



HAL
open science

**Contribution à l'étude des mécanismes de mise en place
et d'évolution du remplissage de la Baume-Bonne
(Quinson, Alpes-de-Haute-Provence, France): Apports
de l'analyse minéralogique et micromorphologique des
dépôts phosphatés et des dépôts carbonatés**

Brahim Mestour

► **To cite this version:**

Brahim Mestour. Contribution à l'étude des mécanismes de mise en place et d'évolution du remplissage de la Baume-Bonne (Quinson, Alpes-de-Haute-Provence, France): Apports de l'analyse minéralogique et micromorphologique des dépôts phosphatés et des dépôts carbonatés. Archéologie et Préhistoire. Museum national d'histoire naturelle - MNHN PARIS, 1996. Français. NNT: . tel-01045053

HAL Id: tel-01045053

<https://theses.hal.science/tel-01045053>

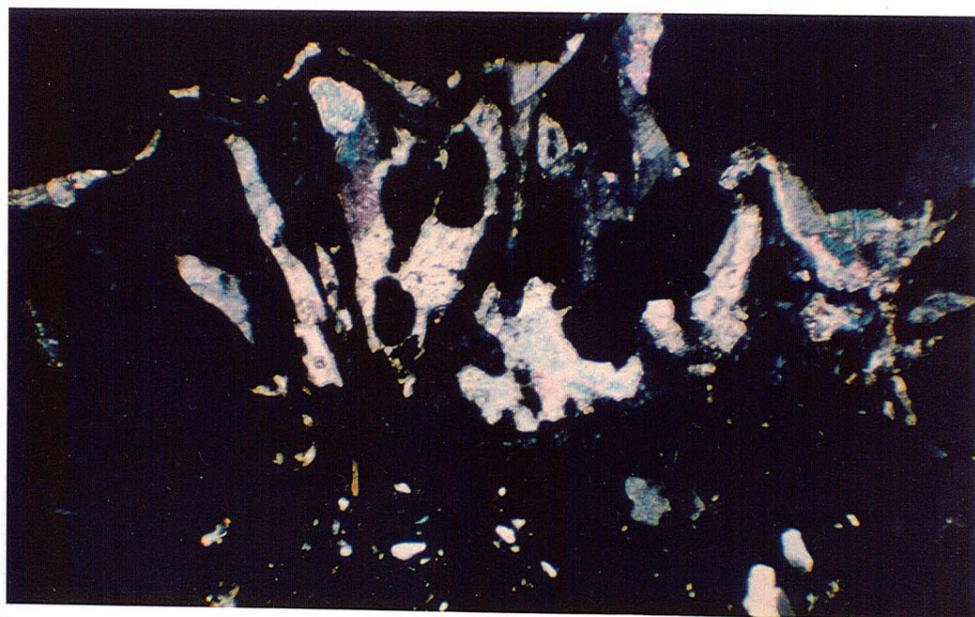
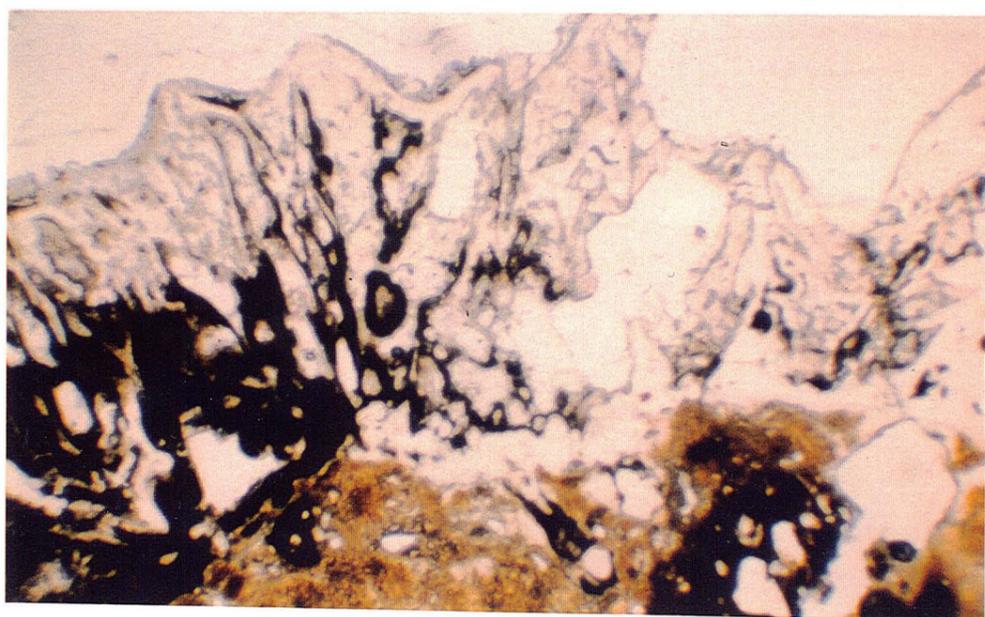
Submitted on 4 Aug 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

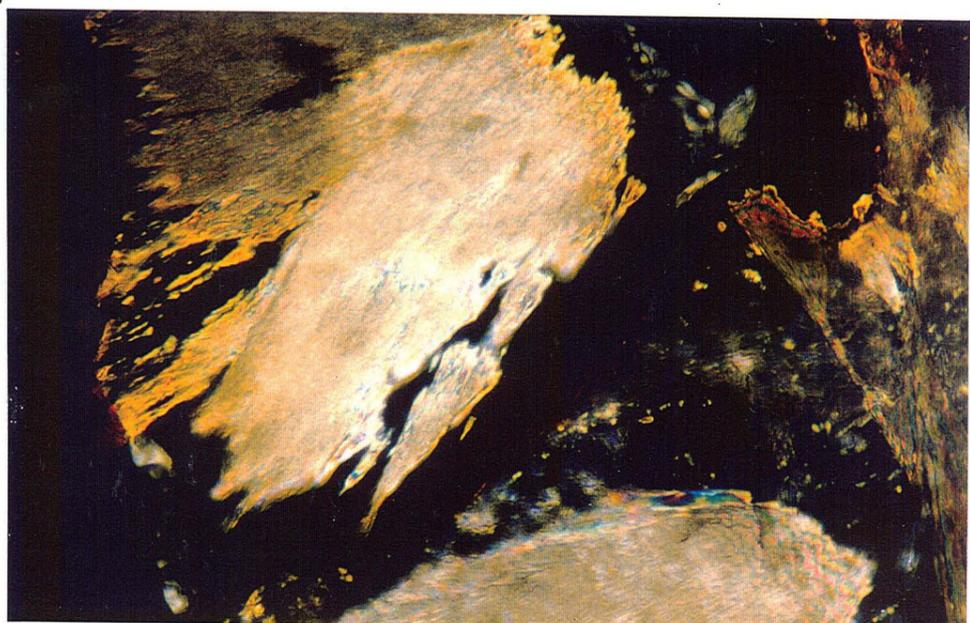
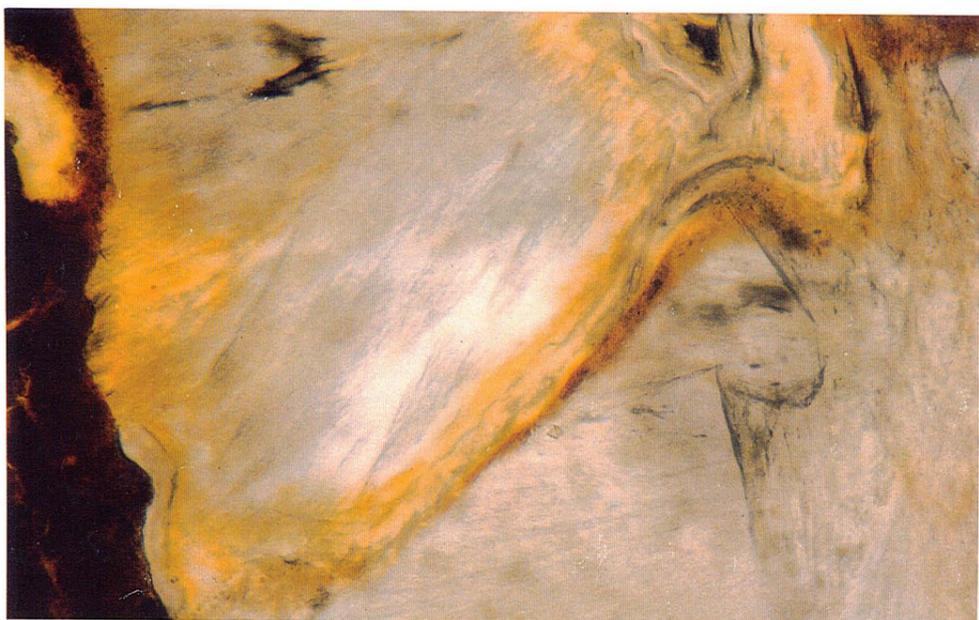
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Photo 9- Base de la carotte P (couloir). Large vide planaire avec un épais revêtement apatitique sombre et très peu biréfringent envahit secondairement par la calcite. a: LN, b: LP, 1 cm = 379 μ m.

Photo 10- Exemple d'envahissement calcitique d'un revêtement apatitique dans la salle. a: LN, b: LP, 1 cm = 38 μ m.

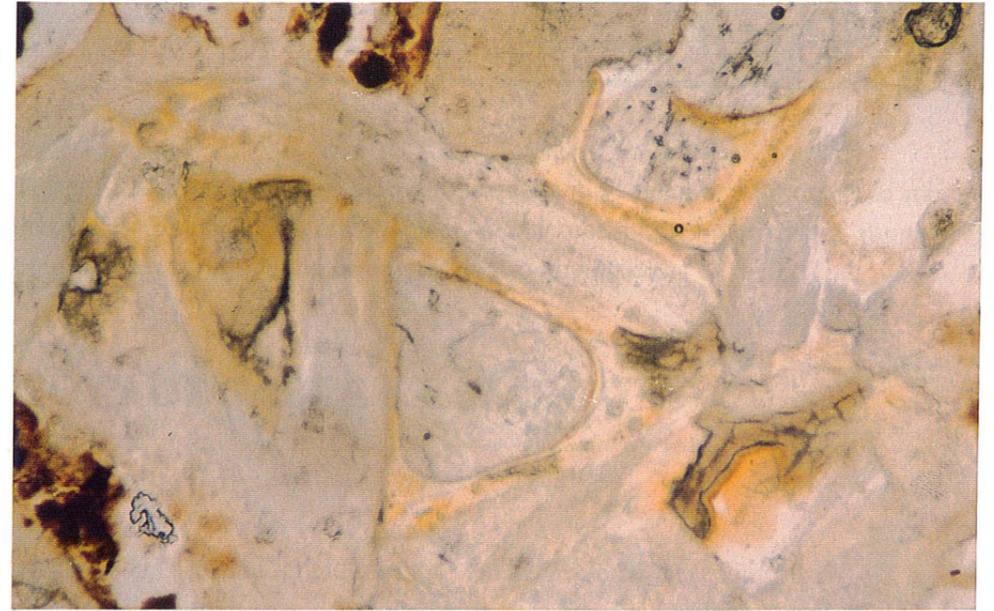


9

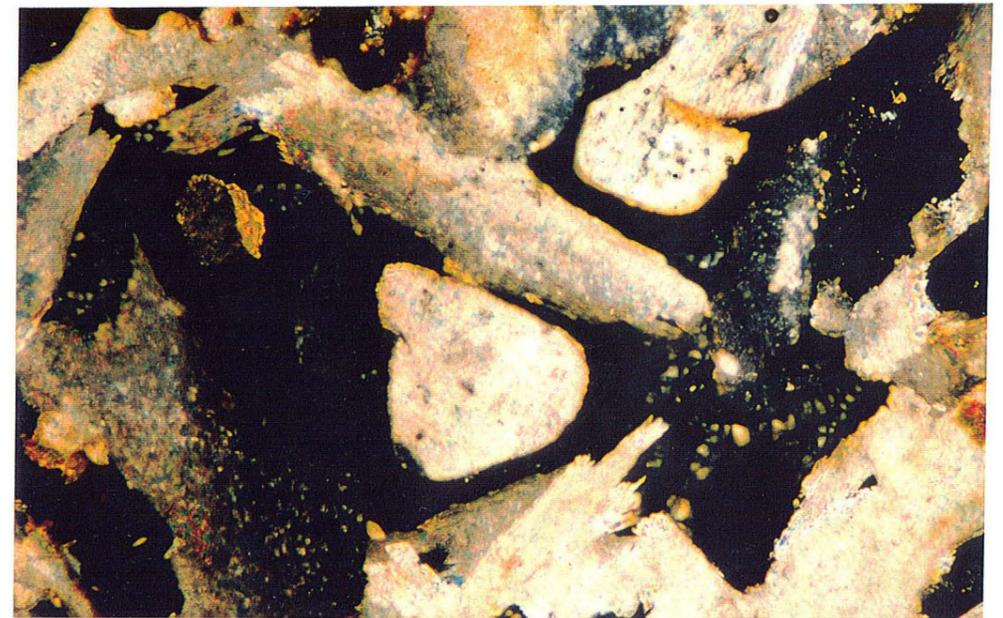


10

Photo 11- Autre exemple d'envahissement calcitique d'un revêtement apatitique dans la salle.
a: LN, b: LP, 1 cm = 76 μ m.



11



CHAPITRE IV SYNTHÈSE MINÉRALOGIQUE

Il s'agit d'une première mise au point permettant de préciser l'apport de la minéralogie. La synthèse des données minéralogiques et microscopiques associées, rapportées aux observations de terrain, permet de distinguer quatre grands types de dépôt.

I. DÉPÔTS DE SABLE ET D'ARGILE

I.1. Caractérisation

Localisés dans l'aven ("grand puits") et en avant de l'aven ("petit puits"). Dans l'aven ils débutent par un dépôt de sable moyen calibré (Tabl. 1) très homogène. Au dessus, vient un dépôt formé d'une alternance de sable grossier et d'argile rouge compactée.

Les observations du terrain montrent une limite brutale entre les niveaux sableux et les niveaux argileux. Ces derniers ne constituent jamais des niveaux continus, mais se biseautent souvent et se perdent latéralement, relayés par des sables grossiers ou moyen.

Les observations microscopiques montrent que les niveaux sableux sont formés par une dominance de grains de quartz arrondis, de micas, de feldspaths et d'une fraction de minéraux lourds. Les quartz et les minéraux lourds sont bien conservés et présentent un aspect frais. Les autres minéraux présentent une altération faible ou modérée selon leur résistance et surtout les plagioclases sont assez bien conservés. La porosité correspond à l'entassement libre de grain, et comme les grains sont grossiers, cette porosité est assez élevée et donne un milieu drainant. Dans les pores plus étroits assez fréquents dans les niveaux proches de la surface, on peut observer des revêtements très minces ou pelliculaire d'apatite autour des grains. Seuls les niveaux profonds et au contact d'un lit argileux présentent à leur base une calcitisation.

La minéralogie de ces niveaux argileux indique la présence d'édifices micacés, du quartz et de la kaolinite. Le quartz et une partie des micas se trouvent sous forme de limons fortement sertis dans la matrice argileuse. Les niveaux argileux peuvent renfermer de l'apatite cryptocristalline en quantité plus ou moins notable, avec des traces de crandallite. L'apatitisation n'est pas uniforme, elle se manifeste d'autant plus que le niveau argileux est proche de la surface et/ou de la paroi calcaire présentant une épaisse carapace apatitique. Par contre la calcite ne se manifeste bien que dans les niveaux du fond et proches de la paroi.

En avant de l'aven ("petit puits"), l'observation macroscopique indique un comblement complexe qui montre à la fois des sables grossiers et argiles rouges côte à côte avec les sables moyens calibrés d'une part, et d'autre part une phosphatation de plus en plus intense au fur et à mesure que l'on s'approche du substratum au point que le dépôt devient blanchâtre et vacuolaire formé principalement par des phosphates et des quartz. La nature minéralogique n'a pu être réalisée. Cependant, la phosphatation constitue un rajout postérieur à la formation

fluviale; de plus son intensité en avant de l'aven montre que la phosphatation est liée à des circulations hydriques postérieures chargées en phosphate qui transitent le long du substratum, qui à cet endroit constitue un collecteur privilégié des eaux.

I.2. Conclusion

Comme constaté déjà sur le terrain, les sables calibrés et les sables grossiers proviennent des alluvionnements du Verdon. La présence, dans un lit grossier de la partie est de l'aven, de restes osseux appartenant à des poissons d'eau douce confirme cette origine.

L'alternance des lits argileux avec les niveaux sableux et la non continuité latérale empêche de considérer ces lits comme horizon d'accumulation d'argile (horizon B_t des pédologues; DUCHAUFOR, 1977), le dépôt étant à l'abri des averses. Les niveaux sableux ne constituent pas un horizon appauvri et ne présentent qu'une faible altération de leurs minéraux les moins résistants. Ces considérations indiquent qu'il ne s'agit pas de différents horizons d'un sol fersiallitique rouge (PERRENOUD, 1993) mais de niveaux sédimentaires.

La minéralogie des lits argileux, exceptées les minéralisations secondaires (phosphatation, calcitisation), est identique à celle de l'argile rouge prélevée au sein du substratum crevassé dans l'abri, à celle de l'argile plaquée contre la paroi rocheuse de l'aven, à celle de l'argile rouge formant la matrice de la brèche et à celle de l'argile de la grotte du Cade. Cette identité minéralogique est en accord avec l'hypothèse d'un apport karstique. Cependant, ces lits argileux peuvent aussi être issus des charriages par le Verdon de paléosols rouges développés dans la région, la fraction argileuse de ces paléosols est constituée d'illite dominante et de kaolinite (SUKENDARMO, 1989).

Les minéralisations secondaires (phosphatation, calcitisation) sont postérieures aux dépôts fluviaux et leur origine se trouve en dehors au profil, leur localisation et leur intensité sont liées à la proximité du substratum ("petit puits" ou zone M3) ou de la paroi ("grand puits", zones N3 et O3).

II. DÉPÔT LIMONEUX À CAILLOUX

II.1. Caractérisation

Ce dépôt est formé par un limon jaune et compact, très riche en micas blancs et en quartz. Dans sa partie supérieure moins épaisse, il renferme des cailloux calcaires de grande taille présentant tous une carapace apatitique importante. Au sommet, cette matrice est homogène et limoneuse.

Il est localisé au dessus de l'aven où il surmonte la formation fluviale (au niveau du "grand puits"). Dans la partie est de l'aven, il est surmonté par le dépôt carbonaté (la brèche).

Les cailloux de ce dépôt se différencient des cailloux du dépôt carbonaté par une plus grande taille et par une carapace apatitique plus épaisse. La matrice se distingue des autres

sédiments fins par une texture limono-argileuse, par la richesse en micas et en quartz et sa couleur d'ensemble jaune.

II.2. Conclusion

Bien que l'étude minéralogique de ce dépôt soit incomplète, plusieurs observations concordent pour faire de ce dépôt une formation à part.

La matrice des cailloux est très fine et ne comporte aucune trace de fragment calcaire détritique, de fragment d'ossement, ou de trace d'activité humaine ou faunique, sauf dans sa partie supérieure où elle est remaniée par le dépôt carbonaté sus-jacent. Les cailloux calcaires sont de plus grande taille, de forme généralement arrondie et pourvus d'une carapace apatitique importante. Ces caractères différencient ce dépôt limoneux à grands cailloux du dépôt carbonaté. À l'est de l'aven, ce dépôt est surmonté par le dépôt carbonaté, ce qui suggère que ce dernier lui est postérieur.

Le dépôt limoneux surmonte le dépôt fluviale au niveau de l'aven, ce qui met le premier en position postérieure par rapport au second.

Malgré le fait que ce dépôt limoneux soit phosphaté et qu'il repose sur le substratum dans la zone M, il est différent du dépôt phosphaté de l'abri (carottes M et N), du couloir (carotte P) et de la salle. La différence provient de la texture du sédiment, de l'absence des petits galets karstiques, de la présence de gros cailloux calcaires et de l'absence de vestiges anthropiques et fauniques, même de la taille des sables.

L'origine et la mise en place de ce dépôt sont délicates à préciser sur la seule base des critères minéralogiques, du reste incomplètes. Ces deux points seront réexaminés lors de l'étude des caractères micromorphologiques en comparaison avec les autres coupes.

III. DÉPÔTS PHOSPHATÉS

III.1. Observations

Ces dépôts ont une grande extension. Ceux du couloir font suite à ceux de la salle et se prolongent dans l'abri, mais apparemment s'estompent aux abords de l'aven, dans la zone M, où ils sont relayés par le dépôt limoneux à grands cailloux. Ces dépôts sont alimentés par l'activité karstique à partir du sédiment limoneux du plateau.

Les différences apparentes de couleur et la non continuité des niveaux tiennent à plusieurs facteurs qui sont :

- l'inégalité du substratum avec des pentes et des surcreusements qui influencent la mise en place et le drainage;
- la position du dépôt dans l'abri-grotte : salle et couloir sous l'influence de gouttières sont humides et frais, l'abri est plus exposé aux facteurs externes;

- les dépôts de l'abri dans sa partie sud sont les plus exposés au climat externe et sont donc très bioturbée par la végétation;
- l'activité anthropique et faunique très abondante (apports organiques et minéraux, bioturbation par creusement des terriers) n'est pas uniforme, ce qui crée des niveaux non continus et de nouvelles conditions d'altération différentielle;
- la quantité et la nature des minéralisations secondaires, surtout les phosphates, qui donnent des nuances et des consistances différentes au sédiment qu'elles affectent. Ces mêmes minéralisations dépendent des facteurs cités plus haut.

III.2. Conclusion

Ces dépôts phosphatés ne peuvent se présenter comme l'équivalent décarbonaté des brèches carbonatées ni du dépôt à matrice limoneuse et à grands cailloux. Il est impensable que tous les cailloux aient subi une dissolution complète sans laisser de trace ni macroscopique ni microscopique et cela même en l'espace de quelques mètres. Dans le couloir, le dépôt carbonaté surmonte le dépôt phosphaté (carottes R et S surmontent la carotte P), ce dernier dépôt est donc antérieur au premier.

L'épaisse couche de faciès particulière qui forme le sommet de la carotte M (couche M5, "amalgame" sur la fouille) a été considérée comme un témoin de la décarbonatation des dépôts phosphatés et un argument en faveur de l'équivalence entre les dépôts phosphatés et les dépôts carbonatés de la partie nord. Cette conclusion est basée sur le fait que cette épaisse couche (M5) renferme des cailloux calcaires, des ossements et de l'industrie avec une matrice fine. Deux considérations vont à l'encontre de cette conclusion :

- d'abord, cette couche ne présente aucune structure macroscopique et une structure complètement excrémentielle poussiéreuse microscopiquement;

- ensuite, elle est constituée d'un matériel hétéroclite qui provient des différents niveaux sous-jacents et alentours. On observe surtout la présence côte à côte d'ossements brûlés, d'ossements non brûlés et bien conservés et d'ossements très altérés, ces derniers n'entretiennent aucune relation apparente avec la matrice qui les renferme (comme observé dans la carotte P). La même observation est faite en ce qui concerne les cailloutis calcaires, on note la présence de cailloux à carapace apatitique de 1 mm ou plus et de fragments calcaires ne présentant aucune trace ni d'apatitisation ni de dissolution, et cela même à une dizaine de mm de distance.

Il en résulte que cette couche n'est pas en place et est complètement remaniée, d'autant plus qu'elle a servi au développement de racines d'arbres. La méthode de fouille appliquée, avant l'arrivée du Professeur de LUMLEY et ses collaborateurs, consistait à ne recueillir que les "belles" pièces lithiques. Ceci peut expliquer la présence de l'industrie dans cette couche. Le remaniement est donc actuel et ne remonte probablement qu'au tout début de la fouille.

IV. DÉPÔTS CARBONATÉS

Ils sont les seuls dépôts à présenter un apport de la paroi. Leur phosphatation est généralement sous forme détritique (restes osseux principalement). Ces dépôts ne s'observent ni dans la salle ni au sud de l'abri. Dans le couloir d'entrée, ils surmontent le dépôt phosphaté après une lacune (vide).

Leur localisation le long de la paroi nord et leur absence dans la salle indiquent que ces dépôts sont liés uniquement à la manifestation de la paroi rocheuse dans sa partie nord et seulement dans l'abri et dans le couloir. Les cailloutis sont issus de la desquamation de la paroi, mais la matrice argileuse rouge qui n'est présente que le long de la paroi nord est issue de cette dernière probablement par activation des fissures qu'on observe dans la paroi nord.

Ces dépôts ont subi l'action de la double pente du substratum, une pente douce de l'ouest vers l'est et une pente abrupte du nord vers le sud qui s'interrompt au niveau de l'axe de l'abri. Il est probable que ces dépôts se soient mis en place par solifluxion à l'état boueux ce qui expliquerait l'absence de contact direct avec les dépôts phosphatés et leur limitation à la partie nord.

TROISIÈME PARTIE
CARACTÈRES MICROSTRUCTURAUX

INTRODUCTION

L'étude des microstructures et des constituants élémentaires de base n'a pu être convenablement faite sans connaissance préalable des différentes minéralisations (nature et mécanismes) affectant les dépôts.

Cette partie est consacrée à la définition de la nature des constituants (minéraux ou non), de leur organisation (macroscopique et microscopique) et l'interaction sédiment hôte/minéralisation secondaire. L'objectif est d'affiner la caractérisation des différents dépôts, la recherche des traits sédimentaires originels et post-sédimentaires et leur classification dans le temps autant que possible. L'ensemble des caractérisations sert de support pour des corrélations plus fines entre les différents dépôts et d'une zone à l'autre.

Dans cette étude, il a été opté pour la conservation de la distinction faite entre les dépôts : phosphatés, carbonatés, fluviatiles. Elle est très pratique et réelle. L'étude a été faite depuis le couloir d'entrée vers la sorite.

Les dépôts phosphatés ont été étudiés en premier et en détail (carotte P, carottes N et O, puis carotte M).

Les dépôts carbonatés ont fait l'objet d'une distinction : carottes R, S et A ont fait l'objet d'une étude conjointe pour leur liaison directe avec la paroi calcaire et la similitude des traits, la carotte J est étudié à part car il s'agit d'un dépôt au fond d'un creux dans le substratum et enfin les carottes B et C conjointement car malgré leur liaison directe avec le dépôts le long de la paroi nord elles présentent des variations nettes.

Les dépôts fluviatiles sont représentés par la carotte G.

Les dépôts à matrice limoneuse jaune et phosphatée emballant de gros cailloutis à carapace apatitique et s'intercalant entre les dépôts fluviatiles et les dépôts carbonatés et bréchifiés (au niveau de l'aven) sont étudiés en dernier et à part. Il est difficile de les rattacher directement aux dépôts phosphatés à cause de leur teneur en cailloux calcaire et ils se distinguent des dépôts carbonatés par la matrice phosphatée et compactée.

CHAPITRE I LES DÉPÔTS PHOSPHATÉS

I. COUPE LONGITUDINALE 3a0 (CAROTTE P)

Pour ne pas encombrer les figures et masquer les microstructures, les néoformations dans les vides ne sont pas représentées dans les figures à petite échelle.

I.1. Couche P1

Elle possède une épaisseur moyenne de 40 cm. Elle est caractérisée par un aspect bariolé, une structure lamellaire, un sédiment fin et compact.

Selon la microstructure et la composition, cette couche présente trois niveaux distincts qui sont du bas en haut :

- Niveau P1a : Caractérisé par une phosphatation quasi complète avec nodulisation.
- Niveau P1b : Caractérisé par son aspect hétérogène dû à la présence de domaines phosphatés jaunâtres, de domaines non phosphatés rougeâtres et des granules de différentes natures.
- Niveau P1c : Caractérisé par la formation de nodules calcitiques et un aspect boueux.

I.1.1. Niveau P1a

I.1.1.1. Description

Il s'agit d'un niveau lamellaire très riche en phosphate, jaune, massif et induré, d'une épaisseur moyenne de 15 cm (Fig. 41).

Aux faibles grossissements, la masse basale est jaune et d'aspect massif. On y distingue des petites concrétions jaunes arrondies d'environ 4 mm de diamètre maximum, une masse jaune allongée horizontalement à allure concentrique, une masse globuleuse grise d'aspect boueux et enfin des agrégats brun-rouge qui se concentrent beaucoup plus au sommet et qui semblent provenir du niveau sus-jacent.

Les macrovides consistent en quelques chenaux ou chambres de 2 mm maximum de diamètre et une fissuration planaire discontinue découpant la masse basale en agrégats lamellaires (Pl. X, Photo 1). Ces fissures, du fait de leur discontinuité, s'interpénètrent et les lamelles ont alors des épaisseurs variables. Quelquefois, les fissures planaires peuvent se joindre par des fissures obliques aboutissant à des agrégats lenticulaires. Ces fissures peuvent atteindre 5 mm d'ouverture.

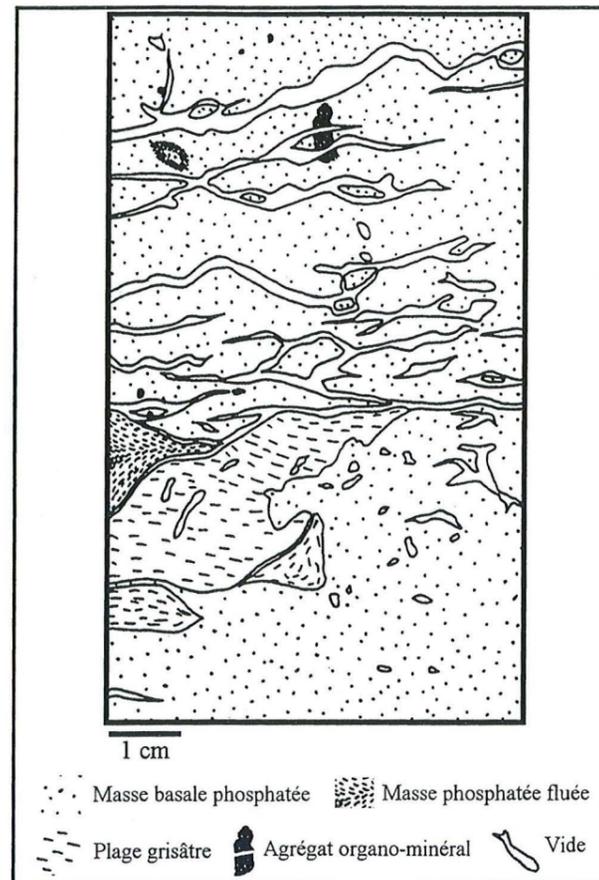


Fig. 41- Niveau P1a : Organisation macroscopique.

A l'échelle microscopique, on constate que la masse basale jaune qui forme l'unité principale est très hétérogène (Fig. 42). L'hétérogénéité est plus manifeste au sommet qu'en bas.

L'essentiel du niveau est formé par un matériel fin très phosphaté. Le plasma est abondant (40%), jaune et isotrope ou faiblement biréfringent dans les tons gris bleutés. Le squelette (60%) est principalement quartzueux avec des paillettes micacées; quelques rares feldspaths, biotite, zircon, sphène et tourmaline de la taille des limons en constituent les minéraux accessoires. La taille des grains de quartz ne dépasse pas 400 μm , ceux ayant une taille comprise entre 100 et 400 μm comptent pour 5% à la base et 20% au sommet. La majorité de ces grains sont anguleux à sub-anguleux, parfois on observe, pour les grains les plus grossiers, un bord anguleux et tranchant alors que les autres bords sont plus émoussés. Les gains de quartz allongés et les paillettes de micas ne possèdent pas d'orientation préférentielle.

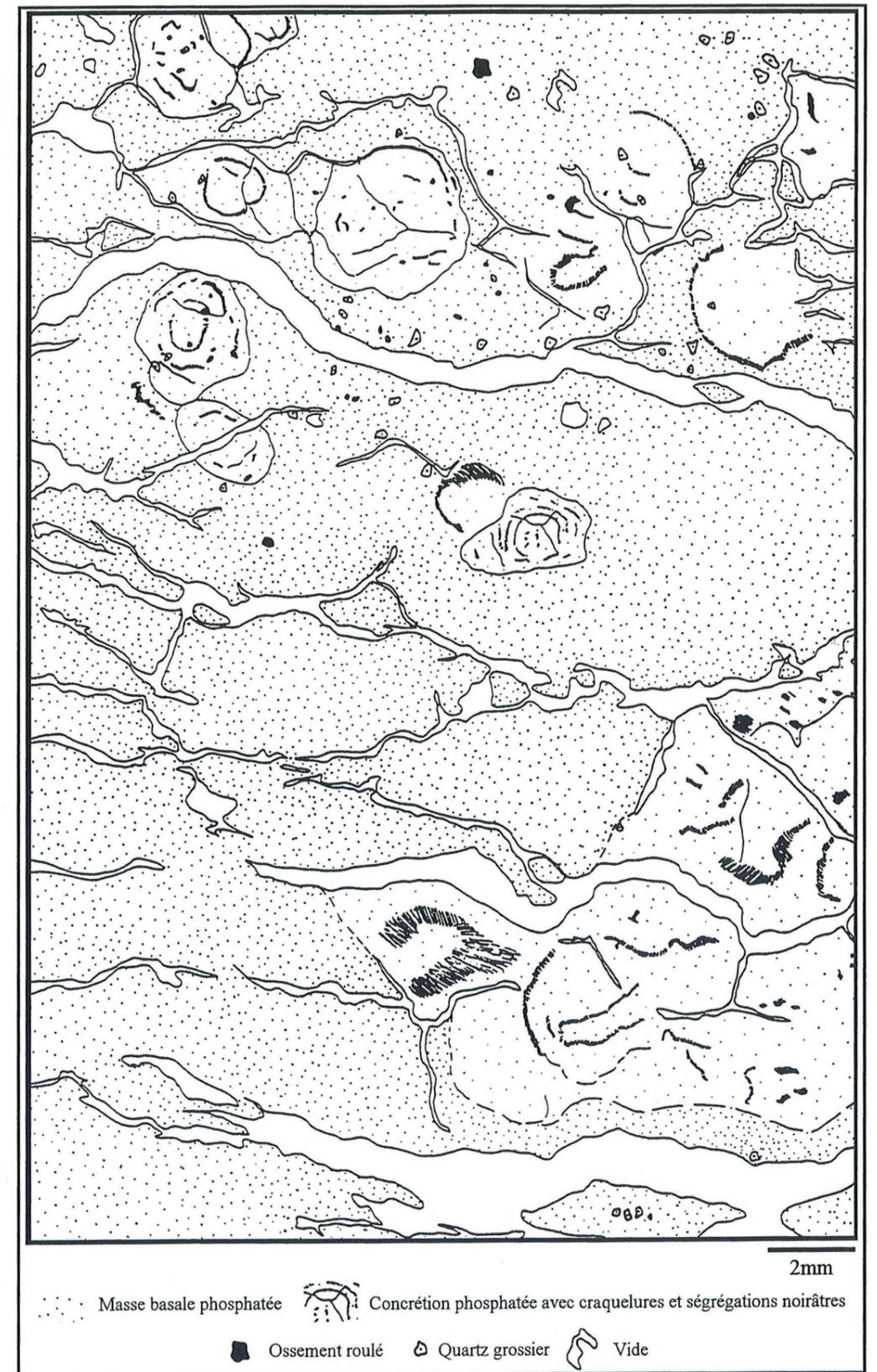


Fig. 42 - Niveau P1a : Organisation microscopique.

Ce matériel donne naissance à des concrétions jaunes ou jaune pâle et de taille variable, les plus grosses et aussi les plus rares peuvent atteindre 4 mm de diamètre et une forme arrondie; elles sont denses et sans porosité apparente (Fig. 42). Ces concrétions se différencient de la masse basale par une fissuration courbe continue dans la plupart des cas et signalée par un fin liseré noirâtre d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse. Cette fissuration peut n'être qu'une ébauche ce qui est un indice d'une formation *in situ* de ces concrétions aux dépens de la masse basale. Elles montrent un aspect concentrique mis en évidence par des ségrégations noirâtres, possèdent des craquelures qui prennent naissance au centre et un squelette analogue à celui de la masse basale mais de plus petite taille et en plus faible proportion (30%).

La base est caractérisée par un plasma grisâtre isotrope, dense et uniforme, au sein duquel baigne un squelette très fin (200 μm au maximum) formé principalement de grains de quartz anguleux et de quelques paillettes micacées. Le squelette constitue environ 10 %. L'ensemble forme une masse grisâtre continue ou bien donne naissance à de petites concrétions disséminées et aux contours irréguliers atteignant 1 à 2 mm pour les plus grosses.

Le sommet montre un enrichissement relatif en grains de quartz de 300 à 400 μm , quelques rares grains jaune-orange arrondis, quelques granules en grès et ovales de 5 mm, quelques débris anguleux de silex n'excédant pas 500 μm et des agrégats organo-minéraux brun-rouge. Dans les plages phosphatées, l'espace entre les grains du squelette peut être complètement rempli par un plasma phosphaté jaune et isotrope, sauf quelques plages restreintes de quelques dizaines de microns présentant parfois une faible biréfringence dans le gris bleuté du premier ordre et prenant alors un aspect mamelonné (granulaire). Dans les rares plages non complètement phosphatées, l'espace intergranulaire est rempli par un plasma argileux (< 10 μm), il s'agit de plages résiduelles entourant des grains de quartz ou tapissant d'anciens vides. Cette fraction fine est très poussiéreuse car riche en paillettes de mica et en grains de quartz, colorée en brun-rouge, avec un litage discret et très faiblement biréfringente. Enfin, ce plasma argileux, ou bien les vides, renferme des sphérules de fer et/ou de manganèse, de quelques microns de diamètre, dispersées dans la masse et parfois accolées les unes aux autres en chaîne. Ces sphérules rouge sombre peuvent, parfois, montrer un cœur et une bordure encore plus foncée. Cette structure évoque des précipitations bactériennes. Les grains jaunes très émoussés, arrondis ou ovalaires et sans biréfringence, présentent une fissuration très fine et parallèle qui rappelle celle des restes osseux, leur taille variable ne dépassant pas le millimètre. Les agrégats brun-rouge sont arrondis ou allongés horizontalement avec un contour qui peut être franc ou diffus, et une zone externe au contact de la masse basale qui présente parfois une coloration jaune à jaune-rouge accusant une décoloration naissante et montrant une argile micacée de faible litage. Le squelette est identique à celui de la masse basale environnante. Ces agrégats, dans les zones de concentration, s'alignent horizontalement le long de la fissure planaire constituant la limite supérieure du niveau. Ils ne sont pas phosphatés mais pris, comme pour le squelette de la masse basale, dans le ciment phosphaté. Les plus grands sont en fait constitués par un accollement de plusieurs agrégats de plus petite taille.

La fissuration planaire est postérieure puisqu'elle affecte tous les constituants cités sans distinction. Cette fissuration sert à une structure d'accueil pour des recristallisations phosphatées, calcitiques et ferro-manganifères. La fissuration planaire découpe le sédiment en

agrégats lamellaires, mais elle découpe aussi les constituants élémentaires et les minéraux soit directement soit indirectement par la création de tensions élevées fracturant les éléments quelle que soit leur nature. Ainsi, les agrégats organo-minéraux, les granules en grès, les grains de quartz et les paillettes micacées présentent tous un effritement à toutes les échelles, enrichissant secondairement le plasma et le squelette tant sur le plan granulométrique que sur le plan minéralogique (par exemple l'apparition de la glauconie et des grains de quartz grossiers est liée uniquement à la désagrégation du grès, enrichissement des minéraux argileux en illite par désagrégation mécanique de la muscovite, la coexistence de grains de feldspath à divers degrés d'altération).

Le dernier événement observé est directement lié à cette fissuration nouvelle. Il s'agit de néoformations d'oxydes de fer et de manganèse, d'apatite et de crandallite et de calcite.

I.1.1.2. Discussion

La finesse du matériel détritique par rapport au niveau sus-jacent et sa composition principalement quartzreuse semblent indiquer une double origine : une accumulation des fins à la base et la phosphatation qui se fait par remplacement du matériel originel.

L'individualisation des concrétions phosphatées s'est faite progressivement à partir d'un matériel boueux riche en phosphates. Cette phosphatation nodulaire transforme et efface complètement la structure et la texture originelles.

I.1.2. Niveau P1b

I.1.2.1. Description

Épaisseur moyenne de 20 cm. Ce niveau est très hétérogène et bariolé du fait de la juxtaposition d'unités phosphatées, calcitisées et purement détritiques (Fig. 43 et Fig. 44).

Les unités ou les agrégats sont millimétriques. D'aspect massif, ce niveau est bariolé en jaune, gris, brun rougeâtre. Il est beaucoup plus riche en agrégats brun-rouge, granules et "galets karstiques" (2-3% environ) essentiellement en grès ainsi qu'en outils en silex. L'arrangement en agrégats lamellaires persiste, les concrétions phosphatées jaunes sont présentes mais en plus faible quantité et souvent mal individualisées alors que les concrétions phosphatées grises disparaissent.

La macroporosité est de même type que pour le niveau sous-jacent mais beaucoup plus fine tandis que les vésicules et les chambres augmentent en nombre et en taille. Ce niveau est beaucoup plus travaillé biologiquement (activité racinaire).

La masse basale n'est pas complètement envahie par les phosphates. Elle possède une plus grande teneur en grains de sable plus grossiers, en granules de grès, en concrétions ferromanganiques et en fraction argileuse non phosphatée. La masse basale montre aussi des plages de ségrégation différentielle et une porosité biologique plus développée.

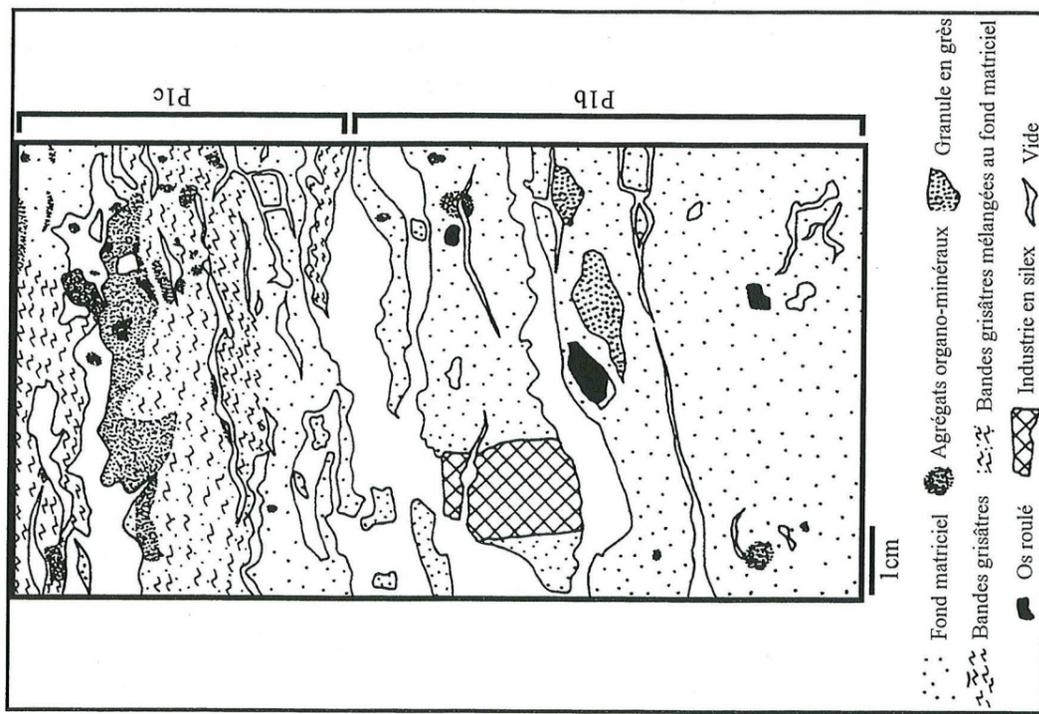


Fig. 44- Niveau P1b sommet : Organisation macroscopique.

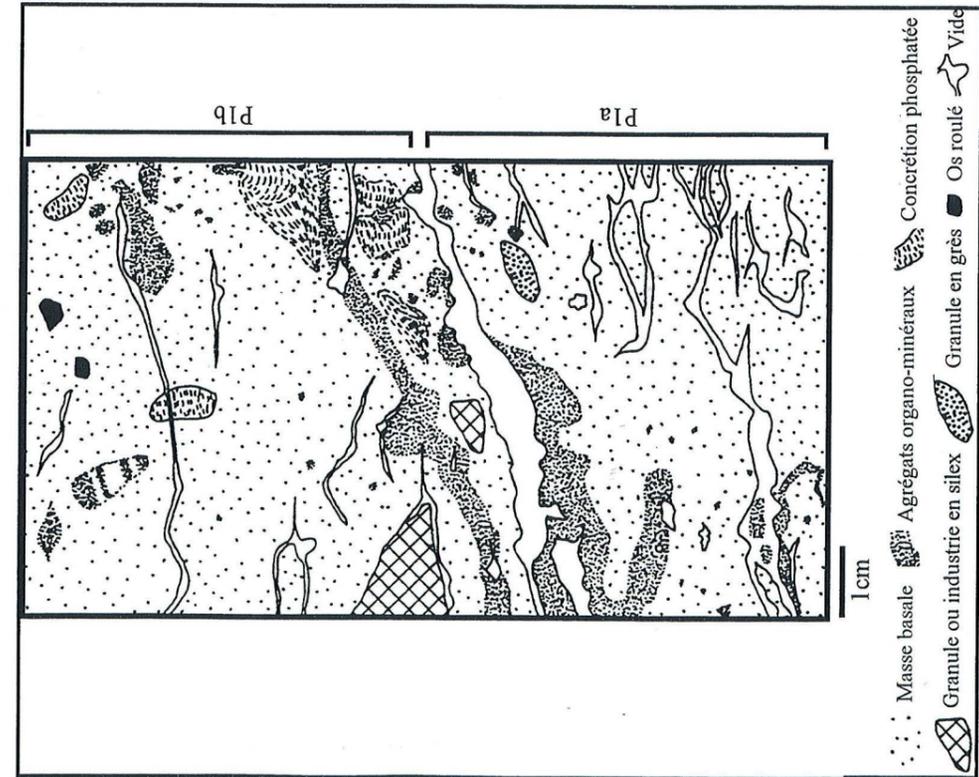


Fig. 43- Niveau P1b base : Organisation macroscopique.

La fissuration planaire donne au niveau P1b une structure lamellaire, mais à l'intérieur de chaque lamelle, le matériel s'organise en agrégats plus ou moins arrondis selon la nature; la porosité est alors due à l'entassement quand elle ne résulte pas de bioturbation (Fig. 45-46-47).



Fig. 45- Niveau P1b base : Organisation microscopique.

La masse basale comprend des zones phosphatées et des zones non phosphatées. Les premières sont caractérisées par une forte concentration limono-sableuse alors que les secondes sont caractérisées par une forte concentration argileuse et argilo-limoneuse, parfois limono-sableuse.

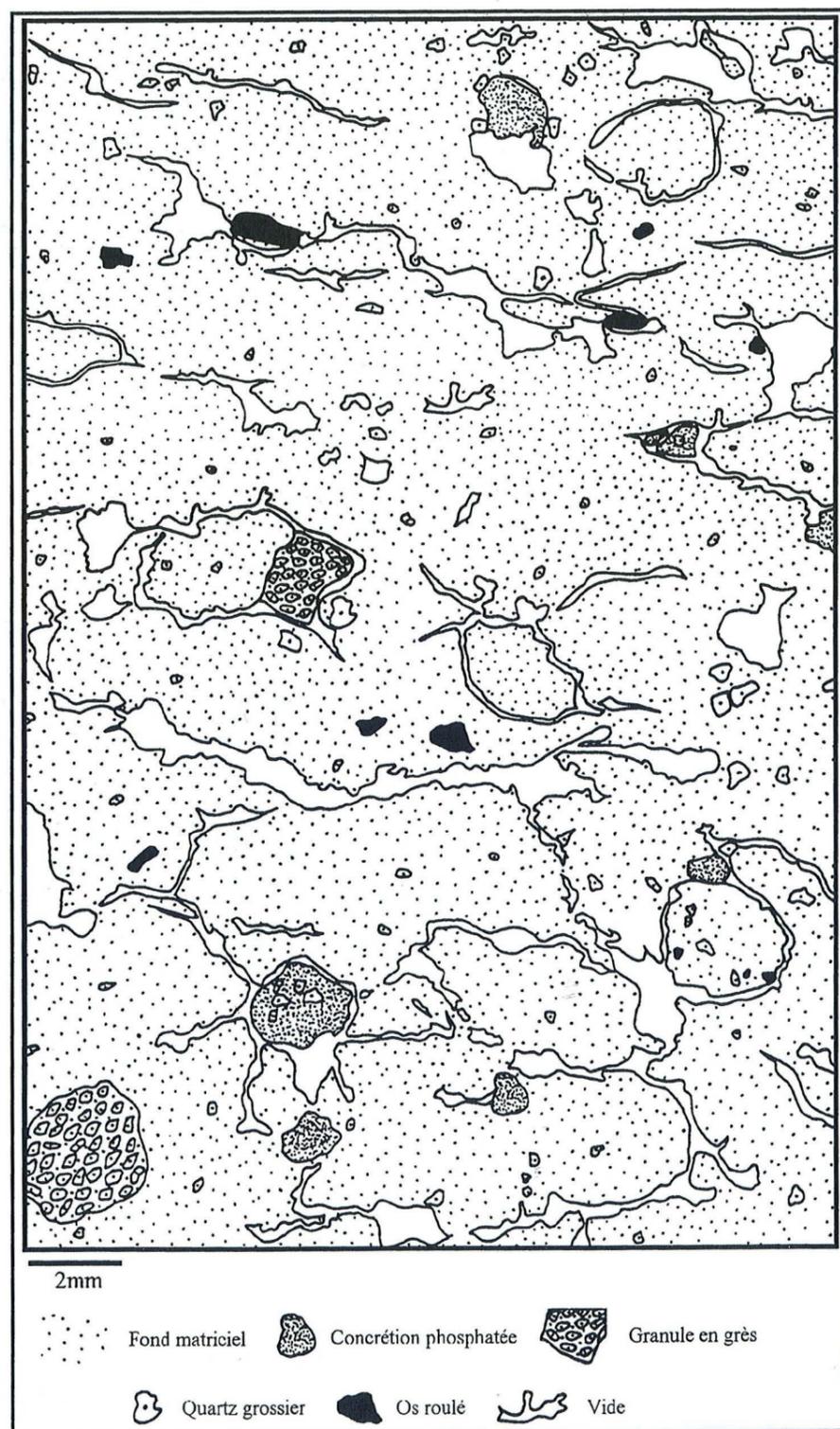


Fig. 46- Niveau P1b moyen : Organisation microscopique.

