

Institut royal des Sciences
naturelles de Belgique

BULLETIN

Tome XXXI, n° 9
Bruxelles, mars 1955.

Koninklijk Belgisch Instituut
voor Natuurwetenschappen

MEDEDELINGEN

Deel XXXI, n° 9
Brussel, Maart 1955.

NOTES MINÉRALOGIQUES.

V. — Fulgurites in situ à Zonhoven (Limbourg belge),

par René VAN TASSEL (Bruxelles).

Introduction. — Les fulgurites des terrains sableux comptent, en raison des longueurs très considérables qu'elles peuvent atteindre, parmi les effets des plus remarquables de l'action de la foudre sur l'écorce terrestre. Leur présence a bien été observée dans de nombreuses régions du globe; de même, en Belgique, elles n'ont pas passé inaperçues. A. HACQUAERT a signalé, en 1939, un fragment de 3 cm provenant de Dorper Heide à Lommel (1). E. DARTEVELLE (1941, 1942 et 1945) a décrit, entre autres, des spécimens mesurant jusqu'à 7,2 cm de longueur, récoltés à Mol et Lommel par le Dr. G. HASSE d'Anvers, et il a établi la liste des gisements belges connus. Les fulgurites signalées par ces auteurs constituent des fragments trouvés à la surface ou remaniés et il ne semble pas que l'observation d'une fulgurite indubitablement en place dans les terrains belges, à l'endroit même où elle a pris naissance, ait jamais fait l'objet d'une description dans une publication scientifique.

La formation d'une fulgurite avait toutefois été constatée, en 1868, par un groupe d'ouvriers à la carrière de marbre Ste-Anne

(1) Une erreur s'est glissée dans la légende qui accompagne la reproduction de cette fulgurite; le grossissement est 2 ×.

à Gougny, quand la foudre frappa un tas de sable de 8 m³ et d'environ 1 m de hauteur. Cette observation fut rapportée seulement quinze ans plus tard par D. VAN BASTELAER (1883), qui précisa, à cette occasion, les caractéristiques d'un spécimen préservé de 12 cm de long.

Il est vraisemblable que les fulgurites en place ne doivent pas être excessivement rares dans certaines régions sableuses belges, mais leur découverte et surtout les observations des conditions de gisement ne se présentent que fort accidentellement (2).

L'envoi d'un tube vitrifié, long de 5,5 cm (fig. 2A; Inventaire général : 19.459), soumis pour détermination et offert en novembre 1953, par les Frères de Zonhoven, fut à l'origine de la présente étude. Le spécimen provenait d'un lot de fragments récoltés, au cours de l'été 1953, par M. A. VANDEPUT (3), de Zonhoven, lors du creusement d'un puits pour prélèvement de sable. D'après les indications fournies par cette personne, le tube s'enfonçant grosso-modo verticalement, fut rencontré à la profondeur approximative de 1 m et poursuivi jusqu'à 3 m. Mes observations sur place, faites en décembre 1953 et mars 1954, portent à partir de cette dernière profondeur. La fouille, entreprise par creusement (4) d'un puits vertical de 1,2 m de diamètre, permit de suivre la fulgurite jusqu'à 6 m de profondeur, où elle devenait inaccessible. Mais dans le même puits une autre fulgurite, cette fois plus mince, fut observée au cours des travaux et poursuivie jusqu'à 10 m de profondeur, où elle échappa à son tour aux observations. Vers le haut, cette dernière fulgurite se laissa repérer jusqu'à l'endroit, à 2,40 m sous la surface du sol, où elle avait été décapitée, malheureusement sans être aperçue, par des excavations antérieures ou par les déblaiements préliminaires.

Deux fulgurites ont donc été observées dans un espace très réduit; la longueur dépasse pour la première 5 m, en tenant compte des deux premiers mètres signalés par M. A. VANDEPUT,

(2) A la veille de la guerre 1914-1918, feu A. HAVERMANS, professeur d'école normale, avait observé par hasard une fulgurite en place dans la bruyère de Kalmthout. Une fouille, sans outils appropriés, avait permis de dégager une tubulation qui descendit verticalement dans le sable, mais qui se cassa à faible profondeur. Le spécimen prélevé, d'environ 1 cm de diamètre et 20 cm de long avec un élargissement au milieu, fut soigneusement conservé par M. R. HAVERMANS d'Essen, mais fut néanmoins détruit en 1944 à la suite des circonstances de guerre (Communication personnelle de M. R. HAVERMANS).

(3) Mécanicien ajusteur aux Charbonnages de Winterslag.

(4) Le creusement fut exécuté par M. J. TRUYERS, puisatier à Genk.

et celle de la seconde 7,50 m. Toutefois, dans aucun des deux cas, la terminaison ne fut atteinte, ce qui interdit de donner des indications précises sur les longueurs réelles.

Les deux fulgurites sont très fragiles sur la plus grande partie de leurs parcours. Elles ont seulement pu être récoltées par fragments (max. 20 cm), mais un prélèvement minutieux a permis de procéder au laboratoire à une reconstitution assez fidèle. A part les tout premiers deux mètres, dont malheureusement peu de matériel semble être préservé, les fulgurites dégagées sont conservées à l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique (Inv. gén. 19.634).

Gisement. — Le gisement des fulgurites est situé, en pleine bruyère dépourvue d'arbres, sur le territoire de Zonhoven, à environ 150 m au N. de la route Zonhoven-Genk, près du sommet d'une colline, appelée Vlasberg, qui fait partie de la bordure sud-ouest du plateau campinois. Le sol y est jonché de galets roulés de silex et de roches ardennaises appartenant aux anciennes terrasses de la Meuse. La figure 1 représente une carte topographique des lieux; le cercle au centre y indique l'endroit exact de la fouille.

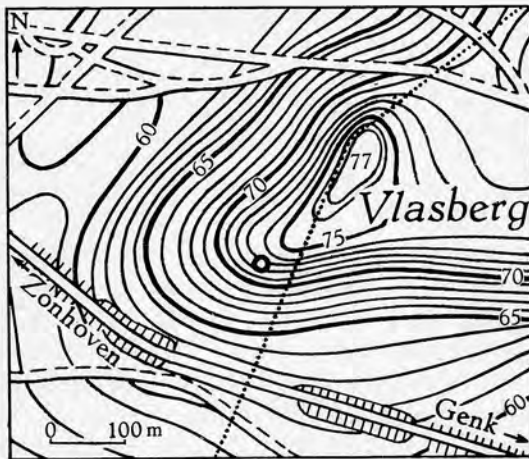


Fig. 1. — Carte topographique au 1/10.000 du Vlasberg avec, au centre à la cote 72-73 m, le gisement des fulgurites.

Milieu. — Le profil du terrain ne fut plus observable à l'endroit même de l'excavation initiale, mais une coupe, faite

environ 2 m à l'ouest du gisement, a permis de faire les observations suivantes :

Surface du sol : bruyère (cote + 72-73 m)	Epaisseur	Profondeur de la base
a. Sable gris foncé avec nombreux galets roulés de silex cacholongisé, de quartz, de quartzite . . .	7 cm	7 cm
b. Sable gris cendré avec nombreux galets du même type	12 cm	19 cm
c. Sable noir, humique, avec nombreux galets du même type	3 cm	22 cm
d. Sable brun, avec nombreux galets du même type .	17 cm	39 cm
e. Sable brun clair, devenant brun gris (e') vers la base, avec rares lits minces horizontaux de sable très foncé (e'')	18 cm	57 cm
f. Cailloutis de galets roulés de silex cacholongisé, de quartz	2 cm	59 cm
g. Sable jaunâtre à multiples strates horizontales de sable brun (g'); présence de rares lentilles argileuses	20 cm	79 cm
h. Cailloutis de galets roulés de silex cacholongisé, de quartz, de quartzite	3 cm	82 cm
i. Sable fin, jaune clair, micacé, sans stratification; absence de glauconie apparente et de traces organiques; rubéfections irrégulières surtout près du sommet	? > 9 m	? > 10 m

C'est dans ce dernier sable bien homogène, parfois blanchâtre, s'étendant dans le puits de fouille jusqu'au delà de 10 m de profondeur, que les fulgurites ont été dégagées. Ce sable est à ranger stratigraphiquement dans le Boldérien continental (Miocène), en se référant à la corrélation de F. HALET (1936).

