, l'existence d'un processus de différenciation concernant en particulier les carbonates du sol.

Dans l'horizon cultural, les variations observées sont importantes :

- de 1 à 15 % de carbonates totaux (cf. fig. III-b) ;
- de 1 à 3 % de calcaire actif (cf. fig. III-a).

Dans l'horizon d'accumulation, les variations sont nettement plus faibles :

- de 30 à 45 % de carbonates totaux (cf. fig. III-d) ;
- de 5 à 10 % de calcaire actif (cf. fig. III-c).

L'étude des teneurs en carbonates des différentes fractions granulométriques dans l'horizon d'accumulation permet de préciser que, au niveau de cette hétérogénéité pédologique, 80 % des limons fins sont carbonatés contre 40-60 % dans la zone périphérique. Ainsi, au niveau de l'hétérogénéité, l'horizon d'accumulation est constitué par 25 % de limons fins calcaires, tandis qu'ils ne représentent que 5 à 10 % de ce même horizon dans la zone périphérique.

L'hétérogénéité pédologique est donc caractérisée par une accumulation relative de carbonates, en particulier dans l'horizon d'accumulation où ces carbonates sont fins et très réactifs.

Remarquons que, si tache de chlorose et hétérogénéité pédologique sont effectivement associées, la tache de chlorose semble pourtant décalée d'une dizaine de mètres par rapport à l'hétérogénéité pédologique. Ce léger décalage, confirmé par la suite, restera inexplicé. Observons toutefois que la tache de chlorose est décalée vers des sols calciques recarbonatés (fig. I), et non pas vers les sols calciques vrais.

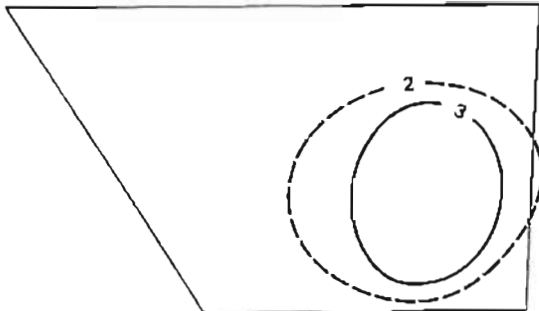
Nota : Par commodité de langage, nous appellerons désormais « hétérogénéité pédologique », notée H, la zone associée à la tache de chlorose ; et « zone référence », notée h, la zone périphérique ne présentant pas ou peu de symptôme chlorotique.

2. FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DU SOL.

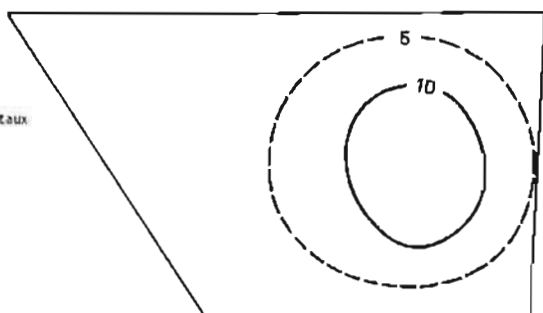
2.1. PROTOCOLE EXPERIMENTAL - OBTENTION DES DONNEES.

Le fonctionnement hydrodynamique du sol est mesuré à l'aide de dispositifs tensio-neutroniques. Du fait de la morphologie du sol, les dispositifs adoptés comprennent :

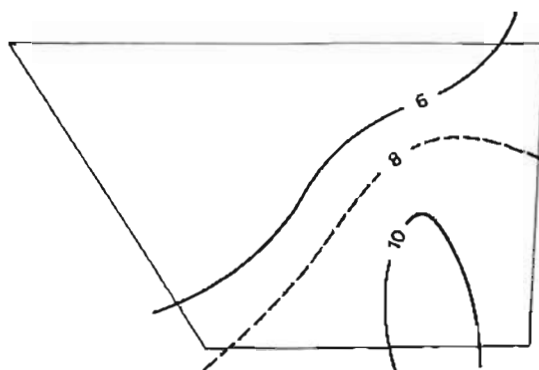
- un tube de mesure neutronique, permettant des relevés de teneurs en eau de 0 à 160 cm de profondeur ;
- 7 cannes tensiométriques, installées aux cotes 15, 30, 40, 50, 60, 80 et 130 cm.



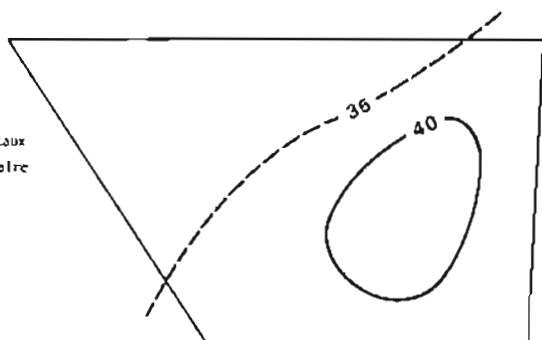
(a)
Carte des teneurs en calcaire actif
de l'horizon cultural
(g/100g de terre)



(b)
Carte des teneurs en carbonates totaux
de l'horizon cultural
(g/100g de terre)



(c)
Carte des teneurs en calcaire actif
de l'horizon d'accumulation calcaire
(g/100g de terre)



(d)
Carte des teneurs en carbonates totaux
de l'horizon d'accumulation calcaire
(g/100g de terre)

FIGURE III. — *Cartes des teneurs en carbonates dans l'horizon cultural (à 30 cm) et dans l'horizon d'accumulation (à 80 cm de profondeur)*
Maps of the calcareous data into the cultural horizon and into the accumulation horizon

Trois stations de mesure (notées h1, H et h2) sont installées à intervalle régulier de 12 m, selon un transect recoupant l'hétérogénéité pédologique (cf. fig. II-b). Les stations sont alignées sur un même rang de plantation, chaque station étant située dans l'espace découvert entre deux arbres (soit à 3 m des arbres).

Ce verger a été retenu en particulier pour sa topographie plane, de manière à éviter les transferts latéraux d'eau par ruissellement. Il est irrigué par aspersion sous frondaison, mode d'irrigation choisi pour son homogénéité. Les asperseurs sont déplacés du fond du verger vers les stations de mesure. La station h2 est en conséquence irriguée avant les stations H, puis h1.

La mesure de la dynamique de l'eau porte sur une année complète (1979). Les relevés de teneur en eau sont effectués deux fois par semaine au printemps, tous les quinze jours en été et en automne.

Les données physiques sont mesurées « in situ » ou sur échantillons non remaniés prélevés à l'emplacement des stations après creusement de fosse :

- les masses volumiques sont obtenues par gamma-densimétrie « in situ » ;
- les conductivités hydrauliques sont mesurées à l'aide de cellules de Richards sur échantillons non remaniés de sol d'un volume de 140 cm³ ($S = 22,9 \text{ cm}^2 \times L = 6,0 \text{ cm}$). Les membranes céramiques utilisées, d'une épaisseur de 2,0 mm, ont une perméabilité de $1,6.10^{-3} \text{ cm/h}$.

Rappelons que la mesure du fonctionnement hydrodynamique du sol a précédé l'observation directe du sol.

