

Étude sédimentologique préliminaire au *Trou Al'Wesse* (Modave, Belgique)

Stéphane PIRSON

RÉSUMÉ

Le site du *Trou Al'Wesse* fait l'objet de nouvelles recherches depuis 1988. Aucune étude sédimentologique n'y avait été réalisée jusqu'ici. Le présent article s'attache à déterminer la nature, l'origine et le mode de mise en place des dépôts pléistocènes de la terrasse. Une interprétation paléoclimatique est proposée, débouchant sur le positionnement de la séquence étudiée dans l'échelle chronostratigraphique générale.

ABSTRACT

New excavations at the Trou Al'Wesse site have been made since 1988. No sedimentological study had been carried out so far. In this paper, we are purposing to determine the nature, origin and mechanism of deposition of the terrace pleistocene sediments. A palaeoclimatic interpretation is being proposed, with a view to positioning the analysed sequence on the general chronostratigraphic scale.

1. INTRODUCTION

La grotte du *Trou Al'Wesse* a été fouillée à plusieurs reprises dès la deuxième moitié du XIX^e siècle, notamment par Dupont ainsi que par Fraipont, Lohest et Braconnier (Otte, 1979; Collin & Haesaerts, 1988). Toutefois, nous ne possédons que très peu d'informations la concernant. Aucun rapport relatif à ces anciennes fouilles n'a été publié. En outre, le matériel mis au jour lors de ces recherches ne nous est parvenu que partiellement et de façon « extrêmement réduite » (Otte, 1979: 430; Ulrix-Closset, 1975: 100). Les rares publications qui mentionnent le *Trou Al'Wesse* laissent toutefois entrevoir l'importance du site (Dupont, 1873b; Fraipont & Braconnier, 1887; Fraipont, 1897). Ce contraste entre l'importance présumée du site et la carence en informations motivèrent de nouvelles recherches. C'est ainsi que depuis 1988, le service de préhistoire de l'Université de Liège, en collaboration avec l'A.S.B.L. « Les chercheurs de la Wallonie », effectue des fouilles au *Trou Al'Wesse* sous la responsabilité de Fernand Collin. Huit campagnes s'y sont ainsi succédé jusqu'en 1999, portant essentiellement sur un sondage ouvert dans la terrasse, parallèlement à l'axe de la grotte (Collin & Haesaerts, 1988; Collin, 1989; Collin *et al.*, 1994; Collin & Otte,

1995; Collin *et al.*, 1996; Pirson & Collin, 1997; Otte *et al.*, 1998).

L'étude présentée ici débuta fin 1996 dans le cadre d'un troisième cycle (D.E.A.) à l'Institut de Paléontologie humaine (I.P.H., Paris). À l'époque, les informations relatives à la géologie du site étaient assez sommaires. En effet, si la stratigraphie du *Trou Al'Wesse* était connue dans ses grandes lignes (Collin *et al.*, 1996), particulièrement pour les dépôts holocènes (Collin & Haesaerts, 1988), elle n'avait pas encore fait l'objet d'un levé détaillé systématique. De plus, aucune étude sédimentologique n'y avait été réalisée. Notre travail fut entrepris dans la perspective de préciser la stratigraphie du site et d'éclairer la nature, l'origine ainsi que le mode de mise en place des dépôts pléistocènes de la terrasse. Une seule coupe présentait la succession complète des niveaux pléistocènes. Celle-ci fut levée en détail dans le cadre du D.E.A. afin de servir de support aux prélèvements sédimentologiques. Nous sommes conscient que toute analyse de laboratoire doit, idéalement, être précédée d'une étude stratigraphique détaillée. Toutefois, les impératifs du D.E.A. nous ont conduit à donner la priorité au travail en laboratoire. C'est pour cette raison qu'une seule coupe fut étudiée.

Les conclusions stratigraphiques de cette étude ont récemment fait l'objet d'une communication (Pirson & Collin, 1997). L'étude sédimentologique préliminaire, qui fait l'objet du présent article, s'oriente quant à elle dans

quatre directions. D'abord, l'étude de la nature du sédiment, suivie de l'analyse du taux de carbonates; ensuite, l'étude granulométrique de la fraction inférieure à 2 mm; enfin, la morphoscopie des grains de quartz.

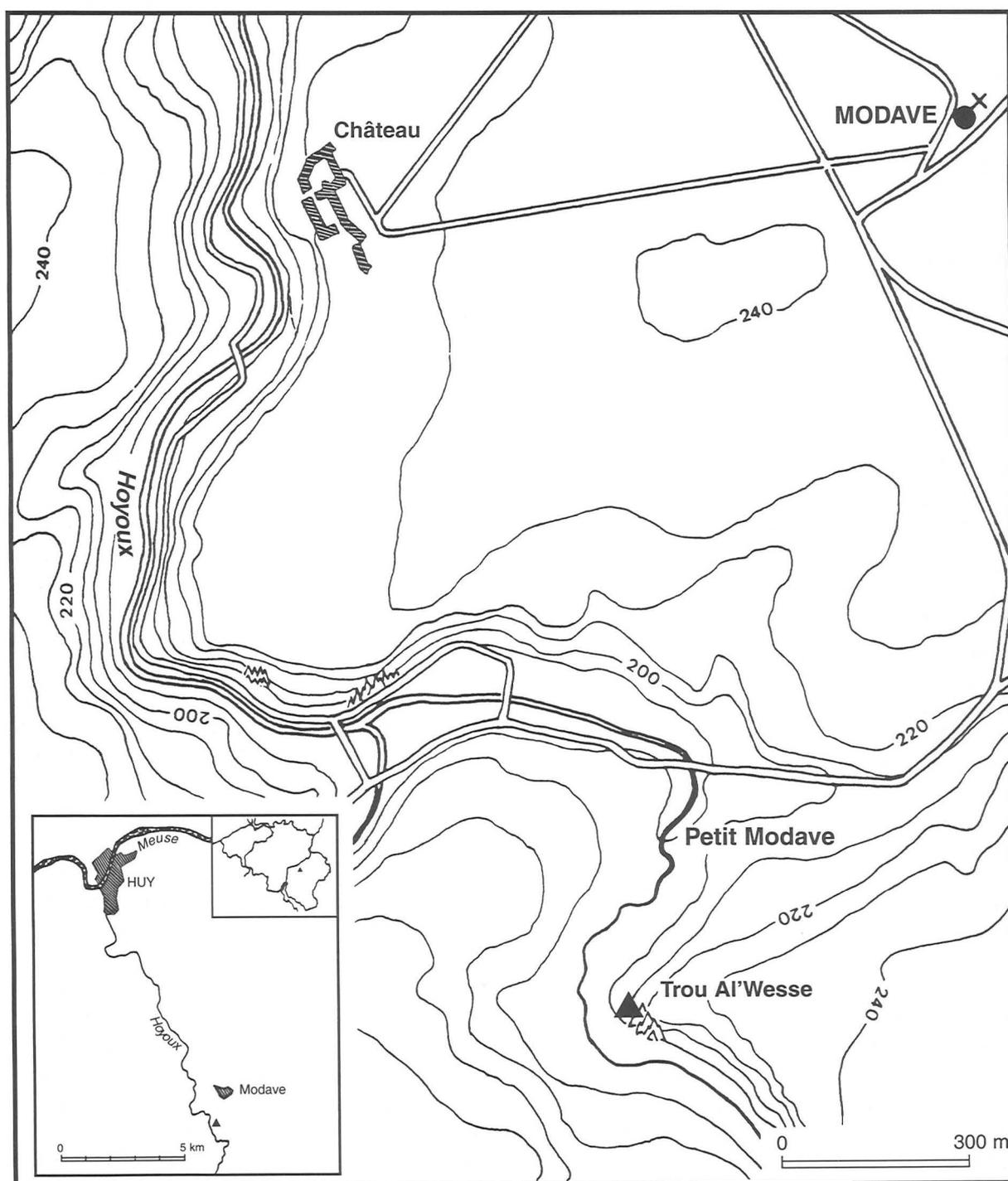


FIG. 1. – Situation du *Trou Al'Wesse*.
(D'après Ulix-Closset, 1975.)

2. PRÉSENTATION DU SITE

2.1. Situation géographique (fig. 1)

Le « *Trou Al'Wesse* », ou « *Trô al'Wesse* » (toponyme wallon signifiant *Trou à la guêpe*) se situe sur le territoire de la commune de Modave (province de Liège, Belgique), près de l'ancien hameau de « *Petit-Modave* », sur la rive droite du Hoyoux (affluent de la Meuse). La grotte et ses environs appartiennent aujourd'hui à la *Compagnie intercommunale bruxelloise des Eaux (C.I.B.E.)*.

2.2. Cadre géologique régional

La région du *Trou Al'Wesse* se situe au centre du synclinorium de Dinant et plus précisément dans le Condroz (fig. 2). Cette région présente une géologie particulière : l'alternance de synclinaux et d'anticlinaux montrant respectivement des calcaires d'âge tournaisien ou viséen et des psammites d'âge famennien (fig. 3). La géomorphologie du Condroz — un relief régulièrement ondulé — est directement héritée du substrat géologique et est liée à une érosion différentielle : les psammites, plus résistants, forment les crêtes (ou *tiges*) alors que les calcaires, sujets à l'érosion chimique, se rencontrent dans les dépressions (ou *chavées*). La direction sud-ouest nord-est des structures géologiques de cette région du Condroz s'est également imposée aux formes générales du relief.

On rencontre également, dans le Condroz, outre du Silésien au cœur de certains synclinaux, des placages d'âge tertiaire (fig. 3). La région fut en effet couverte par la mer oligocène. Après le retrait de celle-ci, le réseau hydrographique actuel s'esquissa. Le Hoyoux « devait faire partie [de ce] réseau hydrographique primitif de la région, probablement installé, à l'origine, suivant la plus grande pente d'une surface assez uniforme » couverte des sables déposés par cette mer oligocène (Seret, 1960).

Signalons enfin la présence importante de travertins d'âge holocène dans le Hoyoux, ce qui a entraîné la formation de petits barrages naturels (Lohest, 1901; Forir & Lohest, 1904; Lespineux, 1904; Geurts, 1976; Lanuit, 1984). Les alluvions de la plaine d'inondation de ce cours d'eau en sont d'ailleurs chargées en face du *Trou Al'Wesse* (Collin & Haesaerts, 1988).

Le tableau 1 (p. 121) présente les différentes formations rencontrées dans la région de Modave.

2.3. La grotte du *Trou Al'Wesse*

La cavité s'ouvre à la base d'un éperon rocheux (photo, p. 118) à une cinquantaine de mètres du Hoyoux, huit mètres plus haut que celui-ci (Masy, 1993). L'entrée de la grotte, orientée vers le sud-ouest, se prolonge par une large galerie relativement horizontale d'environ trente-cinq mètres de long (fig. 4), colmatée — en partie du moins — par des déblais issus des fouilles anciennes (Collin & Haesaerts, 1988). Au bout de cette galerie, le plafond est percé d'une cheminée verticale rejoignant l'extérieur neuf mètres plus haut (Masy, 1993). Le réseau karstique n'est pas connu dans son intégralité, un bouchon de sédiments obstruant le fond de la galerie.

Cette situation particulièrement propice à l'installation de l'homme — présence d'une grotte, d'une rivière proche et orientation au sud-ouest — fut mise à profit, à plusieurs reprises, par les préhistoriques. L'homme s'y installa en effet au Paléolithique moyen, au Paléolithique supérieur (Aurignacien) et au Mésolithique. De plus, au Néolithique, une sépulture y fut aménagée dans la cheminée (Masy, 1993).

La grotte du *Trou Al'Wesse* s'est développée dans une dolomie secondaire à crinoïdes se rattachant à la Formation de l'« *Encrinite de Flémalle* » (tableau 1) dolomitisée [« *Formation de Modave* » de Hance (1985)]. L'âge de la formation d'un karst est très difficile, sinon impossible, à établir avec précision. Tout au plus peut-on obtenir des informations chronologiques grâce aux remplissages sédimentaires, à la morphologie des phénomènes karstiques ou aux datations des concrétions (Renault, 1976; Ek & Poty, 1982; Ek & Quinif, 1988; Gewalt & Ek, 1988). La karstification est, bien entendu, postérieure au dépôt et à la lapidification de la roche karstifiée (Renault, 1976:193). Elle est aussi postérieure à l'émersion, les calcaires paléozoïques belges étant d'origine marine. Dès l'émersion, les phénomènes karstiques peuvent commencer en surface (paléolapiés paléozoïques : Ek & Poty, 1982). Les phénomènes de profondeur nécessitent par contre une fissuration préalable de la roche (Renault,

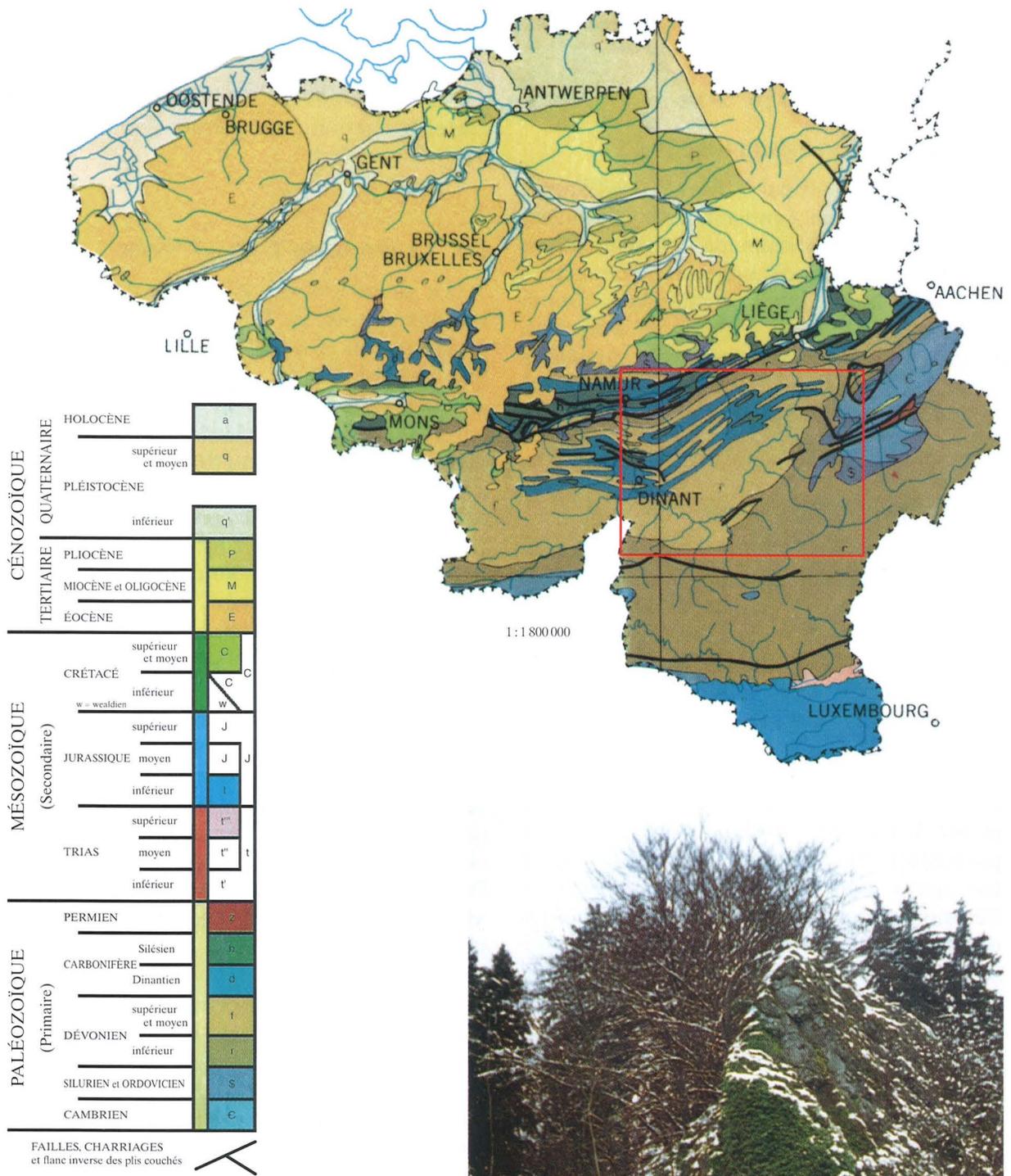


FIG. 2a. – Carte géologique de Belgique (d'après P. de Bethune & J. Bouckaert; reproduite avec l'aimable autorisation du Service Géologique de Belgique). La zone encadrée correspond à la figure 2b.



Ci-contre : vue du *Trou Al'Wesse* depuis la plaine alluviale du Hoyoux; décembre 1998 (cliché St. Pirson).

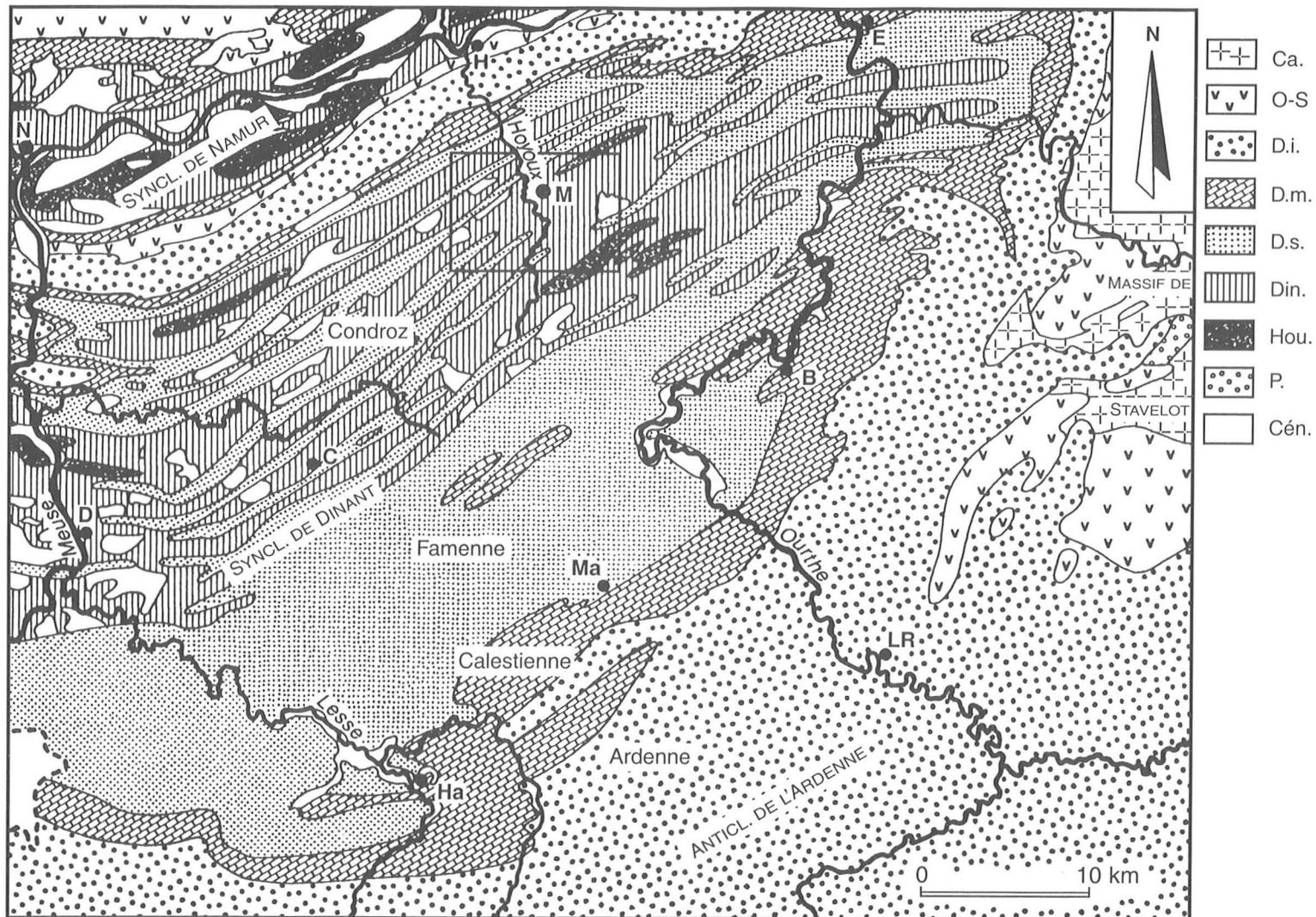


FIG. 2b. – Cadre géologique général (extrait du *Grand Atlas*, De Boeck-Wesmael, 1993, p. 8). La zone encadrée correspond à la figure 3.

N = Namur; H = Huy; E = Esneux; M = Modave; C = Ciney; B = Barvaux; D = Dinant; Ma = Marche-en-Famenne; LR = La Roche-en-Ardenne; Ha = Han-sur-Lesse.
 Ca = Cambrien; O-S = Ordovico-Silurien; D.i. = Dévonien inférieur; D.m. = Dévonien moyen (principalement); D.s. = Dévonien supérieur (principalement); Din. = Dinantien (Tournaisien + Viséen) = Carbonifère inférieur; Hou = Houiller (ou Silésien) = Carbonifère supérieur; P = Permien; Cén = Cénozoïque (Tertiaire + Quaternaire).

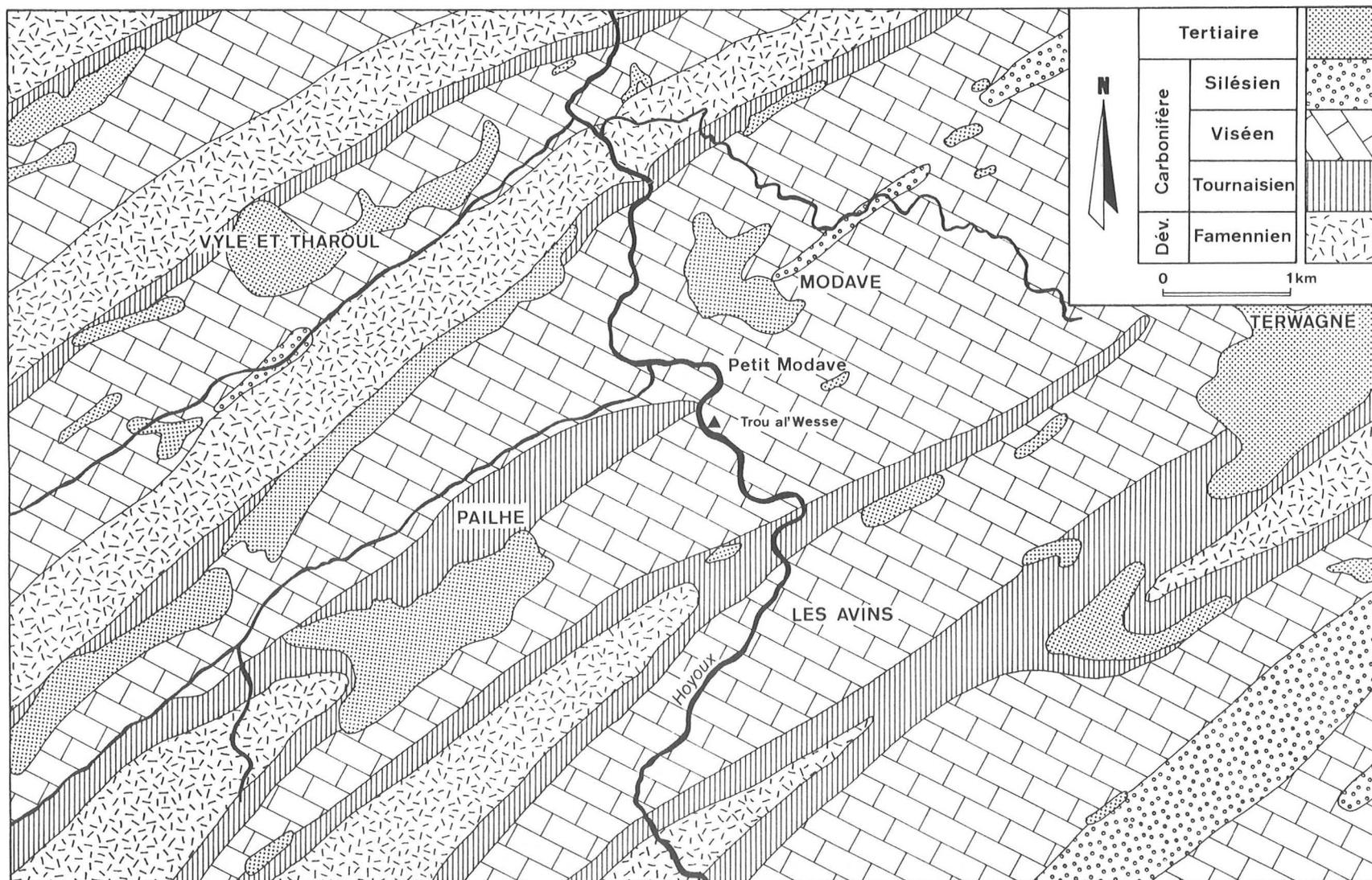


FIG. 3. – Cadre géologique régional (d'après Lohest *et al.*, 1902, modifié). La formation dans laquelle s'est développé le karst du *Trou Al'Wesse* est l'*Encrinite de Flémalle*. Auparavant considérée d'âge viséen inférieur (d'où la figure 3; voir aussi Paproth *et al.*, 1983), elle vient d'être récemment rattachée (Éd. Poty, comm. pers.) au sommet du Tournaisien (voir tableau 1, p. 121).

Tableau 1

Les formations rencontrées dans la région de Modave
D'après Éd. Poty (comm. personnelle), Paproth *et al.* (1983), Thorez
et al. (1985), Hance (1985, 1988) et Robaszynski & Dupuis (1983).

| LITHOSTRATIGRAPHIE (FORMATIONS) | | CHRONOSTRATIGRAPHIE | | | |
|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|---|---|---|
| Argiles d'Andenne | | Oligocène sup. ou Miocène inf. | | PALÉOGÈNE | TERTIAIRE |
| Sables | | Oligocène | | | |
| Namurien | | | SILÉSIE | | C A R B O N I F È R E |
| Couches de Warnant | | Warnantien | V I S É E N | D I N A N T I E N | |
| Anhée | « Grande Brèche » | | | | |
| Poilvache | | | | | |
| Thon-Samson | | | | | |
| Seilles | | | | | |
| Lives | | Livien | | | |
| Neffe | | | | | |
| Terwagne | | (Moliniacien) | T O U R N A I S I E N | | |
| Sovet | | | | | |
| Oolithe des Avins | | | | | |
| Encrinite de Flémalle | | | | | |
| Martinrive | | Ivorien | | | |
| Encrinite de l'Ourthe | | | | | |
| Yvoir | | | | | |
| Landelies | | Hastarien | | | |
| Schistes du Pont d'Arcole | | | | | |
| Hastièrre | | | | | |
| Comblain au Pont | | Psammites du Condroz | FAMENNIEN | DÉVONIEN SUPÉRIEUR | |
| Évieux | | | | | |
| Montfort | | | | | |
| Souverain-Pré | | | | | |
| Esneux | | | | | |

1976:193), l'orogénèse hercynienne pour le cas qui nous occupe.

Dans le Condroz, la dernière phase d'émerision coïncide avec le retrait de la mer oligocène. Des phénomènes karstiques liés à cette période ont été reconnus (Ek & Poty, 1982). Pour Seret (1960), le Hoyoux serait une rivière ancienne, surimposée, développée au départ de cette surface de retrait de la mer oligocène. L'incision de sa vallée pourrait correspondre

au début de phénomènes karstiques de profondeur, un drainage souterrain pouvant se développer à la suite de la mise en relief consécutive à l'encaissement de la rivière (Renault, 1976:196). Toutefois, pour Ek & Poty (1982:80), c'est surtout au Quaternaire que les grottes se sont constituées (« karst linéaire, avec des phénomènes mieux développés en profondeur » qu'au Tertiaire).

Il est donc probable que la formation de la grotte du Trou Al'Wesse soit principalement

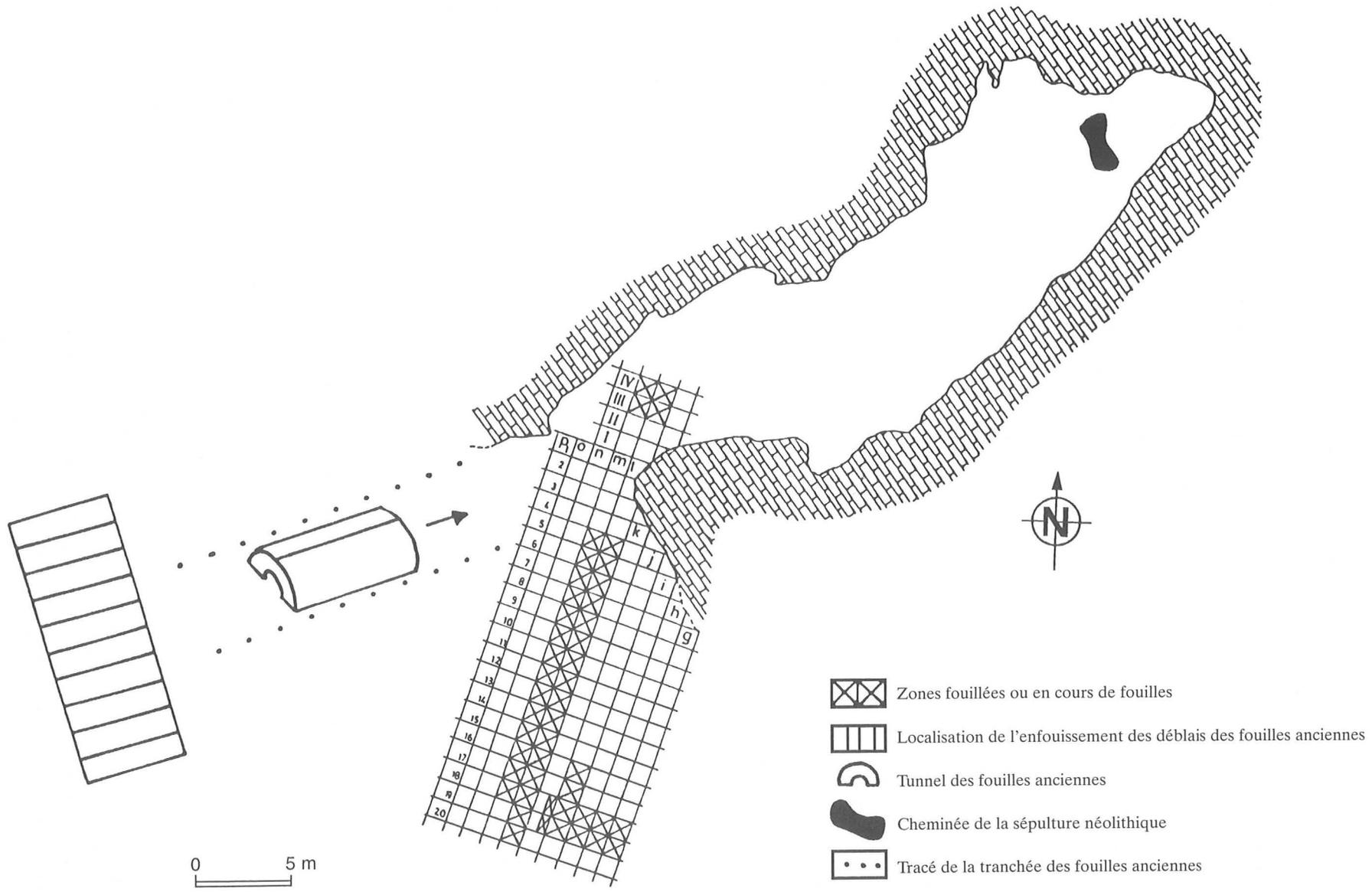


FIG. 4. – Le Trou Al'Wesse : plan de la grotte, extension des fouilles en 1998 et situation du tunnel des anciennes fouilles (d'après Derclaye *et al.*, 1999).

d'âge quaternaire. Ajoutons que la karstification se développe surtout lors de périodes tempérées humides (Renault, 1976:195).

2.4. Stratigraphie des dépôts du Trou Al'Wesse

À l'instar des informations archéologiques, les informations sur la stratigraphie des fouilles anciennes sont assez dérisoires. Dupont mentionne 6 niveaux ossifères (Dupont, 1873a : tableau synoptique; Dupont, 1873b:131, tableau) dont 3 (Dupont, 1873a), voire 4 (Dupont, 1873b) présentent des traces d'occupation humaine. Fraipont et Braconnier disent avoir retrouvé ces 6 niveaux ossifères (Fraipont & Braconnier, 1887:403). Ces auteurs mentionnent en outre la présence d'une couche de sable jaune-orange mélangée avec de l'argile plastique rouge (Lohest & Braconnier, 1888:64).

Étant donné la faible extension des fouilles actuelles, il est prématuré d'essayer de reconnaître les 6 niveaux ossifères de Dupont, surtout que cet auteur n'incluait apparemment pas le Mésolithique. Cette culture est en effet mentionnée pour la première fois par Otte

(1979:434) sur base de l'étude du matériel des anciennes fouilles. Elle fut découverte sur le terrain lors de la campagne de 1988 (Collin & Haesaerts, 1988).

La figure 4 indique l'extension des fouilles en 1998 (la campagne de 1999 n'ayant été consacrée qu'à des relevés stratigraphiques). Une interprétation provisoire de la stratigraphie du *Trou Al'Wesse* (fig. 5), intégrant les données accumulées jusqu'en 1996, est présentée par Collin *et al.* (1996). L'étude sédimentologique présentée ici se limite à la coupe transversale 4-5 en M (fig. 4 et 6). Cette coupe était la seule, en 1996, à présenter l'intégralité des dépôts pléistocènes jusqu'au « *bedrock* », et ce dans leur plus grand développement. La figure 7 présente le log stratigraphique établi au départ de la coupe 4-5 en M. La description des couches s'y rapportant ainsi que la coupe elle-même ont déjà été publiées (Pirson & Collin, 1997). Remarquons que la stratigraphie pléistocène décrite dans Pirson & Collin (1997) diffère légèrement de celle publiée par Collin *et al.* (1996), comme le rappelle la figure 6.

Nous présentons ci-après un résumé de la stratigraphie des dépôts concernés par la coupe 4-5 en M. Le levé systématique des

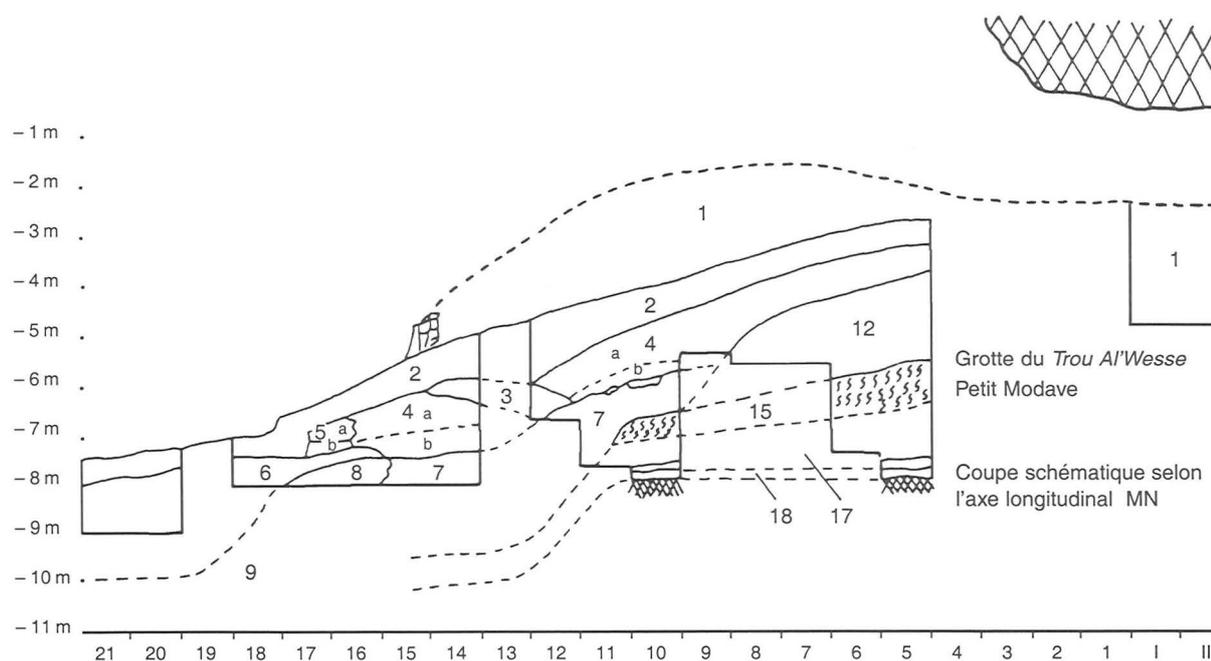


FIG. 5. – Interprétation provisoire de la stratigraphie du *Trou Al'Wesse* (d'après Collin *et al.*, 1996).