Les dépôts supérieurs de la coupe montrent, jusqu'environ 50 cm, un profil de podzolisation. L'allure des couches *d* et *e* est ravinante. Le cailloutis *h* n'est pas horizontal, mais incline assez fortement à l'ouest : direction approx. N15W et inclinaison approx. 50W. Le sable *g* tend à devenir, de ce fait, plus puissant à l'ouest et, effectivement, est déjà observable sur une épaisseur de 60 cm, environ 1 m à W de la coupe précédente. Cette allure permet de supposer que ce sable n'a plus été visible au gisement

même des fulgurites. M. A. VANDEPUT a affirmé qu'il a creusé en un endroit où la bruyère était encore intacte et que c'est immédiatement sous les dépôts à cailloux qu'il a observé, dans du sable non stratifié, à 0,80-1 m de profondeur, la tubulation pour la première fois.

La description de la coupe, complétée par les données granulométriques consignées au Tableau I, indique que les terrains superficiels sont essentiellement sablo-caillouteux. Ces constatations ne sont pas sans importance dans la discussion sur l'âge de la tubulation.

TABLEAU I.
Composition des couches superficielles.

Couche	> 4 mm	4 à 2 mm	2 à 1 mm	1 mm à 70 μ	< 70 μ	Soluble dans HCl + H ₂ O ₂
a	14,17 %	1,36 %	1,36 %	69,57 %	1,23 %	12,30 %
b	8,48	6,10	3,97	77,43	—	3,76
c	44,16	6,27	2,84	36,47	0,06	10,13
d	40,18	9,06	3,62	45,07	0,07	1,99

Le sable *i* ne varie guère sur la puissance de 9 m visible dans le puits de fouille. Sa couleur est nuancée entre le blanc et le jaune. Des infiltrations rouge-brun irrégulières, non horizontales, viennent perturber sporadiquement son aspect uniforme; il s'agit d'une imprégnation ferrugineuse qui peut être enlevée par un lavage à l'acide chaud. Vers 10 m de profondeur le sable est un peu plus aggloméré et jaunâtre, à la suite d'une cimentation ferrugineuse peu importante. L'examen granulométrique, dont les résultats sont groupés au Tableau II, met en évidence que le sable *i* est fin, bien calibré et remarquablement uniforme (5). Il est seulement un peu plus grossier à 10 m, mais reste néanmoins un sable fin. La cimentation n'est que partiellement responsable de cette variation, car un traitement à l'acide chlorhydrique (1:1, à chaud), susceptible d'éliminer le ciment ferrugineux, n'a que peu d'influence sur les propriétés granulométriques (spécimen : 10 m*).

(5) Il n'est peut-être pas inutile de signaler ici, à titre documentaire, que les sables < 1 mm (sable traité à HCl et H₂O₂) des couches supérieures au sable *i* présentent d'autres propriétés granulométriques que ce dernier (voir tableau au verso, en bas de page).

TABLEAU II.

Analyses granulométriques du sable boldérien *i*.
(Tamisage mécanique de 50 g par Rotap pendant 10').

Tamis Tyler	Maille mm	Profondeur					
		0,80 m	2,50 m	3,50 m	6,00 m	10 m	10 m*
35	0,42	0,14 %	0,10 %	0,10 %	0,12 %	0,10 %	} 0,13 %
42	0,35	0,12	0,14	0,10	0,18	0,23	
48	0,30	0,30	0,44	0,28	0,48	0,75	
60	0,25	1,48	2,38	1,50	2,56	4,39	4,59
65	0,21	4,00	6,76	4,54	6,68	11,94	10,74
80	0,18	18,48	31,16	23,16	32,80	42,81	40,28
100	0,15	43,08	41,76	45,60	40,56	29,12	32,61
115	0,12	19,60	11,80	16,04	10,90	6,68	7,45
150	0,10	9,78	4,40	6,84	4,16	2,88	3,17
200	0,07	2,24	1,02	1,52	0,94	0,47	0,52
> 200	< 0,07	0,74	0,50	0,58	0,52	0,33	0,32
Somme		99,96 %	100,46 %	100,26 %	99,90 %	99,70 %	100,51 %

Caractéristiques granulométriques des sables < 1 mm
supérieurs au sable boldérien *i* :

Tamis Tyler	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>e'</i>	<i>e''</i>	<i>g</i>	<i>g'</i>	
28 mesh	} 9,63 %	} 24,30 %	8,43 %	7,40 %	0,16 %	1,06 %	1,97 %	0,18 %	0,31 %	
32			7,72'	7,67'	0,32	1,63	3,48	0,52	1,10'	
35			9,81	9,42	0,77	1,88	4,40	1,45	2,57	
42	6,56	15,06	14,24	13,06	1,85	2,78	7,55	3,92	6,00	
48	8,12	15,46	15,90	15,13	3,30	3,64	11,21	8,88	12,05	
60	9,28	13,07	13,70	13,31	5,50	4,44	12,52	13,81	16,53	
65	7,88	7,85'	8,02	8,48	6,09	3,93	9,11	12,53	13,58	
80	16,17	10,39	10,14	11,35	16,21	11,14	15,28	22,96	20,92	
100	22,67	8,98	7,92	9,28	34,37	32,97	19,22	23,61	18,17	
115	10,02	3,15	2,24	2,99	18,34	20,43	9,10	8,06	5,88	
150	5,48	1,30	1,02	1,31	10,02	11,87'	4,64	3,26	2,25	
200	2,36	0,42	0,38	0,42	2,77	3,64	1,27	0,72	0,50	
> 200	1,74	—	0,18	0,16	0,28	0,53	0,22	0,06	0,08	
		99,91 %	99,98 %	99,70 %	99,98 %	99,98 %	99,94 %	99,97 %	99,96 %	99,94 %

Lithologiquement le sable *i* est essentiellement quartzeux, avec quelques lamelles de mica blanc et quelques grains noirs : tourmaline, glauconite et minéraux opaques. Le caractère fortement siliceux de ce sédiment se reflète également dans sa composition chimique :

H ₂ O-	0,04 %
Perte au feu	0,23
SiO ₂	98,01
Al ₂ O ₃	1,12
Fe ₂ O ₃	0,44
		99,84 %

La particularité d'uniformité, aussi bien dans la composition que dans la granulométrie, constitue un cas intéressant se rapprochant d'un milieu homogène presque idéal et incite à examiner les fulgurites d'une façon détaillée, même si certains caractères doivent encore rester sans explication. La consignation des observations peut être de nature à faire mieux connaître les propriétés de la foudre.

Allure. — Le chemin suivi par les fulgurites est grossièrement vertical. Il a, de ce fait, grandement favorisé les fouilles et offert l'occasion de suivre les tubulations sur une distance considérable dans un puits circulaire de 3,75 m de circonférence. Les fulgurites sont blanches comme neige et tranchent bien sur le sable ambiant, même quand celui-ci est franchement blanchâtre; même les plus fines ramifications se laissent ainsi repérer à l'œil nu. Sectionnées suivant un plan horizontal, les tubulations se présentent dans le sable, comme une bague blanche déformée, complètement creuse, à l'intérieur, et, en contact direct, à l'extérieur, avec le sable environnant.