2.2. FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE.

L'étude de l'évolution des profils de teneurs en eau permet de dégager les schèmes suivants :

- Lors d'un apport d'eau (infiltration) :
 - en zone centrale H, seul l'horizon cultural est totalement resaturé, la discontinuité pédologique entre horizons semblant limiter l'infiltration dans l'horizon d'accumulation,
 - en zone référence h, l'ensemble du profil est resaturé, aucun effet « discontinuité » ne se manifestant.
- Entre deux apports d'eau (dessèchement) :
 - en zone centrale H, le dessèchement de l'horizon cultural est plus rapide et plus important qu'en zone référence h. Par contre les variations de teneur en eau de l'horizon d'accumulation sont de moindre amplitude qu'en zone référence h (cf. fig. IV).
- D'une manière générale :
 - en zone centrale H, l'horizon d'accumulation est plus sec qu'en zone référence h, et ce durant tout le printemps.

Les mesures de charge hydraulique, qui précisent le sens des flux d'eau dans le sol, confirment le rôle prépondérant joué par cette discontinuité pédologique.

Prenons pour exemple la période du 27/04 au 17/05 (cf. fig. V). Ces trois semaines se situent au printemps, en pleine période de croissance des pêchers. Climatiquement, la période est déficitaire, l'inversion de flux théorique hors irrigation ayant lieu en mars. Le 27/04, les profils de potentiel sont équivalents sur l'ensemble des sols de la parcelle. L'horizon d'accumulation est en drainage.

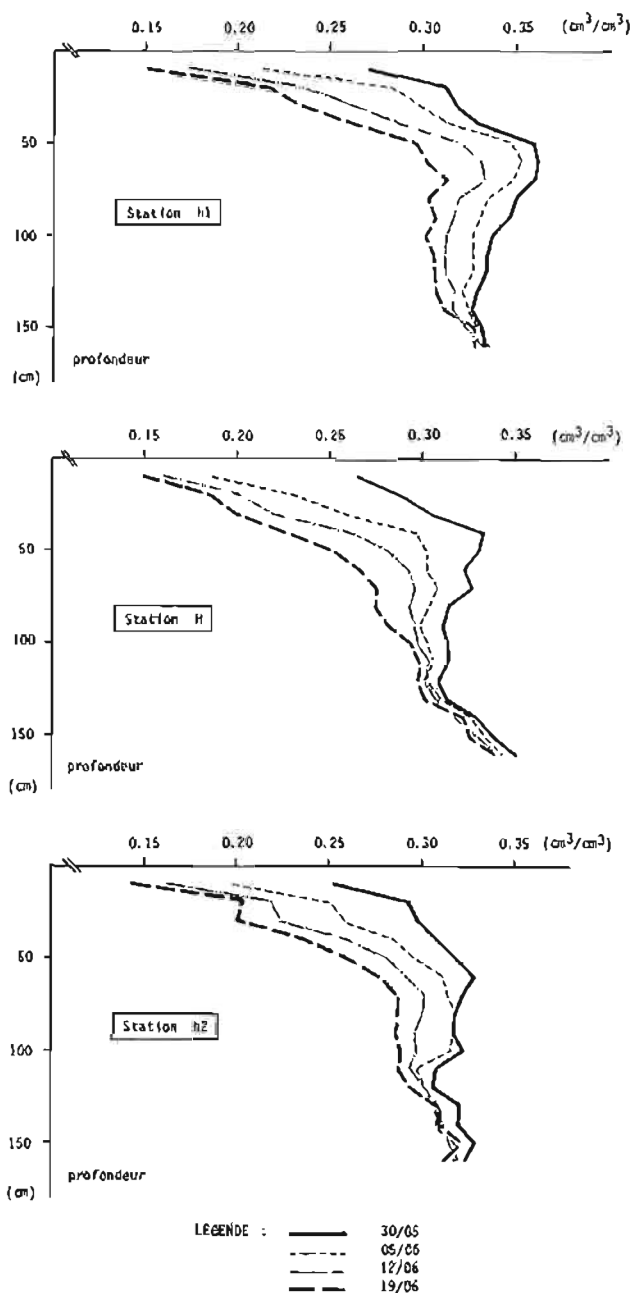


FIGURE IV. — Evolution comparée des profils de teneur en eau θ en cours de dessèchement

Compared evolution of the water-content profiles of soil in drying process

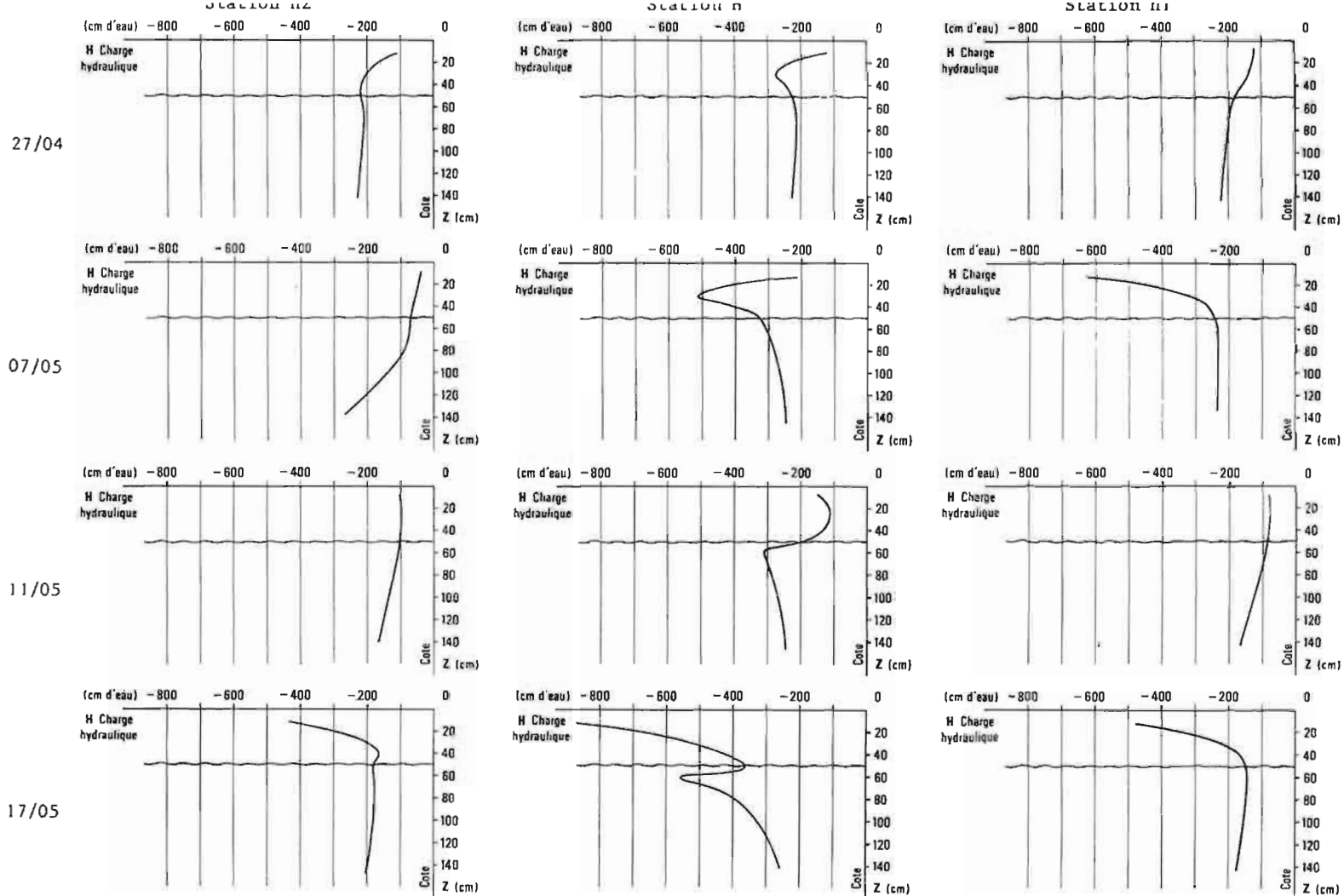


FIGURE V. — Evolution comparée des profils de charge hydraulique lors d'un apport d'eau
 Compared evolution of hydraulic load profiles during an irrigation

Le verger est irrigué au cours de la journée du 07/05 : lors de la mesure, la station h2 est irriguée, la station H en début d'irrigation, tandis que la station h1 n'est pas encore irriguée. Au niveau de la station H, l'horizon d'accumulation est en dynamique de remontées capillaires, tandis qu'il est sensiblement à l'équilibre (absence de transferts) au niveau de la station h1.

