

## Structures pédologiques de type karstique dans une formation carbonatée à substrat et recouvrement sableux

M. Lamouroux, G. Bellier,  
F.-X. Humbel, E. Driffort  
ORSTOM - Bondy

### RÉSUMÉ

En forêt d'Ermenonville, le Marinésien est une formation carbonatée peu épaisse recouverte de sables podzolisés et reposant sur un substrat sableux. Elle est transformée par des structures de plus en plus profondes et larges appelées puits :

- les poches, organisées en réseau de maille plurimétrique, incorporent des argiles résiduelles et des sables sus-jacents ;
- les cheminées s'évasent au niveau du substrat, qu'elles alimentent en produits venant des horizons supérieurs ;
- les cuvettes ont un contenu jaune et hydromorphe. Elles jalonnent le pied de dunes, bénéficiant de l'apport oblique de solutions qui suivent l'horizon Bh des podzols des versants ;
- les dolines traversent plus largement la formation carbonatée. Les argiles sédimentaires ou de décarbonatation sont affectées par le lessivage. Des silcrètes soulignent les stades d'enfoncement de la doline ;
- l'ouvala juxtapose dolines sèches et dolines avec nappes. Les dolines sèches sont drainées par un horizon de soutirage. Les dolines avec nappes présentent deux horizons argileux incurvés, ce qui entrave les écoulements latéraux. Des graviers siliceux néoformés s'observent dans les horizons sableux intercalés ;
- la doline ouverte par une tête de talweg présente des versants taillés dans les sables du substrat, qui évoluent en podzols.

Les puits forment une succession de structures de plus en plus évoluées, qui résultent d'un relais de processus allant vers une acidification croissante :

- dissolution de la formation carbonatée,
- lessivage des argiles de décarbonatation, ou sédimentaires ;
- puis dégradation par les acides organiques émis en surface ;
- podzolisation directe et massive des sables résiduels.

Cette chronoséquence, plus ou moins avancée selon les endroits, se traduit spatialement dans chaque puits par une succession ordonnée de fronts de transformation. L'érosion régressive des talwegs fait disparaître les différents puits, structures caractéristiques du plateau.

Enfin, d'autres processus interfèrent localement : hydromorphie, "silcrétisation", accumulations profondes d'argile. Ces dernières sont étudiées dans un autre article.

**Mots-clés :** Structures pédologiques, formation carbonatée, sables, karst, lessivage, podzolisation, géochimie.

#### ABSTRACT

In the sedimentary Parisian basin, the "Marinesian" is a thin calcareous formation covered with podzolized sands and resting upon a sandy subsoil. It is transformed by hole-shaped structures, which are increasingly deep and wide :

- pockets are arranged into a network of meshes over several meters. They contain residual and illuvial clays, organic matter and podzolized sands;
- chimneys broaden in the subsoil and supply it with solutions coming from the upper horizons;
- depressions contain yellow and hydromorphic material. They are observed at the base of dunes and profit by the oblique deposit of solutions over the Bh horizon of slope podzol;
- dolines are depressed spots where the calcareous formation is replaced by decarbonation clays, themselves redistributed by leaching or dissolution. The same holds true for the layers of sedimentary clays observed at the bottom of the Marinesian;
- uvala juxtaposes dry dolines and dolines with perched water tables : dry dolines are drained by an underlying eluvial sandy horizon. Humid dolines present two depressed and curved clayey horizons. Neoformed siliceous gravels are observed in the intermediate sandy horizon ;
- doline cut by the head of a talweg present a podzolic cover developed in sands. The carbonates and the various accumulations have disappeared, excepted silcretes laid at several steps.

Holes structures result from a succession of processes tending towards an increasing acidification. The successive transforming fronts are observable at different levels and may be related to geochemical conditions (see figure 11).

Recently, intense podzolization, linked to the supply of superficial sandy material during Quaternary, accelerates the destruction of the covered carbo-

nated formation. In the end, the advance of the talwegs cut the more evolved hole structures.

**Key-words :** Pedological structures, calcareous formation, sand karst, decarbonation, leaching, podzolization, geochemistry.

## INTRODUCTION

Le site de cette étude a servi à la formation d'étudiants souhaitant pratiquer une analyse structurale détaillée (BOULET *et al.*, 1982). Cela dans le but de tester l'intérêt d'un tel travail pour les études de pédogénèse et pour la cartographie régionale des systèmes de sol (LAMOUREUX *et al.*, 1989). Cet article tient compte des différents travaux effectués sur ce site (BOUCHET, 1987, PETERSCHMITT, 1987, RAJOT, 1988), ou dans des milieux comparables (ROBIN *et al.*, 1975). Il présente les pédogénèses les plus superficielles, un autre article de ce même ouvrage décrivant les traits observés plus profondément, et notamment les accumulations d'argile.

### 1 - CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Le secteur étudié est situé sur les formations de l'Eocène du Bassin Parisien (POMEROL *et al.*, 1986, BRGM, 1967), dans la partie centrale rétrécie d'un plateau que recouvre la forêt d'Ermenonville (figure 1).

Ce plateau de 100 m d'altitude domine de plus de 30 m les plaines limoneuses environnantes. Une coupe simplifiée nord-sud montre, sur un support calcaire du Lutétien la succession suivante de niveaux (figure 2) :

- à la base, l'Auversien représenté par les sables quartzeux blancs de Beauchamp, reposant sur les sables jaunes d'Auvers ;
- au-dessus, le Marinésien, épais de quelques mètres au plus, formé par un marno-calcaire (de St-Ouen) surmontant un sable coquillier, (sur une partie du site seulement), puis un niveau lité vert de sables et d'argiles, plus ou moins carbonaté.
- en surface, un recouvrement de sables soufflés au Quaternaire.