La couche 1 correspond aux déblais des anciennes fouilles. Les couches 3, 5, 6, 7, 8 et 9 ne sont pas considérées dans ce travail. Quant aux autres couches (2, 4, 12, 15, 17 et 18 ainsi que les couches 14, 16 et 19, non illustrées sur cette figure), elles ont récemment fait l'objet d'une révision (Pirson & Collin, 1997); les équivalences entre les deux stratigraphies sont présentées à la figure 6.

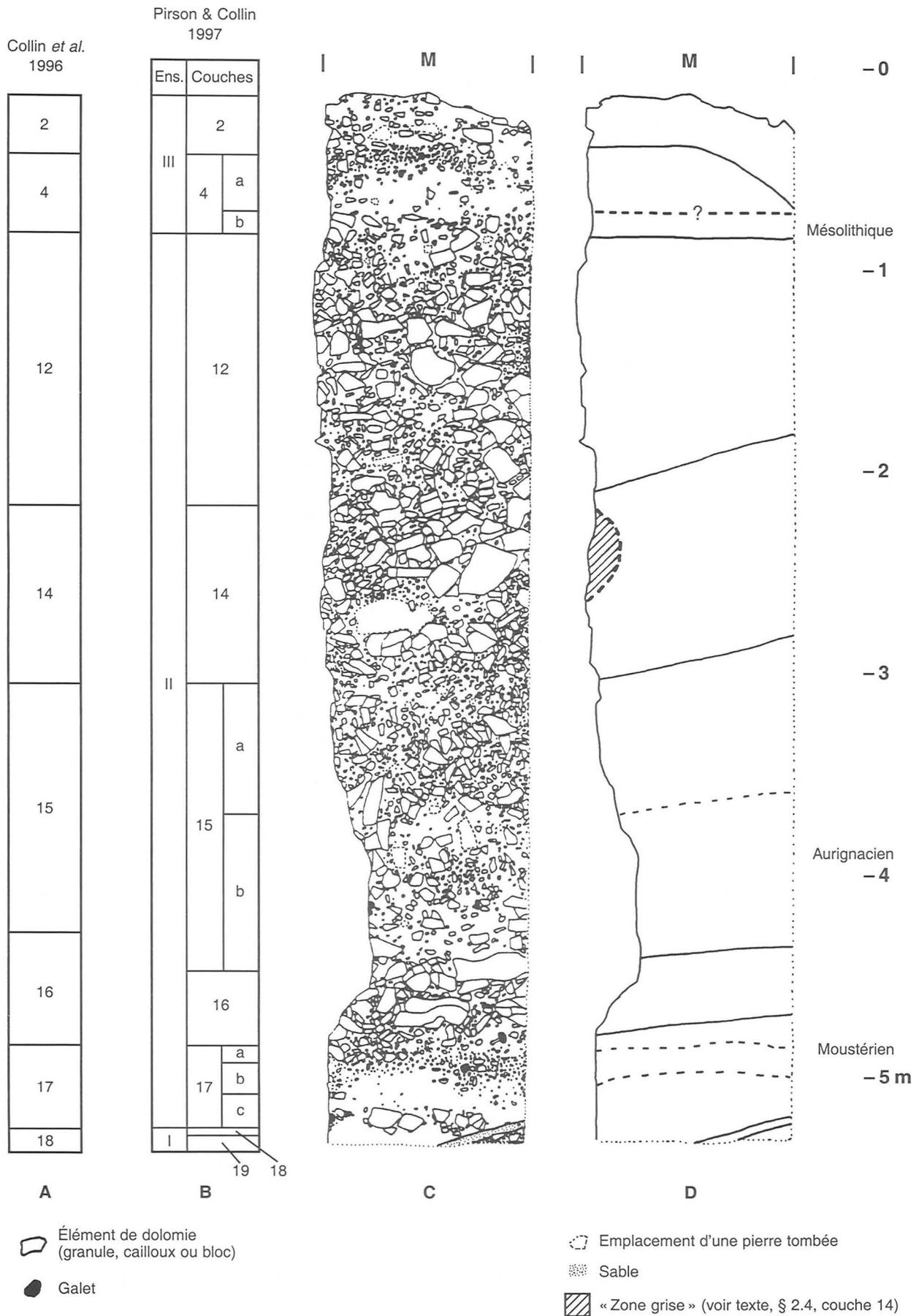
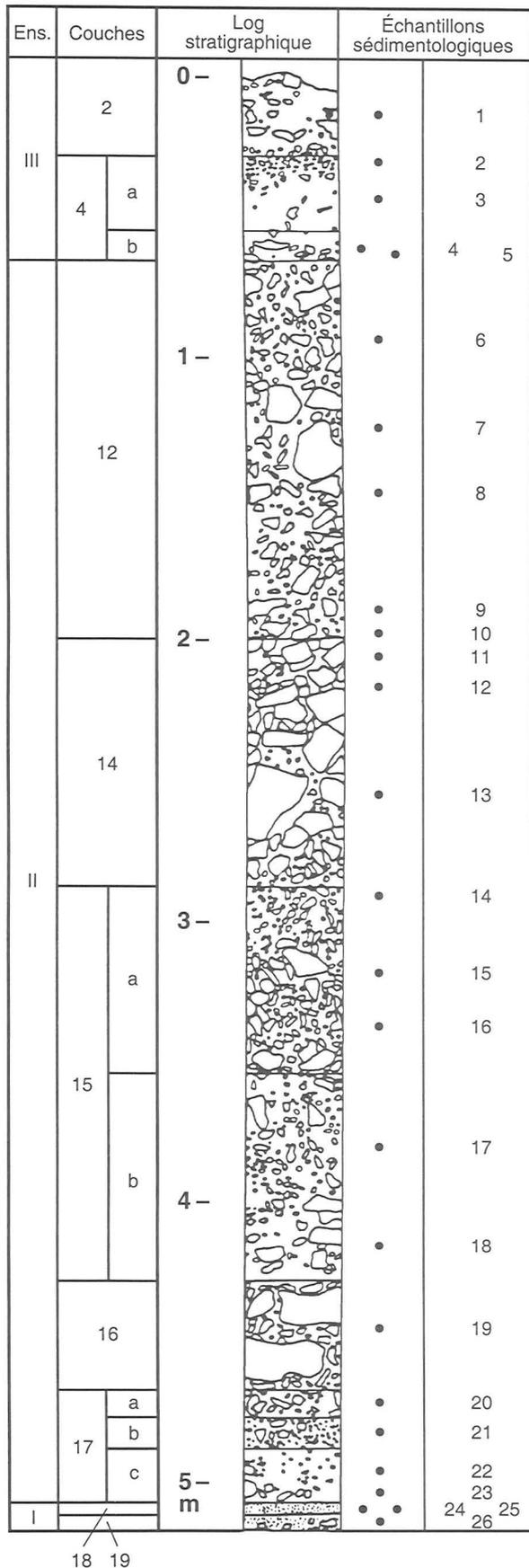


FIG. 6. - Comparaison entre la nouvelle stratigraphie pléistocène du *Trou Al'Wesse* (Pirson & Collin, 1997), utilisée dans ce travail (B) et celle présentée par Collin *et al.*, 1996 (A). C : coupe transversale 4-5 en M. D : position des limites entre couches. Le zéro de la coupe se situe à 283,5 cm sous le zéro de référence du site. Remarquons que la couche 4 de Pirson & Collin (1997) est ici subdivisée en 4a et 4b.



autres coupes du sondage est actuellement en cours. Dans la description qui suit, les arêtes des éléments grossiers sont anguleuses, sauf mention contraire. Quant aux couleurs, elles ont été décrites sur le terrain avec le « Munsell Soil Color Chart ».

- **Couche 19** : sable dolomitique brun grisâtre foncé (10YR 4/2) à quelques éléments grossiers (granules ou cailloux) reposant sur le rocher en place. Cette couche est épaisse d'environ 10 cm.
 - **Couche 18** : sable jaune (2,5Y 8/6) présentant par endroits des zones argileuses orange. Fraction grossière absente. Cette couche est épaisse de 5 cm.
 - **Couche 17** : couche sablo-limoneuse de couleur brun foncé (10YR 4/3), épaisse d'une cinquantaine de centimètres. Trois niveaux sont distingués dans la coupe 4-5 en M, surtout sur base de différences au sein de la fraction grossière. Soit de bas en haut :
 - 17c : niveau plus sableux d'une trentaine de centimètres d'épaisseur. La fraction grossière est rare (quelques cailloux centimétriques) excepté un niveau d'éléments dolomitiques centimétriques à décimétriques situé entre -515 et -525 cm (fig. 6).
 - 17b : niveau riche en petits cailloux émoussés de dolomie, de l'ordre du centimètre ; présence de quelques éléments pluricentimétriques parfois très émoussés.
 - 17a : niveau renfermant des éléments plus grossiers (décimétriques).
- Un matériel archéologique moustérien abondant fut exhumé de la couche 17 (surtout dans les niveaux 17a et b). Le matériel osseux indiquerait une action de l'eau importante (López Bayón, in Collin *et al.*, 1996). De même, le matériel lithique est parfois concassé (agents mécaniques et/ou piétinement ?, Collin *et al.*, 1996).
- **Couche 16** : cette couche, épaisse de 30 cm, se caractérise par la présence de gros blocs de dolomie atteignant 50 cm dans leur plus grande dimension. Ceux-ci ont un pendage sub-horizontale. La fraction grossière comprend également des éléments centimétriques à décimétriques. Tous ces éléments sont contenus dans une matrice sablo-limoneuse brun jaunâtre (10YR 5/4).
 - **Couche 15** : cette couche se divise en deux niveaux : 15.a et 15.b. S'étendant sur 150 cm, elle comprend de nombreux blocs hétérométriques (1 à 15 cm, rarement 20) de dolomie, enrobés dans une matrice sablo-limoneuse (15.b) à limono-sableuse (15.a). Le niveau inférieur

FIG. 7. - Log stratigraphique avec position des 26 échantillons sédimentologiques étudiés dans ce travail. Remarquons que si les échantillons 24 et 25 ont presque la même altitude, ils se rapportent à deux faciès différents de la couche 18 (voir § 3.4.3.2, ainsi que le § 4.2).

(15.b) présente une charge caillouteuse moins importante. Les arêtes de cette fraction grossière y sont plus émoussées. La matrice y est plus foncée (brun jaunâtre foncé; 10YR 4/4) que dans le niveau supérieur (brun jaunâtre; 10YR 5/4). Nombreux cailloux présentant un cortex blanchâtre de calcite secondaire (atteignant parfois 2 mm d'épaisseur). Du matériel archéologique attribuable à l'Aurignacien a été exhumé de cette couche.

- **Couche 14** : épaisse d'environ 80 cm, cette couche est composée de nombreux blocs hétérométriques (centimétriques à pluridécimétriques) de dolomie, emballés dans une matrice sablo-limoneuse brun jaunâtre foncé (10YR 4/4) à brun très pâle (10YR 7/3). Elle se distingue des couches sous- (15) et sus-jacentes (12) par l'abondance des éléments grossiers pluridécimétriques (20 à 50 cm). Ceci est particulièrement net dans la coupe 4-5 en L où se trouve un bloc atteignant plus d'un mètre cube. Dans la partie ouest de la coupe 4-5 en M, de -220 à -270 cm d'altitude, une zone plus grise (10YR 5/2), présentant de nombreux interstices sans matrice entre les blocs («*open work*» de Collin *et al.*, 1994:22), se distingue du reste de la couche (fig. 6).
- **Couche 12** : nombreux blocs hétérométriques (1 à 25 cm) de dolomie enrobés dans une matrice limono-sableuse brune (10YR 5/3) à brun pâle (10YR 6/3). Cette couche est épaisse de 120 cm.
- **Couche 4** : limon sableux brun présentant une faible charge caillouteuse (centimétrique à décimétrique). Le sommet de la couche se caractérise par la présence d'un lit de granules (plurimillimétriques à centimétriques) émoussés. La transition avec la couche 2 sus-jacente est peu nette. Cette couche 4 se divise en deux niveaux : la base (4b) s'enrichit en argile et est plus claire (10YR 4/3) que le sommet (4a; 10YR 3/3). Remarquons que la distinction des deux niveaux est nettement plus visible sur les coupes longitudinales.
L'abondant matériel archéologique provenant de cette couche se rattache au Mésolithique. Il a récemment fait l'objet d'une étude détaillée (Derclaye, 1999; Derclaye *et al.*, 1999).
- **Couche 2** : couche limono-sableuse humifère de teinte très sombre (10YR 3/2) comportant une charge caillouteuse relativement importante. Cette fraction grossière, hétérométrique, est essentiellement constituée d'éléments de 1 à 10 cm. Les blocs, rares, ne dépassent pas 20 cm de largeur maximale.
Le matériel archéologique observé se rattache aux périodes historiques. Des restes particulièrement abondants de microfaune sont présents dans cette partie du sondage.

3. DONNÉES ANALYTIQUES

3.1. Prétraitement des échantillons

Vingt-six échantillons ont été prélevés sur la coupe 4-5 en M (fig. 7). Une fois passés à l'étuve (30 °C) pendant 48 heures, tous les échantillons ont été tamisés à sec à 2 mm. Seule la fraction inférieure à 2 mm a fait l'objet des analyses décrites dans ce chapitre, à l'exception de quelques remarques sur la nature de la fraction grossière (§ 3.2.1). Les prélèvements en vue d'une étude de la fraction supérieure à 2 mm nécessitent des dispositions particulières et seront effectués ultérieurement, en cours de fouilles (voir Miskovsky, 1987:389).

Pour chaque échantillon, 100 g de la fraction inférieure à 2 mm sont placés avec de l'eau dans un agitateur mécanique pendant 24 h (pour 3 échantillons — n^{os} 2, 21 et 25 —, seuls 50 g ont pu être prélevés en raison des difficultés de prélèvement sur le terrain, liées à l'abondance d'éléments plus gros que 2 mm). Ensuite, le sédiment est tamisé sous eau à 40 microns afin de séparer les fractions sableuse et limono-argileuse. Chaque fraction est séchée et pesée au centième de gramme près. Nous partons du principe que les fractions ainsi obtenues sont statistiquement représentatives. À cette étape du traitement des échantillons, l'étude de la nature des sables (§ 3.2.2) et les analyses granulométriques sur sédiment brut — c'est-à-dire non décarbonaté — (§ 3.4) sont réalisées.

Une fois ces deux analyses terminées, le sédiment (les deux fractions) est attaqué à chaud à H₂O₂ (33 %) pour éliminer la matière organique. Ensuite, attaque à HCl à chaud pour éliminer les carbonates. L'attaque à chaud est rendue nécessaire par la présence de dolomite (Klein & Hurlbut, 1999:416). Après avoir déterminé la perte de poids liée à l'attaque à H₂O₂ et HCl (§ 3.3), les analyses suivantes furent effectuées : granulométrie sur sédiment décarbonaté (§ 3.4), morphoscopie (§ 3.5) et étude des minéraux denses (§ 3.2.3).

3.2. Nature du sédiment

L'étude de la nature du sédiment donne essentiellement des informations sur l'origine du dépôt. Si la nature de la fraction limoneuse décarbonatée est souvent étudiée (minéraux

denses), la nature du sédiment brut l'est beaucoup plus rarement. Les informations que cette dernière fournit peuvent pourtant être intéressantes, comme nous le verrons pour la fraction sableuse.

3.2.1. Fraction grossière (> 2 mm)

La fraction grossière représente une part importante du sédiment (voir fig. 6). Elle ne concerne qu'un seul type de roche : une dolomie secondaire à crinoïdes. Il s'agit de la même roche que celle dans laquelle la grotte est creusée (Formation de Flémalle dolomitisée). Son âge est Tournaisien.

3.2.2. Fraction sableuse (2 mm à 40 µm)

La présence de nombreuses catégories de grains de nature différente, repérés lors d'un rapide examen des sables bruts au binoculaire, nous a conduit à déterminer la nature et les proportions des différents constituants de la fraction sableuse avant attaque à l'acide. L'étude de ces différentes catégories et l'analyse de leur répartition stratigraphique sont susceptibles de fournir des informations relatives à l'origine du sédiment des différentes unités lithostratigraphiques définies sur le terrain.

3.2.2.1. Méthodologie

La fraction sableuse est divisée en quatre fractions (Hadjouis, 1987 : 416), dans le but de travailler sur des grains de taille comparable. Ces quatre fractions sont présentées dans le tableau 2. Ces fractions sont ensuite étudiées à la loupe binoculaire afin d'établir les proportions de leurs différents constituants. Lorsque la fraction comportait de très nombreux grains, une partie seulement fut analysée. Plusieurs techniques de sous-échantillonnage sont utilisables. Aucun séparateur mécanique n'étant disponible au laboratoire où les analyses furent réalisées, nous avons opté pour la méthode manuelle du quartage (« *Coning and quartering* », Ingram, 1971 : 52).

L'objectif ici recherché n'étant pas d'effectuer une étude quantitative précise, les proportions des différentes catégories reconues (voir § 3.2.2.2) furent établies sur les quatre fractions des 26 échantillons étudiés par estimation visuelle à l'aide de diagrammes de fréquence (voir par exemple Charollais

Tableau 2

Les quatre fractions utilisées pour l'étude de la nature de la fraction sableuse

| Nom | Intervalle granulométrique |
|--------|----------------------------|
| F.S. | De 2 mm à 630 µm |
| F.I. | De 630 µm à 315 µm |
| F.II. | De 315 µm à 160 µm |
| F.III. | De 160 µm à 40 µm |

& Davaud, 1976). Cette méthode est classiquement utilisée en géologie depuis Folk (1951) et Shvetsov (1954, cité dans Terry & Chilingar, 1955) pour la détermination rapide des différents composants d'une roche, dure ou meuble (voir la critique faite de cette méthode dans Dennison & Shea, 1966). Les résultats des estimations visuelles avaient préalablement été comparés avec ceux d'une autre méthode, plus rigoureuse mais plus longue (utilisée notamment en palynologie et pour l'étude des minéraux denses) : le comptage. De 300 à 700 grains furent ainsi isolés par quartages successifs (Ingram, 1971), lors de 4 comptages différents.

Deux échantillons pris au hasard ont servi pour la comparaison. Le premier fit l'objet de deux comptages sur la fraction F.I. Quant au deuxième, un comptage fut appliqué à F.S. et un autre à F.I. Les résultats, comparés aux estimations visuelles, sont présentés sur la figure 8. Un des deux échantillons fit l'objet de deux estimations visuelles sur F.I. Les résultats sont également présentés sur la figure 8. Cette figure nous montre que les résultats des deux méthodes sont, dans l'ensemble, assez cohérents. Remarquons que pour un même échantillon, la fraction comptée (ou estimée) une première fois est rajoutée à l'ensemble avant de procéder aux quartages menant au deuxième comptage (ou à la deuxième estimation).

De cette comparaison, on peut conclure que les résultats des estimations sont relativement fiables. Remarquons toutefois que les comptages qui ont permis l'étalonnage de la méthode n'ont été réalisés que sur F.S. et F.I. Si F.II. ne pose probablement pas de problème, nous sommes plus réservé quant à F.III. En effet, les résultats des estimations visuelles sur cette fraction sont délicats pour deux raisons. D'abord, la petite taille des grains (160 à 40 µm) et leur nombre très élevé (il s'agit de la fraction la plus importante

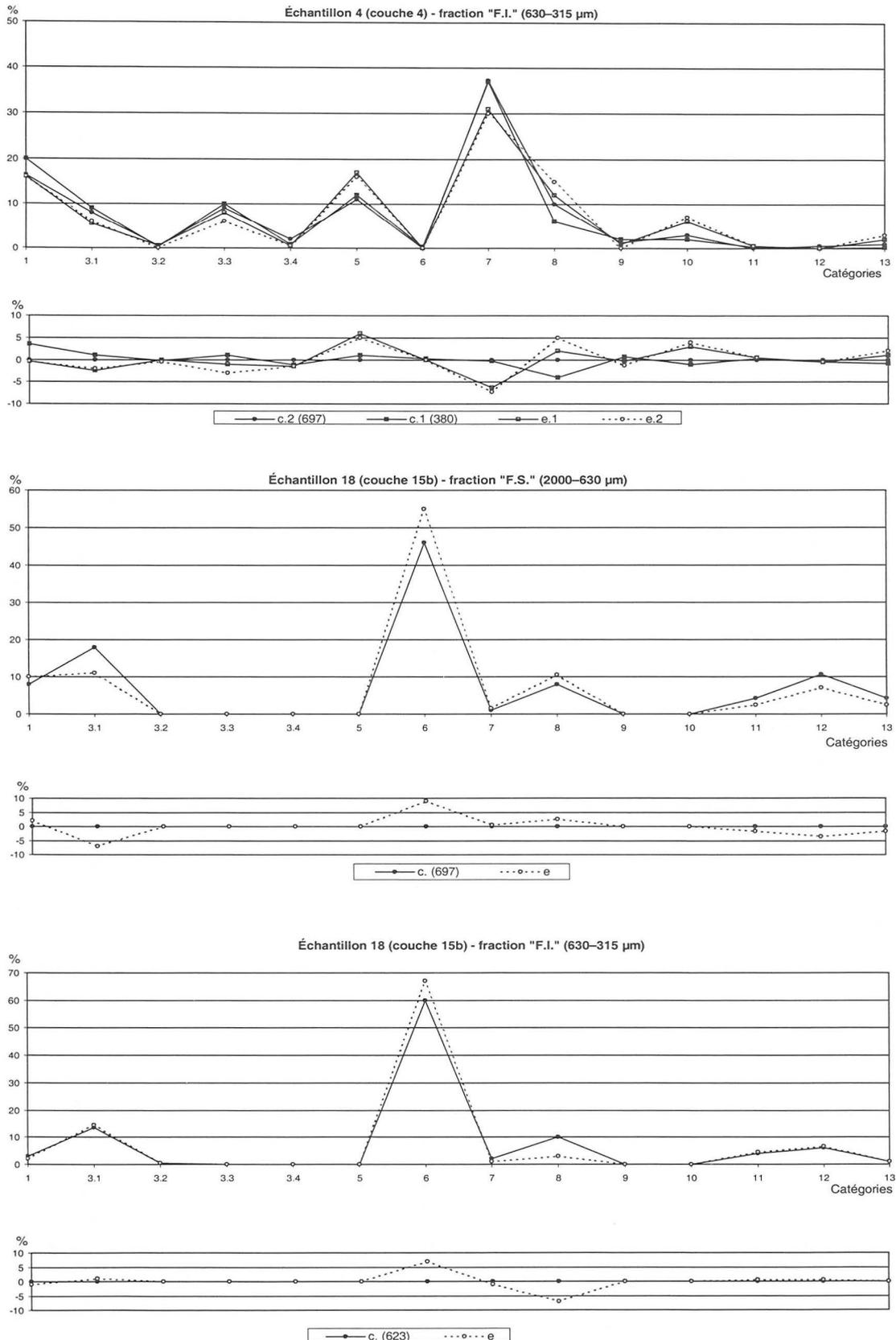


FIG. 8. – Comparaison entre comptages (c.) et estimations visuelles (e.). Les nombres entre parenthèses associés aux comptages correspondent au nombre de grains comptés. Le premier graphique de chaque série présente les données brutes des comptages ou des estimations visuelles (en %). Le deuxième graphique présente la différence entre les valeurs (%) du comptage effectué sur le plus grand nombre de grains et les autres valeurs (%), concernant soit un comptage, soit une estimation visuelle. Les chiffres figurés en abscisse représentent les numéros des catégories définies dans ce travail (voir § 3.2.2.2).

en poids) peuvent favoriser des erreurs d'estimation. Ensuite, il n'est pas toujours aisé, vu la petite taille des éléments, de distinguer les grains de quartz de ceux de dolomite. Nous avons donc été amené à contrôler la qualité de nos résultats.

Le contrôle consiste en une comparaison des résultats des estimations visuelles des catégories non affectées par l'attaque à l'acide (catégories 11 à 15; voir ci-dessous, § 3.2.2.2) avec les résultats de la granulométrie des sédiments décarbonatés (voir § 3.4) et ce, pour chacune des quatre fractions (F.S., F.I., F.II., F.III.). Pour permettre ces comparaisons, voici les étapes qui furent suivies.

- Présenter les résultats de la granulométrie sur sédiment décarbonaté en quatre fractions, identiques à celles utilisées pour les estimations visuelles (F.S. à F.III.). On a donc, pour chaque échantillon¹, une valeur (exprimée en gramme) par fraction.
- Transformer les données des estimations (% sur nombre) en un poids. Cette opération nous a paru raisonnable vu les faibles différences de densité entre les catégories principales (calcite : 2,6 à 2,8; dolomite : 2,85 à 2,95; quartz : 2,65).
- Sommer les poids ainsi obtenu des 5 catégories concernées.
- Comparer le poids des catégories 11 à 15 obtenu par la granulométrie (c'est-à-dire le poids du sédiment décarbonaté) avec celui obtenu via les estimations, et ce fraction par fraction. Si on considère que les données de la granulométrie reflètent la réalité, la différence entre le poids obtenu par granulométrie et le poids obtenu par estimations visuelles correspond à l'erreur commise lors des estimations. La figure 9 présente l'écart entre ces poids.

Sur la figure 9, on constate que la comparaison est plus que satisfaisante pour F.S. et F.I. Pour F.II., seul l'échantillon 25 montre un écart important. Par contre, pour F.III., plusieurs échantillons présentent des différences importantes. Ces différences peuvent être dues, selon nous, à deux phénomènes. D'abord, la difficulté évoquée plus haut de distinguer, dans F.II. et surtout dans F.III., le quartz de la dolomite. Ensuite, la différence de technique de tamisage entre la granulométrie (colonne de tamis disposée sur une secoueuse électrique vibrante; voir § 3.4.1) et les estimations (4 tamis secoués manuellement).

¹ Sauf les échantillons 26 et 23 pour lesquels aucune donnée relative à la granulométrie des sédiments décarbonatés n'est disponible. En effet, ces échantillons sont entièrement carbonatés (voir § 3.3).

Afin de vérifier que, pour F.III., ces différences sont bien liées à une erreur de détermination (quartz ou dolomite), nous avons décidé de comparer les résultats des estimations visuelles avec la perte de poids des sables après traitement à H₂O₂ et HCl (voir § 3.3). Les catégories concernées sont celles affectées par l'attaque à l'eau oxygénée et à l'acide (catégories 1 à 10; voir § 3.2.2.2). Si le problème est lié à une confusion entre quartz et dolomite, l'écart par rapport au zéro de la figure 9 (catégories 11 à 15 sur F.III., englobant le quartz) devrait être compensé par un écart de même valeur absolue mais de signe contraire pour les catégories 1 à 10 (englobant la dolomie). La démarche suivie est présentée ci-dessous.

- Pour chaque catégorie, transformer, fraction par fraction, les données des estimations (% sur nombre) en un poids. Cette opération nous a paru raisonnable vu les faibles différences de densité entre les catégories principales (calcite : 2,6 à 2,8; dolomite : 2,85 à 2,95; quartz : 2,65).
- Calculer, échantillon par échantillon, le poids de chaque catégorie pour l'ensemble des sables.
- Sommer les poids des catégories concernées. On obtient le poids total d'éléments susceptibles de disparaître après attaque à l'acide dans les sables.
- Comparer ce poids avec la perte de poids des sables après attaque à H₂O₂ et HCl. Si on considère que les données issues de l'attaque à H₂O₂ et HCl reflètent la réalité, la différence entre le poids obtenu après traitement à H₂O₂ et HCl et le poids obtenu par estimations visuelles correspond au poids sous-estimé lors des estimations (surestimé si le poids est négatif) des catégories concernées.

Les résultats de cette comparaison sont présentés à la figure 10.

La figure 11 montre clairement que, à l'exception de l'échantillon 25, le poids sur-estimé ou sous-estimé des catégories 11 à 15 de la fraction F.III. est contrebalancé par le poids sous- ou surestimé des catégories 1 à 10 du sable total. Les différences illustrées à la figure 9 sont donc liées à une confusion entre quartz et dolomite lors des estimations de la fraction F.III.

L'échantillon 25 présente toutefois un problème différent. La figure 11 montre en effet que l'excédent de poids des catégories 11 à 15 pour la fraction F.III. (15,5 g) n'est pas contrebalancé par un déficit équivalent au niveau des catégories 1 à 10. Cet excédent est lié à un problème de tamisage lors de

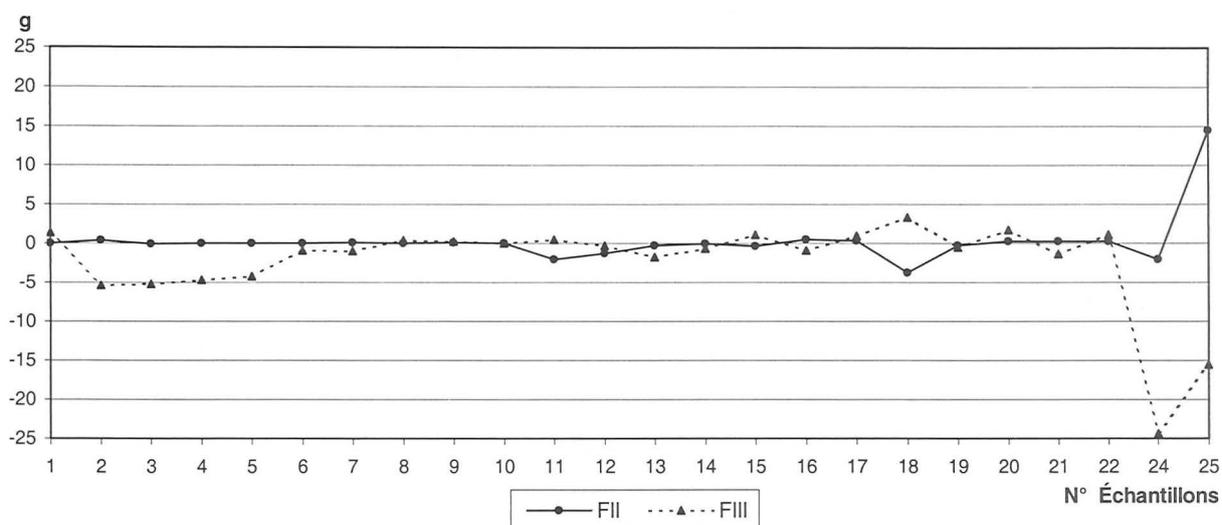
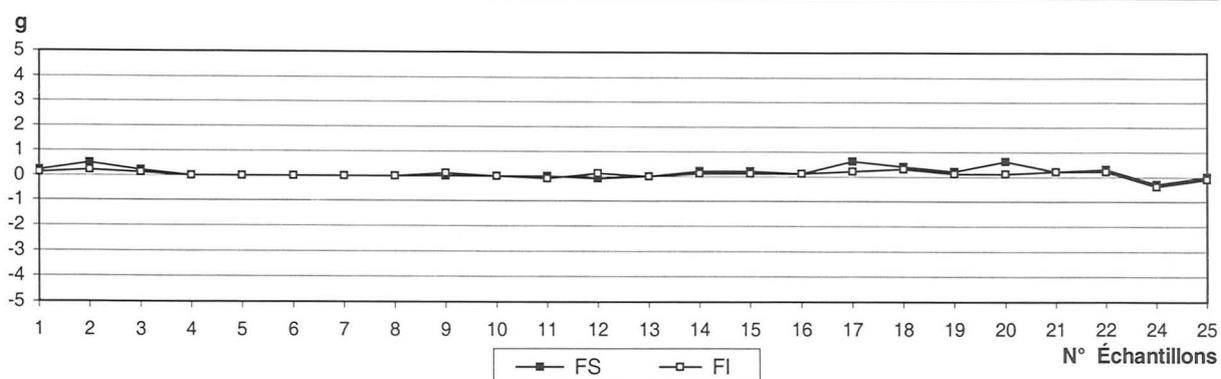


FIG. 9. – Les courbes représentent (pour chacune des quatre fractions étudiées : FS. à F.III.) la différence entre, d'une part, le poids des catégories 11 à 15 (catégories non affectées par le traitement à H_2O_2 et HCl) obtenu par la granulométrie (= poids du sédiment décarbonaté) et, d'autre part, le poids des mêmes catégories mais obtenu par estimations visuelles. Les valeurs obtenues correspondent à l'erreur liée aux estimations visuelles pour ces catégories 11 à 15 (en considérant que les données de la granulométrie reflètent la réalité). Remarquons que les échantillons 23 et 26 ne sont pas représentés vu qu'ils sont totalement carbonatés.

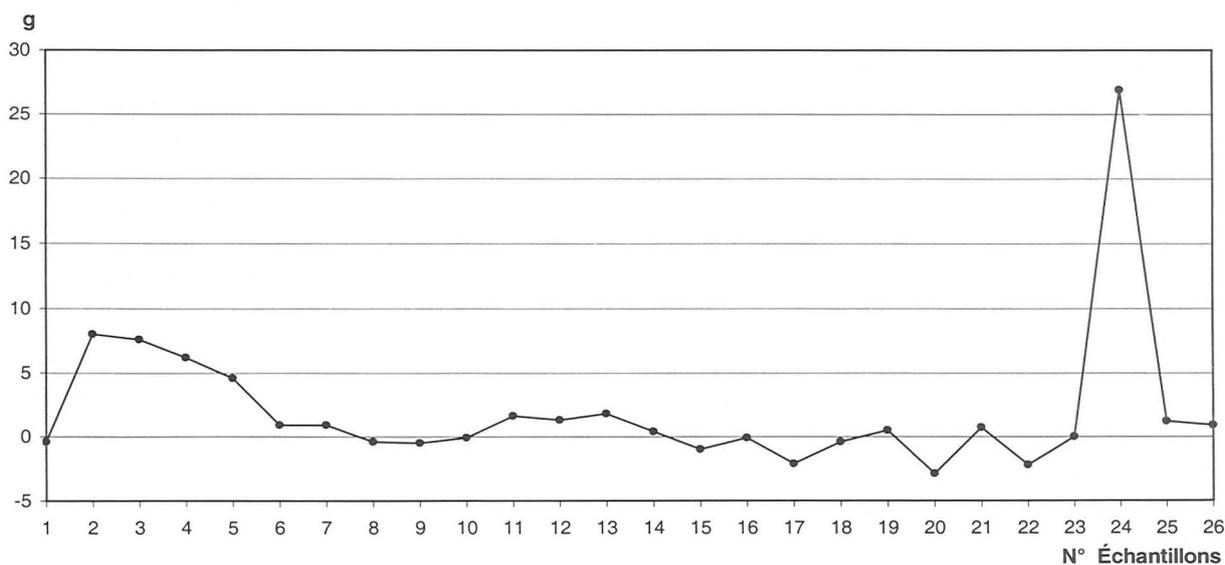


FIG. 10. – La courbe représente la différence (pour la totalité de la fraction sableuse) entre, d'une part, le poids des catégories 1 à 10 (catégories affectées par le traitement à H_2O_2 et HCl) déduit de la perte de poids après attaque à H_2O_2 et HCl (voir § 3.3) et, d'autre part, le poids des mêmes catégories obtenu par estimations visuelles. Les valeurs obtenues correspondent à l'erreur liée aux estimations visuelles pour ces catégories 1 à 10 (en considérant que les données issues de l'attaque à H_2O_2 et HCl reflètent la réalité).