Quatre jours après, le 11/05, les profils tensiométriques révèlent une dynamique de drainage au niveau de la zone référence h (h1 et h2). Par contre, au centre de l'hétérogénéité H, les eaux d'irrigation ont resaturé l'horizon cultural mais n'ont pas pénétré au sein de l'horizon d'accumulation. Le 17/05, l'horizon cultural est en remontées capillaires sur l'ensemble de la parcelle. Mais, si l'horizon d'accumulation est encore en drainage dans la zone référence h, au centre de l'hétérogénéité H, cet horizon est resté en remontées capillaires durant tout cet épisode.

Ainsi, au niveau de l'hétérogénéité pédologique H, la présence d'une discontinuité réduit de façon notable l'infiltration des eaux d'irrigation. Ce phénomène entraîne une quasi-indépendance de comportement de l'horizon d'accumulation. Tandis que l'horizon cultural subit de fortes variations de teneurs en eau liées aux apports d'eau, **l'horizon d'accumulation, qui se dessèche progressivement, demeure en dynamique de remontées capillaires sur de longues périodes**, indépendamment des conditions hydriques régnant dans l'horizon cultural.

Par contre, **en zone référence h, l'ensemble du profil participe aux phases de dessèchement/réhumectation, l'horizon d'accumulation se trouvant tantôt en dynamique de drainage, tantôt en dynamique de remontées capillaires.**

Devant un tel fonctionnement hydrodynamique, on peut se demander si l'écoulement est unidimensionnel. En effet, la discontinuité entre horizons se comportant comme un véritable plancher imperméable, il semble probable que l'eau s'évacue au moins pour partie latéralement.

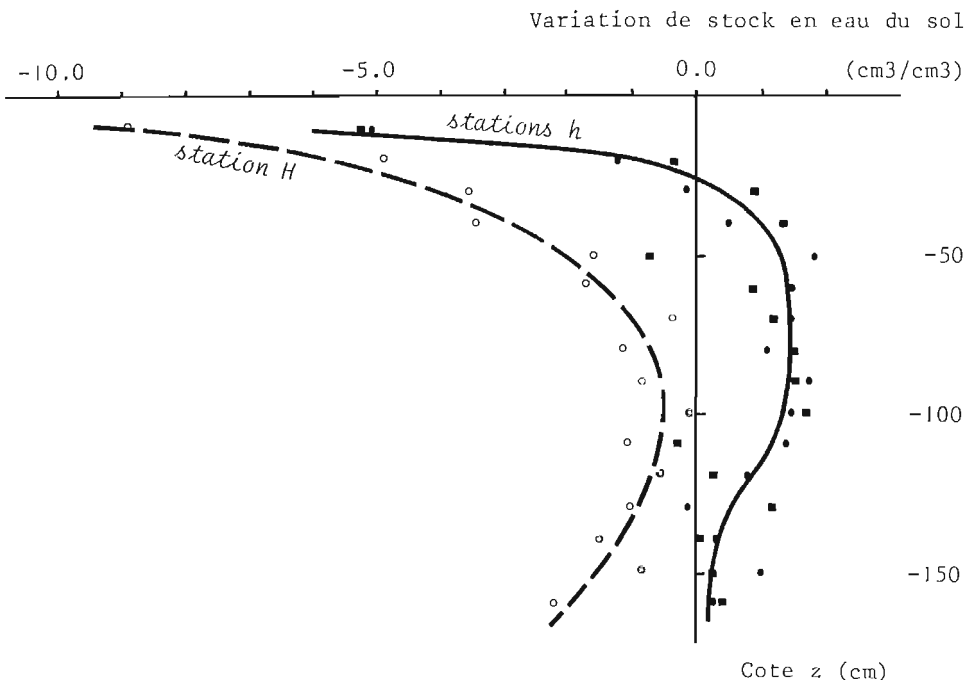
Du 24/04 au 17/05, les variations de stock en eau du sol, de la surface à 170 cm, sont respectivement de + 6,6 mm et de + 1,2 mm pour les stations h1 et h2, tandis qu'elle est de — 25,5 mm au niveau de la station H (cf. fig. VI). Cette dernière valeur concerne pour 70 % les premiers 55 centimètres de sol. Alors que le profil H est en remontées capillaires profondes (gain d'eau, même faible), il se trouve en définitive avoir perdu plus d'eau que les profils h1 et h2, alors en drainage (perte d'eau). Ce paradoxe peut être levé en admettant soit une évapotranspiration supérieure au niveau de la tache de chlorose, soit l'existence de transferts latéraux d'eau allant de l'hétérogénéité H vers sa périphérie, la zone référence h.

La première hypothèse paraît assez fragile. Au niveau de l'hétérogénéité pédologique, les arbres sont fortement chlorosés, leur feuillage, de ce fait, très réduit. L'énergie arrivant directement au sol y est plus importante, accentuant l'évaporation ; mais la réduction de la surface foliaire entraîne certainement une moindre transpiration, terme essentiel de l'évapotranspiration. Si la réduction de la surface foliaire consécutive à la chlorose peut expliquer une partie du déficit hydrique observé, l'existence de transferts latéraux, bien que non démontrée, paraît certaine.

Remarquons que ces transferts latéraux pourraient être à l'origine du décalage — d'une dizaine de mètres — observé entre la tache de chlorose et l'hétérogénéité pédologique précédemment définie à partir des teneurs en carbonates totaux et actifs du sol.

2.3. CONDUCTIVITES HYDRAULIQUES ET POROSITES.

Les conductivités hydrauliques ont été mesurées au centre de l'hétérogénéité (profil H) et en zone référence (profil h1*) (cf. fig. II-b), dans l'horizon d'accumulation à 100 cm. Les courbes de conductivité des horizons culturaux sont semblables, ce qui ne doit pas surprendre : remaniés par les façons culturales, les propriétés physiques de ces horizons doivent peu varier sur l'ensemble de la parcelle.



(les stations h1 (■) et h2 (●) présentant des profils similaires, une courbe unique a été représentée).

FIGURE VI. — Variation comparée du stock en eau du sol lors d'apport d'eau
Compared variation of soil water reserve during an irrigation

En revanche, dans l'horizon d'accumulation, les courbes de conductivités hydrauliques sont bien différentes d'un site à l'autre. Il apparaît que (cf. fig. VII) :

- l'horizon d'accumulation est nettement mieux drainant en zone référence qu'au niveau de l'hétérogénéité ;
- en zone référence, les valeurs de conductivité de l'horizon d'accumulation sont supérieures à celles de l'horizon cultural ; tandis que, au niveau de l'hétérogénéité, ces valeurs sont inférieures à celles de l'horizon cultural.