Pour la facilité de la description les deux tubulations seront désignées par I et II.

La fulgurite I est celle, rencontrée la première, à 0,80-1 m de profondeur, par M. A. VANDEPUT qui a déclaré qu'elle s'enfonce quasi verticalement sans ramification et que le diamètre du tube, étant de 1,5 cm environ au début diminue progressivement pour atteindre un peu moins d'un cm, à 3 m de profondeur. Mes propres observations indiquent qu'entre 3 et 4,5 m elle est dirigée vers l'ouest et fait un angle d'environ 10° avec la verticale. De fines ramifications longues de quelques mm ou cm et larges de 1 à 1,5 mm sont parfois implantées sur le tube principal à

la manière de radicelles sur une racine et sont généralement orientées vers le bas. A 4,5 m la fulgurite se bifurque : une ramification de 2 mm de section se maintient dans la direction précédente, diminue progressivement en importance, dessine ensuite un mince filet blanc friable dans le sable et se dissipe finalement 30-40 cm au-dessous de l'embranchement; la tubulation principale de son côté s'enfonçe davantage vers l'ouest sous un angle de 35° avec la verticale (6). Par le changement de direction la fulgurite ne tarde pas à disparaître dans la paroi du puits de fouille et à devenir finalement inaccessible, pour des raisons techniques, à la profondeur de 6 m. A la fin de son parcours observé, la tubulation s'incurve davantage vers le nord. La section du tube, restée grossièrement circulaire avec un diamètre de 7-8 mm jusqu'à 5,40 m, accuse ensuite une forme aplatie (12 × 5 mm).

La fulgurite II est plus mince et plus uniforme; son aspect circulaire (4 à 5,5 mm comme diamètre extérieur) ne change guère sur une longueur de 7,5 m. Elle s'enfonçe sous un angle de 10-15° avec la verticale. Des ramifications, de 1 à 2 mm de section, sont repérées de temps à autre, notamment à 3,5, 4 et 5,8 m, et elles sont orientées vers le bas.

La direction de la fulgurite II est S.E. à 2,40 m de profondeur et change graduellement : E. à 5,6 m, E.N.E. à 6,8 m, E. à 8 m et E.S.E. à 10 m. Vers 8 m, la tubulation s'est écartée tellement de l'axe du puits de fouille qu'elle devient pratiquement inaccessible à partir de 10 m. La fulgurite fait ainsi son entrée dans le puits par la paroi ouest, décrit un demi-tour par le sud et sort du puits par la paroi est; elle contourne la fulgurite I par le sud.

Les deux tubulations suivent donc un chemin en sens grossièrement opposé : la fulgurite I se dirige de l'est à l'ouest; l'autre, au contraire, de l'ouest à l'est.

Ces conclusions se dégagent de l'examen de l'allure générale des fulgurites, car, à l'échelle du décimètre, les tubulations ne sont pas rigoureusement rectilignes : elles montrent, en effet, des sinuosités et des coudes susceptibles de donner des changements de direction parfois assez brusques mais sans grande influence sur l'allure générale, sauf dans le cas signalé de la fulgurite I à 4,50 m de profondeur.

(6) Cette ramification est visible à la figure 2C : à gauche de la lettre C est représentée la branche principale et au-dessus, à droite, la trace de la fine ramification.

La présence de deux tubulations sur une surface restreinte pose la question de savoir si elles sont elles-mêmes le résultat d'une bifurcation ou si elles sont indépendantes dans l'espace et dans le temps. Les données nécessaires manquent toutefois pour pouvoir circonscrire davantage le problème. Il ne m'a pas été donné, en effet, d'examiner les fulgurites dès le début. Une réponse précise peut d'autre part s'avérer fort aléatoire, car l'observation éventuelle de tubes indépendants dans l'espace n'implique pas encore qu'ils ne sont pas contemporains : la foudre peut se ramifier avant de frapper le sol ou l'existence d'une bifurcation peut être effacée par l'érosion. L'occurrence de deux tubulations non contemporaines n'est, par contre, pas de nature à étonner, quand on prend en considération la prédilection de la foudre pour frapper certains endroits.

Morphologie. — Les deux fulgurites de Zonhoven montrent bien les caractères typiques de tubulations creuses, à paroi mince limitée par une surface extérieure rugueuse et mate et une surface intérieure vitreuse et reluisante. Elles sont grossièrement cylindriques sur la plus grande partie de leurs parcours. Le calibre varie graduellement avec la profondeur et sa diminution va de pair avec une atténuation des irrégularités à la surface extérieure et avec un amincissement de la paroi. Le diamètre des tubulations témoigne ainsi assez fidèlement de la puissance de l'éclair. La figure 2 représente quelques fragments de fulgurite grandeur naturelle. Les spécimens A, B, C, D et E font partie de la fulgurite I; les spécimens F, G, H et I de la fulgurite II. L'orientation verticale de la représentation est garantie, excepté pour les fragments A, B et I.

La rugosité de la surface extérieure est due à la cimentation, par un liant vitreux, de grains de quartz devenus opaques pour la plupart. La nature presque exclusivement quartzeuse du sable est responsable du fait que cette opacité donne à la surface extérieure des tubulations une couleur blanche comme neige et que le verre est incolore. Localement des grains noirs sont enrobés dans le ciment vitreux et des macules noir brunâtre apparaissent dans le verre. Les rubéfections qui se dessinent, dans le sable, sous forme de trainées irrégulières et minces de l'ordre du mm, marquent leurs empreintes sur les fulgurites qui montrent, au passage de chaque lit brun rouge une auréole brunâtre de même épaisseur. Le pigment fait corps avec la masse fondue, car une extraction, à chaud, par l'acide chlorhydrique conc., susceptible d'éliminer la pigmentation limoniteuse, est sans effet.