Depuis le retrait de la mer du Marinésien, il y a 35 millions d'années, cette région a connu de longues périodes d'émersion sous des climats variés. Le paysage a été plus récemment façonné par l'érosion, et par des pédogénèses successives. Des déformations tectoniques mineures sont aussi intervenues : une flexure est-ouest passant par le secteur étudié a infléchi vers le nord le compartiment nord du plateau, dont les strates ont maintenant un faible pendage inverse du pendage normal observé dans le compartiment sud.

Sous les climats périglaciaires le sol a été perturbé, sur deux mètres d'épaisseur environ, par des processus de cryoturbation et de gélifluxion, puis recouvert d'un voile sableux, épais de quelques décimètres. Localement ce dernier est modelé en dunes de formes vives qui peuvent atteindre 6 m d'épaisseur. Ces sables ont été remontés par le vent à partir des versants taillés dans les sables de Beauchamp.

C'est dans ce contexte morphoclimatique et sur ce matériau complexe que se marquent les évolutions récentes et actuelles, qui héritent ainsi de pédogénèses et de morphogénèses anciennes variées. La coupe schématique (figure 3) distingue deux types de structures :

- en profondeur, des structures résultant de processus de soutirage et d'accumulations diverses dans le substrat sableux, carbonates, argiles, silice, matière organique, etc.
- en surface, des structures liées à l'altération des sédiments carbonatés ou argileux du Marinésien sous couverture sableuse podzolisée. Elles se présentent en horizons et en "puits" reliant ces horizons superficiels aux couches profondes.

La couverture du plateau calcaire comporte de bas en haut les horizons suivants :

- au contact des formations carbonatées, un liseré organique discontinu (horizon B  $\beta$ ), puis un horizon argilo-sableux brun-jaune décarbonaté, épais d'un ou deux décimètres ;
- plus haut, un horizon sablo-argileux également brun-jaune ;
- en surface, des horizons sableux, de teinte claire, à raies argileuses et organiques (lessivage et podzolisation).

Des formations analogues ont été décrites en forêt de Fontainebleau par A.M. ROBIN *et al.*, 1975, où ces auteurs ont montré que les horizons brun-jaune contiennent des argiles de décarbonatation enrichies d'argiles illuviales.

On s'intéresse ici aux puits, en distinguant par largeur et profondeur croissantes : les poches ou cheminées, les cuvettes, les dolines et les ouvalas. On décrira ces structures autour desquelles s'organise la couverture pédologique du plateau ; on montrera l'importance géochimique et le rôle morphogénétique de ces puits qui alimentent les couches profondes en constituants divers.

## 2 - DIFFÉRENTES STRUCTURES DE DISSOLUTION PAR PUIITS

La dissolution affecte principalement les formations carbonatées représentées le plus souvent par du marno-calcaire cryoturbé, mais les structures observées concernent aussi les argiles de décalcification, les sables coquilliers, le niveau vert lité et la couverture sableuse superficielle.

**POCHES OU CHEMINÉES : premières ouvertures dans le calcaire.**

Poches et cheminées sont des structures décarbonatées qui pénètrent dans la formation carbonatée. Une cheminée désigne ici une poche qui s'enfonce jusqu'au substrat sableux. Poches et cheminées s'évasent souvent au niveau des discontinuités horizontales que présente l'ensemble carbonaté, au toit des sables coquilliers notamment.

Les poches sont en relation complexe avec les cellules de cryoturbation : la figure 4a montre, sur un substrat en place de marno-calcaire blanc à passées d'argiles vertes, des blocs redressés de calcaire et de silex bordant des cellules de 2 m de profondeur. Le matériau cryoturbé est hétérogène : c'est un mélange de volumes plus ou moins carbonatés, argileux ou plus sableux, de couleur également variable (du blanc au jaune-gris). On observe aussi, en profondeur, des poches de sable limoneux jaune vif d'origine indéterminée (terriers ?). Deux profondes poches décarbonatées, colorées en jaune-rouge, se sont développées dans la formation cryoturbée sablo-argileuse. La figure 4b montre le détail d'une poche avec, du bord vers l'intérieur, la succession d'horizons :

- organique, en liseré discontinu (horizon B β) au contact du calcaire et pénétrant celui-ci ;
- argilo-sableux, brun-jaune, décarbonaté, moulant le calcaire ;
- sablo-argileux, brun-jaune, à bord intérieur sinueux et net ;
- sableux, humide, de teinte claire (gris-beige), à raies brunes argileuses ou raies organiques noirâtres, pénétrant en doigt de gant dans les sinuosités de l'encaissant sablo-argileux ;
- des blocs de silex, provenant du marno-calcaire, sont présents dans et en surface des horizons brun-jaune : nombreux dans le fond des poches, plus dispersés ailleurs.

La partie axiale sableuse et humide paraît correspondre à une zone de circulation préférentielle d'eau et de matières, les bords évasés de la poche formant entonnoir. La surface du sol n'est cependant pas déprimée à l'aplomb des poches.

Le sable à raies provient en partie de l'éluviation du résidu de décarbonatation et surtout d'un remplissage par des sables superficiels. La podzolisation qui nourrit les raies organiques est d'autant mieux exprimée que l'épaisseur des sables superficiels est plus importante.