Or, une conductivité hydraulique au voisinage de la saturation, supérieure, dans l'horizon profond, à celle de l'horizon de surface signifie que cet horizon profond peut supporter des déblts plus importants que ceux tolérés par l'horizon de surface. De ce fait, en zone référence h, l'horizon d'accumulation assure le ressuyage de l'horizon cultural. A l'inverse, une conductivité plus faible dans l'horizon profond que celle de l'horizon de surface pourra provoquer, au-delà d'une certaine quantité d'eau à évacuer, l'engorgement de ce dernier. C'est bien ce que l'on observe au centre de l'hétérogénéité pédologique H.

L'observation des profils de masse volumique du sol confirme également ces observations (fig. VIII). En zone référence h1, le profil de masse volumique révèle une diminution progressive de la porosité du sol avec la profondeur, celle-ci variant de 0,45 à 0,40 cm³/cm³ vers 120-150 cm de profondeur. Par contre, au niveau de l'hétéro-

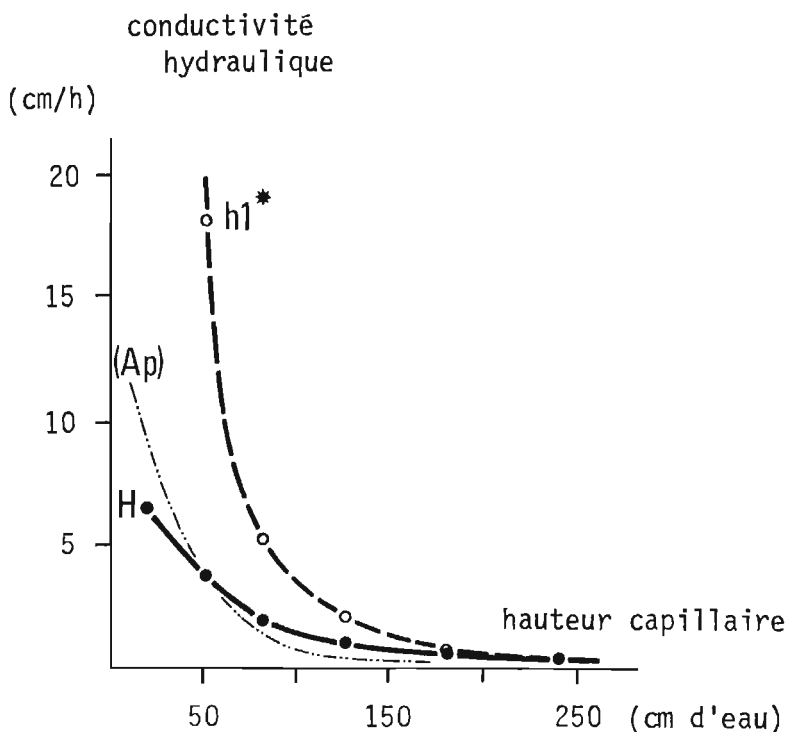


FIGURE VII. — Courbes comparées de conductivité hydraulique dans l'horizon cultural et dans l'horizon d'accumulation (à 100 cm de profondeur)

Compared curves of hydraulic conductivity into the cultural horizon and the accumulation horizon

généité pédologique H, le profil de masse volumique met en évidence **une discontinuité physique majeure** entre horizon cultural et horizon d'accumulation. Dès 50 cm de profondeur, ce dernier s'avère nettement plus dense et par conséquent moins poreux qu'en zone référence h1, à 12 m de distance seulement. De 70 à 110 cm de profondeur, la porosité n'y est que de $0,33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Toutefois cet écart de porosité reste faible, de l'ordre de 10% de la porosité totale. Mais la perméabilité d'un sol dépend souvent moins de sa porosité que de l'organisation de cet espace poral.

3. ORGANISATION MORPHOLOGIQUE DU SOL.

Cinq fosses, notées h1*, h1, H, h2 et h2* (fig II b) ont été creusées selon le transect défini par les trois stations tensio-neutroniques h1, H et h2. Ces fosses ont permis d'explorer 60 m de sol sur 2 m de profondeur. Lors de cette investigation, nous nous sommes plus particulièrement préoccupés des structures liées à la ségrégation des carbonates, et à l'organisation de l'espace poral. Une étude micromorphologique (lames minces et microscope à balayage) qui a porté sur les deux profils extrêmes H et h1*, a permis d'affiner l'observation de la structure des pores.

Les horizons culturaux (horizon cultural de labour et façons superficielles Ap1, horizon cultural de défoncement Ap2) diffèrent peu d'un site à l'autre. Ils sont bien structurés, poreux et peu compacts. Remarquons toutefois que le profil h1* se singularise par la présence d'un horizon A1, non remanié par les façons culturales : l'horizon d'accumulation y apparaît donc plus profondément qu'ailleurs.

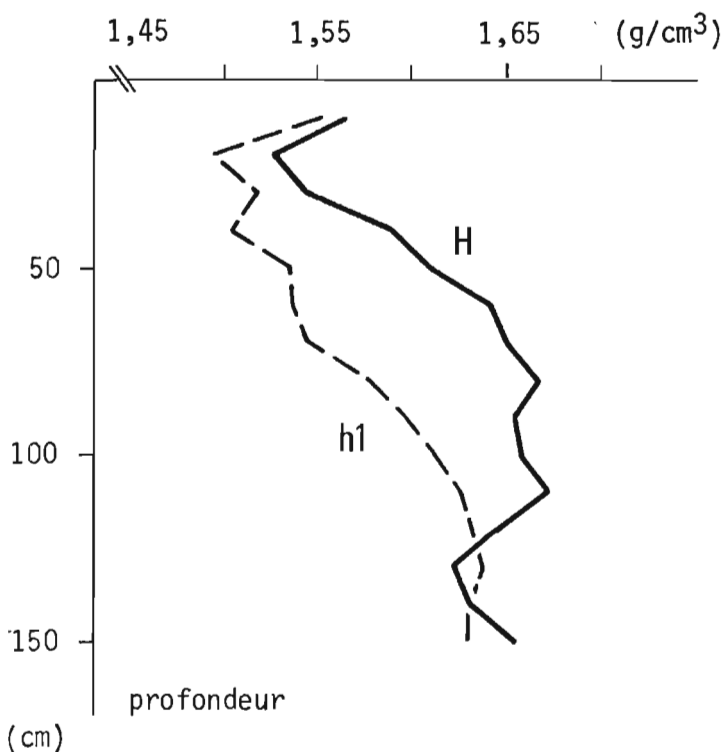


FIGURE VIII. — *Profils comparés de masse volumique du sol*
Compared soil bulk density profiles

En revanche, la morphologie de l'horizon d'accumulation est nettement plus contrasté que ne le laissaient prévoir les seules analyses de terre.

3.1. ARGILANES, VEINES ARGILEUSES ET PROCESSUS DE DECARBONATATION.

En zone référence, le système racinaire des pêchers est bien développé, exploitant l'ensemble du sol, tant les horizons supérieurs que l'horizon d'accumulation calcaire. Les racines sont saines, ne présentant pas de trait particulier.