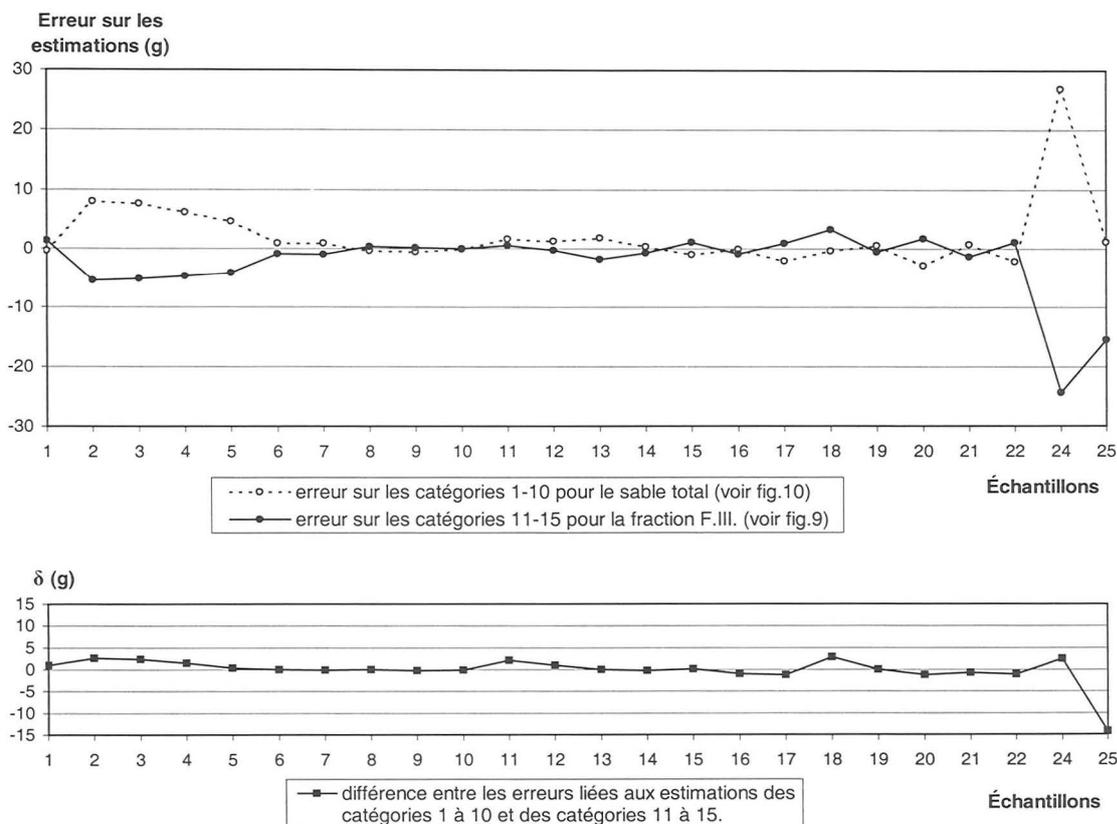


FIG. 11. – Erreurs liées aux estimations visuelles (poids sur- ou sous-estimé) pour les catégories 1 à 10 et 11 à 15. Le premier graphique illustre les erreurs liées aux estimations pour chacun des deux groupes de catégories (1–10 et 11–15). On voit clairement que l'erreur sur les catégories 1 à 10 (catégories affectées par le traitement à H_2O_2 et HCl) est contrebalancée par celle concernant les catégories 11 à 15 (non affectées par le traitement à H_2O_2 et HCl), à l'exception de l'échantillon 25 (voir texte). Le second graphique présente l'écart δ entre les erreurs des deux groupes de catégories.

la séparation de F.II. et F.III. En effet, la somme des poids de F.II. et F.III. obtenue par la granulométrie pour les catégories 11 à 15 est identique à la même somme obtenue par estimations visuelles, ce qui explique l'allure de la figure 9 pour cet échantillon. La particularité de l'échantillon 25 est facilement explicable. En effet, il présente un mode très important (29 %) à 160 μm (mode principal; voir figure 18.2a). Or, 160 μm est la limite entre F.II. et F.III. La différence de technique de tamisage entre granulométrie et estimations (voir ci-dessus) couplée à l'abondance de sédiment sur le tamis de 160 μm a donc provoqué une rétention de sédiment sur le tamis de 160 μm lors du tamisage manuel.

Ces résultats nous ont conduit à effectuer une correction des résultats des estimations au niveau de la fraction F.III. Un facteur de correction (valeurs de la courbe « F.III. » sur la figure 9) a été appliqué aux catégories

« quartz » et « dolomite » pour tous les échantillons de cette fraction (sauf l'échantillon 25; voir ci-dessus).

Ainsi corrigés, les résultats des estimations visuelles nous paraissent utilisables, du moins pour les tendances principales. Nous garderons bien évidemment à l'esprit que ces résultats doivent être considérés avec une grande prudence (du moins leur aspect quantitatif) dans la mesure où l'estimation visuelle est une méthode empirique.

3.2.2.2. Les principales catégories rencontrées et leur origine

Voir tableau 3, p. 132.

3.2.2.3. Résultats

Les résultats des estimations visuelles sont illustrés à la figure 12. Les graphiques présentent les variations, au sein de la stratigraphie, des catégories principales de la fraction sableuse totale (somme de F.S.,

Tableau 3
Les principales catégories rencontrées et leur origine

A. CARBONATES

| NATURE | | DESCRIPTION | ORIGINE |
|--|----------------------------|---|---|
| Carbonates dinantiens | 1. Dolomie | Grains de dolomie | Résultent de la désagrégation de la dolomie des parois de la grotte |
| | 2. Dolomite | Cristaux de dolomite* | |
| | 3. Calcite de divers types | Rhomboèdres plus ou moins complets de calcite blanche (3.1) ou rose (3.2), calcite translucide plus ou moins aciculaire (3.3), scalénoèdres de calcite blanchâtres ou translucides (3.4) et fragments de veine de calcite (3.5) | |
| | 4. Fossiles | Articles de crinoïdes, tétracoralliaires solitaires, ... | |
| | 5. « Sphères » de calcite | Calcite blanche plus ou moins sphérique. Cette catégorie a été isolée de la catégorie 3 en raison de sa répartition stratigraphique particulière | Désagrégation de la roche, affectée ultérieurement par une pédogenèse |
| 6. Grains microcristallins jaunes carbonatés | | Grains aux arêtes émoussées, composés de particules limono-argileuses cimentées par du carbonate. Ces grains sont fréquemment recouverts d'une pellicule d'oxydes (Mn ?) | Inconnue pour l'instant |
| 7. Concrétions carbonatées tubulaires | | Constructions carbonatées se présentant souvent sous forme de tubes | Biologique |

* Dolomie et dolomite ont été séparés dans le but de souligner l'importance de la dolomite dans les sables fins.

B. ORGANISMES

| NATURE | DESCRIPTION | ORIGINE |
|---------------|--|-------------------------------------|
| 8. Microfaune | Os ou fragments d'os de microfaune. Une certaine proportion de la microfaune est brûlée | Pelotes de réjection de rapaces* |
| 9. Mollusques | Coquilles de gastéropodes | |
| 10. Charbons | Fragments de bois végétal carbonisé | Incendie naturel ou feu anthropique |

* Dans le sondage, la microfaune se trouve en effet essentiellement sous le porche.

C. NON CARBONATES

| NATURE | DESCRIPTION | ORIGINE |
|---------------------------------|---|---|
| 11. Quartz | Grains de quartz xénomorphes, anguleux à arrondis | Origine fluviale, éolienne et/ou colluvionnaire (voir § 4) |
| 12.1. Roches détritiques | Grains de roches sédimentaires (grès fins et siltites) de couleur diverses (vert, rouge, noir, gris ou jaunâtre) | Placages tertiaires présents sur les plateaux dans la région (voir § 4) |
| 12.2. Microconglomérats | Grains de microconglomérats à éléments divers (essentiellement du quartz) et à ciment non carbonaté brun, jaune ou orange | |
| 13. Concrétions non carbonatées | Concrétions d'oxydes de fer, brunes (litées ou non), oranges ou jaunes | |

D. MATÉRIEL ARCHÉOLOGIQUE

| NATURE | DESCRIPTION | ORIGINE |
|------------------------|--|-------------|
| 14. Industrie lithique | Esquilles de silex, parfois de chert | Anthropique |
| 15. Céramique | Fragments de terre cuite rouge (rencontrées uniquement dans la couche 2) | |

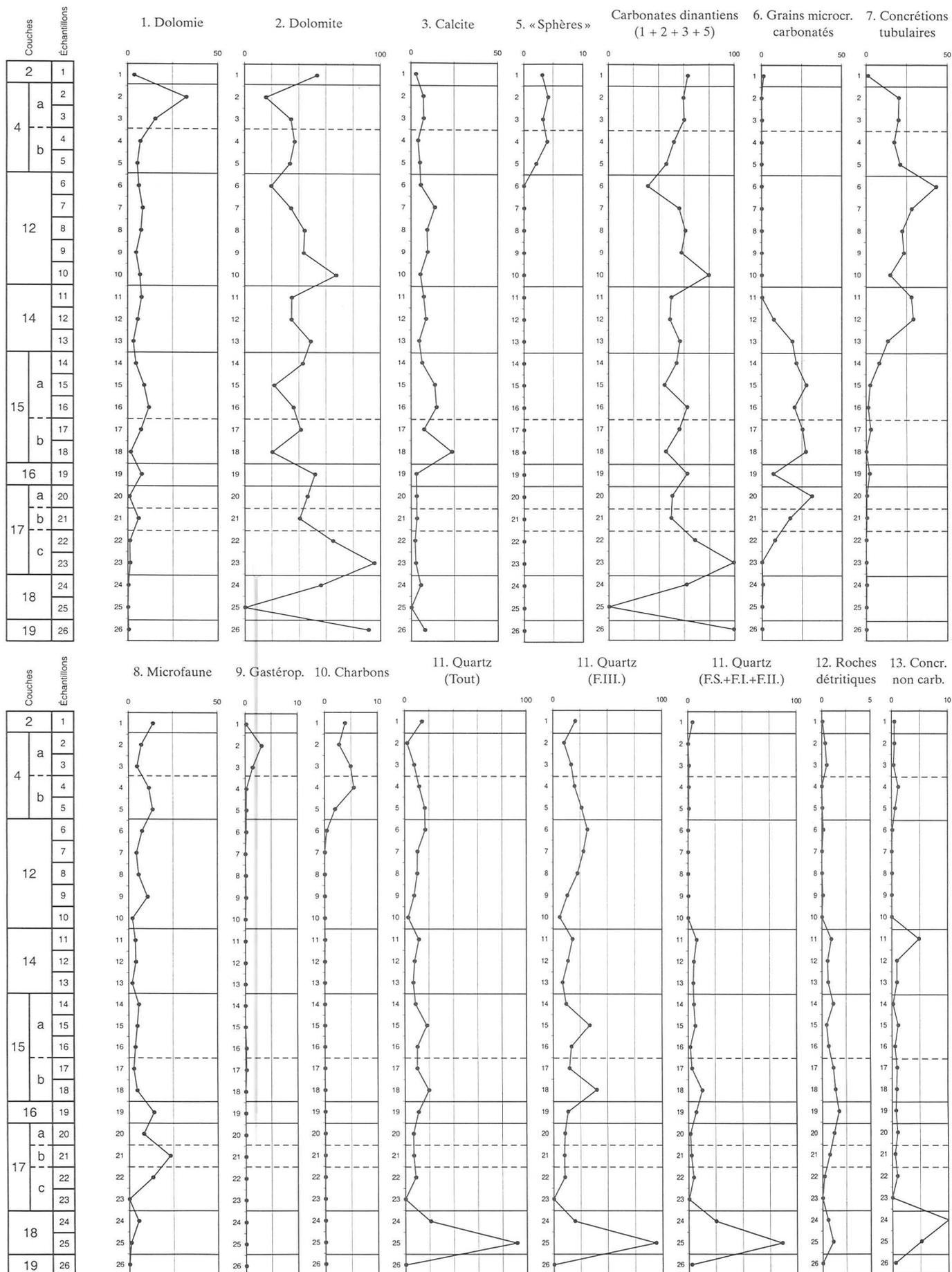


FIG. 12. – Nature du sédiment : variations des catégories définies dans ce travail (voir tableau 3, p. 132) au sein de la séquence étudiée. En abscisse, on trouve les proportions de chaque catégorie, sous la forme d'un poids exprimé en %. En ordonnée sont figurés les numéros des échantillons étudiés.

F.I., F.II. et F.III.), sous forme de pourcentages par rapport au poids total de sable brut. Les quatre fractions ont été rassemblées car elles ne présentaient pas entre elles de différences significatives. Seule la catégorie

« quartz » fait exception. Elle est représentée par trois courbes. La première présente les variations pour le sable total. La deuxième concerne F.III., s'écartant nettement des trois autres fractions. La troisième présente F.S., F.I.

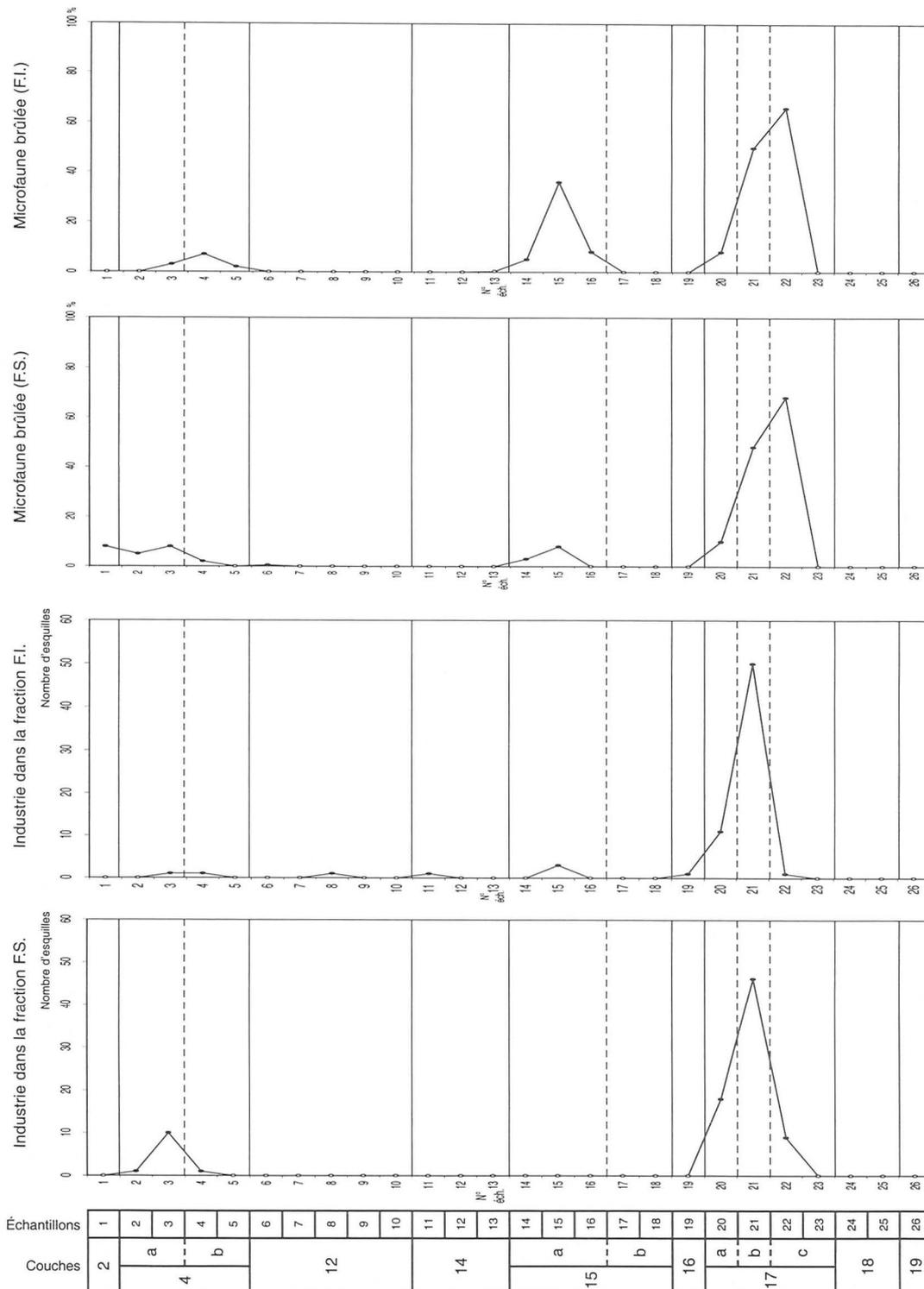


FIG. 13. – Traits anthropiques (industrie lithique et microfaune brûlée) dans les fractions F.S. (2 000 à 630 µm) et F.I. (630 à 315 µm). Les données relatives à l'industrie lithique correspondent au nombre d'esquilles comptées alors que les données relatives à la microfaune brûlée représentent un pourcentage par rapport à la concentration en microfaune totale (brûlée ou non) de l'échantillon. Les cercles blancs représentent des valeurs nulles.

et F.II., rassemblés car montrant les mêmes tendances. Nous sommes donc en présence de deux populations distinctes (voir § 4.3.2.2 et 4.4.2.2).

Remarquons qu'en ordonnée des différents graphiques composant la figure 12, on trouve les numéros d'échantillons et pas l'altitude de ces échantillons. Cette option fut prise par souci de clarté, certains échantillons étant trop proches l'un de l'autre altimétriquement pour permettre une bonne lecture de l'information. Cette remarque s'applique à tous les graphiques présentés dans ce travail (sauf la figure 21 : voir § 3.5.2).

Il ressort de l'analyse de la figure 12 que les constituants principaux de la fraction sableuse sont la dolomite, les « grains microcristallins carbonatés », les « concrétions tubulaires », le quartz et la microfaune. En ce qui concerne les variations des catégories au sein de la stratigraphie, elles seront discutées au § 4.

3.2.2.4. Microfaune brûlée et industrie lithique

Ces deux éléments nous éclairent quant à l'action anthropique sur le site. Les esquilles de silex résultent d'une taille intentionnelle de la pierre (présence d'un bulbe de percussion, ...). Quant à la microfaune, sa carbonisation est probablement liée à la présence de foyers. En effet, la figure 13 nous montre que cette catégorie, dans les fractions les plus grossières (F.S. et F.I.), présente trois pics situés aux mêmes endroits que les pics les plus importants des esquilles de silex.

Des esquilles de silex furent observées dans plusieurs échantillons. Signalons d'emblée que notre propos n'est bien entendu pas de repérer les occupations archéologiques à l'aide du binoculaire, ceci d'autant plus qu'un remaniement par ruissellement de ces esquilles de silex n'est pas à exclure vu leurs petites dimensions. Les remarques qui suivent nous paraissent toutefois intéressantes.

La présence des esquilles de silex et de la microfaune brûlée en grande quantité dans les couches 4 (Mésolithique) et 17 (Paléolithique moyen) est clairement à mettre en rapport avec les occupations archéologiques, puisque des artefacts furent découverts dans ces mêmes couches, en cours de fouille. La présence d'esquilles de silex dans les trois unités lithostratigraphiques que renferme la couche 17 pourrait témoigner de l'existence de plusieurs occupations au Paléolithique moyen.

Ceci est à confirmer par les fouilles archéologiques. Rappelons que, jusqu'ici, la couche 17 avait été considérée comme un seul bloc, les artefacts s'y rapportant étant attribués à une seule occupation (voir aussi § 4.3.3, p. 163).

Le cas de la couche 15 est plus délicat car si la microfaune brûlée est abondante, les esquilles de silex sont nettement moins nombreuses. En outre, la position exacte du niveau aurignacien demeure inconnue à ce jour, seuls quelques rares artefacts ayant été découverts en place.

Quant aux esquilles de silex des échantillons 8, 11 et 19, leur nombre très faible (fig. 13), l'absence de microfaune brûlée et surtout l'absence de niveau archéologique repéré en cours de fouille nous invitent à rester très critique sur la signification de leur présence, un remaniement étant dans ce cas très probable.

3.2.3. Fraction limono-argileuse (< 40 µm)

Cette fraction n'a pas encore fait l'objet d'une étude approfondie. Seuls quelques échantillons furent préparés à l'I.P.H. (Paris) par la méthode de décantation dans du bromoforme CHBr_3 , décrite dans Tourenq (1987:479-482), en vue d'une détermination des minéraux denses. Selon Juvigné (1974), l'emploi de la méthode de décantation « ne permet pas d'extraire tous les minéraux denses d'un échantillon de limon ». Nous avons donc décidé, pour la suite, d'employer une autre technique de séparation : celle par centrifugation (Juvigné, 1974). Les analyses sont actuellement en cours. Toutefois, nous pouvons déjà signaler les quelques résultats, d'ordre qualitatif, d'observations rapides réalisées sur les lames minces préparées par décantation (échantillons 1 à 5). Les principaux minéraux denses qui furent observés sont les suivants : hornblende verte, zircon, tourmaline, rutile, épidote.

3.3. Perte de poids après traitement à H_2O_2 et HCl

La quatrième courbe de la figure 14 présente la perte de poids, exprimée en %, de la fraction inférieure à 2 mm après traitement à H_2O_2 et HCl. Remarquons que cette perte de poids ne concerne pas uniquement les carbonates. L'attaque à H_2O_2 détruit en effet la matière organique. De même, l'étude de

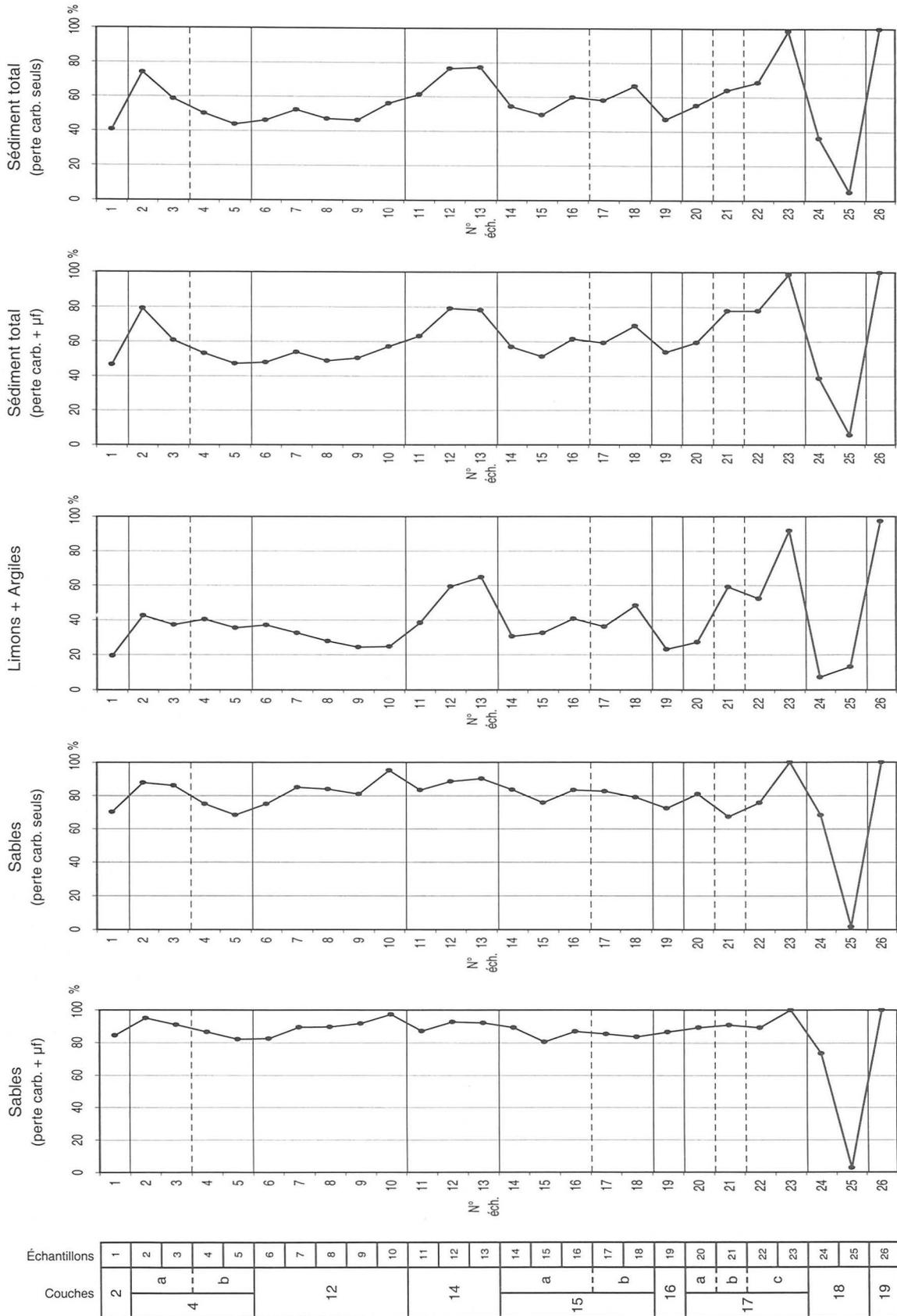


FIG. 14. – Perte de poids (exprimée en %) après traitement à H₂O₂ et HCl au niveau des fractions sableuse et limono-argileuse ainsi que pour le sédiment total (< 2 mm). Pour la fraction sableuse et pour le sédiment total, deux courbes sont présentées : la première fournit les valeurs de la perte en carbonates et en microfaune («carb. + µf»); la seconde présente la perte en carbonates seuls («carb. seuls»). On considère que la fraction limono-argileuse est dépourvue de microfaune (voir § 3.3).

la fraction sableuse au binoculaire (§ 3.2.2) nous a montré que le sédiment était riche en microfaune; or, cette microfaune est détruite par HCl.

Des mesures réalisées par nos soins à l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, sur quelques échantillons, selon la méthode de Gale & Hoare (1991:94-96), ont permis de montrer que le contenu en matières organiques était de l'ordre de 2%. La perte de poids concerne donc essentiellement les carbonates et la microfaune. L'estimation des teneurs en microfaune de chaque échantillon (voir § 3.2.2 et fig. 12) nous permet de proposer une courbe pour la perte en poids de la fraction sableuse ne concernant que les carbonates (fig. 14). La proportion de microfaune dans la fraction limono-argileuse devant être négligeable, la figure 14 présente également la perte de carbonates seuls pour la totalité de la fraction inférieure à 2 mm. Ces courbes de perte en carbonates seuls sont, bien entendu, à considérer avec prudence et sont fournies à titre indicatif.

3.4. Granulométrie

La granulométrie est l'étude de la répartition des éléments de tailles différentes au sein d'une roche. Largement utilisée depuis un siècle (Udden, 1898, cité dans Udden, 1914), elle est essentielle lorsqu'on s'attache à décrire la lithologie des roches meubles. Outre cet aspect descriptif (conduisant par exemple à des corrélations lithostratigraphiques, ou encore au contrôle de l'origine du sédiment), ses applications principales en géologie du Quaternaire concernent la mise en évidence d'altérations (pédogenèse, ...) et surtout la détermination du mode de mise en place du sédiment, la distribution granulométrique étant liée aux modes de transport et de dépôt (voir Gale & Hoare, 1991).

Dans le cadre de cet article, la granulométrie fut employée aux fins suivantes :

- confirmation et précisions éventuelles du découpage stratigraphique;
- caractérisation des sédiments des différentes unités lithologiques en vue de corrélations lithostratigraphiques futures;
- détermination de l'origine des sédiments;
- établissement du mode de mise en place des sédiments.

Les échantillons du *Trou Al'Wesse* étant riches en carbonates, deux granulométries furent réalisées : une sur échantillon brut (non décalcifié), l'autre sur échantillon décalcifié (Hadjouis, 1987:413). Ceci permet, particulièrement en contexte karstique, de mieux comprendre la répartition de ces carbonates au sein du sédiment. Toutefois, la granulométrie sur sédiment brut de la fraction limono-argileuse doit être considérée avec précautions. En effet, la fraction argileuse, avec son comportement colloïdal en solution, est très sensible aux ions polyvalents qui possèdent un fort pouvoir flocculant comme le calcium et le magnésium (Chevallier-Renaud, 1987:428). Ces deux ions sont présents en grande quantité dans nos échantillons en raison de l'abondance de dolomie. Ne pouvant totalement éliminer l'éventualité de phénomènes de floculation lors des analyses de la fraction limono-argileuse brute, nous ne tiendrons compte, lors des interprétations, que des résultats de la granulométrie sur sédiment brut pour la fraction sableuse. Les données relatives à la fraction limono-argileuse non décarbonatée ne seront donc fournies, dans les lignes qui suivent, qu'à titre indicatif.

3.4.1. Méthodologie

Les fractions granulométriques utilisées dans ce travail sont celles en usage au laboratoire de sédimentologie de l'I.P.H. (Paris) et décrites dans Miskovsky (1987). Nous avons, pour les besoins de cet article, introduit des divisions supplémentaires au niveau des sables². L'ensemble des fractions est présenté au tableau 4.

Pour les raisons évoquées plus haut (§ 3.1), la granulométrie de la fraction grossière ne fut pas réalisée. La granulométrie des sables fut réalisée sur une colonne de 17 tamis superposés, s'échelonnant de 2 mm à 40 µm, selon une progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10}$ (norme AFNOR : Association Française de Normalisation)³. Cette colonne est placée sur une secoueuse électrique vibrante pendant dix minutes. Le refus de chaque tamis est ensuite pesé à 0,01 g près. Quant à la granulométrie de la fraction limono-argileuse,

² Les mêmes que celles utilisées pour l'étude de la nature des sables au binoculaire (voir § 3.2.2.1).

³ De -1 à +4,66 en unités phi, selon une progression arithmétique de 0,33 phi.

Tableau 4
Les fractions granulométriques utilisées

| Plus grande largeur des éléments | Nom de la fraction granulométrique | |
|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 1) Supérieure à 10 cm | Blocs | <i>FRACTION GROSSIÈRE</i> |
| 2) De 10 cm à 1 cm | Pierres ou cailloux | |
| 3) De 1 cm à 2 mm | Granules | |
| 4) De 2 mm à 630 µm | Sables très grossiers (F.S.*) | <i>FRACTION SABLEUSE</i> |
| 5) De 630 µm à 315 µm | Sables grossiers (F.I.*) | |
| 6) De 315 µm à 160 µm | Sables moyens (F.II.*) | |
| 7) De 160 µm à 40 µm | Sables fins (F.III.*) | |
| 8) De 40 µm à 2 µm | Limons | <i>FRACTION LIMONO-ARGILEUSE</i> |
| 9) Inférieure à 2 µm | Argiles | |

* F.S., F.I., F.II., F.III. : nomenclature des fractions utilisées pour l'étude de la nature des sables (voir tableau 2, p. 127).

elle fut obtenue à l'aide du *Sedigraph 5000E* (pour le principe de l'appareil, voir Chevallier-Renaud, 1987:429). Le dispersant utilisé est l'hexamétaphosphate de sodium (NaPO_3)₆.

Remarquons que pour présenter graphiquement les données granulométriques de la fraction limono-argileuse de la même manière que les données de la fraction sableuse, il est nécessaire de procéder à un petit artifice. En effet, il faut déterminer le diamètre de « tamis fictifs » continuant la progression géométrique $\sqrt[10]{10}$ et transcrire en pourcentages par rapport au poids total de l'échantillon (sables + limons + argiles) les données de la courbe du *Sedigraph*.

3.4.2. Présentation des données

Les données fournies par les analyses granulométriques sont présentées sous différentes formes aux figures 15 à 19.

Avant de passer à la discussion des résultats, il convient de s'arrêter sur une particularité que présentent toutes les courbes cumulatives : un palier (ou une diminution de pente) entre 50 et 40 µm (4,33 et 4,66 phi). Ce palier (fig. 18.1) est presque systématiquement précédé d'une augmentation de la pente de la courbe entre 63 et 50 µm (4 et 4,33 phi). Ce phénomène se matérialise sur les courbes de fréquences par un pic inverse à 40 µm précédé d'un léger mode à 50 µm (fig. 18.2). La récurrence de cet état de fait plaide en faveur de son caractère artificiel et exclut une bi- ou plurimodalité liée à un mélange naturel. Remarquons que nous avons déjà rencontré ce

phénomène sur des courbes granulométriques d'échantillons issus d'autres sites.

Plusieurs tests furent réalisés à l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, en collaboration avec P. Haesaerts, afin de préciser l'origine d'un tel phénomène. Nous sommes parvenus à la conclusion qu'une partie du sédiment de chaque échantillon était retenu sur le tamis de 50 µm (4,33 phi) occasionnant un déficit sur le tamis de 40 µm (4,66 phi). D'après nos expériences, cette retenue ne serait pas liée à une surcharge de sédiment sur les tamis mais plutôt à des forces électrostatiques qui provoqueraient une cohésion entre les grains en dessous d'un certain diamètre. Des expériences complémentaires sont d'ores et déjà prévues afin de confirmer cette hypothèse. Quoi qu'il en soit, il ressort de nos expériences que le problème est d'origine technique et peut donc être ignoré. En conséquence, nous ne tiendrons compte, pour la fraction sableuse, que des variations de la courbe entre 50 µm et 2 mm.

3.4.3. Discussion des résultats

Nous avons essayé de grouper les échantillons étudiés sur base de leurs caractéristiques granulométriques et ce, indépendamment du découpage stratigraphique. La définition de ces groupes s'est faite essentiellement au départ du sédiment décarbonaté et cela pour deux raisons. D'abord et surtout, comme nous l'avons signalé plus haut, les analyses granulométriques du sédiment brut (non décarbonaté) peuvent être faussées pour

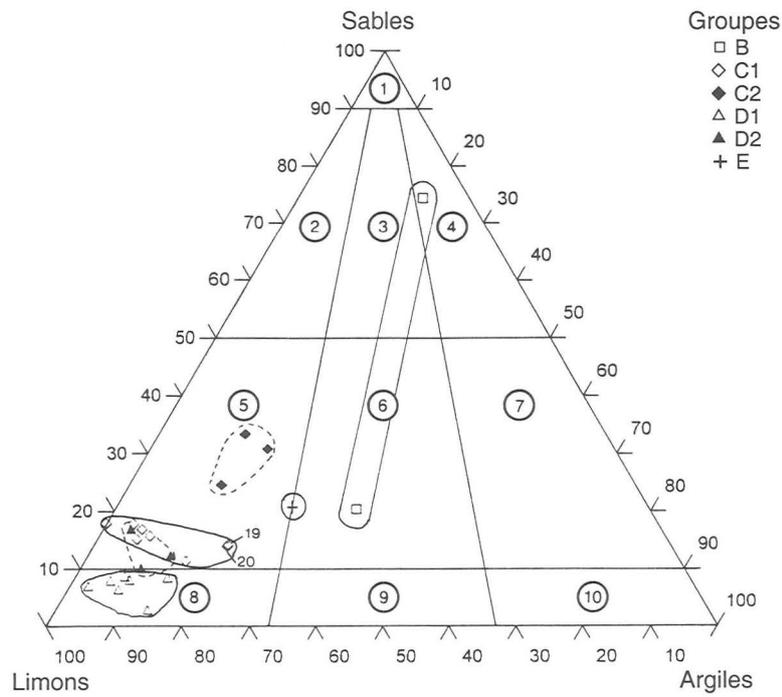


FIG. 15a. – Triangle des textures pour le sédiment décarbonaté.

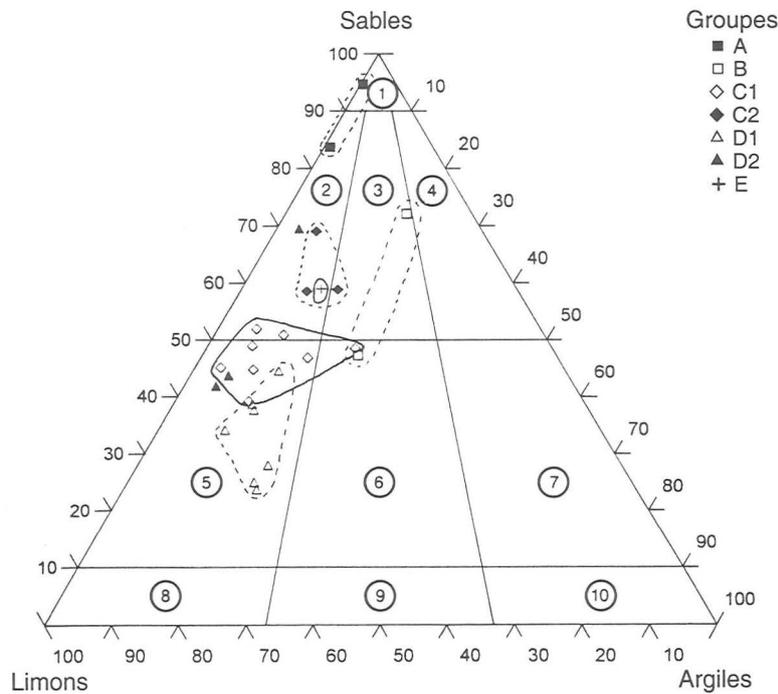


FIG. 15b. – Triangle des textures pour le sédiment brut.