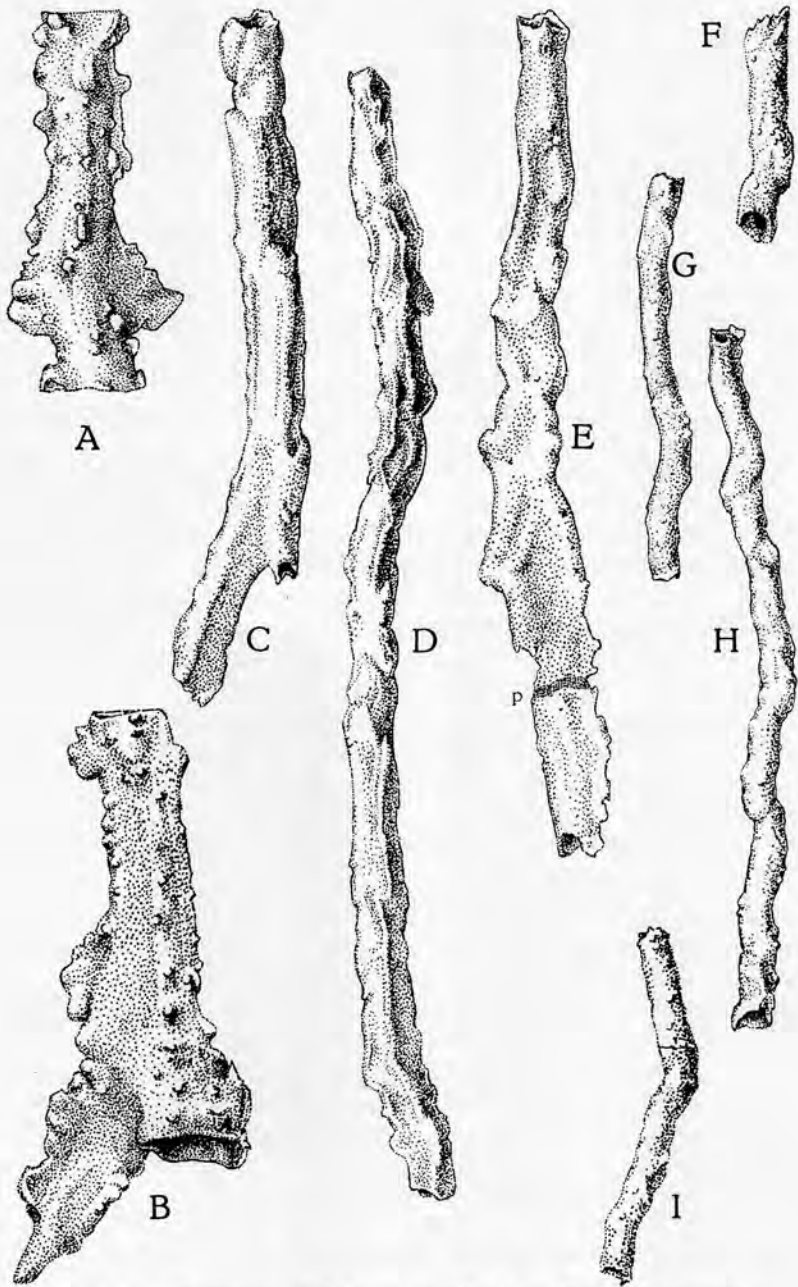


Fig. 2. — Fragments de fulgurite du Vlasberg. Grandeur naturelle.
 Fulgurite I : A et B à ? 1 m, C à 4,50 m, D à 5,25 m, E. à 5,40 m de profondeur.
 Fulgurite II : F à 2,50 m, G à 6,60 m, H à 8,20 m, I à 9,10 m de profondeur.

Une telle pigmentation est visible en bas du spécimen E de la figure 2 à l'endroit du signe p.

L'examen que j'ai pu faire sur les fulgurites du Vlasberg (des deux premiers mètres de la fulgurite I, seulement 34 cm m'ont été accessibles) indiquent qu'elles sont à regarder comme des cas simples dans la classification de A. LACROIX (1942, mémoire déposé en 1933) et conduit à les diviser en trois groupes :

- a. tubes à surface extérieure très irrégulière avec nombreuses excroissances et à surface intérieure lisse; paroi essentiellement vitreuse;
- b. tubes à surface extérieure irrégulière avec structures allongées suivant l'axe et surface intérieure mamelonnée; paroi granuleuse;
- c. tubes à surface extérieure assez uniforme sans structures évidentes et à surface intérieure globulaire; paroi granuleuse.

Dans la catégorie a se classent les spécimens A et B (figure 2). Ils proviennent de profondeurs comprises entre 1 et 3 m. Leur localisation exacte est inconnue, mais il est extrêmement probable qu'ils s'intègrent dans la partie toute supérieure; les excroissances donnent l'impression d'être imputables à une irradiation plus ou moins désordonnées d'un excédent de courant calorifique.

Le calibre de ces tubulations grossièrement cylindriques est 1-1,5 cm de diamètre extérieur; la paroi, épaisse d'env. 1 mm, est essentiellement constituée de verre, bourré d'innombrables petites bulles qui lui communique parfois un aspect laiteux. Le verre cimente vers l'extérieur des grains blanchis de quartz et y est perceptible dans les interstices.

La surface extérieure est très rugueuse, hérissée de pustules circulaires ou allongées, hautes de 1-3 mm et d'excroissances plus importantes, aplaties, longues d'un cm, qui tendent à se terminer en pointe ou qui laissent apparaître à environ 1 cm de la paroi une section tubulaire évoluant vraisemblablement en petite ramification. Cette structure est visible sur la figure 2 B, à gauche de la lettre B. La surface intérieure vitreuse reproduit assez fidèlement, d'une façon atténuée, les irrégularités de la surface extérieure, qui, de ce fait, sont creuses pour la plupart. Les excroissances sont disposées suivant un alignement longitudinal, imparfait et discontinu; elles forment ainsi des arêtes subparallèles à protubérances d'importance variable. De rares crevasses longitudinales, de 1-3 mm de long et de 1/4 mm de large, sont visibles sporadiquement à la surface extérieure et sont

bourrées de verre. Un filament étiré vitreux, de 0,2 mm, enjambant diamétralement la paroi d'une excroissance tubulaire, est parfois visible et prouve que le creux s'est formé par écartement de masses vitreuses plastiques.

La surface intérieure est unie et lisse, mais s'avère, à la loupe, cupulée ou bosselée, suivant que les bulles incluses ont ou n'ont pas percé la paroi intérieure.

Le type *b* s'observe sur tous les autres fragments de la fulgurite I qui m'ont été accessibles et se rencontre, certainement, à partir de la profondeur de 2,75 m.

La section transversale est grossièrement circulaire jusqu'à 5,40 m avec un diamètre extérieur de 7-8 mm (fig. 2 C, D et E), mais elle acquiert une forme elliptique ($1,2 \times 0,5$ cm) ou encore davantage aplatie à partir de cette profondeur jusqu'à la limite des observations à 6 m. A 5,70 m la section est tellement aplatie que les parois sont presque en contact. A la suite de l'aplatissement les fragments sont d'une fragilité extrême et s'effritent à la moindre manipulation. La variation de section est représentée à la figure 2 E : la partie du tube, au-dessus de E est grossièrement cylindrique, la partie au-dessous est aplatie et vue dans le prolongement du petit axe. Ce phénomène assez brusque d'aplatissement reste sans explication, d'autant plus que la fulgurite II ne montre aucune particularité au même niveau.

La paroi d'aspect granuleuse est épaisse de 1-1,2 mm; vers l'extérieur les grains de quartz ne sont plus agglutinés que très légèrement.

A la surface extérieure, des corrugations assez continues dans le sens de l'allongement de la tubulation montrent le plus souvent des crêtes obtuses (fig. 2 C et E) ou, notamment entre 5 et 5,40 m, des crêtes aiguës (fig. 2 D). Cette dernière structure paraît tout à fait semblable à celle de la fulgurite de Port Macquarie, Nouvelle-Galles du Sud, figurée par C. FENNER (1949, Pl. VIII, fig. 10 et 11), qui la qualifie de « unusual ridges ». Aucun facteur n'a été observé susceptible d'expliquer l'existence, sur 40 cm, de corrugations à crêtes aiguës. Il n'est peut-être pas sans intérêt de relever que cette structure se présente sur la partie cylindrique précédant immédiatement l'aplatissement de la tubulation. Les corrugations montrent, parfois, sur la crête, de petites protubérances dont l'extrémité est orientée tantôt en bas, tantôt en haut, et qui semblent bien être les amorces de petites ramifications.

La surface intérieure est vitreuse et mamelonnée; elle se présente comme une couche de globules de verre, réunis entre eux, de 0,1-0,25 mm. Cette dimension, qui se maintient sur toute la distance de 3 à 6 m, correspond aux dimensions des grains de sable (Tableau II). Cette observation indique que l'action calorifique de la foudre a été moins importante par rapport aux spécimens A et B, et qu'elle a donné lieu à un mouvement moins prononcé de la masse fondue; les grains de quartz semblent plutôt être transformés sur place.