L'horizon d'accumulation se présente comme un milieu carbonaté fortement affecté par d'importantes pénétrations de matériau décarbonaté argileux (40% d'argile), qui lui confère un aspect digité très caractéristique. Ces veines argileuses sont essentiellement verticales. Au haut de l'horizon, elles forment à elles seules un niveau totalement décarbonaté, qui se scinde en veines allant s'amenuisant et se ramifiant jusqu'à 140 cm de profondeur. A l'inverse, le matériau carbonaté (22% de carbonates) paraît sous forme de colonnes. Celles-ci s'amincissent vers le haut de l'horizon, à tel point qu'il n'en subsiste que des chapelets verticaux de nodules calcaires indurés, avant de disparaître dans les premiers décimètres de l'horizon. Cet horizon d'accumulation est donc constitué de deux domaines qui s'opposent : un domaine argileux (Bt), et un domaine carbonaté (Cca).

Nous avons divisé cet horizon d'accumulation à structure verticale en cinq niveaux horizontaux qui correspondent à des traits morphologiques dominants :

TABLEAU 1. — Schéma morphologique de l'horizon d'accumulation calcaire B/Cca à l'extérieur de la tache de chlorose

Niveau	Profondeur (cm)	Trait caractéristique	% du volume	
			Bt	Cca
0	65-80	Domaine argileux avec plans de clivage	100	0
1	80-90	Domaine argileux avec nodules calcaires indurés en chapelets	95	5
2	90-100	Veines terrigènes dominantes Encroûtement induré	70-40	30-60
3	100-140	Encroûtement calcaire plus tendre	40-10	60-90
4	140-160	Hydromorphie	0	100

● Le domaine argileux présente une structure prismatique (caractère verticale) bien marquée jusqu'au niveau 2. Les prismes ont un diamètre de l'ordre de 4 cm. Trois plans de clivage principaux sont observés au niveau 0. Ce domaine, totalement décarbonaté aux niveaux 0 et 1, contient de 3 à 4% de carbonates au niveau 3. Signalons également une forte concentration de pisolites ferro-manganiques dans les niveaux supérieurs, 0, 1 et 2.

Le domaine argileux est le siège d'une intense activité biologique, tant racinaire que faunique. Les petites racines sont abondantes dans les niveaux 0, 1 et 2, et persistent jusqu'au niveau 3. Ces racines sont à l'origine d'une porosité moulée de chenaux bien visibles à l'œil nu. D'autre part, l'activité des lombriciens est attestée par un réseau de galeries et un niveau de terriers (niveau 4), qui constituent très généralement l'arrêt des veines argileuses. Nombre de terriers sont remplis pour partie ou totalité par du matériau argileux. Il semble bien que les vers de terre soient en partie responsables de la morphologie de cet horizon.

Du point de vue micromorphologique, le domaine argileux est caractérisé par sa remarquable porosité, mais surtout par la structure pédologique des pores. En effet, **les parois de la plupart des pores sont revêtues d'argiles orientées** (cf. photos 1 et 2). Ces argilanes ont de quelques dizaines de microns à 50-200 μm d'épaisseur.

● Le domaine carbonaté est schématiquement constitué par la juxtaposition de zones pulvérulentes et de nodules calcaires plus ou moins indurés. Les zones pulvérulentes dominent dans le niveau 4, le plus profond ; leur importance diminue progressivement au niveau 3, pour disparaître ensuite. Au niveau 2, le domaine carbonaté est représenté par un assemblage friable de nodules plus ou moins indurés ; au niveau 1, seuls les nodules indurés subsistent, disjoints et noyés dans le matériau argileux.

Au niveau 2, les contacts entre nodules sont recouverts de matériau argileux, tandis que plus profondément (niveau 3), on observe sur les faces externes des nodules un réseau de pores moulés dont les parois sont revêtues d'argile. L'observation micromorphologique confirme cette observation : **au sein du domaine carbonaté, comme dans le milieu décarbonaté, la plupart des pores sont revêtus d'argilanes**. Du reste, l'activité biologique de ce domaine carbonaté semble être localisée dans ces pores.

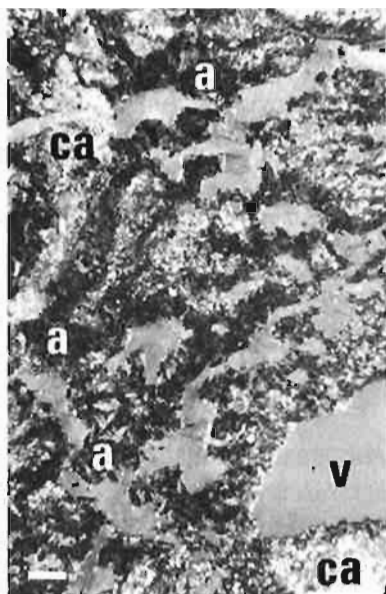


PHOTO 1. — Profil h1* - 100 cm
(G = 50 × - LP)
Revêtements argileux tapissant les
parois des pores d'une matrice carbo-
natée

Clay skins covering the pore walls
into a very carbonated matrix

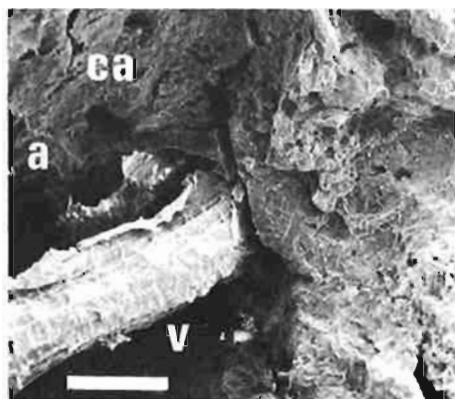


PHOTO 2. — Profil h1* - 100 cm
(G = 130 × - MEB)
Radicelle isolée de la matrice carbo-
natée par des revêtements argileux

Root isolated from the calcareous
matrix by the clay skins

Légende :

■ : 100 μm.

Ca : matrice carbonatée.

a : revêtement argileux.

v : vide.

En définitive, en zone référence, l'horizon d'accumulation est caractérisé par la présence d'argilanes revêtant les parois des pores tant dans les domaines décarbonaté que carbonaté, ainsi que, macromorphologiquement, par la présence de veines argileuses décarbonatées pénétrant profondément cet horizon calcaire.

● Interprétation.

La présence d'argilanes revêtant les parois des pores atteste :

- d'une part, la pérennité fonctionnelle de ces pores qui seule a pu permettre la sédimentation des argiles lors des cycles humectation/dessiccation,
- d'autre part, une dynamique de l'eau actuelle conduisant au moins à leur conservation dans le profil (non recarbonatation).

De même, l'existence de veines argileuses décarbonatées dans l'horizon d'accumulation révèle :

- d'une part, une dynamique de l'eau ayant localement entraîné la dissolution des carbonates et leur élimination de ces veines,
- d'autre part, un fonctionnement hydrodynamique actuel ayant pour effet d'empêcher toute recarbonatation de ces veines argileuses.

Argilanes et veines argileuses sont des structures analogues, manifestations du même phénomène à des échelles différentes.

L'ensemble des données nous conduisent finalement à supposer une dynamique de **décarbonatation du sol**. La présence au sommet de l'horizon d'accumulation de chapelets de nodules calcaires indurés au sein du matériau argileux décarbonaté est décisive : elle témoigne d'une morphologie ancienne différente, antérieure à la décarbonatation de cet horizon d'accumulation de carbonates.