Les divisions utilisées dans les triangles sont celles de Folk, 1954 (cité dans McBride, 1971).

- | | |
|--|--|
| 1. <i>Sand</i> (sable) | 6. <i>Sandy mud</i> (limon argilo-sableux) |
| 2. <i>Silty sand</i> (sable limoneux) | 7. <i>Sandy clay</i> (argile sableuse) |
| 3. <i>Muddy sand</i> (sable limono-argileux) | 8. <i>Silt</i> (limon) |
| 4. <i>Clayey sand</i> (sable argileux) | 9. <i>Mud</i> (limon argileux ou argile limoneuse) |
| 5. <i>Sandy silt</i> (limon sableux) | 10. <i>Clay</i> (argile) |

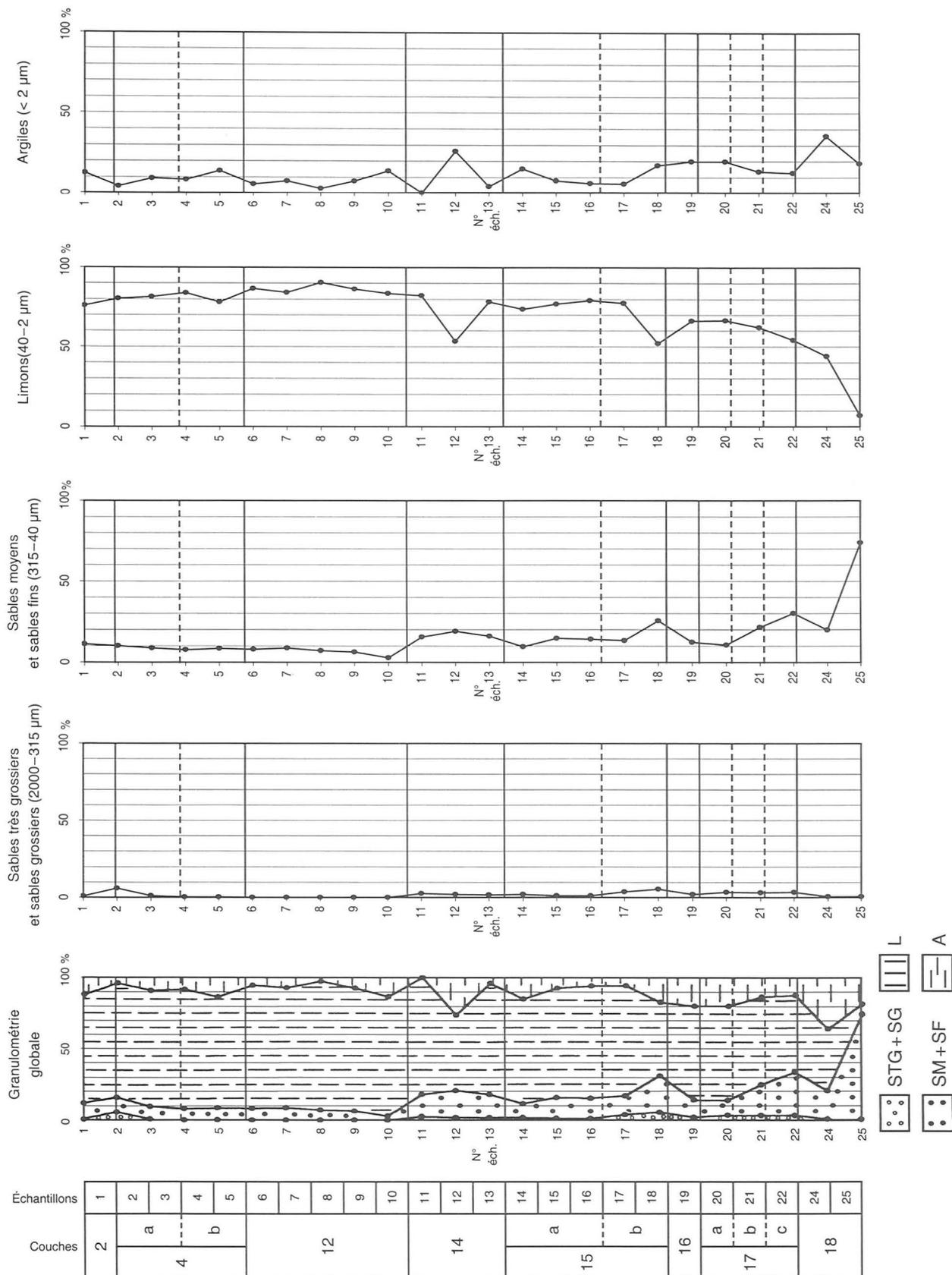


FIG. 16a. – Granulométrie des sédiments décarbonatés.

STG = sables très grossiers (2000–630 µm); SG = sables grossiers (630–315 µm); SM = sables moyens (315–160 µm); SF = sables fins (160–40 µm); L = limons (40–2 µm); A = argiles (< 2 µm).

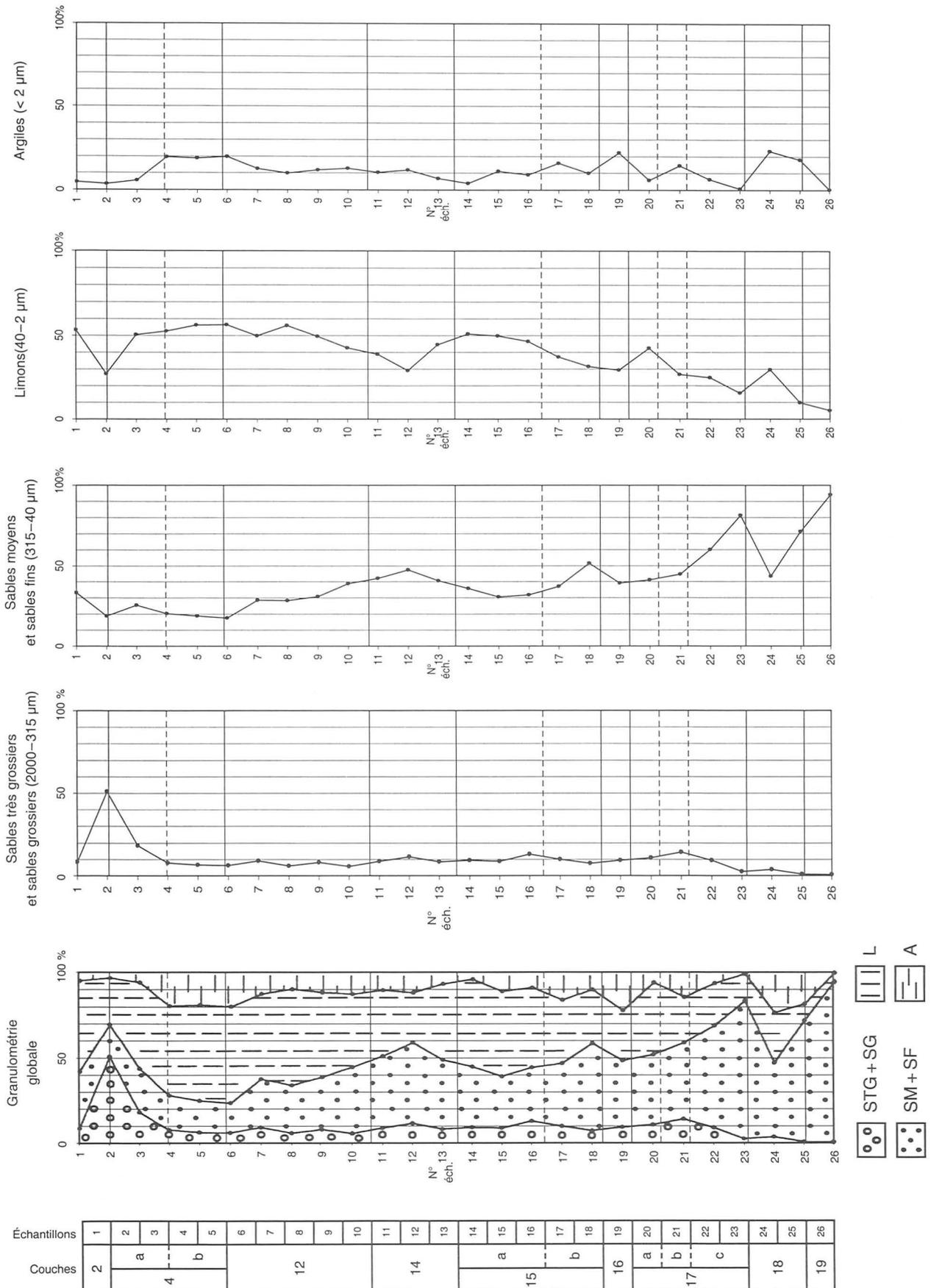


FIG. 16b. - Granulométrie des sédiments bruts.

STG = sables très grossiers (2000-630 µm); SG = sables grossiers (630-315 µm); SM = sables moyens (315-160 µm); SF = sables fins (160-40 µm); L = limons (40-2 µm); A = argiles (< 2 µm).

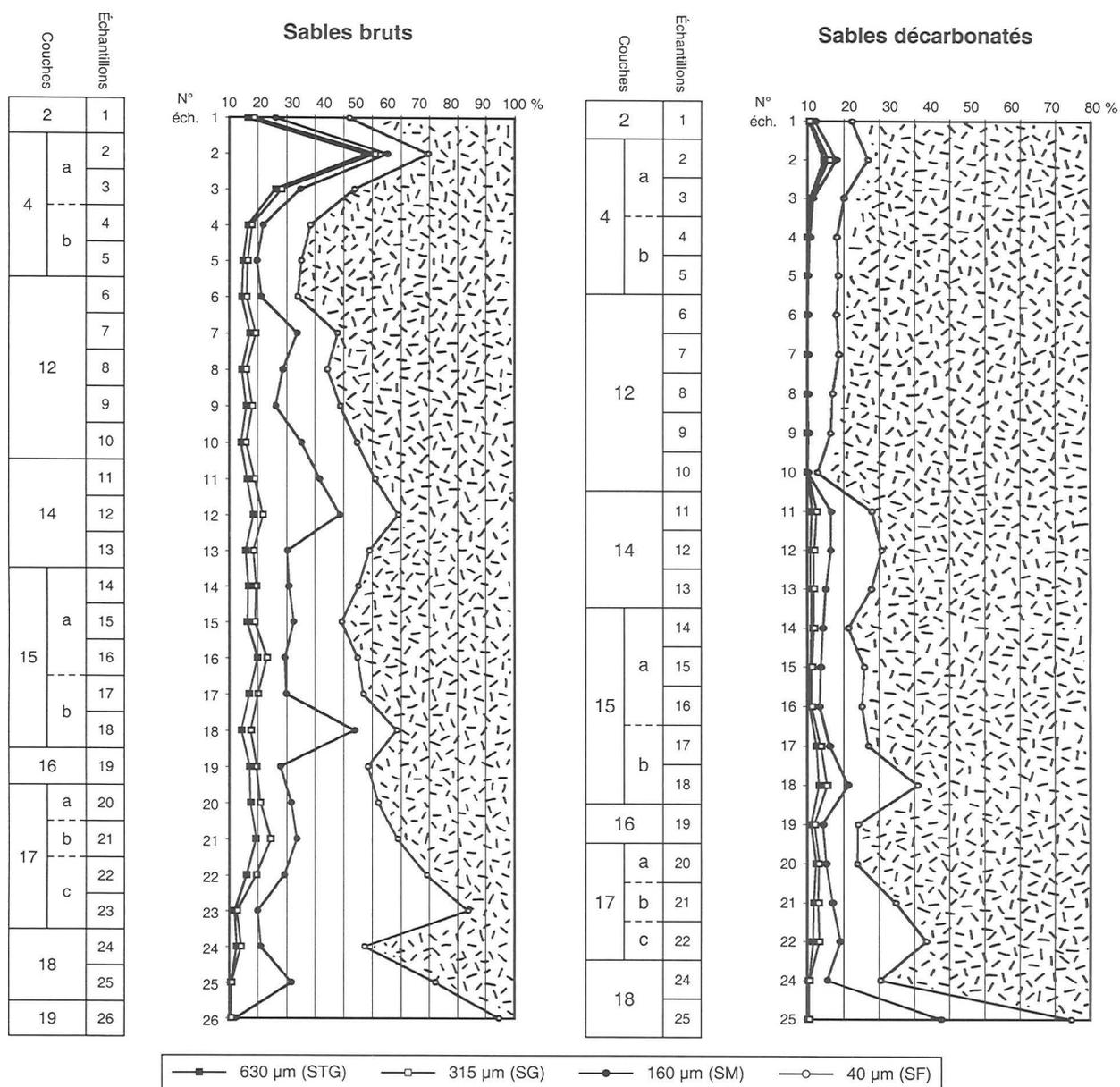


FIG. 17. – Granulométrie des sables (décarbonatés et bruts).

L'aire située à gauche de la courbe de 630 µm correspond aux sables très grossiers (STG : 2000–630 µm). L'aire délimitée par les courbes «630 µm» et «315 µm» correspond aux sables grossiers (SG : 630–315 µm). L'aire délimitée par les courbes «315 µm» et «160 µm» correspond aux sables moyens (SM : 315–160 µm). Quant à l'aire délimitée par les courbes «160 µm» et «40 µm», elle correspond aux sables fins (SF : 160–40 µm). La zone tramée, au-delà de la courbe de 40 µm, correspond aux limons et aux argiles.

la fraction limono-argileuse suite à des problèmes de floculation. Ensuite, l'étude de la nature du sédiment (voir § 3.2) a mis en évidence la présence de microfaune et de carbonates secondaires, deux catégories d'éléments amenant des erreurs dans la détermination du mode de transport/dépôt du sédiment.

Ainsi, parmi les 26 échantillons étudiés dans ce travail, 5 groupes furent définis sur des bases granulométriques (tableau 5).

3.4.3.1. Groupe A

La caractéristique principale de ce groupe est de présenter un sédiment presque totalement carbonaté (0,08 et 0,02 g de résidu après traitement à l'acide). Ce groupe se distingue aussi sur d'autres bases. En effet, les courbes de fréquences du sédiment brut (fig. 18.2b) montrent que le sédiment des deux échantillons concernés est unimodal, sa classe modale, très importante (30 et 40 %), se situant

Tableau 5
Les groupes granulométriques

| Groupe | Unités lithostratigraphiques concernées | N ^{os} échantillons | |
|--------|---|------------------------------|----------------|
| A | Couche 19 | 26 | |
| | Couche 17 | 23 | |
| B | B1 Couche 18 | 25 | |
| | B2 Couche 18 | 24 | |
| C | C1 | Couche 17 | 20 |
| | | Couche 16 | 19 |
| | | Couche 15 | 14, 15, 16, 17 |
| | | Couche 14 | 11, 13 |
| | C2 | Couche 17 | 21, 22 |
| | | Couche 15 | 18 |
| D | D1 | Couche 12 | 6, 7, 8, 9, 10 |
| | | Couche 4b | 4, 5 |
| | D2 | Couche 4a | 2, 3 |
| | | Couche 2 | 1 |
| E | Couche 14 | 12 | |

entre 80 et 100 μm . Les sables composent 84 à 95 % du sédiment (fig. 15b, 16b et 18.1b). En outre, le sédiment de ce groupe est le mieux classé de tous, comme en témoignent l'importance de sa classe modale (30 à 40 % : tableau 6 et fig. 18.2b) ainsi que la figure 18.1b.

Tableau 6

Paramètres granulométriques du sédiment brut

Les chiffres entre parenthèses indiquent l'importance, en %, de la classe modale des deux échantillons du groupe A.

| Paramètres granulométriques | Groupe A |
|------------------------------------|--|
| Sables | 95 et 84 % |
| Sables très grossiers et grossiers | 1 et 3 % |
| Sables moyens et fins | 94 et 81 % |
| Limons + Argiles | 5 et 16 % |
| Classe modale principale | 80–100 μm (40 % et 30 %) |

3.4.3.2. Groupe B

Ce groupe comporte deux échantillons assez différents. Ils ont été regroupés car ils présentent certaines particularités en commun, bien visibles sur les courbes de fréquences (fig. 18.2a et b) : la classe modale principale est située aux environs de 160 μm pour le sédiment décarbonaté et aux environs de 125 μm pour le sédiment brut. Une zone complexe

présentant plusieurs modes mineurs existe aussi au niveau de la fraction limono-argileuse.

Les différences entre les deux échantillons se marquent surtout au niveau de la fraction limono-argileuse. Pour le sédiment décarbonaté, celle-ci est nettement plus importante pour l'échantillon 24 : 79 % contre 26 % pour l'échantillon 25 (tableau 7.1 et fig. 15a, 18.1a et 18.2a). En outre, l'échantillon 24 possède le taux d'argile le plus élevé de tous les échantillons étudiés, avec 36 % (fig. 16a).

Tableau 7.1

Paramètres granulométriques du sédiment décarbonaté

Les chiffres entre parenthèses indiquent l'importance, en %, de la classe modale.

| Paramètres granulométriques | Groupe B1 (éch. 25) | Groupe B2 (éch. 24) |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Sables | 74 % | 21 % |
| Sables très grossiers et grossiers | 0,5 % | 1 % |
| Sables moyens et fins | 73,5 % | 20 % |
| Limons + Argiles | 26 % | 79 % |
| Classe modale principale | 160–200 μm (29 %) | 125–160 μm (6 %) |

Le classement du sédiment décarbonaté des deux échantillons diffère aussi beaucoup (fig. 19). Remarquons ici que les deux indices de classement (celui de Folk et Ward : « *Standard deviation* » et celui de Trask : S_0) sont fort différents : d'après l'indice de Folk et Ward, le sédiment du groupe B est le moins bien classé de tous (3,3); par contre, d'après l'indice de Trask, si l'échantillon 24 est le plus mal classé (4,23), il est talonné par deux autres échantillons (12 et 18) avec une valeur de 4,2. Quand à l'échantillon 25, il se place dans une position centrale par rapport aux autres échantillons (fig. 19). Suivant en cela Gale & Hoare (1991), nous accordons plus de crédits à l'indice de Folk et Ward qui se base sur 4 percentiles contre 2 pour l'indice de Trask.

Comme le montre le tableau 7.2, le sédiment brut de l'échantillon 25 ne présente presque pas de différences par rapport au sédiment décarbonaté. Il n'en va pas de même pour l'échantillon 24, qui accuse une perte après attaque à HCl d'un peu plus de 35 %. Cette perte (fig. 14) se marque surtout au niveau des sables (70 %), la fraction limono-argileuse n'étant presque pas affectée par le traitement à l'acide (7 %).

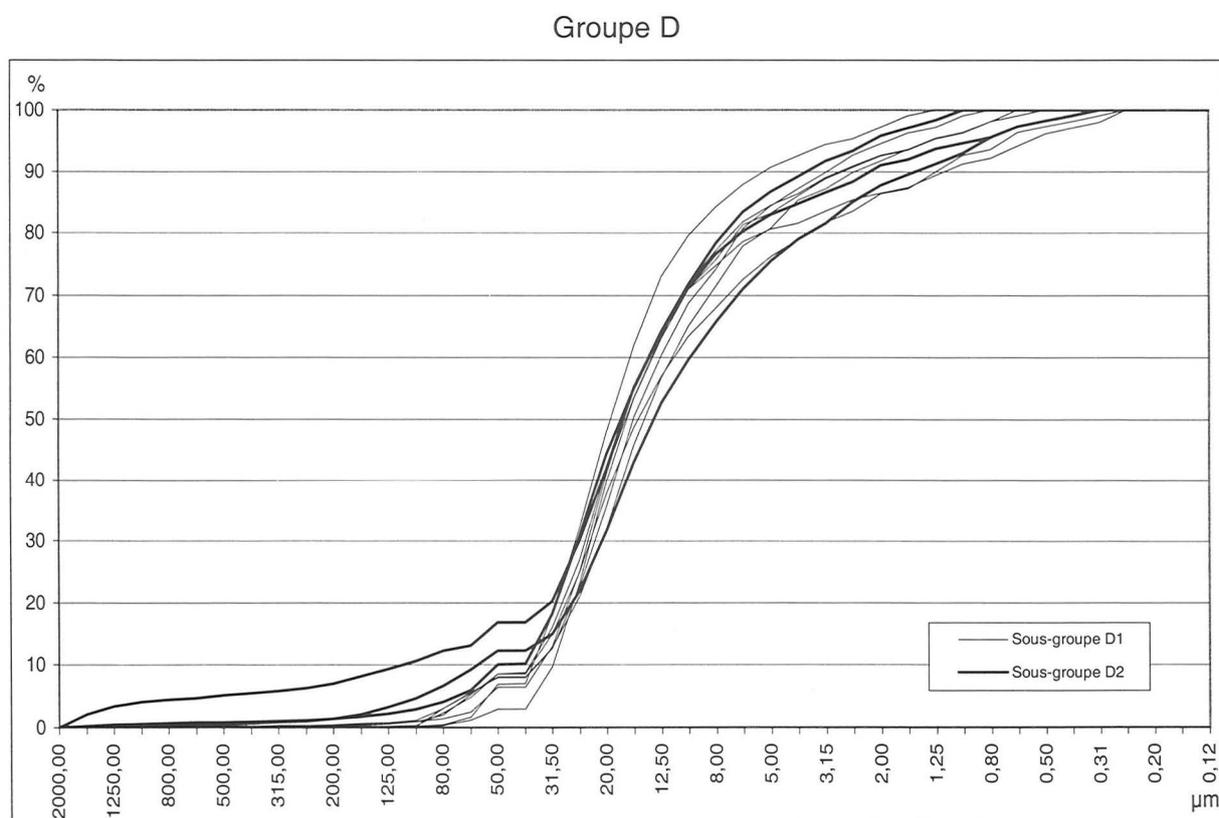
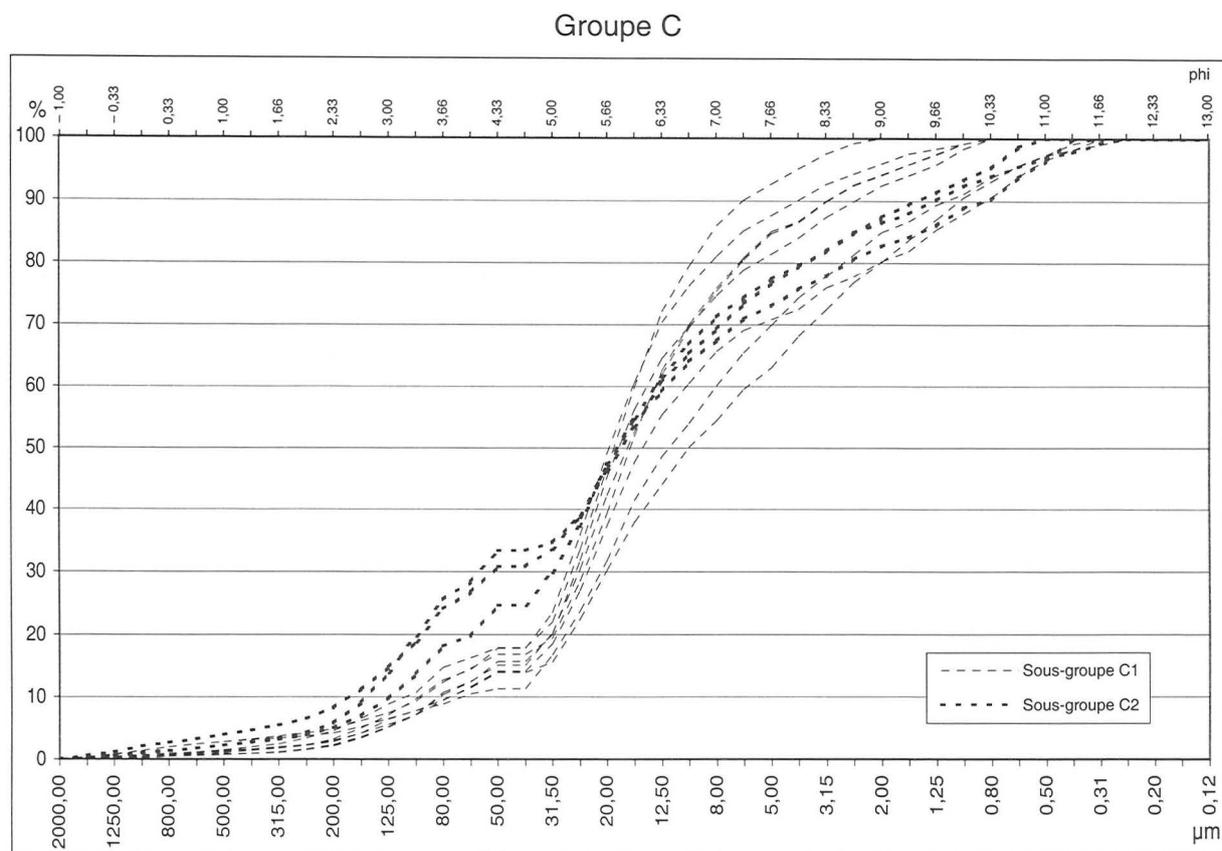
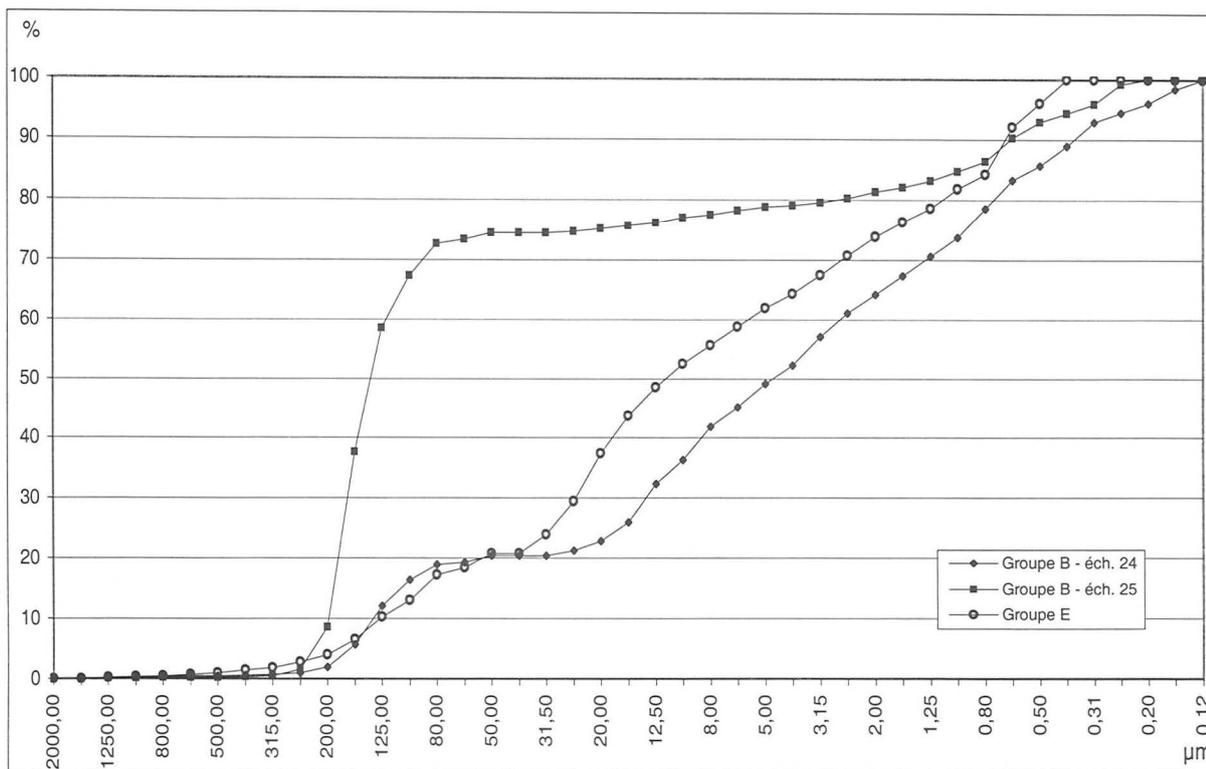


FIG. 18.1a. - Courbes cumulatives du sédiment décarbonaté. Le groupe A n'est pas représenté vu qu'il ne comprend que des échantillons totalement carbonatés.

Groupes B et E



Groupes B, C, D et E
(Tous les échantillons sauf ceux du groupe A sont totalement carbonatés)

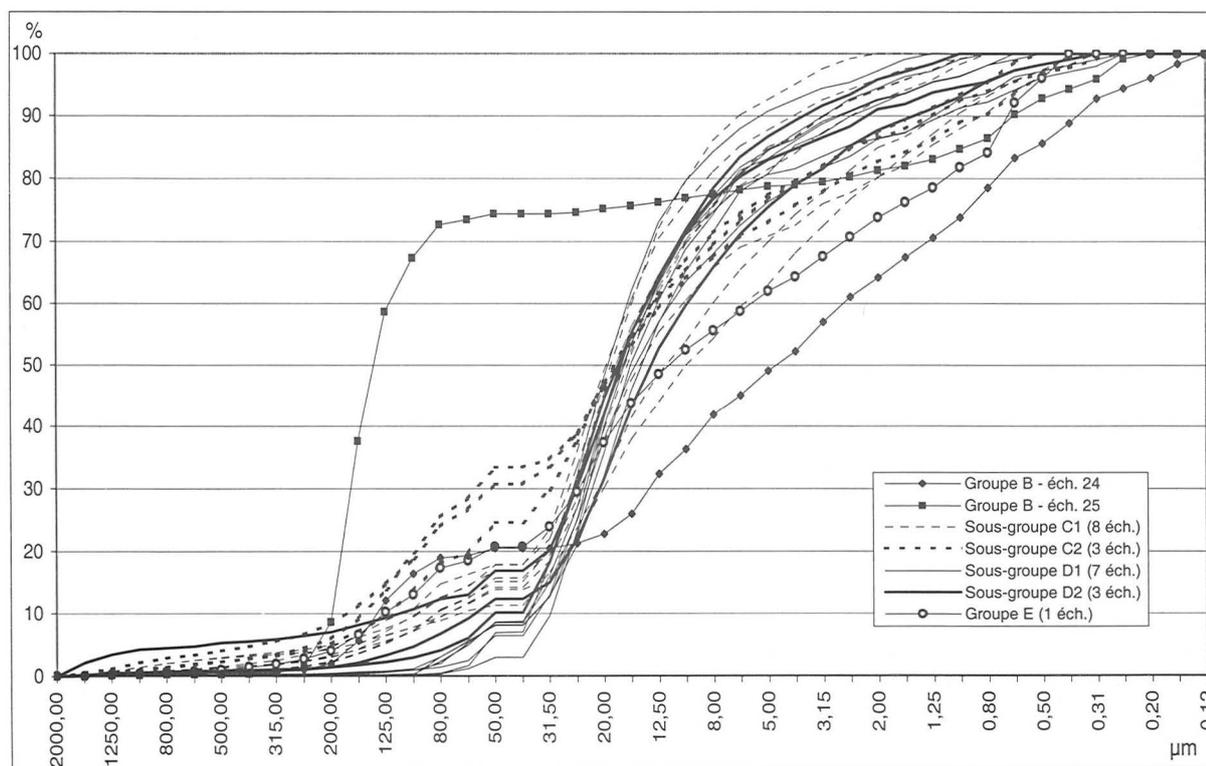
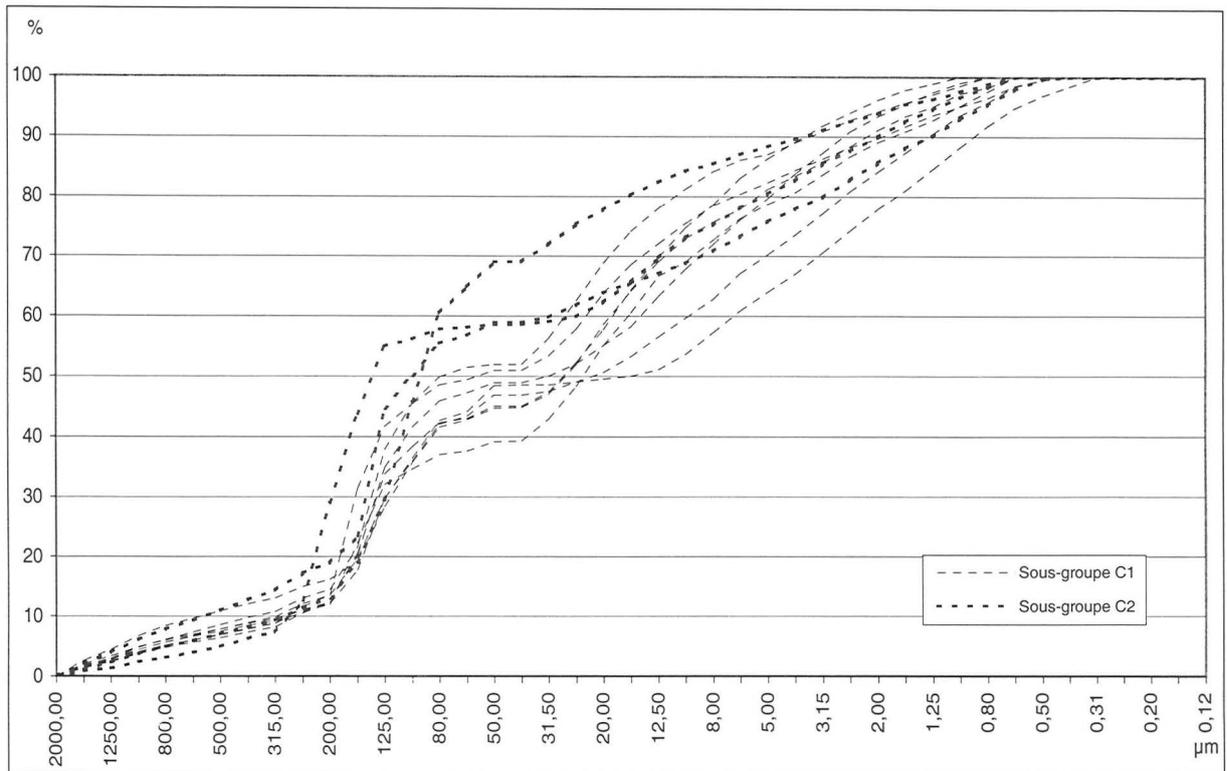


FIG. 18.1a. - (suite).

