

RÉSULTATS DE SONDAGES SISMIQUES RÉALISÉS LORS D'ÉTUDES GÉOMORPHOLOGIQUES SUR LE MASSIF DE STAVELOT (*) (**)

par L. J. BECKERS (***) et A. OZER (****)

(1 figure dans le texte)

RÉSUMÉ

Au cours de recherches géomorphologiques dans le Massif de Stavelot, les auteurs ont réalisé de nombreux sondages sismiques. Ceux-ci leur ont permis, dans une large mesure, et de différencier les couches de solifluxion des zones de fauchage, et d'apprécier l'épaisseur des dépôts meubles.

Les vitesses propres aux assises du Poudingue de Malmédy ont été également déterminées et, en l'absence d'affleurements, ces mesures permirent de distinguer nettement le substratum permien du Cambrien.

ABSTRACT

In the course of geomorphological research in the Stavelot massif several seismic soundings were made by the authors. These have permitted them, to a large degree, to differentiate solifluxion beds in the zone of bending (creep), and to determine the thickness of the unconsolidated deposits.

The velocities characteristic of the Malmédy conglomerate were also determined. Consequently, even in the absence of exposures, it is possible to distinguish clearly between Permian and Cambrian rocks underlying the unconsolidated deposits.

INTRODUCTION

Au cours de recherches géomorphologiques effectuées dans le Massif de Stavelot les deux auteurs ont été amenés à utiliser fréquemment un appareillage de sondage sismique par réfraction (1).

Après une période d'expérimentation, où les résultats obtenus étaient vérifiés sur des coupes ou des fouilles de type classique, la méthode a été utilisée pour pallier la carence d'affleurements et ensuite pour localiser les endroits les plus favorables au creusement de fouilles.

L'interprétation de sondages a permis de connaître les caractéristiques du substratum, notamment de déterminer avec une grande précision la limite d'exten-

(*) Communication présentée à la séance du 6 janvier 1970. Manuscrit déposé à la même date.

(**) Nous remercions vivement MM. MACAR et PISSART de nous avoir conseillés au cours de cette étude et d'avoir bien voulu en relire le manuscrit.

(***) Chercheur au Centre National de Recherches Géomorphologiques.

(****) Aspirant au Fonds National de la Recherche Scientifique, Univ. de Liège.

(1) Il s'agit de l'appareil à sondage sismique Engineering Seismograph (MD1).

sion du Poudingue de Malmédy et d'y apporter des corrections aux tracés antérieurement proposés.

Leur interprétation fournit également des données utiles pour la compréhension des faits géomorphologiques.

Dans la note qui suit, nous avons rassemblé l'ensemble des résultats obtenus par nous dans le Massif de Stavelot (70 sondages sismiques). Nous les comparons avec ceux obtenus par d'autres auteurs et notamment par le service de Géologie appliquée de l'Université de Liège, lors des recherches effectuées sur le site du barrage de Coo-Stavelot, où les études ont également concerné le substratum du Massif de Stavelot.

Contrairement à la disposition stratigraphique observée, les résultats concernant le Poudingue de Malmédy viennent en dernier lieu, car il était nécessaire d'avoir étudié auparavant le Cambrien, mieux localisé, pour ensuite le distinguer du « Permien ».

CLASSIFICATION DES VITESSES OBSERVÉES

1. *Sols superficiels*

Les observations réalisées sur 64 profils montrent que les régions prospectées sont recouvertes partout d'une couche superficielle peu consistante, dont l'épaisseur varie de 0,5 m à 1,5 m. Les vitesses de transmission des ondes y varient de 140 à 520 m/s. 50 % des observations sont groupées entre 240 et 300 m/s, le mode est de 280 m/s, tandis que la médiane est de 260 m/s. Cette forte concentration de la majorité des mesures montre une assez grande constance des propriétés géosismiques du sol superficiel dont la nature varie fortement : loess, dépôts de pente récemment remaniés, dépôts organiques. Les vitesses de transmission spécifiques de la couche superficielle ne se voient pas influencées par la nature de la roche mère : Poudingue de Malmédy ou substratum cambrien. Les variations de vitesse semblent essentiellement en relation avec le drainage de la couche superficielle.