Dans la catégorie c se range la totalité de la fulgurite II. La section est généralement circulaire, parfois un peu ovalaire. Le calibre varie à peine sur tout le parcours de 7,50 m : le diamètre extérieur est de 5-5,5 mm à 2,40 m de profondeur et est encore 4 mm à 10 m. Les fragments F, G, H et I de la figure 2, prélevés à des intervalles distancés, mettent en évidence l'aspect peu variable de la fulgurite II; le fragment G est en partie cylindrique et en partie ovalaire (la tubulation de 3 cm au-dessous de G dans la figure 2 G, donnant l'impression d'être plus mince, est vue dans le prolongement de son grand axe). L'épaisseur de la paroi granuleuse est 0,5-1 mm suivant la profondeur.

La surface extérieure, assez régulière, n'accuse pas de structures évidentes et montre tout au plus quelques ébauches de corrugation. La surface intérieure fait apparaître sur toute la longueur observé de 7,50 m, des globules de verre de 0,1-0,2 mm, comme dans le cas de la fulgurite I, mais moins soudés entre eux.

Caractères microscopiques et composition minéralogique. — L'examen au microscope révèle que la structure des fulgurites varie suivant la profondeur et le diamètre des tubulations et met, de ce fait, en évidence les variations dans la puissance du courant calorifique. La part du quartz fondu est, en effet, importante dans les fragments supérieurs, notamment A et B (fig. 2), et prête aux tubulations une rigidité relativement grande. La masse fondue, mise en mouvement, n'a plus laissé de trace des grains originaux que près du bord extérieur de la paroi et produit à la surface intérieure une couche émaillée unie. Des traînées colorées dans le verre, provenant d'éléments pigmentés, soulignent la mise en mouvement. La paroi vitreuse est bourrée d'une foule de bulles, tantôt sphériques, tantôt ellipsoïdales, qui atteignent parfois 0,25 mm de diamètre. Les grains de quartz de la surface extérieure sont

devenus troubles et crevassés au point de devenir macroscopiquement opaques et sont entourés de verre, qui leur fait perdre leur relief habituel dans les préparations au baume. Les bulles allongées sont disposées presque exclusivement avec leur grand axe perpendiculaire à la paroi, conformément aux multiples observations antérieures faites par d'autres auteurs.

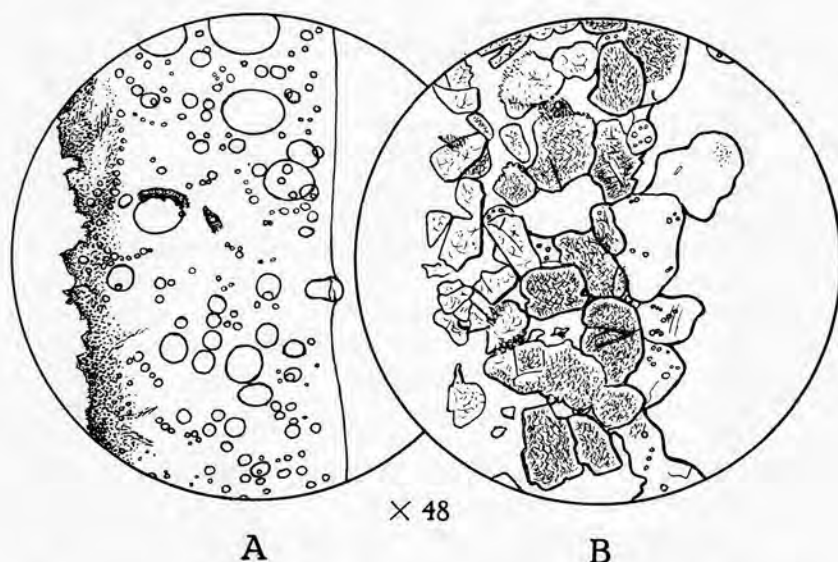


Fig. 3. — Vues schématiques, au microscope, de paroi de fulgurite (la cavité de la tubulation est représentée à droite dans chaque dessin). Grossissement : 48 \times .

A. Section transversale d'un fragment à 71 m de profondeur.

B. Section longitudinale d'un fragment à 5,60 m de profondeur.

Ces propriétés sont illustrées par la figure 3 A, qui représente une section transversale du fragment A de la figure 2. La paroi y est presque exclusivement constituée de verre; à droite se remarque le bord intérieur régulier et à gauche la zone, large du diamètre des grains de sable, composée de quartz trouble et dentelé. Les bulles très abondantes sont de toutes dimensions; elles se superposent même dans l'épaisseur de la section. La forme allongée, perpendiculaire au bord, des grandes bulles est manifestement due aux pressions inégales et à leur mobilité

dans un milieu visqueux. Au centre de la figure 3 A se trouve une bulle, située tout près de la surface intérieure, d'aspect piriforme. A la suite de la chute assez brusque de la pression, résultant du refroidissement des gaz après le passage du fluide calorifique dans la zone axiale, cette bulle a pu se détendre dans la masse encore plastique, toutefois sans percer la fine pellicule de verre enrobant. Ce mécanisme rend compte de la présence des petites bosses ou cupules de la surface intérieure. Ces structures correspondent aux fossettes arrondies observées par P. HARTING (1874, p. 15) à la surface vitrifiée de la fulgurite d'Elspeet. La présence des minéraux colorés dans le sable primitif a donné lieu à une pigmentation brunâtre du verre, à indice de refraction supérieur à celui du verre incolore. Deux de ces macules de verre pigmenté sont visibles au centre de la figure 3 A.

Dans les autres fragments examinés de la fulgurite I, ainsi que dans la fulgurite II, la part du verre est moins importante et confère à la paroi du tube un aspect granuleux. La masse fondue se présente, dans ces cas, sous forme de petits globules agglomérés, de 0,1-0,2 mm, entièrement vitreux ou chargés de bulles et sous forme de liant agglutinant faiblement les nombreux grains de quartz plus ou moins intact. Ce comportement est illustré par la figure 3 B : il s'agit ici d'une section longitudinale, approximativement dans l'axe, de la fulgurite I à 5,60 m. Une telle section est quasi identique à une section transversale. A droite se présentent, en couche de l'ordre de 1/4 mm, des globules vitreux de la paroi intérieure, puis dans la zone centrale des grains de quartz partiellement transformé et trouble, avec localement entre eux des soudures vitreuses. Davantage vers l'extérieur, la part du verre devient de moins en moins évidente et la bordure extérieure, à gauche de la figure 3 B, est constituée de quartz à peine transformé et agglutiné, accusant son relief caractéristique.

La figure 3 pourrait suggérer que l'épaisseur de la paroi des fulgurites est plus grande à 5,60 m, mais il convient de souligner que les grains faiblement adhérents des fragments A et B (fig. 2) ont eu toute chance de se détacher au cours des nombreuses manipulations et surtout au cours du sciage mécanique de la section, tandis que la section 3 B a trait à un fragment soigneusement prélevé, monté tel quel et solidifié avant toute usure.

Une même structure globulaire et granulaire se rencontre dans tous les fragments de la fulgurite II, avec cette différence que les globules sont encore moins soudés entre eux.

La silice fondue est connue minéralogiquement, d'après A. LACROIX (1915), comme lechatéliérite. La pureté du sable (7) boldérien du Vlasberg présage que les constantes physiques du verre des fulgurites se rapprochent de celles du verre de silice pure : $n = 1.458$, densité = 2.204 (A. LACROIX, 1915).