L'argile des horizons brun-jaune provient principalement de la décarbonatation du matériau carbonaté cryoturbé et dans une moindre mesure de l'illuviation des sables soufflés.

Les observations macro - et micromorphologiques amènent à faire intervenir les mécanismes suivants de formation de ces horizons :

- au contact du matériau carbonaté, remplissage des vides de dissolution par la masse argileuse, plastique en période humide : c'est l'argilifluxion définie par LAMOUREUX (1972).
- dans l'horizon sablo-argileux, pénétration gravitaire du sable sus-jacent dans les fissures de retrait, puis incorporation de ces sables en période d'humectation (gonflement) ;
- sur toute l'épaisseur des poches, illuviation d'argile sous forme de cutanes lités biréfringents dans les vides du plasma fortement masépique des horizons brun-jaune, ou sous forme de ponts entre les grains de sable des raies observées dans les horizons sableux (assemblage intertextique, BREWER, 1964).

Sur calcaire épais en position de plateau D. BOUCHET (1987) a montré que ce qui apparaissait sur les coupes comme des poches correspondait en fait à un réseau de cloisons de largeur décimétrique (figure 5). Ce réseau polygonal irrégulier à maille plurimétrique délimite des flots carbonatés en forme de dômes. Le réseau devenant discontinu en profondeur, on observe alors un continuum carbonaté avec des poches espacées.

Les cheminées apparaissent habituellement là où les couches carbonatées ont moins de 1,5 m d'épaisseur, ce qui est le cas sur le bord des affleurements. La figure 6 montre deux cheminées, distantes de 3 m, traversant les formations carbonatées de la base du Marinésien (sables coquilliers et sables verts lités), le marno-calcaire étant totalement dissous au niveau de cette fosse.

*CUVETTES : effet d'impluvium dû au podzol des dunes.*

Il existe aussi des puits plus profonds et plus larges, appelés cuvettes, alignés au pied des dunes, ou entre deux dunes rapprochées. Le transect de la figure 7 passe par deux de ces cuvettes, qui se développent jusqu'aux sables de Beauchamp à 6 m de profondeur. Outre leur diamètre pluri-décamétrique, les cuvettes se distinguent des cheminées par la forme un peu déprimée de la topographie à leur aplomb et surtout par la disparition presque totale des carbonates au profit d'un horizon jaune sablo-argileux, puis de gley et de pseudogley, avec accumulation locale d'eau.

Ces cuvettes paraissent liées à un apport supplémentaire d'eau provenant du versant de dune voisin. Les dunes présentent en effet un podzol bien développé avec, vers 1 m de profondeur, un horizon Bh-Bfe qui ralentit fortement l'infiltration au profit d'un écoulement latéral. Cette eau suit les raies organo-minérales et suralimente le pied de versant (effet d'impluvium) modifiant les conditions géochimiques (hydromorphie). Sur la face sud de la dune, les cuvettes sont moins larges et moins continues : il semble que le plus grand développement des cuvettes au nord soit en relation avec un apport d'eau supplémentaire dû au léger pendage des couches dans cette direction, ainsi qu'à l'abrupt du flanc de la dune.

**DOLINES ET OUVALA : rôle dans la morphogénèse.**

Une forme de dissolution, de largeur hectométrique, et nettement marquée dans la topographie par une dépression, a été également étudiée. Elle est située entre le carrefour de Chaâlis et une tête de talweg se dirigeant vers l'est : elle correspond à une zone hydromorphe (secteur p). Cet "ouvala" est formé de plusieurs dolines juxtaposées. La figure 8 présente la structure transversale de cette zone déprimée, suivant un transect est-ouest repéré sur la figure 9. Du talweg vers le plateau, on observe la succession suivante :

- en page 22, la tête de talweg est séparée de la dépression par un plateau encore armé par le marno-calcaire ;
- en page 32, une doline sèche est drainée à sa base par un horizon sableux de soutirage, reposant lui-même sur une dalle de silcrète (THIRY, 1988 ; THIRY *et al.*, 1988). Un écoulement interne vers le talweg ou en profondeur dans le substrat sableux est probable ;
- au-delà de cette doline sèche, la dépression présente deux nappes perchées : une mare en surface et une nappe de profondeur distincte de la précédente en période sèche. On n'a pas observé de communication avec la doline sèche voisine.

Les sondages autour de la mare montrent plusieurs horizons (2 à 3) d'argile compacte gris-bleu, hydromorphes, séparés par des horizons ou volumes gravelo-argileux gorgés d'eau (passant latéralement à des horizons plus sableux). Les graviers milli à centimétriques, siliceux, ont des formes biscornues. Ils sont formés d'opale et de macrocristaux de quartz de néoformation. Quant aux silex, si nombreux ailleurs dans les argiles de décarbonatation, ils sont ici rares ou très fortement altérés, souvent même réduits à des débris blancs.

Le plancher argileux de ces dolines centrales mal drainées est déprimé de 1 à 1,5 m par rapport aux horizons argileux du plateau. Il présente d'autre part deux remontées (en page 25 et en page 30) qui bloquent les circulations latérales d'eau soit vers la doline sèche, soit vers l'ouest où le plateau présente d'autres petites cuvettes.

On constate donc, au centre de l'ouvala, la présence d'horizons argileux déprimés qui s'inscrivent plus ou moins profondément dans le substrat sableux.