Seules deux vitesses observées furent inférieures à 180 m/s, elles caractérisaient des horizons à très forte teneur en matière organique ayant une faible consistance, ce qui explique ces valeurs particulièrement faibles. Cette couche du sol superficiel est désignée sous le nom « colluvium » par UGEN (1967) et CALEMBERT, MONJOIE, UGEN (1967). Ces auteurs y ont observé quelques vitesses supérieures aux nôtres et atteignant jusqu'à 600 m/s.

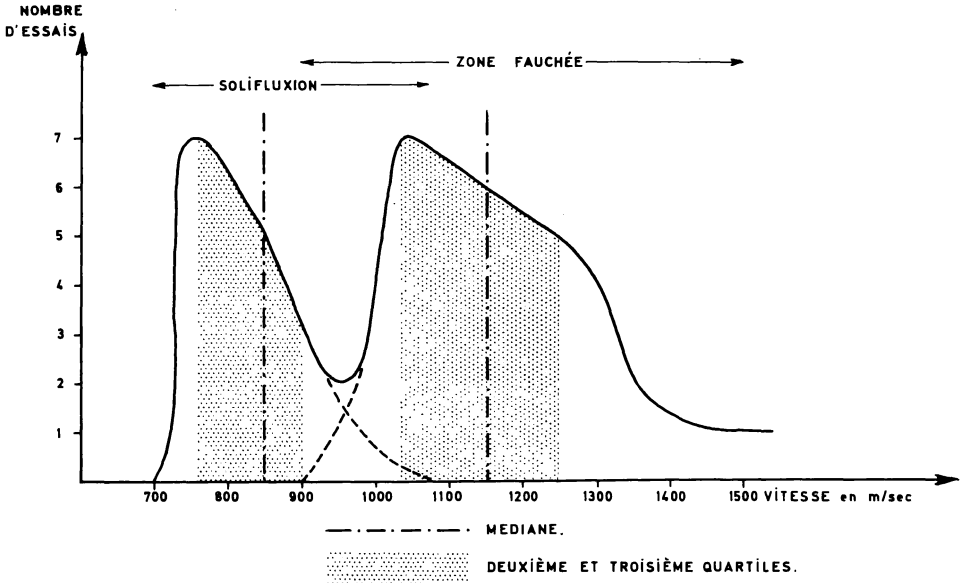
2. *Les formations comprises entre la couche superficielle et le bed-rock*

Entre la couche superficielle et la roche en place, nous avons pu observer partout la présence de formations intermédiaires, au sein desquelles les vitesses de propagation des ondes sismiques varient de 715 à 1500 m/s. L'ensemble est appelé zone de fauchage par CALEMBERT, MONJOIE, UGEN (1967) et UGEN (1967). Ces auteurs y observent des vitesses comprises entre 600 et 1700 m/s.

Cependant, lorsqu'on dresse un diagramme (voir fig.) reprenant l'ensemble de nos mesures, nous obtenons une courbe bimodale, où chacun des modes s'est avéré représentatif d'entités bien distinctes. Ceci nous a permis de différencier les dépôts de solifluxion et les zones de fauchage. Cette interprétation a été vérifiée à plusieurs reprises par l'examen de coupes situées à proximité de nos sondages sismiques.

La précision que nous apportons ainsi aux résultats fournis par UGEN a été possible parce que nous nous sommes limités à des mesures réalisées dans des sites

caractéristiques tels que les glacis développés sur le Cambrien. Comme nous le verrons plus loin, même dans ces sites, la distinction n'est pas toujours possible.



Répartition des vitesses enregistrées dans les couches comprises entre la couche superficielle et le bed-rock cambrien sur des glacis.

A. Les dépôts de congélifluxion.

Les vitesses caractéristiques des dépôts de congélifluxion sont comprises entre 715 et 1080 m/s, 50 % des mesures se groupent entre 770 et 900 m/s, la médiane est de 850 m/s.

Les vitesses les plus élevées (1000 m/s et plus) correspondent à des couches de solifluxion mises en place avant la dernière période froide (BECKERS, 1968, p. 9). Ces dépôts ont été préservés des remaniements récents et sont compacts, ce qui explique les vitesses de propagation élevées qui les caractérisent.