D'une manière générale, le squelette est plus riche en grains de quartz de la taille des sables, cependant ceux qui dépassent 400 μm restent faibles (5% environ) et ont une forme sub-arrondie, alors que ceux ayant une taille entre 100 et 400 μm représentent environ 25-30% et ont une forme anguleuse à sub-anguleuse. Notons l'apparition des grains de quartz polycristallin qui comptent pour environ 10% de l'ensemble des grains de quartz.

Que ce soit dans les plages phosphatées ou non, les grains de quartz du squelette sont presque tous cariés et fissurés. Ils subissent une désagrégation sur place enrichissant le sédiment en grains plus fins (Pl. X, Photo 2). Entre les fragments d'un même grain, on observe fréquemment une recristallisation de l'apatite et/ou de la calcite et dans de nombreux cas, on remarque que ces fragments gardent la même orientation optique que le grain originel. Dans d'autres cas, au lieu d'une recristallisation, on assiste dans ces fissures à une injection de matériel plus fin (argilo-limoneux) avoisinant. Les micas (10% dont 2% de biotite) et les feldspaths (5% dont 1% de plagioclases) présentent le même habitus que dans le niveau sous-jacent et sont toujours plus altérés au sein des plages phosphatées (Pl. X, Photo 3). Accessoirement et pour moins de 1% on trouve du zircon, de la tourmaline, du sphène, de la staurotide, du grenat et de la glauconie.

Les plages argileuses et argilo-limoneuses sont toujours liées et alternes. Elles sont liées à des ségrégations différentielles s'opérant au sein de la masse basale (Fig. 48; Pl. X, Photo 4).

Les plages argileuses couvrent environ 5-10%. La plupart du temps, elles sont en hyporevêtement des vides, sur une partie de la face supérieure ou inférieure des gros éléments ou en revêtement continu des grains de quartz grossiers. Dans d'autres cas plus rares, elles s'intègrent à la masse basale (Fig. 45).

Quelle que soit leur teinte (brun-rouge, jaune-rouge, jaune pâle ou grisâtre), ces argiles ont en commun la grossièreté, l'état poussiéreux, une faible à très faible biréfringence et le litage plus ou moins exprimé (fréquemment signalé par l'alignement de minuscules paillettes micacées). La teinte brun-rouge plus ou moins foncée est liée à la présence du fer complexé à la matière organique colloïdale (Pl. X, Photo 5).

Ces argiles se présentent comme des revêtements de vides structuraux et/ou biologiques existant avant la fissuration planaire. Certains de ces vides sont polyconcaves, où les argiles épousent parfaitement la forme des creux entre lesquels on observe l'intercalation de matériel limoneux.

Ces ségrégations différentielles ont une direction verticale ou oblique et on assiste dans plusieurs cas à une succession verticale de bas en haut d'argile / argile limoneuse / limon / sable limoneux. Elles sont recoupées par la fissuration planaire et lui sont donc antérieures.

De très rares plages éparpillées de quelques centaines de microns sont formées d'une argile jaune, très fine, bien orientée, pure, à biréfringence élevée et à extinction en croix. Ce type semble colmater d'anciens vides, il est donc antérieur aux types précédents.

Les gros éléments (> 2 mm) ont une taille maximale de 1 cm et sont essentiellement en grès, parfois en fragments anguleux de silex ou en quartzite (2 à 3 mm maximum) qui sont interprétés comme débris de taille ou d'utilisation de l'industrie lithique. Les granules en grès sont déchiquetés et le produit est alors disséminé dans la masse l'enrichissant ainsi en grains de quartz grossiers et fins ainsi qu'en paillettes de micas et en minéraux accessoires, notamment en glauconie (Pl. X, Photo 6).

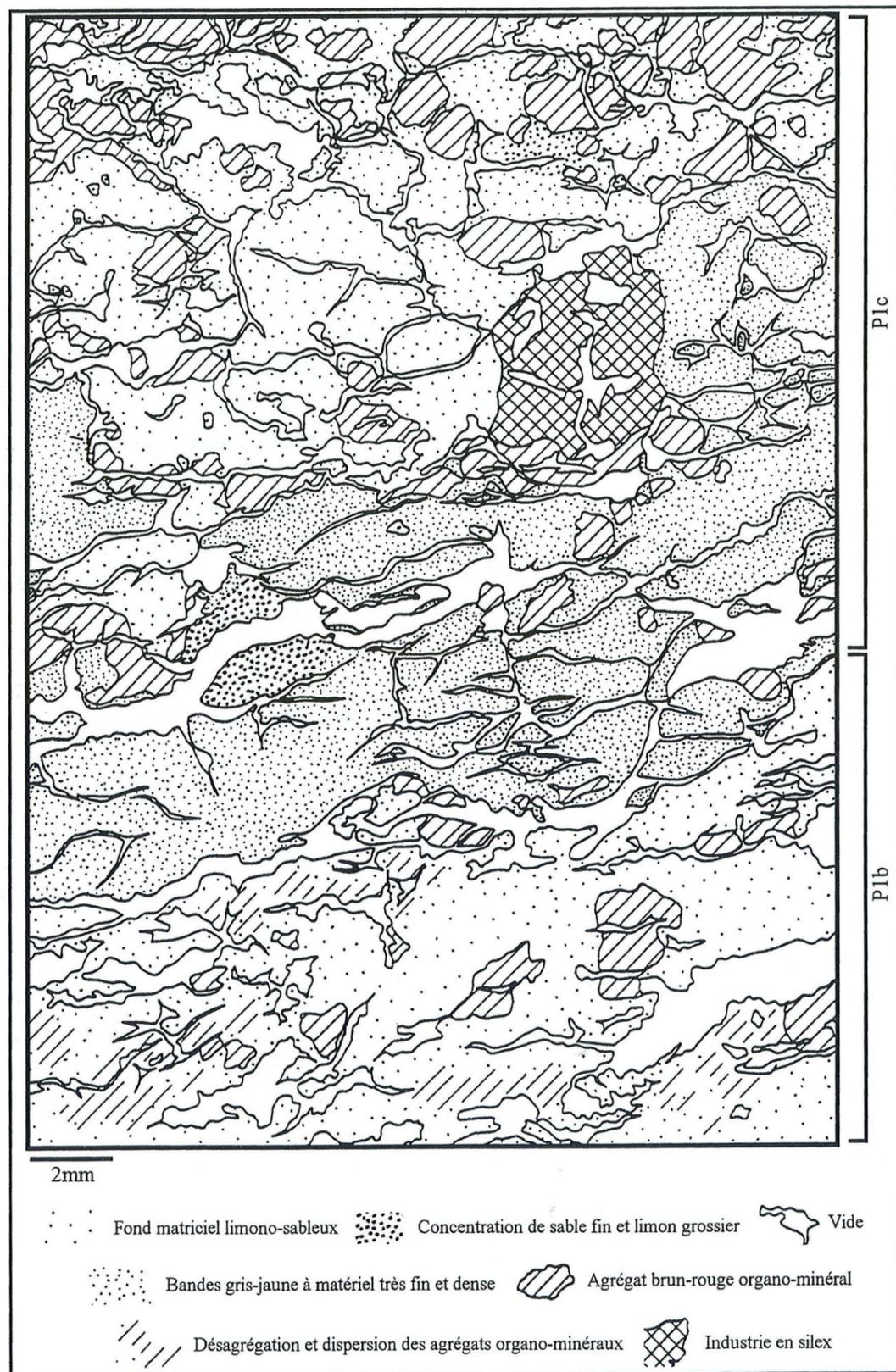


Fig. 47- Niveau P1b sommet : Organisation microscopique.

Les agrégats brun-rouge possèdent un squelette essentiellement quartzeux fin avec de rares grains de quartz grossiers accompagnés de paillettes micacées et de grains phosphatés jaunes portant de fines craquelures. Ce squelette est tout à fait analogue à celui de la masse basale. Ces agrégats montrent des petites plages ou auréoles de déferrugínisation qui sont jaunes et faiblement biréfringentes (en fait cette biréfringence est liée à la présence de paillettes micacées et des grains de quartz dont la taille est inférieure à 10 μm). A l'intérieur des agrégats se développent des vides intergranulaires ou vésiculaires (10-20% de la surface de l'agrégat) comblés totalement ou partiellement par des argiles jaune-orange en LN et jaunes en LP avec une extinction roulante. Ces argiles paraissent grossières de taille et de litage et faiblement biréfringentes, le plus souvent de fines paillettes micacées s'orientent dans le sens du litage qu'elles soulignent. Par contre les plus grands vides communs aux concrétions et au fond matriciel sont dépourvus de ces argiles.

Les agrégats brun-rouge sont de deux types. Le premier est de petite taille (< 1 mm), de forme arrondie ou ovalaire, à squelette essentiellement quartzeux très fin et de couleur brun-rouge foncé. Le second type est de taille plus importante (5 à 10 mm) mais de même squelette que le premier; un système fissural complexe secondaire ou hérité et réactivé les découpe en agrégats de plus petite taille. On trouve alors une filiation directe entre les petits et les grands : déchiquetage *in situ* des plus grands et dissémination du produit dans la masse (Fig. 45 et Fig. 47).

Les éléments phosphatés consistent soit en grains jaunes à jaune-orangé de toutes tailles (500 μm maximum), à contour net, très émoussés et parfois fragmentés, ces grains sont disséminés dans toute la couche et on les trouve même au sein des agrégats brun-rouge; soit en concrétions jaunes aux contours nets, arrondies semblables à celles du niveau sous-jacent, soit allongées et dépourvues de manganèse, et celles aux contours irréguliers et diffus, sont formées d'un ciment phosphaté jaune dans lequel baignent des grains de quartz. Ces concrétions phosphatées sont identiques à celles du niveau sous-jacent mais leur surface n'atteint que 20% de la lame; on observe toujours que les concrétions diffuses ont un squelette beaucoup plus important que les concrétions bien individualisées.

Comme pour le niveau sous-jacent, le système fissural planaire est secondaire puisqu'il découpe toute des unités préexistantes. La porosité antérieure est composée de vides d'entassement, des vides polyconcaves, de chenaux, de vésicules et de chambres, avec une taille variable (2 mm maximum). Les vides servent de structures d'accueil à des précipitations secondaires de phosphates, de la calcite et de fer et manganèse.

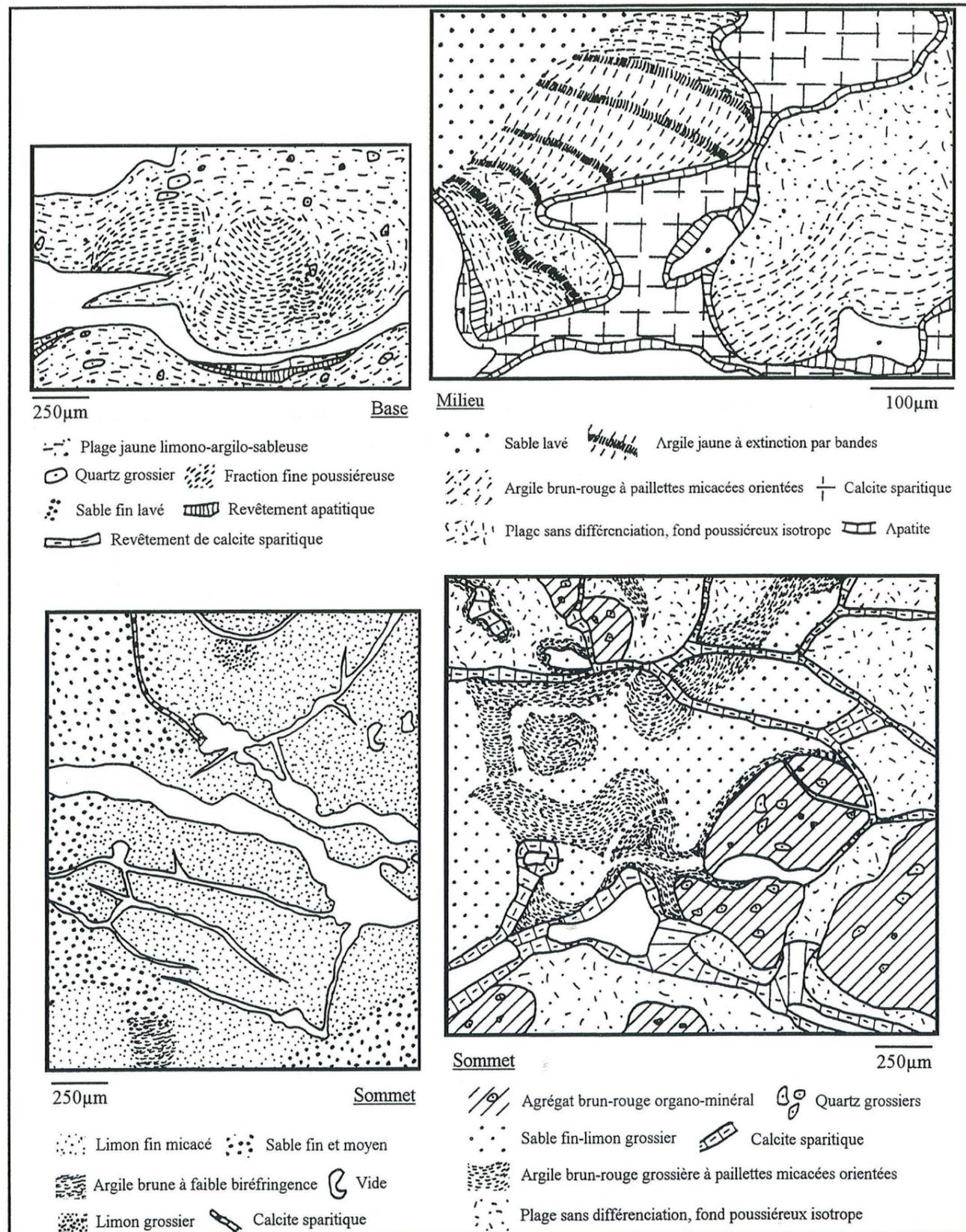


Fig. 48- Niveau P1b : Exemples de traits texturaux.

I.1.2.2. Discussion

Le fait que les agrégats brun-rouge possèdent des revêtements complexes, et qu'ils sont eux-mêmes pris dans le ciment phosphaté (lorsqu'il existe) prouve leur antériorité aux accumulations texturales et à la phosphatation. Le fait aussi qu'ils possèdent un squelette identique à celui de la masse basale, y compris les grains phosphatés, prouve leur formation après dépôt et après anthropogénisation et ne sont nullement hérités du plateau. Leur coloration brun sombre indique la coexistence de fer et de la matière organique. Leur forme arrondie indique une réorganisation profonde du sédiment originel.

La complexité et la généralisation des traits texturaux indiquent une restructuration post-sédimentaire affectant un sédiment saturé en eau et susceptible de se déplacer.

La fissuration planaire fine ou grossière est responsable de la désagrégation mécanique des constituants à tous les niveaux et à toutes les échelles, soit directement soit indirectement par création de tensions élevées lors de l'ouverture de ces fissures. Ainsi, les grains de quartz grossiers proviennent essentiellement de la désagrégation des granules et des gros galets en grès d'origine anthropique. Cette désagrégation enrichit le sédiment en éléments plus fins d'une façon continue et en éléments accessoires (contribuant ainsi au renouvellement du stock en minéraux altérables).

I.1.3. Niveau P1c

I.1.3.1. Description

Ce niveau est local et n'est pas continu. D'une épaisseur moyenne de 5 cm, il est caractérisé par l'individualisation et l'accumulation de nodules calcitiques.

Il s'agit d'un limon sableux laminé (Fig. 44 et Fig. 49). Composé du même matériel que le niveau sous-jacent, il se sépare en bandes rougeâtres parallèles et sub-horizontales, qui alternent ou se juxtaposent avec des bandes grisâtres à matériel plus fin et plus compact. Ces bandes sont entrecoupées ou bien surmontées par des concrétions blanc-grisâtre qui réagissent vivement à l'acide chlorhydrique. Les bandes et les concrétions grisâtres sont très indurées. Ce niveau à une épaisseur de 5 cm en moyenne et n'est pas continu, il disparaît progressivement en allant plus à l'est de la coupe. Il s'agit donc d'un niveau local.

Ce niveau est individualisé par deux grandes fissures, celle du bas à une ouverture de 1 cm en moyenne, celle du haut est de 0,5 cm en moyenne.

On observe la même fissuration planaire qui découpe le sédiment en bandes ou lamelles, seules les lamelles grisâtres sont homogènes, les lamelles rougeâtres montrent la même hétérogénéité que dans le niveau sous-jacent (Fig. 47).

La disposition relative des bandes entre elles présente une certaine variation verticale. En bas, les deux bandes alternent. Au milieu, elles s'entrecroisent et se juxtaposent, à ce niveau la zone de contact située à même hauteur présente un mélange des deux bandes et parfois un ébauche d'organisation de la bande grise en agrégats plus ou moins arrondis. Au sommet, on

observe la dominance des bandes grises à l'intérieur desquelles le matériel s'organise en agrégats grisâtres.

Les bandes rougeâtres présentent le même matériel et la même organisation que le niveau sous-jacent qui se poursuit ici. La fissuration planaire est secondaire puisqu'elle affecte les diverses accumulations texturales (Fig. 48).

Les bandes et les concrétions grisâtres sont caractérisées à la base par des lamelles composées d'un matériel très fin, grisâtres ou beige. Ces lamelles coexistent et s'interpénètrent avec les bandes rougeâtres pour dominer progressivement en allant vers le sommet (qui apparaît comme une masse boueuse en observant la lame mince à l'œil nu) (Fig. 49).

Des fissures secondaires rectilignes, de 50 µm d'ouverture maximale, survenues au sein des lamelles donnent une microstructure en agrégats de forme hexagonale et horizontale à la base du niveau, alors qu'en allant vers le sommet, ces mêmes fissures deviennent courbes et plus large d'ouverture (200 µm maximale) donnant une microstructure arrondie avec parfois un aspect vaguement concentrique.

Les lamelles sont massives, le matériel est très dense et sans vide apparent. Chaque bande est caractérisée par un matériel quartzeux riche en paillettes micacées et bien trié, les grains de quartz ne dépassent pas 25 µm, rarement 50-60 µm et seulement au contact des bandes rougeâtres. Les grains sont anguleux et allongés, la plupart en échardes. Cette dernière forme et les paillettes micacées s'orientent parallèlement à la fissuration ou horizontalement. Le fond matriciel est isotrope et paraît phosphaté. Souvent entre les agrégats hexagonaux s'intercale un matériel formé quasiment que de grains de quartz lavés, bien triés et de 60 µm maximum, anguleux à sub-anguleux, rarement en échardes. Ces concentrations sont allongées avec une épaisseur de 30 µm en moyenne et une porosité uniquement intergranulaire.

1.1.3.2. Conclusion

L'évolution de la microstructure : bande entière, agrégats hexagonaux, agrégats arrondis, est intimement liée à une évolution de la forme et l'ouverture de la fissuration depuis des fissures rectilignes jusqu'à une fissuration courbe discontinue puis continue et plus large. Parallèlement, on assiste à une augmentation progressive et continue de la micritisation des agrégats accompagnée par une diminution du matériel détritique elle aussi progressive. En un mot, la teneur en calcite micritique est inversement proportionnelle à la teneur en matériel détritique. Il est à noter qu'une même zone carbonatée qui apparaît homogène en LN, est subdivisée en deux ou trois plages qui possèdent des orientations optiques différentes (extinction différente des plages). La limite entre ces plages est digitée.

En conclusion, on peut dire que ces nodules calcitiques prennent naissance à partir de revêtements sparitiques ou microsparitiques qui se prolongent dans la masse basale en hyporevêtements et par la suite envahissent progressivement cette masse basale par remplacement des constituants originels tendant vers le statut monominéral. MILLOT *et al.* (1977) ont montré que ce remplacement se fait dans un premier temps avec conservation des structures et des volumes et qu'il peut être, dans le cas du remplacement des quartz, soit direct soit précédé par une phase intermédiaire de néoformation d'argile fibreuse, la palygorskite

(parfois la calcite est discordante sur l'argile). On n'a pas pu observer ici de palygorskite probablement à cause de la fugacité de cette phase ou à cause d'un remplacement direct.

1.1.4. Conclusion sur la couche P1

La faible teneur en argile, l'absence d'espèces gonflantes (smectites) et la désagrégation mécanique des grains minéraux indiquent que la structure lamellaire n'est pas le résultat d'un retrait/gonflement du sédiment.

La structure lamellaire, la compaction et la stabilité des agrégats rapprochent la couche P1 de l'horizon fragique engendré par un gel lent en profondeur (PISSART, 1970; VAN VLIET, 1976 et 1985). En outre, le bon développement et la stabilité des agrégats lamellaires indiquent un drainage faible ou modéré et un matériel déjà décarbonaté au moment du développement des lentilles de glace (VAN VLIET & LANGOHR, 1981), autrement les agrégats se détruisent au moment du dégel par décarbonatation.

Ce gel affecte donc un sédiment hétérogène et déjà évolué. En effet, les agrégats brun-rouge organo-minéraux sont antérieurs à la structure lamellaire. Les divers traits texturaux, recoupés par la structure lamellaire, se sont développés probablement au cours, et sûrement après la mise en place originelle de la couche.

L'individualisation du niveau P1a résulte probablement d'une accumulation absolue des éléments fins à la base de la couche. Mais cette individualisation résulte aussi de la phosphatation quasi complète qui affecte la base, phosphatation qui procède par remplacement progressif du matériel détritique originel. Ainsi, la fraction fine argileuse est sporadique à ce niveau, et les grains les plus grossiers tendent à s'amincir progressivement et à disparaître au sein des plages les plus phosphatées. La richesse du niveau en phosphate semble être issue d'une concentration à la base de la couche alors que le sédiment était encore humide. Le sédiment évolue dans un milieu humide saturé en eau. La proximité du substratum provoque le ralentissement ou l'arrêt des circulation hydriques, la base de la couche se trouve saturée en eau et subit un engorgement au moins temporaire. Cette engorgement crée un milieu confiné et réducteur favorable au développement des concrétions phosphatées (à l'interface oxygène/anoxygène) probablement par intervention de micro-organismes opérant en anaérobiose dont les mécanismes restent obscurs (BURNETT, 1980; SLANSKY, 1980). Cette phosphatation une fois amorcée se poursuit par remplacement plus ou moins complet du sédiment (SLANSKY, 1980). L'individualisation par des fentes courbes et l'induration des concrétions indique une déshydratation et un dessèchement. Ainsi se constitue le niveau 1a, montrant un passage progressif d'un milieu humide et réducteur à un milieu sec passant par un milieu humide oxydant amenant des précipitations de fer et de manganèse.

Les agrégats ne montrent aucune trace de décarbonatation *in situ*, ce qui indique que le sédiment mis en place était déjà décarbonaté. Cette décarbonatation a pu survenir dans la salle (amont) avant l'étalement du sédiment dans le couloir d'entrée (aval).

La phase de gel restructure le sédiment et affecte le drainage. Les agrégats, par leur compaction, deviennent imperméables. Les circulations hydriques ne peuvent plus se faire que latéralement à travers les vides planaires. Ces circulations proviennent de l'amont (salle) et sont

d'abord chargées en phosphates qui cristallisent en apatite fibroradiée tardive dans les vides planaires. Ces revêtements apatitiques ne montrent pas de modifications postérieures et pourraient résulter d'une phase de dégel général et de plus longue durée aboutissant à de grandes circulations d'eaux couplées à un lessivage des phosphates en amont (salle) et leur cristallisation plus en aval (couloir d'entrée).

La cristallisation de l'apatite dans les vides planaires est suivie de celle de la calcite en revêtements sparitiques soit directement sur les parois des vides planaires (si c'est dépourvus de revêtements apatitiques) soit sur les revêtements apatitiques. Les solutions chargées en carbonate de calcium empruntent la même voie et ont apparemment la même origine que les solutions précédentes chargées en phosphates. Au sommet de la couche, ces revêtements imprègnent les agrégats et évoluent en concrétions micritiques par remplacement du matériel originel. Comme pour les concrétions phosphatées, les nodules calcitiques prennent naissance et évoluent dans une masse boueuse et s'individualisent par des fentes courbes de dessiccation indiquant une phase ultime de dessèchement. Par contre, cette calcite est en relation directe avec la fissuration planaire, elle lui est donc postérieure et donc postérieure également à l'individualisation des concrétions phosphatées.

En amont de la coupe, surviennent donc deux phases de lessivage qui se succèdent dans le temps : d'abord un lessivage des phosphates, ensuite un lessivage des carbonates de calcium, qu'on retrouve dans le même ordre plus en aval dans les dépôts du couloir d'entrée.

L'ensemble de ces caractéristiques indiquent une histoire ancienne et complexe, durant laquelle les événements se succèdent, se surimposent et oblitérent les signatures les plus anciennes.

I.2. Couche P2

D'une épaisseur moyenne de 25 cm, cette couche donne naissance à deux niveaux distincts. Le premier, **niveau P2a** (15 cm d'épaisseur en moyenne), se distingue par une accumulation des oxy-hydroxydes de fer et manganèse donnant une coloration rouge-brun à ce niveau (Fig. 49). Le second, **niveau P2b**, se distingue par un départ de fer et une phosphatation quasi générale donnant une coloration jaune pâle au profil.

Le passage du niveau P2a au niveau P2b se fait par un mince niveau, non continu, à individualisation et accumulation de concrétions phosphatées arrondies et jaunes, les contours sont signalés par des liserés d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse. Ces concrétions sont identiques à celles décrites dans le niveau 1a de la couche P1.

I.2.1. Niveau P2a

Le matériel est hétérogène avec un squelette essentiellement quartzueux mais très fin, des agrégats brun-rouge et des galets en grès ou éléments d'industrie en silex (Fig. 50).

Sur les gros éléments, on observe souvent un revêtement mince et noirâtre, ce même revêtement jalonne la masse en raies minces et discontinues.

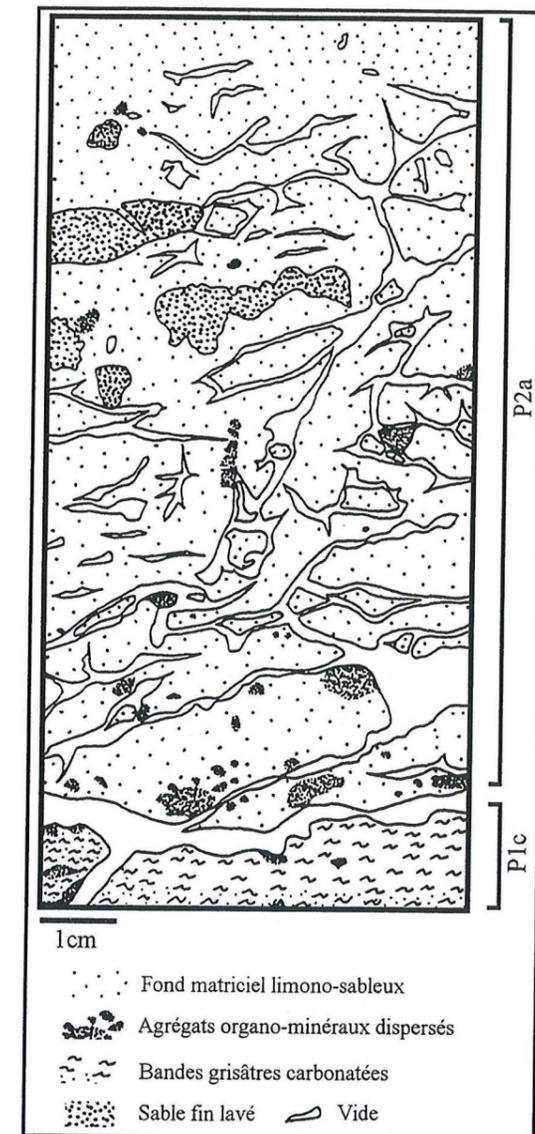


Fig. 49- Niveau P2a : Organisation macroscopique.

Tous les constituants sont tâchés d'oxy-hydroxydes de fer/manganèse qui semblent complexés à la matière organique (réaction vive à H_2O_2), donnant à la lame un aspect sale, alors que les revêtements des vides en ces oxydes sont rares et ne s'observent qu'au sommet du niveau. Les agrégats brun-rouge présents dans les niveaux sous-jacents deviennent rares et de petite taille (400 μm environ).

Le sédiment est formé par un matériel fin (plus fin que ce que l'on observe dans les niveaux sous-jacents) essentiellement quartzueux, avec des paillettes micacées et un bon triage des grains. Les grains de la taille des sables grossiers ne sont qu'occasionnels. Les granules sont rares, ne dépassent pas 6 mm et sont tous en grès, alors que les agrégats brun-rouge deviennent peu abondants et les plus gros présentent le même déchetage par une fine fissuration sub-horizontale. Les plages argileuses sont très réduites et se présentent sous forme

de très minces lits horizontaux et discontinus pouvant avoir 1 mm de longueur. L'ensemble est taché d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse.



Fig. 50- Niveau P2a : Organisation microscopique.

Malgré l'effondrement de la structure, induit par les grandes fissures obliques (5 mm d'ouverture), on observe des zones où une structure lenticulaire est encore conservée (Fig. 50). Les vides planaires sont abondants mais d'ouverture réduite (200 μm en moyenne). Les vides en chambres ou en vésicules sont peu fréquents, avec un diamètre moyen de 200 μm .

Le sommet nodulaire présente manifestement une évolution continue et progressive à partir d'un matériel limoneux fin et grisâtre, ou à partir d'anciennes illuviations argileuses jaunes microlitées et biréfringentes (Pl. X, Photo 7), d'abord vers un matériel renfermant des plages jaunâtres pour aboutir à des plages presque exclusivement jaunes qui donnent finalement des concrétions arrondies et bien individualisées dont les contours sont signalés par des précipitations de fer et de manganèse. Ce schéma rappelle fortement l'individualisation des nodules calcitiques décrite plus haut.

Les grains de quartz sont très abondants avec 60% environ, dont 90% ont une taille inférieure à 80 μm , assez rares ceux compris entre 100 et 300 μm , alors que ceux de taille plus grande ne se rencontrent que sporadiquement et sont alors concentrés dans des plages d'environ 3 mm de diamètre et qui peuvent correspondre à des granules de grès lessivés. Les paillettes micacées comptent pour environ 5% avec une dispersion élevée et une taille inférieure à 50 μm . Ce squelette est accompagné par des grains opaques de 60 μm au maximum qui peuvent être arrondis, anguleux ou avoir des bords en dents de scie.

Au niveau des agrégats lenticulaires, le squelette est formé de sable fin et limon bien classés et lavés, séparés par des raies argileuses peu biréfringentes à grande teneur en fer et manganèse et en matière organique. Ces lamelles ont 500 μm en moyenne d'épaisseur. Les grains de quartz allongés et les paillettes de micas sont fréquemment disposés dans le sens du litage, c'est-à-dire horizontalement (Fig. 51).

Des plages grisâtres, de 2 à 5 mm, s'observent au milieu de la lame (Fig. 49) et correspondent à des galets ou granules en grès, altérés et en voie de désagrégation. Il ne reste que des grains de quartz sub-anguleux de 30 à 200 μm et de rares paillettes micacées ne dépassant pas 20 μm (quelques grains de zircon et de sphène accompagnent ce squelette). La porosité intergranulaire est élevée et complètement comblée par un ciment apatitique continu. A côté de ces galets ou granules, on note la présence de quelques grains anguleux de silex ainsi que quelques grains jaune-orange phosphatés.

La fraction fine est constituée d'une argile brun-rouge, à aspect micro-agrégé poussiéreux et possède une grande dispersion en liaison avec le fer et la matière organique conférant au niveau un aspect sale. Cette liaison avec les oxydes métalliques et/ou la matière organique réduit nettement la biréfringence et masque leur éventuel litage. Apparemment tous les vides en chambres (40-50 μm de diamètre) possèdent un revêtement complet de ces argiles poussiéreuses. Parfois, les revêtements argileux sont fissurés obliquement et on observe que le vide formé est rempli par des grains de quartz lavés de la taille des limons fins (Fig. 51).

Ce niveau reste apatitisé en général. L'apatite est cryptocristalline, jaune pâle, presque transparente et complètement isotrope. Le ciment mêlé à l'argile est en sphérules de 5 à 2 μm . La base du niveau présente des revêtements sans litage ni zonation. En allant vers le sommet, ces revêtements apparaissent avec un litage d'abord discret, puis de plus en plus une zonation bien affirmée en une forme rubanée avec une biréfringence très faible. Ces revêtements, quand ils sont épais (300 μm en moyenne), montrent parfois un ou deux lits colorés en brun et présentant une biréfringence plus élevée dans les tons rougeâtres. Le sommet est beaucoup plus riche que la base, mais l'ensemble du niveau est caractéristique que les niveaux sous-jacents, en particulier les revêtements sont beaucoup plus minces.

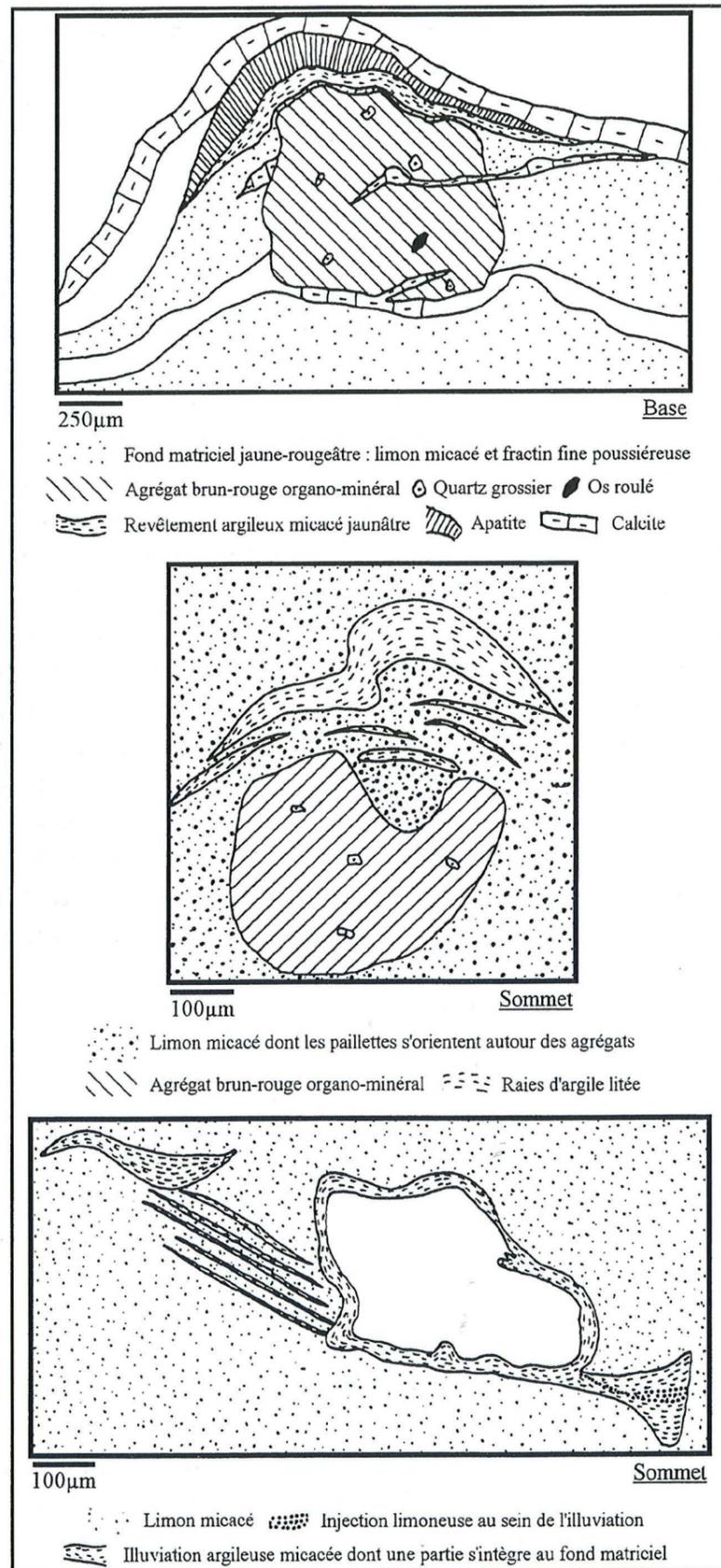


Fig. 51- Niveau P2a : Exemples de ségrégations texturales.

Quant à la calcite qui est toujours secondaire, ses cristaux ont beaucoup diminué de taille et le pourcentage de la microsparite augmente sensiblement. La teneur globale en calcite est en nette régression par rapport aux niveaux sous-jacents et ceci se confirme du bas en haut du niveau. Ainsi, les vides sans revêtement calcitique deviennent majoritaires au sommet. A la base, plus riche en calcite, on observe encore quelques plages de digestion de la masse basale par la calcite. Les cristaux sparitiques et microsparitiques montrent assez souvent des bords dentelés et des vides intergranulaires, signe d'une dissolution. La plupart de ces recristallisations, qui sont éparées, possèdent des cristaux imbriqués les uns dans les autres, les bords sont arrondis, homométriques lorsqu'ils comblent totalement ou partiellement les vides en chambres arrondies.

Le sommet du niveau est caractérisé par des plages gris-beige au sein desquelles prennent naissance et s'individualisent des concrétions apatitiques.

Les plages gris-beige sont constituées d'un matériel limoneux, formé essentiellement de grains de quartz et de paillettes micacées. Ces plages sont très denses et présentent des colmatages argileux. Ces argiles jaunes ne sont pas poussiéreuses, elles montrent un litage bien exprimé, une extinction roulante et une biréfringence assez élevée. On constate que ce matériel se fond progressivement dans une solution apatitique jaune et isotrope jusqu'à disparaître complètement, seul les grains de quartz les plus grossiers subsistent au sein du ciment apatitique qui évolue ensuite vers des concrétions apatitiques bien individualisées par des fentes courbes et continues de rétraction. Cette évolution est très nette au niveau des argiles jaunes de colmatage qui se fondent progressivement dans la solution phosphatée. Ces concrétions sont identiques à celles décrites à la base du profil. Dans les vides internes, on assiste à une recristallisation d'une apatite fibroradiée qui présente une biréfringence relativement élevée (de l'ordre de 0.008). Ce petit niveau nodulaire est très riche en fer et en manganèse qui précipitent dans les vides entourant les agrégats grisâtres et les concrétions phosphatées jaunes. Cette précipitation est en forme de sphérules de quelques microns de diamètre, leur accollement donne des revêtements en masse uniforme et opaque.

I.2.2. Niveau P2b

Il s'agit d'un niveau sableux fin, compact, jaune pâle et homogène sauf au sommet où il est perturbé par la couche sus-jacente. Ce niveau est tassé et on n'observe plus que quelques fissures fines (200 µm) sub-horizontales à obliques.

L'activité biologique s'intensifie au fur et mesure qu'on arrive au sommet du niveau. Elle est principalement racinaire et se manifeste par des cavités (200 µm de diamètre) et par des chenaux (500 µm d'ouverture). Dans les vides biologiques d'origine racinaire, on observe fréquemment des cellules et des fragments végétaux surtout au sommet.

Le squelette occupe 50% de la lame, il est quartzeux avec une taille moyenne des grains autour de 200 µm. La forme est sub-anguleuse à sub-arrondie pour la plupart des grains de quartz. Les paillettes micacées sont assez rares, de la taille des limons fins et présentent des microdivisions et des altérations linéaires. Les grains de feldspaths sont rares avec divers degrés d'altération. La porosité intergranulaire est assez large (variant de quelques microns à

80 voire 200 μm) et occupée largement par un ciment jaune apatitique. Les grains opaques disparaissent et les teneurs en fer/manganèse diminuent nettement.

La fraction fine est très poussiéreuse, riche en quartz et en paillettes micacées. Elle est jaunâtre, isotrope et forme fréquemment un enrobage des grains de quartz par une argile jaunâtre poussiéreuse et très peu biréfringente qui semble être mélangée à de l'apatite. Ces revêtements sont très minces, avec une épaisseur variant entre 10 et 20 μm et séparent toujours les grains de quartz du ciment apatitique ou calcitique.

Globalement, la fraction fine est parcourue par des microfissures la découpant en amas arrondis ou allongés d'une dizaine de microns. Leur agencement détermine une allure finement feuilletée et ondulée horizontalement (Pl. X, Photo 8).

Au sein de la fraction fine, on observe fréquemment des sphérules transparentes à reflet jaunâtre, de 2 μm de diamètre environ, qui sont soit isotropes soit faiblement biréfringentes dans les tons gris foncé. Ces sphérules sont dispersées uniformément dans la masse fine.

Le sommet du niveau (et de la couche) est perturbé par la couche sus-jacente qui introduit du matériel : agrégats et des illuviations argileuses brun-rouge et organiques.

Les agrégats brun-rouge à matière organique, d'environ 2 mm de diamètre, occupent 10% de la surface de la lame, avec une forme ovale allongée horizontalement ou arrondie. Le squelette est essentiellement quartzéux mais peut renfermer quelques grains jaunes phosphatés ou des concrétions phosphatées de quelques centaines de microns à squelette quartzéux, ou bien des recristallisations fibroradiées dans les rares et petits vides. L'intérieur de ces concrétions s'organise en polyèdres jointifs ou bien en lamelles horizontales minces et jointives, mais souvent on observe des craquelures qui les traversent en même temps que la masse avoisinante, ce qui provoque leur dispersion et leur intégration au fond matriciel.

La fraction fine rouge-brun est illuviée à partir de la couche sus-jacente. Elle est moins poussiéreuse, litée avec une biréfringence relativement plus élevée. Vers le sommet où elle est plus épaisse, elle forme soit des revêtements complets des grains du squelette et remplit l'espace intergranulaire, soit des barbes ou revêtements latéraux, soit enfin des coiffes complexes en association avec des limons et des sables fins sur la face supérieure des agrégats et des éléments grossiers. On note que la concavité est orientée souvent vers le haut. Vers la base du niveau, cette argile beaucoup plus mince a tendance à se disperser et à s'intégrer dans le fond matriciel. Ces argiles sont piquetées de microparticules noires charbonneuses et renferment de la matière organique responsable de la teinte foncée.

Cette masse de sédiment présente des taches noirâtres d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse. Ces tâches ont une limite nette mais digitée. Elles sont peu fréquentes mais plus concentrées vers le sommet où elles présentent un aspect granulaire (5 μm de diamètre en moyenne) qui peuvent s'agencer en longs filaments ondulés et sub-horizontaux.

I.2.3. Conclusion sur la couche P2

La composition élémentaire et la granulométrie distinguent nettement cette couche de la couche sous-jacente.

La structure lenticulaire est liée à une ségrégation de glace en lentille synchrone de celle affectant la couche P1 à structure lamellaire.

Le niveau P2b, effondré et réduit, est proche de l'horizon réduit se développant au dessus d'un permagel et correspond à la couche active qui dégèle saisonnièrement (HAESAERTS & VAN VLIET, 1973) et s'accompagne d'une activité biologique. L'épaisseur faible de cette couche active peut être liée à un mauvais drainage (VAN VLIET & LANGOHR, 1981).

La réduction et le tassement du niveau P2b, la ferruginisation et l'effondrement de la structure du niveau sous-jacent sont liés à la dégradation progressive du permagel (HAESAERTS & VAN VLIET, 1973).

Ainsi, la fusion de la glace dans la partie supérieure de la couche provoque l'affaissement progressif de la couche active (niveau P2b) et le sommet lenticulaire du niveau sous-jacent (P2a). Cette fusion conduit à la formation d'une nappe phréatique fluctuante au sommet du permagel et qui s'accompagne par la précipitation des hydroxydes de fer. Le niveau de la nappe descend progressivement, le fer couplé aux colloïdes et à la matière organique précipite dans les vides et enduit les agrégats. L'assèchement final de la nappe conduit au détachement des nodules calcitiques par des fentes courbes au sommet de la couche P1 et à l'apparition des fissures et craquelures obliques dans le niveau sus-jacent (P2a). Cette nappe marque donc le dernier cycle de dégel.

C'est au cours de la descente progressive de la nappe que des concrétions phosphatées s'individualisent au sommet du niveau P2a. Ces concrétions sont identiques à celles formées dans le niveau 1a et procèdent par remplacement du matériel originel. Le mécanisme de leur formation est semblable à celui de la formation des nodules calcitiques.

Les niveaux nodulaires phosphaté (sommet du niveau P2a) et calcitique (niveau P1c) marquent donc les limites supérieures respectives de la nappe au cours de son abaissement progressif. Par conséquent, les concrétions phosphatées (P2a) sont antérieures aux nodules calcitiques.

I.3. Couche P3

Cette couche, de par sa composition, rappelle le niveau P1b et est subdivisée en trois niveaux qui se distinguent par leur structure et par leur composition élémentaire :

- Niveau P3a à structure effondrée mais qui montre une structure lamellaire grossière et une tendance à l'agrégation au sommet.
- Niveau P3b formé d'agrégats arrondis de différente taille et composition.
- Niveau P3c composé de fragments grossiers en silex et en grès qui forment un pavage du niveau sous-jacent.

I.3.1. Niveau P3a

Environ 25 cm d'épaisseur. La base remanie le sommet du niveau sous-jacent et la limite inférieure est floue. Ce niveau est horizontal, mais tronqué à son sommet montrant une surface inclinée vers l'est (vers l'extérieur).

Le matériel est tassé. Le fond est parcouru par des fissures très fines (20 μm d'ouverture en moyenne) qui donne un aspect feuilleté. Des fissures plus larges (400 à 500 μm d'ouverture), sub-horizontales et non continues apparaissent et tendent à découper le matériel en agrégats allongés de 1 cm de largeur et plusieurs centimètres de longueur. De ce fait, l'ensemble présente une structure lamellaire grossière, alors que le fond matriciel est découpé par une microfissuration horizontale ou sub-horizontale.

L'activité biologique est assez développée et se manifeste par des cavités et des chenaux essentiellement racinaires.

La fraction supérieure à 2 mm est très rare et représentée par des concrétions phosphatées identiques à celles de la couche sous-jacente, dont le contour est signalé par un film d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse.

Le squelette est essentiellement quartzéux et occupe 50% environ avec un mauvais classement. La taille moyenne se situe à 200 μm , la forme est généralement anguleuse à sub-anguleuse et les grains de quartz sont beaucoup moins cariés que dans la couche P1. Les micas, principalement de la muscovite en paillette, représente environ 10% du squelette et de taille de limons grossiers à inférieure. Les feldspaths sont rares et très altérés.

Le sable grossier est peu abondant (2 à 5%), représenté par quelques grains de quartz, des grains phosphatés orange, et principalement par des débris en silex et quelquefois en quartzite.

Les agrégats brun-rouge foncé décrits dans la couche P1 sont présents et dispersés. Ils ont une taille variable allant de 50 μm à 3 mm, une forme arrondie ou ovale mais peuvent avoir une forme tronquée. Les plus petits tendent à se fondre dans la masse basale. Ces agrégats, comme les précédents, renferment parfois les grains phosphatés orange.

La fraction fine est en général poussiéreuse car riche en limons fins constitués de grains de quartz et de paillettes micacées. L'état poussiéreux diminue sensiblement en allant vers le milieu.

Globalement, la fraction fine est parcourue par des microfissures la découpant en amas arrondis ou allongés d'une dizaine de microns. Leur agencement détermine une allure finement feuilletée et ondulée horizontalement.

Au sein de la fraction fine, on observe fréquemment des sphérules transparents à reflet jaunâtre, de 2 μm de diamètre environ, qui sont soit isotropes soit faiblement biréfringents dans les tons gris foncé. Ces sphérules sont dispersés uniformément dans la masse fine avec une grande concentration dans les plages jaunes ou jaune-gris. Ce sont ces sphérules qui différencient la fraction fine en plages brun-rouge sans sphérules et plages jaunes à grande concentration.

Les plages jaunes sont plus limoneuses, le fond est isotrope et les grains fins baignent dans un ciment phosphaté cryptocristallin qui montre une organisation en sphérules. Alors que les plages jaune-gris et les plages grisâtres présentent, en plus de l'apatite, des cristaux

calcitiques donnant l'aspect grisâtre. Ces plages s'interpénètrent entre elles avec des limites diffuses et progressives.

Dans l'ensemble, ce niveau est phosphaté mais moins que la couche sous-jacente. Cette phosphatation s'exprime soit sous forme de cimentation par plages discontinues avec une tendance à envahir toute la masse, soit sous forme de cristallisation fibroradiée dans les vides plus larges. La première forme est plus abondante que la deuxième.

La calcite est entièrement secondaire, liée en majorité à l'activité racinaire (manchons et pseudomorphoses) et en moindre mesure à des cristallisations microsparitiques et sparitiques dans les vides. La calcitisation présente un gradient décroissant de la base au sommet. Elle s'exprime beaucoup mieux au niveau des plages à matériel très fin en préservant l'aspect feuilleté. Elle a tendance à envahir toute la masse mais s'arrête au niveau des plages phosphatées.

On observe au sein de la masse basale des précipitations d'oxydes et d'hydroxydes de fer et de manganèse sous forme de plages de 1,5 mm, à contours irréguliers et en forme de sphérules dans les zones les moins denses. Cette précipitation est nettement postérieure à la phosphatation et antérieure à la calcitisation.

I.3.2. Niveau P3b

Il possède une épaisseur moyenne de 15 cm. Ce niveau est formé par des agrégats arrondis millimétriques, surmontés par un niveau formé de fragments de roches diverses formant un pavage de 4 cm d'épaisseur en moyenne. Sur la coupe, on observe quelques galets en grès de 5 cm de diamètre en moyenne, qui sont fortement désagrégés.

Au sein de ce niveau, il existe trois sortes d'agrégats arrondis : brun-rouge, brunâtre et rouge.

Les agrégats brun-rouge sont à squelette quartzéux fin et sont identiques à ceux décrits dans la couche 2 et dans les niveaux P1b. Ils sont répartis dans toute la lame avec des tailles qui vont de 100 μm à 2 mm.

Les agrégats brunâtres sont très denses, possèdent une taille moyenne de 2 mm et forment un mince niveau de 6 mm en moyenne. Le squelette est fin (30 μm en moyenne), formé de grains de quartz et paillettes micacées mais peut renfermer des débris de silex à hauteur de 2% et de taille allant de 300 à 700 μm et des grains de quartz de 200 à 300 μm à hauteur de 5%. Ces agrégats sont riches en débris végétaux très lacérés de même ordre de grandeur que les grains du squelette. Le fond matriciel est brun foncé, avec une biréfringence faible à moyenne due à la richesse en grains de quartz et en paillettes micacées. Dans les rares et minces domaines argileux, on observe une biréfringence faible et une teneur élevée en particules noires charbonneuses. Ces agrégats semblent être formés par un matériel brûlé.

