

## OBSERVATIONS STRUCTURALES DANS LA REGION DE BASTOGNE<sup>1</sup>

Denis JONGMANS<sup>2</sup> & J.W. COSGROVE<sup>3</sup>

(10 figures)

**RESUME.** - La région de Bastogne est connue pour son métamorphisme et le phénomène de boudinage affectant les couches de grès du Siegenien. Le développement des boudins, séparés par des veines de quartz, traduit une extension NW-SE antérieure à la phase majeure du plissement hercynien de l'Ardenne. L'étude détaillée de la section des boudins a mis en évidence leur forme atypique caractérisée par une largeur égale ou inférieure à la hauteur. Ces observations peuvent être expliquées par l'effet du raccourcissement hercynien qui a affecté toutes les structures existantes et a, en particulier, engendré le boudinage des veines de quartz. Lors de ces différentes phases tectoniques, la déformation a été influencée par les structures sédimentaires telles que le gradoclassement et les variations latérales de facies.

**MOTS-CLES.** - Belgique, Bastogne, tectonique, structure sédimentaire, boudinage, veines de quartz.

**ABSTRACT.- Structural observations in the Bastogne area.-** The Bastogne region is well known for its metamorphism and the boudins which occur in the Siegenian sandstone layers. Each boudin is separated from the next by a quartz vein and the boudin formation indicates a NW-SE layer parallel extension. This deformation phase predates the major Hercynian folding in the Ardennes. The structural study of this area indicates that the boudins exhibit an unusual profile geometry with a width equal to or less than the thickness. This can be explained as the result of the Hercynian compression which deformed the early structures and resulted in the formation of boudins in the quartz veins. During the different tectonic phases deformation appears to have been influenced by sedimentary structures as graded bedding and lateral facies variations.

**KEY-WORDS.** - Belgium, Bastogne, tectonics, sedimentary structure, boudinage, quartz veins.

### 1.- INTRODUCTION

Depuis la description par Lohest (1909) des veines de quartz dans les grès de l'Eodévonien, la région de Bastogne est célèbre par des structures affectant les couches compétentes et dénommées par l'auteur boudinage, expression reprise par après dans la terminologie internationale. Le terme boudin désigne une structure de section en forme de baril affectant les couches compétentes, chaque baril étant séparé des voisins par une veine d'extension. Il est maintenant unanimement admis que le boudinage résulte d'un

allongement parallèle au plan de stratification, ce dernier correspondant au plan XY de l'ellipsoïde de déformation.

Depuis les travaux de Lohest, la région de Bastogne a été étudiée pour ses structures et son métamorphisme particuliers par plusieurs auteurs parmi lesquels on peut citer Stainier (1907), Corin (1932), Asselberghs (1946), Brühl (1966) et Autun (1971). Au niveau structural, la dernière étude régionale a été réalisée par Lambert et Bellière (1976).

1. Manuscrit reçu le 10.02.93; accepté le 19.10.93.

2. Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, Université de Liège, Sart-Tilman, Bat. B.19, 4000 Liège.

3. Imperial College, Department of Geology, Prince Consort Road, London SW7 2BP.

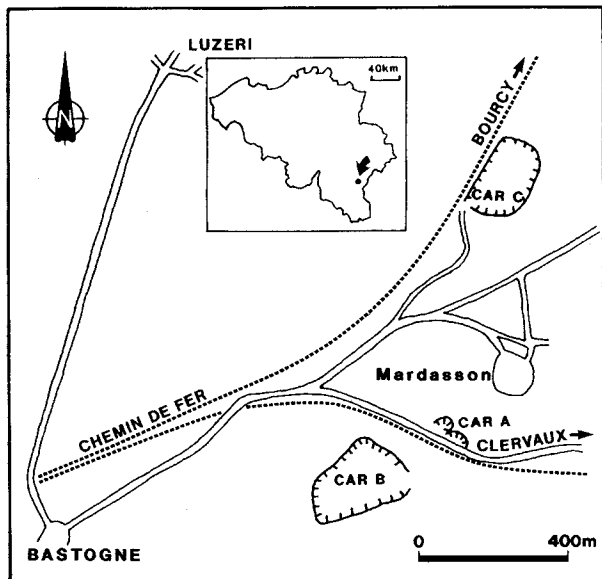


Fig. 1.- Plan de situation des carrières étudiées.