Or, la dynamique de l'eau mise en évidence est caractérisée par l'alternance de périodes de remontées capillaires et de drainage, les quantités d'eau drainées étant accrues du fait d'apports latéraux. En zone référence, l'influence des phases de drainage sur l'organisation du sol est prépondérante, provoquant une décarbonatation de l'horizon d'accumulation. Ce processus est responsable d'une libération d'argiles résiduelles qui se réorganisent au sein du profil. Corrélativement, il engendre des conditions physico-chimiques favorables au développement d'une intense activité biologique qui accélère ce processus pédogénétique.

3.2. CALCITANES, ACCUMULATION CALCAIRE ET PROCESSUS DE RECARBONATATION.

Au niveau de l'hétérogénéité pédologique, l'horizon d'accumulation se présente comme un matériau peu différencié, uniformément carbonaté, compact et pulvérulent.

Au sommet de cet horizon, le niveau de défoncement est bien marqué, déterminant la **discontinuité structurale entre horizons culturaux et horizon d'accumulation**. Les façons culturales, qui ont tronqué le sommet de cet horizon calcaire, sont à l'origine d'une recarbonatation anthropique des horizons culturaux. Le défoncement à 50 cm a eu un effet agronomique néfaste, en recarbonatant les horizons de surface, et en accentuant une discontinuité préexistante.

Le système racinaire des pêchers souligne cette discontinuité physique. En effet, de nombreuses racines courent sur cette discontinuité, quelques-unes pénétrant l'horizon d'accumulation : elles sont alors caractérisées par un coude à angle droit. Les racines se trouvant dans l'horizon d'accumulation sont tortueuses, présentant des cals au niveau des coudes ; leur surface est fripée, souvent crevassée, et recouverte par endroits de carbonates fins. Le milieu est de toute évidence très défavorable au développement des racines de pêcher.

Les veines argileuses dans cet horizon d'accumulation sont peu importantes (10 à 20 % du sol), et carbonatées (7 % de carbonates). Elles ne constituent plus le trait dominant de la morphologie de cet horizon. L'activité biologique y est réduite à quelques racines très tortueuses et portant de nombreuses callosités dues aux carbonates (dépôts blancs au niveau des callosités).

Quant au domaine carbonaté (41 % de carbonates), il est essentiellement représenté par de grandes plages très pulvérulentes et des nodules peu indurés.

Ce caractère pulvérulent est à mettre en relation avec les teneurs élevées de ce milieu en limons fins calcaires (25 % de la terre fine). L'activité biologique y est nulle : les quelques racines qui y pénètrent au sommet de l'horizon montrent une importante diminution de leur diamètre et leur épiderme est comme « desséché ».

Enfin, cet horizon manifeste, dès 100 cm de profondeur, d'importants symptômes d'hydromorphie associés à des zones pulvérulentes de plus en plus étendues. Ce niveau recèle également des terriers de lombriciens, le plus souvent vides ou carbonatés.

Cet horizon d'accumulation correspond aux niveaux 3 et 4 précédemment définis (tableau 1), se développant respectivement de 45 à 90 cm, puis au-delà de 90 cm de profondeur.

Micromorphologiquement, ce matériau a le même aspect massif. L'ensemble de la matrice carbonatée est constituée d'un assemblage de cristaux micritiques de calcite de 10 à 20 μm de diamètre. On y rencontre des concentrations ferro-manganiques dentritiques. Les veines argileuses se différencient peu du domaine carbonaté. La porosité est essentiellement d'origine fissurale.

Les pores sont très généralement revêtus de calcite fine de néoformation (calcite claire, très pure) (cf. photo 3). Le développement de ces calcitanes peut être tel qu'elles obstruent les vides à l'exception d'une lumière centrale. Les racines observées sont gainées de calcite. Du reste, l'observation au microscope à balayage révèle la possibilité de précipitation des carbonates au contact de la racine même. En effet, en particulier dans les premiers décimètres de l'horizon d'accumulation, des cristaux de calcite tapissant les parois des pores présentent l'alignement et la forme de cellules épidermiques, constituant de véritables moules externes de la racine (cf. photo 4). Il est bien certain que la racine se trouve alors dans les conditions les plus défavorables qui soient : la plante chlorose.

Enfin, on observe dans le niveau profond (niveau 4) des argilanes. Mais ces dernières sont à nouveau recarbonatées, ou incluses dans une matrice carbonatée, ou seulement recouvertes par de la calcite de néoformation.

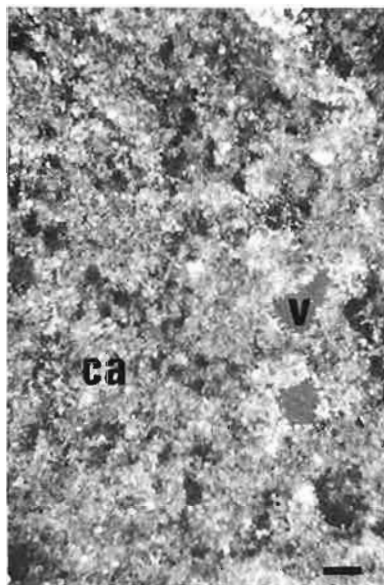


PHOTO 3. — Profil H - 80 cm
(G = 50 × - LP)

Revêtements de calcite micritique
autour des pores d'une matrice carbo-
natée

Calcite neoformation skins covering
the pore walls into a calcareous
matrix

Légende :

■ : 100 μm.

Ca : matrice carbonatée.

a : revêtement argileux.

v : vide.

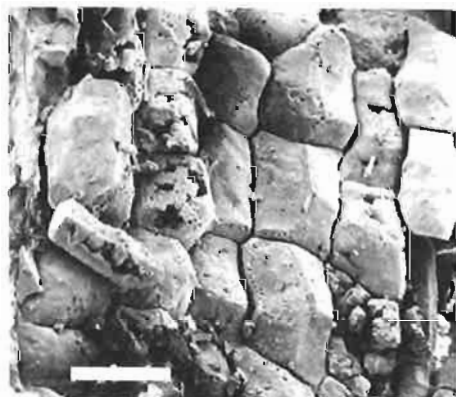


PHOTO 4. — Profil H - 60 cm
(G = 130 × - MEB)

Empreinte de racine dans un macro-
pore par précipitation périphérique
de la calcite

Root print into a macropore, by cal-
cite peripheric precipitation

● Interprétation.

Au niveau de l'hétérogénéité pédologique, l'horizon calcaire se présente comme un véritable horizon d' « accumulation calcaire ». Mais l'existence d'argilanes recarbonatées, de calcite de néoformation sur les parois des pores et au contact des racines, démontre que le fonctionnement actuel consiste en une **recarbonatation du profil**. Celle-ci occulte des structures plus anciennes qui témoignent d'une évolution antérieure différente, probablement une amorce de décarbonatation.