Les agrégats rouges sont les plus abondants, la taille varie de 2 à 4 mm et leur abondance confère à la couche une coloration de fond rougeâtre. C'est au sein de ces agrégats qu'on observe le mince niveau formé d'agrégats brunâtres. Ces agrégats rouges sont formés de grains de quartz de la taille des sables moyens à grossiers, d'éléments phosphatés jaunes ou jaune-orange, de débris de silex et de quartzite, d'agrégats brun-rouge (100 à 200 μm) et

parfois de débris végétaux. L'ensemble de ces constituants ne dépasse pas le mm en taille et sont sertis dans une matrice argileuse rouge, micacée et dense formant un assemblage porphyrique, d'où un taux d'argile supérieur à celui des couches sous-jacentes. Les paillettes micacées et la fraction fine s'orientent autour des grains du squelette et dans les vides internes prenant un aspect lité ("stress cutanes").

Outre les différents agrégats, on observe la présence de quelques concrétions phosphatées de même nature que celles déjà décrites mais qui n'ont plus aucune relation avec la masse adjacente.

Sur les agrégats et les concrétions phosphatées sous-jacents au pavage, on observe des coiffes minces qui peuvent entourer complètement l'agrégat en un revêtement.

I.3.3. Niveau P3c

Les agrégats rouges sont surmontés par un niveau de 4 cm en moyenne, formé par des fragments de silex et de grès (à grains fins) de 5 mm de longueur en moyenne. La plupart de ces fragments sont allongés parallèlement à la pente (vers l'ouest), parfois présentent un pendage subverticale (Fig. 52).

Sur les fragments grossiers, les coiffes possèdent une épaisseur de 1 mm, toujours plus développées sur la face supérieure des fragments et présentent des fissures parallèles entre elles et dans le sens de l'allongement, d'où un litage apparent. Fréquemment, les coiffes débutent par un mince lit argileux brun-rouge organique renfermant des particules noires charbonneuses. L'épaisseur maximale est de 40 μm . Cette argile forme souvent des barbes pendantes à la face inférieure des fragments grossiers de 100 μm d'épaisseur en moyenne, ou bien forme des revêtements des larges vides entre les fragments, dans ce cas le revêtement est plus épais (200 à 500 μm). Ce dépôt argileux est le siège d'une fissuration et d'un décollement du support. Les coiffes, les barbes et les revêtements sont postérieurs à la fissuration *in situ* des fragments grossiers.

L'ensemble agrégats/pavage (niveaux P3b et P3c) présente des fissures et des craquelures *in situ*, sans dispersion des fragments résultants, et pend de 30° environ vers l'est (vers l'extérieur).

Les fragments grossiers et les agrégats possèdent une coiffe limono-argileuse complexe, riche en paillettes micacées orientées, dont le fond est phosphaté donnant une coloration jaunâtre et un fond isotrope. Exceptés les phosphates, le matériel formant ces coiffes est de même nature que le matériel formant les agrégats rouges.

Les vides anciens (interagrégats et entre les fragments grossiers) ainsi que les vides postérieurs (fissures des coiffes et des revêtements, fissuration des fragments grossiers) sont le siège d'une minéralisation secondaire qui se manifeste d'abord par une phosphatation puis par une calcitisation.

La phosphatation est de type rubané dans les vides et se prolonge dans les coiffes limono-argileuses en un ciment cryptocristallin sous forme de sphérules jaune pâle à biréfringence très faible. Cette phosphatation peut affecter les fragments grossiers sans jamais affecter ni les agrégats ni les illuviations argileuses.

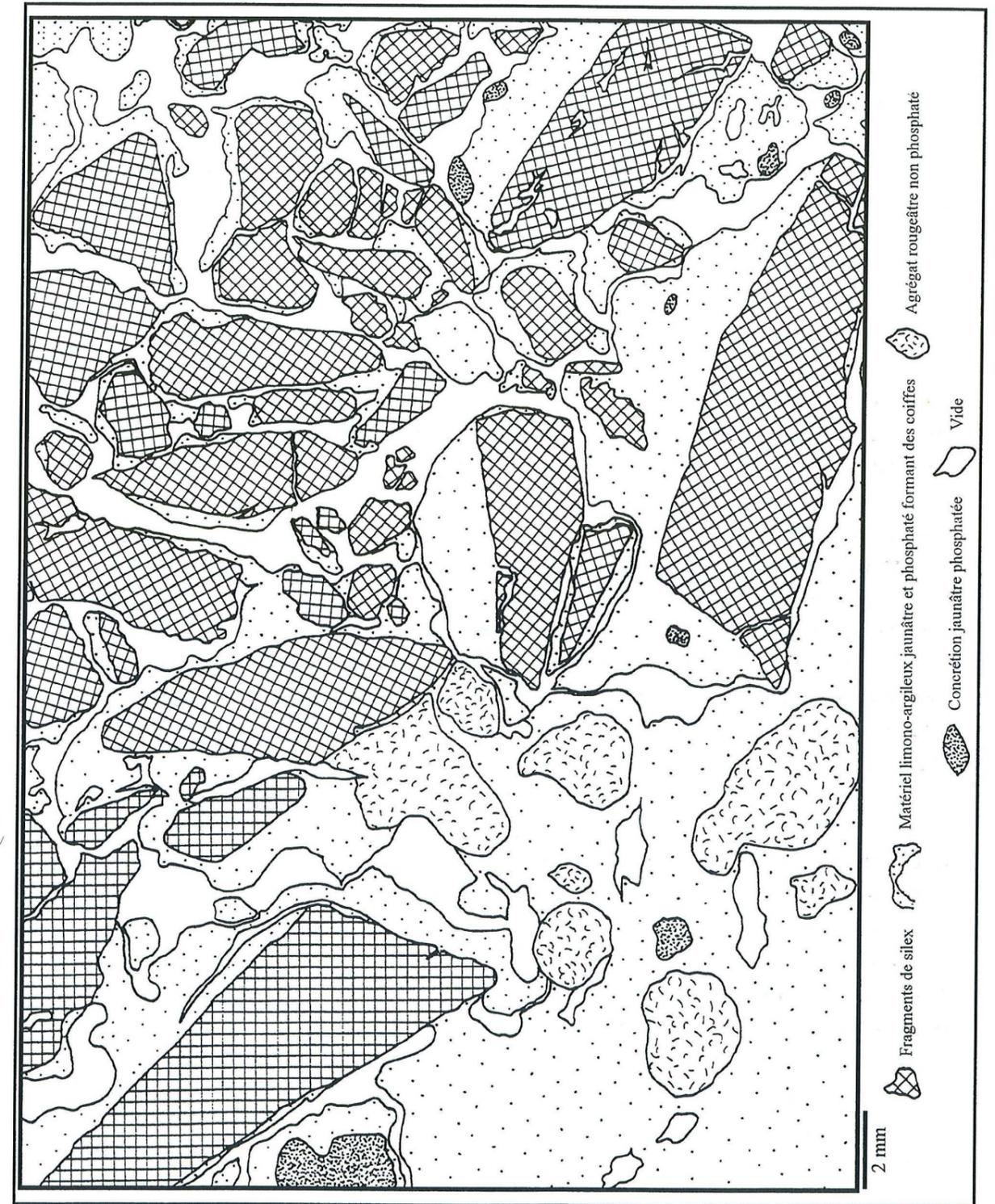


Fig. 52- Niveau P3c : Organisation microscopique du pavage.

La calcitisation est le dernier événement survenu, elle est de même type que celle des couches sous-jacentes. On constate toujours que les agrégats ne renferment pas de calcite avant cette calcitisation postérieure. Cette calcitisation résulte soit d'une circulation de solutions riches en carbonates de calcium soit de l'activité racinaire.

L'activité biologique est assez importante, elle est essentiellement racinaire et se manifeste par des chambres et des vésicules de différente taille. Cette activité peut parfois faire éclater et disperser les agrégats.

I.3.4. Discussion et conclusion sur la couche P3

Le niveau P3a montre une organisation lamellaire grossière et une microfissuration horizontale avec un entassement dense des agrégats et des grains. Cette organisation dénote une ségrégation de lentilles de glace beaucoup plus atténuée que dans les couches précédentes à cause probablement d'une teneur en eau initialement faible (VAN VLIET, 1976 et 1985).

La structure lamellaire est relayée vers le sommet par une tendance à la structuration en agrégats arrondis avec une surface tronquée et inclinée. Il est possible que le sommet ait subi un plus grand nombre de cycles de gel et de dégel aboutissant à la fragmentation de plus en plus fine du sédiment et au déplacement des agrégats vers l'aval. Cette phase érosive du sommet ne peut être attribuée à un ruissellement en surface car on n'observe pas les traits texturaux (ségrégations différentielles et lavages) habituels aux ruissellements. La tendance à l'agrégation arrondie indique plutôt un déplacement par gélifluxion suite à une alternance fréquente de gel et de dégel combinée à une pente.

Faisant suite à ce mouvement latéral, les niveaux P3b et P3c se mettent en place au dessus de la surface décapée et inclinée. La forme arrondie des agrégats de nature différente et la présence des concrétions phosphatées remaniées (possédant revêtements et coiffes) témoignent de ce déplacement latéral se faisant de l'amont vers l'aval de la coupe.

Le pavage (P3c) résulte probablement d'une concentration par lavage intense (FEDOROVA & YARILOVA, 1972; FEDOROFF *et al.*, 1981; ROMANS *et al.*, 1980), il se rapproche du pavage caillouteux (coupe des Tares, couche 5a) décrit et interprété comme une phase d'érosion par BERTRAN (1989) et par BERTRAN & TEXIER (1990).

Ces auteurs attribuent le lavage intense à des percolations abondantes liées à la fonte de la couche neigeuse épaisse au printemps en l'absence de couvert végétal. Dans le cas des grottes, cette couche neigeuse ne peut se former que sur le plateau, mais une partie des eaux peut provenir de la fonte de la glace formée au sein du sédiment.

I.4. Couche P4

I.4.1. Description

La couche, d'aspect très hétérogène, fait 50 cm d'épaisseur et est formé d'un mélange d'agrégats rouge et d'agrégats brunâtres renfermant des débris végétaux très lacérés. A côté de

ces agrégats, on observe la présence relativement importante de galets "karstiques" (10%), en silex et en quartzite. On note aussi la présence de débris de silex, d'ossements de la taille d'un sable grossier, de particules charbonneuses de la taille d'un limon grossier, de fragments végétaux très lacérés et de quelques concrétions phosphatées remaniées. Enfin, la couche renferme quelques galets en grès à grains fins dont la bordure est phosphatée mais qui gardent leur cohésion, et quelques anciennes illuviations (papules) de 1 mm formés d'une argile brun-rouge organique, craquelée et ponctuée de particules charbonneuses (Pl. X, Photo 9).

Les grains de quartz moyens à grossiers sont plus abondants et sont peu ou pas cariés. Les feldspaths sont présents à divers stades d'altération, ces feldspaths n'étaient pas présents dans la couche sous-jacente. Souvent, on observe des plages de concentration de grains de quartz et de micas, d'une taille moyenne de 100 μm , dont les vides intergranulaires sont remplis partiellement ou totalement d'une argile de même type que les papules. Ces plages de concentration font 1 à 2 mm de diamètre et correspondent à des granules en grès altéré dont les grains tendent à se disperser.

La base de la couche (20 cm d'épaisseur environ) garde encore la structure en agrégats arrondis denses, qui tendent à s'assembler en une structure polyédrique grossière et sub-anguleuse; les éléments grossiers conservent encore leur revêtement, sous forme de barbe argileuse (Pl. X, Photo 10), ou sous forme de coiffe argilo-limoneuse (Pl. X, Photo 11). Par contre, le sommet est dense, les agrégats se fondent dans des plages phosphatées ou calcitisées qui envahissent la couche.

Les phosphates sont abondants. Ils sont formés largement par un ciment cryptocristallin et quelques revêtements rubanés dans les larges vides caractérisant la base de la couche, par des grains jaunes ou jaune-orange et quelques concrétions remaniées. Les grains jaunes ou jaune-orange sont formés par 10% d'ossements roulés et émoussés de la taille des sables et par quelques anciens revêtements remobilisés. Le ciment envahit la couche par le haut et tend à se généraliser en grandes plages jaunes où les constituants sont dispersés. Les plages les plus phosphatées ne renferment plus que des grains de quartz ou de zircon et grenat (20%), de la taille du limon ou du sable fin et qui sont parfois cariés et éclatés.

La calcitisation est aussi importante et se manifeste par des plages grisâtres comparables à ce qu'on observe dans le niveau P1c.

L'activité biologique, essentiellement racinaire, est très importante. Des chambres et des cavités de toutes tailles affectent l'ensemble de la couche.

La couche se termine par un niveau de 2 à 3 cm d'épaisseur, noir et tacheté d'orange. Il s'agit d'un niveau organique riche en débris végétaux lacérés et renfermant des fragments d'ossements orange très altérés. Le produit de cette altération imprègne la masse environnante donnant des taches orange à contours irréguliers. Ce niveau noirâtre pénètre dans la couche jusqu'à 10 cm de profondeur.

I.4.2. Discussion et conclusion

Les concrétions phosphatées remaniées, les fragments d'anciens revêtements apatitiques, les papules, les agrégats arrondis et les ossements roulés témoignent d'une

remobilisation du sédiment à partir de la salle principale de la grotte, favorisée par la pente. La structure en agrégats arrondis accompagnée de coiffes, de revêtements et de barbes témoignent d'une mise en place définitive dans des conditions périglaciaires.

Le sommet est effondré, perturbé et très phosphaté. Les phosphates semblent provenir directement du lessivage du niveau sommital organique. C'est un niveau d'accumulation de débris végétaux et d'ossements très décomposés. Cette décomposition s'est faite probablement dans des conditions humides, les eaux étant peu mobiles comme en témoigne la décomposition lente et progressive des os. Ceci produit une solution phosphatée imprégnant la masse environnante.

La mise en place du niveau organique semble se faire postérieurement au dépôt de la couche 4 et indépendamment d'elle. Il est interprété comme issu d'une activité faunique (et/ou anthropique ?) et marque une stabilité de la couche 4.

La surface de la couche 4 a été probablement le siège d'une activité faunique caractérisée par une accumulation de débris organiques végétaux, d'ossements et probablement d'excréments. Un certain degré d'humidité entretenue provoque la dissolution progressive des ossements.

I.5. Couche P5

I.5.1 Description

Il s'agit d'un niveau d'accumulation d'ossements millimétriques et d'agrégats détritiques arrondis (niveau P5a, fig. 53), surmonté et pénétré par un niveau calcitique (niveau P5b) qui se transforme en une croûte dure (niveau P5c) au sommet. Au sein de cette couche, le passage d'un niveau à l'autre est très progressif, par contre la limite basale avec le niveau organique sous-jacent et la limite supérieure avec la couche P6 sont nettes.

Cette couche n'est pas continue et se présente sous forme de remplissage de dépressions au sein de la couche P4. L'encroûtement carbonaté est en relation directe avec le dôme stalagmitique, il n'est pas continu non plus. Le dépôt de la couche P6 génère une carapace apatitique (niveau P5c') sur l'encroûtement carbonaté (cf. légende, Fig. 53).

I.5.2. Conclusion

Le niveau à ossements est local et ne possède pas de valeur stratigraphique. Il semble lié à une activité faunique peut-être de type terrier. Cette accumulation d'ossements a subi ensuite l'action du gel-dégel responsable de la structure en agrégats arrondis. L'encroûtement carbonaté est lui aussi local. Il est en relation avec le dôme stalagmitique et est issu de circulations postérieures d'eau chargée en carbonate de calcium provenant vraisemblablement d'une gouttière. La précipitation de la calcite autour des restes osseux et au dessus de l'accumulation d'ossements s'est produite dans un contexte chaud et humide.

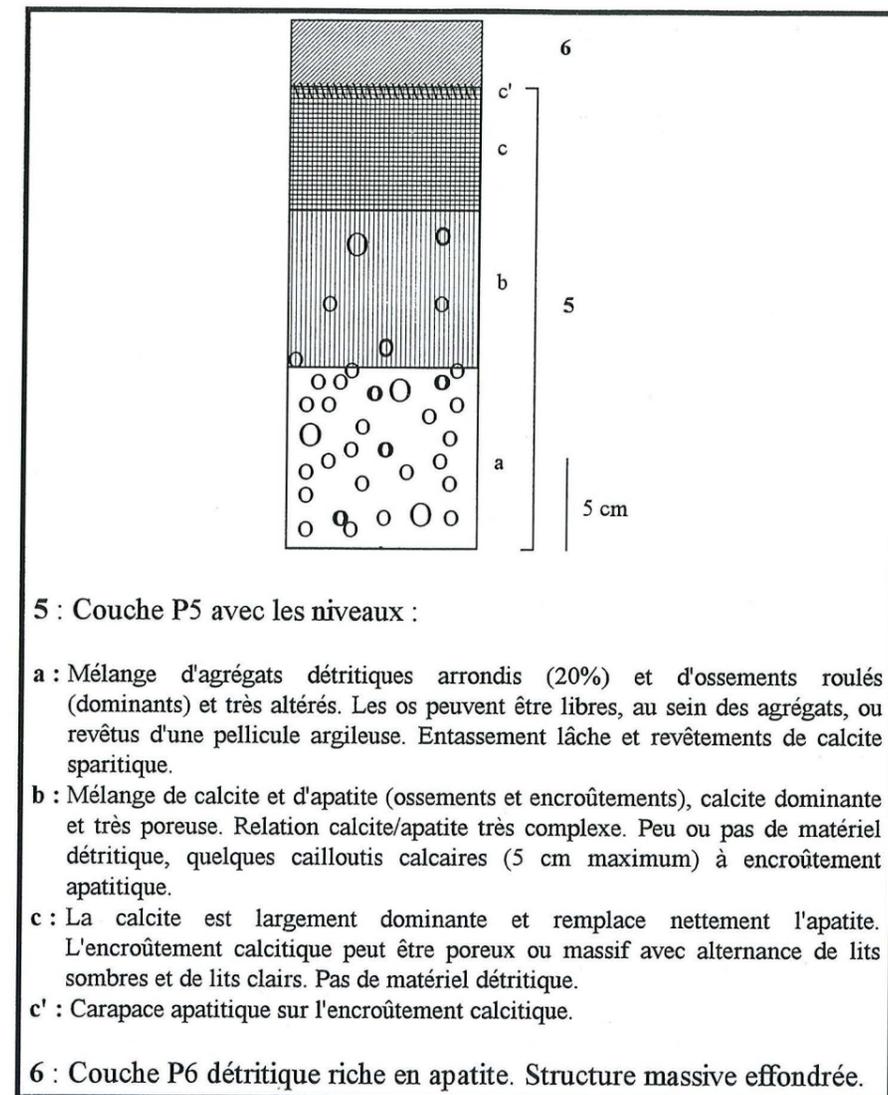


Fig. 53- Représentation schématique, à partir des lames, de la relation entre le niveau à ossements (P5a) et l'encroûtement calcitique (P5c).

I.6. Carotte P : Conclusion

L'ensemble de cette carotte montre un mélange intime de constituants d'origine différente : constituants minéraux (quartz, micas, galets karstiques etc.) provenant du plateau à travers les fissures du karst, des constituants minéraux (galets en grès, industrie lithique) et non minéraux (restes osseux, débris et produits organiques etc.) provenant de l'activité anthropique et faunique. Ce mélange intime témoigne d'un brassage et de restructurations du sédiment.

La restructuration et la réorganisation se manifestent par l'acquisition ultérieure d'une structure lamellaire, en agrégats arrondis et d'effondrement et de tassement. Cette réorganisation affecte postérieurement le sédiment et aboutit à l'effacement des traits sédimentaires originels.

Cette réorganisation ultérieure s'est faite sous contrôle de transformation d'eau, contenue dans le sédiment, en lentilles de glace, puis de la fonte de cette glace. Les arguments en faveur peuvent être résumés comme suivant :

- * mélange de matériel de nature et d'origine différentes;
- * acquisition d'une structure en agrégats arrondis, qui peuvent s'organiser secondairement en structure polyédrique ou lamellaire;
- * structures lamellaires qui se surimpose à l'agrégation arrondie;
- * juxtaposition d'agrégats de type et nature différents;
- * fracturation, à toutes les échelles, des constituants de nature et d'origine différentes;
- * compaction et stabilité des agrégats, quelque soit le type;
- * présence d'un niveau d'effondrement et de tassement général, avec départ du fer;
- * les coiffes sont grossières et poussiéreuses, ce qui indique de fortes percolations au sein du sédiment, cette masse importante d'eau ne peut provenir que de la fonte de la glace et ne peut être considérée comme issue d'un ruissellement à travers les fissures du karst ou de gouttières;
- * présence de niveaux de nodulation, apatitique ou calcitique, qui prennent naissance au sein d'un sédiment boueux; l'origine de l'eau est vraisemblablement interne à la couche et est issue de la fonte de la glace au sein du sédiment.

Les conséquences peuvent être résumées comme suivant :

- * perte des traits sédimentaires originels;
- * mélange de matériels d'origine différente, donc perte des signatures anthropiques et fauniques sur le sédiment;
- * changement de la granulométrie initiale par fracturation mécanique et/ou par ségrégations différentielles;
- * changement de la minéralogie initiale par intégration de nouveaux minéraux lors de la désagrégation mécanique des roches (grès, quartzite, etc.) et lors des prises en charge sélectives des minéraux par percolation.

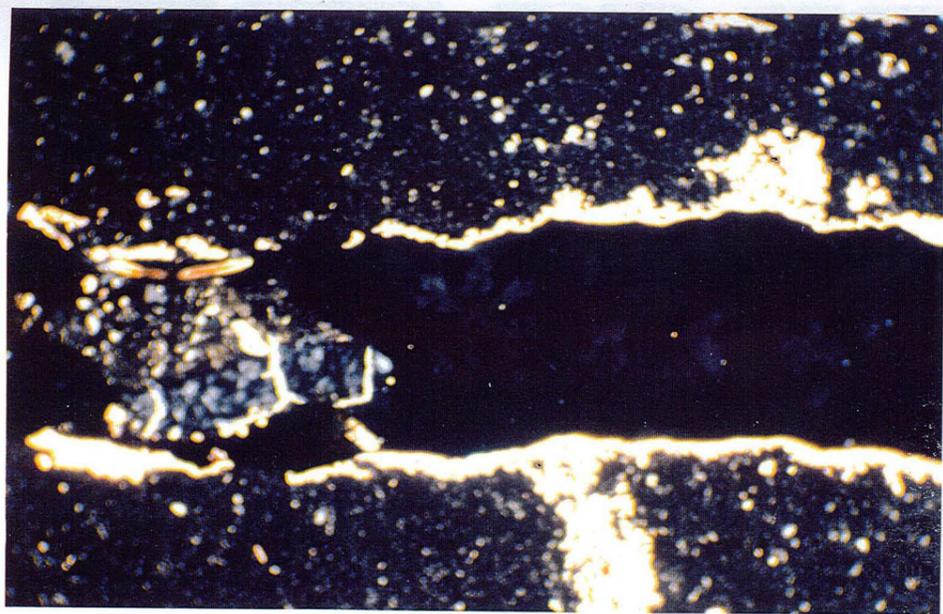
PLANCHE X
CAROTTE P
CARACTÈRES MICROSTRUCTURAUX

Photo 1- Couche P1, niveau P1a : Fissure planaire et agrégation lamellaire. Noter la finesse, la compaction et la phosphatation des agrégats. LP, 1 cm = 189 μ m.

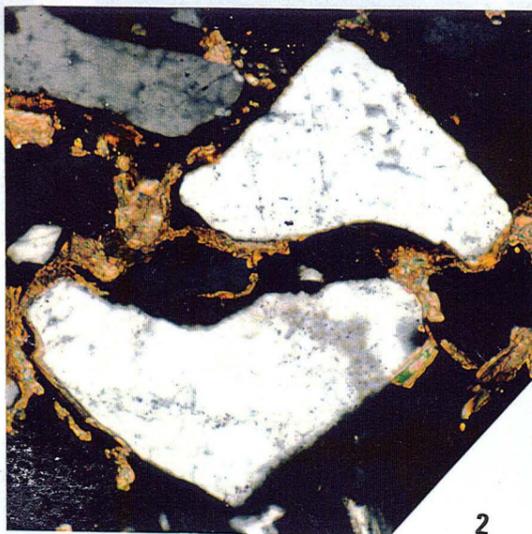
Photo 2- Couche P1, niveau P1b : a et b, deux exemples de fracturation mécanique des grains de quartz. Noter que les fragments possèdent la même orientation optique que le grain originel. LP, 1 cm = 76 μ m.

Photo 3- Couche P1, niveau P1b : Exemple de différenciation texturale. Coiffe complexe sur une concrétion organo-minérale. La coiffe débute par un fin liseré d'argile brune micacée, puis un lit limono-sableux fin suivi par un lit plus épais formé d'un matériel argilo-limoneux micacé à quelques grains grossiers. Noter l'orientation des grains allongés (quartz et micas) et la fissuration planaire découpant ces différents lits et comblée d'une calcite sparitique. LP, 1 cm = 189 μ m.

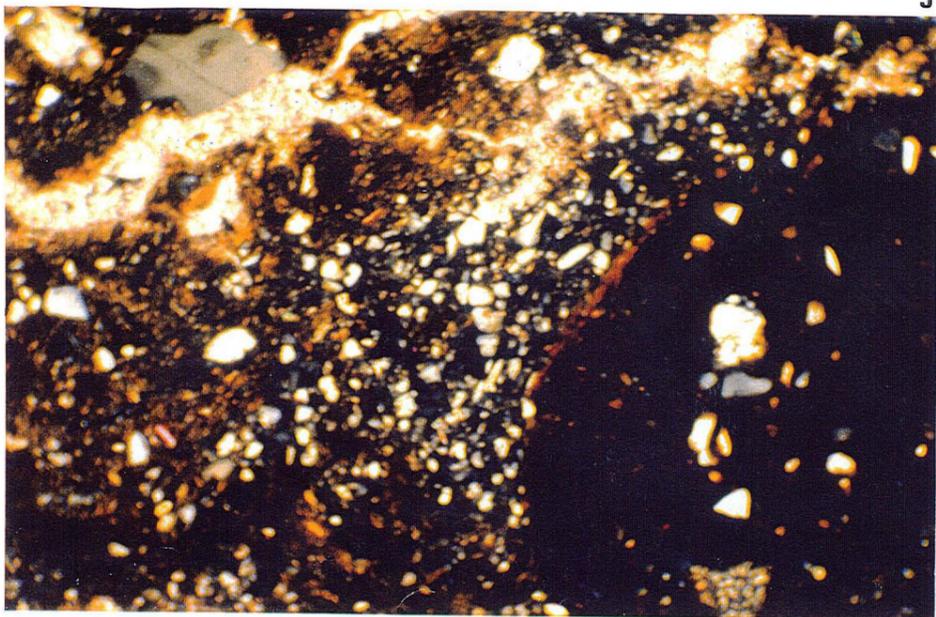
Photo 4- Couche P1, niveau P1b : Altération poussée d'un grain de feldspath au sein d'une plage phosphatée. Noter l'aspect granulaire de la masse phosphatée. a: LN, b: LP, 1 cm = 76 μ m.



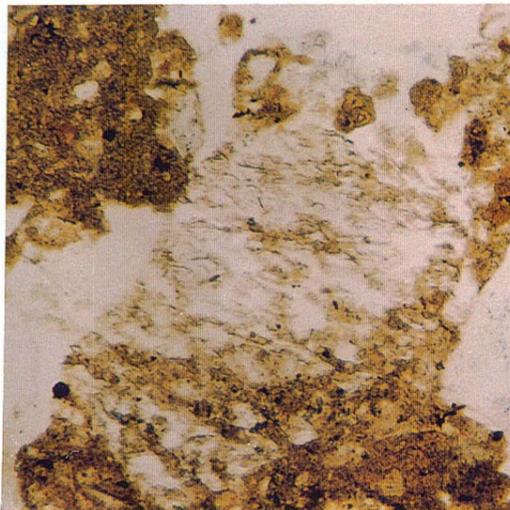
1



2



3



4

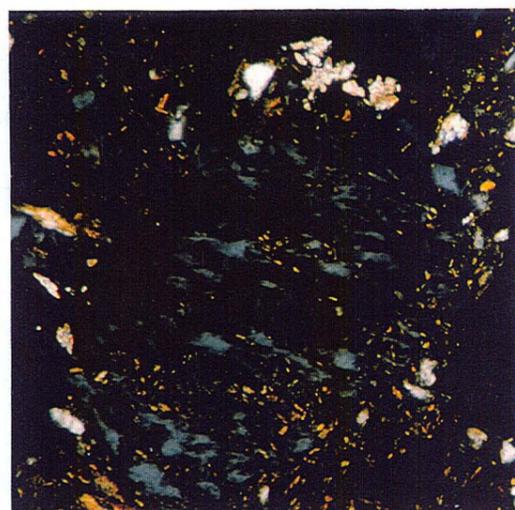
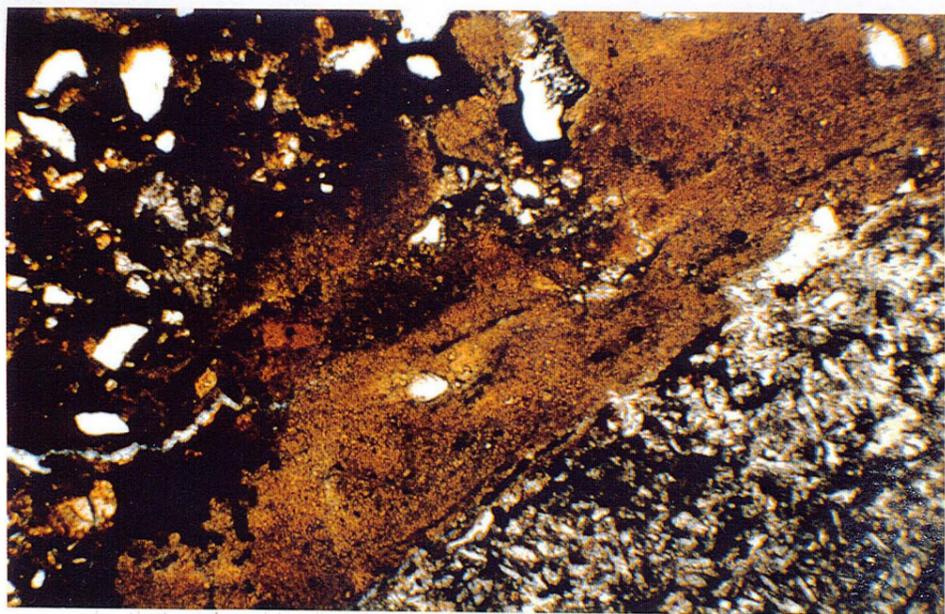


Photo 5- Couche P1, niveau P1b : Illuviation organo-minérale (complexe d'argile, oxydes de fer, matière organique) sur un silex (industrie). Noter le faible litage, l'aspect poussiéreux et l'imprégnation secondaire par des oxydes noirâtres de fer et de manganèse. LN, 1 cm = 191 μ m.

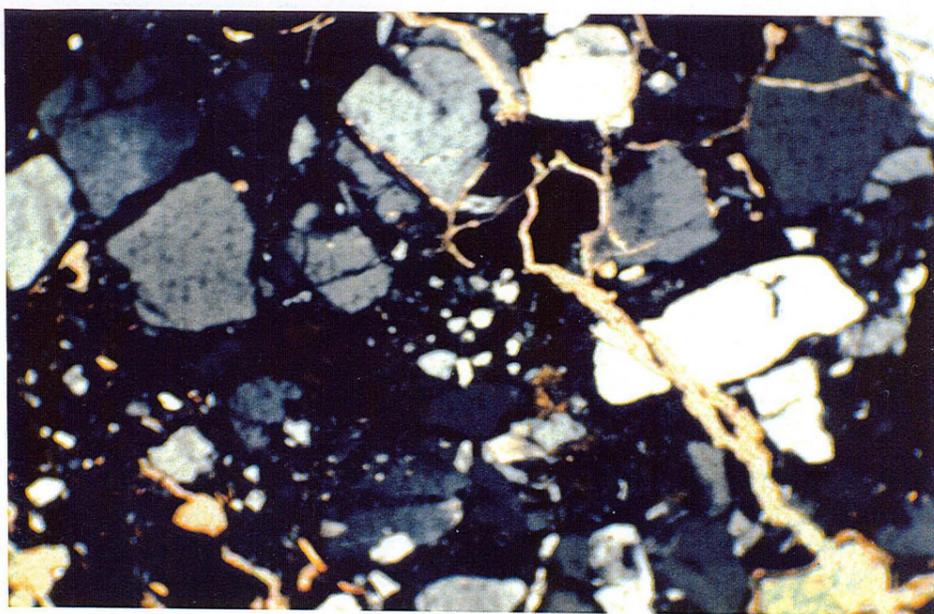
Photo 6- Couche P1, niveau P1b : Exemple de désagrégation mécanique d'un gravier en grès et enrichissement de la masse basale en sable. LP, 1 cm = 191 μ m.

Photo 7- Couche P2, niveau P2a : Phosphatation progressive d'une illuviation argileuse microlitée. Noter le passage graduel, la conservation plus ou moins nette du microlitage dans la zone phosphatée, et le recouplement de l'ensemble par des oxydes noirâtres de fer et de manganèse. LN, 1 cm = 191 μ m.

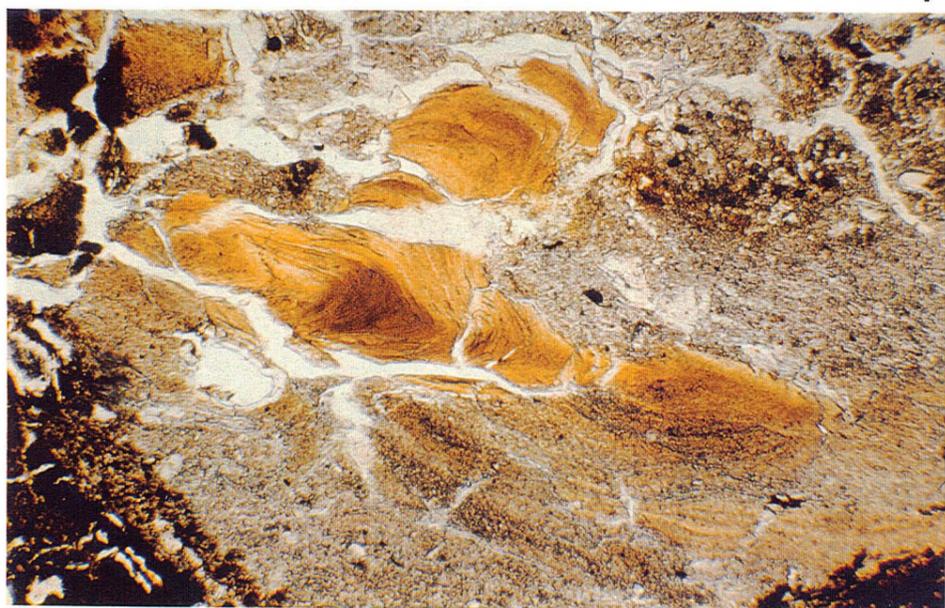
Photo 8- Couche P2, niveau P2b : Fissuration serrée de la fraction fine lui conférant un aspect feuilleté. Noter la concavité dirigée vers le haut de l'illuviation argileuse. LN, 1 cm = 152 μ m.



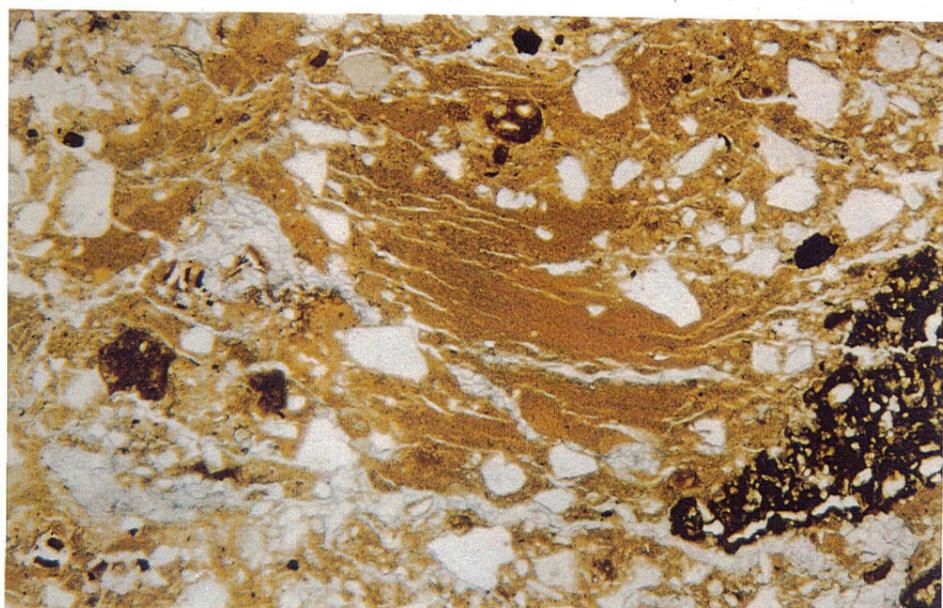
5



6



7

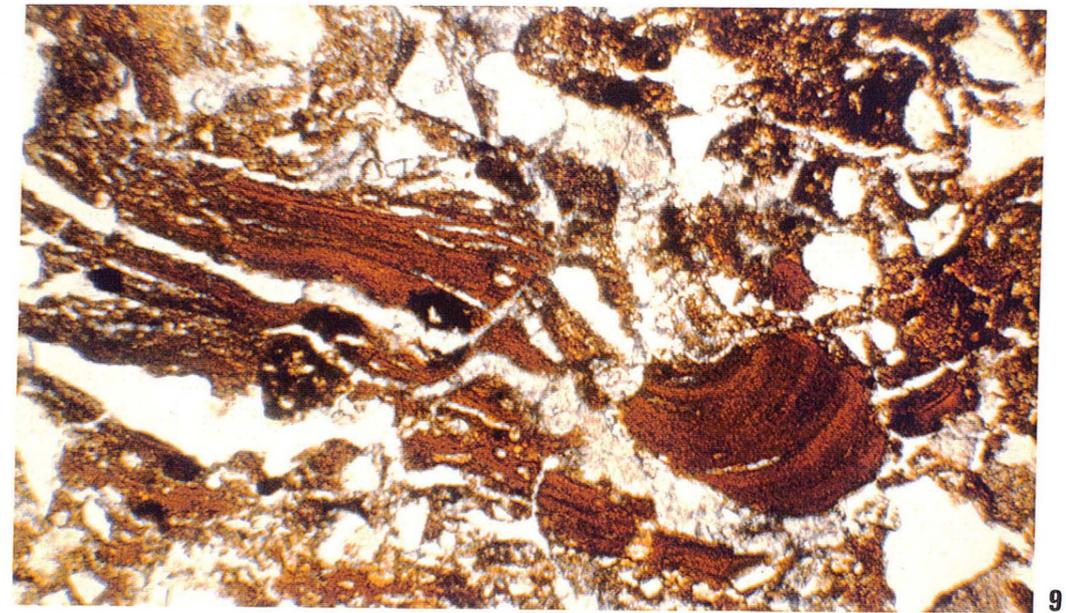


8

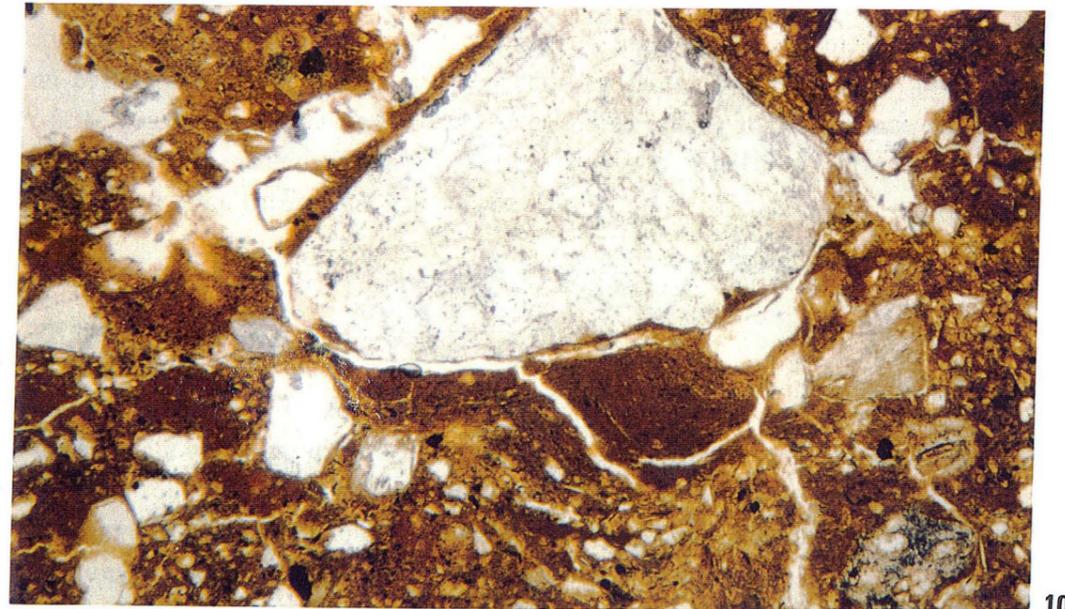
Photo 9- Couche P4 : Illuviation argileuse brun-rouge organique, craquelée et ponctuée de particules charbonneuses. LN, 1 cm = 152 μm .

Photo 10- Couche P4 : Grain de quartz grossier avec une barbe argileuse. LN, 1 cm = 191 μm .

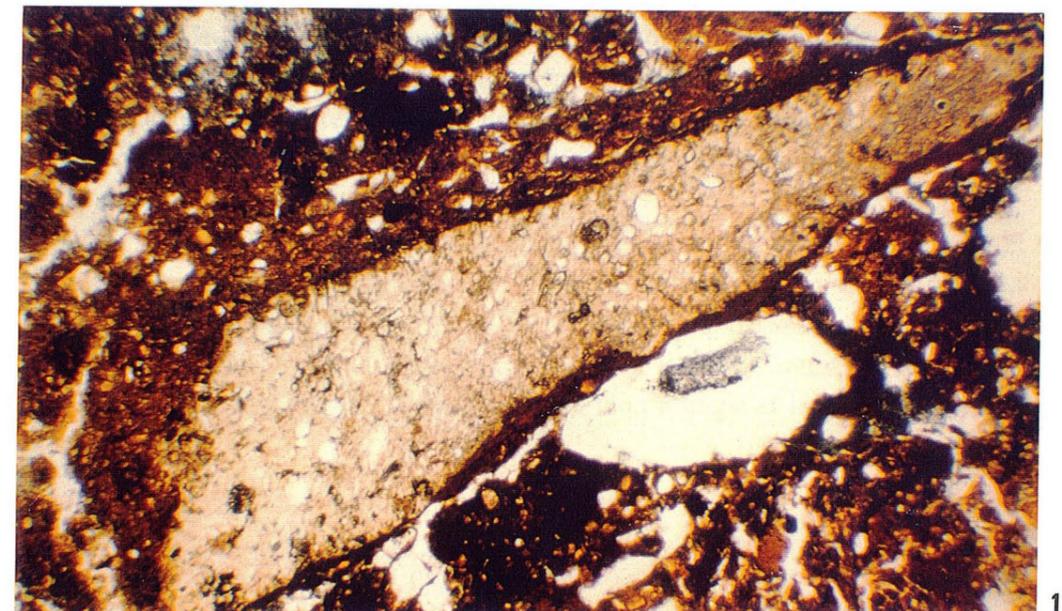
Photo 11- Couche P4 : Coiffe argilo-limoneuse sur un fragment de silex. LN, 1 cm = 376 μm .



9



10



11

II. COUPE LONGITUDINALE 2c50 (CAROTTE N)

La carotte N est située dans la partie nord de l'abri en aval de la carotte P et à 60 cm plus au sud (Fig. 1). Par rapport à la carotte P précédente, cette coupe présente une stratigraphie relativement simple montrant 3 couches distinctes en plus de la carapace d'altération (Fig. 5).

Lors de la taille des blocs indurés, il a été observé un fort pendage vers le sud des différentes couches qui épousent ainsi le pendage du substratum.

II.1. Couche N1

II.1.1. Description

Cette couche est d'épaisseur variable. Vers l'est, l'épaisseur est 20 cm, vers l'ouest et à l'endroit du prélèvement, elle est d'au moins 55 cm. En lames minces, il a été possible de subdiviser cette couche en deux niveaux distincts essentiellement par l'importance relative du matériel détritique et des minéralisations phosphatées. Le passage de l'un à l'autre est progressif mais marqué par une large fissure de 1 mm d'ouverture.

II.1.1.1. Niveau basale N1a

Surmonte la carapace d'altération du substratum. Son épaisseur n'est pas connue avec précision car sa limite basale est difficile à distinguer sur le terrain et le prélèvement n'avait pas atteint la base du profil. Sur les lames, cette épaisseur est d'au moins 15 cm.

On observe une phosphatation très prononcée à ce niveau. La fraction détritique forme environ 20 % de la masse totale. Elle est formée pour moitié de grains de quartz de toute taille (max. 350 μm) et de paillettes micacées. L'autre moitié est formée par des illuviations argileuses micacées finement litées, de couleur jaune-brun qui présentent souvent une décoloration en jaune pâle puis gris. Ces illuviations peuvent parfois être grossières et renferment des grains de quartz de 10 μm de diamètre en moyenne. Apparemment, ces illuviations semblent être plus abondantes à l'origine avant d'être en grande partie transformées en phosphate (Pl. VI, Photo 4; Pl. XI, Photo 1). Il est à noter que la crandallite est le phosphate dominant de ce niveau, suivie par l'apatite.

La masse phosphatée présente des craquelures fines et serrées dans tous les sens, et de larges fissures qui pendent fortement vers l'est. Cette masse renferme aussi des concrétions phosphatées jaunâtres à squelette quartzeux fin et rare. Les fissures et les concrétions phosphatées sont analogues à celles décrites dans le niveau P1a. Par contre, la minéralisation phosphatée est ici la plus importante, la plus variée en morphologie et la plus évoluée (Pl. II, Photo 9).

La porosité est importante, outre les larges fissures obliques (2 mm d'ouverture), on observe de nombreuses vacuoles (300 µm d'ouverture moyenne, quelques unes peuvent atteindre 2 mm d'ouverture) dont les parois sont souvent ondulées.

Ces vides et ces fissures sont souvent le siège de recristallisation d'apatite tardive et on observe assez de revêtements noirâtres d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse. Par contre, la calcite (d'origine racinaire ou revêtements) est très rare. Lorsqu'elle existe, elle constitue toujours l'ultime phase minéralogique mais elle est fortement dissoute (cristaux calcitiques disjoints et extrémités pointues ou bien sous forme de sphérules d'une dizaine de µm disjointes).

II.1.1.2. Niveau N1b

Du bas en haut, on observe une augmentation progressive (de 50 à 70 %) mais nette du matériel détritique sous forme d'agrégats arrondis rouge, quelques fois brun foncé, de toute taille (2 à 5 mm maximum).

Le litage est resté assez net en bas et se manifeste par une fine fissuration oblique ou horizontale. Il s'estompe progressivement vers le haut où il ne se devine que par l'alignement des agrégats rouges ou par une fine fissuration non continue.

Les agrégats bruns ou rouges possèdent les mêmes constituants et sont identiques à ceux décrits dans la couche P1. La couleur brune est donnée vraisemblablement par la matière organique. Les agrégats rouges renferment plus d'argile micacée que ceux de P1. Ils présentent tous une fine fissuration en réseau serré qui assure une dispersion des agrégats toujours plus importante à la base.

Comme pour la couche P1, on observe un mélange de constituant divers avec la présence des granules jaunes, des concrétions phosphatées grisâtres, des concrétions phosphatées jaunâtres, des grains de quartz et des paillettes micacées de toute taille. Par contre, on observe de plus l'apparition de grains de quartz très grossiers (1-2 mm) pour 2-5 %. La majorité des grains du quartz présentent des contours en creux et en saillie ou sont cassés, mais on n'observe plus de fragmentation *in situ*. La masse présente aussi des plages de 0,5 à 1 mm de concentration limoneuse grisâtres.

Par rapport à la couche P1, ce niveau présente en plus des concrétions argileuses à grande teneur en fer et à squelette quartzueux micacé, dont la structure est complexe et témoigne d'une longue évolution, et un enrichissement net en fraction fine micacée. Les anciennes illuviations argileuses micacées finement litées précitées, qui sont très rares dans la couche P1, sont ici plus abondantes. On remarque toujours leur décoloration et leur phosphatation progressives.

La phosphatation régresse nettement en faveur du matériel détritique. La fraction argileuse micacée appartenant soit aux agrégats rouges disloqués soit aux illuviations décolorées présente un débitage de plus en plus fin par un réseau de microfissures. Ce débitage, très important au sommet, confère à ces argiles une microstructure en amas allongés ou en sphérules de 15 à 5 µm et qui se fondent progressivement dans le ciment phosphaté. Ce

dernier présente aussi une microstructure en sphérules d'une dizaine de microns. L'analyse à la microsonde de ces sphérules indique la crandallite.

Les oxydes de fer et de manganèse sont assez présents et montrent une microstructure nettement sphérolaire (10 µm environ) et une coloration rouge-brun sauf les amas denses qui restent noirs. Ces oxydes sont en revêtement pour la plupart et accompagnent l'apatite tardive.

La calcite reste très rare et localisée surtout au sommet ou elle est liée à l'activité racinaire et montre une dissolution prononcée. L'activité racinaire plus intense au sommet engendre une porosité plus importante.

II.1.2. Discussion et conclusion

La présence du matériel détritique (quartz et micas et illuviations décolorées) permet de séparer la base de la couche (N1a) de la carapace phosphatée du substratum. L'identité des grains de quartz et la présence des illuviations décolorées dans les deux niveaux attestent de leur appartenance à une même couche.

La couche est caractérisée par des constituants très variés (quartz grossiers, illuviations micacées décolorées, concrétions phosphatées grisâtres, grains jaunes) dont certains présentent une organisation (agrégats rouges et agrégats bruns, concrétions rouges complexes, plages de concentration limoneuse). Cette variation atteste d'une évolution post-dépositionnelle intense aboutissant à un mélange et à une différenciation au sein de la masse sédimentaire.