Plus au nord, la figure 9 situe des dépressions ouvertes sur les talwegs qui divergent de la ligne de partage des eaux. Les dunes du pourtour ont dû concentrer les écoulements au profit de ces formes de dissolution, mais cette dernière a pu être aussi facilitée par la flexure des couches observée dans cette zone d'étranglement du plateau. Ces dépressions sont interprétées comme des dolines qui ont été ensuite captées par érosion régressive.

La figure 10 présente une de ces dolines rejointe par une tête de talweg, et les différentes dalles de silcrète qui y ont été observées. Le large entablement de silcrète S1, le plus haut et le plus ancien, oriente le tracé de progression des talwegs. Les dalles S2, S3 et S4, plus modestes mais également horizontales et biseautées vers l'amont, sont en relation avec des talwegs secondaires.

### 3 - ÉVOLUTION DES CONDITIONS GÉOCHIMIQUES

Ces silcrètes témoignent d'une redistribution de silice dans le paysage, associée vraisemblablement aux conditions alcalines induites par la dissolution des carbonates. Leur étagement sur les flancs de la doline marque les stades d'enfoncement de celle-ci.

La zone étudiée montre différentes structures de dissolution de couches carbonatées placées dans un environnement sableux. Bien que ces couches soient peu épaisses, on y observe des formes décrites en milieu karstique. Ces formes liées au départ en solution des carbonates et à l'évolution des résidus sont discrètes et en partie masquées par les sables superficiels.

L'arrivée de sable quartzeux en surface au Quaternaire récent est l'événement majeur à considérer aux plans de la nature et des vitesses des transformations. La podzolisation, avec afflux d'acides organiques mobiles et complexants, accélère les dissolutions en cours. La matière organique modifie aussi, par ses propres structures d'accumulation, le trajet des solutions et donc celui des dissolutions. Son accumulation peut ainsi retarder la disparition de certains volumes carbonatés.

Après disparition des carbonates l'acidification est progressive et passe par une étape où le pH est favorable au lessivage. La podzolisation, qui accélère à son tour la décarbonatation, apparaît ensuite : la figure 11 montre, sur le flanc de la doline captée, le passage en quelques mètres du sol en cours de décarbonatation au sol podzolisé, par l'intermédiaire d'une zone où s'exerce le lessivage. Ce dernier s'exprime par une série de raies organo-argileuses, de moins en moins argileuses en profondeur et vers l'aval.

Cette succession dans l'espace de fronts de transformation représente aussi la succession des phénomènes dans le temps. Leur progression est réglée par les "puits", décrits dans cet article et qui présentent eux-mêmes sur une très courte distance des conditions géochimiques contrastées du bord vers le centre.

Cette séquence d'évolutions vers l'acidification n'efface pas toute trace de la présence initiale du sédiment carbonaté. En effet, la silice qui cimente les silcrètes ou qui nourrit les graviers est issue de dissolutions réalisées en conditions alcalines :



- les silex résiduels du marno-calcaire sont fortement altérés ;
- les sables quartzeux résiduels (après décarbonatation) présentent des figures de corrosion attribuables à des conditions alcalines subies antérieurement ( J.-L. RAJOT, 1988).

Ainsi, la dissolution des sédiments carbonatés placés en position de commandement transforme les formations atteintes par les solutions. Elle induit en particulier une redistribution de la silice : discrètes figures de corrosion sur les quartz, ou au contraire, formation de silcrètes en contre-bas. Les entablements formés de place en place par ces derniers arment à leur tour le paysage, en relais des formations calcaires qui les ont nourris.

### CONCLUSION

La formation carbonatée évolue sous un voile sableux podzolisé qui accélère les dissolutions, et sur un substrat sableux épais qui absorbe les produits transportés. Les flux sont concentrés par des puits qui ouvrent progressivement le passage vers la profondeur aux produits issus des altérations superficielles. Ces puits de tailles et de morphologies variées dont certaines sont de type karstique, contribuent à l'amincissement des bords d'affleurements.

Les résidus argileux de décarbonatation nourrissent les évolutions ultérieures. Le lessivage joue un rôle transitoire. L'hydromorphie intervient partout où l'infiltration est lente en milieu acide. L'acidification croît avec la podzolisation, dont les produits entraînés s'accumulent sur le trajet des flux. Les fronts successifs des transformations structurent les différents puits.

## BIBLIOGRAPHIE

BOUCHET D., 1987 - Étude d'un volume brun sablo-argileux compris entre un ensemble sableux supérieur et un ensemble carbonaté inférieur en forêt d'Ermenonville. DEA de pédologie, ORSTOM, univ. Paris VI, 71 p.

BOULET R., HUMBEL F.-X., LUCAS Y., 1982 - Analyse structurale et cartographie en pédologie. II - Une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. Cah. ORSTOM, sér. pédol., vol. XIX, n° 4, p. 323-339.

BREWER R., 1964 - Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley and Sons Inc. 470 p.

BRGM, 1967 - Carte géologique à 1/50 000 de Senlis et notice explicative, 14 p.

LAMOUREUX M., 1972 - Etude de sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse fersiallitique au Liban. Mémoire ORSTOM n° 56, 266 p.

LAMOUREUX M., BELLIER G., HUMBEL F.-X., RAJOT J.-L., 1989 - De l'analyse à la cartographie des structures pédologiques : une première étape en forêt d'Ermenonville. Science du sol, vol. XXVII, n° 1, pp. 49-52.