Groupe C



Groupe D

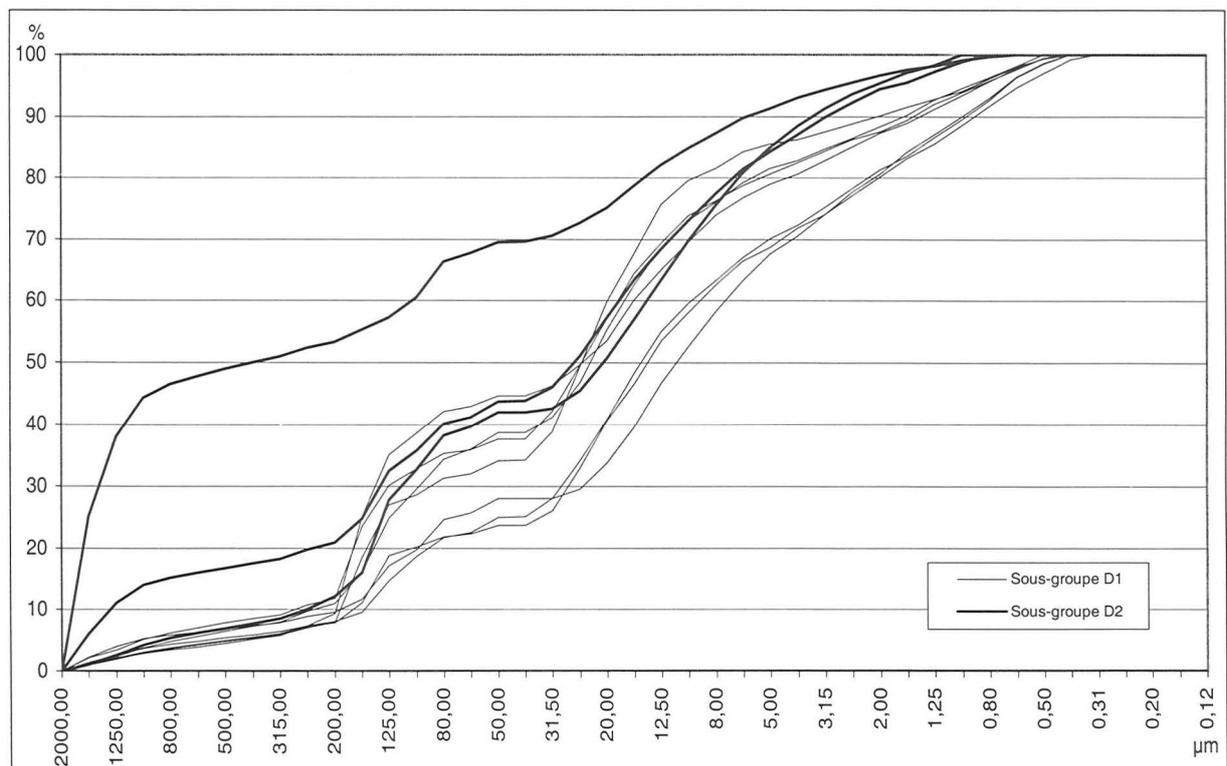
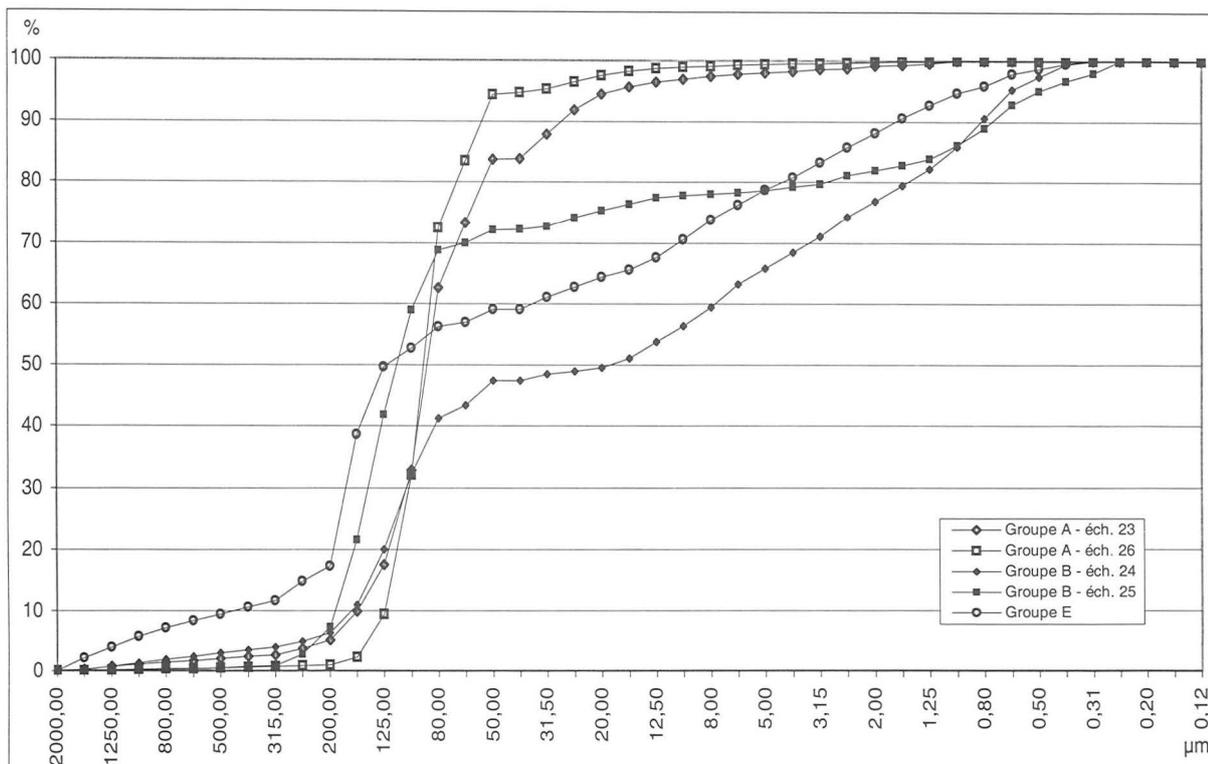


FIG. 18.1b. – Courbes cumulatives du sédiment brut.

Groupes A, B et E



Groupes A, B, C, D et E
(tous les échantillons)

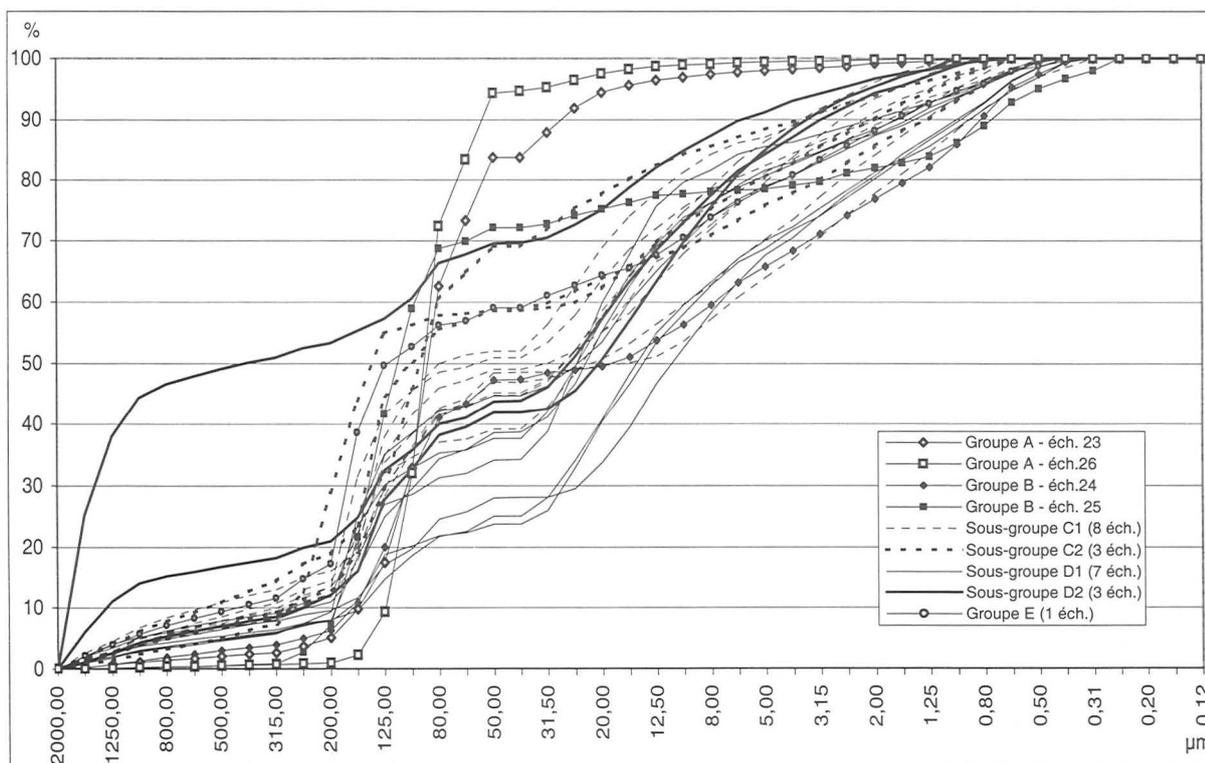


FIG. 18.1b. - (suite).

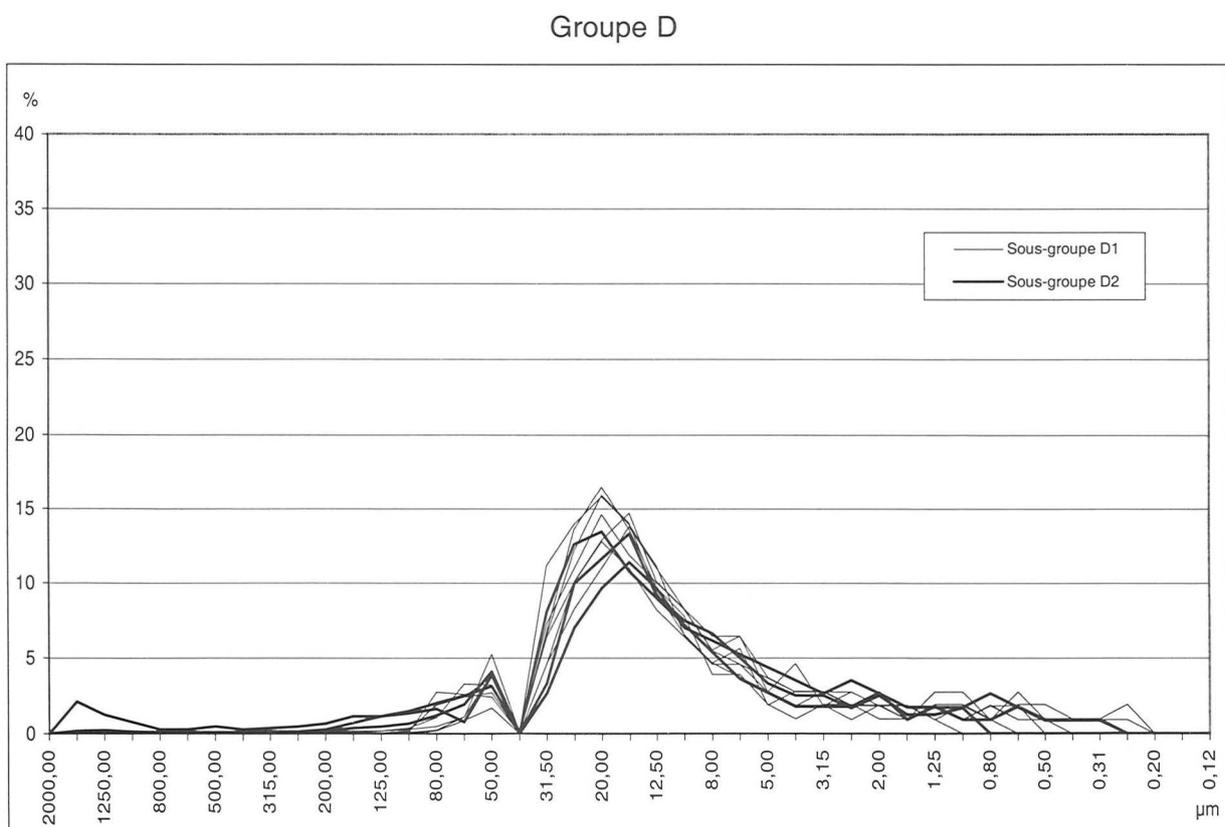
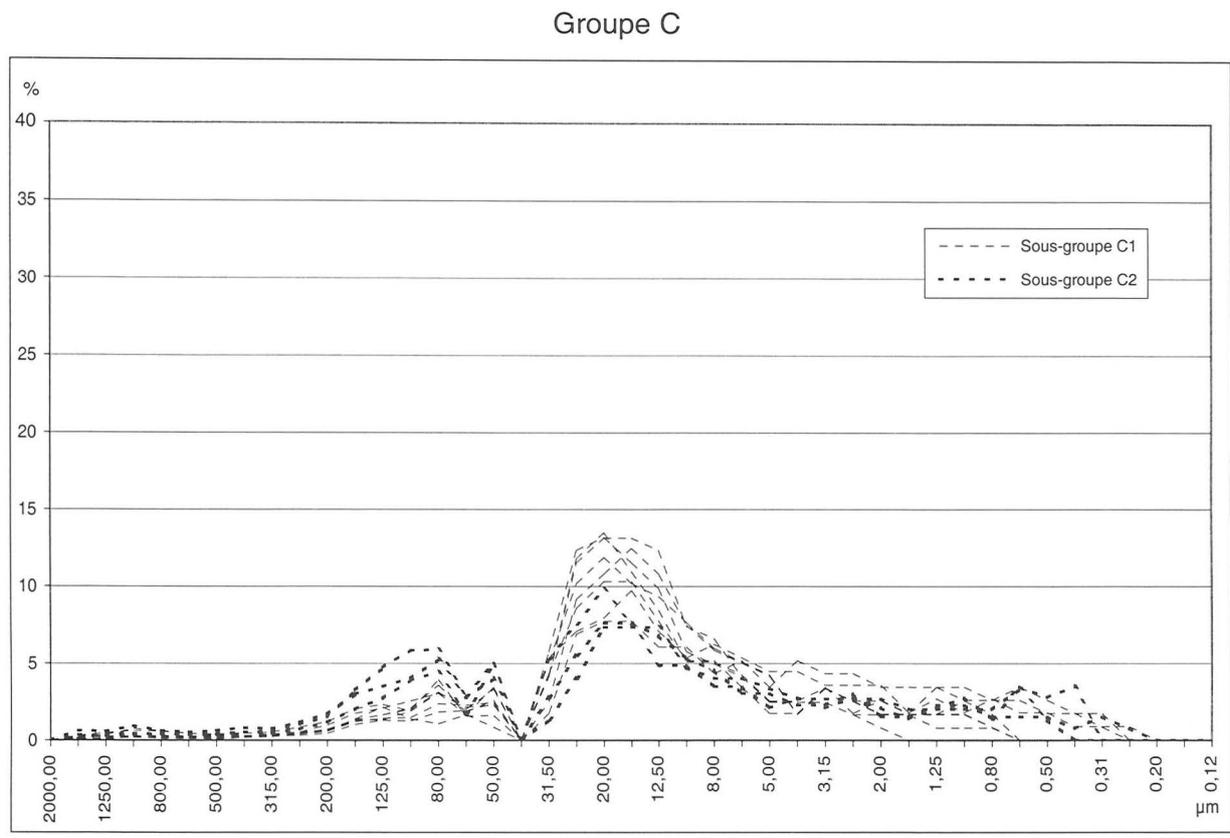
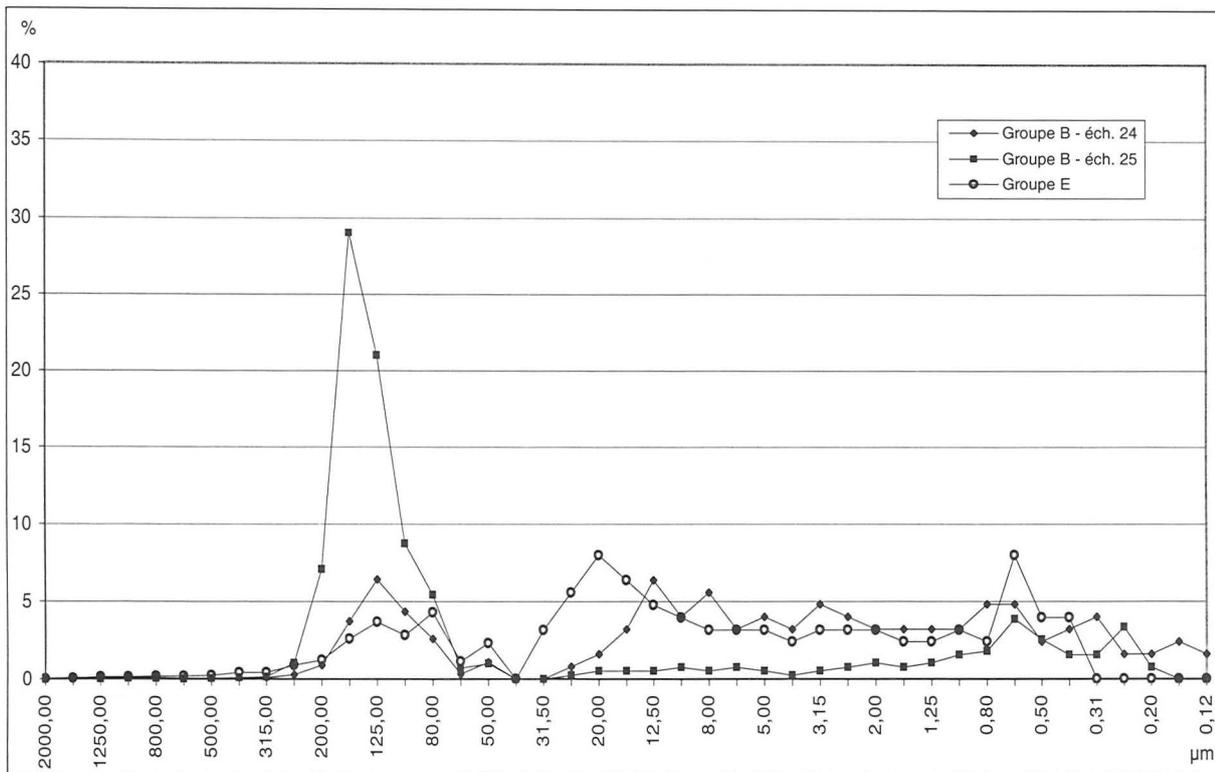


FIG. 18.2a. - Courbes de fréquence du sédiment décarbonaté. Le groupe A n'est pas représenté vu qu'il ne comprend que des échantillons totalement carbonatés.

Groupes B et E



Groupes B, C, D et E
(Tous les échantillons sauf ceux du groupe A sont totalement carbonatés)

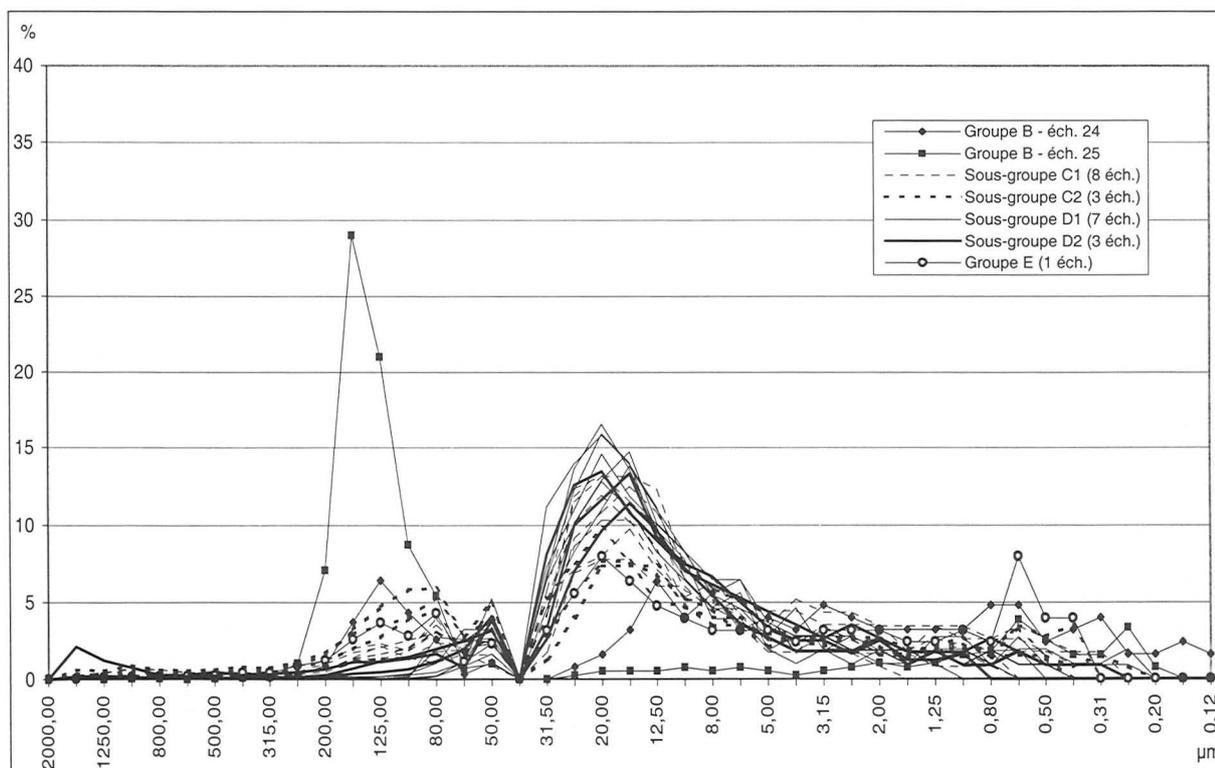
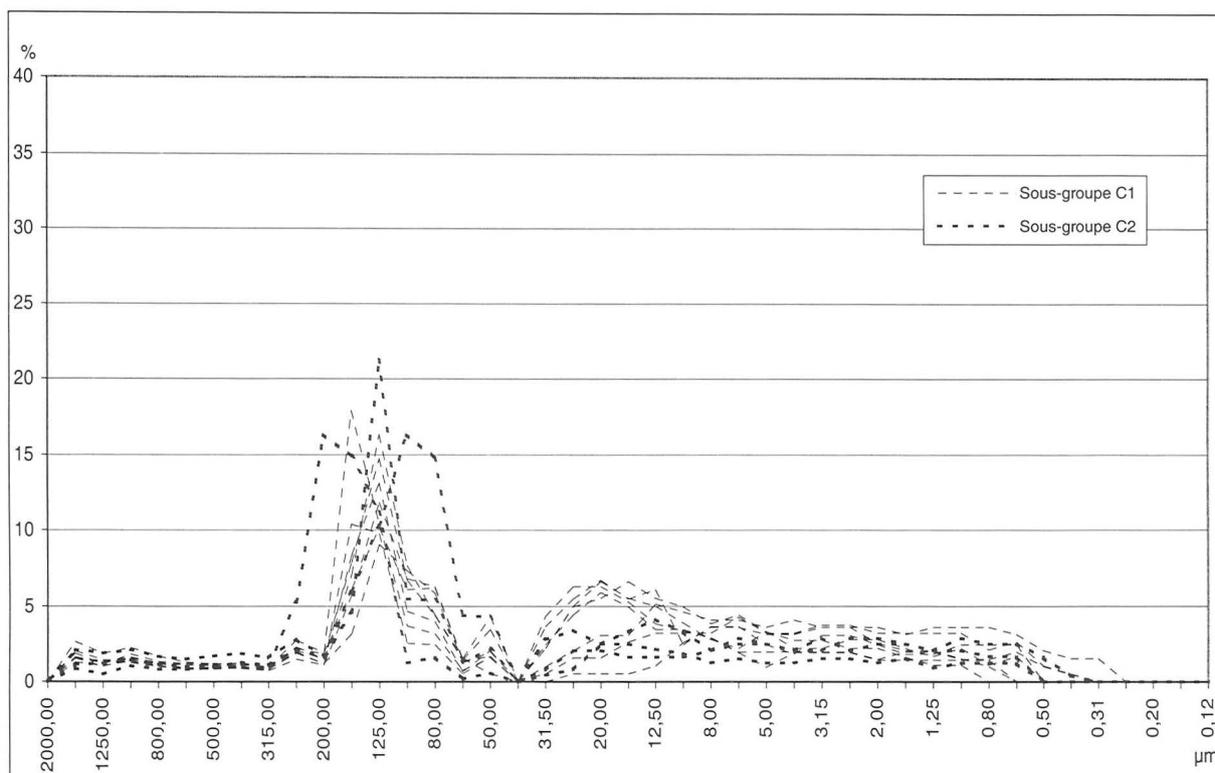


FIG. 18.2a. - (suite).

Groupe C



Groupe D

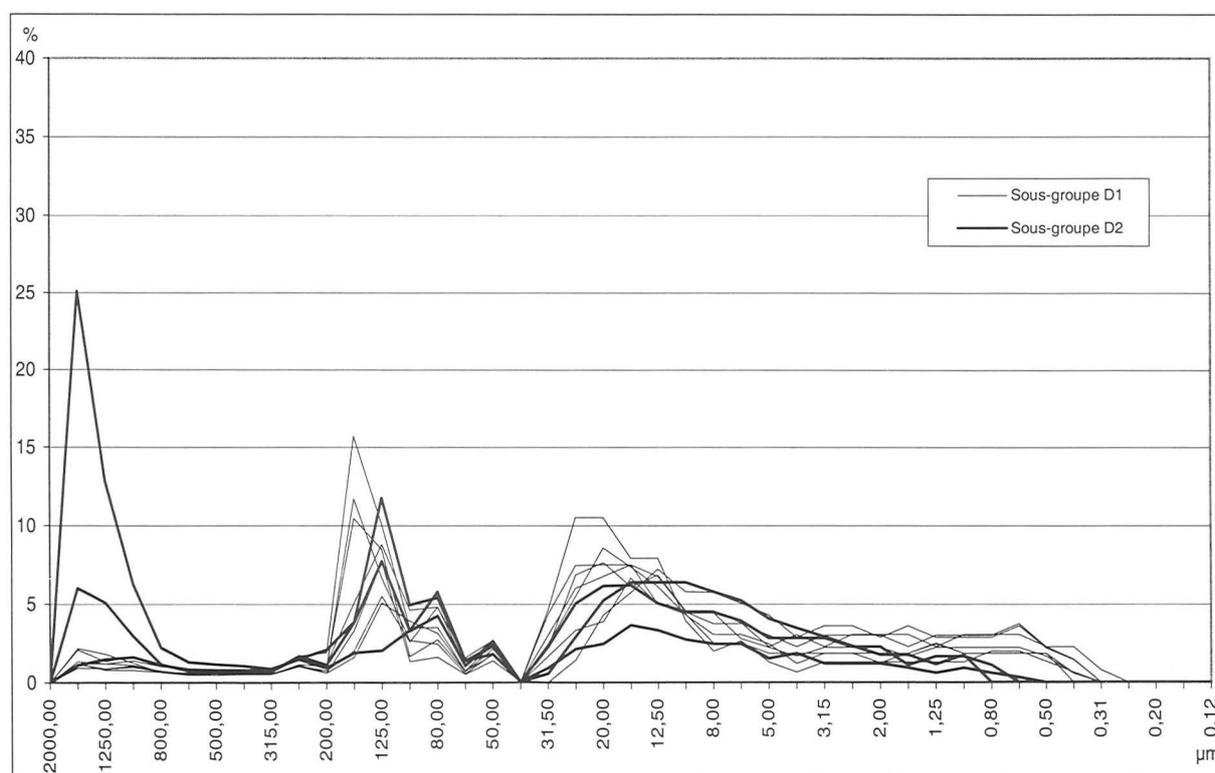
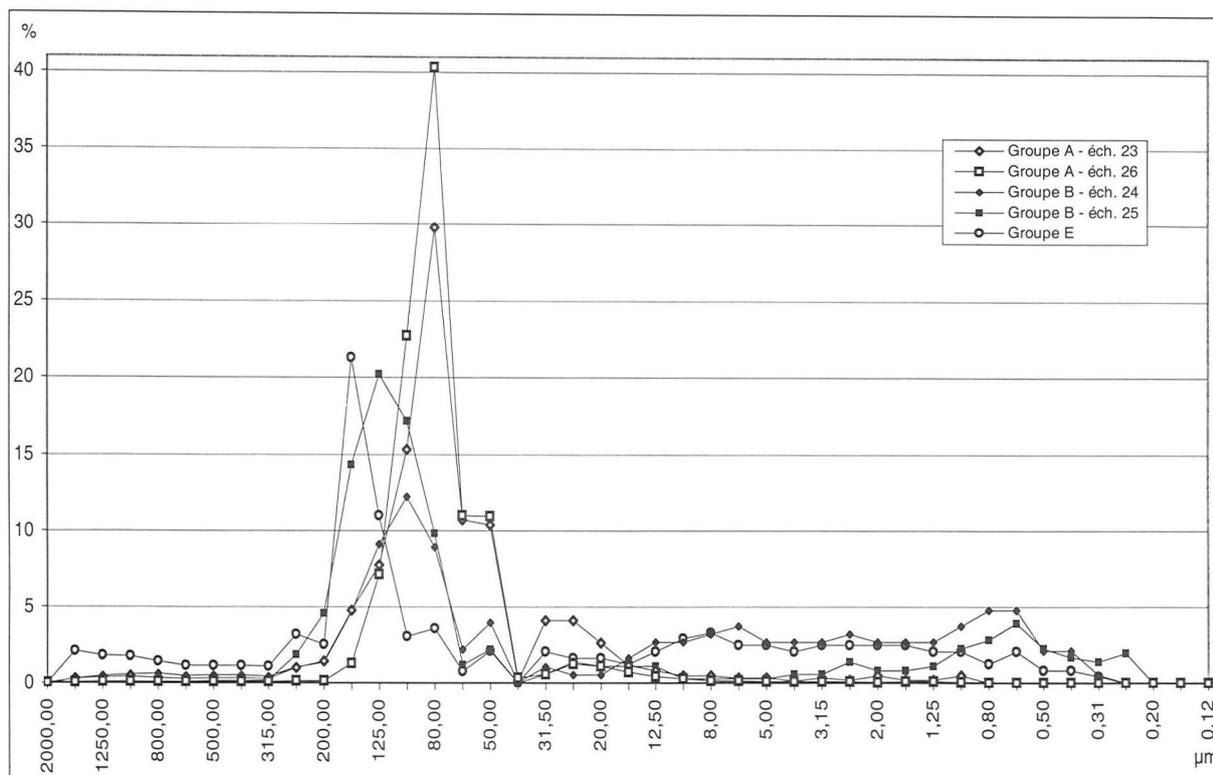


FIG. 18.2b. – Courbes de fréquence du sédiment brut.

Groupe A, B et E



Groupes A, B, C, D et E
(tous les échantillons)

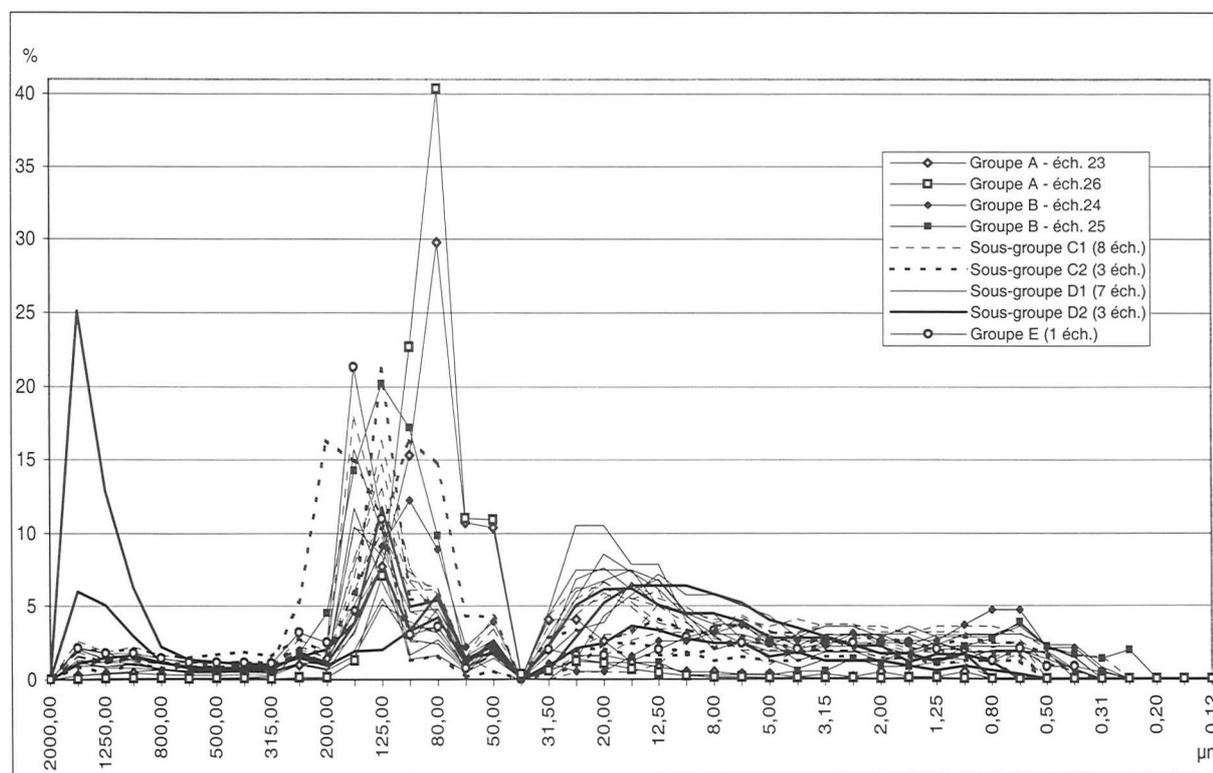


FIG. 18.2b. - (suite).

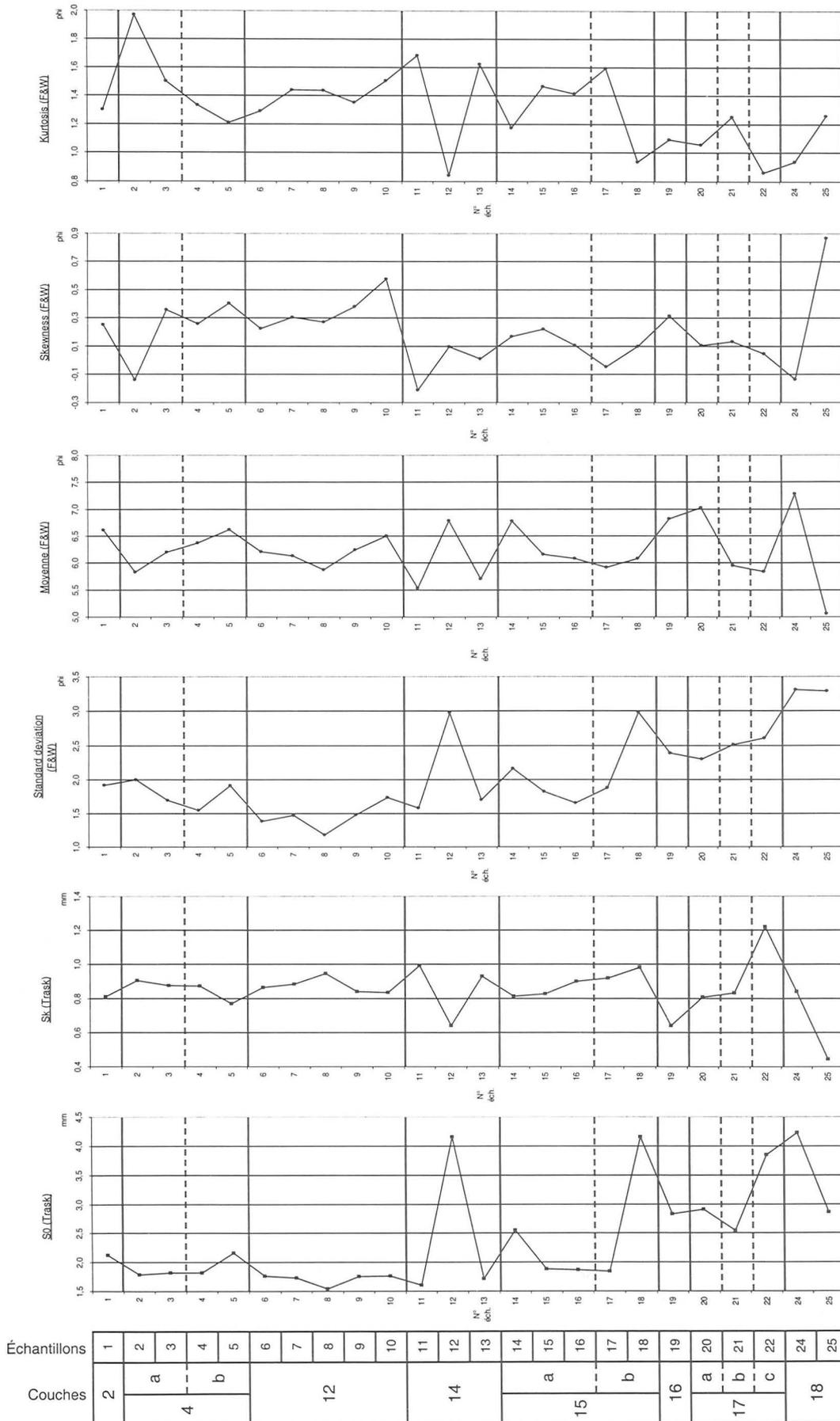


FIG. 19. – Indices granulométriques de Trask (cités dans Hadjouis, 1987, p. 421) et de Folk et Ward (1957).