Ces caractères sont identiques à ceux décrits pour la couche P1 à l'exception de l'absence ici des nodules calcitiques. On observe la même fissuration de la masse mais plus fine et plus discrète; les grains de quartz présentent des cassures mais jamais les fragments côte à côte. Ces deux observations peuvent s'expliquer par l'existence d'une masse d'eau plus grande aboutissant à la fois à la dispersion des fragments quartzueux ou autres issus d'un même grain et au tassement de la masse sédimentaire. D'ailleurs, la décoloration des argiles et la réprécipitation des oxydes de fer et de manganèse attestent de conditions d'hydromorphie ayant régné postérieurement.

L'effondrement de la structure au sommet qui devient massif et la richesse relative en oxydes de fer et manganèse rappellent ceux ayant affecté la couche P2. Par contre, on ne peut distinguer de différenciation nette du sommet. L'abondance relative des grains de quartz grossiers par rapport à P2 coïncide avec la grande densité des galets en grès d'origine anthropique dans cette zone, ces grains s'ajoutent au matériel originellement fin.

Il est vraisemblable que le sommet de N1 corresponde à la couche P2. Les battements d'une nappe d'eau ont dû être plus importants aboutissant à l'effacement progressif de la limite.

Le niveau N1a s'est vraisemblablement individualisé postérieurement au dépôt par une totale dislocation des agrégats rouges caractérisant le niveau sus-jacent, par une décoloration et une phosphatation beaucoup plus intense. Ce niveau correspond au niveau P1a.

Le niveau N1b correspond à l'ensemble des niveaux P1b et P1c et à la couche P2.

En conclusion, on observe que les caractères de la couche N1 se retrouvent dans l'ensemble des couches P1 et P2. Seule l'intensité des événements est différente à cause de la position topographique différente des deux.

L'ensemble des caractères de la couche N1 attestent d'une histoire ancienne et très complexe.

II.2. Couche N2

II.2.1. Description

De couleur jaune pâle verdâtre. Le passage avec la couche sous-jacente est progressif et est marqué sur la lame par des galets en grès phosphatés et disloqués dont les grains s'intègrent progressivement à la masse basale.

Dans l'ensemble, la masse basale est constituée par les mêmes agrégats rouges. Le squelette est caractérisé par l'abondance de la fraction limono-argileuse. Les grains de quartz grossiers mono- et polycristallins et les fragments de silex (de 0,6 à 1,5 mm) sont issus de la désagrégation des galets en grès (Pl. XI, Photo 2) et de l'industrie en silex. Cette fraction sableuse grossière (10% environ) s'ajoute nettement à un matériel plus fin et micacé formant un assemblage porphyrique. Les grains jaunes phosphatés sont présents et très fissurés, ainsi que quelques débris végétaux épars et des particules charbonneuses (30-100 μm) avec une grande dispersion. Enfin, on observe la présence de concrétions jaunes phosphatées à squelette quartzueux très fin (concrétions brun-chocolat très dures), de 4-10 mm de diamètre. Les silex (industries) observés présentent des vides ronds et des fissures dans lesquelles le matériel détritique s'injecte, limono-argileux dans les fissures et argile micacée dans les vides ronds. Ces silex peuvent montrer une fragmentation complète et dispersion des fragments. On observe aussi des granules en quartzite dont les grains de quartz sont dissociés, les vides ainsi créés sont le siège d'une illuviation argileuse brun-rouge micacée. Les grains de quartz grossiers présentent souvent un ou plusieurs côtés tranchants, les paillettes micacées montrent le même effritement ou bien une ouverture en éventail avec dispersion des feuilletts.

Cette couche est caractérisée par des différenciations texturales profondes et complexes. D'une manière générale, on peut distinguer :

- des domaines grisâtres de sable lavé, quartzueux et micacé, en position de coiffes sur les agrégats ou dans les vides interagrégats;
- des domaines grisâtres ou jaune pâle de concentration limoneuse, de même composition minéralogique que les domaines précédents, en position de coiffes sur les agrégats ou bien formant des lits horizontaux d'épaisseur variable (500 μm en moyenne), parfois, on observe des lits à grande teneur en paillettes micacées, au sein desquels les paillettes micacées sont toutes orientées horizontalement et s'empilent l'une sur l'autre;
- des domaines d'une argile micacée orientée et microlitée, en position de coiffes sur les agrégats ou sur les grains grossiers, ou bien en position de revêtements dans les vides vésiculaires et les vides polyconcaves, fréquemment, on observe au sein des agrégats des figures de "stress" de cette argile;

- ces trois domaines peuvent s'associer et former des coiffes ou des revêtements complexes (Pl. XI, Photos 3 et 4), souvent plus importante sur la face supérieure de l'agrégat;

Malgré la complexité de ces ségrégations différentielles, on note que l'ensemble s'inscrit dans une microstructure lamellaire nette et que la distribution des différents traits n'est pas hasardeuse. En effet, la granulométrie devient progressivement de plus en plus grossière de la base au sommet de la couche. Ainsi, la base de la couche (sur 6 cm environ) est caractérisée par la présence de galets en grès entre lesquels les agrégats rouges sont encore conservés et bien individualisés avec très peu de coiffes. Plus haut, (sur 8 cm environ), les agrégats rouges s'entassent et fusionnent. Il est à noter que la séparation entre ces deux niveaux se fait naturellement par une large fissure (2 mm d'ouverture) ondulée horizontalement. Le domaine d'entassement et de fusionnement des agrégats est caractérisé par la compaction du matériel et par de minces coiffes complexes formées d'une alternance de lits argileux et de lits limoneux parfois entrecroisés. On note que ces coiffes débutent toujours par un lit argileux. Les lits n'excèdent pas 100 μm et la coiffe 500 μm . Ce domaine passe progressivement (sur 20 cm environ) au niveau supérieur caractérisé par de larges coiffes sableuses (500 μm). Fréquemment, on observe un granoclassement inverse : les grains les plus fins se trouvent sur l'agrégat. De plus, les coiffes complexes se trouvent localisées dans ce niveau et se caractérisent toujours par une alternance de lits argileux et des lits limoneux puis par un lit sableux à granoclassement inverse.

Vers le sommet et en dehors des coiffes, on peut observer des plages lavées dans lesquelles les grains de quartz grossiers (> 400 μm) se concentrent et atteignent environ 20 %. En outre et indépendamment des coiffes, ce niveau supérieur se caractérise par des lits à sable fin et limon (Pl. XI, Photo 5) et des lits limono-argileux (Pl. XI, Photo 6). Les lits sont denses et le matériel quartzueux et micacé, les grains et les paillettes sont orientés. Dans les lits limono-sableux, on observe souvent que les grains de sable fin les plus grossiers ont tendance à se concentrer vers l'extérieur des lits. Tous ces traits texturaux se juxtaposent et s'interpénètrent d'une manière complexe.

L'ensemble de la masse observée en lumière polarisée montre un aspect strié. La structure lamellaire se surimpose à la structure en agrégats arrondis.

La porosité est abondante et complexe (dans tous les sens). Elle consiste en des fissures horizontales d'ouverture variable et qui ont tendance à se fermer par comblement plus ou moins complet par une argile illuviale jaune rougeâtre assez grossière micacée et microlitée. De même on observe, au sein des lits grossiers, des vésicules (100 μm d'ouverture en moyenne), ces vésicules ne montrent aucune illuviation postérieure (Pl. XI, Photo 7). Enfin, des vides polyconcaves de diamètre variable (pouvant atteindre 2 mm), mais le plus souvent allongés horizontalement (2 mm de longueur maximum). Ces vides polyconcaves sont le siège de la même illuviation que les fissures, illuviation qui comble parfois complètement les vides de petite taille. Cette illuviation peut parfois être surmontée par une illuviation très mince (100 μm environ), aussi micacée mais brune et semble organique. Les microvides sont vésiculaires et avec les fissures fines horizontales, ils affectent à la fois les agrégats et les différents traits texturaux. Postérieurement, on observe des craquelures sub-verticales affectant l'ensemble de la masse cassant les illuviations.

Les revêtements apatitiques sont totalement absents. La calcite est rare, essentiellement d'origine racinaire et dans un état avancé de dissolution.

Le niveau supérieur est caractérisé par une concentration élevée en sphérules de leucophosphite dispersés dans toute la masse du sédiment et dans les vides.

II.2.2. Discussion et conclusion

La structure lamellaire s'accompagne par une accumulation de grains de quartz lavés, par l'orientation des grains et des paillettes horizontalement ou suivant le contour des agrégats et par une extinction optique striée des revêtements. Il s'agit d'une structure lamellaire de type trié (VAN VLIET-LANOË, 1976) issue d'une alternance de gel-dégel.

Cette structure lamellaire provoque des ondulations des agrégats, des figures de stress à l'intérieur des agrégats, une bonne orientation de l'argile à la surface des agrégats en relation avec la fissuration fine et la désagrégation mécaniques des constituants minéraux. Ces traits correspondent à des cryoturbations engendrées par les pressions qui s'exercent sur le matériel sous l'effet de la glace de ségrégation pendant l'engel (VAN VLIET-LANOË, 1985).

Il est clair que la structure lamellaire se surimpose à la structure en agrégats arrondis, elle lui est donc postérieure. Elle est à mettre en relation avec la mise en place de la couche sus-jacente. Il s'agit donc d'une structure lamellaire triée issue d'un engel profond (lent) ce qui explique la conservation des traits associés.

La structure en agrégats arrondis originelle traduit une mise en place par géelifluxion (VAN VLIET-LANOË & VALADAS, 1983) en rapport avec la pente ouest vers l'est.

Sur le terrain et sur les blocs imprégnés, on observe un fort pendage (20 à 30°) des couches vers le sud (vers l'axe ou la rigole de l'abri). Il est fort probable qu'une partie ou la totalité des transferts (lavages et accumulations causés par le dégel) se soient effectués du nord vers le sud (ou le sud-est, à cet endroit, l'axe est orienté vers cette direction). Dans cette optique, les microvides vésiculaires et les vides polyconcaves correspondraient à des fissures ondulées qui seraient coupées par la lame mince en position frontale.

Dans les revêtements, la présence de lits limono-argileux interstratifiés avec des lits argileux indique des percolations rapide. Souvent, le litage de ces accumulations est sinueux, ce caractère et la présence de la leucophosphite en sphérules dispersés dans toute la masse du sédiment, avec une concentration plus élevée au sommet qu'à la base, et dans les vides indiquent un milieu engorgé d'eau.

Postérieurement, l'ensemble de la masse basale est affectée par des craquelures obliques ou verticales et par l'activité racinaire cassant les revêtements.

II.3. Complexe N3

Il s'agit d'un ensemble de couches dans lequel on observe des lits brun foncé riche en matière organique qui sont interstratifiés dans une masse de sédiment micro-agrégé (agrégats arrondis) riche en granules (galets karstiques). Les agrégats arrondis, les éléments grossiers

aplatis et un mince niveau jaunâtre à ciment apatitique et à squelette quartzeux s'organisent en structure lamellaire assez nette. Cette structure lamellaire est horizontale dans la moitié inférieure, oblique vers l'est dans la partie supérieure. Cette dernière présente une plus grande concentration en granules qui forment, avec la matrice, un lit qui pend vers l'est (Fig. 54).

II.3.1. Descriptions

II.3.1.1. Description de N3

Les agrégats arrondis ont formés du même matériel détritique que les agrégats de la couche N2, mais la couleur est plus brune à cause de la présence de la matière organique provenant des lits brun foncé ou violacé. En plus de la matière organique, les agrégats renferment des restes osseux très altérés de la taille des sables fins ou limons grossiers. Ces deux constituants supplémentaires les différencient nettement des agrégats rouges de la couche sous-jacente. Au dessus, on observe deux lits organiques de 1 mm d'épaisseur environ, séparés par un lit d'agrégats arrondis bruns. Les lits organiques brun foncé ou violacé (Pl. XI, Photo 8) possèdent une grande teneur en débris de végétaux très fins et très lacérés, des particules charbonneuses et des restes osseux très altérés de la taille des sables fins (grains orange). Les agrégats entre les lits organiques et au-dessus deviennent plus foncés du fait de l'intégration de la matière organique. L'ensemble des agrégats et les granules s'organisent en une structure lamellaire secondaire. On observe souvent que les éléments grossiers de différente nature sont posés à plat. La micro-organisation et les ségrégations différentielles reproduisent celles observées dans la couche sous-jacente avec la même intensité des lavages (Pl. XI, Photo 9). De même, on observe une plus grande concentration de la leucophosphite au sommet qu'à la base.

Ce complexe est beaucoup plus affecté par l'activité racinaire, elle se manifeste par des chenaux perturbant et cassant les microstructures.

La calcite ne s'observe que dans les chenaux racinaires et apparaît plus conservée.

Devant la complexité de cet ensemble qui pend fortement du nord vers le sud (vers l'axe de la rigole), il est apparu nécessaire d'étudier la carotte O (Coupe longitudinale 3a0) située à 50 cm en arrière (au nord) de la carotte N.

II.3.1.2. Description de la carotte O

Sur le terrain, on observe nettement 6 couches qui se corrélaient bien avec les couches de la carotte N. Ainsi, on distingue O1 et O2 qui sont l'équivalent respectivement de N1 et N2, puis 4 couches successives O3, O4, O5 et O6 qui correspondent au complexe N3. En effet, la base de O3 se corréla parfaitement avec la base de N3.

Le bloc induré montre de la base au sommet (Fig. 54) :

- O3** : couche brun violacé compacte d'une vingtaine de centimètres sur le terrain, seuls les huit centimètres supérieurs sont prélevés; activité racinaire moyenne; tendance à une agrégation polyédrique (mal développée);
- O4** : couche brun violacé à noirâtre très riche en matière organique, d'une dizaine de centimètres d'épaisseur, la limite basale est ondulée mais assez nette; la base s'individualise en un niveau de 2 cm, O4a, renfermant des agrégats arrondis (1-5 mm de diamètre) de même couleur que la couche O3 et noyés dans une matrice noirâtre organique; le sommet (1 cm) est franchement noir; activité racinaire importante; passage très net;
- O5** : couche marron plus claire que O3, épaisseur moyenne de 6 cm; cette couche montre deux niveaux O5a et O5b; le niveau basal, (2 cm) est marron-grisâtre finement lité et très compacté, le sommet (4 cm) montre clairement une agrégation arrondie (diamètre inférieur à 2 mm), la limite frontale est très nette alors que sur les côtés la limite est incertaine; activité racinaire moyenne à faible mais plus importante au sommet qu'à la base; la limite supérieure est assez nette mais ondulée;
- O6** : mélange intime entre des agrégats arrondis provenant du sommet de la couche sous-jacente et des agrégats aplatis noirâtres organiques, la couleur d'ensemble est brun-violacé.

Les couches O4 à O6 sont finement et nettement litées. Outre le pendage vers l'est (en position frontale), les couches présentent un fort pendage vers le sud (observé sur les deux côtés latéraux du bloc induré), si bien qu'on observe un pendage résultant vers le sud-est.

Les granules de toutes sortes sont concentrés plus en avant (vers le sud) qu'au fond.

L'analyse microscopique montre que :

- O3** : formée d'agrégats brun-grisâtre noyés dans une matrice fortement éluvée. Les traits texturaux sont complexes et semblables à ceux décrits dans N2 et N3. On observe clairement que l'éluviation affecte le fond matriciel à texture initiale limono-sablo-argileuse. Cette couche est riche en leucophosphate et renferme quelques grains ovales millimétriques bien émoussés ferrugineux;
- O4** : de texture limoneuse, cette couche est riche en débris végétaux très lacérés, en particules charbonneuses et restes osseux fins et très altérés (grains jaune et orange). Cette couche remanie le sommet de O3 aboutissant à un niveau basal, O4a, caractérisé par les agrégats grisâtres baignant dans une matrice limoneuse riche en matière organique et particules charbonneuses. Le niveau O4b ne renferme pas, ou très peu, les agrégats de O3. Le contact avec la couche sus-jacente est nettement lité, très compacté et très riche en débris végétaux fins et particules charbonneuses;

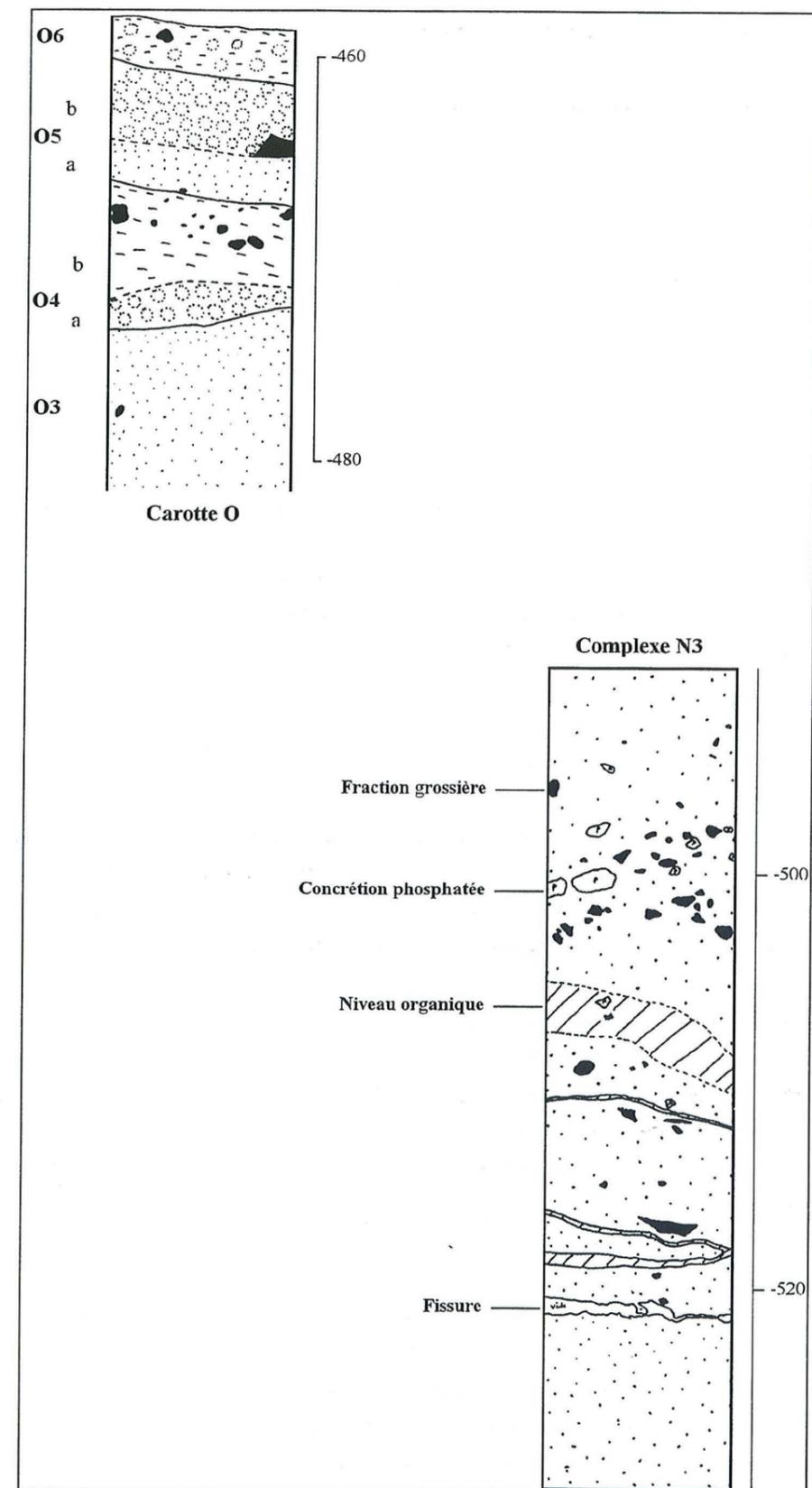


Fig. 54- Schéma, à partir de blocs indurés, montrant l'organisation macroscopique du sommet de la carotte O et du sommet de la carotte N (complexe N3).

O5 : formée d'un matériel fin limono-sableux et essentiellement quartzeux. La base, niveau O5a, est litée. Ce litage est formé par une alternance de lits millimétriques (ou moins) à grande dominance de sphérules de leucophosphite et de lits à dominance de grains de quartz et paillettes micacées. Au dessus, niveau O5b, on passe assez brusquement au même matériel, quartz, micas et sphérules de leucophosphite, qui s'organise en agrégats arrondis de taille variable mais ne dépasse pas 2 mm. Ces agrégats s'organisent secondairement en une structure lamellaire ou litée, accessoirement on peut observer un ou deux lits non continus à majorité de sphérules de leucophosphite. La limite supérieure est très irrégulière et très ondulée, signalée par un lit millimétrique très tassé formé d'un mélange du matériel de O5 et de O6;

O6 : couche comparable à O4.

D'une manière générale, l'ensemble de ces couches présentent un matériel quartzeux plus fin que ce l'on observe pour N3. En particulier, les grains de quartz grossiers sont absents et les grains moyens sont rares. De même, les granules (galets karstiques) semblent plus concentrés en avant de la carotte (vers le sud) qu'en arrière (vers le nord), cette concentration de granules atteint son maximum dans N3. Les revêtements phosphatés sont absents et la calcite rare et d'origine uniquement racinaire.

II.3.2. Discussion et conclusion

II.3.2.1. Carotte O

La couche **O3** possède des agrégats denses renfermant parfois des restes osseux de la taille des sables fins et quelques particules charbonneuses. Cette agrégation est issue d'un étalement du sédiment de l'amont vers l'aval, le long de la pente ouest-est. Lors du dégel, les eaux circulant dans les vides interagrégats ont déposé une matrice limono-argilo-sableuse non triée cimentant les agrégats. La succession des phases de gel-dégel continue à réorganiser le sédiment. On assiste alors à une tendance à l'aplatissement et au fusionnement des agrégats et à une ébauche d'une organisation lamellaire. Parallèlement, la matrice subit des lavages intenses aboutissant à des figures d'éluviation-illuviation complexes. Les soutirages et les accumulations sont interne à la couche et se font obliquement dans le sens de la plus grande pente, vers le sud ou vers le sud-est. La présence de la leucophosphite en sphérules uniformément répartis dans toute la masse y compris les agrégats plaide en faveur d'un milieu saturé en eau.

La couche **O4** s'est déposée également par gélifluxion sur pente ouest-est. Elle remanie légèrement le sommet de O3. Le contexte périglaciaire de ce dépôt est attesté, d'abord, par la lacération poussée des débris végétaux, par l'effritement mécanique des charbons en particules et des restes osseux et par le mélange intime entre un matériel charbonneux et végétal et un matériel d'origine faunique (restes osseux); ensuite, par la tendance à une organisation lamellaire

assez marquée. Il est très probable que cette organisation lamellaire soit synchrone à celle observée dans la couche sous-jacente.

La couche **O5** présente la même texture limono-sableuse et la même composition minéralogique. Il s'agit apparemment d'un même dépôt qui s'est individualisé postérieurement en deux niveaux distincts, O5a à la base et O5b au sommet.

Le niveau **O5a** est caractérisé par une alternance de lits denses à matériel quartzeux et micacé, au sein desquels sont dispersés des sphérules de leucophosphite, et des lits de même composition granulométrique et minéralogique mais à grande concentration de sphérules de leucophosphite. Quel que soit le type de lits, les paillettes micacées et les grains de quartz présentant une élongation sont posés à plat dans le sens du litage. La structure litée, la compaction des agrégats lamellaire et l'orientation des grains rappellent la structure lamellaire décrite dans la couche P1. L'ensemble de cette organisation a été acquise postérieurement suite à la ségrégation de lentille de glace. Dans cette optique, les lits quartzeux représentent le matériel primaire débité en lamelles séparées horizontalement par les fissures ou les fentes de retrait de la glace. Pendant les périodes de dégel, la leucophosphite s'est formée au sein et au-dessus des lamelles dans les fentes de retrait. Ainsi, on aboutit aux lits quartzeux à leucophosphite et des lits à forte concentration de leucophosphite qui se sont formés secondairement. Comme la leucophosphite nécessite un milieu réducteur et comme elle est dispersée également au sein des lamelles quartzeux, l'individualisation des lits à forte concentration de leucophosphite s'est faite dans un milieu engorgé d'eau. La bonne expression de la structure lamellaire témoigne d'un gel profond et lent. Cette phase de gel est vraisemblablement à l'origine de celle qui affecte les couches O4 et O5.

Le sommet de la couche ou niveau **O5b** est caractérisé par la conservation de sa structure primaire en agrégats arrondis mais avec une tendance à la réorganisation lamellaire. Cette faible expression est probablement liée à la position sommitale et à une moindre rétention des eaux consécutive à la porosité interagrégat élevée.

La couche **O6** s'est déposée en remaniant le sommet de O5. Elle est de même constitution que O4. Sa structure montre un mélange d'agrégats noirâtres et d'agrégats bruns étirés. Sa mise en place s'est faite probablement par cryoreptation le long de la pente ouest-est.

II.3.2.2. Complexe N3

Ce complexe montre la même structure primaire en agrégats arrondis qu'en amont de la pente nord-sud (carotte O). Cette agrégation et la composition minéralogique identique témoignent d'une même origine et d'une même dynamique de mise en place. De même, on observe également la même succession de couches quoique les limites deviennent incertaines et la tendance à l'homogénéisation élevée. Cette évolution est probablement issue de la tendance à la restructuration lamellaire postérieure, restructuration qui se trouve accélérée sur la pente forte nord-sud. La présence de lits minces organiques au lieu d'une seule couche est probablement l'expression d'une cryoreptation qui se fait plan par plan comme observé par BERTRAN (1989). La couche organique O4 se retrouve ainsi laminée en bas de pente. La concentration des grains de quartz moyens et grossiers constatée vers le bas de la pente est liée

à la concentration et à l'effritement des galets de grès à ce niveau. En bas de la pente (bande 2), axe de l'abri, on observe une grande concentration de tous les éléments grossiers : outils lithiques (HONG, 1993), des galets en grès (dallage) et des granules (galets karstiques et concrétions brun-chocolat d'apatite). Cette concentration est peut-être liée à des phénomènes de lavage et d'évacuation des fins postérieurement aux dépôts (agrégats arrondis) et antérieurement à la restructuration lamellaire.

C'est ce genre de différenciation et de remaniement périglaciaires sur pente qui rend difficile les corrélations stratigraphiques niveau par niveau.

II.4. Carottes O et N : Conclusion

L'étude de la carotte N et de la carotte O met bien en évidence l'importance et la complexité des facteurs locaux intervenant dans l'évolution et la transformation des dépôts. Ces facteurs sont essentiellement liés à la position par rapport aux pentes (ouest-est et nord sud) et à la position dans l'abri-grotte. La première position influence sur le drainage et sur les directions postérieures de la sédimentation. La deuxième est en rapport avec l'exposition plus ou moins importante des dépôts aux facteurs externes, principalement l'ensoleillement direct qui affecte le taux d'humidité par évaporation (les pluies n'interviennent que par l'intermédiaire de suintement ou de ruissellement à travers les fissures du karst).

La pente ouest-est commande l'étalement des couches d'amont en aval par cryoturbation ou gélifluxion, les structures et l'identité granulométrique et minéralogique de base en sont témoins. L'épaisseur importante de la carapace d'altération du substratum et de la couche détritique atteinte par la phosphatation est en rapport direct avec la position du dépôt dans le creux du "V" que forme le substratum et où on observe un surcreusement en rigole. Ce niveau de collecte et de circulation privilégiées des eaux est l'endroit où les solutions chargées en phosphate sont les plus renouvelées et la hauteur d'eau la plus haute. Il est donc normal qu'on observe à ce niveau la phosphatation la plus importante et la plus variée en types morphologiques.

La position par rapport à l'extérieur, principalement l'exposition à l'ensoleillement, crée un milieu local où le nombre de cycles gel/dégel est plus important que dans le couloir d'entrée et la salle. Ce nombre plus élevé aboutit à des figures d'éluviation-illuviation beaucoup plus marquées et plus complexes. De même, on observe une activité racinaire plus importante qu'en amont.

Ces deux facteurs agissent conjointement dans la différenciation des couches et surtout dans l'engorgement des sédiments qui dure assez pour permettre la genèse de la leucophosphite (nécessité d'un milieu réducteur). On rappelle que la leucophosphite n'a été repérée que dans la partie abri qui a donc fonctionné comme un collecteur des eaux.

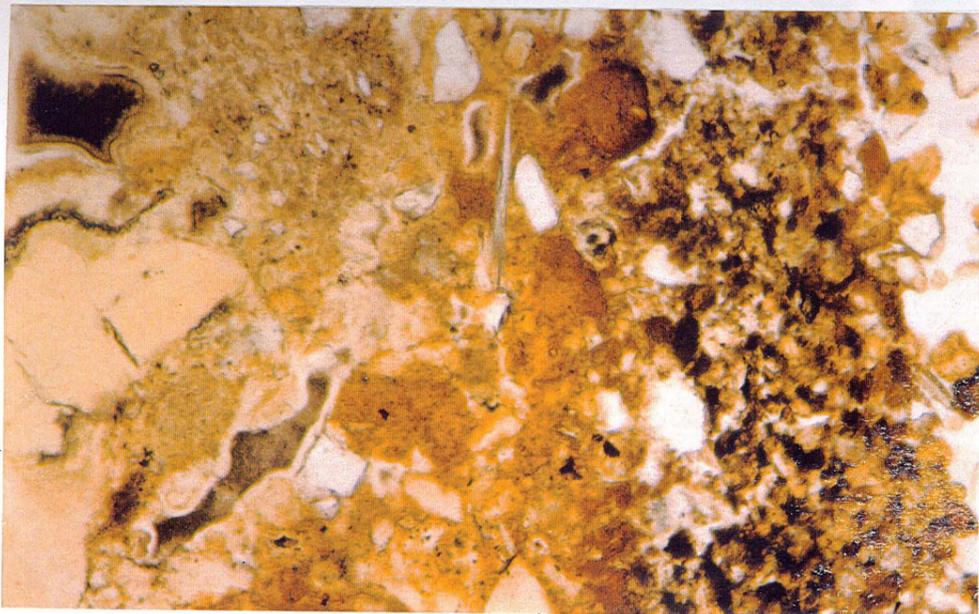
Ce sont toutes ces considérations qui accentuent, sinon changent profondément, les caractéristiques initiales d'une même couche rendant les corrélations, en détail et zone par zone, difficiles à effectuer.

PLANCHE XI CAROTTE N CARACTÈRES MICROSTRUCTURAUX

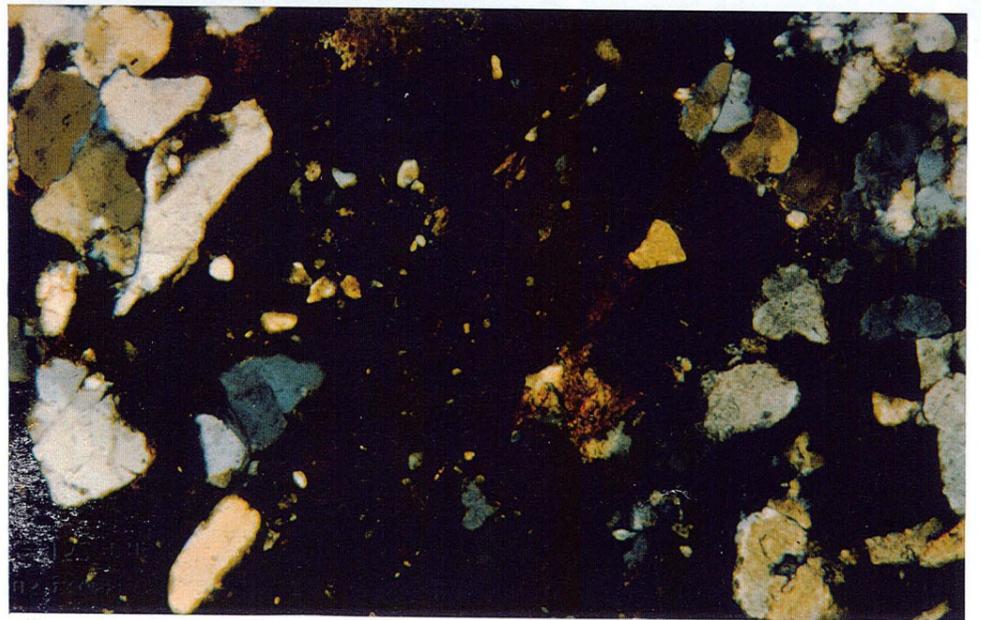
Photo 1- Couche N1, Passage N1a-N1b : Le niveau N1a est représenté par un matériel argilo-limoneux très phosphaté; le Niveau N1b est représenté par un matériel limoneux plus ou moins lavé, ferruginisé et beaucoup moins phosphaté. Ici, le passage est net; ailleurs, il est progressif. LN, 1 cm = 76 μ m.

Photo 2- Couche N2 : La base de cette couche est riche en galets de grès très altérés. L'altération enrichit la masse basale en grains de quartz et en micas de la taille des sables fins et des limons. LP, 1 cm = 152 μ m.

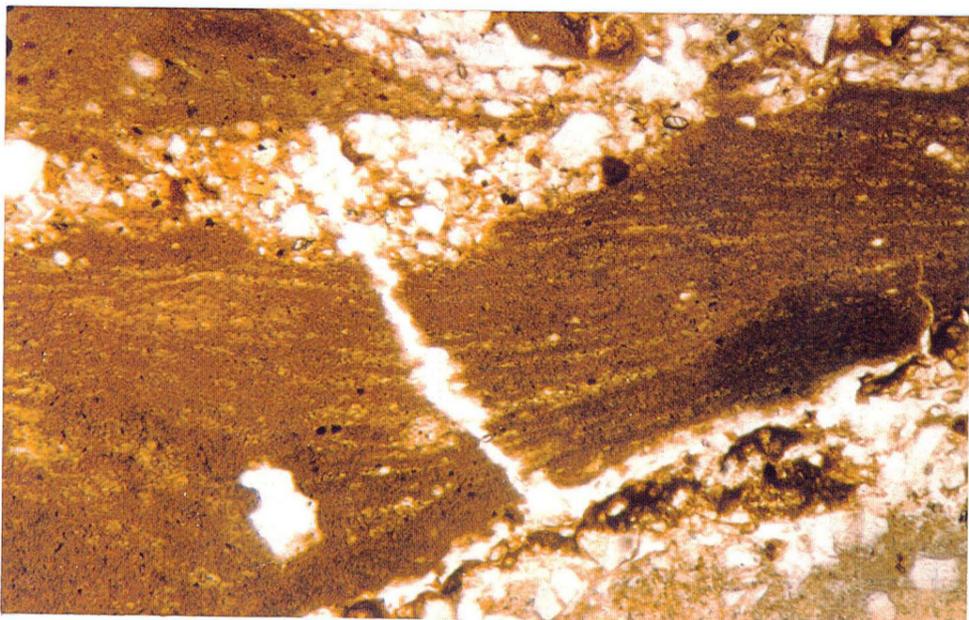
Photo 3- Couche N2 (base) : Coiffe épaisse sur un agrégat arrondi (en bas à droite). La coiffe présente un microlitage faisant alterner des niveaux argileux (foncés en LN et biréfringent en LP) et des niveaux plus grossiers renfermant des limons (clairs en LN). Cette coiffe fine est surmontée d'un lit limoneux plus ou moins lavé. a: LN, b: LP, 1 cm = 152 μ m.



1



2



3

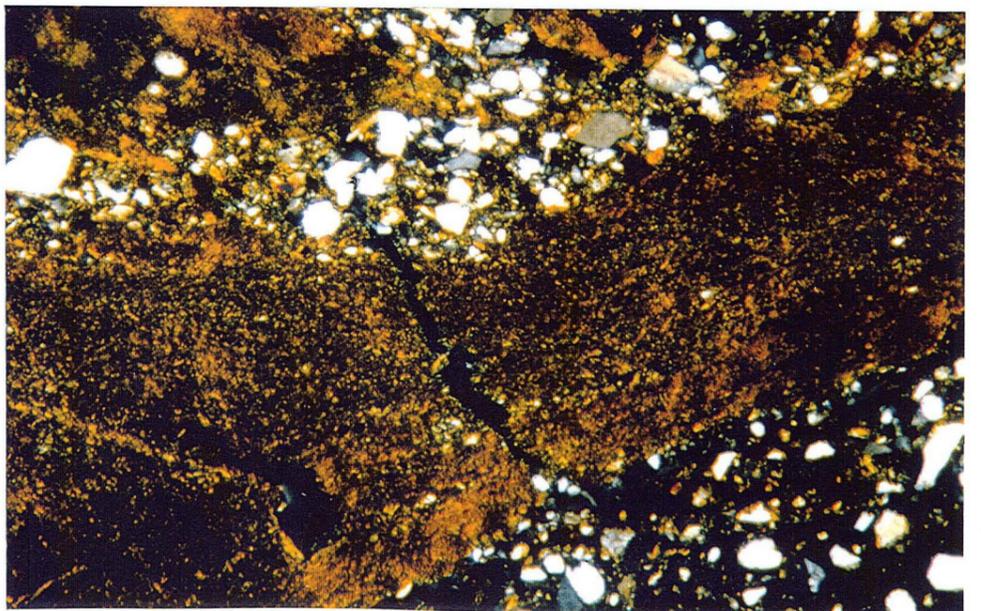
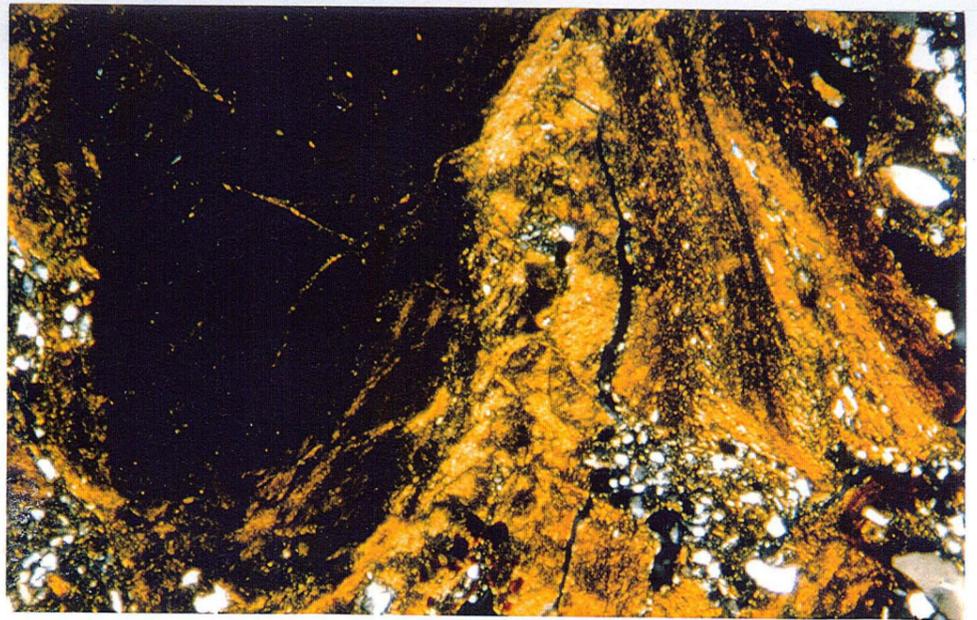
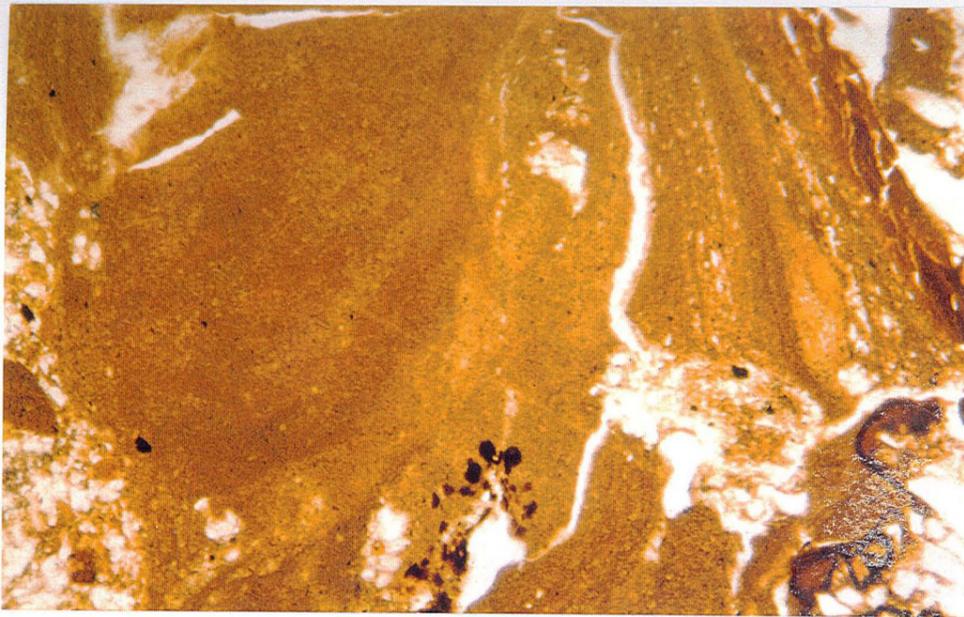


Photo 4- Couche N2 (base) : Exemple d'un revêtement complexe et lité de la paroi latérale d'un vide interagrégat. Ultérieurement, ce revêtement est fissuré et cassé par une injection limoneuse. a: LN, b: LP, 1 cm = 152 μ m.

Photo 5- Couche N2 (sommet) : Niveau limono-sableux lavé, riche en quartz et en micas, subissant une fissuration horizontale ou sub-horizontale. Noter l'absence de revêtements des vides. LP, 1 cm = 152 μ m.

Photo 6- Couche N2 (sommet) : Autre exemple de la même fissuration affectant un matériel limono-argileux très riche en micas. Ceci montre l'hétérogénéité granulométrique de cette couche et la complexité des différenciations texturales. LP, 1 cm = 152 μ m.



4

5

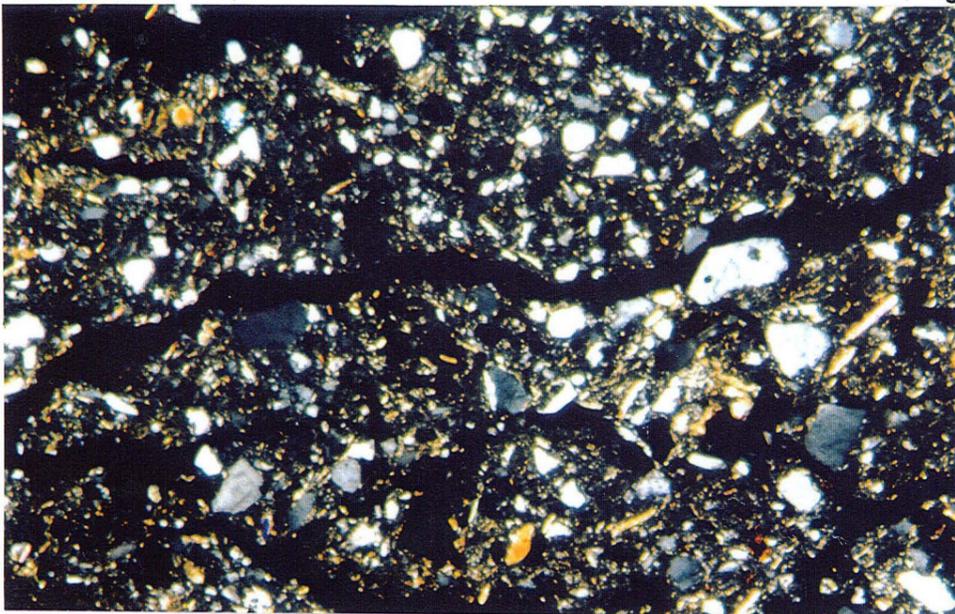
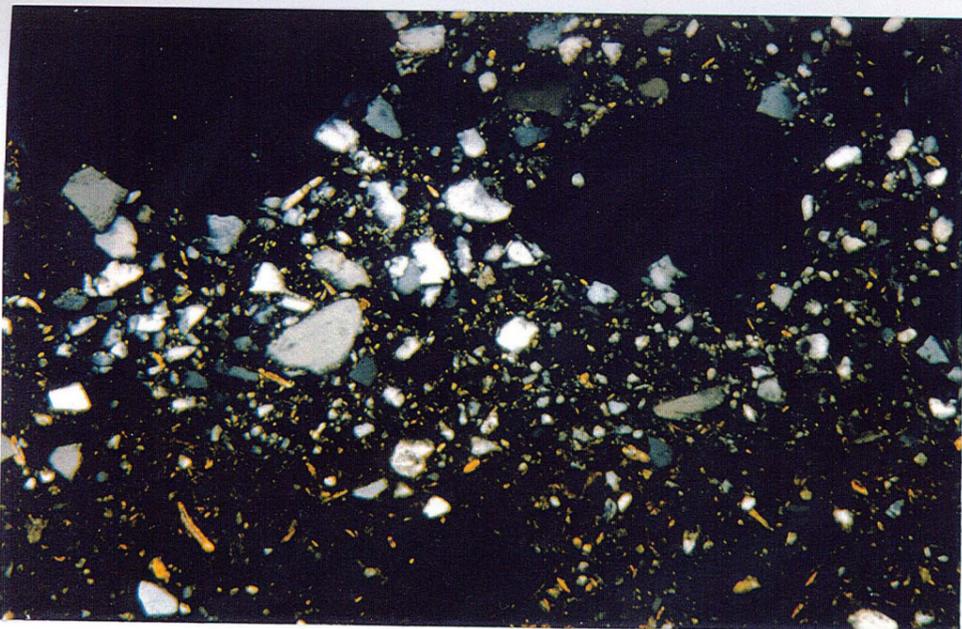


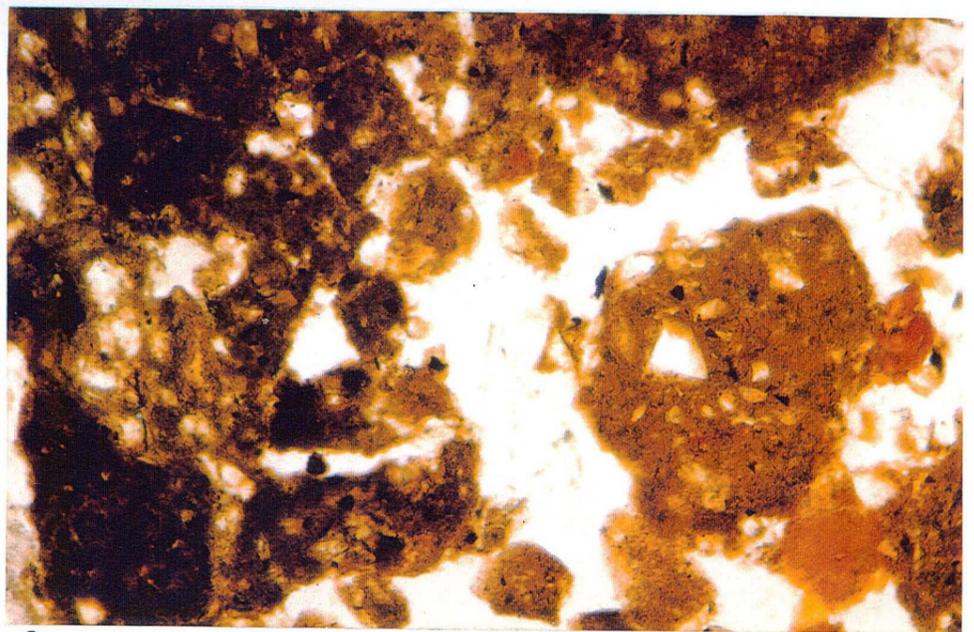
Photo 7- Couche N2 (sommets) : Figure de lavage : granoclassement et ségrégation différentielle du matériel dans un grand vide. Le niveau sableux au sommet est affecté par des vésicules libres de toutes illuviations. Le passage entre les différents lits est progressif. LP, 1 cm = 152 μ m.

Photo 8- Complexe N3 : Vue du niveau brun organique montrant une richesse en particules charbonneuses et en débris végétaux et une organisation en agrégats arrondis. LN, 1 cm = 76 μ m.

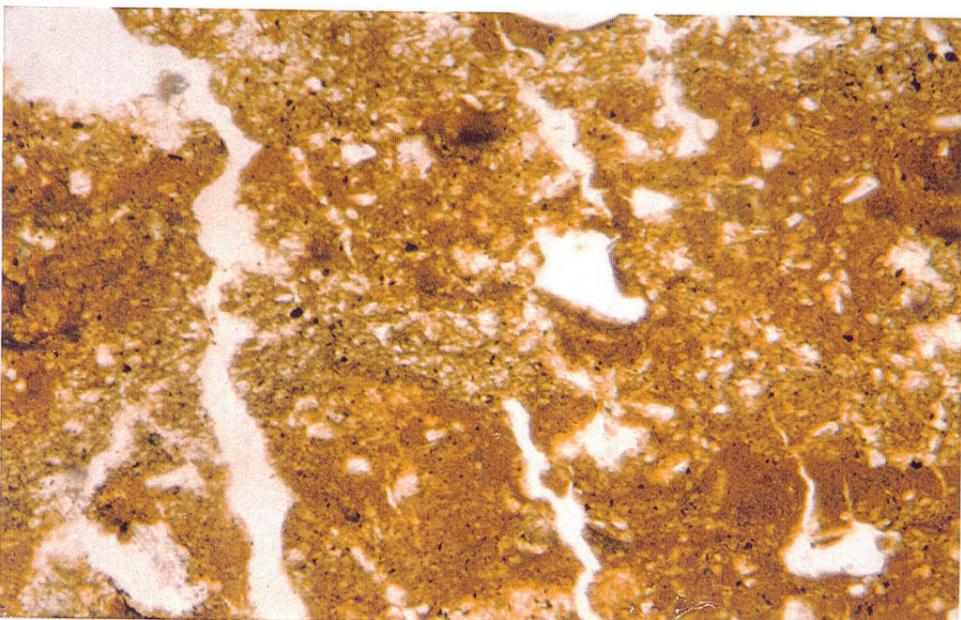
Photo 9- Complexe N3 : Exemple d'organisation texturale affectant ce complexe en dehors des niveaux brun organiques. Noter les craquelures obliques ultérieures. L'orientation des lits argileux (lit biréfringent en bas à droite) est provoquée par des contraintes ("stress cutanes") et non d'une illuviation. a: LN, b: LP, 1 cm = 152 μ m.