Comme l'indique la figure, lorsque les vitesses obtenues sont comprises entre 900 et 1080 m/s, on peut avoir affaire, soit à des couches de congélifluxion très tassées, soit à la zone fauchée, soit aux deux superposées et indiscernables l'une de l'autre. Le nombre des mesures donnant de telles vitesses entre le sol superficiel et la roche en place, représente 20 % du total des observations relatives à cette zone. Parmi ces 20 %, la moitié peut être interprétée correctement grâce à des profils sismiques obtenus dans le proche voisinage et qui fournissent des courbes plus aisées à interpréter. La signification stratigraphique des 10 % des mesures restantes ne peut être précisée qu'à l'aide de fouilles.

B. Zone fauchée.

La zone de fauchage est, comme on le sait, la zone où les bancs s'incurvent par gravité suivant le sens de la pente. Les vitesses de transmission des ondes sismiques y varient de 900 à 1500 m/s, avec un groupement de 50 % des mesures entre

1030 et 1250 m/s, avec un groupement de 50 % des mesures entre 1030 et 1250 m/s (médiane : 1150 m/sec).

Cette zone, d'épaisseur variable, paraît avoir une puissance maximale lorsque la roche en place comporte une forte proportion de quartzophyllades. Les bancs se débitent alors en plaquettes de dimensions modérées. Les débris forment des couches qui s'effilochent vers le bas de la pente et on peut les suivre sur des distances d'autant plus considérables que le banc d'origine est plus épais. Les couches de fauchage s'amincissent moins vite vers le bas lorsque la pente est faible (2 à 5°) et sont d'autant plus nettes que l'on se rapproche de l'orthogonalité entre la direction d'affleurement des bancs et la ligne de plus grande pente.

Les coupes dans la zone fauchée sur substrat essentiellement phylladeux montrent de fines bandes peu cohérentes de débris de petites dimensions, disposées parallèlement à la pente. Ces couches présentent de mauvaises propriétés géosismiques. Leur mise en évidence avec le séismographe est donc plus que problématique.

Les têtes des bancs épais de quartzite ne s'incurvent pas mais se brisent, laissant à la base des dépôts de solifluxion des traînées de blocs. Les propriétés géosismiques résultantes étant très hétérogènes, les mesures qui correspondent à la transmission des ondes dans des couches de ce type donnent fréquemment des vitesses variables, avant d'arriver aux vitesses spécifiques du bed-rock.

3. *Le Bed-rock cambrien*

Dans les zones étudiées, le bed-rock est constitué par une succession de phyllades et de quartzites, avec souvent, interstratifiée, toute la gamme des roches intermédiaires. Selon les sous-assises, les proportions de diverses roches varient fortement. Certains niveaux comportent jusqu'à 50 % de quartzite.

Dans ce type de bed-rock, les vitesses sont comprises entre 1660 et 6000 m/s avec un groupement de 50 % des mesures entre 1850 et 2500 m/s, la médiane étant de 2000 m/s. De plus, on constate un groupement secondaire des vitesses à 4000 m/s. A première vue, les roches donnant de telles vitesses ne diffèrent en rien de celles où une vitesse de 2000 m/s a été acquise. On peut suivre les auteurs antérieurs (UGEN, CALEMBERT, MONJOIE) dans leur interprétation de ce fait : ces vitesses de translation très élevées doivent caractériser des roches non encore fissurées.

Les vitesses inférieures à 1800 m/s correspondent à du Cambrien en place mais altéré et traversé par divers types de fissures. C'est cette zone qui fournit les matériaux de la zone fauchée et les dépôts de solifluxion.

4. *Poudingue de Malmédy (*)*

Les vitesses de propagation des ondes dans cette roche, considérée comme datant du Permien, varient de 780 à 1730 m/s, cependant, 50 % des observations sont groupées entre 1000 et 1180 m/s et la médiane des mesures est située à 1150 m/s. Les vitesses observées dans le Poudingue de Malmédy sont donc bien groupées et très différentes de celles du bed-rock cambrien (médiane 2000 m/s). Ce groupement est encore plus frappant si l'on exclut de ce classement :

(*) Le Poudingue de Malmédy est une formation conglomératique continentale subdivisée en trois assises. Les couches de la première et de la troisième assises ont un ciment argileux, tandis que la seconde, la plus importante, est composée de poudingue à galets calcaires et à ciment argilo-calcaireux.