L'indice de réfraction de la lechatéliérite de Zonhoven mesuré par la méthode à l'immersion est $1.461 \pm .002$, valeur qui est conforme à celles relevées sur d'autres fulgurites : 1.458 (A. LACROIX, 1915), $1.462 \pm .003$ (A. F. ROGERS, 1917), 1.463-1.467 (E. S. SIMPSON, 1931), 1.46 (A. HACQUAERT, 1939), $1.457 \pm .003$ (A. F. ROGERS, 1946). Le verre pigmenté en brun est plus réfringent. La densité est difficile à établir en raison des nombreuses bulles tendant à donner des valeurs trop faibles. Une détermination effectuée, sous le binoculaire, par la méthode de flotation et d'immersion dans des mélanges de 1,2-dibromoéthane et de bromoforme sur des particules d'environ 0,2 mm, exemptes de bulles, a toutefois permis de relever une densité de $2.20 \pm .01$, comparable aux valeurs relevées par d'autres auteurs sur des fragments de fulgurite, dépourvus le plus possible des bulles gênantes : 2.197 (G. P. MERRILL, 1886), 2.1 (A. LACROIX, 1915), 2.20-2.22 (E. S. SIMPSON, 1931).

Des recherches ont été faites en vue de détecter, dans les fulgurites de Zonhoven, d'autres variétés de silice à côté du quartz et de la lechatéliérite (8). A. F. ROGERS (1946) a, en effet, observé de la cristobalite dans une fulgurite d'Indio, Californie, sous forme d'auréole autour de grains de quartz partiellement transformé; W. M. MYERS et A. B. PECK (1925) ont signalé, à l'extérieur de la fulgurite de South Amboy, New Jersey, du quartz à bordure granuleuse de cristobalite; G. BAKER et A. J. GASKIN (1946) ont assimilé des plages biaxes à de la tridymite, dans la fulgurite de Macquarie Harbor, Nouvelles-

(7) G. P. MERRILL (1886) a signalé le premier, et W. FISCHER (1927) après lui, que les analyses chimiques accusent une plus forte teneur en silice pour les fulgurites que pour le sable ambiant. Ces constatations méritent d'être confirmées, comme l'a d'ailleurs remarqué W. FISCHER (1927). Le matériel de Zonhoven se prête peu à une comparaison en raison de la grande pureté du sable; des analyses microchimiques entreprises sur 10-20 mg de substance n'ont pas permis de distinguer chimiquement entre le sable et le verre de la fulgurite.

(8) P. HARTING (1874, p. 19) a signalé que la silice de la fulgurite d'Elspeet montre au microscope une anisotropie, que l'auteur a attribuée à un refroidissement sous grande pression. Cette observation devrait être vérifiée. Le même auteur n'a pas décelé la présence de tridymite.

Galles du Sud. Les sections minces des fulgurites de Zonhoven ne montrent, au microscope polarisant, pas de trace de ces dernières variétés de silice. À la périphérie de certains grains de quartz partiellement transformé se remarque une structure sphérique dans une masse vitreuse qui pourrait faire croire à la présence de cristobalite, mais cette structure est due aux petites cupules de bulles crevées. Des radiogrammes, d'après la méthode des poudres, ont toutefois été pris sur des fractions de fulgurite : d'une part, une prise où la lechatéliérite est concentrée; d'autre part, une portion où le quartz est concentré (Rayonnement Cu, filtre Ni, 40 kV, 35 mA, exp. : 2 h, caméra \varnothing 5,7 cm). Dans aucun des deux cas les raies de diffraction de la cristobalite ou de la tridymite n'ont été observées. A moins que la méthode appliquée ne soit pas suffisamment sensible pour mettre en évidence de trop faibles quantités de ces autres variétés de silice, il faut en conclure que les fulgurites de Zonhoven sont minéralogiquement composées de lechatéliérite et de quartz, abstraction faite des minéraux accessoires du sable.

Divers auteurs ont émis une opinion sur la nature de la matière incluse dans les alvéoles des fulgurites, mais les vérifications expérimentales sont rares. Il est vrai que l'examen de ces inclusions pose assurément un problème délicat. Tantôt la présence d'eau ou de vapeur d'eau, tantôt celle d'air est présumée; le plus souvent les auteurs se sont bornés à parler de bulles gazeuses. P. HARTING (1874) a signalé, qu'en écrasant des éclats de fulgurite d'Elspeet immergés dans de l'huile de térébenthine, ce liquide entre immédiatement dans les alvéoles et il en a conclu que ces dernières sont vides ou contiennent tout au plus une faible quantité d'eau. A. RENARD (1879), en examinant une scorie, s'est demandé si les pores seulement visibles au microscope, ne sont pas dus à l'expansion d'inclusions primitives des grains de quartz. A. HACQUAERT (1939) a fait remarquer que les bulles de la fulgurite de Lommel accusent des groupements, qui semblent souligner grossièrement les vides entre les grains de quartz primitifs et il a conclu, de ce fait, que les bulles proviennent de gaz (air) ou de liquide (eau), qui remplissaient les pores du sable au moment de la chute de l'éclair. Cette observation est confirmée dans les fulgurites de Zonhoven, où un groupement des bulles, même microscopiques, dessinant imparfaitement le contour des grains de quartz transformé, se remarque dans la paroi extérieure du spécimen A et est visible dans la figure 3A. A. F. ROGERS (1917) a constaté le dégagement d'une petite quantité d'eau en chauffant, dans un tube

fermé, des fragments de fulgurite des rivages du lac Michigan et W. M. MYERS et A. B. PECK (1925) y ont vu un argument en faveur de la présence d'eau dans les alvéoles.

Une expérience semblable à celle de P. HARTING (1874) consistant dans l'écrasement, entre deux lamelles de verre, de petits éclats dans de la paraffine liquide ou dans l'eau, a montré qu'il s'échappe de petites bulles gazeuses des alvéoles incluses dans la lechatéliërite de Zonhoven. Ces bulles diminuent progressivement de volume dans le liquide enrobant pour se dissiper ensuite complètement après quelques secondes ou minutes. Ce comportement milite en faveur de la présence de gaz, parmi lesquels l'air semble tout indiqué. Cette observation corrobore la remarque de A. A. JULIEN (1901, p. 676), quand il a formulé : « the bubbles should be more properly denominated air-vesicles (Luftblasen) than vapor or steamcavities (Dampfporen) ».

Mécanisme de la formation. — La présence d'une cavité axiale dans la totalité des tubulations examinées de Zonhoven, soulève la question relative au sort subi par les grains de sable, qui ont primitivement occupé l'espace central. La forme tubulaire des fulgurites a été attribuée à divers facteurs, dont la part prépondérante varie suivant les auteurs : action purement mécanique de la foudre (W. FISCHER, 1927; K. ANDRÉE, 1934), pression de dilatation des gaz (de la vapeur d'eau principalement : K. G. FIEDLER, 1817; P. HARTING, 1874; ou de l'air principalement : J. J. PETTY, 1936; C. FENNER, 1949), portés à haute température au passage de l'éclair, ou encore une résultante d'action mécanique et d'action calorifique (A. LACROIX, 1915 et 1942). Le mécanisme de la formation des fulgurites n'est donc pas encore connu dans tous ses détails.

L'hypothèse peut être faite que la matière contenue actuellement dans le volume délimité par la paroi extérieure provient du sable primitif d'un même volume. Un essai de vérification peut être tenté, dans ce sens, au moyen des données relevées sur les spécimens de Zonhoven.