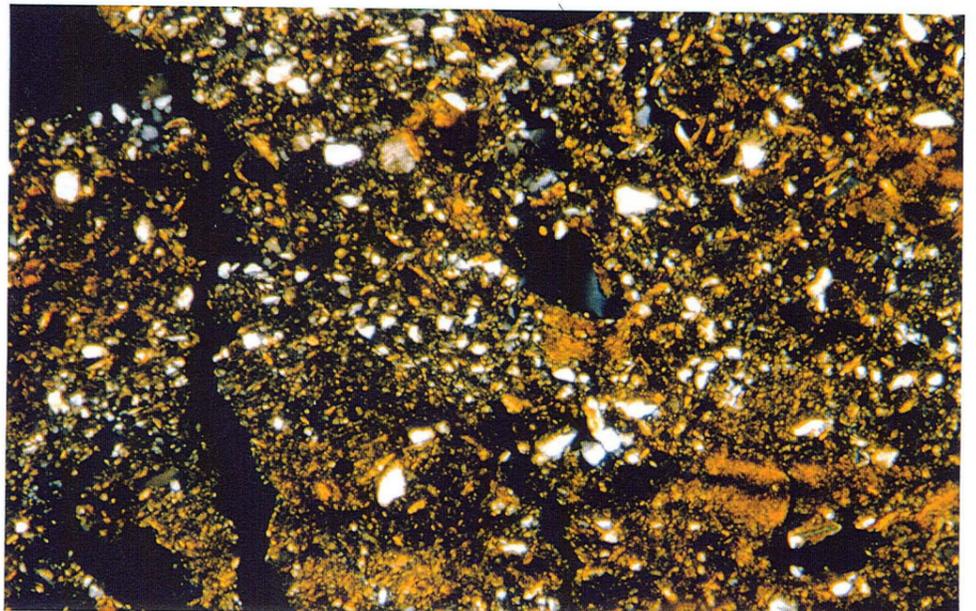
7



8



9



III. COUPE LONGITUDINALE 2a40 (CAROTTE M)

Cette carotte a fait l'objet d'une étude microscopique de la part de PERRENOUD (1993) dans une optique de mise en place de la paragenèse phosphatée des remplissages karstiques. Toutefois, il apparaît nécessaire de reprendre cette étude du point de vue organisations et microstructures à la lumière des données minéralogiques et microscopiques des autres coupes étudiées ici, tout en intégrant les observations et les conclusions de PERRENOUD.

L'observation des lames minces montre, outre la carapace d'altération, 5 couches bien distinctes nommées M1 à M5.

Elle montre aussi une activité racinaire intense affectant tout le profil et remaniant profondément les microstructures. Dans bien des cas, il est difficile de faire des filiations entre les différentes microstructures observées dans une même couche. Cependant, leur description et la comparaison avec celles observées dans les autres profils fournissent des éléments de discussion et de conclusion, mais avec réserve.

III.1. Carapace d'altération

Elle a été étudiée en détail dans la **Deuxième Partie, Chapitre II, § IV.2. Mise en place de la crandallite.**

III.2. Couche M1

III.2.1. Description

Elle est caractérisée par une texture limoneuse. Le squelette est formé par des grains de quartz, des paillettes micacées et par des grains oranges phosphatés. Les grains de quartz et les micas paraissent provenir de la désagrégation et de la dispersion d'anciens agrégats brunâtres dont on voit encore quelques-uns. L'ensemble de squelette quartzeux prend de l'importance au fur et à mesure qu'on s'approche du sommet de la couche.

La porosité est élevée et vacuolaire, surtout à la base de la couche (Pl. XII, Photo 1), à laquelle se surimpose une porosité plus importante et plus grossière due à l'activité racinaire intense. La porosité vacuolaire initiale est le siège d'une illuviation brun rougeâtre formée d'une argile micacée grossière, poussiéreuse et litée. L'empoussièrement est provoqué par la présence de la matière organique et le litage se manifeste par l'orientation de fines paillettes micacées.

Les illuviations argileuses subissent une transformation vers la crandallite. Ainsi, on observe vers la base de la couche l'apparition en plein milieu de l'illuviation d'un mince lit phosphaté jaune qui s'étend progressivement et latéralement jusqu'à envahir quasi totalement l'illuviation. Les remaniement racinaires intenses assurent l'éclatement et la dispersion de ces traits et on observe alors des structures "vermiformes" qui jalonnent la masse.

Cette masse phosphatée jaune, qui montre une structure granulaire ou sphérolaire en LP, peut subir une dissociation et une dispersion de ses sphérules qui s'intègrent progressivement à la masse basale en petits amas ou en sphérules isolés. Cette dispersion est assurée par l'activité racinaire, mais surtout par des lavages postérieurs auxquels le sommet de la couche a été soumis comme en témoigne l'apparition de domaine de concentration limoneuse ou limono-sableuse sans fraction fine.

III.2.2. Discussion et conclusion

Hormis les grains oranges dispersés dans la masse, le contenu et la microstructure sont semblables à ceux décrits pour le sommet de la couche N1 avec laquelle la couche M1 se raccorde bien, et cela même sur le terrain. La présence de la matière organique dans les illuviations présente une autre exception.

Les grains oranges posent problème d'origine. Ils n'ont été observés que très rarement à la base des profils. Par contre, ils sont plus ou moins abondants dans les niveaux noirâtres qui renferment des débris végétaux lacérés et des particules charbonneuses, ces niveaux ne se trouvent qu'au sommet des profils et se rencontrent même au fond de la salle. Ils ont été observés en abondance dans le terrier prélevé de la carotte S, et toujours en association avec des débris végétaux et particules charbonneuses. Il est fort probable que ces grains orange étaient à l'origine des restes osseux, ingurgités (abondance dans terrier) ou non, qui prennent cette coloration orange soit par le feu soit par imprégnation d'une substance organique quelconque.

Ces observations conduisent à voir dans cette couche un remaniement intense et un mélange d'un matériel détritique identique à celui de la couche N1 avec un matériel d'un terrier quelconque formé de débris osseux et de la matière organique. Ce mélange aurait subi par la suite une totale réorganisation par des circulations hydriques amenant les illuviations argileuses et transformation de l'apatite originelle en crandallite.

Il ne s'agit qu'une hypothèse qui demande confirmation ou infirmation. Pour cela, il faut s'assurer de la continuité latérale de cette couche, avec ses grains orange (plus en amont, zones L et K).

III.3. Couche M2

III.3.1. Description

C'est une couche brun-grisâtre qui remanie le sommet de la couche sous-jacente. La nuance grisâtre provient du lavage intense subit par la couche ne laissant qu'un matériel à texture limoneuse formé principalement de grains de quartz et de paillettes micacées, par un départ de fer consécutif probablement à des périodes d'engorgement, et par la présence de la leucophosphite en sphérules jaune pâle à transparent qui nécessite également un milieu réducteur.

L'ensemble de la couche présente une microstructure en agrégats arrondis millimétriques à inframillimétriques associée à des coiffes ou des revêtements limoneux sur les agrégats et sur les éléments grossiers (fragments de silex, petits galets karstiques etc.) et à des lavages internes aboutissant à des domaines blanchâtres de concentration de sables fins et/ou de limons grossiers (Pl. XII, Photo 2).

La couche présente une concentration relativement importante en petits galets karstiques de 5 mm de diamètre en moyen. Ils présentent tous une coiffe formée soit par l'entassement de petits agrégats arrondis soit par une coiffe lavée blanchâtre de même composition que les domaines de concentration. Il est aussi à noter que le sommet renferme des grains ferrugineux (2 mm environ) rouge vif ou brun foncé et très émoussés. Les grains orange, en nombre plus réduit, sont dispersés au sein de la masse et supportent les mêmes coiffes qui, parfois, entourent les grains entièrement.

L'activité racinaire est intense provoquant des remaniements des traits texturaux et l'augmentation de la porosité.

On note l'absence des revêtements apatitiques et des revêtements calcitiques observés dans la carotte P. La calcite est assez abondante et est liée à l'activité racinaire.

III.3.2. Conclusion

Toutes les caractéristiques de cette couche rappellent fortement la couche O3 et la base de N3 auxquelles elle est rattachée. Elle a donc la même origine et la même dynamique de mise en place que ces deux couches. Par contre, elle n'a pas subi de tassement postérieur et l'activité racinaire a contribué à lui donner un aspect plus aéré.

III.4. Couche M3

III.4.1. Description

Sur le bloc induré, on observe un fort pendage de la couche du sud vers le nord.

De texture limoneuse et de couleur brun-violacé, cette couche est riche en débris végétaux très lacérés et carbonisés, en particules charbonneuses et restes osseux fins et très altérés (grains jaune et orange). Elle remanie le sommet de M2 aboutissant à l'intégration des agrégats brun-grisâtre dans une matrice limoneuse riche en matière organique et particules charbonneuses. Le sommet ne renferme pas, ou très peu, les agrégats sous-jacents. Le contact avec la couche sus-jacente est net (Pl. XII, Photo 3), compacté et très riche en débris végétaux fins et particules charbonneuses, prenant alors une coloration plus foncée (noirâtre). Il faut noter que ce sédiment est pulvérulent et ne réagit que très peu à l'eau oxygénée, ce qui confirme sa richesse en charbon. La fraction grossière (petits galets karstiques) sont présent mais en nombre réduit.

Outre ces principaux caractères, on observe des concrétions centimétriques blanchâtres à jaunâtre, très poreuse (porosité vacuolaire) que la diffractométrie des rayons X donne comme

un mélange apatite-crandallite-calcite. La leucophosphite est toujours sphérolaire et dispersée dans la matrice.

L'activité racinaire est plus importante et conduit aux mêmes imprégnations calcitiques et à l'accentuation de la porosité (principalement en chenaux et en chambres).

III.4.2. Conclusion

La couche présente un mélange entre des charbons de bois réduit en poussière, des éléments provenant d'une activité faunique (débris osseux) et anthropique (outils), des éléments phosphatés (concrétions) et du sédiment détritique limoneux (quartz, micas, petits galets karstiques). Ce mélange ne présente pas d'organisation particulière à part un tassement avant les bioturbations racinaires.

La composition de cette couche est la même et se rattache à la couche O4, aux niveaux noirâtres observés au sein du complexe N3 et de P3. De même, elle s'est déposée par gélifluxion, mais l'agrégation arrondie qui aurait pu en découler a été détruite par suite de circulations postérieures dispersant les agrégats et leurs constituants, conduisant à un mélange tassé. La présence de la leucophosphite indique que cette couche a subi des phases d'engorgement.

III.5. Couche M4

III.5.1. Description

Elle présente le même pendage vers le nord que la couche sous-jacente. Elle possède une texture limono-sableuse (sables très fins), une coloration jaune-verdâtre et elle est très riche en nodules formés d'un mélange apatite-crandallite-calcite. Cette couche est la plus affectée par l'activité racinaire qui est énorme. La fraction fine ($> 5 \mu\text{m}$) est très réduite, poussiéreuse (riche en quartz et micas) et s'organise en revêtements des grains sableux et limoneux.

Cette couche a subi un remaniement intense aboutissant à une homogénéisation des traits sédimentaires et texturaux. La masse sédimentaire s'organise en agrégats arrondis de petite taille (50 μm en moyenne) (Pl. XII, Photo 4) avec un aspect granulaire et une porosité d'entassement assez élevée. Cette agrégation fine est issue d'un revêtement complet des grains de quartz sableux par une matrice limoneuse fine essentiellement quartzeuse et micacée. Le remaniement intense affecte aussi les nodules phosphatés, les uns sont éclatés et tendent à se disperser, les autres présentent un évidement et seul le cortex est encore en place.

La teinte pâle de la couche est due au départ du fer et à une dispersion homogène des sphérols jaunâtres de leucophosphite.

L'activité biologique intense pulvérise encore plus cette organisation, accentue la porosité et fait éclater parfois les nodules. Cette activité racinaire provoque la calcitisation qui est quasi totale au sommet de la couche. Ce sommet présente de grandes fissures et de grands

vides qui se remplissent du matériel venant de la couche sus-jacente. Elle est postérieure à l'organisation granulaire.

III.5.2. Conclusion

L'homogénéisation et la forte réduction de la taille des agrégats sont dues à un brassage intense du sédiment par des alternances de gel-dégel.

Lors des phases de dégel, il se produit un engorgement du sédiment créant un milieu réducteur favorable à la ségrégation du fer et à la genèse de la leucophosphite.

III.6. Couche M5

III.6.1. Description

Cette couche épaisse n'est bien développée qu'au niveau de la carotte M, latéralement elle s'amincit rapidement pour disparaître. Macroscopiquement, elle est caractérisée par une absence totale de toute organisation, une matrice pulvérulente et par des constituants de nature très variée. Sur la fouille, elle désignée sous le terme d'"amalgame".

L'observation microscopique indique l'apparition brutale d'un matériel hétéroclite qui provient des différents niveaux sous-jacents et alentours. On observe surtout la présence côte à côte d'ossements brûlés, d'ossements non brûlés et bien conservés et d'ossements très altérés, ces derniers n'entretiennent aucune relation apparente avec la matrice qui les renferme (comme observé dans la carotte P). La même observation est faite en ce qui concerne les cailloutis calcaires, on note la présence de cailloux à carapace apatitique de 1 mm ou plus et de fragments calcaires ne présentant aucune trace ni d'apatitisation ni de dissolution, et cela même à une dizaine de mm de distance. Des fragments cohérents de sédiment provenant des couches sous-jacentes ou alentours et des fragments de stalactites tombées qu'on n'observe que dans la partie nord (carotte R).

Tous ces constituants baignent dans une matrice (elle même hétérogène) totalement excrémentielle (Pl. XII, Photo 5).

III.6.2. Conclusion

Les caractéristiques de cette couche indiquent qu'elle est "artificielle" et est complètement remaniée, mais aucun rapport avec des remaniements périglaciaires. La méthode de fouille appliquée avant l'arrivée du Professeur de LUMLEY et ses collaborateurs consistait à ne recueillir que les "belles" pièces lithiques, ce qui explique la présence de l'industrie dans cette couche. Il est donc très probable que le remaniement est très récent et remonte au tout début de la fouille.

III.7. Carotte M : Conclusion

Le contexte général de la mise en place des couches et de leur minéralisation sont identiques à celles des carottes N et O.

Deux caractères singularisent la carotte M. D'abord une activité racinaire ancienne très importante induisant directement ou indirectement la calcitisation des couches à tous les niveaux. Ensuite, l'intensité des remaniements périglaciaires qui se manifeste dans la couche M4.

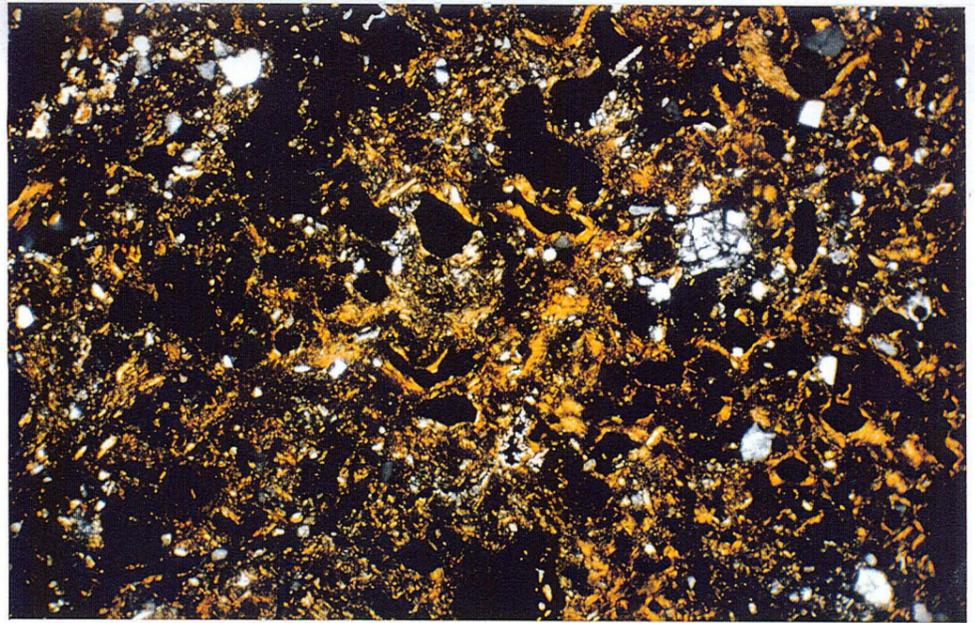
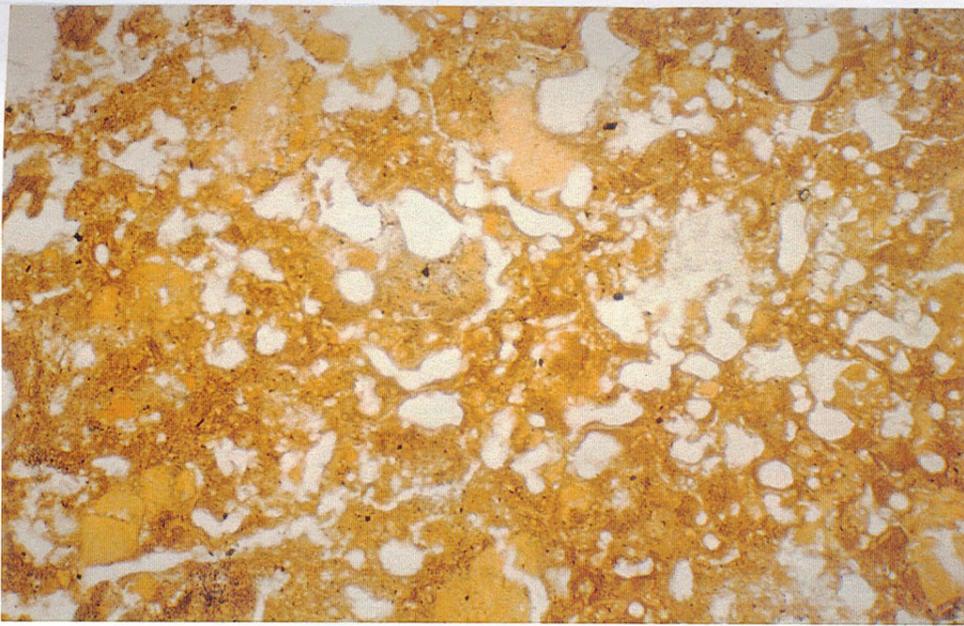
Ces deux caractères sont probablement liés à la position sud de la carotte M tout près de l'extérieur. Cette proximité a peut-être favorisé l'installation, à toutes les époques, d'une végétation bénéficiant de l'ensoleillement et de l'apport supplémentaire en eau d'une partie des pluies. Ces apports hydriques supplémentaires et l'influence plus importante du climat externe seraient à l'origine des remaniements périglaciaires beaucoup plus intenses. Mais aussi à la création d'une ambiance physico-chimique différent et non indéterminée), favorable à la genèse des nodules phosphatés caractérisés par un corps et un cortex.

Ces considérations semblent indiquer que l'abri aurait été ouvert beaucoup plus tôt que l'on ne pense et même antérieurement au remplissage.

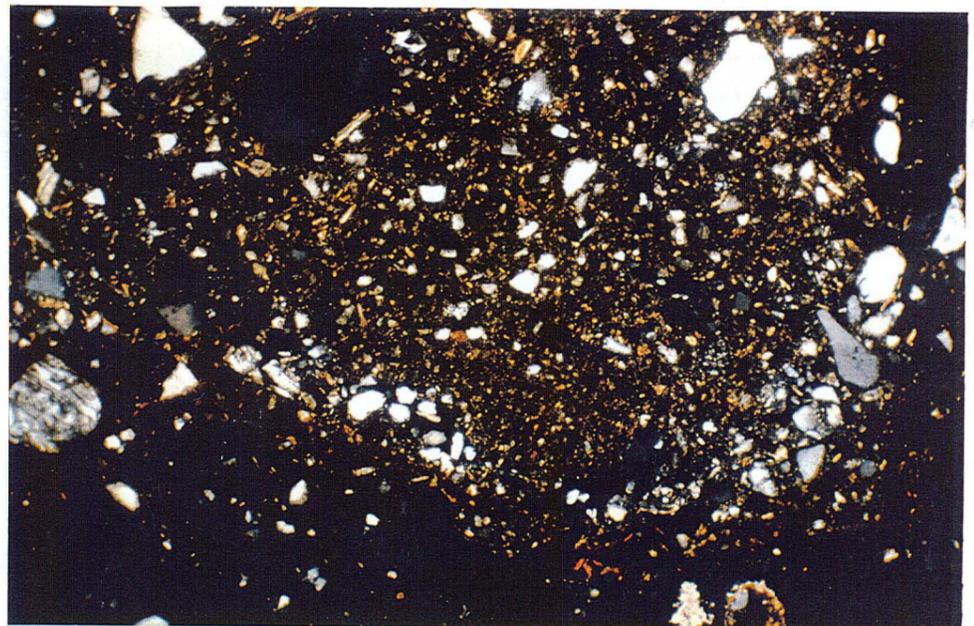
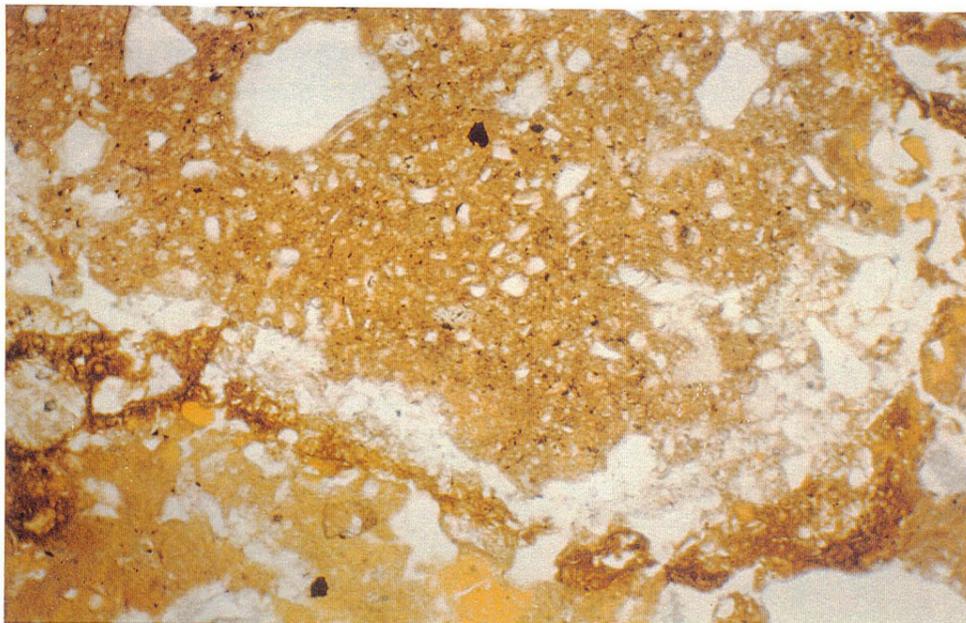
PLANCHE XII
CAROTTE M
CARACTÈRES MICROSTRUCTURAUX

Photo 1- Couche M1 : Vue globale sur la base de la couche M1, vacuolaire, très riche en crandallite et pauvre en matériel détritique (peu d'édifices micacés et très peu de quartz). a: LN, b: LP, 1 cm = 189 μ m.

Photo 2- Passage entre la couche M1 et la couche M2 : Le passage est brutale entre M1 riche en crandallite et M2 très riche en matériel détritique, apparition de la leucophosphite et d'une organisation en agrégats arrondis. a: LN, b: LP, 1 cm = 189 μ m.



1

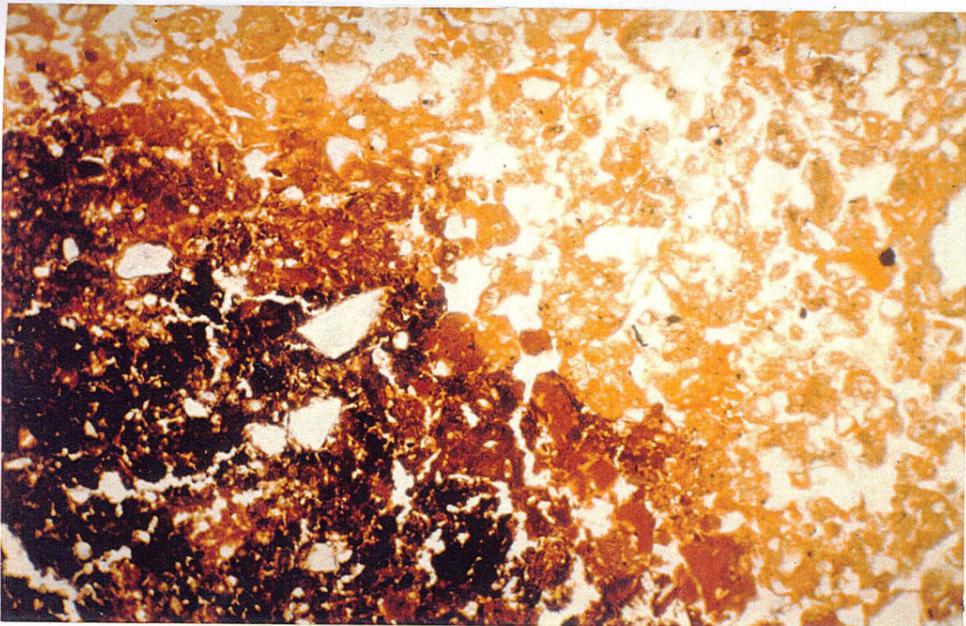


2

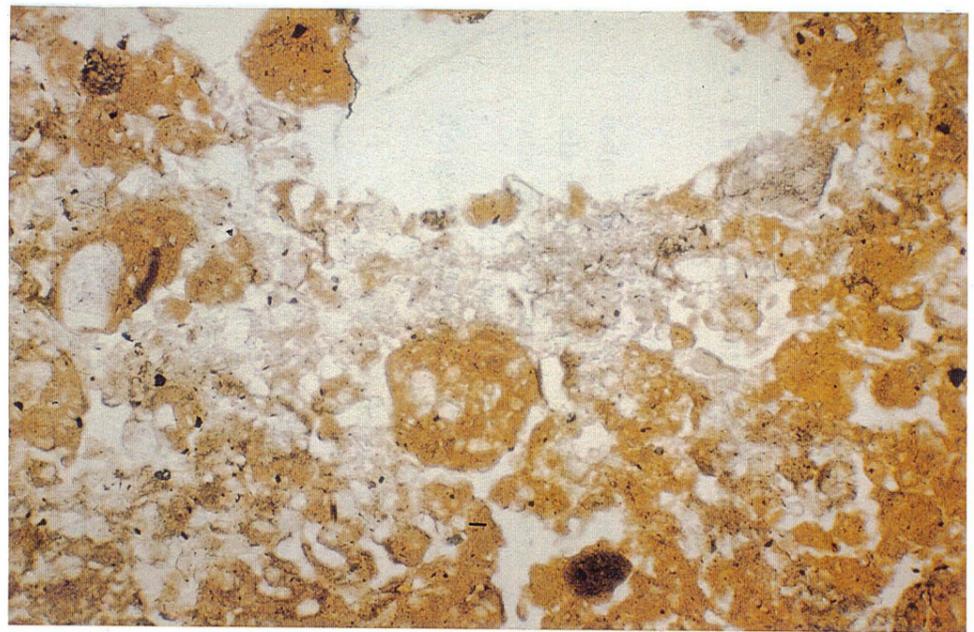
Photo 3- Passage entre la couche M3 et la couche M4 : Le passage est brutale entre la couche M3 très riche en particules charbonneuses et en débris végétaux lacérés et la couche M4 jaunâtre, très riche en matériel détritique et en nodules phosphatés (mélange apatite-crandallite) et en leucophosphite. a: LN, 1 cm = 189 μ m.

Photo 4- Sommet de la couche M4 : L'agrégation et les vides sont bien développés, en haut on observe un vide racinaire. En LP, on observe bien la formation de lits sableux par lavage probablement favorisé par le vide racinaire. a: LN, b: LP, 1 cm = 189 μ m.

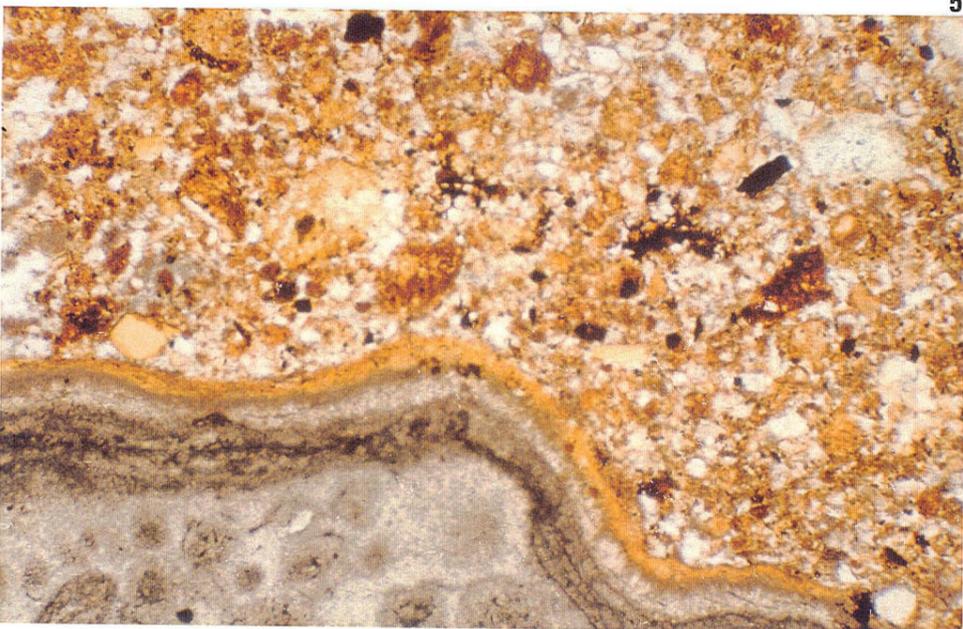
Photo 5- Couche M5 : Noter l'organisation excrémentielle, l'hétérogénéité des constituants élémentaires, en bas on observe un cailloutis calcaire avec une carapace apatitique jaunâtre. LN, 1 cm = 189 μ m.



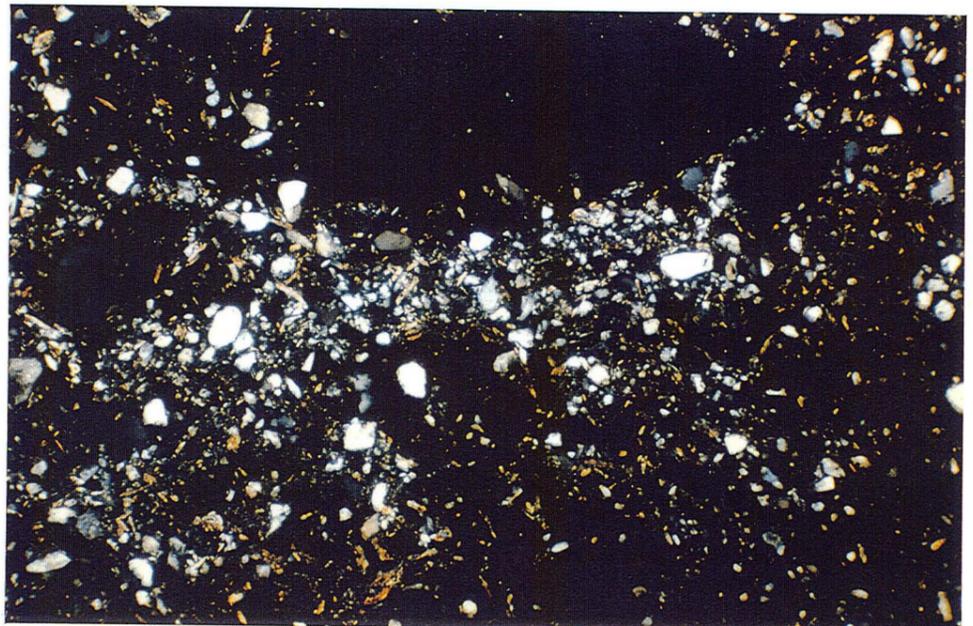
3



4



5



IV. LES DÉPÔTS PHOSPHATÉS : SYNTHÈSE

IV.1. Composition élémentaire et origine des sédiments

Exception faite de toute minéralisation secondaire (toute forme de phosphate, sauf les restes osseux, et la calcite), la nature des constituants élémentaires du sédiment est constante et cela même quelque soit la zone étudiée, seule la quantité de l'un ou de plusieurs constituants varie soit par accumulation absolue ou relative soit par dissolution.

Cette composition élémentaire a toujours montré un mélange entre des éléments d'origine différente.

La fraction grossière (> 2 mm) est caractérisée par :

- * de petits galets qualifiés de karstiques, arrondis ou ovales et de nature pétrographique variable, identiques à ceux du plateau et qui en sont originaires;
- * des pièces lithiques principalement en silex et des galets en grès (dallage) d'origine anthropique; des fragments d'os (moins fréquents, la taille dépasse rarement le centimètre) issus à la fois de l'activité anthropique et faunique, et de rares fragments charbonneux eux aussi ne dépassant pas le centimètre et d'origine anthropique.

La fraction fine (< 2 mm) est caractérisée par :

- * des quartz et de la muscovite principalement, accompagnés par des biotites et des feldspaths selon l'intensité de l'altération (on note que la fraction argileuse est elle même dominée par les quartz et les édifices micacées), la granulométrie à dominance limoneuse puis sable fin s'apparente à celle du plateau et se distingue nettement de celle du dépôt fluviatile de l'aven;
- * des fragments d'os de taille et d'intensité d'altération différentes, des fragments de roches provenant soit de la fragmentation des galets en grès ou des outils en silex soit sont des produits de débitage (débris de silex), des débris végétaux lacérés et des fragments et particules charbonneux; l'ensemble provient de l'activité anthropique et faunique mais il faut noter que les débris végétaux peuvent être hérités du plateau.

Tous ces éléments se trouvent intimement liés les uns aux autres. Les vastes fouilles effectuées jusqu'à présent n'ont jamais révélé de distinction verticale entre des couches ou des niveaux archéologiques et des couches plus ou moins stériles; par contre, elles révèlent des concentrations plus ou moins nettes de témoins archéologiques selon les zones en relation avec les pendages du substratum et révèlent aussi des redressements des outils. Lors de ces fouilles, il n'a été mis en évidence que des restes de foyers remaniés dont le contenu est dispersé, jamais de foyers structurés. De même, l'étude microscopique ne montre pas de distribution différentielle entre le contenu archéologique et le sédiment hérité du plateau.

Ce mélange des constituants d'origine différente indique des réorganisations macroscopiques et microscopiques du sédiment pendant et après mise en place au sein de chaque couche distinguée.

L'origine du sédiment qu'on observe actuellement est double : détritique provenant du plateau et archéologique provenant de l'activité anthropique et faunique.

L'observation du terrain montre que l'arrivée des sédiments détritiques s'est effectuée à travers les fissures du karst, bien développées au fond de la grotte, s'accumulant au fond de la grotte (salle) en s'étalant vers la sortie (couloir puis abri).

Les prélèvements des sédiments du plateau montrent une richesse en petits galets de différente nature mais aussi de fragments calcaires plus ou moins émoussés qui ont été arrachés à la roche mère calcaire qui affleure largement. Cette fraction grossière est emballée dans une matrice limono-sableuse riche en quartz et en micas, en débris végétaux et en débris calcaires de la taille des sables grossiers à la taille des limons. Comme les fissures du karst ont permis l'entraînement des petits galets, elles ont dû permettre aussi l'entraînements des fragments calcaires. Or les sédiments de la salle (le peu qu'on a pu étudier) et particulièrement les dépôts du couloir et de l'abri ne contiennent aucune trace de calcite (sauf celle constituant l'ultime phase minéralogique).

L'absence du calcaire détritique indique donc une phase de dissolution complète des fragments calcaires. Cette décarbonatation a été longtemps attribuée à la phosphatation (remplacement de la calcite par l'apatite). Or, il a été observé que les plages du sédiment "sain" (non phosphaté) sont dépourvues de calcite; de plus, les agrégats arrondis, qui ne s'imbibent pas d'eau à cause de leur densité et dont le contenu échappent à l'altération (dissolution, phosphatation etc.), renferment toute sorte de matériel (débris de silex, des restes osseux, fragments de roches divers etc.) sauf du calcaire, quelle qu'en soit la forme. L'étude de la paragenèse phosphatée montre que l'apatitisation a affecté un sédiment déjà décarbonaté et l'étude de la dissolution des os (et de l'apatite) montre que la dissolution de l'apatite ne se fait qu'après évacuation complète de la calcite hors du profil.

En résumé, la décarbonatation s'est effectuée bien avant la phosphatation (et bien avant la réorganisation du sédiment; cf. § IV.2. de cette synthèse). La question qui se pose est quand s'est-elle effectuée ?

Deux hypothèses peuvent être envisagées sans pouvoir en privilégier aucune :

- * au cours du déplacement du sédiment à travers les fissures, les fragments calcaires subissent un amincissement de plus en plus important, de sorte qu'en débouchant dans la salle, ce qui reste est très fins et facile à dissoudre, de cette manière, le sédiment qui se répand dans le couloir et dans l'abri est quasiment dépourvu de calcite : l'essentiel de la décarbonatation s'est effectuée dans les fissures du karst et dans la salle;
- * le sédiment qui s'est répandu dans le couloir et dans l'abri est encore riche en fragments calcaires, dans ce cas, l'essentiel de la décarbonatation s'est effectuée *in situ*, ce qui implique une séparation dans le temps entre la décarbonatation et la phosphatation.

IV.2. Organisations et dynamique de mise en place

En dehors des zones de bioturbation racinaire, l'observation des lames minces montre que le sédiment s'organise principalement soit en agrégats lamellaires, parfois lenticulaire, soit en agrégats arrondis (de 5 mm à 50 μ m), soit encore en une structure de tassement et de compaction (effondrement et désagrégation).

Les agrégats lamellaires sont hautement compactés, d'où leur grande stabilité. Cette compaction s'accompagne par une fracturation mécanique des constituants à toutes les échelles (nettement visible dans la couche P1). Cette organisation lamellaire est nettement postérieure au sédiment qu'elle débite et en plus, elle se surimpose à une organisation antérieure en agrégats arrondis associés à des ségrégations texturales différentielles. Ces derniers renferment des vestiges d'origine anthropique et faunique et ne peuvent être hérités du plateau. Ce qui revient à dire que ces organisations ne sont pas originelles, mais proviennent de restructurations post-sédimentaires. L'organisation sédimentaire originelle est complètement oblitérée, du moins dans les profils étudiés.

La reprise des agrégats arrondis par la structure lamellaire s'observe à la base des carottes P et N (couches basales jaunes compactées). Au-dessus, les agrégats arrondis sont bien différenciés et peuvent ou non être réorganisés en lamelles, généralement sans leur destruction. Ils sont toujours associés à des coiffes et à des plages de lavage plus ou moins exprimées selon l'intensité des circulations hydriques postérieures. Là aussi, il s'agit d'une réorganisation post-sédimentaire.

Ces restructurations et réorganisations sont sous le contrôle de l'alternance de gel/dégel. L'agrégation lamellaire (ou lenticulaire) est issue d'un gel lent et profond affectant un matériel limoneux qui s'y prête bien. L'organisation en agrégats arrondis, associée aux lavages et à des coiffes, est issue d'un nombre de cycles gel et de dégel plus important, en surface et combiné à la pente.

Pendant les périodes du dégel, une quantité importante d'eau circule à l'intérieur du sédiment. Ces circulations se font à l'intérieur des couches et sont principalement obliques à cause de la double pente. Elles ont été à l'origine de transferts importants du matériel au sein de la matrice. Ainsi, on constate l'enrichissement de l'abri, par rapport au couloir, en fraction argileuse et limoneuse fine; sur la coupe ouest (non étudiée en lames minces) et au niveau de la rigole, on observe une couche jaunâtre dont la texture est singulièrement sableuse (sables fin et moyen) dont la diffractométrie X donne uniquement des pics de quartz avec très peu de calcite, ce qui confirme un lessivage latéral des fins dans le sens de la rigole (est ou sud-est); en avant de l'aven (petit puits sur la fouille), on trouve une formation assez épaisse très enrichie en micas par rapport à tout le remplissage.

Ces lessivages latéraux successifs de la fraction fine ont changé directement et/ou indirectement la physionomie du dépôt, changements qui peuvent être résumés comme suivant:

- * variations texturales par perte ou par accumulation d'une fraction de la matrice suivant la position de la couche sur la double pente;
- * les variations texturales se répercutent sur la porosité et le drainage : l'enrichissement en fines des couches situées dans l'abri provoque la réduction de la porosité, ce qui conduit à

des périodes d'engorgement du sédiment lors du dégel, alors que les couches du couloir ne connaissent pas ces périodes ou brièvement;

- * la qualité du drainage et la position des couches commandent la nature et la suite minéralogique et les microstructures des phosphates;
- * la perte d'une fraction de la matrice et les glissements sur les pentes (pendant l'engel ou juste après dégel lorsque le sédiment est saturé en eau) ont été à l'origine des concentrations en constituants grossiers : concentration des petits galets karstiques observée en lames minces et des pièces de l'industrie lithique constaté lors des fouilles (de LUMLEY et Coll., 1968; inédit) et lors du comptage du matériel récolté (HONG, 1993). Ces concentrations et ces glissements se font couche par couche, on ne constate pas de mélange et on observe toujours des limites assez nettes des couches. Les dépôts des fines et les concentrations, ainsi que la compaction par le gel, sont à l'origine de la grande densité verticale du matériel archéologique, et probablement la perte de niveaux stériles séparant des niveaux archéologiques.

En fait, plusieurs paramètres agissent conjointement sur la configuration et l'évolution des dépôts phosphatés : position par rapport aux pentes, position par rapport à l'extérieur, composition granulométrique et pétrographique, drainage etc. Ces paramètres sont liés les uns aux autres et évoluent au cours du temps.

C'est à cause de ces différenciations structurales, texturales et minéralogiques profondes que l'on perd les continuités des couches d'une zone à l'autre et que les corrélations stratigraphiques, tant macroscopiques que microscopiques, se font difficilement et d'une manière parfois incertaine.

CHAPITRE II LES DÉPÔTS CARBONATÉS : LES BRÈCHES

On distingue deux grands ensembles :

- * le premier ensemble occupe une position supérieure et est caractérisé par des cailloutis de différente taille, généralement anguleux, portant ou pas une mince pellicule apatitique et emballés dans une matrice rougeâtre; cet ensemble est riche en vestiges osseux et en industrie lithique et présente de grandes variations dans l'intensité de la calcitisation (cimentation et induration) et dans la concentration des cailloutis d'une zone à l'autre; il est localisé le long de la paroi nord (couloir et abri) et à l'est (abri, à la sortie);
- * le deuxième ensemble est caractérisé par des cailloux plus émoussés, portant une importante carapace apatitique et emballé dans une matrice limoneuse jaunâtre compacte, plus ou moins phosphatée et peu calcitisée; cet ensemble est très pauvre en restes archéologiques; il est localisé sous le premier ensemble et uniquement au niveau de l'aven.

I. ENSEMBLE BRÉCHIQUE SUPÉRIEUR

I.1. Le long de la paroi nord

Quatre carottes ont été étudiées le long de la paroi nord : deux dans le couloir d'entrée (carottes R et S) et deux dans l'abri (carottes J et A).

Les carottes R, S et A montrent globalement les mêmes caractéristiques, seule l'intensité de la calcitisation et l'épaisseur des couches varient en relation avec les pendages (vers l'est et vers le sud, abrupt) et les discontinuités morphologiques du substratum (replats, surcreusement). La carotte J montre une plus grande concentration de cailloutis calcaires avec peu de matrice en voie d'une calcitisation totale.

I.1.1. Carottes R, S et A

Elles présentent les mêmes couches avec les mêmes constituants et la même microstructure. La carotte S possède à sa base un terrier conservé qui a servi comme référentiel pour les bioturbations et pour l'apport du matériel par activité faunique.

Elles présentent de la base au sommet deux couches fortement calcitisées, séparées par une couche argilo-limoneuse rougeâtre, et au sommet vient une couche non continue, riche en galets karstiques et à matrice argilo-limoneuse rougeâtre.

Le profil type est représenté par la carotte R (Fig. 7).

I.1.1.1. Couche R1

L'ensemble de cette couche s'organise en agrégats arrondis de 100 à 800 μm (500 μm en moyenne) donnant un aspect granulaire à la couche. Les agrégats sont bien individualisés avec un contour net et une porosité interagrégat très élevée. Les éléments grossiers sont peu fréquents, représentés par quelques cailloutis millimétriques à centimétriques allongés et parallèles à la surface, fortement inclinée vers le sud.

Les agrégats sont formés d'un matériel argilo-carbonaté dense et d'un squelette rare formé généralement par des restes osseux très altérés (teinte blanchâtre en LN et complètement isotrope en LP) de la taille des sables moyens ou grossiers, parfois par des grains de quartz grossiers et très cariés (Pl. VII, Photo 2). Tous les éléments grossiers calcaires portent une coiffe formée soit par des agrégats de petite taille, soit par une matrice argilo-carbonatée de même nature que les agrégats arrondis.

L'ensemble des agrégats portent un revêtement complet d'une calcite sparitique qui cimentent les agrégats. Ces revêtements ne comblent pas entièrement les espaces interagrégats. Les cristaux sparitiques montrent un degré de dissolution assez élevé qui se manifeste par des vides entre les cristaux, par un détachement des cristaux les uns des autres et par des extrémités pointues (vers la lumière des vides).

Cette couche montre macroscopiquement une variation de teinte, du gris-blanchâtre au rose-grisâtre. Cette variation est liée à la quantité de calcite que les agrégats renferment.

En effet, les agrégats évoluent vers une calcitisation totale (cf. Caractères minéralogiques, chap. III). Latéralement (au niveau de la carotte S), cette couche passe à une couche blanchâtre formée d'agrégats arrondis hautement calcitisés, il ne subsiste plus qu'un noyau détritique formé généralement par un reste osseux, alors que la matrice argileuse a complètement disparu.

I.1.1.2. Couche R2

Cette couche est de texture limono-argileuse fine, riche en quartz et en micas. La fraction grossière est rare et composée principalement par des débris osseux ou de débris calcaire. Elle est moins carbonatée dans l'ensemble, mais on observe une carbonatation plus importante au sommet qu'à la base.

Cette couche s'organise en agrégats arrondis inframillimétriques. Cette agrégation est plus développée au sommet qu'à la base où on observe plus des craquelures de dessiccation et des chenaux de bioturbation.

Les limites supérieure et inférieure sont irrégulières mais franches.

I.1.1.3. Couche R3

Cette couche est très carbonatée et indurée. Elle est la plus riche en fragments calcaires. La matrice fine est une argile limoneuse micacée, très riche en calcite micritique et emballant

des éléments grossiers très hétérogènes. Le principal constituant de la fraction grossière sont des fragments calcaires provenant directement de la fragmentation de la paroi, des fragments de stalactites et des fragments stalagmitiques. Ces fragments calcaires montrent tous un amincissement et des craquelures. Les autres constituants sont des restes osseux fins, des fragments charbonneux et des petits galets karstiques.

La matrice argilo-carbonatée forme un revêtement complet des éléments grossiers aboutissant à une structure micro-agrégée bien développée. La porosité interagrégats est très développée. Cette porosité est envahie par des revêtements de calcite sparitique.

Tous les éléments grossiers (centimétriques) sont posés à plats et parallèlement à la surface fortement inclinée vers le sud.

I.1.1.4. Couche R4

C'est une couche très riche en petits galets karstiques emballés dans la même matrice argilo-limoneuse, rougeâtre et peu carbonatée. Cette couche n'est pas continue, elle forme un lambeau qui couvre la couche sous-jacente et une partie du dôme stalagmitique jouxtant la carotte R.

La structure ne semble pas avoir évolué, il s'agit d'une structure polyédrique anguleuse consécutive à des craquelures de dessiccation. Les agrégats polyédriques sont centimétriques et les vides sont peu revêtus de calcite sparitique.

I.1.1.5. Conclusion

Ces dépôts carbonatés le long de la paroi sont mis en place dans un contexte périglaciaire net responsable de l'accumulation des fragments calcaires issus de la paroi et de l'acquisition d'une organisation en agrégats arrondis bien développée.

Les fragments grossiers calcaires et les ossements très présents dans ces dépôts présentent des craquelures *in situ* observables sur le terrain et sous microscope. Tous les éléments figurés présentant une quelconque élongation sont posés à plat et parallèlement à la surface fortement inclinée vers le sud.

Ces dépôts montrent une évolution vers une calcitisation totale avec formation de croûte calcaire en relation avec la proximité de la paroi calcaire.

I.1.2. Carotte J

I.1.2.1. Description

Cette carotte est située à mi-pente nord-sud et illustre la concentration de cailloutis vers le bas de la pente.