LAMOUREUX M., BELLIER G., HUMBEL F.X., 1990 - Accumulations argileuses profondes dans le substrat sableux d'une formation carbonatée en forêt d'Ermenonville. Colloques et séminaires, ORSTOM.

POMEROL Ch. et FEUGUEUR L., 1986 - Guides géologiques régionaux, bassin de Paris, MASSON.

RAJOT J.-L., 1988 - Différenciation des sols en forêt d'Ermenonville. Influence d'une formation carbonatée et d'un niveau de "silcrète". DEA de pédologie, ORSTOM - Univ. Paris VI, 63 p.

ROBIN A.M. et DE CONINCK F., 1975 - Interprétation génétique d'un horizon argileux profond ferro-argilique en forêt de Fontainebleau. Science du sol, n° 3, pp. 213-228.

THIRY M., 1988 - Les grès lustrés de l'Éocène du Bassin parisien : des silcrètes pédologiques. Bull. Inf. Géol. Bass. Paris, vol. XXV, n° 4, p. 5-14.

THIRY M., BERTRAND AYRAULT M., GRISONI J.C., MENILLET F., SCHMITT J.M., 1988 - Les grès de Fontainebleau : silicifications de nappes liées à l'évolution géomorphologique du bassin de Paris durant le Plio-Quaternaire. Bull. soc. géol. France, (8), t. IV, n° 3, pp. 419-430.

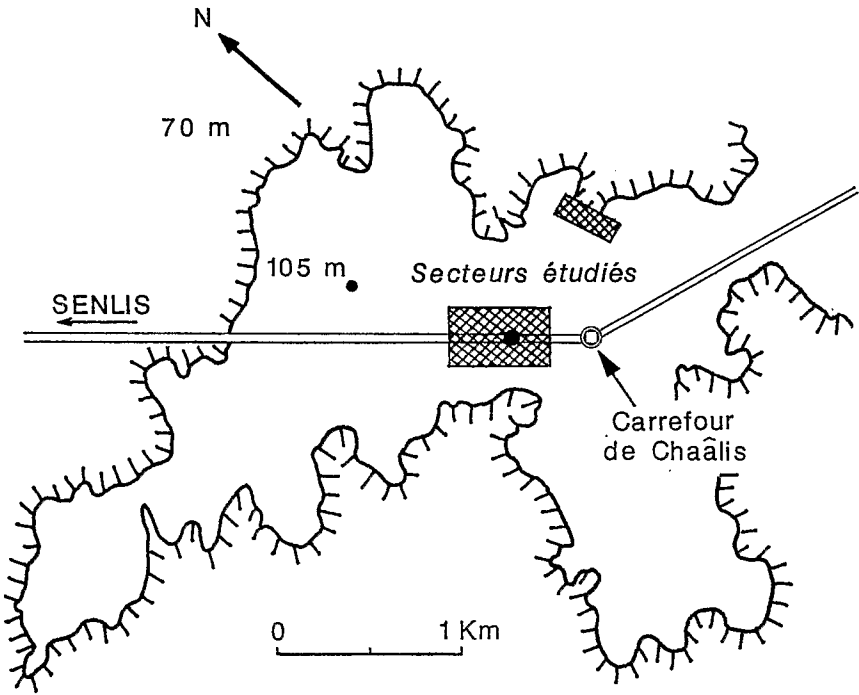


Figure 1 : Plateau de la forêt d'Ermenonville.

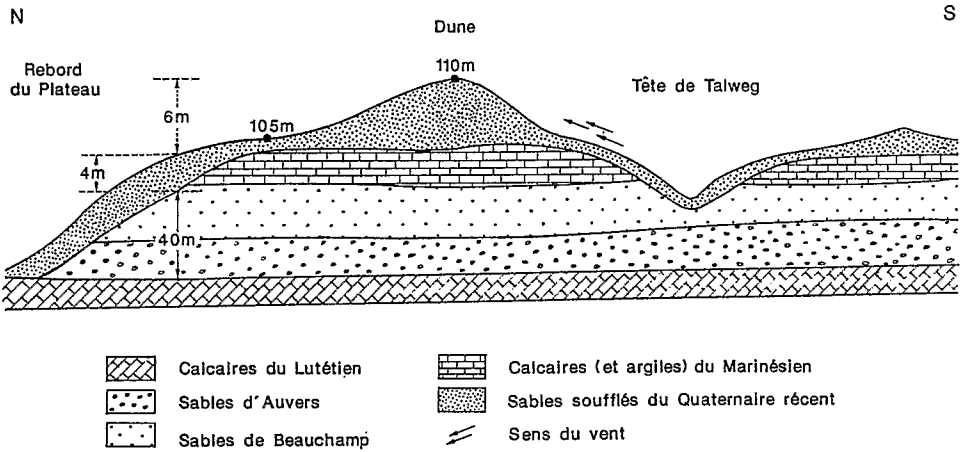


Figure 2 : Coupe stratigraphique simplifiée (d'après Pomerol *et al.*, 1986).