La mesure de la porosité du sable, provenant du gîte des fulgurites, a établi que les pores occupent 38 % du volume total. Un calcul, se rapportant à la fulgurite II, indique qu'un cylindre de 3 mm de diamètre et de, par exemple, 10 cm de haut, contient 44 mm³ de quartz (P.S. = 2,6), qui peuvent par déplacement, se loger à peu près, sous forme de verre (P. S. = 2,2), dans le volume de 48 mm³, disponible, en raison des pores, dans le tube enveloppant de 1 mm d'épaisseur. Cette dernière dimension cor-

respond assez bien à l'épaisseur de la paroi de la fulgurite, mais, par contre, l'observation montre que les pores de la paroi sont loin d'être colmatés comme le suppose le calcul précédent. L'examen des sections minces, telle que celle de la fig. 3 B, révèle en outre que la présence du verre ne s'est plus manifestée, dans le cas de la fulgurite II, à 0,5 mm de la paroi intérieure. Il faut encore signaler en plus, relativement à la paroi, qu'une transformation de quartz en verre, produisant une augmentation de volume, et, de ce fait, une diminution d'espace libre, est négligée dans le calcul. L'hypothèse énoncée plus haut ne trouve pas d'appui dans le cas considéré.

L'examen d'un fragment ayant manifestement été soumis à une action plus intense de la foudre, tel que le spécimen A (fig. 2 A et 3 A), paraît tout aussi intéressant. Le volume de la cavité centrale du fragment A est 2,7 cc et celui de l'enveloppe même, 1,6 cc. Dans le premier volume, 1,7 cc ont pu être occupés par du quartz et dans le second, 0,6 cc par les pores. Le verre, provenant de la fusion de 1,7 cc de quartz, requiert env. 2 cc d'espace libre dans la paroi; cette condition se satisfait seulement pour un tube de 3 mm d'épaisseur, ce qui dépasse largement l'épaisseur observée. Dans le calcul il y aurait encore lieu de tenir compte d'une transformation quasi complète de quartz en verre dans l'espace occupé actuellement par la paroi et de la présence des nombreuses bulles; la considération de ces deux phénomènes n'a d'autre incidence que d'augmenter l'épaisseur calculée de la paroi.

Il paraît résulter de ces constatations que l'invariabilité de la porosité, à la base des calculs, ne s'est pas réalisée; il est en effet fort probable que la pression, responsable du refoulement du verre, a également tassé les grains au voisinage immédiat et dégagé de ce fait un volume axial plus grand. Il est aussi possible, du moins pour le spécimen A, qu'il y ait eu perte de substance, par simple effet mécanique près de la surface ou par volatilisation de la silice, ce qui ferait admettre des températures actives bien supérieures à celle de la fusion du quartz. Des données supplémentaires sont toutefois indispensables pour étayer quelque interprétation fondée et soulignent l'importance des observations minutieuses des conditions de gisement.

Longueur. — La longueur totale des fulgurites de Zonhoven est inconnue; non seulement les terminaisons n'ont pas été atteintes au cours des fouilles, mais aussi la constatation du début n'a pu se faire avec les garanties souhaitables. La faible

variation de calibre de la fulgurite II, sur un trajet déjà considérable de 7,5 m, indique que l'énergie de la foudre ne s'est dépensée que fort graduellement et fait présumer que cette fulgurite peut, en principe, s'étendre encore sur une distance appréciable. La diminution insensible du calibre en fonction de la profondeur a déjà été signalée par J. J. PETTY (1936) pour des fulgurites de Carolina, pour lesquelles il a indiqué des longueurs de 4,5 à 7,5 m « without any marked decrease in size ». Il est possible que la nappe phréatique ait constitué la fin des fulgurites de Zonhoven. Au pied de la colline Vlasberg, vers la cote 61 m, l'eau est normalement puisée à 3 m de profondeur et dans le puits de fouille le sable devenait très légèrement humide à 10 m. Il se peut que la terminaison de la fulgurite n'était plus loin quand les fouilles ont été arrêtées à 10 m.

Age. — Les considérations sur la longueur possible des fulgurites de Zonhoven sont toutefois assez précaires du fait que l'âge incertain des tubulations ne permet pas de considérer l'importance de la partie éventuellement enlevée par l'érosion. Les tubulations peuvent être récentes, comme elles peuvent aussi appartenir à une époque plus révolue, toutefois postérieure au Boldérien (Miocène).

Des fulgurites *in situ* fossiles peuvent être conservées dans leur milieu au même titre que les structures primaires des sédiments. Des tubulations considérées comme fossiles ont été signalées par W. L. BARROWS en 1910 (*in* K. ANDRÉE, 1934) à New Jersey dans des sables crétacés et par W. FISCHER (1927) à Guteborn dans des dépôts miocènes, mais A. W. GRABAU (1913, *in* K. ANDRÉE, 1934), d'une part, et K. ANDRÉE (1934), d'autre part, ont estimé que l'âge fossile n'en était pas suffisamment établi et que l'hypothèse de formation toute récente, après la mise à jour artificielle des sédiments au cours de l'exploitation, n'est pas à écarter.

Dans le cas des fulgurites de Zonhoven les conditions d'observation sont encore moins favorables. Le sommet de la fulgurite II a été détruite avant sa découverte; pour la fulgurite I les seules données disponibles sont celles fournies par M. A. VAN-DEPUT, qui fut affirmatif en déclarant que sa fouille fut faite dans un sol vierge et que la tubulation fut observée pour la première fois dans le sable blanchâtre sous les dépôts à galets. Pour qu'un âge antérieur à la formation des terrasses mosanes puisse être envisagé, il est indispensable d'être renseigné si les dépôts à galets sont bien, au gîte des fulgurites, les sédiments non dérangés

des terrasses, et si ces couches se prêtent à la formation éventuelle de fulgurites récentes. Il n'est pas évident que la première condition soit réalisée; la seconde par contre semble être satisfaite. La description des dépôts à galets, exposée précédemment, a mis en évidence que la nature sablo-caillouteuse des couches supérieures se prête, à la lumière de la découverte de W. FISCHER (1938), à la formation de fulgurites. Ce dernier auteur a signalé, en effet, une fulgurite longue de 1 m dans du gravier de Sörnewitz, Saxe. Si les couches supérieures à cailloux sont bien en place au gîte du Vlasberg et si les fulgurites apparaissent seulement sous ces dépôts, un âge pré-holocène semble admissible. Il faut toutefois ne pas perdre de vue que le caractère hétérogène et la couleur des dépôts à galets sont susceptibles de masquer une fulgurite éventuelle devant un œil non averti, et que la formation d'une fulgurite ne débute pas nécessairement immédiatement sous la surface. Il résulte, en conclusion de ces considérations, que les données de gisement utiles à la précision de l'âge sont fort vagues.

Une autre observation à rapporter dans ce cadre est que les fulgurites du Vlasberg ont inclus, au passage des zones rubéfiées d'infiltration du sable, un pigment rouge-brun dans leur masse fondue. Ceci indique que la formation des tubulations est postérieure à ces rubéfiations, dont toutefois l'âge est également inconnu.

Il convient de signaler qu'une fibre d'une substance brunâtre d'env. 0,5 mm de diamètre a été constatée dans la cavité axiale de la fulgurite II, depuis le début observé à 2,40 m de profondeur jusqu'à env. 3 m. Cette substance, chargée d'un pigment ferrugineux, reste néanmoins brunâtre après extraction à l'acide (HCl 1:1 à chaud) et se comporte comme une matière organique au cours d'une calcination succédant au lavage. Bien qu'aucune structure cellulaire nette n'ait été visible au microscope, cette fibre est vraisemblablement une trace végétale. Une telle substance est postérieure à la tubulation, car il est inadmissible qu'une racine ayant guidé la foudre dans le sable puisse subsister dans la tubulation. Le sable du gîte des fulgurites s'est d'ailleurs révélé exempt de traces végétales. D'autre part, la constatation de la présence d'une racine postérieure dans la cavité de la fulgurite est malheureusement sans grand intérêt pour la précision de l'âge de la tubulation, car le développement d'une racine dans le creux d'une fulgurite peut être tout récent et se produire rapidement. La présence de substances végétales dans les fulgurites en place n'est d'ailleurs pas exceptionnel et a déjà été

signalée, de vieille date, par K. G. FIEDLER (1817, p. 141, et 1822) et E. SPIESS (1897).