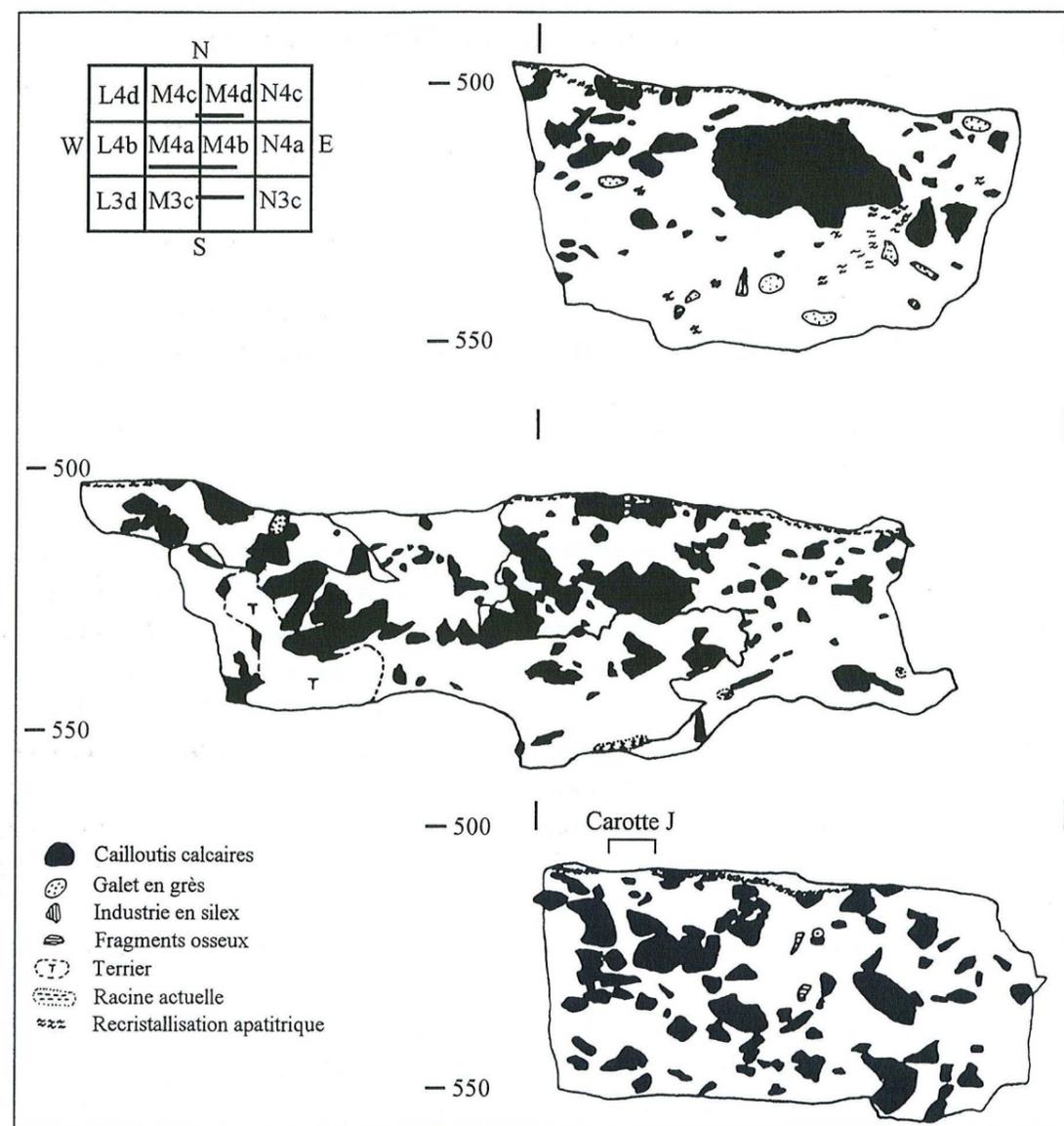


Fig. 55- Brèche supérieure : Coupes stratigraphiques étagées du nord vers le sud.

On peut noter la concentration élevée, la taille et la morphologie des cailloutis calcaires en comparaison avec la figure 7; également la rareté des témoins archéologiques et l'apatitisation secondaire qui se fait par le haut.

Ce dépôt remplit une dépression du substratum. Il est très riche en cailloutis calcaires (Fig. 55) de grande taille (5 à 10 cm, parfois 30 cm), anguleux et montrant parfois des cassures *in situ*. La matrice, rosâtre, beige ou rouge selon le degré de carbonatation, est peu représentée (20% en moyenne) et remplit les vides entre les cailloux.

L'étude des lames minces de ce profil montre que :

- * les cailloux subissent une fragmentation *in situ* et continuent à évoluer en s'amincissant après leur dépôt;

- * ces cailloux portent une mince carapace apatitique jaunâtre (quelques centaines de microns), uniquement au sommet du dépôt et fréquemment à la face supérieure du cailloux. Cette carapace est en relation avec une imprégnation postérieure du sommet par des solutions phosphatées. Cette imprégnation apatitique postérieure conduit à la formation de revêtements rubanés minces et très serrés dans les vides au sein de la matrice, ce sont là les seuls revêtements apatitiques comparables à ceux des dépôts phosphatés que l'on observe au sein d'un dépôt carbonaté;
- * la matrice remplissant les vides entre les cailloux est formée d'un matériel hétérogène, elle est peu représentée au sommet et beaucoup plus abondante à la base du dépôt;
- * la fraction grossière (0.04 et 10 mm) de la matrice est formée par des esquilles anguleuses et allongées soit osseuses soit calcaires et par de petits galets karstiques, cette fraction représente environ 40% de la matrice;
- * la fraction fine originelle de la matrice est une argile limoneuse micacée non ou faiblement carbonatée. Postérieurement, cette fraction subit une calcitisation secondaire par digestion du matériel originel. La calcitisation procède par plages à limites irrégulières et se traduit sur le terrain par la présence de zones friables et de zones indurées et par différence de couleur (plus c'est beige, plus la calcitisation est importante);
- * Postérieurement à l'arrivée de la matrice et de sa calcitisation, on observe une illuviation argileuse rouge vif, litée et à biréfringence élevée. Cette illuviation se dépose dans les vides vacants au sein de la matrice et entre les cailloux;
- * contrairement à la matrice des carottes R, S et A, la matrice de ce dépôt ne se présente pas en agrégats arrondis. Que se soit la matrice ou l'illuviation tardive, on n'observe que des craquelures de dessiccation;
- * postérieurement et uniquement au sommet, on observe un mince dépôt argilo-limoneux très riche en petits fragments osseux émoussés jaune-orange;
- * l'activité racinaire n'a pas été observée, les restes osseux en grains émoussés jaune-orange ainsi que les fragments de stalactites sont absents ou très rares.

I.1.2.2. Conclusion

Ce dépôt se différencie de dépôts carbonatés étudiés ci-dessus par une grande densité des cailloutis calcaires anguleux issus de la paroi par desquamation sous des conditions périglaciaires. Après l'amoncellement des cailloux, des percolations postérieures ont permis le dépôt de la matrice. Ces percolations le long de la pente se sont vraisemblablement produites en plusieurs phases comme semblent en témoigner la nature et l'évolution de la matrice.

I.2. La brèche de la partie est

Cette brèche est représentée par la coupe transversale est Oa0 (Fig. 8). Deux carottes ont été étudiées : carotte B au dessus de l'aven et carotte C plus à l'est et reposant sur le substratum.

I.2.1. Carotte B

I.2.1.1. Présentation

La base de la carotte B, représentée par la couche B1, appartient en réalité à la brèche inférieure caractérisée par de gros cailloux calcaires émoussés, possédant une importante carapace apatitique terreuse et noirâtre, et emballé dans une matrice limoneuse jaunâtre et plus ou moins phosphatée.

L'ensemble bréchique supérieur proprement dit débute par la couche B2 épaisse d'une vingtaine de cm et riche en débris végétaux. La couche B3 est une argile limoneuse rougeâtre, épaisse, elle aussi, d'une vingtaine de cm avec une limite inférieure nette. La couche B4 est caractérisée par une concentration de cailloutis calcaire de petite taille (5 cm maximum), de restes osseux fragmentés mais bien conservés et d'industrie lithiques en silex principalement; ces éléments sont posés à plat pour la plupart et sont emballés dans une matrice identique à la couche B3 si bien que la limite entre les deux couches n'est pas nette. La couche supérieure ou B5 est complètement désorganisée et rappelle fortement la couche M5 (ou amalgame).

I.2.1.2. Description

La **couche B2** présente une différenciation en deux niveaux qui ne s'observe pas sur le terrain. Le niveau basal est plus épais et rouge-brun car renfermant moins de débris végétaux, ces derniers sont intégrés à la masse basale argilo-limoneuse. Le niveau sommital (environ 8 cm) est beaucoup plus riche en débris végétaux très lacérés et de ce fait beaucoup plus sombre (noirâtre) ce qui conduit à une limite nette avec la couche sus-jacente.

Cette couche ne paraît pas renfermer de matériel archéologique, la fraction grossière (> 2 mm) est absente. Par contre, on observe nettement la présence de grains de quartz grossiers (1-2 mm) arrondis. Ces grains de quartz sont dispersés dans toute la couche avec une fréquence de 2-5% et proviennent certainement de la couche de sable grossier fluviatile caractérisant le sommet du dépôt de l'aven. Outre ces grains de quartz, on observe la présence de petits restes osseux en grains jaune-orange et de petits éléments phosphatés et à contours irréguliers; l'ensemble est intégré à la masse basale et témoigne d'une activité faunique ou anthropique (ces constituants phosphatés sont identiques à ceux observés dans le terrier à la base de la carotte S). La matière organique (débris végétaux lacérés), très abondante au sommet, s'intègre progressivement à la masse basale en allant vers le bas de la couche.

Cette couche est très bioturbée par une activité racinaire intense et présente des fissures obliques ou verticales. La calcitisation est très peu exprimée, sous forme de manchons et pseudomorphoses racinaires essentiellement, alors que les phosphates ne s'expriment que par l'apatite issue d'éléments figurés provenant de l'activité faunique.

La couche B2 repose sur la couche B1 (appartenant à la brèche inférieure) en la ravinant, avec un contact ondulé.

La **couche B3**, rougeâtre, est à texture argilo-limoneuse riche en paillettes micacées. Ses constituants sont identiques à ceux de la couche sous-jacente mais sans matière organique. On note toujours la présence de grains de quartz grossiers provenant du dépôt fluviatile et la présence de nombreux restes osseux en grains jaune-orange ou orange issus d'une activité faunique ou anthropique et intégrés à la masse basale. On note surtout la présence de pièces lithiques en silex (sur les 2 lames correspondantes à la couche, on en dénombre 3) posées à plat, alors que les descriptions sur le terrain indiquent que cette couche est stérile archéologiquement et est non altérée.

Cette couche passe progressivement d'une structure où les microfissures et les chenaux de bioturbation sont dans tous les sens aboutissant à des agrégats mal définis vers une organisation en agrégats arrondis bien développés vers le sommet avec une porosité interagrégat envahit par la calcite sparitique. Parallèlement, le sommet s'enrichit en de petits fragments osseux plus ou moins bien conservés et en petits fragments allongés calcaires. Ces éléments sont issus de la couche sus-jacente.

La texture et l'organisation de la couche B3 rappellent fortement les caractéristiques de la couche R2.

La **couche B4** ne se distingue de la couche sous-jacente que par la présence d'une fraction grossière comprenant des restes osseux, des fragments calcaires, des pièces lithiques en silex et quelques galets karstiques (Fig. 56). Ces éléments sont posés à plat et c'est leur l'alignement qui forme la limite avec la couche B3.

En lame mince, on observe que ces éléments baignent dans la même matrice que B3. Les éléments grossiers, principalement les restes osseux et fragments calcaires montrent souvent une désagrégation *in situ* (Fig. 57). La calcite dans les vides et au sein de la matrice montre parfois une dissolution évidente qui se manifeste dans les revêtements par l'accentuation des vides entre les cristaux sparitiques, et par une grande dissociation des cristaux au sein de la matrice aboutissant à de petits cristaux de calcite (30-40 μm) dispersés au sein d'une matrice peu ou pas biréfringente et poussiéreuse.

La **couche B5** est la couche sommitale, elle est de composition hétéroclite avec une structure complètement excrémentale. Elle est complètement remaniée et ressemble beaucoup à la structure de M5 (ou amalgame).

I.2.1.3. Conclusion

La **couche B2** possède des caractéristiques (texture, couleur) similaires à la matrice des cailloutis de la brèche supérieure et aux couches fines rougeâtres sans cailloutis (R2, B3). Elle est donc liée à la formation de cette brèche. Renfermant des sables grossiers caractéristiques de la formation fluviatile de l'aven, il est possible que la couche B2 soit mise en place par ruissellement le long des pentes et à partir de la paroi nord. Au cours de son dépôt, elle a arraché une partie des sables grossiers qui affleurent en partie en avant de l'aven (dans le petit puits), avant de remplir une dépression au dessus de l'aven. Cette couche s'est stabilisée par la

suite et a vu se développer, d'une part, une activité racinaire intense l'enrichissant en matière organique et débris végétaux lui conférant une teinte sombre, et d'autre part, une activité faunique l'enrichissant en grains phosphatés (probablement des déjections) mais on n'observe pas de matériel archéologique (ni sur la fouille ni sur les lames). Ces activités biologiques ont intensément remanié la couche en brassant et intégrant leurs produits à la masse basale.

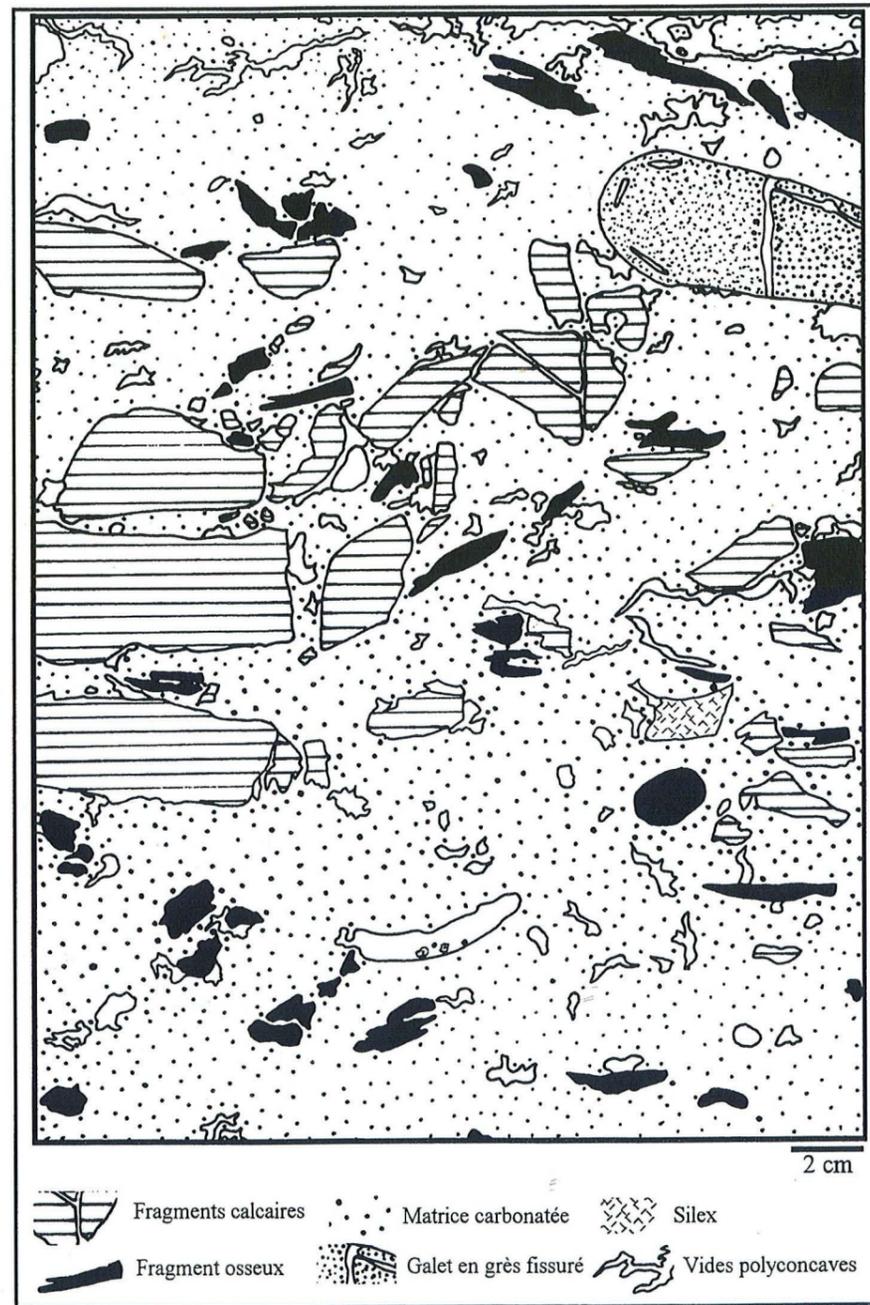


Fig. 56- Organisation macroscopique de la base de la couche B4, relation avec la couche B3.

Excepté le brassage du sédiment par activité biologique, cette couche ne semble pas présenter une évolution quelconque sous l'action des eaux (courantes ou se transformant en

glace). En effet, la couche est très peu structurée et ne montre qu'une multitude de microfissures dans tous les sens et issues du dessèchement (ni réorganisation ni transferts).

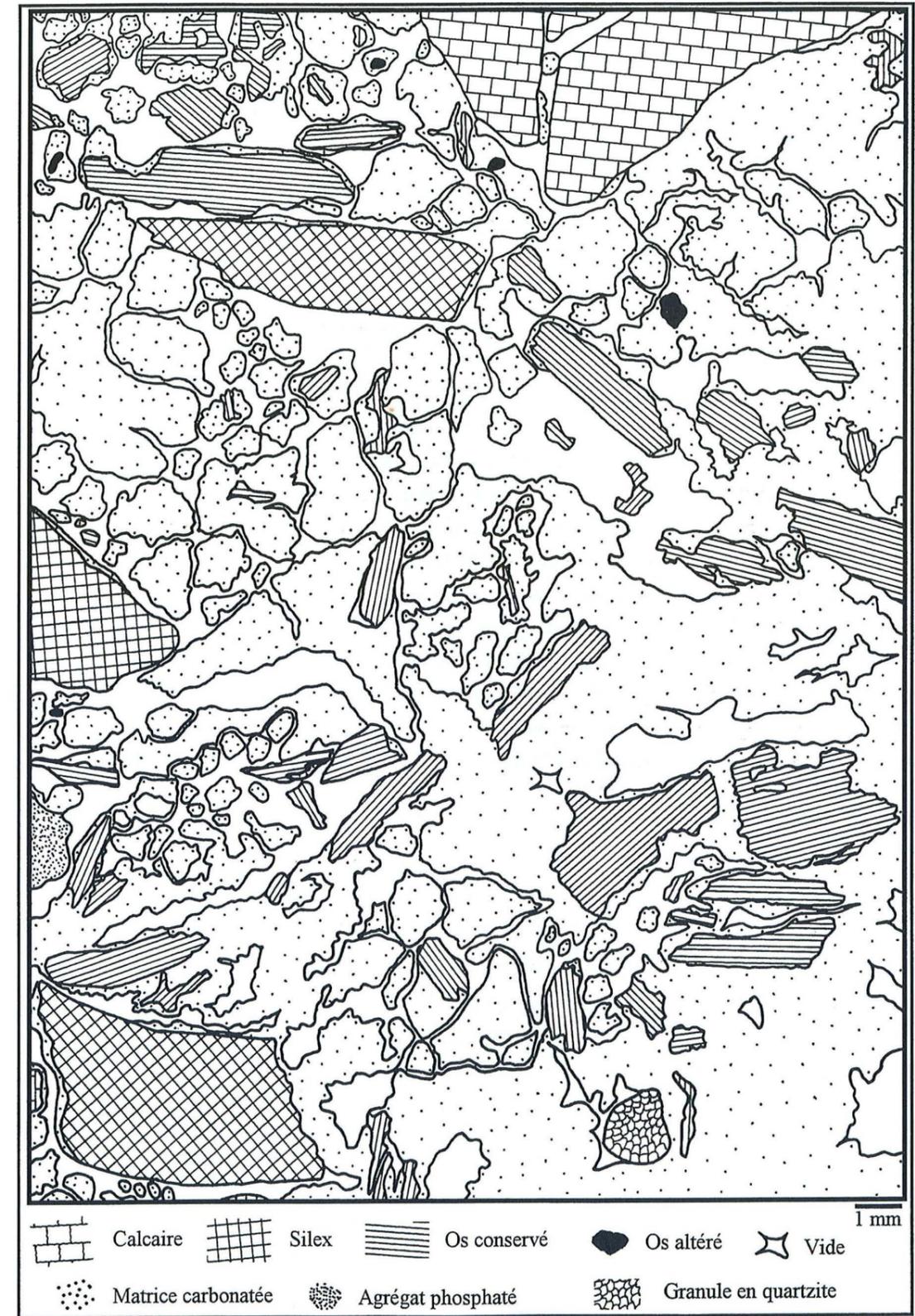


Fig. 57- Organisation microscopique de la base de la couche B4, relation avec la couche B3.

De plus, les grains phosphatés ne présentent pas de dissolution et imprégnation de la masse basale.

La **couche B3** présente les mêmes caractéristiques initiales que la précédente, avec les grains de sables grossiers, elle a donc la même origine et la même mise en place. Par contre, elle s'en distingue par la présence des pièces lithiques (contrairement à ce que l'on pensait) et par une évolution post-sédimentaire intense. Cette évolution se manifeste par la réorganisation en agrégats arrondis qui s'intensifie progressivement en allant vers le sommet. A ce niveau, le sédiment est micro-agrégé et montre des agrégats arrondis millimétriques (pour les plus grands) caractéristiques d'une restructuration sous des conditions périglaciaires. Postérieurement, on assiste à une phase de précipitation de la calcite sparitique dans les vides interagrégats cimentant la couche. Comme pour l'agrégation, la cimentation des agrégats s'atténue progressivement du sommet vers la base de la couche.

La **couche B4** montre une restructuration et une histoire plus complexes. Elle est riche en matériel archéologique (ossements et pièces lithiques) et en cailloutis calcaires. Les restes osseux et les cailloutis calcaires montrent une fragmentation intense et *in situ*. L'ensemble de ces éléments montre une tendance à une réorientation parallèlement à la surface horizontale.

La fragmentation et la réorientation témoignent d'une mise en place et d'une évolution sous l'action d'une alternance gel-dégel. La matrice subit parallèlement une fragmentation en agrégats polyédriques ou arrondis. C'est probablement au cours des phases de dégels que la dissolution de la calcite interagrégat et au sein de la matrice s'effectue.

Il est vraisemblable que la phase de réorganisation de la couche B3 en agrégats arrondis est synchronisée à cette phase de réorganisation de la couche B4, comme en témoigne l'enrichissement du sommet de B3 en débris osseux et calcaires. La calcite précipitant entre les agrégats de B3 provient, au moins en partie, de la dissolution affectant la calcite de la couche B4.

I.2.2. Carotte C

Cette carotte se trouve au sud de la carotte B et elle repose sur le substratum (Fig. 8). Elle montre la même succession de couche que la carotte B mais très bioturbée. On note la même composition élémentaire mais les agrégats arrondis sont très éclatés et les couches mélangées. On note en particulier que la base renfermant des cailloutis calcaires quasi complètement transformés en apatite rubanée (appartenant à la brèche inférieure) et donc très altérée possède une matrice rougeâtre qui renferme des restes osseux bien conservés. Ceci indique une bioturbation intense et sur toute la hauteur.

II. ENSEMBLE BRÉCHIQUE INFÉRIEUR

Cet ensemble est localisé au dessous de la brèche supérieure est (carottes B et C) et au dessus de la formation fluviatile (carottes D et G). Sa répartition spatiale est restreinte à l'aven et à ses abords immédiats. Les limites supérieure (avec la brèche supérieure) et inférieure (avec les sables grossiers fluviatiles) sont tranchées mais ondulées. L'étude microscopique concerne ces quatre localités (Fig. 7, 8 et 38).

II.1. Caractérisation

La distinction de cet ensemble des autres ensembles stratigraphiques a été basée sur trois critères qui s'observent aussi bien sur le terrain que sur lames minces :

- cailloutis calcaires : morphologie et distribution;
- matrice : texture et sa minéralisation secondaire;
- matériel archéologique : très peu représenté ou absent.

Cet ensemble présente une épaisseur très variable comme le montre la figure 38.

II.1.1. Cailloutis calcaires

Ces cailloutis se distinguent de ceux de la brèche supérieure par un degré d'éroulé très élevé, par une forme globuleuse et par une carapace apatitique beaucoup plus importante, généralement noirâtre avec un aspect terreux.

La figure 38 montre une extension relativement très localisée de ces cailloutis, mais surtout elle montre une répartition en profondeur très inégale. Dans la partie est de l'aven, on les observe en profondeur au sein des sables grossiers et des sables moyens d'origine fluviatile. Dans les parties sud (carotte D) et ouest (carotte G), on ne les observe qu'au sein de la brèche inférieure, mais avec une distribution inégale; en effet, dans la partie sud les cailloutis sont répartis sur toute l'épaisseur avec toutefois une concentration plus élevée vers l'est que vers l'ouest, alors que dans la partie ouest ces cailloutis se répartissent uniformément mais seulement au sommet de la brèche inférieure.

Ces cailloutis ont longtemps été considérés comme l'équivalent du dallage en grès à la base du dépôt phosphaté à cause d'une part de la forme en galet de ces cailloutis et leur importante carapace apatitique, et d'autre part à cause de l'altitude équivalente. Par ailleurs et lors des fouilles antérieures à 1968, des cailloutis calcaires ont été observés au niveau de la zone M dans l'axe de la rigole, au dessus du substratum et pris dans une importante carapace apatitique qui affecte à la fois le substratum et les cailloutis. Cette observation a conduit naturellement à considérer ces cailloux comme des témoins ayant échappé à la dissolution totale, et donc un argument de plus pour corréliser ces cailloux avec le dallage en grès.

Trois arguments principaux peuvent être avancés à l'encontre de cette corrélation :

- Les observations du terrain montrent que le substratum présente des fissurations et des fracturations aboutissant à la formation de l'axe de la rigole qui se trouve important au niveau de la zone M (vers la sortie). Ces fissures ont été envahies progressivement par l'apatite. L'apatitisation progresse et prend de l'importance de telle manière qu'il aboutit à la formation d'un véritable niveau ou couche (10 cm, parfois 20 cm d'épaisseur) au sein de laquelle baignent des fragments calcaires complètement détachés et isolés du substratum d'où ils sont originaires. Ces fragments calcaires possèdent une section dominante carrée, alors qu'elle est ovale pour les cailloutis de la brèche inférieure. Ces derniers ont donc bien une répartition bien restreinte à l'aven. Les cailloutis au ras du substratum ont une origine bien distincte (substratum) et ne constituent pas l'intermédiaire entre le dallage et les cailloutis de l'aven.

- Le dallage a été considéré comme formé principalement par des galets en grès mais aussi par des galets en calcaires, ces derniers ont complètement disparu à cause d'une transformation complète en phosphate (apatite). Or, les observations macroscopiques (du terrain et des blocs indurés) et microscopiques des dépôts phosphatés au niveau du dallage (carottes P et N) n'ont jamais révélé la présence de calcaire détritique même de la taille de limons. L'absence totale de toute trace de calcaire détritique ne peut s'expliquer par une transformation complète en apatite, et ceci pour deux raisons : la première raison se trouve dans la partie supérieure du dallage non complètement phosphatée (couche P3 et N2), il est impossible de transformer entièrement un galet calcaire de 5 ou 10 cm en apatite sans qu'un cœur de la roche originelle soit conservé même à l'état microscopique ou que l'aspect général du cailloutis soit conservé (sorte de "pierres fantômes" comme observées dans la poche phosphatée de la Caune de l'Arago). La deuxième raison se trouve dans le cas extrême d'une transformation totale; il a été observé que la carapace apatitique sur cailloutis calcaire (ou directement sur le substratum) se présente sous forme d'anneaux successifs dont le mécanisme principal est le remplacement avec conservation de la forme originelle; ceci indique que dans le cas d'une transformation totale, on en aurait trouvé la trace sous forme d'anneaux concentriques encore en place (sorte d'oignon formé d'apatite), et dans le cas d'une fragmentation et remaniement de la carapace apatitique, on en aurait observé les fragments (parfaitement reconnaissables et caractéristiques au microscope polarisant) dispersés dans la matrice. En effet, à la base de la carotte C on observe bien des cailloutis calcaires encroûtés sur les 2/3 externes qui gardent encore le cœur calcaire intact, et dans l'extrême cas où ces carapaces apatitiques sont fragmentés et dispersés (par action de gel-dégel et/ou actions biologiques), ces fragments se reconnaissent aisément sous microscope (sinon à l'oeil nu).

- les galets constituant le dallage (éléments prélevés lors des fouilles antérieures à 1968 et les restes observés actuellement) sont en majorité gréseux, alors que les galets de la brèche inférieure sont en majorité calcaires (les galets en grès sont rares, de petite taille et très dispersés). Si on considère que les éléments calcaires de la brèche inférieure appartiennent au dallage qui ne sont pas altérés au niveau de l'aven, il se pose le problème de la rareté des galets en grès au niveau de l'aven : soit il s'agit d'une conservation différentielle des éléments calcaires alors que les éléments siliceux (grès) sont altérés, cette hypothèse est improbable; soit il s'agit d'un choix des éléments du dallage (leur nature pétrographique) de la part de l'Homme de la Baume-Bonne, dans ce cas on ne s'explique pas ce choix à quelques mètres de distance.

II.1.2. La matrice

La matrice présente une texture globale limoneuse, constituée essentiellement par des grains de quartz et des paillettes micacées, dépourvue de calcite (sauf les précipitations secondaires) et phosphatée avec une structure compacte. En ce sens, elle évoque le sédiment du dépôt phosphaté (base des carottes P et N). Cependant, elle s'en distingue par l'absence, sauf rares exceptions et uniquement au sommet, d'agrégats ou de concrétions organo-minérales, de concrétions phosphatées ou de restes osseux et par l'absence de petits galets karstiques. De plus, l'absence de petits fragments calcaires et des fragments osseux la distingue de la matrice de la brèche supérieure.

En revanche, la matrice renferme entre 5 et 10% de sable grossier à grains émoussés appartenant à la formation fluviatile. Elle peut aussi renfermer (selon les endroits) des raies d'argile rouge biréfringente provenant aussi de la formation fluviatile. Ces éléments fluviatiles peuvent être concentrés ou bien très disséminés. Il y a eu donc remaniement (léger) du sommet des sables grossiers fluviatiles.

La phosphatation consiste en un ciment cryptocristallin jaunâtre et très peu biréfringent (notons que les pics de l'apatite et de la crandallite formant ce ciment sont très mal résolus), plus ou moins continu selon les endroits. A la base de la carotte B (ou B1), le ciment est compact, continu et est formé uniquement par un ciment cryptocristallin. Au sommet de la carotte D, la cimentation est discontinue, mais surtout on observe quelques recristallisations rubanées dans les vides. Au sommet de la carotte G, seul le ciment est présent et d'une manière discontinue. Dans tous les cas, l'intensité de la phosphatation est très faible par rapport au dépôt phosphaté avec une mauvaise cristallisation (résolution et nombre de pics R.X réduits), et présente un gradient décroissant du sommet vers la base.

La calcite est totalement secondaire. Elle est formée par des cristaux sparitiques ou microsparitiques, revêtant des vides ou de rares chenaux. Cette calcitisation secondaire présente aussi une répartition très inégale.

II.1.3. Le matériel archéologique

Le matériel archéologique est sporadique dans cette brèche. Les rares restes (éclats en silex, quelques dents) sont concentrés au sommet de la brèche inférieure et semblent provenir du matériel archéologique caractérisant la brèche supérieure. On observe que la brèche inférieure est riche en restes osseux à la base de la carotte C, mais cette richesse provient du mélange du matériel provenant des deux brèches; mélange dû à des bioturbations et/ou à l'action du gel-dégel. Cette absence des témoins archéologiques sépare la brèche inférieure de la brèche supérieure et du dépôt phosphaté.

II.2. Conclusion

L'ensemble des caractères étudiés sépare nettement cette brèche inférieure des autres dépôts de l'abri-grotte de la Baume-Bonne. Il reste à déterminer l'origine et la mise en place de ses constituants.

La brèche inférieure est caractérisée par la présence de cailloutis calcaire émoussé et très encroûté par l'apatite. Cependant, il a été montré l'indépendance de ces galets calcaires de ceux du dallage. Cette indépendance ne peut s'expliquer, dans le contexte global des dépôts de la Baume-Bonne, que par une accumulation locale (au dessus de l'aven formant une dépression) de cailloutis calcaires provenant de la desquamation de la paroi calcaire. Le degré d'émoussé et l'épaisseur importante de la carapace apatitique attestent d'une longue évolution dans un environnement humide et chargé de phosphate.

La matrice, elle, est similaire au sédiment détritique observé à la base du dépôt phosphaté. On en conclut qu'elle en est issue. Comme mécanisme de mise en place, l'étude du dépôt phosphaté a montré l'existence de période de lessivage du sédiment fin lors des phases de dégel et leur accumulation vers l'aval, en bas de pente. On suggère donc une mise en place progressive par lessivage de la base du dépôt phosphaté. Cette accumulation aurait été synchronique ou postérieure aux couches P1 et P2 dont le matériel détritique (fin, quartzeux et micacé) est très similaire à celui de la matrice en question. Elle est très probable aussi que cette accumulation soit antérieure à la couche P3 au sein de laquelle on observe des fragments végétaux lacérés qui sont absents au sein de cette matrice. L'absence de galets karstiques, du matériel archéologique et de l'agrégation arrondie constituent un autre argument en faveur d'une accumulation des fines par lessivage. Ce sont ces phases de ruissellement qui sont responsables de l'émoussé des cailloutis calcaires et de leur apatitisation; les solutions provenant du dépôt phosphaté étant chargées de phosphate.

En conclusion, on peut suggérer une mise en place en deux temps : dans un premier temps, il y a eu chute et accumulation locales de pierres calcaires, lors de la première ou la deuxième phase de gel affectant la couche P1; dans un deuxième temps, il y a eu accumulation d'une matrice limoneuse par migration latérale des fins à partir des sédiments contemporains à P1-P2 et à N1.

Dans tous les cas, cette brèche inférieure est antérieure à la brèche supérieure et est postérieure à la formation fluviale. De plus, elle est au moins postérieure à la couche P2.

L'ensemble de ces considérations met la mise en place et l'évolution de la brèche inférieure à part des autres formations sédimentaires.

III. LES DÉPÔTS CARBONATÉS : SYNTHÈSE

L'étude des dépôts carbonatés montre que le principal critère de distinction par rapport aux autres dépôts (phosphatés et fluviaux) est la présence d'éléments calcaires détritiques provenant du démantèlement de la paroi. Ce sont là les seuls dépôts dans lesquels on observe une participation active de la paroi calcaire à leur élaboration. La composition élémentaire et la texture de la matrice ainsi que la morphologie des éléments calcaires permettent de séparer nettement la brèche inférieure de la brèche supérieure.

La brèche inférieure est d'abord caractérisée par l'absence de témoins archéologiques (sauf dans le cas d'un mélange comme le montre la carotte C). Ensuite, elle est caractérisée par la présence de cailloutis calcaires grossiers (5 cm minimum), émoussés (forme globuleuse) et portant une épaisse carapace apatitique (épaisseur centimétrique). La morphologie et l'épaisseur de la carapace apatitique attestent d'une longue évolution dans un environnement humide et chargé de phosphate. La matrice de ces cailloutis est aussi caractéristique. Sa nature minéralogique (principalement quartzreuse et micacée), sa texture (essentiellement limoneuse), l'absence de petits fragments calcaires et osseux détritiques et sa phosphatation la rapproche plus du sédiment caractérisant la partie inférieure des dépôts phosphatés que de la matrice de la brèche supérieure. La texture fine et la minéralogie de cette matrice montre qu'elle est élaborée progressivement par l'évacuation des éléments fins à partir des sédiments des dépôts phosphatés le long de la pente est-ouest et leur accumulation au niveau de l'aven formant une dépression.

En ce sens, cette brèche inférieure constitue un dépôt particulier et localisé. Elle ne constitue pas le prolongement latéral de la base des dépôts phosphatés renfermant le dallage. Si le démantèlement de la paroi donnant une accumulation de cailloutis calcaires au niveau de l'aven peut être contemporain des périodes rigoureuses enregistrées par la base des dépôts phosphatés, la matrice, elle, prend son origine des sédiments de cette même base. Elle en résulte que la brèche inférieure est antérieure aux dépôts fluviaux, synchronique et/ou postérieure aux couches renfermant le dallage (P1-P2 et N1), antérieure à la partie supérieure des dépôts phosphatés et antérieure à la brèche supérieure. Seule l'accumulation des cailloutis calcaires indique une période de froide et probablement sèche car on n'observe que les cailloutis, alors que l'accumulation de la matrice et l'évolution de ces cailloutis indiquent un environnement humide, prenant son origine probablement de phases de dégel.

La brèche supérieure se caractérise par la présence plus ou moins abondante de témoins archéologiques (restes osseux de toute taille et pièces lithiques), par des éléments calcaires de différente taille et peu ou pas encroûtés par l'apatite et par une matrice argilo-limoneuse renfermant des débris osseux et calcaires. Cette brèche présente des variations aussi bien de la nature des fragments calcaires que de leur concentration en fonction de la position sur la pente du substratum et de leur situation dans l'abri-grotte, les mêmes variations sont constatées pour la calcitisation secondaire de ces dépôts en relation avec la proximité de la paroi calcaire.

QUATRIÈME PARTIE
DISCUSSION GÉNÉRALE
ET CONCLUSION

I. INTRODUCTION

Cette partie a pour but de donner une signification paléoenvironnementale, voire une approche des conditions paléoclimatiques, aux différents caractères du remplissage de la Baume-Bonne.

Pour cela, il est nécessaire de prendre en considération les données suivantes :

- l'ensemble de cette étude reste partielle, d'une part par l'absence de l'étude des dépôts de la salle, alors qu'on observe une liaison certaine avec ceux du couloir et ceux de l'abri, et d'autre part, par l'absence de témoins stratigraphiques dans l'axe de l'abri ce qui ne permet actuellement qu'une vue partielle de la stratigraphie;
- le remplissage a évolué d'une manière intense tant sur le plan microstructural que sur le plan minéralogique, ce qui a conduit à la perte des traits sédimentaires originels (perte du référentiel);
- les traits minéralogiques et microstructuraux qui affectent une même couche sont la plupart du temps télescopés (parfois enchevêtrés) et présentent des variations intenses d'une zone à l'autre en relation avec les pentes et avec l'intensité du drainage, la hiérarchisation de l'ensemble des événements affectant une couche devient très difficile sinon impossible dans le détail;
- lors de rafraîchissement des coupes et lors des prélèvements, on a souvent observé des niveaux ou des couches de faciès très différents côte à côte sans qu'il s'agisse d'un passage latéral du faciès, ce fait est illustré dans le couloir d'entrée où on peut observer une couche noirâtre organique et en arrière on observe un sédiment rougeâtre micro-agrégé, au niveau du "petit puits" où on observe un contact latéral entre sable grossier et argile rouge, sable moyen et phosphaté et encroûtement phosphaté intense (les corrélations stratigraphiques entre les quatre côtés se sont avérées très difficiles et aléatoires), ce fait a été également signalé lors des fouilles antérieures à 1968 (LUMLEY de et Coll., inédit); ceci illustre une sédimentation irrégulière et, dans le cas du "petit puits" un ravinement probable;
- l'activité biologique au sens large (anthropique, faunique, végétale et microbiologique), elle aussi n'était pas uniforme ce qui laisse une empreinte différente d'une zone à l'autre et pour une même couche sédimentaire.

Ces données mettent en évidence le nombre important des facteurs ayant commandé le remplissage et son évolution postérieure, facteurs qu'on peut résumer ainsi :

- à côté des larges fissures caractérisant le fond de la grotte mais aussi la paroi nord côté abri et couloir et où sédiments et eaux peuvent transiter, on observe la présence de gouttières qui sont très actives du couloir d'entrée au fond de la grotte. Ces gouttières provoquent une humidification locale et commandent des minéralisations secondaires différentes du reste du sédiment resté sec;
- le substratum calcaire est caractérisé par un creusement en "V" accentué dans le sens transversal conjugué à une pente dans le sens longitudinal. Cette configuration est irrégulière d'une zone à l'autre si bien que le substratum présente un aspect général escarpé. Cette disposition affecte le drainage aboutissant à des zones d'engorgement et des zones de circulation des eaux. De même, elle aboutit à des différenciations texturales et minéralogiques d'une zone à l'autre selon la position sur les pentes et cela pour une même couche;

- les activités anthropiques et fauniques qui apportent du matériel étranger à la couche et d'une manière inégale, ceci est illustré par les terriers (conservés ou effondrés). Le principal apport se situe au niveau des restes osseux et de la matière organique (déjection de toute sorte). L'évolution postérieure de ces apports aboutit à des différenciations ultérieures variables.

Tous ces facteurs ont agi mutuellement sur la mise en place et l'évolution post-sédimentaire du remplissage selon le principe action-réaction. Leurs effets se surimposent de telle manière qu'on ne peut apprécier l'effet de chacun séparément.

De ce fait, il s'avère très difficile de hiérarchiser et de corrélérer l'ensemble des événements en détail. On ne peut procéder que d'une manière globale à l'échelle du type de dépôt (fluvial, phosphaté, carbonaté).

II. CARACTÉRISATION DES DÉPÔTS ET APPORTS DES DONNÉES ANTÉRIEURES

Les données stratigraphiques qui manquent actuellement sur le terrain (pour cause des fouilles) ont été puisées dans les coupes et les notes des fouilles antérieures à 1968 publiées ou non.

Le but de ce paragraphe est de positionner les données acquises le long de cette étude par rapport aux données stratigraphiques antérieures à 1968 et par rapport à la synthèse globale de 1993 consignée dans le tableau 1.

II.1. Présentation générale : Facteurs du remplissage

Les facteurs ayant régi le remplissage de la Baume-Bonne ont été déjà énoncés dès 1960 par LUMLEY de & BOTTET, puis LUMLEY de (1969, 1976) dont on cite l'extrait suivant :

«Les éléments constitutifs de chaque couche, résultent directement de trois facteurs principaux :

- l'homme : par l'apport d'éléments étrangers à la grotte et par sa présence même qui contrarie les agents naturels;

- la configuration et la position de la grotte : en climat très humide, les diaclases et fissures descendant du plateau et aboutissant dans la grotte ont permis l'apport de petits galets usés et calibrés provenant des poudingues Pontien-Pliocène;

- le climat :

en période froide, cinq phénomènes principaux sont à retenir :

- * le délitage des roches par le gel,
- * la solifluxion,
- * la dissolution,

* le ravinement,

* les apports éoliens,

en période chaude ou tempérée, trois phénomènes principaux sont à retenir :

* l'altération liée à des phénomènes chimiques complexes,

* la formation de planchers stalagmitiques,

* une dissolution faible des calcaires.

En résumé, en période froide, les actions mécaniques sont dominantes. Le délitage des parois entraîne une augmentation d'épaisseur du remplissage. Celle-ci est compensée par les phénomènes chimiques de dissolution des calcaires et par les ravinements.

En période chaude, le climat ambiant favorise les phénomènes chimiques et les actions mécaniques sont à peu près nulles. Le remplissage ne pourra s'accroître en épaisseur si ce n'est par l'action de l'homme.»

La présente étude aboutit à ces mêmes résultats, avec toutefois quelques nuances importantes :

* **L'homme** : si son influence est importante, il faut lui ajouter l'influence des animaux et celle des racines. L'influence des animaux est marquée, d'une part par les terriers de toutes les tailles qui remanient les couches et cela particulièrement dans les parties sud et sud-est, et d'autre part par l'apport de la matière organique (déjections) et les restes osseux susceptibles de se transformer en apatite recristallisée. Les racines ont profondément remanié le remplissage de la partie sud, elles ont joué aussi un grand rôle dans les calcifications secondaires.

* **La configuration et la position de la grotte** : aux fissures et aux diaclases permettant l'acheminement des sédiments du plateau vers la grotte, on peut ajouter les nombreuses gouttières qui permettent d'entretenir l'humidité des sédiments, de générer des calcifications secondaires en surface et de constituer un apport autochtone supplémentaire sous forme de stalactites tombées. Cependant, la configuration particulière du substratum a joué un rôle très important, directement par ses pentes et indirectement en conditionnant le drainage, dans la morphologie générale des dépôts et dans les transformations post-sédimentaires.

* **Le climat** : le climat a marqué le remplissage de différentes manières. Son action, conjuguée à celles des autres facteurs, a contribué à la morphologie actuelle complexe du remplissage.

• L'influence des périodes froides s'illustre bien dans le remplissage à toutes les échelles d'observation : fragmentation et orientation des roches diverses (fragments calcaires, pièces de l'industrie lithique ou du dallage et les restes osseux), glissements des niveaux et soustractions par lessivage, agrégats lamellaires et arrondis, orientations et ségrégations des particules...

Cependant, il est à préciser que la complexité de la sédimentation et de sa différenciation liés au gel est fonction aussi de la configuration de la grotte en général et du substratum en particulier.

Les ravinements ne sont mis en évidence que par l'étude approfondie du terrain, ils sont très nets au sommet du remplissage (Fig. 59 b et c). Ces ravinements n'ont pu

être mis en évidence sur lames minces, mais on observe beaucoup de figures de ruissellement qui provoquent des soustractions de la fraction fine, aboutissant à un enrichissement de la fraction grossière quelque soit sa nature ou son origine, et leurs accumulations ailleurs. Ce qui revient à dire qu'aux ravinements qui ont pu affecter la base du remplissage, il faut ajouter les lessivages des particules. Il y a donc lieu de prendre en considération l'importance des lessivages, dans les différentes différenciations texturales, à côté des ravinements.

Les apports éoliens sont très plausibles mais difficiles, sinon impossibles, à mettre en évidence pour deux raisons essentielles. La première réside dans le contexte géomorphologique de la grotte : les falaises forment des à-pics interrompus par des corniches étroites, les sédiments y sont très peu abondants et identiques à ceux du plateau; ce qui fait que le stock des minéraux lourds ne peut qu'être identique, à la différence que la phosphatation a détruit le groupe des amphiboles et celui des pyroxènes, ailleurs ces groupes sont intacts. La deuxième raison réside dans l'importance des transferts de la fraction fine qui se font dans des directions variables et à différentes reprises et il est donc très difficile d'imputer les niveaux fins, quelque soit leur importance, au vecteur éolien.

- L'étude précédente a mis en évidence l'importance de l'évolution chimique des couches, mais surtout elle a noté que cette évolution s'est faite périodiquement en alternance avec la sédimentation : il n'y a pas une seule phase majeure, mais plusieurs.
- La présente étude montre cette alternance entre sédimentation et diagenèse. La seule différence réside dans la nature minéralogique de cette diagenèse : il s'agit de la paragenèse phosphatée, et non à manganèse et/ou fer, et/ou de la calcitisation.

En conclusion, le remplissage actuel de la Baume-Bonne montre l'intervention de plusieurs facteurs dans la mise en place et dans l'évolution post-sédimentaire. La morphologie sédimentaire complexe du remplissage montre l'importance de la topographie du substratum et l'intervention de facteurs locaux tel que la proximité de la paroi calcaire, la position vis à vis de l'extérieur et sur les pentes, la présence des gouttières, etc.

L'identité et/ou la continuité sédimentaires et des transformations postérieures permettent de dégager quatre ensembles distincts : l'ensemble fluviatile, l'ensemble phosphaté, la brèche inférieure et la brèche supérieure. L'ensemble des coupes présentées montre l'importance des différenciations minéralogiques et texturales, au sein de chaque ensemble, aboutissant à un nombre élevé de faciès. Ces faciès posent un problème de nomenclature : niveau, couche, sous-ensemble... Cependant et à la lumière des données antérieures et actuelles, on peut caractériser les différents ensembles, l'un par rapport à l'autre, et leurs subdivisions ainsi que leur répartition spatiale.

II.2. Caractérisation et répartition des ensembles

II.2.1. L'ensemble fluviatile

Il s'agit d'un épais dépôt formé essentiellement par du sable moyen surmonté par une alternance de sable grossier et argile rouge compacte. Cette formation occupe les zones (O-N-M)3. Dans les zones (O-N)3, aven ou "grand puits", ce dépôt est assez bien conservé. Par contre en avant de l'aven, zone M3 ou "petit puits", le dépôt repose sur le substratum et présente une morphologie très complexe (Fig. 58).

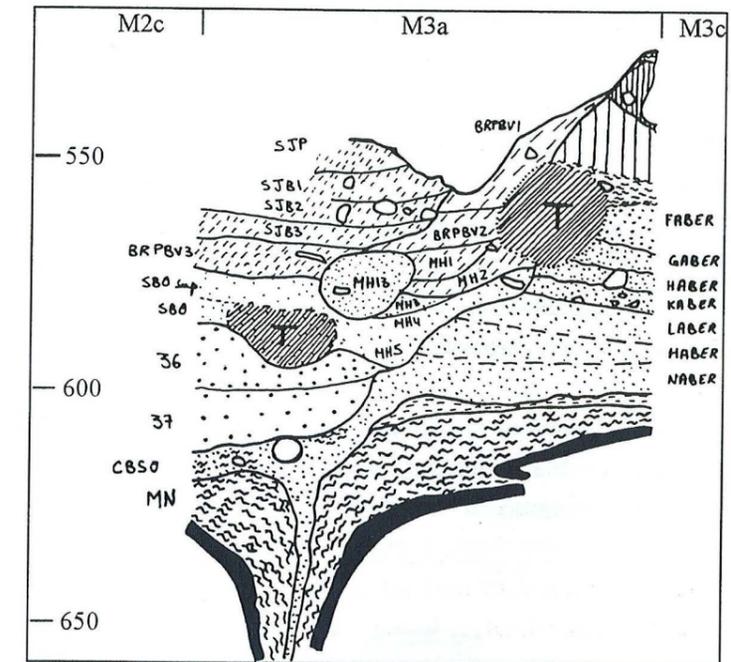


Fig. 58- Coupe transversale au niveau de la zone M3a.

En effet, cette zone se trouve dans l'axe de la rigole et où le substratum amorce son plongeon dans l'aven, de plus il présente une pente raide orientée N-S. Cette topographie confère une morphologie et une différenciation complexes aux différentes couches. En particulier, on note l'impossibilité de faire des corrélations stratigraphiques, sur le terrain, entre les quatre parois du "petit puits", ceci à cause des arrachages et des glissements et à cause d'une phosphatation intense et très inégale. Cette zone apparaît donc comme un collecteur des eaux chargées en phosphate et comme un croisement de sédimentation ou redistribution.

En conclusion, l'ensemble fluviatile présente un degré de transformation inégal. Au niveau de l'aven, zones (O-N)3, cet ensemble est assez bien conservé comme le montre l'aspect général des minéraux (l'essentiel de l'altération est hérité) et surtout la bonne conservation des restes osseux, contenus dans un lit grossier, malgré l'ancienneté du dépôt et malgré un transport fluviatile d'énergie assez forte. La phosphatation et la calcitisation, relativement faibles et ponctuelles, forment un "rajout" lié à des suintements postérieurs le long de la paroi

calcaire; ceci est bien observé sur le terrain et sur lames minces. Par contre en avant de l'aven, dans la zone M3, cet ensemble, qui repose sur le substratum, a subi des remaniements et surtout une phosphatation intense et inégale provoquée par des circulations latérales longitudinales et/ou transversales. Ce fait, lié à la topographie du substratum et à la présence d'une partie (au moins) de l'ensemble phosphaté, indique clairement que le critère "dépôt sur substratum et phosphatation" n'implique pas nécessairement une corrélation stratigraphique : deux couches d'origine et de composition différentes peuvent se trouver côte à côte sans qu'il s'agissent ni d'un même niveau ni d'un passage latéral de faciès.

En résumé, dans la zone M3, les couches très phosphatées reposant sur le substratum ne correspondent pas à la base de l'ensemble phosphaté situé plus à l'ouest; ces couches font partie de l'ensemble fluviatile localement et secondairement phosphaté.