Tableau 7.2

Paramètres granulométriques du sédiment brut
Les chiffres entre parenthèses indiquent l'importance, en %, de la classe modale.

| Paramètres granulométriques | Groupe B1 (éch. 25) (valeurs sur séd. décarbonaté) | Groupe B2 (éch. 24) |
|------------------------------------|--|------------------------|
| Sables | 72 % | 47 % |
| Sables très grossiers et grossiers | 1 % | 4 % |
| Sables moyens et fins | 71 % | 43 % |
| Limons + Argiles | 28 % | 53 % |
| Classe modale principale | 125–160 µm (20 %) | 100–125 µm (12 %) |

3.4.3.3. Groupe C

Les onze échantillons dont il est question ici (voir tableau 5) ne forment pas un ensemble très homogène (fig. 18.1a). Toutefois, leur sédiment décarbonaté présente des courbes cumulatives d'allure générale semblable (fig. 18.1a), avec une classe modale principale située vers 20 µm (fig. 18.2a). En outre, un caractère les isole du reste des échantillons : la présence d'une classe modale secondaire entre 80 et

100 µm (fig. 18.2a). Ceci nous a conduit à rassembler ces échantillons dans un même groupe granulométrique.

Deux ensembles se distinguent nettement au sein du sédiment décarbonaté des 11 échantillons : C1 et C2 (fig. 15a). Leurs caractéristiques granulométriques sont présentées dans le tableau 8.1. Notons que la classe modale secondaire située vers 80 µm est plus marquée pour le sédiment de C2 (fig. 18.2a). L'indice de classement de Folk et Ward (« *Standard deviation* ») varie de 1,6 à 2,4 pour C1 (mal classé à très mal classé) et de 2,5 à 3 pour C2 (très mal classé). Quant à l'indice d'asymétrie (« *Skewness* »), ses valeurs essentiellement positives (fig. 19) traduisent une dispersion au niveau des particules fines.

Le sédiment brut possède une classe modale principale entre 125 et 160 µm, une deuxième vers 20 µm ainsi que de légers modes secondaires aussi bien dans la fraction sableuse que dans la fraction limono-argileuse (fig. 18.2b). Ses caractéristiques granulométriques sont présentées dans le tableau 8.2.

On constate que C1 et C2 se distinguent aussi sur le sédiment brut.

Tableau 8.1

Paramètres granulométriques du sédiment décarbonaté

Les valeurs entre parenthèses correspondent à la moyenne arithmétique des valeurs de tous les échantillons concernés, sauf pour les « Classes modales principales » où elles correspondent à l'importance, en %, de la classe modale envisagée.

| Paramètres granulométriques | Groupe C | Sous-groupe C1 | Sous-groupe C2 |
|------------------------------------|-------------------------|--|--|
| Sables | 11–33 % (19 %) | 11–18 % (15 %) | 25–33 % (30 %) |
| Sables très grossiers et grossiers | 1–5 % (3 %) | 1–4 % (2 %) | 3–5 % (4 %) |
| Sables moyens et fins | 9–30 % (17 %) | 9–16 % (13 %) | 21–30 % (26 %) |
| Limons + Argiles | 67–89 % (81 %) | 82–89 % (85 %) | 67–75 % (70 %) |
| Classes modales principales | Vers 20 µm* ; 80–100 µm | Vers 20 µm (8–13 %) 80–100 µm (2–4 %) | Vers 20 µm (7–10 %) 80–100 µm (4–6 %) |

* 16–20 µm, 16–25 µm, 12,5–25 µm ou 20–25 µm.

Tableau 8.2

Paramètres granulométriques du sédiment brut

| Paramètres granulométriques | Groupe C | Sous-groupe C1 | Sous-groupe C2 |
|------------------------------------|---------------------------|--|---|
| Sables | 39–69 % (51 %) | 39–52 % (47 %) | 59–69 % (62 %) |
| Sables très grossiers et grossiers | 7–14 % (10 %) | 8–13 % (10 %) | 7–14 % (10 %) |
| Sables moyens et fins | 30–60 % (41 %) | 30–42 % (37 %) | 45–60 % (52 %) |
| Limons + Argiles | 31–61 % (49 %) | 48–61 % (53 %) | 31–41 % (38 %) |
| Classes modales principales | Vers 160 µm* ; vers 20 µm | Vers 160 µm (9–18 %) vers 20 µm (5–7 %) | Vers 160 µm (16–21 %) vers 20 µm (2–4 %) |

* 125–160 µm ou 160–200 µm, sauf éch. 18 (200–250 µm) et éch. 22 (100–125 µm).

La comparaison des données du sédiment brut et du sédiment décarbonaté (fig. 16, 17, 18) indiquent que la classe modale située vers 160 μm ainsi que la majorité des sables grossiers disparaissent après attaque à l'acide.

3.4.3.4. Groupe D

Il existe des points communs entre les 10 échantillons du groupe D et ceux du groupe C [allure générale des courbes cumulatives décarbonatées (fig. 18.1a), classe modale du sédiment décarbonaté vers 20 μm , ...]. Toutefois, plusieurs caractéristiques du sédiment décarbonaté nous ont conduit à les distinguer. D'abord, des teneurs en sables nettement plus faibles que pour le groupe C (tableau 9.1; fig. 15a, 16a et 17). Ensuite, l'absence de classe modale secondaire vers 80 μm (fig. 18.2a). Enfin, la figure 19 montre que l'indice de *Skewness* des échantillons du groupe D (échantillons 1 à 10) est très différent de celui des échantillons du groupe C (échantillons 11 à 22, sauf n° 12). Remarquons en outre que les courbes cumulatives décarbonatées témoignent d'une bien plus grande homogénéité pour le groupe D que pour le groupe C (fig. 18.1a; voir aussi fig. 15a et 16a).

Deux sous-groupes ont été isolés : D1 et D2. Les teneurs en sables du sédiment décarbonaté de ces deux sous-groupes diffèrent (tableau 9.1). Le sédiment décarbonaté de D1 est unimodal [classe modale unique vers 20 μm (fig. 18.2a)], comme celui de D2 (sauf l'échantillon 2 qui présente deux classes modales secondaires vers 1 600 μm et vers 80 μm).

L'indice de classement de Folk et Ward (« *Standard deviation* ») traduit un classement meilleur que pour le groupe C. Il varie de 1,2 à 1,9 pour D1 (mal classé) et de 1,7 à 2 pour D2 (mal classé). Quant à l'indice d'asymétrie de Folk et Ward (« *Skewness* »), ses valeurs oscillent entre 0,2 et 0,6 pour D1, traduisant une dispersion vers les particules fines. Pour D2, si les échantillons 3 et 1 présentent des valeurs semblables à celles de D1 (0,3 et 0,4), l'échantillon 2 s'en écarte nettement (-0,14), traduisant une asymétrie vers les particules grossières.

Le sédiment brut possède deux classes modales principales (vers 160 μm et vers 20 μm), ainsi que des modes secondaires aussi bien dans la fraction sableuse que dans la fraction limono-argileuse (fig. 18.2b). Les échantillons 2 et 3 font toutefois exception (tableau 9.2), surtout l'échantillon 2 qui possède une classe modale principale très marquée (25 %) entre 1 600 et 2 000 μm et deux classes modales secondaires (80–100 μm et 16–20 μm).

Le tableau 9.2 présente les caractéristiques granulométriques du sédiment brut. La comparaison avec les données du sédiment décarbonaté indique que la classe modale située aux environs de 160 μm ainsi que la majorité des sables supérieurs à 315 μm (y compris la classe modale importante de 1 600–2 000 μm de l'échantillon 2) disparaissent après attaque à l'acide (comparer aussi les figures 15a et 15b, 16a et 16b, 18.1a et 18.1b, 18.2a et 18.2b). Remarquons que les sables moyens (160–315 μm) disparaissent aussi (fig. 17).

Tableau 9.1

Paramètres granulométriques du sédiment décarbonaté

Les valeurs entre parenthèses correspondent à la moyenne arithmétique des valeurs de tous les échantillons concernés, sauf pour les « Classes modales principales » où elles correspondent à l'importance, en %, de la classe modale envisagée.

| Paramètres granulométriques | Groupe D | Sous-groupe D1 | Sous-groupe D2 |
|------------------------------------|---|--|--|
| Sables | 3–17 % (9 %) | 3–9 % (7 %) | 10–17 % (13 %) |
| Sables très grossiers et grossiers | 0–6 % (0,8 %) | 0–0,33 % (0,1 %) | 1–6 % (3 %) |
| Sables moyens et fins | 3–11 % (8 %) | 3–9 % (7 %) | 9–11 % (10 %) |
| Limons + Argiles | 83–97 % (91 %) | 91–97 % (93 %) | 83–90 % (87 %) |
| Classes modales principales | 16–20 μm ou 20–25 μm (sauf l'échantillon 2) | 16–20 μm ou 20–25 μm (13–16 %) | Échantillons 1 et 3 16–20 μm ou 20–25 μm (11–13 %) Échantillon 2 16–20 μm (13 %) 1 600–2 000 μm (2 %) 80–100 μm (2 %) |

Tableau 9.2
Paramètres granulométriques du sédiment brut

| Paramètres granulométriques | Groupe D | Sous-groupe D1 | Sous-groupe D2 |
|------------------------------------|---|--|--|
| Sables | 24–70 % (39 %) | 24–45 % (33 %) | 42–70 % (52 %) |
| Sables très grossiers et grossiers | 6–51 % (13 %) | 6–9 % (7 %) | 9–51 % (26 %) |
| Sables moyens et fins | 18–39 % (26 %) | 18–39 % (26 %) | 19–33 % (26 %) |
| Limons + Argiles | 30–76 % (61 %) | 55–76 % (67 %) | 30–58 % (48 %) |
| Classes modales principales | Vers 160 μm Vers 20 μm (sauf éch. 2 et 3) | Vers 160 μm * (5–16 %) Vers 20 μm ** (7–10 %) | Échantillon 1 125–160 μm (12 %) 10–20 μm (6 %) Échantillon 2 1 600–2 000 μm (25 %) 80–100 μm (6 %) 16–20 μm (4 %) Échantillon 3 125–160 μm (8 %) 1 600–2 000 μm (6 %) 16–20 μm (6 %) |

* 125–160 μm ou 160–200 μm .

** 16–20 μm , 20–25 μm , 16–25 μm , 20–31,5 μm ou 12,5–16 μm .

3.4.3.5. Groupe E

L'échantillon unique de ce groupe présente des différences nettes par rapport à ceux des autres groupes (fig. 15, 16, 18 et 19). Le sédiment décarbonaté est plurimodal : il présente deux classes modales principales (20–25 μm et 0,63–0,80 μm) ainsi que deux classes modales secondaires (125–160 μm et 80–100 μm). Quant au sédiment brut, s'il est proche des échantillons du groupe C par la présence d'une classe modale principale importante à 160–200 μm , il s'en distingue toutefois par ses deux classes modales secondaires qui se situent entre 80 et 100 μm et entre 8 et 10 μm (et non à 16–20 μm comme dans le groupe C).

Tableau 10.1

Paramètres granulométriques du sédiment décarbonaté

Les chiffres entre parenthèses indiquent l'importance, en %, de la classe modale.

| Paramètres granulométriques | Groupe E |
|------------------------------------|---|
| Sables | 21 % |
| Sables très grossiers et grossiers | 2 % |
| Sables moyens et fins | 19 % |
| Limons + Argiles | 79 % |
| Classes modales principales | 20–25 μm (8 %) 0,63–0,80 μm (8 %) 125–160 μm (4 %) 80–100 μm (4 %) |

Tableau 10.2

Paramètres granulométriques du sédiment brut

Les chiffres entre parenthèses indiquent l'importance, en %, de la classe modale.

| Paramètres granulométriques | Groupe E |
|------------------------------------|--|
| Sables | 59 % |
| Sables très grossiers et grossiers | 12 % |
| Sables moyens et fins | 47 % |
| Limons + Argiles | 41 % |
| Classes modales principales | 160–200 μm (21 %) 80–100 μm (4 %) 8–10 μm (3 %) |

3.5. Morphoscopie

La morphoscopie des grains de quartz est l'étude de l'état de surface de ces grains. Les informations que l'on peut tirer de cette analyse concernent l'histoire du mode de transport du sédiment.

3.5.1. Méthodologie

Cette étude a été réalisée sur la fraction F.I. des sables décarbonatés (de 630 à 315 μm). Ce choix est lié au fait que cette fraction enregistre le mieux les différents modes de transport. Par exemple, des grains de 0,1 mm ou plus petits enregistrent rarement l'action éolienne (chocs trop peu violents) alors que

les grains supérieurs à 1,5 mm sont moins usés car moins déplacés (Cailleux & Tricart, 1959:74). Remarquons d'emblée que lors de l'interprétation des résultats d'une analyse morphoscopique, il faut toujours garder à l'esprit la possibilité de remaniements.

Deux catégories de quartz ont été rencontrées : des grains «émoussés-luisants» et des grains «non usés». Classiquement, il existe une troisième catégorie : celle des «ronds-mats» (typiques d'une action éolienne). Aucun grain de ce type n'a été observé dans les échantillons du *Trou Al'Wesse*. L'absence de cette catégorie des «ronds-mats» s'explique aisément. Il existe, en gros, deux types de sédiments éoliens : les limons (löss) emportés par le vent dans la haute atmosphère sur de grandes distances, et les sables (de couverture ou de dune), déplacés par le vent par saltation sur des distances beaucoup plus petites vu leur poids. Le *Trou Al'Wesse* est bien au-delà de la zone des sables de couverture (fig. 20). Quant aux löss, s'ils sont présents dans la région du *Trou Al'Wesse* (fig. 20), ils ne contiennent normalement pas de sables d'un

diamètre supérieur à 250 μm (Mücher, 1986). Or, la fraction étudiée pour la morphoscopie concerne des sables dont le diamètre va de 630 à 315 μm .

3.5.1.1. Les émoussés-luisants

Cailleux et Tricart (1959) les définissent comme suit : «Le contour général est à angles émoussés, voire arrondis. Les parties les plus saillantes du grain, du côté d'où vient la lumière, sont brillantes». Cet aspect émoussé et luisant est acquis à la suite d'un frottement prolongé par roulement dans l'eau. Remarquons que l'aspect émoussé et luisant n'apparaît que très lentement : soit dans des fleuves de plusieurs centaines de kilomètres, soit sur des plages marines ou sur les plages de très gros lacs (Cailleux & Tricart, 1959:75-77).

Parmi les émoussés-luisants, deux sous-catégories ont été définies dans ce travail :

- émoussés-luisants hyalins ;
- émoussés-luisants opaques.

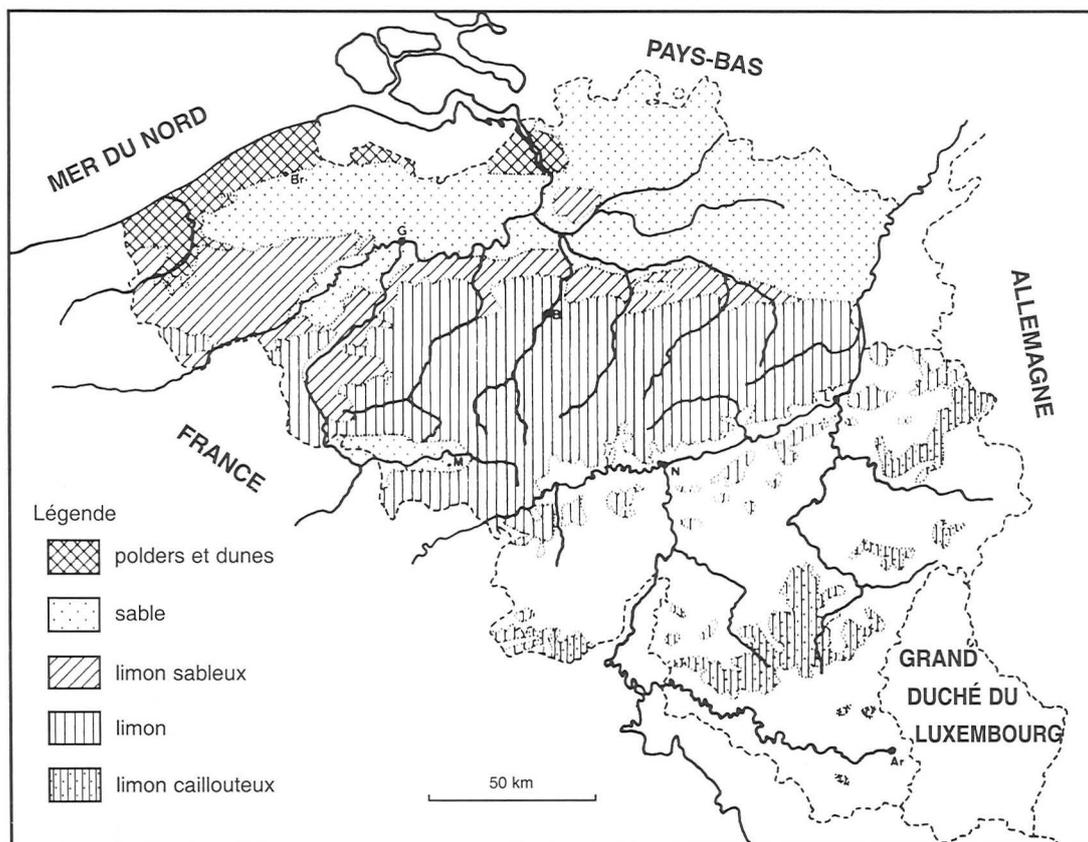


FIG. 20. - Répartition des dépôts de couverture, d'après la carte des sols de Belgique (repris de Haesaerts, 1984).

3.5.1.2. Les non usés

Selon Cailleux et Tricart (1959), leur contour est le plus souvent anguleux. Les faces correspondent soit aux faces originelles du cristal, soit à des cassures.

Ce type de grain est très fréquent (arènes de désagrégation, dépôts de rivières courtes, de petites plages ou de petites dunes, solifluxion, éboulis, coulées boueuses, gel, glaciers, ...).

Les mêmes sous-catégories que pour les émoussés-luisants ont été définies :

- non usés hyalins;
- non usés opaques.

3.5.2. Résultats

Seuls 10 échantillons sur les 26 ont fait l'objet d'une étude morphoscopique. Les résultats de cette étude sont présentés à la figure 21. Ils seront discutés au § 4. Remarquons que, contrairement aux autres graphiques (voir la remarque au § 3.2.2.3), l'ordonnée des différents graphiques de la figure 21 correspond à une altitude et pas à un numéro d'échantillon.

4. INTERPRÉTATIONS

Nous analyserons ici les résultats obtenus par les différentes analyses sédimentologiques présentées précédemment. Couche par couche, nous traiterons des informations relatives à la stratigraphie (confirmation du découpage lithostratigraphique effectué sur le terrain et informations nouvelles), à la nature et à l'origine des sédiments ainsi qu'à leur mode de mise en place.

4.1. Couche 19

Clairement individualisé sur le terrain, le sédiment de l'unité lithostratigraphique 19 (échantillon n° 26) se distingue aussi par ses caractéristiques sédimentologiques.

Ce sédiment est entièrement constitué de carbonates (fig. 14). Sa fraction sableuse, totalisant à elle seule près de 95 % de l'ensemble du sédiment (fig. 16b), est composée d'environ 90 % de dolomite et 10 % de calcite (fig. 12). Le mode unique (80 µm) correspond à la taille

moyenne des cristaux de dolomite pour cet échantillon.

Remarquons que la présence d'éléments de calcite dans le résidu d'altération de la dolomie est lié à une dolomitisation incomplète du calcaire originel, cette dolomitisation affectant d'abord le ciment, ensuite les éléments aragonitiques comme les coquilles de mollusques et en dernier lieu les éléments calcitiques comme les crinoïdes, les rugueux, les coquilles de brachiopodes, ... (Purser, 1980).

Ce sable, reposant sur la roche en place, trouve son origine dans la désagrégation de cette dernière. Les altérations *in situ* de roches carbonatées sont généralement d'ordre chimique. L'altération dont il est question ici est liée à la nature de la roche mère : une dolomie secondaire saccharoïde pulvérulente. D'autres séquences stratigraphiques en milieu karstique, développées sur substrat dolomitique, présentent une telle couche basale de sable dolomitique, comme par exemple le *Trou da Somme* (López Bayón *et al.*, 1997).

4.2. Couche 18

Les caractéristiques sédimentologiques de la couche 18 (groupe B) l'isolent de toutes les autres (fig. 15a). Le sédiment de cette unité présente, sur le terrain, un faciès sableux jaunâtre qui passe progressivement par endroits à des zones argileuses oranges. Nous discuterons successivement des deux faciès.

4.2.1. Sable jaune (éch. n° 25)

Sa fraction sableuse domine nettement le sédiment brut (72 %) comme le sédiment décarbonaté (74 %) [fig. 16a et b]. Elle est composée principalement de quartz (94 %); on y rencontre également des concrétions d'oxydes de fer et des fragments de roches détritiques (fig. 12).

La perte de poids après attaque à HCl (fig. 14) est très faible (un peu plus de 5 %). Le mode principal est situé entre 125 et 160 µm, avant comme après traitement à l'acide (fig. 18.2a et b). Notons l'absence de mode à 20 µm, ce qui distingue les deux échantillons de la couche 18 et celui de la couche 19 de tous les autres échantillons.

La composition de ce sédiment (très peu de carbonates) traduit clairement une origine allochtone. La granulométrie nous donne des

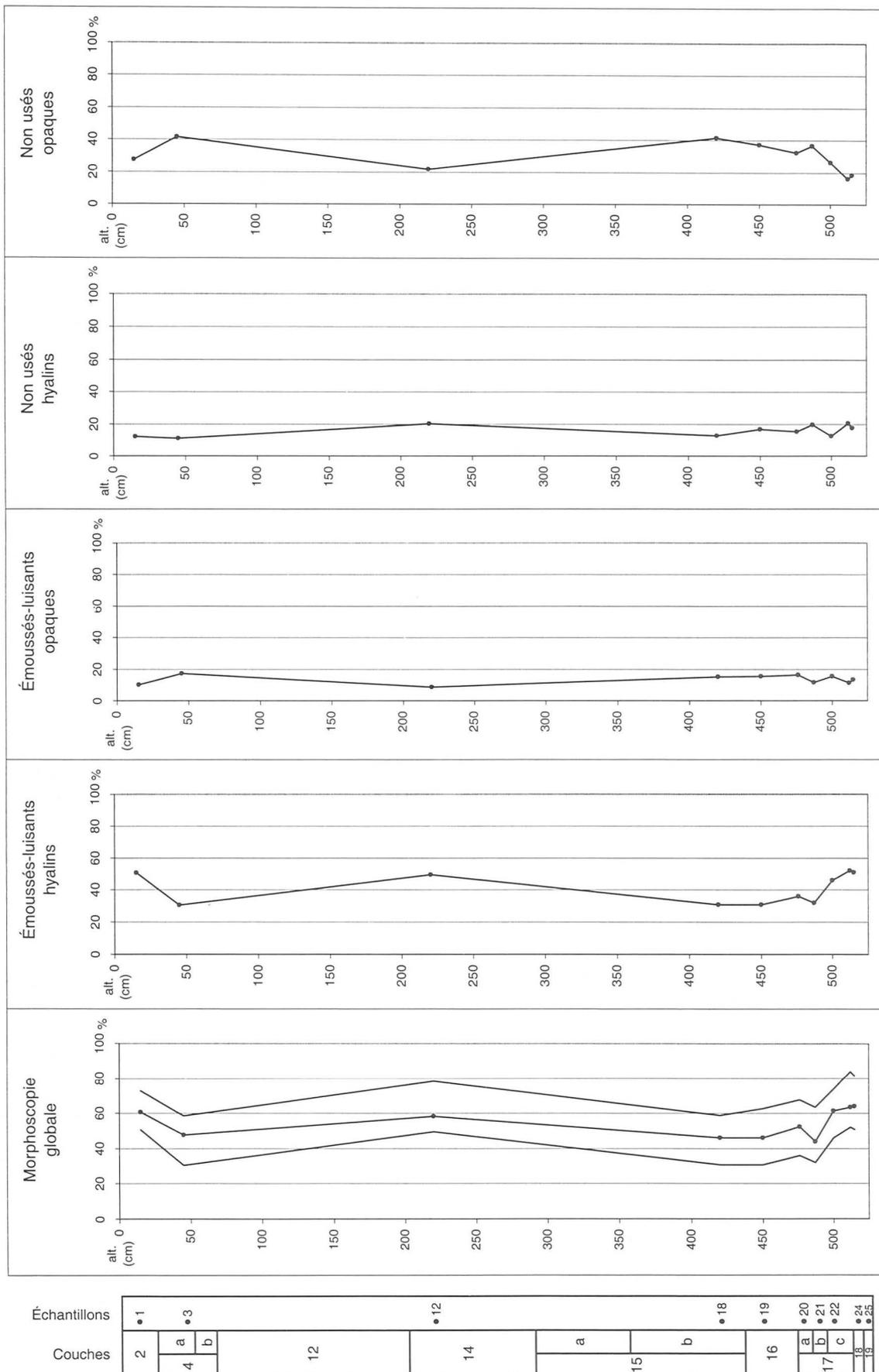


FIG. 21. – Morphoscopie des grains de quartz. La courbe joignant les différents échantillons étudiés est uniquement donnée à titre d'information, vu le nombre peu élevé d'échantillons analysés.

indications quant au mode de mise en place de ce sable : la forme de la courbe cumulative (fig. 18.1) évoque le faciès « parabolique » de Rivière (1977), indiquant un dépôt par excès de charge. La structure interne de la couche, son extension et le contexte général font plutôt penser à un sédiment fluviatile. Quant aux données de la morphoscopie (fig. 21), elles nous permettent d'obtenir des informations sur l'origine de ce sédiment. La proportion élevée de grains « émousés-luisants » (64 %) est difficile à expliquer par l'action exclusive d'une rivière locale (le Hoyoux est une rivière d'une trentaine de kilomètres de longueur). En effet, en contexte fluviatile, l'aspect « émousés-luisants » n'apparaît que très lentement, dans des cours d'eau de plusieurs centaines de kilomètres, et dans des proportions nettement plus faibles (Cailleux & Tricart, 1959:75-77). Des valeurs telles que celles observées pour le sable de la couche 18 ne se rencontrent qu'en contexte marin. Il faut donc envisager le remaniement, par une rivière (vraisemblablement le Hoyoux), de niveaux géologiques d'origine marine ayant fourni un stock d'émousés-luisants important. Vu les terrains traversés par la rivière, les placages de sables marins d'âge tertiaire (voir § 2.2) nous semblent constituer une origine plus qu'acceptable. Les résultats de l'étude des minéraux denses devraient nous permettre de confirmer cette hypothèse de travail.

En conclusion, ce sable jaune correspondrait au remaniement de placages de sables marins d'âge tertiaire, fréquents dans la région, qui ont transité par le karst via un cours d'eau avant de se déposer par excès de charge juste au-dessus de la roche en place.

Remarquons que ce genre de formation (sables), parfois accompagnée de granules ou de cailloux roulés, est fréquemment rencontrée en milieu karstique, à la base des séquences sédimentaires [*Trou du Frontal* (Dupont, 1865); *La Naulette* (Dupont, 1867); *Remouchamps* (Ek, 1974); *La Belle-Roche* (Cordy, 1998); *Sclayn* (Haesaerts, 1992); *Trou Magrite* (Haesaerts, 1995); etc.]. En fonction du contexte et de l'histoire du remplissage, il peut s'agir de dépôt fluviatiles en place, du remaniement intrakarstique d'anciennes terrasses fluviatiles, du remaniement de sédiments marins tertiaires, ... Il est difficile d'estimer l'âge de ces dépôts.

4.2.2. Zones argileuses oranges (éch. n° 24)

Ce sédiment est très différent du précédent. La perte en poids après traitement à l'acide de la fraction inférieure à 2 mm (fig. 14) est de près de 40 % (dont près de 75 % pour la fraction sableuse). La composition de la fraction sableuse (fig. 12) explique ces valeurs : plus de 50 % de dolomite, 20 % de quartz, 10 % de concrétions d'oxydes de fer, 5 % de calcite ainsi que des fragments de roches détritiques et de la microfaune. Le sédiment décarbonaté est constitué de près de 80 % de fraction limono-argileuse, dont 36 % d'argile (valeur la plus élevée de l'ensemble des échantillons étudiés dans ce travail).

Toutefois, des ressemblances avec le sable jaune nous ont conduit à rassembler ces deux sédiments dans le même groupe granulométrique : le groupe B (§ 3.4.3). Le mode principal des deux sédiments décarbonatés se situe vers 125-160 µm. Contrairement aux couches sus-jacentes, il n'y a pas de mode vers 20 µm. De plus, ils possèdent à eux deux les valeurs les plus faibles de perte en poids après attaque à l'acide (fig. 14). Quant à la nature de la fraction sableuse des deux faciès, elle présente également des similitudes : teneurs les plus importantes en quartz pour les fractions F.S. à F.II., teneurs les plus importantes en concrétions d'oxydes de fer, teneurs nulles en « grains microcristallins carbonatés », (fig. 12). Enfin, la morphoscopie montre (fig. 21) que le pourcentage de grains « émousés-luisants » est identique pour les deux sédiments (63 % et 64 %).

Le très mauvais classement de ce sédiment argileux (fig. 18.1a et 19) ainsi que sa composition évoquent un mélange de plusieurs stocks. Les données relatives à la fraction sableuse (composition, granulométrie et morphoscopie) indiquent l'existence de deux stocks correspondant vraisemblablement au sable jaune (§ 4.2.1) et au produit de la désagrégation de la dolomie (remaniement de la couche 19?). Quant à la fraction limono-argileuse, elle doit être mise en relation avec l'activité du cours d'eau. Son importance est selon nous à mettre en relation avec une diminution de la compétence de la rivière.

4.3. Les couches 17 (a, b et c), 16, 15 (a et b) et 14

Avant de décrire l'ensemble des sédiments de ces quatre couches, signalons que deux échantillons appartenant l'un à la couche 14 (échantillon 12), l'autre à la couche 17 (échantillon 23) s'écartent totalement des 11 autres échantillons, homogènes entre eux.

L'échantillon 23 se rapproche de l'échantillon 26, tant par ses caractéristiques granulométriques (groupe A) que par la nature de sa fraction sableuse — 100 % de « carbonates dinantiens » (fig. 12), dont plus de 90 % de dolomite et le reste de calcite — ou par la perte en poids après traitement à H₂O₂ et HCl — 99 % (fig. 14). Cet échantillon, prélevé dans la zone à éléments grossiers de l'unité 17c (fig. 6), correspond à la désagrégation de ces éléments de dolomie.

L'échantillon 12, quant à lui, diffère complètement de l'ensemble des autres échantillons étudiés. Il a été isolé dans un groupe granulométrique à part : le groupe E (§ 3.4.3.5). Les figures 16a et 16b, 18.2a et 15a illustrent cette situation. Sa position dans la stratigraphie (zone « *openwork* » avec oxydes de fer; voir § 2.4) et ses particularités granulométriques nous font penser que cet échantillon se situe dans la zone limite de la tranchée creusée par Dupont (Fraipont & Braconnier, 1887:403) à l'entrée de la grotte. La position de l'ancienne galerie de fouille découverte lors de la campagne de 1993 (Collin *et al.*, 1994:21) corrobore cette hypothèse (fig. 4). L'échantillon 12 se rattacherait donc à une zone de déblais des anciennes fouilles et consisterait ainsi en un mélange de plusieurs unités. L'extension de la tranchée vers l'ouest réglerait définitivement la question.

4.3.1. Nature du sédiment

Les analyses sédimentologiques ont mis en évidence de **nombreux points communs** entre la fraction inférieure à 2 mm des échantillons étudiés de ces quatre unités lithostratigraphiques.

D'abord, les caractéristiques granulométriques communes, qu'il s'agisse du sédiment brut ou décarbonaté, nous ont amené à les rassembler dans un même groupe (groupe C, voir § 3.4.3.3). La majorité de la fraction sableuse est composée de carbonates (> 75 %) comme nous le montre la perte en poids après

traitement à H₂O₂ et HCl (fig. 14) ainsi que la granulométrie [proportions des sables avant et après traitement (fig. 16a et 16b), disparition de la plupart des sables grossiers et du mode principal commun situé vers 125–160 µm (fig. 18.2a et 18.2b), ...].

L'étude de la nature de la fraction sableuse confirme l'homogénéité de cet ensemble (fig. 12). Si les teneurs en « carbonates dinantiens » (catégories 1 à 5) ne diffèrent pas beaucoup de celles des couches 2 à 12, d'autres catégories indiquent clairement que les couches 17 à 14 se distinguent des autres unités lithostratigraphiques.

- Les « grains microcristallins carbonatés » (cat. n° 6) ne se rencontrent que dans ces quatre couches;
- Les « concrétions tubulaires » (cat. n° 7) sont, dans l'ensemble, en nette régression par rapport aux couches sus-jacentes;
- Les fractions F.S. à F.II. du quartz (cat. n° 11) ainsi que les catégories 12 (« roches détritiques ») et 13 (« concrétions non carbonatées ») se distinguent nettement des couches sus- et sous-jacentes (fig. 12).

Rappelons que la fraction grossière (> 2 mm), très importante (voir figure 6), est entièrement constituée de dolomie et que la fraction limono-argileuse est, en gros, composée de moins de 50 % de carbonates (fig. 14).

Il existe toutefois **quelques différences** entre les quatre couches de cet ensemble, illustrées par la granulométrie (fig. 15 à 19) et la nature des sables (fig. 12). Ces différences confirment le découpage stratigraphique effectué sur le terrain pour les unités 14, 15a, 15b et 16. La division en 3 unités composant la couche 17 (basée, sur le terrain, essentiellement sur les variations au sein de la fraction grossière) est, par contre, plus difficile à retrouver au niveau de la fraction inférieure à 2 mm. L'échantillon 20 se rapproche de l'échantillon 19 (couche 16 : voir fig. 15a et 16a) et, d'une manière plus générale, de celui des couches 14 et 15. Tous ces échantillons forment le sous-groupe C1. Par contre, 17b et 17c forment, avec l'échantillon 18, le sous-groupe C2 (voir § 3.4.3.3) et 18.1a; 2° mode plus marqué). Il nous paraît toutefois prématuré d'affirmer la présence d'une coupure entre 17a et 17b, d'autant plus qu'un seul échantillon a été analysé dans chacune de ces deux couches.

4.3.2. Origine et mode de mise en place du sédiment

Le caractère plurimodal du sédiment brut de cet ensemble (voir discussion relative au groupe C, § 3.4.3.3 et figures 18.1b et 18.2b) traduit une origine complexe résultant d'un mélange de plusieurs stocks. Nous avons distingué les sédiments autochtones, les sédiments allochtones et les phénomènes post-dépositionnels, suivant en cela de nombreux auteurs (Laville, 1975; Ek & Quinif, 1988; etc.).

4.3.2.1. Stock autochtone

- Le démantèlement de la dolomie du porche et des parois de la grotte, lié à des phénomènes de **cryoclastie**, est à l'origine de la fraction grossière du sédiment. La **fragmentation secondaire** par le gel — « gélivation de reprise » de Laville (1975:25) signalée en Belgique, par exemple à Remouchamps (Ek, 1974:40) — et/ou l'**altération chimique** des éboulis après leur mise en place expliquent l'importance des éléments centimétriques de dolomie ainsi que la part importante de grains de « carbonates dinantiens » dans la fraction sableuse. Une partie de la fraction limono-argileuse a certainement une origine identique vu sa perte en poids après traitement à l'acide.
- La couche 17b se distingue des autres du groupe C par la présence de nombreux **granules** (1 cm–2 mm) émoussés de dolomie. Cet émoussé n'est pas lié à la présence d'une rivière. En effet, ni la structure du sédiment sur le terrain, ni l'étude sédimentologique de la fraction inférieure à 2 mm n'indiquent le dépôt par un cours d'eau. Ces granules pourraient correspondre à une phase de **ruissellement** intense.