NORD

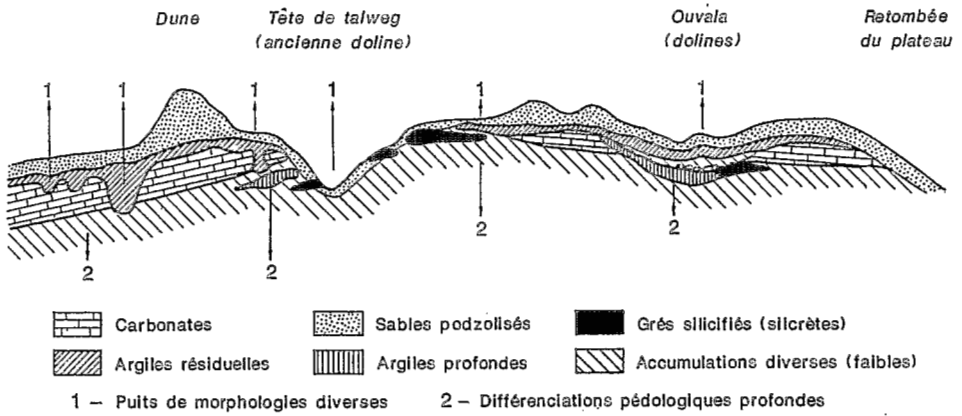


Figure 3 : Coupe schématique du plateau nord :

1. Evolutions par puits de surface ; 2. Différenciations pédologiques profondes.

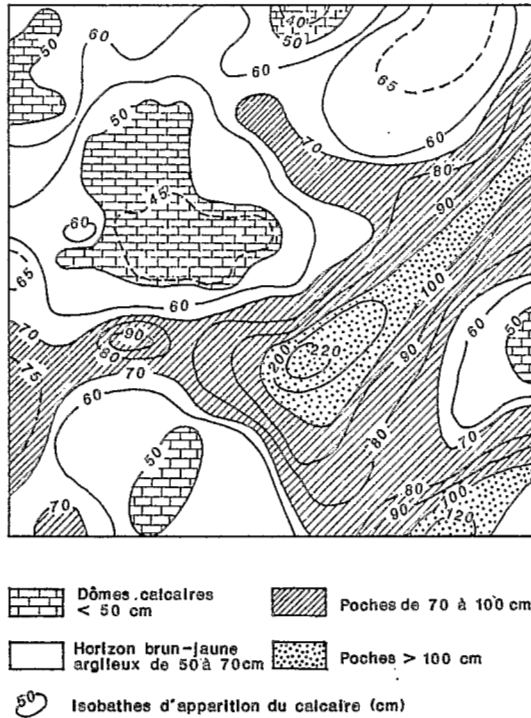


Figure 5 : Réseau de poches de décarbonatation (surface 7 m x 7 m).

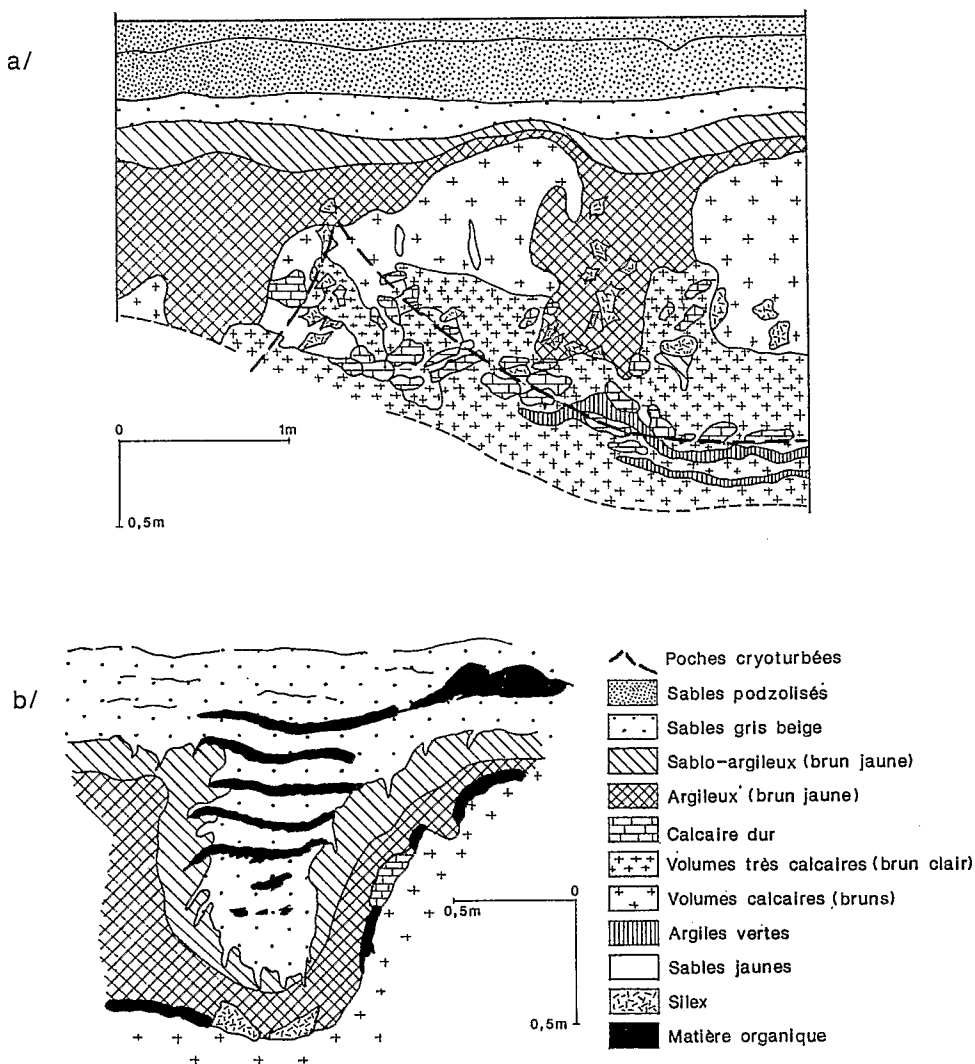


Figure 4 : Relations entre cellules cryoturbées (a) et poches de décarbonatation (b).