II.2.2. L'ensemble phosphaté

Cet ensemble occupe la majeure partie du remplissage depuis la salle jusqu'aux abords de l'aven probablement (Fig. 4, 5, 6; Fig. 59 a-b-c; Fig. 60).

L'examen de cette ensemble montre les caractères généraux suivants :

- les ravinements importants qui caractérisent le sommet de l'ensemble et observés sur toutes les coupes;
- sur les coupes, on note l'absence de la brèche supérieure, le remanié important en surface et le vide entre la carotte P (ensemble phosphaté) et la carotte R (brèche supérieure); ceci indique une lacune entre ces deux ensembles;

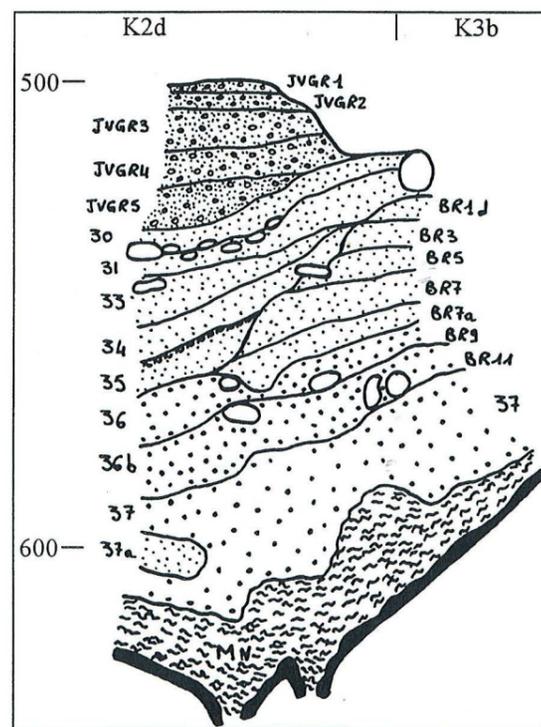


Fig. 59a- Coupe transversale au niveau de la zone K2d.

- la partie sud de cet ensemble est caractérisée par l'abondance des terriers et de l'activité racinaire, donc des remaniements importants qui rendent difficiles les caractérisations des couches et leurs corrélations nord-sud;
- la partie nord (Fig. 60) est caractérisée par une diminution importante de l'épaisseur de cet ensemble qui tend à se biseauter sur le substratum et vers l'extérieur; on observe aussi une tendance à la disparition de cet ensemble vers le nord (coupe transversale, Fig. 59 c) où le substratum remonte fortement (vers la zone K3c);
- l'épaisseur des couches est très variable (du simple au double) et souvent on observe des contacts latéraux entre deux ou plusieurs couches sans qu'il s'agisse d'un passage latéral de faciès, ce cas caractérise le couloir d'entrée (sommet de la carotte P) et l'abri dans la zone K2 et K3;
- l'étude de la phosphatogenèse montre que la phosphatation n'est pas la seule responsable des différenciations et de la morphologie complexe de la sédimentation de cet ensemble, l'intervention de la topographie du substratum, de l'apport anthropique (dallage) et l'empreinte du climat sont les facteurs les plus en cause : il est à rappeler que le sommet de l'ensemble phosphaté est plus affecté par les ségrégations texturales et les laminations sur les pentes que par la phosphatation;
- en dehors de la zone K caractérisée par le dallage séparant l'ensemble phosphaté en partie basale et partie sommitale, les galets en grès se retrouvent dispersés dans presque tous les niveaux des autres zones, ce qui implique que le fait de renfermer des galets en grès n'est pas un critères formel d'identification des couches;
- le substratum est caractérisé par une carapace apatitique d'épaisseur et de faciès variable : l'épaisseur est plus importante en bas de pente et en général, plus la tranche d'eau est importante en hauteur et en durée, plus la carapace apatitique est épaisse; pour le faciès, on observe soit un faciès lité noirâtre (induit par un film de manganèse et probablement de la matière organique), d'aspect métallique et très dur caractérisant une grande partie du substratum, soit un faciès feuilleté blanchâtre et moins dur caractérisant le substratum dans sa partie sud. Il est probable que cette différence de faciès est liée à une différence du drainage au dessus du substratum; quoi qu'il en soit, la carapace est une apatite formée aux dépens du substratum calcaire et ne renferme pas de matériel détritique (quartz), ces deux faciès sont l'équivalent local l'un de l'autre mais ne peuvent être l'équivalent des couches basales très phosphatées qui sont un dépôt détritique (quartzeux et micacé principalement); dans les coupes présentées ici, la carapace est notée "MN", elle n'est pas à confondre avec les couches notées "37" ou "K".

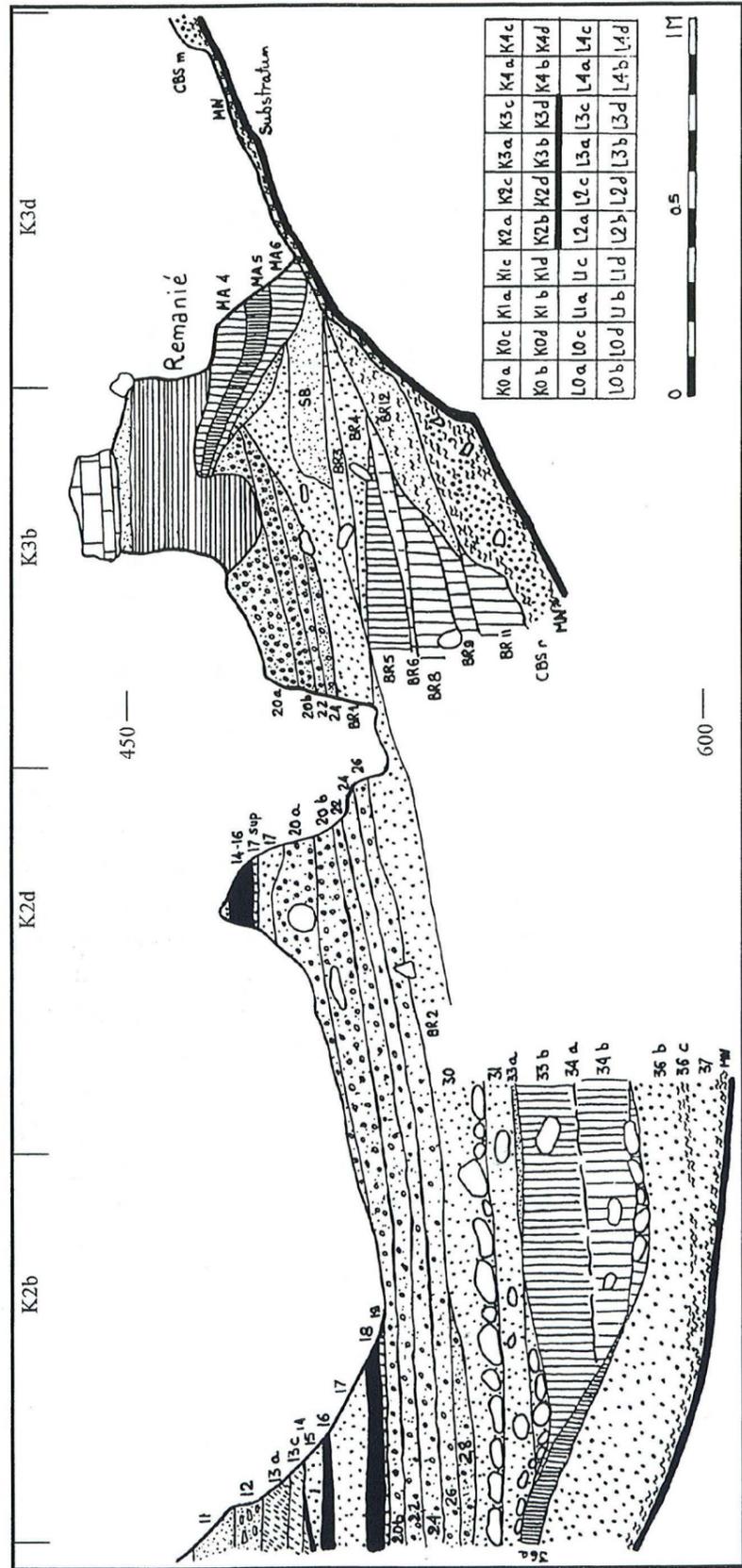


Fig. 59b- Coupe transversale au niveau de la bande Kb.

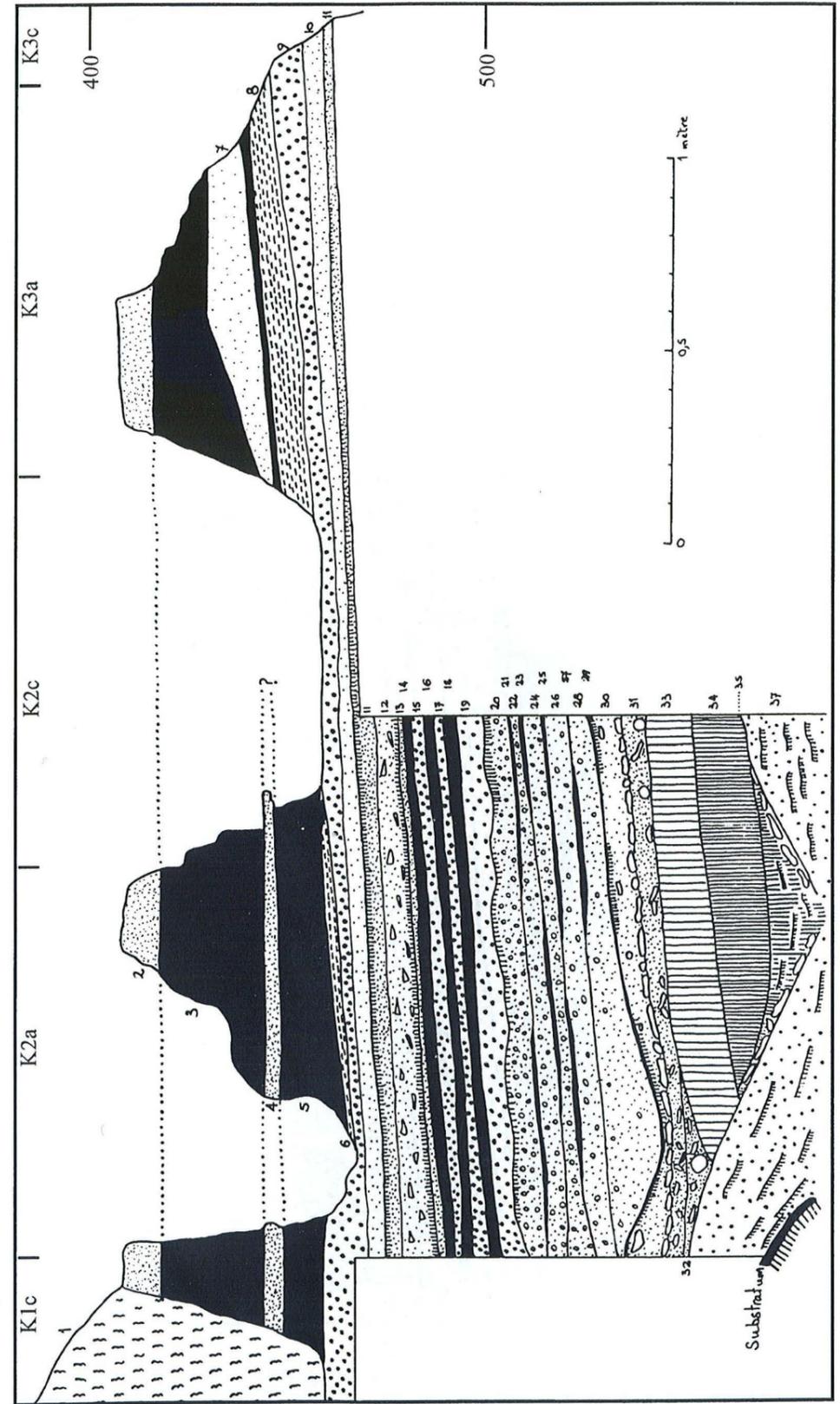


Fig. 59c- Coupe transversale au niveau de la bande Ka.

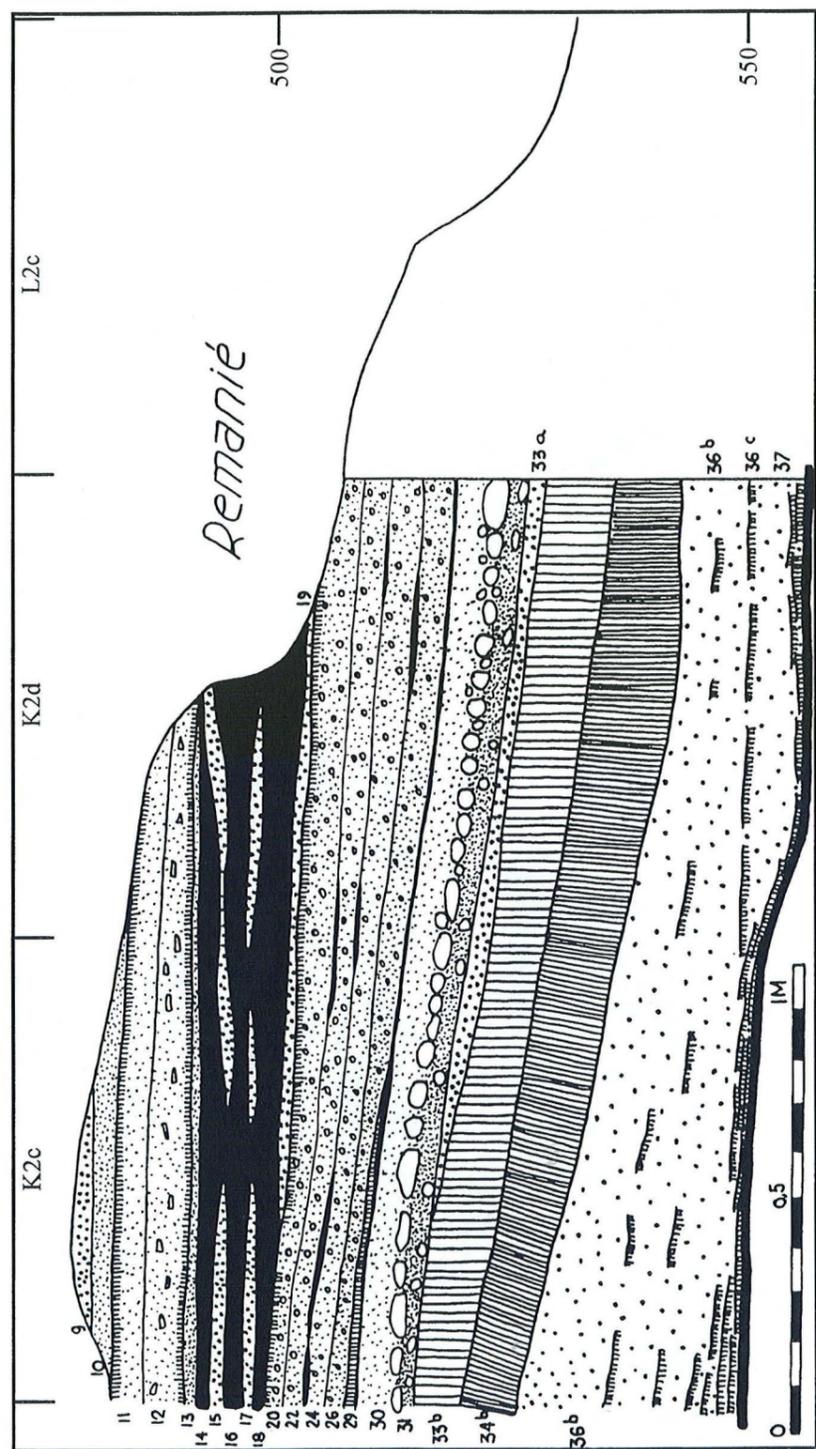


Fig. 60- Coupe longitudinale au niveau de la zone K.

En conclusion, une corrélation entre les différentes coupes de l'ensemble phosphaté est proposée (Fig. 61). Les arguments du terrain et du laboratoire concordent pour séparer cet ensemble en deux parties : base et sommet.

- La base est caractérisée par un sédiment jaunâtre compact et très phosphaté (P1+P2; N1; M1) avec une microstructure dominante lamellaire ou polyédrique, elle supporte le dallage (concentré dans la bande K). On observe une phosphatation plus intense de l'aval (N1) par rapport à l'amont (P1+P2), ce fait est dû à la fois à une accumulation des eaux plus importante en aval et à la présence du dallage qui maintient l'humidité dans les couches qu'il surmonte. La phosphatation intense (concrétions et la croûte apatitiques) indique une longue durée d'évolution et marque une lacune sédimentaire entre cette partie et la partie sommitale.
- Le sommet est beaucoup moins phosphaté (P3+P4; N2+N3; M2+M3+M4), les agrégats sont généralement arrondis avec tendance à se répartir en lits. Les différentes colorations dominantes traduisent la nature du sédiment, en particulier la richesse en débris végétaux et en particules charbonneuses. En amont (carotte P), ce sommet est caractérisé par la présence de l'apatite; alors qu'en aval (carottes O, N et M), il est caractérisé par la leucophosphite. Cette évolution est due à la fréquence des phases d'engorgement et de lavage consécutives aux pentes; l'évolution de l'apatite vers la leucophosphite est probablement latérale, cette transformation minéralogique est à chercher entre la carotte P et la carotte O (zone B probablement).

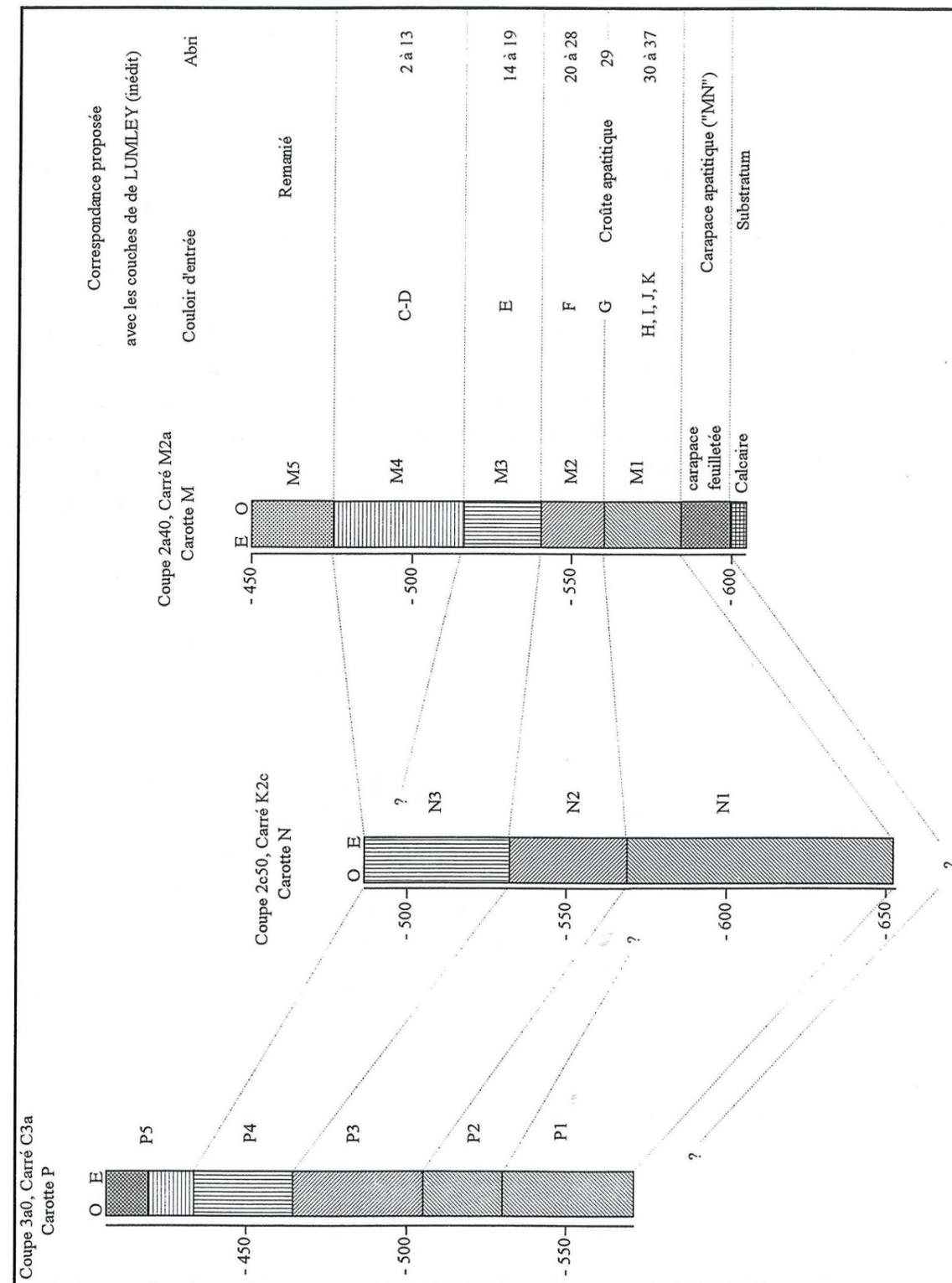


Fig. 61- Ensemble phosphaté : corrélation proposée.

II.2.3. La brèche inférieure

Elle est caractérisée par la présence de gros cailloux calcaires à carapace apatitique bien développée et par une matrice limoneuse jaunâtre phosphatée, localement et secondairement carbonatée. Elle surmonte l'ensemble fluviatile avec une épaisseur variable, en particulier, les cailloux calcaires peuvent s'observer au fond de l'aven et au sein du dépôt sableux (côté est de l'aven).

La particularité de cet ensemble tient en une double origine de ses constituants : concentration locale des cailloux calcaires au dessus de l'aven et une accumulation limoneuse qui provient principalement du lessivage latéral (dans le sens longitudinal) d'une partie au moins de l'ensemble phosphaté situé en amont. On remarque que la matrice ne renferme pas de fragments grossiers (galets karstiques, fragments calcaires, pièces lithiques, restes osseux...) sauf à son sommet où les brassages sont importants.

Ces cailloux ne représentent pas le prolongement du dallage à galets en grès et cet ensemble ne représente pas le prolongement latéral moins altéré de l'ensemble phosphaté. Le développement important de la carapace apatitique sur ces cailloux, attestant d'une évolution d'assez longue durée, et le passage brutal vers la brèche supérieure, de composition complètement différente, témoignent d'une lacune entre la brèche inférieure et la brèche supérieure.

Lors des fouilles antérieures à 1968, la brèche inférieure a été subdivisée en trois couches : CBS a, b et c selon la concentration en cailloutis et selon l'apparence de la matrice.

II.2.4. La brèche supérieure

Cet ensemble est caractérisé par une hétérogénéité de ses constituants (nature et origine) et par leur distribution et calcitisation variables selon les zones et selon la proximité de la paroi.

Les éléments calcitiques sont de deux types : les fragments de l'encaissant et les stalactites. Ces derniers sont plus abondants en allant vers le couloir où les gouttières sont fréquentes. Les fragments calcaires sont abondants le long de la paroi nord mais présentent une accumulation en bas des pentes pour les plus grands. Ces accumulations aboutissent à une différenciation en niveaux plus riches en grossiers et pauvres en matrice (généralement le long de la paroi nord) et niveaux plus riches en matrice (la coupe est de l'abri, carotte B).

La différenciation texturale est accentuée par une calcitisation secondaire qui, en se faisant en plusieurs phases, aboutit à des encroûtements calcaires plus ou moins accentués selon la proximité de la paroi.

Cette brèche supérieure surmonte la brèche inférieure avec une limite nette qui s'observe bien sur la coupe est (carotte B). La différence importante de la phosphatation entre ces deux ensembles indique une lacune de sédimentation.

Les rapports entre cette brèche et l'ensemble phosphaté sous-jacent sont incertains. Le vide observé entre la carotte P et la carotte R, l'importance des déblais entre ces deux ensembles et la différence fondamentale des constituants indiqueraient une lacune de

sédimentation. Dans ce cas, la limite verticale et nette qui a été observée dans l'abri lors des fouilles antérieures correspondrait à un contact physique entre deux faciès différents, et non à un passage latéral entre un faciès sain et son équivalent altéré.

Les différents niveaux de cette brèche semblent se déposer dans le même contexte périglaciaire et appartiennent probablement à une même période.

III. SIGNIFICATION DES TRAITS OBSERVÉS

III.1. Le remplissage

L'étude de la composition élémentaire du remplissage détritique (ossements non compris) montre quatre sources bien distinctes :

- le Verdon avec ses alluvions anciennes (probablement anté-quatérnaires);
- les fissures du karst où transitent les sédiments du plateau;
- la roche encaissante qui fournit les fragments calcaires par fragmentation;
- l'activité anthropique fournissant des galets en grès et des outils principalement en silex.

Le sédiment du plateau est composé d'une matrice limoneuse (essentiellement quartzeuse et micacée) qui emballe une composante grossière formée de petits galets arrondis et parfois craquelés et de fragments calcaires de la taille des sables et plus provenant de la fragmentation de la roche affleurante. Ces éléments se retrouvent dans le remplissage karstique à l'exception des fragments calcaires. L'entraînement des éléments grossiers à travers les fissures du karst suppose une grande énergie des eaux de ruissellement. La présence d'un couvert végétal dense ralentit beaucoup l'énergie des eaux d'infiltration et retient le sol, si bien que seule la fraction fine parvient dans la grotte. Alors que la présence d'une couverture neigeuse permet une libération brutale des eaux lors de la fonte avec assez d'énergie pour entraîner les éléments grossiers et de déboucher les conduits karstiques. La dissolution des fragments calcaires portlandiens ne livre qu'une quantité extrêmement faible de résidu insoluble (LUMLEY de, 1969).

Il est donc probable que l'arrivée du sédiment dans la grotte, à travers les fissures du karst s'est faite dans des conditions périglaciaires et lors de la fonte de la couverture neigeuse. Les eaux froides auraient permis la dissolution, partielle ou totale, de la fraction grossière calcaire.

III.2. Les microstructures

Quatre types de microstructure s'observent actuellement dans le remplissage étudié :

- des structures et microstructures typiquement sédimentaires et alluvionnaires caractérisant la formation fluviatile et qui correspondent à une activité ancienne du Verdon;

- une réorganisation en agrégats arrondis qui affecte l'ensemble du dépôt phosphaté et la brèche supérieure le long de la paroi nord et à l'est. Dans la brèche, cette agrégation s'accompagne par une fragmentation des cailloutis calcaires et des ossements enrichissant la matrice limono-argileuse. Dans le dépôt phosphaté, l'agrégation est plus exprimée dans l'abri (aval) que dans le couloir (amont) et s'accompagne d'un enrichissement en fraction fine principalement quartzeuse et micacée et par des revêtements ou coiffes poussiéreux. La stabilité de ces agrégats est assurée d'abord par leur compaction et accessoirement par une calcitisation secondaire (cas des couches de la brèche supérieure);
- une réorganisation en agrégats lamellaires (occasionnellement lenticulaire) très stable du fait de leur haute compaction et qui s'accompagne d'une fragmentation mécanique, à toutes les échelles, des constituants élémentaires même les plus résistants (grains de quartz, grès et silex) et par des ségrégations des oxy-hydroxydes de fer et de manganèse;
- des figures de ruissellements obliques qui se manifestent par :

* un niveau jaunâtre composé uniquement de sable moyen à fin et principalement quartzeux, ce niveau est localisé au sein du dépôt phosphaté sur la coupe transversale ouest et au niveau de l'axe de la rigole;

* l'enrichissement de l'abri (carotte N; aval) en paillettes micacées par rapport au couloir (carotte P; amont);

* remaniement de la formation fluviatile en avant de l'aven ("petit puits") par ruissellement ce qui donne des lits millimétriques formés de quartz limoneux et des paillettes micacées toutes posées à plat horizontalement, ces lits s'intercalent au sein de sables moyens et fins ne renfermant que peu de fraction fine; de plus, c'est le seul endroit où la formation fluviatile est nettement phosphatée;

* accumulation latérale de la matrice limoneuse de la brèche inférieure à partir du dépôt phosphaté.

Les réorganisations microstructurales qui affectent le dépôt phosphaté et la brèche supérieure sont issues de la transformation de l'eau en glace. Les agrégats arrondis indiquent une alternance de cycles de gel-dégel; le nombre des cycles ne peut être estimé car cette microstructure est accentuée par les pentes. La microstructure lamellaire affectant principalement la base du dépôt phosphaté indique un gel lent en profondeur. Ces réorganisations se sont donc développées sous un climat périglaciaire. Le climat externe devrait être très froid et d'assez longue durée pour qu'il parvienne à marquer profondément le remplissage. Il est donc vraisemblable que ces microstructures marquent des périodes glaciaires. L'influence marquée du climat externe sur les dépôts du couloir (fond de l'abri) semble indiquer que l'abri était déjà ouvert.

La formation de la brèche inférieure (gros cailloux à carapace apatitique, matrice limoneuse phosphatée) possède deux origines : l'accumulation des cailloux calcaires s'est faite localement par desquamation de la paroi pendant une période glaciaire, alors que l'accumulation de la matrice s'est faite pendant une période humide par ruissellement latéral à partir de la base du dépôt phosphaté. La chute des cailloux est probablement synchrone de la période de restructuration de la base du dépôt phosphaté (P1-P2, N1 et probablement M1). L'accumulation de la matrice est issue de la grande phase de dégel affectant le sommet des

couches précitées, sachant que les niveaux lavés observés sur la coupe transversale ouest appartiennent à la base du dépôt phosphaté.

Dans tous les cas, il faut retenir l'importance de la configuration du substratum comme facteur accentuant les différenciations microstructurales et texturales.

III.3. Les minéralisations

III.3.1. Phosphatation

En général, la phosphatation dans les grottes préhistoriques est rapportée aux périodes interglaciaires (BARRAL & SIMONE, 1976; LUMLEY *de et al.*, 1981; GIRESSE & VAN VLIET-LANOË, 1986). Cependant, PERRENOUD (1993) situe la phase de phosphatation, affectant l'ensemble III du remplissage de la Caune de l'Arago, dans les stades isotopiques 5a, 4 ou 3, en particulier il situe la genèse de la crandallite dans ce site vers le stade isotopique 4 (glaciaire) et admet que cette genèse n'est pas obligatoirement liée à un climat chaud.

Dans l'abri-grotte de la Baume-Bonne, la genèse des minéraux phosphatés s'est faite progressivement et à plusieurs reprises en alternance avec la sédimentation et avec les phases de ruissellement. Il n'y a donc pas une seule phase mais plusieurs, chacune étant interrompue soit par l'absence d'eau (gel) soit par la mise en place de la couche sus-jacente.

L'étude de la mise en place de l'apatite montre qu'elle dérive principalement de la dissolution des restes osseux en milieu humide (pourrissement dû à la richesse en matière organique, déjections de toute sorte, favorable au développement bactérien). Les restes osseux et la matière organique sont issus de l'activité anthropique (richesse en pièces de l'industrie lithique) et faunique (attestée par les nombreux terriers de différentes tailles), l'eau est libérée lors du dégel (les revêtements apatitiques rubanés et fibroradiés sont associés soit à une restructuration lamellaire soit à une restructuration en agrégats arrondis). KONHAUSER (1994) montre la genèse d'un phosphate de fer, sous forme de sphérules par activité bactérienne dans l'Arctique canadien, ce qui montre que l'activité bactérienne est possible même si l'environnement est froid car les bactéries créent leur propre milieu (microsites).

Ceci montre que les phases de phosphatation à la Baume-Bonne sont un indicateur paléoenvironnemental et non paléoclimatique. Elles ont pu survenir aussi bien dans des conditions périglaciaires que dans des conditions chaudes ou tempérées et humides.

Par contre, il en est peut-être autrement pour la formation des concrétions phosphatées brun-chocolat dures (observées au nord de l'axe du couloir et de l'abri). Dans la couche P2 où elles sont *in situ*, leur formation atteste du passage progressif d'un milieu humide (boueux) vers un milieu sec (déshydratation et durcissement des concrétions). Deux observations s'imposent concernant ces concrétions et leur milieu de genèse. La première est que ces concrétions ne présentent aucune déformation par gel dans la couche P2. La deuxième observation concerne le taux élevé de l'humidité actuelle des sédiments du couloir et de la salle (les prélèvements de la carotte P, dans le couloir, et celui effectué dans la salle perdent plus de la moitié de leur

pois une fois séchés). Cette humidité provient d'un nombre assez important de gouttières actives affectant le couloir et la salle et est entretenue par une faible évaporation. Cette faiblesse de l'évaporation est due d'une part à la finesse et à la compaction des sédiments (les fissures planaires favorisent le piégeage de l'eau), et d'autre part à la fraîcheur du couloir et de la salle par rapport à l'extérieur (actuellement et en plein été, on constate une différence de température pouvant aller jusqu'à environ 20°C entre la salle et l'extérieur, un peu moins pour l'abri). De ce fait, la déshydratation et le durcissement des concrétions, nécessitant un dessèchement total du sédiment (au moins dans le couloir), supposent des températures externes assez élevées et de durée assez longue pour pouvoir affecter le sédiment.

On peut donc conclure que la déshydratation et le durcissement de ces concrétions phosphatées marquent un réchauffement du climat. Seulement, ce réchauffement peut avoir aussi bien une valeur d'interglaciaire qu'une valeur d'interstadaire.

III.3.2. Calcitisation

Les précipitations calcitiques reconnues à l'intérieur ou à la surface du remplissage sont principalement de trois types : les revêtements sparitiques dans les vides structuraux, les pseudomorphoses et manchons racinaires et les encroûtements denses et épais (type stalagmite) ou bien spongieux.

Les pseudomorphoses et les manchons racinaires sont de diamètre fin et dispersés dans les profils (à l'exception de la carotte M) indiquant une colonisation dispersée (en mosaïque) par des herbacées. Cette calcite déborde souvent et imprègne, avec remplacement, la masse basale conduisant à la formation de concrétions calcitiques de contours irréguliers et de taille variable. Il est à noter que cette forme ne subit pas de transformation postérieure (dissolution ou fragmentation mécanique), elle est toujours postérieure aux phases de réorganisation microstructurale et c'est elle qui perturbe le microstructure acquise. Ceci pourrait indiquer que l'activité racinaire se développe pendant une phase de stabilité de la couche et se fossilise par le dépôt de la couche sus-jacente.

En conclusion, cette forme de cristallisation calcitique issue de l'activité racinaire n'est pas caractéristique dans les dépôts de la partie nord (par rapport à l'axe de l'abri) à cause sa rareté et de sa dispersion. En revanche, elle affecte profondément les dépôts du côté sud de l'abri (plus précisément la carotte M) et sur toute l'épaisseur, conduisant à un remaniement intense. Cette activité intense dans cette partie de l'abri indiquerait que l'abri était ouvert.

Quelque soit le cas de figure, l'activité racinaire, dans ce remplissage, ne possède aucune valeur paléoclimatique. Elle indique seulement un environnement assez humide et assez lumineux pour permettre le développement des herbacées.

Pour les revêtements calcitiques des vides structuraux, il faut distinguer ceux observés dans le dépôt phosphaté du couloir (carotte P) de ceux observés au sein de la brèche supérieure le long de la paroi nord (carottes R, S et A).

Dans le cas du dépôt phosphaté (cf. Deuxième partie, Chap. III, § II.1.2.), les revêtements des vides et leur évolution vers des nodules calcitiques (couche P1) constituent l'ultime phase minéralogique fossilisant les microstructures; ils sont bien conservés. Ces revêtements sont constitués de cristaux macrosparitiques et sont de type vadose. Les nodules calcitiques sont issus de ces revêtements par imprégnation et remplacement progressif de la masse basale, l'assèchement et l'évaporation aboutit au durcissement et au détachement des nodules par des fentes courbes de dessiccation. Cette phase d'individualisation se rattache à la même phase au cours de laquelle les concrétions phosphatées se sont individualisées au sein de la couche P2.

Par conséquent et comme pour les concrétions phosphatées, on peut avancer que l'individualisation des nodules calcitiques et les revêtements sparitiques dont ils sont issus marquent un réchauffement du climat pouvant avoir aussi bien une valeur interglaciaire qu'une valeur interstadiaire. L'encroûtement calcitique affectant localement le sommet de la carotte P (couche P5) découle vraisemblablement du plancher stalagmitique attribué au stade isotopique 5 (5e plus précisément).

Les calcitisations secondaires de la brèche supérieure sont polyphasées et complexes. Les observations microscopiques montrent au moins trois générations :

- calcite micritique et microsparitique observée au sein des agrégats arrondis qui peut être qualifiée de primaire et est considérée comme étant liée au dépôt de la matrice fine;
- calcite sparitique à microsparitique précipitant dans les vides interagrégats conduisant à la cimentation des agrégats entre eux tout en les préservant de l'effondrement. Ce type est similaire aux revêtements sparitiques du dépôt phosphaté (couche P1), il fait suite à la restructuration du sédiment par gel-dégel et marque un réchauffement (ces revêtements ne sont pas déformés mécaniquement);
- l'évolution vers les croûtes (niveaux poreux très encroûtés dans les carottes R et S, cimentation quasi complète en dalle de la carotte A) est plus complexe à situer dans le temps. Les observations du terrain et des lames minces montrent que cette évolution s'est faite par accumulation de la calcite qui ne provient pas de la dissolution d'une couche ou d'un horizon particulier, mais provient à la fois des suintements sur la paroi et des gouttières. L'effet de la paroi (dans une moindre mesure des gouttières car celles-ci ne s'observent que dans le couloir) a été un facteur important dans cette évolution. Le deuxième facteur concerne les inégalités morphologiques du substratum favorisant des zones d'accumulation des eaux chargées en carbonate de calcium et des zones où le drainage est important (sur les pentes raides), d'où la discontinuité et l'intensité variable. Le troisième facteur concerne l'exposition directe de la brèche supérieure à l'ensoleillement qui favorise l'évaporation.
- le dôme stalagmitique dans le couloir est attribué au début du stade isotopique 5 (FALGUÈRES *et al.*, 1991; GAGNEPAIN *et al.*, 1996) (Tabl. 1 et 13), mais aucune relation

directe et fiable n'a pu être faite entre ce dôme et les encroûtements de la brèche supérieure. Cependant, on a tendance à les situer dans la même ou période.

En conclusion, on peut avancer que les calcitisations secondaires de la brèche supérieure marquent un réchauffement du climat. Cependant, elles dépendent aussi de la morphologie générale du dépôt et du karst. Leurs conditions de genèse sont donc morphoclimatiques.

IV. IMPACTS SUR LES TÉMOINS ARCHÉOLOGIQUES

Les réorganisations sédimentaires et les altérations physico-chimiques ont eu des impacts importants, à différents niveaux, sur les témoins archéologiques (os, pièces lithiques, charbon de bois...) et sur leur assemblage.

IV.1. Les restes osseux

Le degré de l'altération physico-chimique des restes osseux est fonction du milieu de conservation où ils se trouvent (nature du sédiment).

Dans les dépôts fluviaux : le sommet de ces dépôts est caractérisé par des sables très grossiers en majorité quartzeux qui renferment des restes osseux attribués, par Lucien JOURDAN (com. écrite de PERRENOUD), à des poissons ayant disparus au Mio-Pliocène. Malgré leur ancienneté, l'absence du carbonate de calcium dans ces sables et le transport par les eaux, ces restes osseux n'ont subi qu'une abrasion mécanique par les eaux aboutissant à leur aspect actuel très lustré et émoussé. L'analyse microscopique ne montre pas d'altération à l'échelle de l'observation. On n'observe pas de dissolution-recristallisation de l'apatite. Les plages de biréfringence restent nettes et bien délimitées, ne montrant aucune tendance à l'isotropie. Cependant, des réarrangements ultrastructuraux des cristallites apatitiques ne sont pas à exclure. La principale altération observée est donc mécanique et due principalement au transport fluvial, elle est par conséquent héritée. L'absence d'une évolution postérieure s'explique par la texture grossière du sédiment qui permet un bon drainage, si bien que le contact de ces os avec les eaux reste bref (absence de confinement) empêchant une dissolution malgré l'absence du calcaire et la prépondérance des silicates. Cependant, le degré élevé de l'émoussé de ces restes rend les déterminations spécifiques difficiles, voire impossibles.

Dans la brèche supérieure : le long de la paroi nord (secteur 4-5) et dans la partie est (zone O), les restes osseux présentent une altération physico-chimique plus ou moins prononcée. L'altération la plus importante consiste en une fragmentation mécanique importante des os,

observable à l'échelle macroscopique et microscopique, consécutive aux phases de gel; la conséquence en est d'une part un enrichissement du matériel osseux en "esquilles", qui s'ajoutent à la fragmentation intentionnelle anthropique ou faunique, et d'autre part le dégagement des os à l'état fragmentaire lors de la fouille pour les os fragmentés sur place et dont les fragments sont maintenus liés par la calcite secondaire. Ces os montrent, au microscope, des réarrangements profonds des cristallites de l'apatite, des pénétrations des oxydes de fer et de manganèse (qui laissent présager une activité bactérienne), des vides microscopiques au sein de l'os et des craquelures. Ces modifications n'affectent pas l'aspect macroscopique de l'os mais montrent clairement une évolution postérieure à prendre en compte lors des datations radiométriques. En général, les restes osseux sont assez bien conservés dans la brèche supérieure carbonatée.

Dans les dépôts phosphatés : l'ensemble des restes osseux a évolué par dissolution complète vers l'apatite recristallisée (cf. Fig. 36).

Conclusion : la bonne (ou la mauvaise) conservation des restes osseux observés est fonction directe des conditions morphoclimatiques (humidité, composition de l'eau, drainage) et édaphiques (texture du sédiment conditionnant le drainage, présence ou absence du carbonate de calcium). En particulier, on constate qu'un milieu filtrant, même sans calcaire, n'affecte pas cette conservation d'une manière significative, en raison probablement de l'absence de la matière organique, et qu'un milieu renfermant du calcaire constitue un milieu tampon empêchant la dissolution des os. La bonne conservation des restes osseux en milieu carbonaté est illustré, par exemple, dans les sites de plein air en Bretagne (France) développés sur roche silicatée et où on observe une meilleure conservation des os en s'approchant des côtes parallèlement à une richesse des sédiments en tests calcaires.

IV.2. L'industrie lithique

La matière première est principalement siliceuse (95% environ; silex majoritaire, chaille et quartzite; BOUAJAJA, 1992; HONG, 1993). La résistance de ce matériau et la grande richesse du gisement en pièces de l'industrie lithique font que les transformations postérieures n'affectent que peu de pièces. L'altération la plus profonde concerne les pièces lithiques situées dans le couloir au niveau de l'axe (zone 2 récoltant le maximum d'eau) et se manifeste à la fois par une phosphatation en surface, parfois en profondeur à la faveur des vides ou des fissures préexistants, et par des craquelures ou éclatement de certaines pièces sous l'effet du gel. Ce type de pièces reste relativement minoritaires et n'affecte pas les études typologiques et technologiques. L'altération des pièces lithiques a été observée par BOUAJAJA (1992) qui parle d'une désilicification des pièces postérieurement à leur débitage.

IV.3. Autres témoins archéologiques

L'ensemble des dépôts archéologiques ont évolué sous des conditions périglaciaires, c'est à dire des alternances de gel-dégel. Sous ces conditions, de nombreux témoins archéologiques (charbons de bois, cendres, déjections, esquilles osseux ou d'industrie...) ont subi des broyages, des dispersions et une intégration à la masse basale détritique. Si bien qu'on assiste d'une part à la disparition de structure d'activité anthropique bien précise et organisée, principalement les foyers, et d'autre part à l'absence de niveaux stériles archéologiquement, au sens strict du terme, ayant séparés des sols d'habitat. Tous les niveaux des dépôts archéologiques (y compris les niveaux argilo-limoneux de la brèche supérieure) renferment ces témoins à l'état méso- et microscopique sous forme de débris carbonneux, osseux et/ou fragments phosphatés attribuables à des déjections. Ces dilutions dans la masse concernent aussi bien le matériel anthropique (méso- et microscopique) que les structures et microstructures issues des occupations humaines.

IV.4. Assemblage du matériel archéologique

Le dépôt phosphaté, très riche en industrie lithique et très pauvre en ossements, occupant la majeure partie de l'abri-grotte, a évolué dans des conditions périglaciaires. Il en résulte une diminution de l'épaisseur du dépôt par compaction et par diverses soustractions de la fraction fine consécutives aux lessivages latéraux. Ces deux événements qui s'ajoutent aux glissements des couches sur les pentes se traduisent, d'une part par une concentration du matériel lithique principalement au niveau de l'axe de la rigole, d'autre part par l'absence de niveaux stériles séparant les niveaux d'accumulation archéologique. Cette concentration s'observe bien dans les profils de répartition du matériel archéologique en fonction de la profondeur (profils établis par Mi-Young HONG et Claire Gaillard de 1990 à 1993, I.P.H.). Cependant, ces glissements et ces concentrations se sont faites plan par plan, si bien qu'on ne constate pas de mélange des pièces; par contre, il est difficile pour le préhistorien de faire un découpage ou une distinction entre les différents niveaux d'habitat; ceci pourrait masquer une éventuelle évolution culturelle. D'après la répartition du matériel archéologique, l'abri-grotte semble être fréquenté en permanence, ce qui n'est peut-être qu'une apparence.

Au niveau de l'aven (vers la zone O), l'assemblage peut être compliqué dans la mesure où cette zone a fonctionné comme un croisement pour des couches de provenances diverses selon les pentes, ce qui peut conduire à un mélange du matériel archéologique ou bien avoir côte à côte deux types de matériel chronologiquement différents.

Au niveau de la brèche carbonatée riche en ossements et en pièces de l'industrie lithique, les diverses concentrations des éléments grossiers (quelque soit leur nature ou origine) par glissement le long des pentes a probablement occasionné un mélange du matériel archéologique, ce qui pourrait expliquer les datations radiométriques divergeant pour des os du même niveau.

V. HISTORIQUE DU REMPLISSAGE ET HYPOTHÈSE CHRONOLOGIQUE

Les datations radiométriques, U/Th et ESR, sont nombreuses (FALGUÈRES *et al.*, 1991; GAGNEPAIN *et al.*, 1996) à la Baume-Bonne (Tabl. 1 et Tabl. 13). Elles concernent principalement le dôme stalagmitique et la brèche supérieure; ailleurs, le matériel datable fait défaut. L'ensemble des datations a été effectué au Laboratoire de Géochronologie, I.P.H.

Le dôme stalagmitique, en position sommitale, est daté d'environ 130 000 ans. Ce qui correspond au stade isotopique 5, plus précisément au stade isotopique 5e.

Les ossements de la brèche supérieure (le long de la paroi nord et à l'est de l'abri) ont fait l'objet de plusieurs datations (Tabl. 1 et Tabl. 13). Le fait remarquable est l'écart qui existe entre ces dates et cela même pour des os appartenant à un même niveau stratigraphique (FALGUÈRES *et al.*, 1991). L'étude micromorphologique de la brèche supérieure (carottes R, S, J, A, B et C) montre qu'elle a subi des réorganisations postérieures intenses incluant notamment l'assemblage du matériel archéologique. Les ossements ont subi des concentrations par glissement en bas des pentes et/ou par lessivage de la matrice fine, et une altération de leurs caractéristiques optiques plus ou moins prononcée sans en affecter de l'aspect macroscopique. Ces observations peuvent expliquer les écarts des dates pour les os appartenant au même niveau. D'un autre côté, les effets de l'alternance du gel/dégel (fragmentation des éléments grossiers, formation des agrégats arrondis intégrant des témoins archéologiques, etc.) ont conduit à une longue évolution des restes osseux dans un milieu d'ambiance physico-chimique variable dans le temps et précédent la cimentation des agrégats et des éléments grossiers par la calcite sparitique. Dans de telles conditions, les échanges ioniques entre l'apatite des os et son environnement sédimentaire sont aussi variables dans le temps et sont très complexes. Ce qui revient à dire que les os ont pu recevoir postérieurement de l'uranium (ce qui conduit à un rajeunissement), mais ils peuvent aussi le perdre (ce qui conduit à un vieillissement); ces échanges peuvent aussi affecter le thorium bien qu'il soit très peu mobile comparé à l'uranium (RAE *et al.*, 1989).

Tenant compte de ces difficultés, une autre série de datation a été effectuée sur les ossements de la brèche supérieure (GAGNEPAIN *et al.*, 1996; Tabl. 13). Dans l'ensemble, ces nouvelles dates s'accordent pour situer la brèche supérieure dans le stade isotopique 6 (BAHAIN, comm. pers.). Ceci est en accord avec les conclusions de cette étude montrant que les différents niveaux de la brèche supérieure appartiennent à une même période glaciaire. Les différents niveaux ou couches formant cette brèche correspondraient aux différentes fluctuations (stades et interstades) de la même période glaciaire.

L'ensemble phosphaté (ou ensemble bariolé) n'a pu être daté à cause de l'absence du matériel datable (restes osseux dissouts ou très altérés).

Cependant, un silex brûlé, trouvé au sommet de cet ensemble côté sud, a pu être daté par ESR (FALGUÈRES *et al.*, 1991). Il donne un âge de 271 ± 38 ka et les auteurs s'accordent

pour une attribution au stade isotopique 8. Cette attribution va dans le sens d'un dépôt et d'une évolution sous un climat glaciaire (cf. Quatrième partie, § III. Signification des traits observés). Dans ce cas, le stade isotopique 7 correspondrait à une lacune de sédimentation observable dans le couloir (coupe longitudinale 3a0; Fig. 4) où on observe un vide entre le sommet du phosphaté (stade isotopique 8) et la brèche supérieure (stade isotopique 6). Pendant le stade isotopique 7, seules les minéralisations secondaires sont actives. Selon les corrélations proposées pour les différentes coupes du phosphaté (Fig. 61), le sommet du dépôt phosphaté (Tabl. 13), attribuable au stade isotopique 8, comprend les couches (ou sous-ensemble, selon les termes) P3-P4-P5 (couloir côté nord), N2-N3 (abri à la limite avec le couloir côté nord) et M2-M3-M4 (centre de l'abri côté sud).