Or, le fonctionnement hydrodynamique mis en évidence est caractérisé par une dynamique de remontées capillaires sur de longues périodes. On peut supposer que

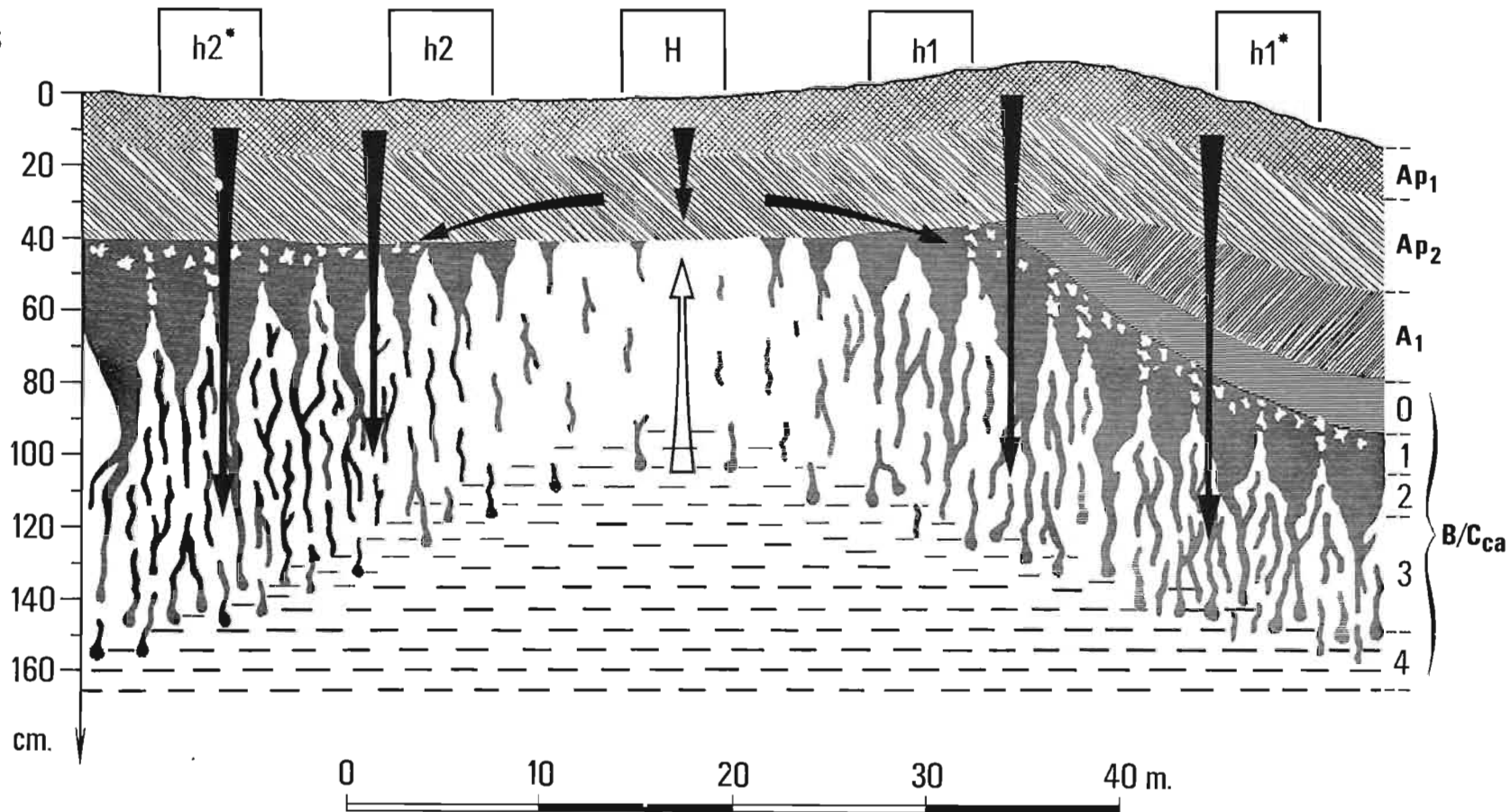


FIGURE IX. — Représentation schématique de la dynamique de l'eau du système pédologique

Schematic representation of pedologic system water dynamic

ces remontées d'eau profonde s'accompagnent de remontées de carbonates dissous qui précipiteraient lors du dessèchement du sol. La dynamique de l'eau serait donc à l'origine de la différenciation du sol.

Inversement, on conçoit aisément que ce processus de carbonatation/décarbonatation, par apport au dépôt de matériau carbonaté, influe considérablement sur les propriétés physiques du sol, et la dynamique de l'eau. **Dans le cas étudié, dynamique de l'eau et évolution pédogénétique sont indissociables.**

3.3. EVOLUTION PEDOLOGIQUE DU SOL.

La coupe de sol, établie à partir des cinq profils observés (cf. fig. 1X), révèle une structure en « dôme » de l'horizon calcaire ; le sommet de ce dôme correspond à l'hétérogénéité pédologique. L'horizon d'accumulation se caractérise par un nombre plus ou moins important de figures de décarbonatation, les veines argileuses : celles-ci sont nombreuses et bien différenciées en zone référence, quasi-absentes en zone centrale. D'autre part, une nette discontinuité structurale entre horizons culturaux et horizons d'accumulation singularise l'hétérogénéité pédologique.

La dynamique de l'eau peut être schématisée comme suit.

Lors d'un apport d'eau, l'eau s'infiltre dans les horizons culturaux. Au niveau de l'hétérogénéité pédologique, la discontinuité structurale entre horizon cultural et horizon d'accumulation bloque l'infiltration verticale de l'eau. L'eau s'évacue alors latéralement vers la zone référence. L'horizon d'accumulation n'enregistre donc pas l'apport d'eau et présente continuellement une dynamique de remontées capillaires, indépendamment des conditions hydriques régnant dans l'horizon cultural. En revanche, en zone référence, l'eau ne rencontre pas de discontinuité majeure : elle percole à travers tout l'horizon d'accumulation, les veines argileuses constituant ses cheminements préférentiels. Les veines argileuses drainent en outre l'eau migrant latéralement au niveau de la discontinuité structurale de l'hétérogénéité.

Cette dynamique de l'eau est associée à une évolution différentielle du sol. En zone référence, les importants transferts d'eau favorisent une décarbonatation de l'horizon calcaire. La dissolution des carbonates entraîne une amélioration des propriétés de drainage du sol tant par départ de matériau carbonaté, par sédimentation des argiles sur les parois des pores fonctionnels — ce qui renforce leur stabilité — que par le développement d'une intense activité biologique. A l'inverse, au niveau de l'hétérogénéité pédologique, la proximité d'un milieu drainant bien rend possible l'évacuation latérale de l'eau et permet ainsi l'installation d'un processus de recarbonatation de l'horizon d'accumulation par remontées capillaires.

Remarquons que la cause première d'une telle évolution différentielle pourrait être négligeable, en l'occurrence une position topographique différente. Et cette différenciation peut être rapide. En effet, C. MATHIEU (1978) a montré que, après seulement 10 années d'irrigation, un sol isohumique à profil calcaire différencié présentait une augmentation importante des ferri-argilanes de vides dans le profil, en particulier dans les horizons profonds (B et Bca).

Finalement, il apparaît que la couverture pédologique étudiée peut être schématiquement décrite comme deux sous-unités morphologiques, bien qu'il nous faille admettre une seule unité fonctionnelle intégrant les fonctionnements étroitement dépendants sinon complémentaires de ces deux sous-unités. Cette dynamique pédogénétique tend à renforcer les propriétés physiques et les structures pédologiques responsables de son existence même. Le volume pédologique étudié constitue un « **système pédo-génétique** », « entité fonctionnelle qui, grâce à ses interactions internes et externes, possède une

* (A.T.P. « Analyse de système, 1977-1978.)

dynamique propre et des propriétés spécifiques différentes de la somme linéaire des propriétés de ses composants »(*). **Ce système pédogénétique évolue dans le sens d'une accentuation de la différenciation des deux sous-systèmes de sol, par recarbonatation de l'un et décarbonatation de l'autre, tandis qu'il est globalement en cours de décarbonatation.**

CONCLUSION.