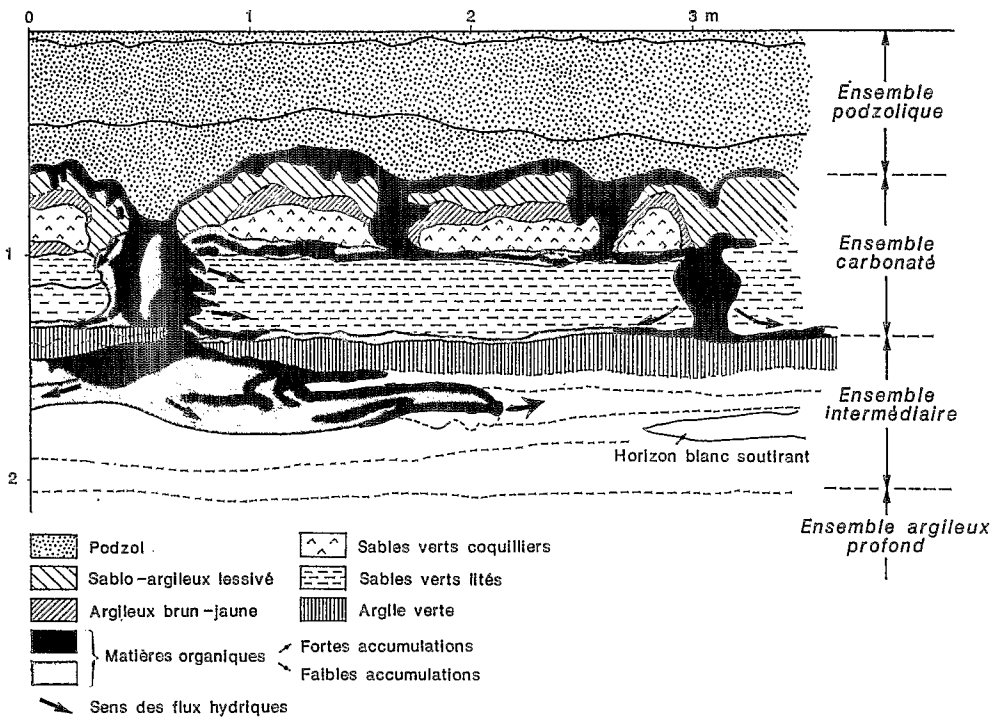


Figure 6 : Cheminées dans le Marinésien altéré (v 17).

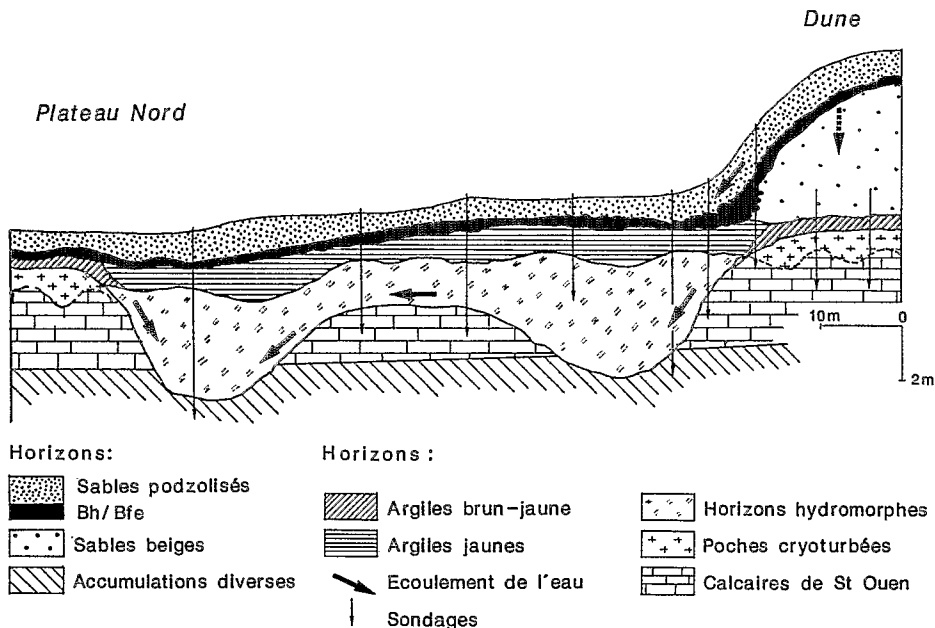


Figure 7 : Cuvettes en pied de dune : effet impluvium et hydromorphie.