L'analyse minéralogique et micromorphologique montre que le passage entre la base (P1-P2, N1 et M1) et le sommet du dépôt phosphaté est brutal. Les différences portent à la fois sur les caractères minéralogiques, texturaux et microstructuraux. L'étude des coupes antérieures à 1968 (LUMLEY de & Coll.; inédites) montre que cette limite est matérialisée par une croûte apatitique dure et d'aspect noirâtre nommée 29 dans l'abri et G dans le couloir (Fig. 61). Cette croûte semble plus épaisse au niveau de l'axe de l'abri (rigole) et s'atténue vers les bords. La position relative de cette croûte par rapport aux différentes couches permet de la faire corrélérer avec le sommet de la couche P2 caractérisé par la présence des concrétions apatitiques brun-chocolat. La distinction minéralogique et micromorphologique et la présence d'une croûte apatitique semblent indiquer un arrêt de la sédimentation. Pendant cette phase d'arrêt, la base du dépôt phosphaté subit une évolution minéralogique (évolution vers des concrétions apatitiques dures, suivie localement d'une calcitisation). Eu égard au contexte géomorphologique du dépôt, on peut admettre que cette évolution (formation des concrétions apatitiques par induration et déshydratation) s'est effectuée pendant un interglaciaire qui, logiquement, correspondrait au stade isotopique 9.

S'inscrivant dans cette même logique, la mise en place et l'évolution microstructural (découpage en lamelles et les ségrégations texturales sous l'effet de la transformation de l'eau en glace) peuvent être attribuées au stade isotopique 10.

Le tableau 13 présente une synthèse de ces données. Cette synthèse s'appuie sur l'ensemble des données pluridisciplinaires acquises à cette date. Malgré leur importance qualitative et quantitative, elles restent partielles à l'échelle de l'ensemble du remplissage de l'abri-grotte. Par conséquent, ce tableau n'a qu'une valeur hypothétique.

| Stade isotopique | Dates isotopiques (Ka)* | Couloir | Abri | Aven |
|------------------|--|---|------|--|
| 5 | 125±7 ; 135±10 130+17/-14 128+13/-11 ⁽¹⁾ | Evolution vers une calcitisation prononcée de la brèche supérieure Formation du dôme stalagmitique | | |
| 6 | 140+11/-10; 163+52/-35 196±26; 184±21 239+25/-20; 155+10/-9 214+24/-19; 252+38/-28 240+35/-28; 198+19/-16 181+22/-18 ⁽²⁾ | Brèche supérieure : R1-R2-R3-R4 (côté nord, couloir); carotte A et B2-B3-B4-B5 (côté est, abri) | | |
| 7 | | Lacune sédimentaire Lessivages; Phosphatations; Calcitisations | | |
| 8 | 271±38 ⁽³⁾ | Sommet de la formation phosphatée : P3-P4-P5; N2-N3; M2-M3-M4 | | |
| 9 | | Lacune sédimentaire Phosphatation (concrétionnement) puis Calcitisation (concrétionnement) Lessivage des fines en amont et accumulation en aval (au niveau de l'aven) | | Dépôts de la matrice+ phosphatation |
| 10 | | Base de la formation phosphatée : P1-P2; N1; M1 | | Accumul des cailloux |
| ? | | Discordance et lacune sédimentaire Formation fluviatile | | |

Tabl. 13- Remplissage de la Baume-Bonne : Historique et hypothèse chronologique.

* GAGNEPAIN *et al.*, 1996. Type d'échantillons datés : ⁽¹⁾ Calcite. ⁽²⁾ Ossements. ⁽³⁾ Silex brûlé.

VI. CONCLUSION

Ce travail a rejoint les propositions paléoenvironnementales et paléoclimatiques avancées, pour la mise en place et l'évolution du remplissage de la Baume-Bonne, par les études antérieures. Cependant, la mise en oeuvre de l'analyse microscopique couplée aux analyses minéralogiques a permis d'enrichir les caractérisations des sédiments et de nuancer les conclusions antérieures.

Malgré l'importance des données acquises, ce travail reste partiel à l'échelle de l'ensemble du remplissage de l'abri-grotte du fait de l'absence de l'étude des dépôts de la salle (grotte proprement dite) dont sont issus ceux du couloir et de l'abri. Il n'est donc qu'une contribution à l'étude de la mise en place et de l'évolution du remplissage de la Baume-Bonne.

BIBLIOGRAPHIE

- AXELROD J.M., CARRON M.K., MILTON C. & THAYER T.P. (1952)** - Phosphate mineralization at Bomi-Hill and Bambuta, Liberia, West Africa. *American Miner.*, Vol. 37, N° 11-12, p. 883-909.
- BADDIEL C.B. & BERRY E.E. (1966)** - Spectra structure correlations in hydroxy and fluorapatite. *Spectrochem. Acta*, Vol. 22, p. 1407-1416.
- BARRAL L. & SIMONE S. (1976)** - Le Pléistocène moyen à la grotte d'Aldène (Cesseras, Hérault). *IX^e Congrès de l'UISPP*, Nice 1976, Livret-guide de l'excursion C2, H. de LUMLEY (Dir.), p. 255-266.
- BARROUG A., REY C., TROMBE J.C. & MONTEL G. (1981)** - Sur la préparation en milieu aqueux d'une apatite carbonatée de type AB. comparable à l'émail dentaire. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 292, série II, p. 303-306.
- BATURIN G.N. (1972)** - Marine geology. Phosphorus in interstitial waters of sediments of the southeastern Atlantic. *Oceanology, Acad. Sc. U.S.S.R., U.S.A.*, 12, n° 6, p. 849-855.
- BERTRAN P. (1989)** - Evolution de la couverture superficielle dans le sud de la France depuis le dernier interglaciaire. *Etude micromorphologique de quelques profils types*. Thèse Univer. Bordeaux I, 210 p.
- BERTRAN P. & TEXIER J.P. (1990)** - L'enregistrement des phénomènes pédosédimentaires et climatiques dans les dépôts colluviaux d'Aquitaine : l'exemple de la coupe des Tares (Dordogne). *Quaternaire*, 1, p. 77-90.
- BIGI A., FORESTI E., GREGORINI R., RIPAMONTI A., NOVERI N. & SHAH J.S. (1992)** - The role of magnesium on the structure of biological apatites. *Calcif Tissue Int.*, 50, p. 439-444.
- BILLAUD Y. (1982)** - Les paragenèses phosphatées du paléokarst des phosphorites du Quercy. Thèse de 3^{ème} cycle, Univers. Claude-Bernard Lyon 1, 135 p.
- BLANCHARD F.N. (1972)** - Physical and chemical data for crandallite from Alachua Country, Florida. *Amer. Miner.*, Vol. 57, p. 473-484.
- BLOUNT A.M. (1974)** - The crystal structure of crandallite. *Amer. Miner.*, Vol. 59, p. 41-47.
- + **BOUAJAJA M. (1992)** - Les industries lithiques du Paléolithique inférieur du remplissage Pléistocène moyen de la Baume-Bonne, Quinson, Alpes de Haute-Provence. Thèse du MNHN, Paris, 237 p.
- BOULET R. (1974)** - Toposéquences des sols tropicaux en Haute-Volta : équilibres dynamiques et bioclimats. Thèse Sc. Strasbourg, multigr., 330 p.
- BROPHY G.P. & NASH J.T. (1968)** - Compositional, infrared, and X-ray analysis of fossil bone. *American Miner.*, Vol. 53, p. 445-454.
- CLAUZON G. (1996)** - Limites de séquences et évolution géodynamique. *Géomorphologie : Relief, processus, environnement*, n° 1, p. 3-22.
- COOK P.J. (1970)** - Repeated diagenetic calcitization, phosphatisation, and silicification in the Phosphoria Formation. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, Vol. 81, p. 2107-2116.
- DUCHAUFOR Ph. (1977)** - *Pédologie. Vol. 1 : Pédogenèse et classification*. Ed. Masson, 477 p.

- EL FALEH EI M. (1988) - *Les mécanismes de synthèse de l'apatite par activité microbienne; rôle et comportement de quelques éléments minéraux : application aux phosphates sédimentaires.* Thèse Géol.-Géochim., Univer. Strasbourg I, 230 p.
- X EL HAMMOUTI K. (1995) - *Les assemblages minéralogiques de la fraction argileuses des sédiments de la Baume-Bonne, Quinson, Alpes-de-Haute-Provence. Evolution géochimique et signification géodynamique et paléoclimatique.* Thèse du MNHN, Paris, 209 p.
- EVANS L.A., MACEY D.J. & WEBB J. (1992) - Calcium biomineralization in the radular teeth of the Chiton, *Acanthopleura hirtosa*. *Calcif Tissue Int.*, 51, p. 78-82.
- * FALGUÈRES C., LAURENT M., AJAJA O., BAHAIN J.-J., YOKOYAMA Y. & HONG M.-Y. (1991) - Datation par les méthodes U-Th et ESR de la grotte de la Baume-Bonne (Alpes de Haute-Provence). *Acte du XII^{ème} Congrès de l'U.S.P.P.*, Bratislava, Tchécoslovaquie.
- FEDOROFF N., DE KIMPE C.R., PAGE F. & BOUREAU G. (1981) - Essai d'interprétation des transferts sous forme figurée dans les podzols du Québec méridional à partir de l'étude micromorphologique des profils. *Geoderma*, 26, p. 25-45.
- FEDOROVA N.N. & YARILOVA E.A. (1972) - Morphology and genesis of prolonged seasonally frozen soils in Western Siberia. *Geoderma*, 7, p. 1-13.
- FLICOTEAUX R. (1980) - Genèse des phosphates alumineux du Sénégal occidental. Etapes et guide de l'altération. *Mém. Sc. Géol.*, 67, 229 p.
- FLICOTEAUX R. & LUCAS J. (1984) - Weathering of Phosphate Minerals. in J.O. NRIAGU and P.B. MOORE (Eds.) : *Phosphate Minerals*, Springer-Verlag, p. 292-317.
- FOX C.A. & PROTZ R. (1984) - Definition of fabric distributions to characterize the rearrangement of soil particles in the turbic cryosols. *Can. J. Soil Sc.*, Vol. 61, p. 35-46.
- FRÖHLICH F. (1981) - Les silicates dans l'environnement pélagique de l'océan Indien au Cénozoïque. *Mém. M.N.H.N.*, série C, Sciences de la Terre, t. XLVI, Paris, 206 p.
- FRÖHLICH F. (1989) - Deep-sea biogenic silica : new structural and analytical data from infrared analysis - geological implications. *Terra nova*, 1, p. 267-273.
- FRÖHLICH F. (1993) - Principes de la détermination et de la quantification par spectroscopie IR des minéraux en mélanges naturels. Applications minéralogiques et géologiques. *Journée d'étude du 15 décembre 1993*, Publ. MNHN-ORSTOM, p. 3-7.
- GAGNEPAIN J., GAILLARD C., ABASSI M., AJAJA O., BAHAIN J.-J., BOUAJAJA M., EL HAMMOUTI K., FALGUÈRES C., HONG M.-Y., LAURENT M., MECKURIA B., MESTOUR B., PATOU-MATHIS M. & PERRENOUD C. (1996) - Synthèse chronostratigraphique et culturelle du site de la Baume-Bonne à Quinson (Alpes-de-Haute-Provence, France). *XIII Cong. Intern. De l'U.I.S.P.P., Forli (Italie)*, Section 5, résumé dans 'Abstracts 1'. p. 154.
- GARLAND A. N. (1989) - Microscopical analysis of fossil bone. *Applied Geochemistry*, Vol. 4, p. 215-229.
- GIRESE P. & VAN VLIET-LANOË B. (1986) - Phosphatic mineralization. in CALLOW P. & CORNFORD J.M. (Eds.) : "La Cotte Saint-Brelade, 1961-1978 excavation", *Geobooks*, p.97.

- GOLDBERG P.S. & NATHAN Y. (1975) - The phosphate mineralogy of et-Tabun cave, Mount Carmel, Israel. *Miner. Mag.*, Vol. 40, p. 253-258.
- X GUILLORÉ P. (1985) - Méthode de fabrication mécanique et en série des lames minces. *Doc. Ronéot.*, I.N.A. P.G., Départ. des sols, 22 p.
- HAESAERTS P. & VAN VLIET-LANOË B. (1973) - Evolution d'un permafrost fossile dans les limons du dernier glaciaire à Harmignies (Belgique). *Bull. AFEQ*, 3, p. 151-164.
- HASEMAN J.F., LEHR J.R. & SMITH J.P. (1950) - Mineralogical character of some iron and aluminium phosphates containing potassium and ammonium. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.*, Vol. 15, p. 76-84.
- HOFFERT M., LUMLEY H. de, MISKOVSKY J.-C. & RENAULT-MISKOVSKY J. (1973) - Variations climatiques mises en évidence dans les dépôts anciens de la grotte de la Calmette (Dions, Gard). *Bull. A.F.E.Q.*, 3, p. 179-192.
- HOLCOMB D.W. & YOUNG R.A. (1980) - Thermal decomposition of human tooth enamel. *Calcif Tissue Int.*, 31, p. 189-201.
- X HONG M.-Y. (1993) - *Le Paléolithique inférieur de l'abri de la Baume-Bonne (Quinson, Alpes-de-Hautes-Provence). Etude technologique et typologique de l'industrie lithique.* Thèse du MNHN, Paris, 316 p.
- ICOLE M., PERINET G. & LAFONT R. (1981) - Influences biochimiques dans les paragenèses secondaires du remplissage de la Caune de l'Arago à Tautavel. *Colloque International du CNRS (Prétirage)* : "Datations absolues et analyses isotopiques en préhistoire : Méthodes et limites. Datation du remplissage de la Caune de l'Arago à Tautavel", H. de LUMLEY et J. LABEYRIE (Dir.), p. 107-113.
- JONGEBLOED W.L., VAN DEN BERG P.J. & ARENDS J. (1974) - The dissolution of single crystals of hydroxyapatite in citric and lactic acids. *Calc. Tiss. Res.*, 15, p. 1-9.
- KONHAUSER K.O., FYFE W.S., SCHULTZE-LAM S., FERRIS F.G. & BEVERIDGE T.J. (1994) - Iron phosphate precipitation by epilithic microbial biofilms in Arctic Canada. *Can. J. Earth Sci.*, Vol. 31, n° 8, p. 1320-1324.
- LEGEROS R.Z., TRAUTZ O.R., LEGEROS J.P. & KLEIN E. (1968) - Carbonate substitution in apatite structure. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, p. 1712-1718.
- LEGEROS R.Z., LEGEROS J.P., TRAUTZ O.R. & SHIRRA W.P. (1971) - Conversion of monetite, CaHPO₄, to apatites : Effet of carbonate in the cristallinity and morphology of the apatite crystallites. *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 14, p. 57-66.
- LEGEROS R.Z., BONEL G. & LEGROS R. (1978) - Type of "H₂O" in human enamel and in precipitated apatites. *Calc. Tiss. Res.*, 26, p. 111-118.
- LEGEROS R.Z. & LEGEROS J.P. (1984) - Phosphate Minerals in Human Tissues. in J.O. NRIAGU and P.B. MOORE (Eds.) : *Phosphate Minerals*, Springer-Verlag, p. 351-385.
- LUCAS J. & PRÉVÔT L. (1984) - Synthèse de l'apatite par voie bactérienne à partir de matière organique phosphatée et de divers carbonates de calcium dans des eaux douces et marine naturelles. *Chem. Geol.*, 42, p. 101-118.
- X LUMLEY H. de & BOTTET B. (1960) - Sur l'évolution des climats et des industries au Riss et au Würm d'après le remplissage de la Baume-Bonne (Quinson, Basses Alpes). *Festschrift für Lothar Zoltz, Steinzeitfragen der Alten und Neuren Welt*, Bonn, p. 271-301.

- LUMLEY-WOODYEAR H. de (1969) - Le Paléolithique inférieur et moyen du Midi méditerranéen dans son cadre géologique. *Vème Suppl. à Gallia-Préhistoire*, t. I, Ligurie-Provence, 463 p.
- X LUMLEY H. de (1976) - Baume-Bonne (Quinson, Alpes de Haute-Provence). *IXe Congrès de l'UISPP*, Nice 1976, Livret-guide de l'excursion C2, H. de LUMLEY (Dir.), p. 29-38.
- LUMLEY H. de, PARK Y.-H., CAMARA A., GELEIJNSE V., BEINER M., FOURNIER A., MISKOVSKY J.-C., HOFFERT M. & SCHAAF O. (1981) - Caractéristiques sédimentologiques et minéralogiques du remplissage quaternaire de la Caune de l'Arago à Tautavel. Origine et mise en place des sédiments. *Colloque International du CNRS (Prétirage)* : "Datations absolues et analyses isotopiques en préhistoire : Méthodes et limites. Datation du remplissage de la Caune de l'Arago à Tautavel", H. de LUMLEY et J. LABEYRIE (Dir.), p. 43-73.
- MILLOT G., NAHON D., PAQUET H., RUELLAN A. & TARDY Y. (1977) - L'épigénie calcaire des roches silicatées dans les encrûtements carbonatés en pays subaride, Anti-Atlas, Maroc. *Sci. Géol., Bull.*, 30, 3, Strasbourg, 1977, p. 129-152.
- MISKOVSKY J.-C. (1974) - Le Quaternaire du Midi méditerranéen. Stratigraphie et paléoclimatologie d'après l'étude sédimentologique du remplissage de grottes et abris sous-roche (Ligurie, Provence, Bas-Languedoc, Roussillon, Catalogne). *Etudes Quaternaires*, n° 3, 331 p.
- MONTEL G. (1968) - Conceptions nouvelles sur la physico-chimie des phosphates de structure apatitique. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, p. 1693-1700.
- NAHON D. (1976) - Cuirasses ferrugineuses et encrûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : géochimie, structures, relais et coexistence. *Sci. Géol., Mém.*, 244, 232 p.
- NAHON D. (1991) - Introduction to the petrology of soils and chemical weathering. *A Wiley Interscience Publication, John Wiley and Sons Inc.*, 313 p.
- NELSON D.G.A. & FEATHERSTONE J.D.B. (1982) - Preparation, analysis, and characterization of carbonated apatites. *Calc. Tiss. Int.*, 34, p. S69-S81.
- NRIAGU J.O. (1976) - Phosphate-Clay mineral relations in soils and sediments. *Canad. J. Earth Sc.*, Vol. 13, N° 6, p. 717-736.
- OKAZAKI M. (1983) - F-CO₃²⁻ interaction in IR spectra of fluoridated CO₃-apatites. *Calc. Tiss. Int.*, 35, p. 78-81.
- PALACHE C., BERMAN H. & FRONDEL C. (1951) - The system of mineralogy. JOHN WILEY (Ed.), N.-Y., Vol. 2, 1124 p.
- PANCZER G. (1990) - *Minéralogie et géochimie de l'altération des phosphorites nodulaires du Neguev, à la discordance Mishash-Ghareb (Israël)*. Thèse de Doct., Univer. Louis-Pasteur, Strasbourg, 193 p.
- PÉNAUD P. (1978) - *La paragenèse phosphatée de la grotte de la Caune de l'Arago (Pyrénées Orientales)*. Thèse de 3^{ème} cycle, Univer. Paris VII, 162 p.
- + PERRENOUD C. (1993) - *Origine et mise en place des paragenèses phosphatées de remplissages karstiques quaternaires. Etude micromorphologique des sédiments de la Caune de l'Arago (Tautavel, Pyrénées-Orientales) et de la Baume-Bonne (Quinson, Alpes-de-Haute-Provence)*. Thèse du MNHN, Paris, 181 p.

- PISSART A. (1970) - Les phénomènes physiques essentiels liés au gel, les structures périglaciaires qui en résultent et leur signification climatique. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, t. 93, fasc. 1, p. 7-49.
- POSNER A.S., BLUMENTHAL N.C. & BETTS F. (1984) - Chemistry and structure of precipitated hydroxyapatites. in J.O. NRIAGU and P.B. MOORE (Eds) : *Phosphate Minerals*, Springer-Verlag, p. 330-350.
- RAE A., HEDGES R. E. M. & IVANOVICH M. (1989) - Further studies for uranium-series dating of fossil bone. *Applied Geochem.*, Vol. 4, N° 3, p. 331-337.
- REY C., COLLINS B., GOEHL T., DICKSON I.R. & GLIMCHER M.J. (1989) - The carbonate environment in bone mineral. A resolution-enhanced Fourier transform infrared spectroscopy study. *Calc. Tiss. Int.*, 45, p. 157-164.
- REY C., RENUGOPALAKRISHNAN V., COLLINS B., & GLIMCHER M.J. (1991) - Fourier transform infrared spectroscopic study on the carbonate ions in bone mineral during aging. *Calc. Tiss. Int.*, 49, p. 251-258.
- ROMANS J.C., ROBERTSON L. & DENT D.L. (1980) - The micromorphology of young soils from South-East Iceland. *Geogr. Ann.*, 1-2, p. 93-104.
- ROSS S.D. (1974) - Phosphates and other oxy-anion of group V. In : *The Infrared spectra of minerals*, Farmer V.C. (ed.), Mineralogical Society, Monograph 4, p. 383-422.
- ROUX P. (1982) - *Contribution à l'étude du comportement et de la synthèse des apatites carbonatées sous haute pression*. Thèse Doct. d'Etat, Chimie des solides, I.N.P., Toulouse, 166 p.
- SIMMONS G.C. (1964) - Leucophosphite, a new occurrence in the Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil. *American Miner.*, Vol. 49, p. 377-386.
- SLANSKY M. (1980) - Géologie des phosphates sédimentaires. *Mém. BRGM*, n° 114, 92 p.
- SMITH J.P. & LEHR J.R. (1966) - An X-ray investigation of carbonate apatite. *J. Agric. Food Chem.*, 14, p. 342-349.
- + SUKENDARMO J. (1989) - *Les dépôts continentaux plio-pléistocènes du plateau de Riez-Valensole, autour de Puimasson (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. Thèse du M.N.H.N., Paris, 192 p.
- TERMINE J.D. & LUNDY D.R. (1973) - Hydroxide and carbonate in rate bone mineral and its synthetic analogues. *Calc. Tiss. Res.*, 13, p. 73-82.
- VAN VLIET-LANOË B. (1976) - Traces de ségrégation de glace en lentilles associées aux sols et phénomènes périglaciaires fossiles. *Biul. Peryglac.*, N° 26, p. 41-55, 2 Pl. Pho.
- VAN VLIET-LANOË B. (1985) - Frost effects in soils. in BOARDMAN (Ed.), *Soils and Quaternary Landscape Evolution*, p. 117-118.
- VAN VLIET-LANOË B. (1986) - Micromorphology. in CALLOW P. & CORNFORD J.M. (Eds.) : *"La Cotte Saint-Brelade, 1961-1978 excavation"*, *Geobooks*, p.91-96.
- VAN VLIET-LANOË B. & LANGOHR R. (1981) - Correlation between fragipan and permafrost with special reference to Weichsel silty deposits in Belgium and Northern France. *Catena*, 8, p. 137-154.
- VAN VLIET-LANOË B., DUMONT J.L. & VERRECCHIA E. (1990) - Précipitations cryogéniques de carbonates de calcium : Mythe ou réalité. *Bull. Centre Géomorpho.*, 38, CNRS de Caen, Travaux du Groupe Seine n° 5, p. 55-65.

- VIEILLARD P. (1978)** - Géochimie des phosphates. Etude thermodynamique. Application à la genèse et à l'altération des apatites. *Mém. Sc. Géol.*, 51, 181 p.
- VIGNOLES M., BONEL G., HOLCOMB D.W. & YOUNG R.A. (1988)** - Influence of preparation conditions on the composition of type B carbonated hydroxyapatite and on the localization of the carbonate ions. *Calc. Tiss. Int.*, 43, p. 33-40.
- VIGNOLES-MONTREJAUD M. (1984)** - Contribution à l'étude des apatites carbonatées de type B. Thèse Doct. d'Etat, Physico-chimie des solides, I.N.P., Toulouse, 285 p.
- VOGT T., (1987)** - Quelques microstructures de croûtes calcaires quaternaires d'Afrique du Nord. *A.F.E.S.*, VII^e Réunion Intern. Micromorphologie des Sols (1985), p. 563-568.
- VOGT T., (1989)** - Croûte calcaire d'origine cryogénique. *Z. Geomorph. N.F.*, Supp. 75, Berlin-Stuttgart, p. 115-135.
- WHITE W.B. (1974)** - The carbonate minerals. In : *The Infrared spectra of minerals*, Farmer V.C. (ed.), Mineralogical Society, Monograph 4, p. 227-285.
- WINAND L. (1968)** - Etude physico-chimique de diverses carbonatapatites. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, p. 1718-1721.
- YOUNG R.A. & HOLCOMB D.W. (1982)** - Variability of hydroxyapatite preparations. *Calc. Tiss. Int.*, 34, p. S17-S32.

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| Tabl. 1- Synthèse stratigraphique du remplissage (LUMLEY de & Coll., 1993; inédit)..... | 16 |
| Tabl. 2- Principales substitutions de l'hydroxyapatite (LEGEROS <i>et al.</i> , 1984). | 48 |
| Tabl. 3- Données de la diffraction X de l'apatite de la Baume-Bonne..... | 53 |
| Tabl. 4- Paramètres cristallographiques de l'apatite de la Baume-Bonne. | 55 |
| Tabl. 5- Composition élémentaire moyenne de l'apatite de la Baume-Bonne..... | 60 |
| Tabl. 6- Crandallite de la Baume-Bonne. Résultats de la diffractométrie X..... | 64 |
| Tabl. 7- Paramètres cristallographiques de la crandallite de la Baume-Bonne. | 64 |
| Tabl. 8- Composition chimique de la crandallite de la Baume-Bonne..... | 67 |
| Tabl. 9- Caractères chimiques et cristallographiques de la crandallite..... | 67 |
| Tabl. 10- Analyse par diffraction X de la leucophosphite de la Baume-Bonne. | 70 |
| Tabl. 11- Résultats de l'analyse à la sonde de la leucophosphite..... | 71 |
| Tabl. 12- Résultats des analyses ponctuelles des ossements et des produits de dissolution. | 74 |
| Tabl. 13- Remplissage de la Baume-Bonne : Historique et hypothèse chronologique..... | 224 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|-------|
| Fig. 1- Plan de l'abri-grotte de la Baume-Bonne et situation des carottes étudiées. | 5 |
| Fig. 2- Localisation géographique de la Baume-Bonne..... | 8 |
| Fig. 3a- Cadre géologique de la Baume-Bonne. | 9 |
| Fig. 3b- Coupe transversale du Cañon du Verdon (LUMLEY de, 1969). | 9 |
| Fig. 4- Coupe longitudinale 3a0 (carotte P). | 21 |
| Fig. 5- Coupe longitudinale 2c50 (carotte N). | 23 |
| Fig. 6- Coupe longitudinale 2a40 (carotte M). | 24 |
| Fig. 7- Coupe transversale Oa0 et coupe longitudinale 3c0..... | 26 |
| Fig. 8- Coupe transversale Na0 (carotte G)..... | 28 |
| Fig. 9- Influence de l'attaque acide (HCl) et de la chauffe sur l'apatite et sur la crandallite. | 32 |
| Fig. 10- Dépôts carbonatés : Log stratigraphique et localisation des prélèvements..... | 34 |
| Fig. 11- Dépôts phosphatés : Log stratigraphique et localisation des prélèvements..... | 35 |
| Fig. 12- Minéralogie globale. Exemples de diffractogrammes X. | 39-40 |
| Fig. 13- Répartition spatiale des principales phases minéralogiques. | 41-42 |
| Fig. 14- Schéma représentant la carapace apatitique du substratum..... | 45 |
| Fig. 15- Structure comparée des apatites (POSNER <i>et al.</i> , 1984)..... | 49 |
| Fig. 16- Maille élémentaire du réseau de l'apatite (SLANSKY, 1980). | 49 |
| Fig. 17- Exemples de diffractogrammes R.X de l'apatite. | 51-52 |
| Fig. 18- Spectres infrarouges des principaux types morphologiques de l'apatite. | 57 |
| Fig. 19- Exemples de diffractogrammes X de la crandallite. | 65 |
| Fig. 20- Spectre infrarouge de la crandallite de la Baume-Bonne..... | 66 |
| Fig. 21- Diffractogramme X de la leucophosphite. | 70 |
| Fig. 22- Spectre I.R. de la leucophosphite..... | 71 |
| Fig. 23- Comparaison des rapports F/P et Ca/P des os et de leurs produits de dissolution..... | 75 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 24- Analyse par spectrométrie infrarouge de la carapace sur le substratum calcaire. | 77 |
| Fig. 25a- Diagramme ternaire : Apparition de l'apatite au sein du matériel alumino-silicaté. | 79 |
| Fig. 25b- Analyse bivariée Ca-P, droite et coefficient de corrélation et rapport Ca/P. | 79 |
| Fig. 26- Solubilité de l'apatite, calcite et quartz en fonction du pH (COOK, 1970) | 80 |
| Fig. 27- Diagrammes X de la crandallite en ciment cryptocristallin et minéraux associés. | 84 |
| Fig. 28- Diagrammes X des concrétions dures brun-chocolat et du sédiment associé. | 84 |
| Fig. 29- Schéma, à partir d'une lame mince, de la carapace phosphatée sur substratum. | 85 |
| Fig. 30- Carapace phosphatée sur substratum calcaire : Analyses par diffraction X. | 87 |
| Fig. 31- Nodules blanc-jaunâtre : Analyses par diffraction X. | 89 |
| Fig. 32- Schéma montrant les mécanismes de la nodulation (NAHON, 1991). | 90 |
| Fig. 33a- Diagramme ternaire : Apparition de la crandallite à partir de l'apatite. | 92 |
| Fig. 33b- Crandallite : Analyses bivariées, droites et coefficients de corrélation. | 92 |
| Fig. 34- Carotte M, Analyse par diffraction X : Apparition de la leucophosphite. | 94 |
| Fig. 35a- Diagramme ternaire : Apparition de la leucophosphite. | 96 |
| Fig. 35b- Leucophosphite : Analyses bivariées, droites et coefficients de corrélation. | 96 |
| Fig. 36- Schéma global de l'origine et de la mise en place de la paragenèse phosphatée. | 102 |
| Fig. 37- Différentes formes et de la distribution du carbonate de calcium | 105 |
| Fig. 38- Répartition des cailloutis calcaires dans les formations de l'aven. | 106 |
| Fig. 39- Les différentes étapes de l'individualisation des nodules calcitiques. | 113 |
| Fig. 40- Comparaison de la structure et de la texture des nodules calcitiques. | 117 |
| Fig. 41- Niveau P1a : Organisation macroscopique. | 130 |
| Fig. 42 - Niveau P1a : Organisation microscopique. | 131 |
| Fig. 43- Niveau P1b base : Organisation macroscopique | 134 |
| Fig. 44- Niveau P1b sommet : Organisation macroscopique. | 134 |
| Fig. 45- Niveau P1b base : Organisation microscopique. | 135 |
| Fig. 46- Niveau P1b moyen : Organisation microscopique. | 136 |
| Fig. 47- Niveau P1b sommet : Organisation microscopique. | 138 |
| Fig. 48- Niveau P1b : Exemples de traits texturaux. | 140 |
| Fig. 49- Niveau P2a : Organisation macroscopique | 145 |
| Fig. 50- Niveau P2a : Organisation microscopique. | 146 |
| Fig. 51- Niveau P2a : Exemples de ségrégations texturales. | 148 |
| Fig. 52- Niveau P3c : Organisation microscopique du pavage. | 155 |
| Fig. 53- Relation entre le niveau à ossements et l'encroûtement calcitique | 159 |
| Fig. 54- Organisation macroscopique du sommet des carottes O et N (complexe N3). | 170 |
| Fig. 55- Brèche supérieure : Coupes stratigraphiques étagées du nord vers le sud. | 189 |
| Fig. 56- Organisation macroscopique de la couche B4, relation avec la couche B3. | 193 |
| Fig. 57- Organisation microscopique de la couche B4, relation avec la couche B3. | 194 |
| Fig. 58- Coupe transversale au niveau de la zone M3a. | 205 |
| Fig. 59a- Coupe transversale au niveau de la zone K2d. | 206 |
| Fig. 59b- Coupe transversale au niveau de la bande Kb. | 208 |
| Fig. 59c- Coupe transversale au niveau de la bande Ka. | 209 |
| Fig. 60- Coupe longitudinale au niveau de la zone K. | 210 |
| Fig. 61- Ensemble phosphaté : corrélation proposée. | 212 |

LISTE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES

| | |
|---|-----|
| PLANCHE I- PRÉSENTATION DU SITE. | 36 |
| <u>PARAGENÈSE PHOSPHATÉE</u> | |
| PLANCHE II- APATITE : TYPES MORPHOLOGIQUES | 62 |
| PLANCHE III- CRANDALLITE : TYPES MORPHOLOGIQUES | 68 |
| PLANCHE IV- LEUCOPHOSPHITE : TYPES MORPHOLOGIQUES | 72 |
| PLANCHE V- MISE EN PLACE DE L'APATITE | 82 |
| PLANCHE VI- MISE EN PLACE DE LA CRANDALLITE | 93 |
| <u>CALCITISATIONS</u> | |
| PLANCHE VII- DÉPÔTS CARBONATÉS | 120 |
| PLANCHE VIII- DÉPÔTS FLUVIATILES DE L'AVEN | 121 |
| PLANCHE IX- DÉPÔTS PHOSPHATÉS | 122 |
| <u>CARACTÈRES MICROSTRUCTURAUX</u> | |
| PLANCHE X- CAROTTE P. | 161 |
| PLANCHE XI- CAROTTE N | 174 |
| PLANCHE XII- CAROTTE M. | 181 |

| |
|--------------------|
| TABLE DES MATIÈRES |
|--------------------|

ABSTRACT
RÉSUMÉ
SOMMAIRE
AVANT-PROPOS

PREMIÈRE PARTIE
INTRODUCTION : DÉFINITIONS

| | |
|--|----|
| DÉFINITION DU SUJET..... | 1 |
| CADRE GÉNÉRAL DU SUJET | 4 |
| I. PRÉSENTATION DU SITE | 4 |
| I.1. Configuration du site..... | 4 |
| I.2. Situation géographique..... | 6 |
| I.3. Contexte géologique et géomorphologique..... | 6 |
| II. STRATIGRAPHIE : ÉTAT DES CONNAISSANCES | 11 |
| II.1. Origine et mise en place | 11 |
| II.1.1. Ensemble de sables moyens calibrés..... | 11 |
| II.1.2. Ensemble à alternance de sables grossiers et d'argiles plastiques rouges | 11 |
| II.1.3. Ensemble bariolé à industrie et à galets..... | 12 |
| II.1.3.1. Zone non décarbonatée..... | 12 |
| II.1.3.2. Zone décarbonatée | 12 |
| II.1.3.2.1. Sous-ensemble jaune-orangé | 12 |
| II.1.3.2.2. Sous-ensemble gris-verdâtre | 12 |
| II.1.3.2.3. Sous-ensemble brun violacé | 13 |
| II.1.3.2.4. Sous-ensemble jaune-verdâtre..... | 13 |
| II.1.3.2.5. Sous-ensemble gris-noir..... | 13 |
| II.1.3.2.6. Phosphatation | 14 |
| II.1.4. Couche d'argiles rouge-brun | 14 |
| II.1.5. Ensemble à petits éléments calcaires | 14 |
| II.1.6. Couche limono-argileuse rougeâtre..... | 14 |
| II.1.7. Ensemble à gros éléments calcaires..... | 15 |
| II.1.8. Plancher stalagmitique supérieur..... | 15 |
| II.2. Synthèse - Historique du remplissage | 15 |
| III. CONCLUSION : PROBLÈMES POSÉS | 17 |
| MÉTHODE ET TECHNIQUES..... | 18 |
| I. MÉTHODE | 18 |
| II. TECHNIQUES D'APPROCHE..... | 18 |
| II.1. Travaux de terrain..... | 18 |
| II.1.1. Présentation des principales coupes étudiées..... | 19 |
| II.1.1.1. Dépôts phosphatés..... | 20 |
| II.1.1.1.1. Coupe longitudinale 3a0, carotte P..... | 20 |
| II.1.1.1.2. Coupe longitudinale 2c50, carotte N..... | 22 |
| II.1.1.1.3. Coupe longitudinale 2a40, carotte M..... | 22 |
| II.1.1.2. Dépôts carbonatés | 25 |
| II.1.1.2.1. Coupe transversale Oa0, carottes A, B et C..... | 25 |

| | |
|---|----|
| II.1.1.2.2. Coupe longitudinale 3c0, carotte R..... | 25 |
| II.1.1.3. Dépôt fluviatile..... | 27 |
| II.1.2. Stratégie et localisation des prélèvements..... | 29 |
| II.2. Travaux de laboratoire..... | 30 |
| II.2.1. Analyses microscopiques des lames minces..... | 30 |
| II.2.2. Analyses minéralogiques..... | 30 |
| II.2.2.1. Diffraction X..... | 30 |
| II.2.2.2. Spectrométrie infrarouge..... | 32 |
| II.2.3. Analyses chimiques ponctuelles..... | 33 |
| II.2.4. Techniques complémentaires..... | 33 |
| III. SYNTHÈSE..... | 34 |

DEUXIÈME PARTIE CARACTÈRES MINÉRALOGIQUES

| | |
|---|-----------|
| CHAPITRE I- PRINCIPALES PHASES MINÉRALOGIQUES..... | 37 |
| I. INTRODUCTION..... | 37 |
| II. CONTEXTE MINÉRALOGIQUE GLOBALE..... | 37 |
| III. DISTRIBUTION SPATIALE..... | 41 |
| IV. CONCLUSION..... | 43 |
| CHAPITRE II- LA PARAGENÈSE PHOSPHATÉE..... | 44 |
| I. L'APATITE..... | 44 |
| I.1. Types morphologiques et distribution..... | 44 |
| I.1.1. Apatite en relation avec un support calcaire..... | 44 |
| I.1.1.1. Apatite du substratum..... | 44 |
| I.1.1.2. Apatite des cailloutis calcaires..... | 44 |
| I.1.1.3. Apatite des tests calcaires..... | 45 |
| I.1.2. Apatite en relation avec un support silicaté..... | 45 |
| I.1.2.1. Ciment..... | 45 |
| I.1.2.2. Concrétions..... | 46 |
| I.1.2.3. Nodules..... | 46 |
| I.1.3. Apatite en relation avec la porosité..... | 46 |
| I.1.4. Les apatites détritiques ou remaniées..... | 46 |
| I.2. Caractères cristallographiques..... | 47 |
| I.2.1. Introduction : définition de l'apatite..... | 47 |
| I.2.1.1. Structure..... | 47 |
| I.2.1.2. Principales substitutions..... | 48 |
| I.2.2. Caractérisation par diffractométrie X..... | 50 |
| I.2.2.1. Analyse des diagrammes..... | 50 |
| I.2.2.2. Paramètres cristallographiques..... | 54 |
| I.2.3. Caractérisation par spectrométrie infrarouge..... | 55 |
| I.2.4. Analyses chimiques ponctuelles..... | 59 |
| I.3. Conclusion..... | 61 |
| II. LA CRANDALLITE..... | 63 |
| II.1. Introduction..... | 63 |
| II.2. Types morphologiques et distribution..... | 63 |
| II.3. Données de la diffraction X et de l'infrarouge..... | 64 |
| II.4. Données de la microsonde..... | 66 |

| | |
|--|------------|
| II.5. Conclusion..... | 67 |
| III. LA LEUCOPHOSPHITE..... | 69 |
| III.1. Données analytiques..... | 69 |
| III.2. Conclusion..... | 69 |
| IV. MISE EN PLACE DE LA PARAGENÈSE PHOSPHATÉE..... | 73 |
| IV.1. Mise en place de l'apatite..... | 73 |
| IV.1.1. Apatite en présence des restes osseux..... | 73 |
| IV.1.1.1. Observations microscopiques..... | 73 |
| IV.1.1.2. Analyses ponctuelles..... | 74 |
| IV.1.1.3. Conclusion..... | 75 |
| IV.1.2. Apatite en l'absence des restes osseux..... | 76 |
| IV.1.2.1. Observations microscopiques..... | 76 |
| IV.1.2.2. Analyses ponctuelles..... | 78 |
| IV.1.2.3. Conclusion..... | 80 |
| IV.1.3. Conclusion sur la mise en place de l'apatite..... | 81 |
| IV.2. Mise en place de la crandallite..... | 83 |
| IV.2.1. Distribution spatiale..... | 83 |
| IV.2.2. Analyses minéralogiques..... | 83 |
| IV.2.2.1. Ciment..... | 83 |
| IV.2.2.2. Concrétions dures brun-chocolat..... | 85 |
| IV.2.2.3. Carapace sur substratum..... | 85 |
| IV.2.2.4. Les nodules..... | 87 |
| IV.2.2.4.1. Descriptions et minéralogie..... | 87 |
| IV.2.2.4.2. Discussion des mécanismes de formation..... | 89 |
| IV.2.3. Analyses chimiques ponctuelles..... | 91 |
| IV.2.4. Conclusion..... | 91 |
| IV.3. Mise en place de la leucophosphite..... | 94 |
| IV.3.1. Observations microscopiques et minéralogiques..... | 94 |
| IV.3.2. Données de la microsonde..... | 94 |
| IV.3.3. Conclusion..... | 95 |
| V. ORIGINE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES..... | 97 |
| V.1. Origine du phosphore..... | 97 |
| V.1.1. Origine externe à l'abri-grotte..... | 97 |
| V.1.2. Origine interne au karst..... | 97 |
| V.1.2.1. L'encaissant..... | 97 |
| V.1.2.2. Guano..... | 98 |
| V.1.2.3. Restes osseux..... | 99 |
| V.1.3. Conclusion..... | 99 |
| V.2. Origine du calcium..... | 99 |
| V.3. Origine de l'aluminium..... | 100 |
| V.4. Origine du fer..... | 100 |
| V.5. Origine du potassium..... | 100 |
| VI. SYNTHÈSE..... | 101 |
| VII. CONCLUSION..... | 104 |
| CHAPITRE III- CALCAIRE ET CALCITISATION..... | 105 |
| I. CALCAIRE DÉTRITIQUE..... | 105 |
| I.1. Cailloutis..... | 105 |
| I.1.1. Les dépôts de l'aven..... | 106 |
| I.1.2. Les dépôts carbonatés..... | 107 |

| | |
|---|-----|
| I.1.3. Les dépôts phosphatés..... | 107 |
| I.2. Fragments de stalactites et de stalagmites..... | 108 |
| I.3. Autres formes..... | 108 |
| I.4. Conclusion..... | 108 |
| II. CALCITISATION SECONDAIRE..... | 109 |
| II.1. Morphologie et modalités de précipitation..... | 109 |
| II.1.1. Calcite des dépôts de l'aven..... | 109 |
| II.1.2. Calcite des dépôts phosphatés..... | 110 |
| II.1.2.1. Revêtements des vides..... | 111 |
| II.1.2.2. Imprégnations de la masse basale..... | 112 |
| II.1.2.2.1. Morphologie..... | 112 |
| II.1.2.2.2. Modalités de précipitation..... | 112 |
| II.1.2.3. Croûte calcaire..... | 114 |
| II.1.3. Calcite des dépôts carbonatés..... | 114 |
| II.2. Discussion et conclusion..... | 115 |
| II.2.1. Mécanismes de précipitation..... | 115 |
| II.2.2. Environnement..... | 116 |
| II.2.3. Origine de la calcite..... | 118 |
| II.2.3.1. Au niveau de l'aven..... | 118 |
| II.2.3.2. Les dépôts phosphatés..... | 118 |
| II.2.3.3. Les dépôts carbonatés..... | 118 |
| II.2.4. Conclusion sur la calcitisation secondaire..... | 119 |
| III. CONCLUSION SUR LE CARBONATE DE CALCIUM..... | 119 |
| CHAPITRE IV- SYNTHÈSE MINÉRALOGIQUE..... | 123 |
| I. DÉPÔTS DE SABLE ET D'ARGILE..... | 123 |
| I.1. Caractérisation..... | 123 |
| I.2. Conclusion..... | 124 |
| II. DÉPÔT LIMONEUX A CAILLOUX..... | 124 |
| II.1. Caractérisation..... | 124 |
| II.2. Conclusion..... | 125 |
| III. DÉPÔTS PHOSPHATÉS..... | 125 |
| III.1. Observations..... | 125 |
| III.2. Conclusion..... | 126 |
| IV. DÉPÔTS CARBONATÉS..... | 127 |

TROISIÈME PARTIE CARACTÈRES MICROSTRUCTURAUX

| | |
|---|-----|
| INTRODUCTION..... | 128 |
| CHAPITRE I- LES DÉPÔTS PHOSPHATÉS..... | 129 |
| I. COUPE LONGITUDINALE 3a0 (CAROTTE P)..... | 129 |
| I.1. Couche P1..... | 129 |
| I.1.1. Niveau P1a..... | 129 |
| I.1.1.1. Description..... | 129 |
| I.1.1.2. Discussion..... | 133 |
| I.1.2. Niveau P1b..... | 133 |
| I.1.2.1. Description..... | 133 |
| I.1.2.2. Discussion..... | 141 |

| | |
|---|-----|
| I.1.3. Niveau P1c..... | 141 |
| I.1.3.1. Description..... | 141 |
| I.1.3.2. Conclusion..... | 142 |
| I.1.4. Conclusion sur la couche P1..... | 143 |
| I.2. Couche P2..... | 144 |
| I.2.1. Niveau P2a..... | 144 |
| I.2.2. Niveau P2b..... | 149 |
| I.2.3. Conclusion sur la couche P2..... | 150 |
| I.3. Couche P3..... | 151 |
| I.3.1. Niveau P3a..... | 152 |
| I.3.2. Niveau P3b..... | 153 |
| I.3.3. Niveau P3c..... | 154 |
| I.3.4. Discussion et conclusion sur la couche P3..... | 156 |
| I.4. Couche P4..... | 156 |
| I.4.1. Description..... | 156 |
| I.4.2. Discussion et conclusion..... | 157 |
| I.5. Couche P5..... | 158 |
| I.5.1. Description..... | 158 |
| I.5.2. Conclusion..... | 158 |
| I.6. Carotte P : Conclusion..... | 159 |
| II. COUPE LONGITUDINALE 2c50 (CAROTTE N)..... | 162 |
| II.1. Couche N1..... | 162 |
| II.1.1. Description..... | 162 |
| II.1.1.1. Niveau basale N1a..... | 162 |
| II.1.1.2. Niveau N1b..... | 163 |
| II.1.2. Discussion et conclusion..... | 164 |
| II.2. Couche N2..... | 165 |
| II.2.1. Description..... | 165 |
| II.2.2. Discussion et conclusion..... | 167 |
| II.3. Complexe N3..... | 167 |
| II.3.1. Descriptions..... | 168 |
| II.3.1.1. Description de N3..... | 168 |
| II.3.1.2. Description de la carotte O..... | 168 |
| II.3.2. Discussion et conclusion..... | 171 |
| II.3.2.1. Carotte O..... | 171 |
| II.3.2.2. Complexe N3..... | 172 |
| II.4. Carottes O et N : Conclusion..... | 173 |
| III. COUPE LONGITUDINALE 2a40 (CAROTTE M)..... | 175 |
| III.1. Carapace d'altération..... | 175 |
| III.2. Couche M1..... | 175 |
| III.2.1. Description..... | 175 |
| III.2.2. Discussion et conclusion..... | 176 |
| III.3. Couche M2..... | 176 |
| III.3.1. Description..... | 176 |
| III.3.2. Conclusion..... | 177 |
| III.4. Couche M3..... | 177 |
| III.4.1. Description..... | 177 |
| III.4.2. Conclusion..... | 178 |
| III.5. Couche M4..... | 178 |

| | |
|---|-----|
| III.5.1. Description | 178 |
| III.5.2. Conclusion | 179 |
| III.6. Couche M5 | 179 |
| III.6.1. Description | 179 |
| III.6.2. Conclusion | 179 |
| III.7. Carotte M : Conclusion | 180 |
| IV. LES DÉPÔTS PHOSPHATÉS : SYNTHÈSE | 182 |
| IV.1. Composition élémentaire et origine des sédiments | 182 |
| IV.2. Organisations et dynamique de mise en place | 184 |
| CHAPITRE II- LES DÉPÔTS CARBONATÉS : LES BRÈCHES | 186 |
| I. ENSEMBLE BRÉCHIQUE SUPÉRIEUR | 186 |
| I.1. Le long de la paroi nord | 186 |
| I.1.1. Carottes R, S et A | 186 |
| I.1.1.1. Couche R1 | 187 |
| I.1.1.2. Couche R2 | 187 |
| I.1.1.3. Couche R3 | 187 |
| I.1.1.4. Couche R4 | 188 |
| I.1.1.5. Conclusion | 188 |
| I.1.2. Carotte J | 188 |
| I.1.2.1. Description | 188 |
| I.1.2.2. Conclusion | 190 |
| I.2. La brèche de la partie est | 190 |
| I.2.1. Carotte B | 191 |
| I.2.1.1. Présentation | 191 |
| I.2.1.2. Description | 191 |
| I.2.1.3. Conclusion | 192 |
| I.2.2. Carotte C | 195 |
| II. ENSEMBLE BRÉCHIQUE INFÉRIEUR | 196 |
| II.1. Caractérisation | 196 |
| II.1.1. Cailloutis calcaires | 196 |
| II.1.2. La matrice | 198 |
| II.1.3. Le matériel archéologique | 198 |
| II.2. Conclusion | 199 |
| III. LES DÉPÔTS CARBONATÉS : SYNTHÈSE | 200 |

QUATRIÈME PARTIE DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION

| | |
|---|-----|
| I. INTRODUCTION | 201 |
| II. CARACTÉRISATION DES DÉPÔTS ET APPORTS ANTÉRIEURES | 202 |
| II.1. Présentation générale : Facteurs du remplissage | 202 |
| II.2. Caractérisation et répartition des ensembles | 205 |
| II.2.1. L'ensemble fluviatile | 205 |
| II.2.2. L'ensemble phosphaté | 206 |
| II.2.3. La brèche inférieure | 213 |
| II.2.4. La brèche supérieure | 213 |
| III. SIGNIFICATION DES TRAITS OBSERVÉS | 214 |
| III.1. Le remplissage | 214 |

| | |
|---|-----|
| III.2. Les microstructures | 214 |
| III.3. Les minéralisations | 216 |
| III.3.1. Phosphatation | 216 |
| III.3.2. Calcitisation | 217 |
| IV. IMPACTS SUR LES TÉMOINS ARCHÉOLOGIQUES | 219 |
| IV.1. Les restes osseux | 219 |
| IV.2. L'industrie lithique | 220 |
| IV.3. Autres témoins archéologiques | 221 |
| IV.4. Assemblage du matériel archéologique | 221 |
| V. HISTORIQUE DU REMPLISSAGE ET HYPOTHÈSE CHRONOLOGIQUE | 222 |
| VI. CONCLUSION | 225 |
| BIBLIOGRAPHIE | 226 |
| LISTE DES TABLEAUX | 232 |
| LISTE DES FIGURES | 232 |
| LISTE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES | 234 |