1° les valeurs supérieures de 1400 à 1730 m/s qui s'expliquent vraisemblablement par une très forte humidité. La carte pédologique signale en effet, aux endroits où ces valeurs ont été trouvées, l'existence de zones à drainage défavorable.

2° les valeurs inférieures, de 780 à 880 m/s, lesquelles sont spécifiques du poudingue altéré ou des dépôts de pente.

La synthèse des renseignements recueillis permet en outre de distinguer un groupement secondaire des vitesses de transmission autour de 1300-1400 m/s. Ces vitesses sont généralement obtenues dans l'assise intermédiaire du poudingue, à ciment argilo-calcaireux, et à plus forte cohésion.

Les vitesses enregistrées dans le poudingue sont donc bien groupées, ce qui permet d'affirmer que les propriétés géosismiques de ce dernier sont homogènes. Cependant, les vitesses observées ici sont fort proches de celles obtenues sur la zone de fauchage des roches cambriennes. La médiane (1150 m/s) est identique pour les deux couches. Il est donc nécessaire d'agir avec prudence lors des interprétations des sondages dans les régions de Stavelot-Malmédy.

5. Le Poudingue de Malmédy altéré

Le Poudingue de Malmédy est surmonté de formations dont les vitesses varient de 380 à 920 m/s. 50 % des observations sont groupées entre 570 et 750 m/s et la médiane est à 675 m/s. Ces formations correspondent soit à du poudingue désagrégé, soit à des dépôts de pentes formés au départ de celui-ci. Dans ce premier cas, cette formation est particulièrement importante pour mesurer l'épaisseur des dépôts recouvrant le poudingue en place. Il semble pratiquement exclu de parler ici de zone de fauchage, car nous ne l'avons jamais observée.

Les valeurs ci-dessus sont à rapprocher de celles observées dans les dépôts de solifluxion et on ne peut donc les différencier par les mesures sismiques. En général, les dépôts de solifluxion sont cependant plus compacts que le poudingue altéré.

CONCLUSION

L'ensemble des mesures sismiques que nous avons effectuées dans la région de Stavelot nous a permis :

1) de déterminer les vitesses propres au Poudingue de Malmédy, et de montrer qu'elles sont très différentes de celles acquises sur les roches cambriennes, beaucoup plus cohérentes.

2) de discerner, dans un certain nombre de cas, les dépôts de solifluxion des zones de fauchage.

Les autres résultats confirment ceux obtenus dans la région de Stavelot, par d'autres équipes (CALEMBERT, MONJOIE et UGEN — Institut Géotechnique de l'État à Gand — UGEN V.), dans une optique essentiellement appliquée.

Nous pensons utile de signaler, en terminant, l'appoint considérable que les sondages sismiques peuvent fournir pour la compréhension des faits géomorphologiques après une période d'expérimentation, en donnant des renseignements sur le bed-rock et les dépôts, là où les affleurements font défaut.

Nature des Couches	Vitesses obtenues (m/sec)	Limites des 2 ^e et 3 ^e quartiles	Médiane	Auteurs
Sol superficiel (64) (*)	140 à 520 175 à 550 250 à 600	240 à 300 250 à 325	260	Beckers, Ozer (66-68) Ugen (1967) Calembert, Monjoie, Ugen (1967)
Cambrien « scarifiable » Cambrien « non scarifiable » Bed-rock cambrien (37)	1800 à 3450 3500 à 5000 1700 à 4500 1660 à 6000	2380 à 2910 1850 à 2500	2000	Ugen (1967) Ugen (1967) Calembert, Monjoie, Ugen (1967) Beckers, Ozer (66-68)
Dépôts de solifluxion (16) Zone de fauchage (21)	715 à 1080 900 à 1500 600 à 1700 650 à 1700	770 à 1900 1030 à 1250 790 à 1170	850 1150	Beckers, Ozer (66-68) Beckers, Ozer (66-68) Calembert, Monjoie, Ugen (1967) Ugen (1967)
Poudingue de Malmédy (20) Poudingue de Malmédy dans l'eau (4) Poudingue de Malmédy altéré (16)	780 à 1400 1400 à 1730 380 à 920	1000 à 1180 570 à 570	1150 675	Ozer (1967-1968) Ozer (1967-1968) Ozer (1967-1968)