4.3.2.2. Stocks allochtones

Galets de dolomie

Quelques rares éléments centimétriques très arrondis de dolomie, interprétés comme étant des galets de rivière, ont été observés dans les couches 17b (1 élément), 17a (2 éléments) et 15a (4 éléments). Le contexte (rares galets isolés, structure du sédiment) et les analyses sédimentologiques de ces niveaux excluent la présence d'une rivière. Nous pensons que ces galets ont été apportés par l'homme sur le site, les galets des couches 17b

et 17a étant en association avec du matériel archéologique — silex et ossements — (voir fig. 6).

Microfaune

Pelotes de régurgitation de rapaces nocturnes — les rapaces nocturnes, contrairement aux rapaces diurnes, ne digèrent pas les os de leurs proies à cause d'un déficit en acide chlorhydrique dans leurs sucs digestifs (Géroudet, 1965:37 et 313). La grande quantité de microfaune — jusqu'à 23 % dans la fraction sableuse (fig. 12) et jusqu'à 14 % dans le sédiment < 2 mm — est à mettre en relation avec la position particulière de la coupe étudiée : sous le porche de la grotte⁴. Cette abondante microfaune est intéressante car son étude permettra certainement d'obtenir des informations complémentaires sur le paléoenvironnement.

« Grains microcristallins carbonatés »

Leurs arêtes émoussées et la pellicule d'oxydes (Mn ?) les recouvrant fréquemment évoquent un séjour en surface et une mise en place par **ruissellement** depuis le plateau. Leur répartition (exclusive aux couches 14 à 17) va dans le sens de cette hypothèse (une partie de la fraction sableuse détritique de ces unités s'est mise en place par ruissellement : voir ci-dessous). Une étude en lame mince pourrait préciser leur nature et nous éclairer sur leur origine qui demeure inconnue.

Fraction détritique

La forme des courbes cumulatives du sédiment décarbonaté évoque une origine éolienne. Afin de confirmer cette hypothèse, nous avons comparé les données du *Trou Al'Wesse* pour les couches 17 à 14 avec les valeurs caractéristiques de l'œss (Mücher, 1986). Le tableau 11 présente cette comparaison.

Le tableau 11 indique que le limon compris entre 16 et 63 µm est nettement moins bien représenté pour les couches 17 à 14 (groupe C) que pour les lœss « typiques » de Mücher (1986), auxquels se rattachent les lœss de Hesbaye. Cette caractéristique va de pair avec les valeurs faibles de la médiane (16 µm en moyenne contre 30 µm pour les lœss « classiques ») et du mode principal

⁴ Le porche servant de lieu de repos, de digestion et de régurgitation aux rapaces.

Tableau 11

Comparaison entre les caractéristiques granulométriques de lœss typiques données par Mücher (1980) et les caractéristiques granulométriques des sédiments décarbonatés du *Trou Al'Wesse*.

Les chiffres entre parenthèses indiquent une valeur moyenne.

| Fraction concernée | MÜCHER (1986) | <i>Trou al'Wesse</i> | | |
|--------------------|------------------|----------------------|------------------|------------------|
| | | Groupe C | Sous-groupe C1 | Sous-groupe C2 |
| 2–63 µm | 50–80 % | 56–85 % (74 %) | 69–85 % (78 %) | 56–67 % (61 %) |
| 16–63 µm | 55 % | 25–52 % (37 %) | 26–52 % (40 %) | 25–35 % (29 %) |
| < 2 µm | < 20 % | 0–20 % (11 %) | 0–20 % (10 %) | 13–17 % (15 %) |
| 2 mm–63 µm | < 15 % | 1,2–28 % (15 %) | 1–16 % (12 %) | 20–28 % (25 %) |
| 63–210 µm* | < 10 % | 1–24 % (12 %) | 1–13 % (9 %) | 16–24 % (20 %) |
| 2 mm–250 µm | Normalement, non | 0,02–7 % (3 %) | 0–4 % (2 %) | 4–7 % (5 %) |
| Md | 20–40 µm (30 µm) | 10–19 µm (16 µm) | 10–19 µm (16 µm) | 17–18 µm (18 µm) |

* 63–200 µm pour les échantillons du *Trou al'Wesse*.

(16–20 µm contre environ 30 µm pour les lœss de Hesbaye). Cette particularité est à mettre en relation, selon nous, avec la position géographique du *Trou Al'Wesse*, à la bordure sud de la zone classique des lœss, c'est-à-dire plus loin de leur source qu'était le fond exondé de la Mer du Nord (Haesaerts, 1984 : 33 ; Juvigné, 1978 : 82–83). Signalons que des limons d'origine éolienne provenant de la grotte de Sclayn présentent également des valeurs de la médiane oscillant autour de 20 µm (Gullentops & Deblaere, 1992 : 25 ; Haesaerts, 1992 : 45–48).

Remarquons que le mauvais classement du sédiment (voir § 3.4.3.3, groupe C) est parfaitement compatible avec une origine éolienne. En effet, les lœss sont généralement moins bien classés que ce à quoi on pourrait s'attendre (« *poorly sorted* » de Folk et Ward) et présentent une asymétrie du côté des particules fines (caractère également présent pour le sédiment du groupe C). Cela est lié au prétraitement des échantillons (§ 3.1) qui disperse les agrégats (Gale & Hoare, 1991 : 71).

Un autre élément qui ressort de l'analyse du tableau 11 concerne les teneurs en sables⁵, particulièrement pour les trois échantillons du sous-groupe C2. Elles sont bien plus élevées que celles communément admises pour les vrais lœss (voir aussi, au tableau 8.1, les teneurs importantes du groupe C en sables décarbonatés, particulièrement en sables très grossiers et grossiers ; il existe notamment des grains dont le diamètre dépasse 1,6 mm !). De plus, les courbes cumulatives et les courbes

de fréquences (fig. 18.1a et 18.2a) indiquent que le sédiment décarbonaté est plurimodal : outre le mode principal (16–20 µm), un mode secondaire existe vers 80 µm, particulièrement pour les trois échantillons du sous-groupe C2. Tout ceci est incompatible avec une origine éolienne unique.

Tous ces éléments indiquent que le sédiment décarbonaté résulte du mélange de plusieurs stocks. Le premier consiste en un lœss fin. À celui-ci vient s'ajouter un sable relativement grossier. L'étude de la nature de la fraction sableuse (§ 3.2.2) et particulièrement les données relatives à la catégorie n° 11 (quartz) nous éclairent quant à la composition de ce sable. En effet, nous avons déjà signalé (voir § 3.2.2.3) l'existence de deux stocks distincts au niveau du quartz (fig. 12), la courbe de la fraction F.III. (sables < 160 µm) différant notablement de celles des trois autres fractions (sables > 160 µm). De plus, les catégories 12 (« roches détritiques ») et 13 (« concrétions non carbonatées ») possèdent une courbe de même allure que celle des fractions F.S., F.I. et F.II. du quartz. Le sable qui est venu s'ajouter au lœss est donc composé de ces trois éléments (quartz > 160 µm, roches détritiques et concrétions d'oxydes de fer), la fraction F.III. du quartz correspondant pour l'essentiel à la fraction sableuse du lœss.

L'origine de ce sable, vu sa composition, est sans doute la même que celle du sable jaune de la couche 18 : un sable marin tertiaire (voir § 4.2.1). Les données disponibles pour la morphoscopie (fig. 21) sont en accord avec cette interprétation, la teneur en « émoussés-luisants » du sédiment des couches 17 à 14 (44 à 61 %) étant à mettre en relation avec

⁵ 2 mm à 63 µm dans la classification utilisée par Mücher (1986).

des dépôts d'origine marine (voir discussion au § 4.2.1). L'analyse des minéraux denses des couches 17 à 14, actuellement en cours, devrait en principe nous aider à confirmer cette hypothèse.

En conclusion, la fraction détritique des sédiments des couches 17 à 14 est composée d'un mélange entre du **loess fin** et du **sable d'âge tertiaire**. Le sable tertiaire s'est probablement mis en place par **ruissellement** depuis des placages situés sur le plateau. Les échantillons présentant des taux plus élevés de sables supérieurs à 315 μm (groupe C2) traduiraient une augmentation de l'intensité des ruissellements. Quant aux limons d'origine éolienne, leur mélange intime avec les sables oligocènes, les « grains microcristallins carbonatés », la microfaune et les éléments autochtones (gros et fins) plaide en faveur d'une position secondaire liée également à du **ruissellement**.

4.3.2.3. Phénomènes diagénétiques

Les « concrétions tubulaires » sont des manchons racinaires et sont donc à mettre en relation (Laville, 1975:37-38) avec une **pédogenèse sus-jacente** (voir aussi § 4.4.2.3).

Le cortex blanchâtre observé sur certains éléments de dolomie au niveau de la couche 15 (§ 2.4) est également de nature post-dépositionnelle. Aucun élément le concernant n'a toutefois été rencontré lors des différentes analyses sédimentaires. L'étude détaillée de la stratigraphie de l'ensemble du site aidera certainement à cerner de plus près la répartition exacte et l'origine de ce phénomène. Il pourrait s'agir d'un phénomène lié à une **pédogenèse interstadaire**.

4.3.3. Remarque sur la couche 17

Le matériel paléontologique de la couche 17 présente, d'après Collin *et al.* (1996), des altérations importantes liées à l'action de l'eau et les artefacts y sont parfois concassés. Ceci contraste avec les résultats préliminaires de la sédimentologie qui n'indiquent pas d'action d'eau à haute énergie. Le sédiment de la couche 17 n'a pas été déposé par une rivière dans des conditions particulièrement dynamiques. Tout au plus a-t-on, comme rappelé ci-dessus, des conditions très humides avec ruissellements importants (surtout pour 17b et 17a). Il est prématuré d'essayer de

résoudre ce problème dans l'état actuel des recherches. En effet, la surface actuellement connue de cette unité lithostratigraphique complexe est très faible. Il est nécessaire d'effectuer une étude stratigraphique détaillée sur une surface plus grande afin de mieux comprendre la géométrie et le découpage microstratigraphique de l'unité 17.

De plus, la position stratigraphique précise des os affectés par l'action de l'eau reste à déterminer car avant la révision de la stratigraphie (Pirson & Collin, 1997), la couche 17 était considérée comme une seule entité alors qu'on y distingue aujourd'hui 3 unités. En outre, on parlait jusqu'il y a peu de « la » couche moustérienne (Collin *et al.*, 1996). Or, du matériel lithique a été observé sur la coupe 4-5 en M dans 17a et dans 17b, et des esquilles de silex inférieures à 2 mm existent dans les trois unités (fig. 13)!

Comme on le voit, des problèmes subsistent au niveau de la couche 17, problèmes d'autant plus importants à résoudre qu'il s'agit d'un (ou de plusieurs?) niveau(x) archéologique(s). Une collaboration étroite entre archéologues, paléontologues et géologues nous paraît indispensable lors de la poursuite des fouilles afin de résoudre ces problèmes.

4.4. Les couches 12, 4 et 2

4.4.1. Nature du sédiment

Les couches 12, 4 et 2 présentent entre elles **des similitudes** relativement importantes. Leurs caractéristiques granulométriques communes sont celles du groupe D (voir § 3.4.3.4). Tout comme pour les couches 17 à 14, la fraction grossière est composée exclusivement de dolomie. La fraction sableuse est carbonatée entre 70 et 95 %. Quant à la fraction limono-argileuse, elle contient 20 à 40 % de carbonates (fig. 14).

La forte proportion de carbonates dans la fraction sableuse est également illustrée par la comparaison entre le sédiment décarbonaté et le sédiment brut de la figure 17 : on notera la disparition quasi totale des sables > 160 μm après attaque à HCl. Les courbes de fréquences (fig. 18.2a et 18.2b) nous apprennent que le mode situé vers 125-160 μm , ainsi que le mode de 1600 μm de l'échantillon 2, disparaissent après traitement à l'acide.

L'étude de la nature de la fraction sableuse nous montre (fig. 12) que les constituants principaux de cette fraction sont, pour le groupe D (couches 2 à 12), des carbonates dinantiens (57 % en moyenne). Ceux-ci ne présentent pas de différence significative par rapport aux couches 17 à 14. Le second élément en importance est la catégorie « concrétions tubulaires » (à l'exception de la couche 2 qui en est presque dépourvue : 1 %). Ensuite viennent le quartz et la microfaune. Parmi les autres catégories, notons les valeurs extrêmement faibles des « grains microcristallins carbonatés » (catégorie n° 6), du quartz (catégorie n° 11) pour les fractions F.S. à F.II., ainsi que des « roches détritiques » (catégorie n° 12). La catégorie n° 13 (« concrétions non carbonatées ») présente aussi des valeurs faibles, surtout pour la couche 12. Quant aux catégories n° 5 (« sphères de calcite »), 9 (« gastéropodes ») et 10 (« charbons »), elles se rencontrent principalement au niveau des couches 2 et/ou 4 (fig. 12).

Notons qu'il existe également des **différences** importantes entre ces couches. Le sédiment décarbonaté de la couche 12 se distingue par des valeurs nulles pour les sables supérieurs à 315 µm (sables très grossiers et grossiers), des valeurs relativement faibles pour l'ensemble des sables (3–9 %) [fig. 16a], ainsi que par des valeurs très faibles, voire nulles, pour le quartz (catégorie n° 11) des fractions F.S. à F.II. et pour les catégories 12 (« roches détritiques ») et 13 (« concrétions non carbonatées ») [fig. 12].

Le sédiment de la couche 2 se caractérise par des valeurs de sables décarbonatés plus élevées que celles de la couche 12 (fig. 16a, 16b et 17), par la quasi-absence de « concrétions tubulaires » (catégorie n° 7) ainsi que par des teneurs en « grains microcristallins carbonatés » (catégorie n° 6) et en quartz (catégorie n° 11) pour les fractions F.S. à F.II. un peu plus élevées que celles des couches 12 et 4.

Quant à la couche 4, une distinction peut être faite entre son sommet et sa base. La partie supérieure est très riche en sables et particulièrement en sables supérieurs à 315 µm (sables très grossiers et grossiers), ceci à la fois pour le sédiment brut et pour le sédiment décarbonaté (fig. 16a, 16b et 17). Cette caractéristique, partagée avec le sédiment de la couche 2, nous a conduit à rassembler la couche 2 et le sommet de la couche 4 dans le

même sous-groupe granulométrique (D2). Le sommet de la couche 4 est aussi un peu plus riche en « roches détritiques » (catégorie n° 12) que la base de la couche et que les couches 12 et 2 (fig. 12).

La base de la couche 4, quant à elle, se rapproche de la couche 12 (fig. 16a et 16b), avec qui elle constitue le sous-groupe granulométrique D1 (voir § 3.4.3.4). Des valeurs légèrement supérieures en sables grossiers l'en distinguent toutefois, ainsi que des valeurs un peu plus élevées en « concrétions non carbonatées » (catégorie n° 13) [fig. 12].

4.4.2. Origine et mode de mise en place

De la même manière que pour les couches 17 à 14, le caractère plurimodal des courbes granulométriques du sédiment non décarbonaté (fig. 18.1a et 18.1b; voir aussi § 3.4.3.4, groupe D) indique que le sédiment est composé d'un mélange de plusieurs populations.

4.4.2.1. Stock autochtone

Comme pour les couches 17 à 14 (§ 4.3.2.1), **cryoclastie**, **fragmentation secondaire** et **altération chimique** sont à l'origine de la présence en grande quantité de dolomie, dolomite et calcite dans les couches 12 à 2.

Le sommet de la couche 4 présente une quantité importante de **granules** (2 mm–1 cm) émoussés. Ces éléments pourraient traduire, comme pour la couche 17b, une phase de **ruissellement** intense, d'autant plus que, comme pour cette couche 17b, la fraction inférieure à 2 mm des échantillons de 4a est riche en sables grossiers, ce qui est également à mettre en relation, selon nous, avec du ruissellement.

4.4.2.2. Stocks allochtones

Microfaune

Pelotes de régurgitation de rapaces nocturnes (voir § 4.3.2.2).

Fraction détritique

La forme des courbes cumulatives du sédiment décarbonaté (fig. 18.1a) évoque, comme pour les couches 17 à 14, une origine éolienne. Le tableau 12 compare les données des sédiments des couches 12 à 2 avec les valeurs de lèss typiques (Mücher, 1986).

Les données du tableau 12 confirment l'origine éolienne du sédiment décarbonaté

Tableau 12

Comparaison entre les caractéristiques granulométriques de lœss typiques données par Mûcher (1980) et les caractéristiques granulométriques des sédiments décarbonatés du Trou Al'Wesse.

Les chiffres entre parenthèses indiquent une valeur moyenne.

| Fraction concernée | MÛCHER (1986) | Trou al'Wesse | | | |
|--------------------|------------------|---------------------|-------------------|----------------|----------|
| | | Sous-groupe D1 | | Sous-groupe D2 | |
| | | Couche 12 | Couche 4b | Couche 4a | Couche 2 |
| 2–63 µm | 50–80 % | 88–96 % (91 %) | 81–86 % (84 %) | 83–85 % (84 %) | 79 % |
| 16–63 µm | 55 % | 45–60 % (52 %) | 40–44 % (42 %) | 42–49 % (46 %) | 34 % |
| < 2 µm | < 20 % | 3–7 % (6 %) | 8–14 % (11 %) | 4–9 % (7 %) | 12 % |
| 2 mm–63 µm | <15 % | 2–6 % (4 %) | 5 % | 6–13 % (10 %) | 9 % |
| 63–210 µm* | < 10 % | 2–6 % (4 %) | 5 % | 5–7 % (6 %) | 8 % |
| 2 mm–250 µm | Normalement, non | 0,02–0,2 % (0,07 %) | 0,2–0,4 % (0,3 %) | 1–6 % (4 %) | 1 % |
| Md | 20–40 µm (30 µm) | 16–19 µm (17 µm) | 15 µm | 17 µm | 13 µm |

* 63–200 µm pour les échantillons du Trou al'Wesse.

des couches 12 à 2. Les valeurs plus faibles de la catégorie 16–63 µm sont à mettre en relation avec les valeurs de la médiane (environ 16 µm) et du mode à 16–20 µm. Elles appellent la même remarque que pour les couches 17 à 14 (voir § 4.3.2.2) : le lœss est relativement fin car plus éloigné de la source que les lœss « classiques » de Hesbaye. De même, le mauvais classement du sédiment (« *poorly sorted* » de Folk et Ward) et les valeurs de l'indice d'asymétrie sont dus, comme pour les couches 17 à 14 (voir § 4.3.2.2), à la dispersion des agrégats lors du prétraitement des échantillons (Gale & Hoare, 1991) et sont compatibles avec une origine éolienne.

De même, les quelques données qualitatives concernant les minéraux denses des échantillons des couches 4 et 2 (voir § 3.2.3) sont compatibles avec l'origine éolienne.

Les valeurs des sables décarbonatés supérieurs à 250 µm de la couche 12 et de la base de la couche 4 sont négligeables, celles du sommet de la couche 4 sont du même ordre que celles des couches 17 à 14 (voir § 4.3.2.2) et celles de la couche 2 sont intermédiaires. Quant aux courbes cumulatives et de fréquence du sédiment décarbonaté (fig. 18.1a et 18.2a), elles ne présentent qu'un seul mode, sauf pour l'échantillon 2 (voir § 3.4.3.4, groupe D). La distinction D1/D2 se fait principalement au niveau de l'abondance des sables (tableau 9.1) ainsi qu'au niveau de la nature de la fraction sableuse pour les catégories 12 (« roches détritiques »).

Ces éléments tendent à démontrer que le sous-groupe granulométrique D1 concerne des échantillons dont la fraction décarbonatée

est uniquement composée de **lœss fins**. Par contre, le sous-groupe D2 est, comme le sont les couches 17 à 14, composé de sédiments issus d'un mélange entre du **lœss fin** et un stock de **sable d'âge tertiaire** probable (voir § 4.3.2.2). Les données de la morphoscopie (disponibles uniquement pour les couches 4 et 2) sont en accord avec cette interprétation (voir discussion pour le § 4.3.2.2).

L'origine de la fraction détritique étant définie, il nous reste à définir son mode de mise en place. Les mêmes remarques que pour les couches 17 à 14 (voir § 4.3.2.2) sont de mise pour les couches 2 et 4a. Le sable d'âge tertiaire et le limon d'origine éolienne sont probablement arrivés par **ruissellement** depuis le plateau, le phénomène devant être plus intense pour le sommet de la couche 4 au vu des teneurs plus importantes en sables supérieurs à 315 µm.

La base de la couche 4 et surtout la couche 12 présentent des teneurs très faibles (voire nulles) en sables grossiers. Cela ne peut être dû à l'épuisement du stock de sables oligocènes sur le plateau dans la mesure où on les retrouve dans les niveaux sus-jacents à la couche 12. Une position primaire des lœss ne peut non plus en être la cause, et ce pour deux raisons. D'abord, le limon d'origine éolienne est, comme pour les autres couches, intimement mélangé aux autres constituants (« grains microcristallins carbonatés », microfaune, éléments autochtones — grossiers et fins), ce qui est en opposition avec une sédimentation éolienne. Ensuite, si les sables grossiers sont rares, ils ne sont pas totalement absents pour tous les échantillons, comme

on devrait l'observer dans un vrai lœss (tableau 12, ligne «2 mm–250 µm»). Le limon éolien a donc été remanié, probablement par **ruissellement** depuis le plateau, comme pour les couches sous- et sus-jacentes. Un ruissellement moins dynamique pourrait alors expliquer la rareté de ces sables supérieurs à 315 µm. Mais il est possible également d'envisager une période d'accumulation (de lœss) sur le plateau, empêchant en grande partie l'accès aux stocks de sables tertiaires, le ruissellement affectant alors principalement le lœss fraîchement déposé. Dans l'état actuel de nos connaissances, il ne nous est pas possible de trancher entre ces deux hypothèses.

4.4.2.3. Phénomènes diagénétiques

Les concrétions tubulaires sont des manchons racinaires et ont donc une origine **biochimique** en relation avec une pédogenèse (Laville, 1975:37–38). Leur répartition suppose que la **pédogenèse** concernée a démarré du sommet de la couche 4 (ou de la couche 2?).

La présence de «sphères de calcite» (catégorie n° 5) est probablement à mettre en relation avec la **pédogenèse** de la couche 2 (dissolution des arêtes par l'action d'une eau agressive).

5. ENREGISTREMENT PALÉOCLIMATIQUE

5.1. Introduction

L'interprétation paléoclimatique des séquences sédimentaires situées à l'intérieur des grottes est assez délicate en l'absence de concrétionnements. Le cas des séquences de terrasses de grottes et des abris-sous-roche est plus favorable. En effet, l'influence des phénomènes climatiques extérieurs y est plus directement perceptible. Cette situation permet, dans des situations idéales, d'établir un lien avec l'enregistrement paléoclimatique relativement précis défini en Moyenne Belgique sur base des séquences lœssiques (Haesaerts, 1984; Haesaerts, 1985).

Toutefois, l'absence de séquence sédimentaire de référence en contexte karstique pour notre pays (Haesaerts, 1992; Collcutt, 1993:19) doit nous inciter à la plus grande prudence.

5.2. Remarques sur la cryoclastie

La cryoclastie (ou gélifraction, ou gélivation) désigne la fragmentation d'une roche sous l'effet du gel (Foucault & Raoult, 1992). Elle est liée à plusieurs phénomènes : l'humidité, la lithologie (structure et texture de la roche concernée), la fréquence des alternances gel/dégel ainsi que l'intensité et la durée du gel (Laville, 1975:23).

5.2.1. Influence du climat

Si on s'accorde généralement pour faire principalement intervenir la cryoclastie lors de phases froides et humides (Miskovsky, 1987:389; etc.), il n'en demeure pas moins que la gélivation des parois peut également se produire en climat tempéré (Ek, 1979:22; Haesaerts, 1992:52; Colcutt, 1993:18). Il semble même que, dans certaines conditions, l'augmentation de la cryoclastie soit à mettre en relation avec des épisodes de réchauffement au sein d'une période froide (Burhenne, 1988:122). En effet, des conditions très froides peuvent réduire, par exemple, la fréquence des cycles gel/dégel. De la même manière, des conditions froides et très sèches pourraient aussi réduire le fractionnement par le gel des parois rocheuses. Nous devons donc être très critique quant à l'interprétation climatique de ce phénomène, par ailleurs très bien représenté au *Trou Al'Wesse*.

5.2.2. Influence de la lithologie

L'importance de la lithologie est particulièrement marquante au *Trou Al'Wesse*. En effet, la dolomie constituant les parois du karst est un terrain particulièrement favorable aux phénomènes de gélivation : roche très fracturée, se délitant facilement. De plus, la porosité d'une dolomie secondaire est plus importante que celle du calcaire (Greensmith, 1978), ce qui augmente sa sensibilité au gel (Laville, 1975:23).

5.3. Interprétation paléoclimatique de la séquence du Trou Al'Wesse

Les considérations développées ci-dessus et au § 4 nous amènent à proposer les interprétations paléoclimatiques suivantes.

5.3.1. Couche 19

La désagrégation de la roche en place sous forme d'un sable dolomitique est liée à l'altération du ciment séparant les cristaux de dolomite. Cette altération est probablement à rattacher à une phase climatique tempérée.

5.3.2. Couche 18

Aucun signal climatique n'est enregistré dans ce genre de dépôt.

5.3.3. Couches 17 à 14

5.3.3.1. Ruissellements

Du ruissellement relativement important a été mis en évidence (§ 4.3.2) pour la fraction détritique décarbonatée (limon d'origine éolienne et sables oligocènes) ainsi que probablement pour les « grains microcristallins carbonatés ». Des phases de ruissellement plus dynamiques semblent être à l'origine de la plus grande importance de sables grossiers des échantillons 18, 21 et 22.

Les granules émoussés de la couche 17b témoigneraient également, selon nous, d'un ruissellement important.

5.3.3.2. Cryoclastie

L'importance de la fraction grossière dans les unités lithostratigraphiques 14, 15a et 16 témoigne de l'ampleur de la cryoclastie. Cela pourrait être mis en relation avec un climat froid et humide, sous réserve des observations faites au § 5.2.

Les couches 14 et 16 présentent des blocs de plus grosses dimensions que les autres couches de la séquence. Parfois, le décollement de gros blocs peut se faire indépendamment de toute action du gel (Ek & Quinif, 1988:2-3). Toutefois, la présence de tels blocs en niveau bien individualisés semble indiquer une fracturation d'origine climatique. Dans l'état actuel de nos connaissances, il ne nous est pas permis de déterminer si cette cryoclastie importante est liée à une phase froide très humide, à une action importante du gel ou encore à une combinaison des deux processus.

Les couches 15b et 17 témoignent par contre d'une cryoclastie moins importante (fig. 6). Une phase plus sèche paraît peu probable vu l'importance des ruissellements évoquée ci-dessus. La cause de la diminution

de la fracturation de la paroi est donc probablement liée à une diminution de l'influence du gel. Il pourrait s'agir là du témoignage d'une amélioration climatique. L'émoussé plus important de la fraction grossière pour la couche 15b (voir § 2.4) pourrait aller dans le même sens (altération chimique).

5.3.3.3. Interprétation

Le climat pour l'ensemble des couches 17 à 14 est donc dans l'ensemble froid et humide, avec des indices d'amélioration climatique pour les unités 15b et 17.

5.3.4. Couche 12

5.3.4.1. Ruissellements

Nous avons vu au § 4.4.2.2 que le limon d'origine éolienne de la couche 12 était arrivé par ruissellement dans la séquence. Une particularité de ce limon par rapport à celui des autres unités est de présenter un taux extrêmement faible, voire une absence totale, de sables supérieurs à 315 μm . Deux hypothèses furent évoquées pour expliquer cela : soit des processus sédimentaires (ruissellement) moins dynamiques, soit de nouveaux apports de lèss masquant plus ou moins complètement la source de sables. Dans les deux cas, la tendance climatique associée traduit un assèchement.

5.3.4.2. Cryoclastie

La gélivation est importante dans la couche 12, comme en témoigne l'abondante fraction grossière. Une humidité particulièrement importante semble peu probable vu les remarques formulées ci-dessus. À nouveau, nous faisons donc intervenir les modalités du gel.

5.3.4.3. Interprétation

Le climat lors du dépôt de la couche 12 témoigne donc de tendances froides, probablement plus sèches que pour les autres unités.

5.3.5. Couches 4 et 2

5.3.5.1. Ruissellements

La base de la couche 4 indique une légère augmentation du ruissellement. Cette augmentation est beaucoup plus marquée pour la couche 2 et surtout pour le sommet de la couche 4 (sables grossiers, granules émoussés : voir § 4.4.2). Nous y voyons l'indice d'un accroissement de l'humidité. Remarquons qu'un ruissellement intense peut traduire, outre une humidité importante, un couvert végétal réduit. Les témoins de pédogenèse ainsi que les données archéologiques (Mésolithique pour la couche 4 et périodes historiques pour la couche 2, donc végétation holocène) indiquent clairement ici que c'est l'humidité qui est responsable du ruissellement.

Dans l'hypothèse d'un apport de lœss contemporain du dépôt de la couche 12 (voir § 5.3.4), la pauvreté en sables grossiers de la base de la couche 4 pourrait s'expliquer par l'inertie du système à éroder ces lœss après leur dépôt. Le ruissellement n'atteindrait ainsi que petit à petit les sources de sables sous-jacentes au nouveau lœss sur le plateau.

5.3.5.2. Cryoclastie

La pauvreté en éléments grossiers indique une nette diminution, dès la base de la couche 4, des phénomènes de gélivation. Un climat plus sec est à exclure vu les remarques faites sur le ruissellement. Nous sommes donc probablement en présence d'une diminution des influences du gel, donc d'une amélioration climatique. La présence de concrétions tubulaires liées à une pédogenèse et surtout d'un sol humifère dans la couche 2 confirment cette interprétation.

5.3.5.3. Interprétation

Les traces de pédogenèse importante, couplées à l'augmentation de l'humidité et à la diminution des influences du gel, indiquent un réchauffement climatique.

5.3.6. Remarque

Comme on le voit, les phénomènes principalement évoqués pour la mise en place des sédiments des couches 2 à 17 sont le ruissellement et la cryoclastie. Aucun indice de déplacement en masse n'a été reconnu, ni sur le terrain, ni à travers nos analyses.

Toutefois, nous devons garder à l'esprit que nos observations ne concernent qu'une seule coupe ; la géométrie d'ensemble n'a pas encore été étudiée dans le détail. De plus, les analyses sédimentologiques réalisées dans le cadre de ce travail (granulométrie, morphoscopie, ...) se basent sur le sédiment pris en vrac et donc perturbé. Des analyses où le sédiment est étudié de telle manière que son organisation initiale soit conservée, comme la micromorphologie (voir définition et description de la méthode dans Courty, Fédoroff & Guilloché, 1987), pourraient apporter d'éventuels compléments d'information.

6. CONCLUSION — CADRE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE

Les objectifs principaux de l'étude sédimentologique préliminaire (préciser la nature, l'origine et le mode de mise en place des dépôts pléistocènes) ont, dans l'ensemble, été atteints. Une interprétation paléoclimatique a en outre été proposée sur base des données disponibles actuellement. Cette interprétation paléoclimatique de la séquence du *Trou Al'Wesse* comparée à la séquence de référence des lœss de Moyenne Belgique (Haesaerts, 1984 ; Haesaerts, 1985) nous amène à proposer l'échelle chronostratigraphique illustrée au tableau 13.

On constate que la chronostratigraphie proposée sur base des résultats de la sédimentologie est compatible avec les données de l'archéologie et de la géochronologie (Otte *et al.*, 1998). La poursuite de l'étude géologique et la confrontation des résultats présentés ici avec les données de la paléontologie (étude en cours par I. López Bayón) ainsi qu'avec celles d'autres sciences paléoenvironnementales comme la palynologie, la micropaléontologie (*a priori* très prometteuse) et la malacologie permettra de tester et compléter le schéma proposé ici à titre provisoire.

L'exemple du *Trou Al'Wesse* illustre bien l'intérêt des analyses sédimentologiques en grotte et en abri-sous-roche. En effet, les études en laboratoire sont particulièrement importantes en milieu karstique, peut-être davantage que dans la plupart des autres environnements sédimentaires, vu la complexité des apports (autochtones et allochtones) qui interviennent dans le remplissage.

Tableau 13
Cadre chronostratigraphique de la séquence du Trou Al'Wesse

| Couches | Contexte climatique | Chronostratigraphie (10 ³ ans B.P.) | S.I. | Culture | Datations* (B.P.) | | | |
|---------|---------------------|--|------|--------------------------|-------------------|---|-------------|---|
| 2 | Tempéré et humide | 0 | 1 | Historique | | | | |
| 4 | | | | a | Mésolithique | 5045 ± 45 (OxA-7633) 6650 ± 70 (Lv-1751) | | |
| | b | | | | | | | |
| 12 | Froid et sec | 10 | 2 | Pléniglaciaire supérieur | | | | |
| 14 | Froid et humide** | 25 | 3 | Interpléniglaciaire | | | | |
| 15 | | | | | | a | Aurignacien | 30750 ± 850 (OxA-7496) 32325 ± 660 (Lyon-212) 36500 ± 1100 (OxA-7634) |
| | | | | | | b | | |
| 16 | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | a | | |
| | b | | | | | | | |
| | c | ? | | | | | | |
| 18 | ? | | ? | | | | | |
| 19 | Tempéré ? | | | | | | | |

* Les dates publiées dans Otte *et al.* (1998) et reprises ici ont été obtenues sur ossements, sauf une (30750 ± 850 BP: OxA-7496) réalisée sur une pointe de sagaie.

** Avec, peut-être, des indices d'amélioration climatique pour les unités lithostratigraphiques 15b et 17? (voir § 5.3.3).

7. PERSPECTIVES

Le bilan relativement positif de l'étude sédimentologique préliminaire ne doit pas nous faire oublier qu'il ne concerne qu'une seule coupe. Il apparaît dès lors essentiel d'étendre l'étude géologique de terrain à l'ensemble de la tranchée actuelle. Une connaissance détaillée de la stratigraphie (géométrie et extension des unités lithostratigraphiques) est primordiale pour la poursuite des fouilles, notamment au niveau des couches archéologiques 15 (Aurignacien) et 17 (Moustérien), ainsi qu'à la transition entre les dépôts de pente et les dépôts de la plaine alluviale du Hoyoux. L'étude de l'environnement immédiat du site pourrait également nous apporter des précisions quant aux sources des apports allochtones (placages de sables oligocènes sur le plateau, influence du Hoyoux, ...). De même, l'étude du karst (morphologie, remplissage, ...) est susceptible de fournir des informations intéressantes qui complèteraient la vision d'ensemble du site.

Si une étude de terrain détaillée s'impose, les analyses de laboratoire devraient égale-

ment être poursuivies. Quelques analyses du type de celles réalisées dans le cadre de cet article (essentiellement la granulométrie et l'étude de la nature du sédiment) suffiront probablement à compléter les travaux de terrain. Parallèlement, de nouvelles analyses pourraient compléter l'information. Nous pensons principalement à la micromorphologie, à l'étude des minéraux denses, à l'étude de la fraction grossière ainsi qu'à la nature et à l'origine des « grains microcristallins carbonatés ».

Nous l'avons déjà dit, notre pays manque de référence pour la sédimentologie en domaine karstique. Les gisements préhistoriques en grotte ou en abris qui ont fait l'objet d'un suivi géologique continu sur le terrain et d'une étude géologique détaillée sont extrêmement rares. Il est pourtant essentiel de multiplier les données dans le but de confronter les résultats des analyses sédimentologiques appliquées sur différents sites. Cela nous permettrait de mieux comprendre les mécanismes de la dynamique sédimentaire qui régissent le remplissage de nos grottes et de nos abris.