Le sol est un milieu d'accès difficile dont l'observation directe est généralement ponctuelle. Les plantes, et les cultures en particulier, constituent de remarquables sondes, quelle que soit l'échelle d'investigation.

L'étude à très grande échelle d'une tache de chlorose ferrique sur pêchers nous a conduit à mettre en évidence les relations privilégiées entre dynamique de l'eau et organisation pédomorphologique dans le cas d'un sol calcaire. L'utilisation des carbonates en tant que traceur de la dynamique de l'eau antérieure et actuelle s'est avérée fructueuse.

Si les horizons culturaux sont relativement homogènes, les **horizons profonds sous-cultureaux** présentent des morphologies très différenciées :

- au niveau de la tache de chlorose, un horizon d'accumulation compact et fortement carbonaté, associé à une dynamique dominante de remontées capillaires ;
- en zone saine non chlorosante, un horizon calcaire fortement décarbonaté, siège d'un intense activité biologique, qui lui confère des qualités de drainance assurant une bonne percolation des eaux.

D'un point de vue micro-pédologique et agronomique, les horizons profonds de ces sols se distinguent par la **structure de leurs pores**, environnement immédiat des racines.

- au niveau de la tache de chlorose, les parois des pores sont revêtues de calcite de néoformation, très réactive. La racine se développe dans un milieu défavorable : la plante chlorose ;
- en zone saine, les parois des pores sont recouvertes d'argiles orientées, isolant la racine du matériau carbonaté : la plante est saine.

Ainsi, le fonctionnement hydrodynamique du sol dépend essentiellement de l'organisation des horizons profonds. Ces morphologies très différenciées sont associées à des microstructures caractéristiques d'un intérêt agronomique déterminant. Lors d'une investigation cartographique des sols en vue d'une utilisation agricole, l'observation des structures et microstructures des horizons pédologiques fortement différenciés, généralement sous-cultureaux, doit faire l'objet d'une analyse particulièrement attentive.

Enfin, dans le cas présent, la dynamique globale de l'eau ne peut être comprise en l'absence de transferts latéraux. **Ces relations de proximité conditionnent l'évolution pédogénétique du sol :**

- dynamique de carbonatation au niveau de la tache de chlorose ;
- dynamique de décarbonatation en zone saine.

Le volume pédologique considéré présente deux fonctionnements hydrodynamiques, et pédogénétiques, différents sinon opposés. Ces deux sous-unités de sol si étroitement dépendantes doivent être comprises en tant que sous-systèmes couplés par interaction, constitutifs du système étudié. D'un point de vue cartographique, ces deux sous-systèmes appartiennent donc à la même **unité de sol**, considérée comme **entité fonctionnelle**. Cette unité de sols bruns calcaires à accumulation calcaire est, à échelle de la région, en cours de décarbonatation.

Tandis que, à long terme et moyenne échelle, l'ensemble du système a sa dynamique propre, à moyen terme et grande échelle, les trajectoires d'évolution des deux sous-systèmes divergent. Or, ce mode d'évolution, de type convectif, présente une grande stabilité aux perturbations externes : il est probable qu'il n'est pas exceptionnel, en particulier dans les sols à forte différenciation latérale. Je pense que l'étude de tels systèmes évolutifs doit permettre d'approfondir notre connaissance des **modalités d'évolution des sols**.

Bibliographie

- ARNAL H. (1965). — Carte des sols au 1/5.000^e : Saint-Nazaire, 13-27-h 1-3, C.N.A.B.R.L., Nîmes.
- A.T.P. « Analyse de Système » (1977-1978). — La Systématique dans les Sciences de la Terre, C.N.R.S., Université de Bordeaux III, février 1979, 237 p.
- BOUCHE M.-B. (1971). — In « **La vie dans les sols** », Gauthier-Villiers, ouvrage collectif présenté par PESSON.
- 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.*, 29 (1) : 37-57.
- DROUINEAU G. (1942). — Evolution des techniques de lutte contre la chlorose. Journées fruitières d'Avignon, pp. 73-86.
- GRAS R. (1969). — Considérations sur la porosité et l'étude des milieux poreux. *Science du Sol* (2) : 79-90.
- HOUDAILLE F. et SEMICHON L. (1894). — L'état physique du calcaire considéré comme cause déterminante de la chlorose. *Ann. Ecole Nat. Agr.*, Montpellier, 8 : 243-326.
- JAILLARD B. (1980). — Fonctionnement hydrique d'un sol carbonaté. Incidence sur la chlorose ferrique. Thèse de 3^e cycle, 13 nov. 1980, U.S.T.L., Montpellier, 131 p.
- JUSTE C. et POUGET R. (1972). — 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'Agr.*, 58 : 352-357.
- 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) : 95-112.
- RIBOUR B. (1970). — Influence du facteur eau et de certaines techniques culturales sur l'induction de la chlorose en sol calcaire. Mémoire E.N.I.T.A., Bordeaux, 67 p.
- SALSAC L. (1980). — L'absorption du calcium par les racines des plantes calcicoles ou calcifuges. *Science du Sol* (1) : 45-77.

SUMMARY

RELATIONSHIPS BETWEEN WATER FLOW AND SOIL MORPHOLOGICAL FEATURES IN A CAMBISOL

The relationships between water flow and soil morphological features are considered in the case of a calcareous soil, carbonates being the morphological tracer. In order to take into account the effect of relationship of vicinity on their evolution and the water dynamics, we are led to search for an efficient test to locate a convenient place. For this purpose, a ferric chlorosis spot is regarded as revealing a soil heterogeneity, and a particular hydrodynamic behaviour. Then we compared the hydrodynamic functioning and the soil morphology on the chlorosis spot with the outside of this spot. This work is undertaken on a very large mapping scale (1/100).

The selected patch belongs to a calcic cambisol map-unit defined on the scale of 1/5.000, with a lime accumulation horizon. Detailed mapping shows various soils sub-types, from calcareous to non calcareous soils (cf. fig. n° 1).

On the chlorosis spot, the hydrodynamic behaviour measurement shows the important effect of a physical discontinuity between the cultural and the accumulative horizons (cf. fig. n° VIII). When water is brought in, this discontinuity reduces the infiltration into the lime accumulation horizon where water remains in capillary upward motion during long periods (cf. fig. n° V).

Outside of the spot, there is no discontinuity: the water flows through the whole soil profile. This water dynamics is related with lateral water flows, from the spot center towards its periphery on the top of lime accumulation horizon.

Besides this lime accumulation horizon shows very different morphological features:

- on the chlorosis spot, there is a dense and pulverulent media uniformly carbonated. The pore walls are covered of calcite neoformation (cf. photos n° 3 and n° 4), which show a recarbonation process;
- outside of the spot, very porous, large clays veins deeply penetrate this horizon. The pore walls, in the clay veins and in the carbonated matrix, are covered with oriented clay skins (cf. photos n° 1 and n° 2). These features show that the soils are in a decarbonation process, related with a good percolation of infiltration water.

Finally, this pedogenetic system is composed by two sub-systems connected by interaction, the chlorosis spot soil in carbonation process and the outside of the chlorosis spot soil in decarbonation process. So, meanwhile the evolution trajectories of the two sub-systems diverge, on a long period this system is on the whole in way of decarbonation. A such pedogenetic pattern may be currently in the pronounced lateral differentiation soil.