Les données générales, qui se dégagent de la littérature déjà fort abondante sur les fulgurites et qui sont rassemblées et commentées par W. FISCHER (1927), K. ANDRÉE (1934) et J. J. PETTY (1936), indiquent que les tubulations de Zonhoven correspondent aux caractéristiques qui peuvent être formulées pour des fulgurites typiques et simples, bien que les phénomènes de fusion s'y révèlent moins importants qu'il a généralement été reconnu. Leur longueur déjà considérable n'est pas extraordinaire : d'autres fulgurites (9), qui peuvent être signalées parmi les plus longues observées, mesurent : 11,3 m à Drigg, Cumberland (E. L. IRTON, 1823), 14 m à Rome, New York (C. E. WEST, 1843); en Carolina, J. J. PETTY (1936) a signalé des fulgurites mesurant communément 6 à 9 m de longueur et il a même repéré des tubulations à 18 m sous la surface du sable. Une particularité qui s'est remarquée souvent sur des fulgurites d'autres provenances est l'allure spiralée, et précisément dextrogyre, des corrugations sur la surface extérieure des tubulations. Cette structure ne se manifeste pas sur les fulgurites examinées de Zonhoven; les corrugations, généralement peu prononcées, n'y sont pas rigoureusement parallèles à l'axe de la tubulation et ébauchent parfois une allure rotatoire sur un cm, mais elles ne sont pas susceptibles de mettre en évidence une structure spiralée sur une distance de l'ordre du dm.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE.

- ANDRÉE, K., 1934, *Der Blitz als allgemein-geologischer Faktor und erdgeschichtliche Erscheinung*. (Schrift. Phys.-ökon. Ges. Königsberg, LXVIII, pp. 111-158.)
 BAKER, G. et GASKIN, A. J., 1946, *Natural glass from Macedon, Victoria, and its relationships to other natural glasses*. (J. Geol., LIV, pp. 88-104.)
 DARTEVELLE, E., 1941, *Fulgurites du Congo*. (Bull. Soc. belg. Géol., L, pp. 91-95.)
 DARTEVELLE, E., 1942, *Les Fulgurites*. (Ciel et Terre, LVIII, pp. 180-187.)

(9) A. DUFRÉNOY (1856, p. 161) a signalé une fulgurite ramifiée de plus de 10 m de long sans indication de provenance.

- DARTEVELLE, E., 1945, *Fulgurites de Belgique*. (Bull. Soc. belg. Géol., LIV, pp. 254-257.)
- DUFÉRENOY, A., 1856, *Traité de Minéralogie*. 2 éd., T. 2, 683 pp., Paris.
- FENNER, C., 1949, *Sandtube fulgurites and their bearing on the tektite problem*. (Rec. S. Austral. Mus., IX, pp. 127-142.)
- FIEDLER, K. G., 1817, *Über die Blitzröhren und ihre Entstehung*. (Gilbert Ann. Phys. LV, pp. 127-164.)
- FIEDLER, K. G., 1822, *Auffindung und Ausgrabung einer 8 Leipzig. Ellen 5 3/4 Zoll langen Blitzröhre bei Dresden*. (Gilbert Ann. Phys. LXXI, pp. 301-312.)
- FISCHER, W., 1927, *Blitzröhren aus dem miocänen Glassanden von Guteborn bei Ruhland, O. L.* (Neues Jahrb. f. Min., Beil. Bd. LVI, Abt. A, pp. 69-98.)
- FISCHER, W., 1938, *Eine Blitzröhre aus dem Geschiebekies vom Lichte-Berg bei Sörnewitz, Amtshauptmannschaft Oschatz, Sachsen*. (Sitz. Ber. Abh. Naturw. Ges. Isis, Dresden, 1936-1937, pp. 51-53.)
- HACQUAERT, A., 1939, *Een fulguriet uit de Limburgsche Kempen*. (Natuurw. Tijdschr. 21, pp. 3-6.)
- HALET, F., 1936, *Le Néogène et l'Oligocène entre Hasselt et Genck*. (Bull. Soc. belg. Géol., XLVI, pp. 194-199.)
- HARTING, P., 1874, *Notice sur un cas de formation de fulgurites et sur la présence d'autres fulgurites dans le sol de la Néerlande*. (Verh. Wetensch., Amsterdam, XIV, 23 pp.)
- IRTON, E. L., 1821, *On the vitreous tubes found at Drigg, in Cumberland*. (Trans. Geol. Soc., V, pp. 617-618.)
- IRTON, E. L., 1823, *Fortgesetzte Nachrichten von Ausgrabung von Blitzröhren zu Drigg, in Cumberland; aus einem Briefe*. (Gilbert Ann. Phys., LXXIV, pp. 218-222.)
- JULIEN, A. A., 1901, *A study of the structure of fulgurites*. (J. Geol., IX, pp. 673-693.)
- LACROIX, A., 1915, *La silice fondue considérée comme minéral (lechatelierite)*. (Bull. Soc. franc. Min., XXXVIII, pp. 182-186.)
- LACROIX, A., 1915, *Sur les fulgurites exclusivement siliceuses du Sahara oriental et sur quelques fulgurites silicatées des Pyrénées*. (Bull. Soc. franç. Min. XXXVIII, pp. 188-198.)
- LACROIX, A., 1942, *Les fulgurites du Sahara*. (Comm. Acad. Sci. Colon. Paris, XVIII, 1931-1940, pp. 151-168.)
- MERRILL, G. P., 1886, *On Fulgurites*. (Proc. U. S. Nat. Mus., IX, pp. 83-91.)
- MYERS, W. M., et PECK, A. B., 1925, *A fulgurite from South-Amboy, New Jersey*. (Amer. Mineral., 10, pp. 152-155.)
- PETTY, J. J., 1936, *The origin and occurrence of fulgurites in the Atlantic Coastal Plain*. (Amer. J. Sci., 5th. ser., XXXI, pp. 188-201.)
- RENARD, A., 1879, *Sur la microstructure de quelques produits de fusion du quartz*. (Ann. Soc. belg. Microsc., V, pp. 29-42.)
- ROGERS, A. F., 1917, *A review of the amorphous minerals*. (J. Geol. XXV, p. 526.)
- ROGERS, A. F., 1946, *Sand fulgurites with enclosed lechatelierite from Riverside County, California*. (J. Geol., LIV, pp. 117-122.)
- SIMPSON, E. S., 1931, *Contributions to the Mineralogy of Western Australia. Series VI. (7) Lechatelierite, West Popanyinning, S. W. Division*. (J. roy. Soc. West. Australia, XVII, pp. 145-146.)

- SPIESS, E., 1897. *Über einen Fulguritfund im Diluvialsand der Umgebung von Nürnberg.* (Abh. Naturh. Ges. Nürnberg, X, pp. 19-23.)
- VAN BASTELAER, D. A., 1883, *Sur un fulgurite formé en présence de plusieurs témoins à Gougnies près de Charleroi.* (Bull. Acad. roy. Sci. Belg., 1883, 3^e Sér., 6, pp. 144-152.)
- WEST, C. E., 1843, *Notice of certain siliceous tubes (Fulgurites) formed in the earth.* (Amer. J. Sci., XLV, pp. 220-222.)

INSTITUT ROYAL DES SCIENCES NATURELLES DE BELGIQUE.