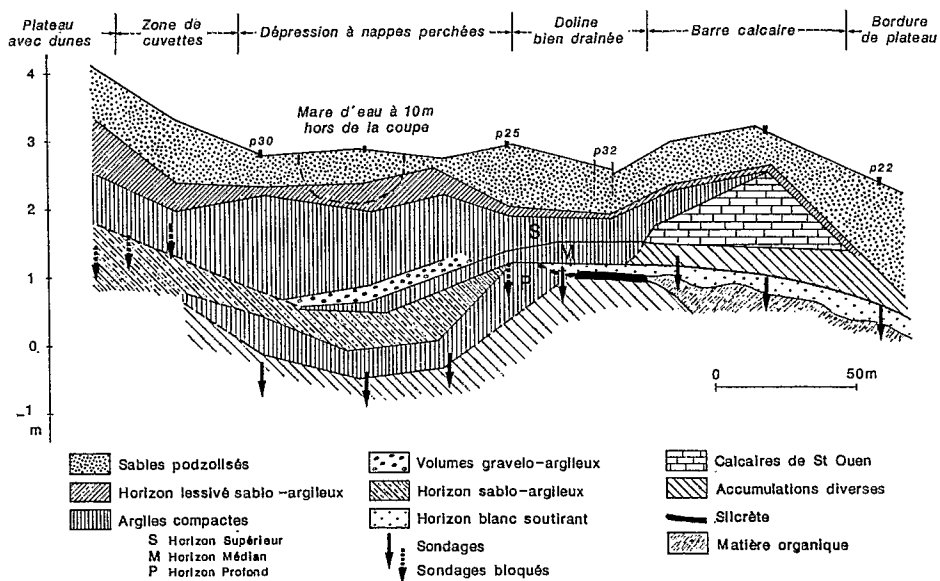


Figure 8 : Coupe schématique de l'ouvala p.

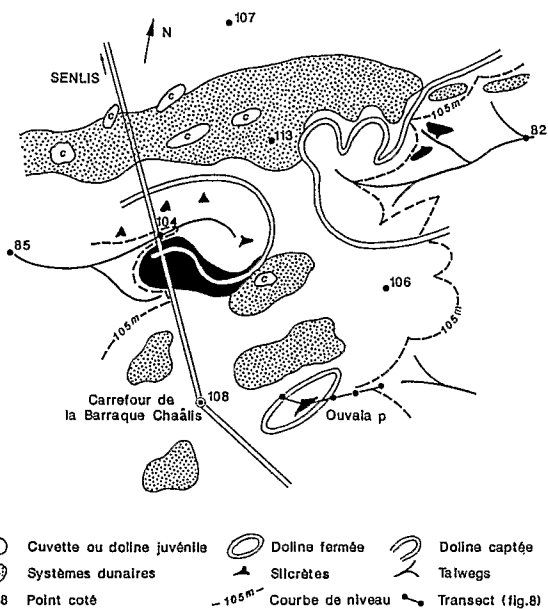


Figure 9 : Relations dans le secteur étudié, entre réseau hydrographique, dolines, silcrètes et dunes.

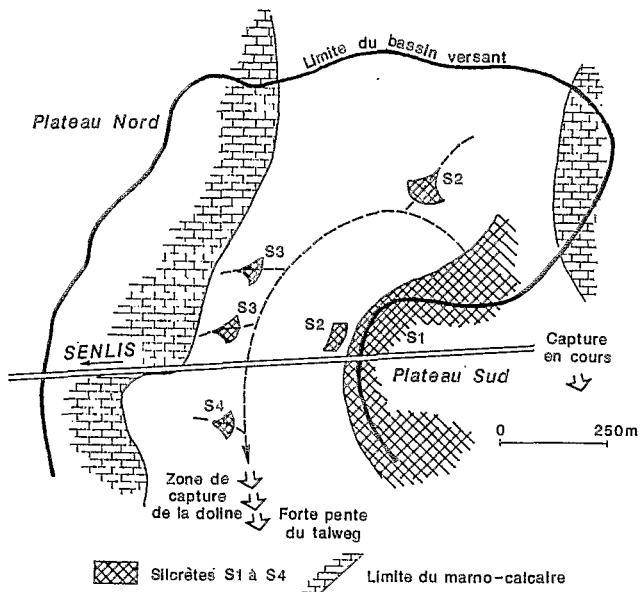


Figure 10 : Tête de talweg et dalles de silcrètes.

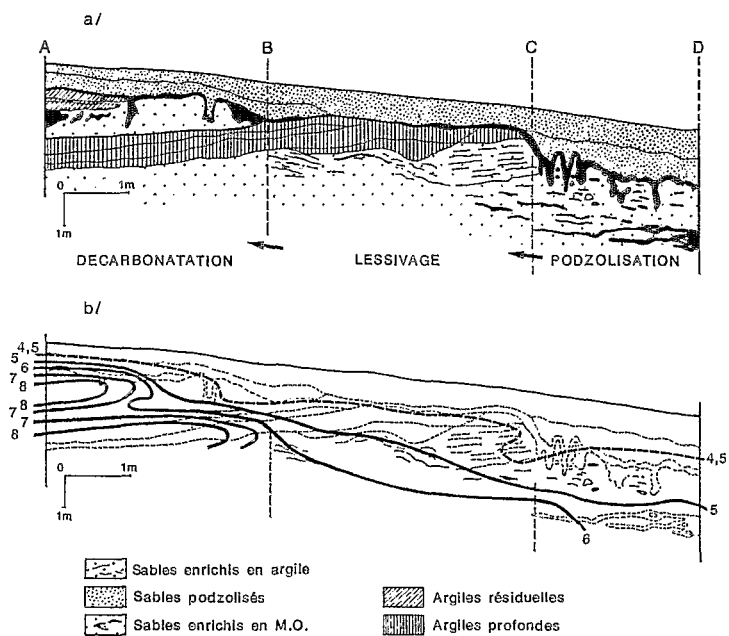


Figure 11 : Fronts de transformation et processus en cours (a) - courbes d'iso - ph(b).