Dans ce cadre, les travaux devraient systématiquement se faire dans une optique pluridisciplinaire afin d'étalonner entre elles les différentes sciences qui étudient l'environnement et le climat des hommes du passé. À ce propos, il serait souhaitable qu'en Belgique, les études paléoenvironnementales soient nettement mieux représentées sur les sites préhistoriques. C'est sur le terrain, et autrement que sous la forme d'interventions ponctuelles, que des disciplines telles que la paléontologie ou la sédimentologie doivent prendre place, en se greffant sur un cadre stratigraphique précis et détaillé établi de concert entre l'archéologue et le géologue. Cette conception plurielle de la recherche préhistorique serait hautement profitable à la discipline. L'archéologie préhistorique moderne renouerait ainsi avec la tradition des scientifiques du XIX^e siècle qui, tels M. De Puydt, J. Fraipont et M. Lohest, avaient compris l'importance d'une telle approche pluridisciplinaire.

LEXIQUE

CHRONOSTRATIGRAPHIE : voir « Stratigraphie ».

COMPÉTENCE (D'UN COURS D'EAU) : « Aptitude plus ou moins grande d'un cours d'eau à transporter des matériaux » (Foucault & Raoult, 1992). « Taille maximum des débris transportés par ce cours d'eau » (A. Pissart, 1989).

COMPORTEMENT COLLOÏDAL : se dit de particules ayant les propriétés de colloïdes. Les colloïdes sont des « [...] particules très petites (quelques μm) de substances diverses restant suspendues dans l'eau » (état dispersé) « en fonction de la tension superficielle de celle-ci, de sa viscosité et de la charge électrique des particules. Des modifications du pH, des teneurs en sels, ..., entraînent une floculation (agglomération lâche de particules) » (état floculé) « et une précipitation » (Foucault & Raoult, 1992).

DIAGENÈSE : ensemble des processus qui affectent un sédiment après son dépôt.

FLOCCULATION : voir « Comportement colloïdal ».

FORMATION : voir « Stratigraphie ».

LITHOSTRATIGRAPHIE : voir « Stratigraphie ».

LOG : « Anglicisme utilisé pour désigner une colonne stratigraphique (tirée de l'étude d'une région, ou correspondant à un forage) » (Foucault & Raoult, 1992).

OROGENÈSE : « Tout processus conduisant à la formation de relief. Plus particulièrement, formation des orogènes », c'est-à-dire des « systèmes montagneux édifiés sur une portion instable de l'écorce terrestre, ayant subi un important resserrement et montrant des plis et des nappes de charriage [...] » (Foucault & Raoult, 1992).

PALÉOLAPIÉS : lapiés fossile. Un lapiés (ou lapiès ou lapiéz ou lapiaz) est un phénomène karstique de surface. Il s'agit d'« [...] une surface creusée de cannelures ou de rigoles, larges de 1 cm à 1 m, séparées par des lames tranchantes » (Foucault & Raoult, 1992).

POUVOIR FLOCCULANT : qui provoque la floculation (voir ce mot).

PSAMMITE : « Les psammites du Condroz sont essentiellement des microarkoses (grès fins riches en feldspaths) à structure quartzitique, à grain fin (40 à 150 μm), très bien classées, généralement micacées et à contenu élevé en feldspaths (15 à 50 %). [...] Les micas détritiques sont groupés en minces lits, ce qui permet un délitage aisé en plaquettes ou en dalles. Le ciment des grès est mixte, siliceux et/ou carbonaté » (Goemaere *et al.*, 1998 : 18).

STRATIGRAPHIE : « Science qui étudie la succession des dépôts sédimentaires, généralement arrangés en couches (ou strates). Elle permet d'établir une chronologie stratigraphique relative [...]. On aboutit ainsi à des divisions que l'on peut différencier selon la nature des arguments qui servent à les définir. On distingue habituellement :

1. les **divisions lithostratigraphiques**, fondées sur la nature des terrains, indépendamment de leur contenu en fossiles. La plus petite division est la **couche**, plusieurs couches constituant un **membre**, plusieurs membres une **formation**, plusieurs formations un **groupe**.
2. les **divisions biostratigraphiques** fondées sur le contenu en fossiles. [...]

3. les **divisions chronostratigraphiques** caractérisées par des ensembles de couches auxquelles on fait correspondre des intervalles de temps. [...]»

(Foucault & Raoult, 1992).

TÉTRACORALLIAIRES : coraux fossiles, à quatre cloisons principales.

TRAVERTIN : « Roche sédimentaire calcaire continentale, à aspect concrétionné, plus ou moins vacuolaire [...]. Les travertins se déposent aux émergences de certaines sources, et dans des cours d'eau peu profonds à petites cascades [...]. L'aspect caverneux est dû en partie à la disparition [...] des débris végétaux encroûtés de carbonates [...].» (Foucault & Raoult, 1992).

XÉNOMORPHE : « S'applique à un minéral qui, bien que cristallisé, présente une forme quelconque, les faces caractéristiques du système cristallin n'ayant pu se développer [...]. Ant. : automorphe. » (Foucault & Raoult, 1992).

Remerciements

Il m'est agréable de remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, contribuèrent à l'aboutissement de ce travail, et plus particulièrement :

- F. Collin et M. Otte, responsables des fouilles au Trou Al'Wesse;
- la Compagnie intercommunale bruxelloise des Eaux, propriétaire du site;
- S. Abdessadok, responsable du laboratoire de sédimentologie de l'Institut de Paléontologie humaine (Paris), directeur de mon mémoire;
- Ch. Perrenoud, géologue au Musée de Tautavel, pour ses conseils;
- B. Lecervoisière, B. Mestour et R. Moudrikah, doctorants à l'I.P.H. (Paris), pour les nombreuses discussions fructueuses;
- F. Groult, A. Pirson-Dauchot, Ph. Pirson, I. López Bayón, Ph. Lacroix et V. Ancion, pour leur aide précieuse sur le terrain;
- M. Toussaint, paléanthropologue et archéologue, pour sa disponibilité et ses conseils;
- Th. Oudoire, géologue au Museum d'histoire naturelle de Lille, pour les discussions sur certains points de méthodologie;
- Éd. Poty, professeur à l'Université de Liège, pour les informations inédites communiquées au sujet du Dinantien;

– Ph. Pirson, qui par sa relecture attentive est à l'origine de nombreuses améliorations du manuscrit.

Sauf mention contraire, les illustrations ont été réalisées par Sylviane Lambermont, dessinatrice à l'Association Wallonne d'Études Mégalithiques (ACS fouille 750 zi accordé par le Ministère de la Région wallonne, Division de l'Emploi). Qu'elle trouve ici l'expression de mes plus vifs remerciements.

Enfin, je tiens tout spécialement à exprimer ma gratitude à mes parents, pour leur aide et leur disponibilité, ainsi qu'à mon épouse, pour sa patience et son soutien.

Bibliographie

- BURHENNE M., 1988. « Apport de l'étude des sédiments à la compréhension de la stratigraphie et du paléoclimat des dépôts quaternaires en grotte : le Trou Jadot (Province de Liège, Belgique) », *Annales de la Société géologique de Belgique*, 111 : 113–123.
- CAILLEUX A. & TRICART J., 1959. *Initiation à l'étude des sables et des galets*, vol. I, Paris, Centre de Documentation Universitaire, 376 p.
- CHAROLLAIS J. & DAVAUD E., 1976. *Microfaciès et ordinateur*, Paris, Technip, 225 p.
- CHEVALLIER-RENAUD M.-C., 1987. *Granulométrie des fractions limono-argileuses*, in J.-C. Miskovsky (éd.), *Géologie de la Préhistoire, Géopré*, p. 427–437.
- COLLCUTT S. N., 1993. « Physical Sedimentology of the Deposits of the Grotte Walou (Province de Liège, Belgium) », *Société wallonne de Paléontologie*, Mémoire n° 7 : 11–23.
- COLLIN F., 1989. « Trou Al'Wesse (Petit-Modave); fouilles 1989 », *Notae Praehistoricae*, 9 : 25–26.
- COLLIN F. & HAESAERTS P., 1988. « Trou Al'Wesse (Petit-Modave); fouilles 1988 », *Notae Praehistoricae*, 8 : 1–14.
- COLLIN F., LÓPEZ BAYÓN I., OTTE M., DERCLAYE C. & TRINH D., 1996. « Interprétation de la chronostratigraphie sur la terrasse du Trou Al'Wesse (Petit-Modave, Province de Liège) », *Notae Praehistoricae*, 16 : 47–53.

- COLLIN F., MASY Ph. et TINANT M., 1994. «La grotte du Trou Al'Wesse (Province de Liège); fouilles et découvertes de 1993», *Notae Praehistoricae*, 13 : 21–25.
- COLLIN F. & OTTE M., 1995. «Sondages dans la terrasse pléistocène de la grotte du Trou Al'Wesse (Petit-Modave, Province de Liège)», *Notae Praehistoricae*, 15 : 5–10.
- CORDY J.-M., 1998. «Contexte et problématique de l'industrie lithique du Paléolithique ancien de "La Belle-Roche" à Sprimont (Province de Liège)», Namur, D.G.A.T.L.P., Études et Documents, Archéologie, 5 : 9–22.
- COURTY M.-A., FÉDOROFF N. & GUILLORÉ P., 1987. *Micromorphologie des sédiments archéologiques*, in J.-C. Miskovsky (éd.), *Géologie de la Préhistoire, Géopré*, p. 439–477.
- DENNISON J.M. & SHEA J.H., 1966. «Reliability of visual estimates of grain abundance», *Journal of Sedimentary Petrology*, 36 (1) : 81–89.
- DERCLAYE C., 1999. *Étude du matériel archéologique de la couche 4 du Trô al'Wesse (Petit-Modave, Province de Liège, Belgique)*, Université de Liège (Faculté de Philosophie et Lettres), Mémoire de licence inédit, 2 vol.
- DERCLAYE C., LÓPEZ BAYÓN I., COLLIN F. & OTTE M., 1999. «Contributions à la connaissance du Mésolithique récent en Ardennes : étude archéologique de la couche 4 du Trô al'Wesse (Petit-Modave, Province de Liège, Belgique)», *Notae Praehistoricae*, 19 : 85–95.
- DUPONT Éd., 1865. «Notice sur les fouilles scientifiques exécutées dans les cavernes de Furfooz (Province de Namur)», *Bulletins de l'Académie Royale des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique*, 2^e série, XX (7) : 244–250.
- DUPONT Éd., 1867. «Étude sur cinq cavernes explorées dans la vallée de la Lesse et le ravin de Falmignoul pendant l'été de 1866», *Bulletins de l'Académie Royale des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique*, 2^e série, XXIII (3) : 244–265.
- DUPONT Éd., 1873a. *Les temps préhistoriques en Belgique. L'homme pendant les âges de la pierre dans les environs de Dinant-sur-Meuse*, Bruxelles, 250 p., 1 tableau synoptique.
- DUPONT Éd., 1873b. *Sur l'antiquité de l'homme et sur les phénomènes géologiques de l'époque quaternaire en Belgique*, in *Congrès International d'Anthropologie et d'Archéologie préhistoriques, 6^e session, Bruxelles, 1872*, Bruxelles, C. Muquardt, p. 110–132.
- EK C., 1974. *Étude sédimentologique dans la grotte de Remouchamps*, in M. Dewez (éd.), *Nouvelles recherches à la grotte de Remouchamps, Bulletin de la Société royale belge d'Anthropologie et de Préhistoire*, 85 : 16–41.
- EK C., 1979. «Les phénomènes karstiques dans les roches paléozoïques de la Belgique. Processus actuels, problèmes actuels», *Annales de la Société géologique de Belgique*, 102 : 13–26.
- EK C. & QUINIF Y., 1988. «Les sédiments détritiques des grottes : aperçu synthétique», *Annales de la Société géologique de Belgique*, 111 : 1–7.
- EK C. & POTY Éd., 1982. «Esquisse d'une chronologie des phénomènes karstiques en Belgique», *Revue belge de Géographie*, 106 (1) : 73–85.
- FOLK R.L., 1951. «A comparison chart for visual percentage estimation», *Journal of Sedimentary Petrology*, 21 (1) : 32–33.
- FOLK R.L. & WARD W.C., 1957. «Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters», *Journal of Sedimentary Petrology*, 27 (1) : 3–26.
- FORIR H. & LOHEST M., 1904. «Les cascades de Barse et le tuf du Hoyoux», *Annales de la Société géologique de Belgique*, 31 : 155–160.
- FOUCAULT A. & RAOULT J.-F., 1992. *Dictionnaire de Géologie*, 3^e édition, Paris, Masson. 350 p.
- FRAIPONT J., 1897. «Les néolithiques de la Meuse (type Furfooz)», *Bulletin de la Société d'Anthropologie de Bruxelles*, 16 : 311–391.

- FRAIPONT J. & BRACONNIER I., 1887. «La poterie en Belgique à l'âge du mammoth», *Revue d'Anthropologie*, 3^e série, 2 : 385–407.
- GALE S.J. & HOARE P.G., 1991. *Quaternary sediments. Petrographic Methods for the Study of Unlithified Rocks*, London, Belhaven Press, 323 p.
- GÉROUDET P., 1965. *Les rapaces diurnes et nocturnes d'Europe*, Neuchâtel, Delachaux et Niestlé, p. 37 et 313.
- GEURTS M.-A., 1976. «Genèse et stratigraphie des travertins de fond de vallée en Belgique», *Acta Geographica Lovanien-sia*, 16, 66 p.
- GEWELT M. & EK C., 1988. «Les concrétions carbonatées des grottes : aperçu synthétique», *Annales de la Société géologique de Belgique*, 111 : 9–19.
- GOEMAERE E., PAQUET B. & VERMERE-N L., 1998. *Les carrières de grès famenniens en Wallonie*, Geological Survey of Belgium, Professional Paper, 1998/3, N. 288, 127 p.
- GREENSMITH J.T., 1978. *Petrology of the sedimentary rocks*, London, Georges Allen & Unwin, 6^e édition, 241 p.
- GULLENTOPS F. & DEBLAERE C., 1992. *Érosion et remplissage de la grotte Scladina*, in *Recherches aux grottes de Sclayn*, vol. 1, *Le Contexte, Études et Recherches Archéologiques de l'Université de Liège*, 27 : 9–31.
- HADJOUIS A., 1987. *Granulométrie des fractions sableuses*, in J.-C. Miskovsky (éd.), *Géologie de la Préhistoire, Géopré*, p. 413–426.
- HAESAERTS P., 1984. *Aspects de l'évolution du paysage et de l'environnement en Belgique au Quaternaire*, in D. Cahen et P. Haesaerts (éd.), *Peuples chasseurs de la Belgique préhistorique dans leur cadre naturel*, Bruxelles, I.R.S.N.B., p. 27–39.
- HAESAERTS P., 1985. «Les lœss du Pléistocène supérieur en Belgique; comparaison avec les séquences d'Europe centrale», *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 1985 (2–3) : 105–115.
- HAESAERTS P., 1992. *Les dépôts pléistocènes de la terrasse de la grotte Scladina à Sclayn (Province de Namur, Belgique)*, in *Recherches aux grottes de Sclayn*, vol. 1, *Le Contexte, Études et Recherches Archéologiques de l'Université de Liège*, 27 : 33–55.
- HAESAERTS P., 1995. *Le remplissage de la tranchée C du Trou Magrite*, in M. Otte et L.G. Strauss (éd.), *Le Trou Magrite : Fouilles 1991–1992, Études et Recherches Archéologiques de l'Université de Liège*, 69 : 47–54.
- HANCE L., 1985. *Le Moliniacien (Viséen inférieur) du Synclinorium de Dinant depuis la région dinantaise jusqu'à la vallée de l'Ourthe (Belgique). Biostratigraphie et contexte sédimentologique*, Université Catholique de Louvain, Thèse de doctorat.
- HANCE L., 1988. «Le Moliniacien du Synclinorium de Dinant (Belgique), de la région dinantaise à la vallée de l'Ourthe», *Mémoires de l'Institut Géologique de l'Université de Louvain*, 33, 91 p.
- INGRAM R.L., 1971. *Sieve analysis*, in R.E. Carver (ed.), *Procedures in Sedimentary Petrology*, Wiley Interscience, p. 49–67.
- JUVIGNÉ E., 1974. «Un perfectionnement de la méthode de séparation des minéraux denses des lœss», *Annales de la Société géologique de Belgique*, 97 : 289–290.
- JUVIGNÉ E., 1978. «Les minéraux denses transparents des lœss de Belgique», *Z. Geomorph. N. F.*, 22 (1) : 68–88.
- KLEIN C. & HURLBUT C.S. (Jr.), 1999. *Manual of Mineralogy*, John Wiley & Sons, 21st ed., revised, 669 p.
- LANUIT G., 1984. *Étude biosédimentologique et pétrographique des travertins du Hoyoux. Relations microbes-carbonates*, Université de Liège (Faculté des Sciences), Mémoire de licence inédit, 2 tomes, 71 p., 47 pl.
- LAVILLE H., 1975. «Climatologie et chronologie du Paléolithique en Périgord. Étude sédimentologique de dépôts en grottes et sous abris», *Études quaternaires. Géologie, Paléontologie, Préhistoire*, Mémoire n° 4, Marseille, 422 p.
- LESPINEUX G., 1904. «Observations sur les cascades de la vallée du Hoyoux», *Annales de la Société géologique de Belgique*, 31 : 160.

- LOHEST M., 1901. «Le tuf de la vallée du Hoyoux», *Annales de la Société géologique de Belgique*, 28 : B.295–B.298.
- LOHEST M. & BRACONNIER I., 1888. «Exploration du trou de l'abîme à Couvin», *Annales de la Société géologique de Belgique*, 15 : 61–67.
- LOHEST M., FORIR H. & MOURLON M., 1902. *Carte géologique de la Belgique à 1:40.000 n° 157/7-8 (Modave-Clavier)*.
- LÓPEZ BAYÓN I., LÉOTARD J.-M., OTTE M., QUINIF Y., ANCIÓN V., LACROIX P., MILLER R. & NOIRET P., 1997. «Nouvelles recherches dans le site magdalénien du Trou da Somme (Hastière)», *Notae Praehistoricae*, 17 : 63–75.
- MASY Ph., 1993. «La sépulture collective néolithique du Trou Al'Wesse à Modave (Province de Liège)», *Bulletin de la Société royale belge d'études géologiques et archéologiques «Les Chercheurs de la Wallonie»*, XXXIII : 81–99.
- MCBRIDE E. F., 1971. *Mathematical Treatment of Size Distribution Data*, in R. E. Carver (ed.), *Procedures in sedimentary petrology*, p. 109–127.
- MISKOVSKY J.-C., 1987. *Granulométrie et morphoscopie des pierres*, in J.-C. Miskovsky (éd.), *Géologie de la Préhistoire, Géopré*, p. 389–402.
- MÜCHER H. J., 1986. *Aspects of Loess and loess-derived Slope Deposits: an Experimental and Micromorphological Approach*, Amsterdam, 267 p.
- OTTE M., 1979. *Le Paléolithique supérieur ancien en Belgique*, Bruxelles, Musées Royaux d'Arts et d'Histoire, 1, 684 p.
- OTTE M., COLLIN F., MILLER R. & ENGESSER K., 1998. «Nouvelles datations du Trou Al'Wesse dans son contexte régional», *Notae Praehistoricae*, 18 : 45–50.
- PAPROTH E., CONIL R., BLESS M. J. M., BOONEN P., BOUCKAERT J., CARPENTIER N., COEN M., DELCAMBRE B., DEPRIJCK Ch., DEUZON S., DREESSEN R., GROESSENS E., HANCE L., HENNEBERT M., HIBO D., HAHN G. & R., HISLAIRE O., KASIG W., LALOUX M., LAUWERS A., LEES A., LYS M., OP DE BEEK K., OVERLAU P., PIRLET H., POTY Éd., RAMSBOTTOM W., STREEL M., SWENNEN R., THOREZ J., VANGUESTAINE M., VAN STEENWINKEL M. & VIESLET J.-L., 1983. «Bio- and lithostratigraphic subdivisions of the Dinantian in Belgium, a review», *Annales de la Société géologique de Belgique*, 106 : 185–239.
- PIRSON St. & COLLIN F., 1997. «Révision de la stratigraphie pléistocène du Trou Al'Wesse», *Notae Praehistoricae*, 17 : 39–43.
- PISSART A., 1989. *Les rivières*, Notes de cours, Université de Liège, Laboratoire de Géomorphologie et de Géologie du Quaternaire, inédit, 78 p.
- PURSER B. H., 1980. *Sédimentation et diagenèse des carbonates néritiques récents*, Institut Français du Pétrole, éd. Technip, tome 1.
- RENAULT Ph., 1976. *Les karstifications pendant le Quaternaire*, in *La Préhistoire Française*, I.1, Paris, CNRS, p. 192–200.
- RIVIÈRE A., 1977. *Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations. Techniques et Méthodes sédimentologiques*, Paris, Masson, 170 p.
- ROBASZYNSKI F. & DUPUIS C., 1983. *Belgique. Guides géologiques régionaux*, Paris, Masson, 204 p.
- SERET G., 1960. «L'encaissement du Hoyoux depuis la fin de l'ère tertiaire», *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 84 : 199–211.
- TERRY R. D. & CHILINGAR G. V., 1955. «Summary of "Concerning some additional aids in studying sedimentary formations" by M. S. Shvetsov», *Journal of Sedimentary Petrology*, 25 (3) : 229–234.
- THOREZ J., DREESSEN R. & GOEMAERE E., 1985. *The "Psammites du Condroz" — A progradational deltaic-lagoonal-sand bar-tidal flats complex*, in *Symposium on Modern and Ancient Clastic Tidal Deposits. Field Guide «Ancient Tidal Deposits in Belgium and Luxembourg»*, Univ. of Utrecht, 3 : 1–27.
- TOURENQ J., 1987. *Minéraux lourds*, in J.-C. Miskovsky (éd.), *Géologie de la Préhistoire, Géopré*, 479–497.

UDDEN J. A., 1914. « Mechanical composition of clastic sediments », *Bull. of the Geological Society of America*, 25 : 655-744.

ULRIX-CLOSSET M., 1975. *Le Paléolithique moyen dans le bassin mosan en Belgique*, Wetteren, Universa, 420 p.

Adresse de l'auteur :

Stéphane PIRSON
« Association wallonne d'Études mégalithiques »
% Service d'Archéologie
Ministère de la Région Wallonne
Avenue des Tilleuls, 62
B-4000 Liège

E-mail : stephane.pirson@advalvas.be

Annexe 2

Données granulométriques (% cumulés) du sédiment décarbonaté

(Les données des échantillons 23 et 26 ne sont pas disponibles vu que ces deux échantillons sont totalement carbonatés)

| Diamètre (µm) | (phi) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
|------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----|--------|--------|----|
| 2000,00 | -1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | |
| 1600,00 | -0,66 | 0,08 | 2,11 | 0,20 | 0,09 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,19 | 0,05 | 0,14 | 0,19 | 0,06 | 0,00 | 0,30 | 0,62 | 0,04 | 0,28 | 0,36 | 0,09 | | 0,08 | 0,04 | |
| 1250,00 | -0,33 | 0,19 | 3,36 | 0,46 | 0,13 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,41 | 0,19 | 0,19 | 0,46 | 0,19 | 0,05 | 0,77 | 1,21 | 0,17 | 0,65 | 0,63 | 0,50 | | 0,17 | 0,06 | |
| 1000,00 | 0,00 | 0,35 | 4,12 | 0,61 | 0,15 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,69 | 0,34 | 0,52 | 0,72 | 0,35 | 0,26 | 1,39 | 2,12 | 0,41 | 1,40 | 0,99 | 0,96 | | 0,28 | 0,13 | |
| 800,00 | 0,33 | 0,47 | 4,41 | 0,69 | 0,15 | 0,08 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,96 | 0,53 | 0,66 | 0,91 | 0,50 | 0,44 | 1,98 | 2,74 | 0,74 | 2,00 | 1,45 | 1,38 | | 0,36 | 0,19 | |
| 630,00 | 0,66 | 0,56 | 4,70 | 0,79 | 0,20 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 1,21 | 0,73 | 0,85 | 1,17 | 0,64 | 0,60 | 2,43 | 3,30 | 1,02 | 2,45 | 1,81 | 1,74 | | 0,43 | 0,21 | |
| 500,00 | 1,00 | 0,64 | 5,18 | 0,85 | 0,22 | 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 1,51 | 0,97 | 1,09 | 1,41 | 0,76 | 0,70 | 2,85 | 3,92 | 1,33 | 2,83 | 2,17 | 2,20 | | 0,48 | 0,28 | |
| 400,00 | 1,33 | 0,76 | 5,47 | 0,95 | 0,26 | 0,17 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 1,95 | 1,41 | 1,37 | 1,63 | 0,95 | 0,89 | 3,32 | 4,70 | 1,63 | 3,15 | 2,71 | 2,75 | | 0,59 | 0,36 | |
| 315,00 | 1,66 | 0,91 | 5,85 | 1,05 | 0,33 | 0,19 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,12 | 0,02 | 2,48 | 1,85 | 1,75 | 1,87 | 1,18 | 1,09 | 3,69 | 5,45 | 1,96 | 3,40 | 3,16 | 3,35 | | 0,71 | 0,51 | |
| 250,00 | 2,00 | 1,07 | 6,33 | 1,18 | 0,39 | 0,23 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,18 | 0,02 | 3,33 | 2,72 | 2,27 | 2,25 | 1,61 | 1,48 | 4,21 | 6,59 | 2,39 | 3,73 | 3,88 | 4,36 | | 1,01 | 1,54 | |
| 200,00 | 2,33 | 1,36 | 7,00 | 1,36 | 0,48 | 0,29 | 0,06 | 0,07 | 0,04 | 0,27 | 0,05 | 4,51 | 3,93 | 3,26 | 2,85 | 2,31 | 2,08 | 4,88 | 8,29 | 2,98 | 4,18 | 5,06 | 5,87 | | 1,91 | 8,62 | |
| 160,00 | 2,66 | 2,06 | 8,15 | 1,74 | 0,65 | 0,40 | 0,10 | 0,13 | 0,08 | 0,43 | 0,07 | 6,55 | 6,51 | 5,01 | 4,24 | 3,63 | 3,44 | 6,16 | 11,26 | 4,20 | 5,21 | 7,05 | 9,12 | | 5,61 | 37,59 | |
| 125,00 | 3,00 | 3,22 | 9,30 | 2,20 | 0,83 | 0,60 | 0,16 | 0,18 | 0,14 | 0,61 | 0,09 | 8,86 | 10,20 | 7,09 | 6,40 | 5,28 | 5,08 | 7,50 | 14,75 | 5,61 | 6,51 | 9,76 | 13,85 | | 12,03 | 58,55 | |
| 100,00 | 3,33 | 4,69 | 10,64 | 2,87 | 1,13 | 0,98 | 0,25 | 0,35 | 0,24 | 0,88 | 0,16 | 10,76 | 13,02 | 9,65 | 7,76 | 7,26 | 7,16 | 9,35 | 18,76 | 7,07 | 7,76 | 13,64 | 19,67 | | 16,36 | 67,28 | |
| 80,00 | 3,66 | 6,69 | 12,27 | 4,05 | 3,01 | 2,02 | 2,98 | 2,34 | 0,49 | 1,35 | 0,35 | 14,69 | 17,29 | 12,67 | 8,84 | 10,40 | 10,70 | 12,42 | 24,01 | 9,42 | 9,56 | 18,07 | 25,54 | | 18,96 | 72,67 | |
| 63,00 | 4,00 | 9,17 | 13,04 | 5,99 | 5,43 | 5,28 | 5,59 | 4,82 | 1,62 | 2,48 | 1,20 | 16,23 | 18,41 | 14,33 | 10,47 | 12,38 | 12,52 | 14,55 | 26,75 | 11,68 | 11,49 | 19,69 | 28,38 | | 19,29 | 73,38 | |
| 50,00 | 4,33 | 12,31 | 16,87 | 10,09 | 8,12 | 8,50 | 7,98 | 8,57 | 6,87 | 6,40 | 2,86 | 17,83 | 20,69 | 17,73 | 11,31 | 15,66 | 15,10 | 16,83 | 30,77 | 14,11 | 13,84 | 24,57 | 33,38 | | 20,38 | 74,38 | |
| 40,00 | 4,66 | 12,31 | 16,87 | 10,12 | 8,12 | 8,51 | 8,00 | 8,73 | 6,98 | 6,42 | 2,86 | 17,83 | 20,69 | 17,73 | 11,31 | 15,68 | 15,10 | 16,83 | 30,80 | 14,11 | 13,84 | 24,57 | 33,38 | | 20,38 | 74,38 | |
| 31,50 | 5,00 | 14,94 | 20,20 | 18,21 | 12,71 | 14,92 | 12,60 | 16,03 | 18,15 | 12,97 | 9,66 | 21,94 | 23,86 | 23,49 | 16,63 | 19,90 | 20,19 | 19,32 | 33,57 | 18,41 | 15,57 | 29,85 | 34,71 | | 20,38 | 74,38 | |
| 25,00 | 5,33 | 21,96 | 30,17 | 30,79 | 20,98 | 24,98 | 22,72 | 26,98 | 32,10 | 25,14 | 23,26 | 33,44 | 29,41 | 35,83 | 23,72 | 31,70 | 30,38 | 28,47 | 39,10 | 26,99 | 22,46 | 37,39 | 38,71 | | 21,18 | 74,64 | |
| 20,00 | 5,66 | 31,60 | 41,81 | 44,27 | 32,01 | 37,79 | 35,60 | 41,59 | 47,91 | 41,05 | 39,77 | 46,59 | 37,34 | 48,99 | 31,71 | 45,19 | 42,27 | 39,28 | 46,72 | 37,30 | 30,21 | 47,20 | 46,04 | | 22,77 | 75,15 | |
| 16,00 | 6,00 | 43,00 | 55,11 | 55,06 | 45,79 | 48,77 | 50,32 | 53,45 | 61,86 | 55,08 | 53,37 | 59,74 | 43,69 | 60,51 | 41,46 | 56,15 | 52,46 | 51,76 | 54,33 | 47,61 | 37,97 | 54,74 | 53,37 | | 25,96 | 75,66 | |
| 12,50 | 6,33 | 52,65 | 64,26 | 64,05 | 56,82 | 57,00 | 60,44 | 63,49 | 73,03 | 64,44 | 63,09 | 72,06 | 48,45 | 70,38 | 48,56 | 64,59 | 61,80 | 62,57 | 59,17 | 55,34 | 44,00 | 61,53 | 60,69 | | 32,33 | 76,17 | |
| 10,00 | 6,66 | 59,66 | 71,74 | 71,24 | 65,09 | 63,41 | 68,72 | 71,71 | 79,54 | 70,99 | 70,86 | 79,46 | 52,41 | 76,14 | 53,88 | 69,64 | 69,44 | 70,06 | 64,02 | 60,49 | 50,03 | 66,81 | 65,36 | | 36,31 | 76,94 | |
| 8,00 | 7,00 | 65,80 | 78,39 | 76,63 | 71,52 | 67,98 | 74,24 | 77,18 | 84,19 | 75,67 | 74,74 | 86,03 | 55,59 | 81,08 | 60,09 | 74,70 | 75,38 | 75,88 | 67,48 | 65,64 | 54,34 | 71,34 | 69,35 | | 41,88 | 77,46 | |
| 6,30 | 7,33 | 71,06 | 83,37 | 80,23 | 77,95 | 72,55 | 80,68 | 81,75 | 87,91 | 81,28 | 78,63 | 90,14 | 58,76 | 85,19 | 65,41 | 78,92 | 80,47 | 80,87 | 70,94 | 69,08 | 59,51 | 74,35 | 73,35 | | 45,06 | 78,22 | |
| 5,00 | 7,66 | 75,45 | 86,70 | 82,92 | 80,70 | 76,21 | 84,36 | 84,48 | 90,70 | 83,16 | 80,57 | 92,60 | 61,93 | 87,66 | 69,84 | 81,45 | 84,72 | 85,03 | 73,01 | 70,80 | 62,95 | 77,37 | 76,68 | | 49,05 | 78,74 | |
| 4,00 | 8,00 | 78,96 | 89,19 | 84,72 | 85,30 | 78,96 | 87,12 | 86,31 | 92,56 | 85,96 | 81,54 | 95,07 | 64,31 | 90,13 | 74,28 | 83,98 | 86,42 | 86,69 | 75,78 | 72,52 | 68,12 | 79,63 | 79,35 | | 52,23 | 78,99 | |
| 3,15 | 8,33 | 81,59 | 91,69 | 86,52 | 87,14 | 81,70 | 89,88 | 89,05 | 94,42 | 88,77 | 83,49 | 97,53 | 67,48 | 92,60 | 77,83 | 87,35 | 89,81 | 90,02 | 77,86 | 75,95 | 72,43 | 81,90 | 82,01 | | 57,01 | 79,51 | |
| 2,50 | 8,66 | 85,09 | 93,35 | 88,32 | 89,89 | 83,53 | 92,64 | 90,87 | 95,35 | 90,64 | 85,43 | 99,18 | 70,66 | 94,24 | 81,37 | 89,88 | 92,36 | 92,51 | 80,62 | 77,67 | 76,74 | 84,91 | 84,68 | | 60,99 | 80,27 | |
| 2,00 | 9,00 | 87,72 | 95,84 | 91,01 | 91,73 | 86,28 | 94,48 | 92,70 | 97,21 | 92,51 | 86,40 | 100,00 | 73,83 | 95,89 | 84,92 | 92,41 | 94,06 | 94,18 | 82,70 | 80,25 | 80,18 | 86,42 | 87,34 | | 64,17 | 81,30 | |
| 1,60 | 9,33 | 89,48 | 97,09 | 91,91 | 93,57 | 87,19 | 96,32 | 93,61 | 99,07 | 93,45 | 87,37 | 100,00 | 76,21 | 97,53 | 86,70 | 94,10 | 95,76 | 95,84 | 84,08 | 81,96 | 83,63 | 87,93 | 89,34 | | 67,36 | 82,07 | |
| 1,25 | 9,66 | 91,23 | 98,34 | 93,71 | 95,41 | 89,94 | 97,24 | 95,44 | 100,00 | 95,32 | 89,31 | 100,00 | 78,59 | 98,35 | 89,36 | 95,78 | 97,45 | 97,50 | 86,16 | 85,40 | 87,08 | 90,19 | 91,34 | | 70,54 | 83,09 | |
| 1,00 | 10,00 | 92,99 | 100,00 | 94,61 | 96,32 | 92,68 | 99,08 | 96,35 | 100,00 | 96,26 | 91,26 | 100,00 | 81,76 | 99,18 | 91,13 | 98,31 | 99,15 | 99,17 | 88,93 | 87,98 | 90,52 | 92,46 | 93,34 | | 73,73 | 84,63 | |
| 0,80 | 10,33 | 95,62 | 100,00 | 95,51 | 98,16 | 93,60 | 100,00 | 98,17 | 100,00 | 98,13 | 92,23 | 100,00 | 84,14 | 100,00 | 93,79 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 90,31 | 90,55 | 93,11 | 93,97 | 95,34 | | 78,50 | 86,42 | |
| 0,63 | 10,66 | 97,37 | 100,00 | 97,30 | 100,00 | 96,34 | 100,00 | 99,09 | 100,00 | 99,06 | 94,17 | 100,00 | 92,07 | 100,00 | 95,57 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 93,77 | 93,99 | 95,69 | 95,47 | 98,67 | | 83,28 | 90,26 | |
| 0,50 | 11,00 | 98,25 | 100,00 | 98,20 | 100,00 | 97,26 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 96,11 | 100,00 | 96,03 | 100,00 | 97,34 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 96,54 | 96,56 | 97,42 | 96,98 | 100,00 | | 85,67 | 92,83 | |
| 0,40 | 11,33 | 99,12 | 100,00 | 99,10 | 100,00 | 98,17 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 97,09 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 98,23 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 98,28 | 99,14 | 97,74 | 100,00 | | | 88,85 | 94,36 | |
| 0,31 | 11,66 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 99,09 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 98,06 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 99,11 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 99,25 | 100,00 | | 92,83 | 95,90 | |
| 0,25 | 12,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | | 94,43 | 99,23 | |
| 0,20 | 12,33 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | | 96,02 | 100,00 | |
| 0,16 | 12,66 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | | 98,41 | 100,00 | |
| 0,12 | 13,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | | 100,00 | 100,00 | |