(*) Les valeurs entre parenthèses concernent le nombre d'essais.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BECKERS L. J., 1966. — Glacis et pentes rectilignes. Etude séomorphologique d'un type de versant. Mémoire inédit Sc. Géographiques, Université de Liège.
- [2] BECKERS L. J., 1967. — Documents de travail. Volume VIII. Centre National de Recherches Géomorphologiques.
- [3] CALEMBERT L., MONJOIE A., UGEN V., 1967. — Étude géologique et hydrologique préliminaire du site de la centrale de pompage de Coo. Faculté des Sc. Appliquées. Collection des publications n° 3, Université de Liège.
- [4] DOBRIN M. B., 1960. — Introduction to Geophysical Prospecting. Mc Graw-Hill Book Company, Inc.
- [5] INSTITUT GÉOTECHNIQUE DE L'ÉTAT, Gand, 1967. — Procès-verbal relatif aux résultats des essais de pénétration et essais sismiques « Terra-Scout », effectués à l'emplacement prévu pour la seconde tranche de l'Athénée Royal de Stavelot.
- [6] OZER A., 1967. — Contribution à l'étude géomorphologique des régions où affleure le Poudingue de Malmédy. Mémoire inédit Sc. Géographiques, Université de Liège.
- [7] OZER A., MACAR P., 1968. — Le Poudingue de Malmédy occupe-t-il un graben? *Annales de la Société Géologique de Belgique*, T. 91, pp. 559-565.
- [8] UGEN V., 1967. — Résultats d'essais géosismiques en vue de la reconnaissance des sols et du bed-rock à faible profondeur. *Engineering Geology* 2 (3), pp. 169-177.

DISCUSSION

M. A. MONJOIE. — Les résultats des mesures sismiques peuvent être influencés d'une manière notable par l'orientation du profil sismique par rapport à la structure géologique des formations qui font l'objet des mesures. Les auteurs en ont-ils tenu compte ?

Réponse : Les profils réalisés sur les glacis l'ont été selon la ligne de plus grande pente. Celle-ci est, le plus souvent, perpendiculaire à la direction des bancs. Cette disposition est notamment respectée aux endroits où furent levés les profils, elle oblige les ondes du sondage sismique à traverser les couches orthogonalement.

Par contre, en ce qui concerne le Poudingue de Malmédy, les couches sont sub-horizontales. L'orientation du profil sismique par rapport à la structure géologique a peu d'incidence sur les résultats acquis dans ces roches.

M. J. MICHOT. — Les vitesses de 4.000 m/sec que vous avez mentionnées comme caractérisant, dans cette région, une roche non détendue ne peuvent-elles, en fait, être liées à la présence d'un niveau lithologique différent ?

Réponse : L'examen des vitesses acquises sur le bed-rock cambrien montre un groupement secondaire vers 4.000 m/sec. Comme MM. CALEMBERT, MONJOIE et UGEN l'ont observé, il ne peut s'agir que de roches non encore fissurées [*] ou non scarifiables [°].

M. J. BELLÈRE. — L'attribution de certaines vitesses à des terrains fauchés résulte-t-elle d'une observation directe ou d'une interprétation ?

Réponse : Les premières observations qui servirent d'expérimentation furent toutes réalisées à proximité de coupes existantes dans des sites identiques quant à la forme, la morphogenèse, l'âge et le substratum des versants. Cela nous a souvent amenés à distinguer la zone de fauchage des dépôts de solifluxion sur les glacis.

Sur le glacis de Rahier, deux vérifications ont été réalisées et elles furent concluantes.

De toute façon, les sondages sismiques sont, pour nous, une méthode qui ne nous fournira des données appréciables sur le sous-sol, que dans le cadre d'une recherche géomorphologique globale.