L'extension des carrières de grès à proximité de Bastogne a mis à jour des affleurements qui permettent de nouvelles observations à propos de la tectonique régionale. Trois carrières désignées sur la figure 1 par les lettres A, B et C ont été étudiées. La première (A), située au sud du mémorial du Mardasson le long de la route joignant Bastogne à Clairvaux, est abandonnée tandis que les carrières B et C, d'extension plus importante, sont toujours en exploitation. Toutes ces carrières constituent des affleurements remarquables où le phénomène de boudinage affectant les bancs de grès est clairement apparent.

La région de Bastogne est située dans le Dévonien inférieur de l'Ardenne, consistant en une alternance de phyllades, quartzo-phyllades, grès et quartzites. La stratigraphie de la région se présente comme suit (Lambert & Bellière, 1976):

- Siegenien supérieur  $S_3$  : phyllades.
- Siegenien moyen  $S_2$  : psammo-phyllades calcaires fossilifères.
- Siegenien inférieur  $S_{1S}$  : phyllades noirs.  
 $S_{1B}$  : grès et quartzo-phyllades.  
 $S_{1Q}$  : quartzites à grès gris-bleu avec phyllades.

Une carte géologique schématique de la région est présentée à la figure 2. Les formations géologiques dessinent une série de plis orientés NE-SW s'envoyant légèrement vers le NE. L'ensemble des couches forme une large structure anticlinale. Les affleurements examinés dans cette étude sont exclusivement localisés dans le Siegenien inférieur  $S_{1Q}$ .

La région est affectée par une série de failles longitudinales inverses de plusieurs kilomètres à plu-

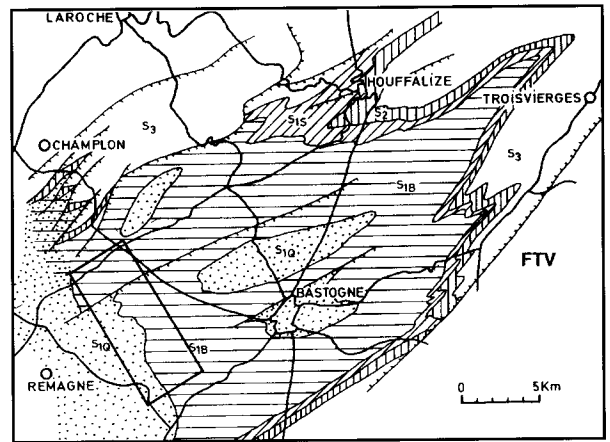


Fig. 2.- Carte géologique des environs de Bastogne (Lambert et Bellière, 1976 ; d'après Brühl, 1966). FTV: Faille de Trois Vierges.

sieurs dizaines kilomètres de long et à pendage sud. Une exception notable est constituée par la faille de Trois Vierges située au sud de Bastogne et qui pend vers le nord.

Lors de leur étude structurale de la région, Lambert et Bellière (1976) ont mis en évidence les principaux épisodes tectoniques suivants:

1. Apparition d'une «schistosité» de cristallisation, parallèle à la stratification et uniquement visible en lames minces. D'après Bellière (communication personnelle), cette structure résulte vraisemblablement de la compaction des sédiments lors de la diagenèse ou est contemporaine du boudinage.
2. Développement du boudinage (direction  $N40^\circ E$ ) traduisant une extension NW-SE ainsi que du métamorphisme (mis en évidence par la présence de biotite, d'ilménite, amphibole, pyrite,...).
3. Première phase de plissement orienté  $N15^\circ E$  environ et probablement local.
4. Deuxième phase de plissement (phase majeure du plissement hercynien de l'Ardenne) orienté  $N50^\circ E$  avec formation d'une schistosité à pendage sud, très bien visible sur les affleurements. Par la suite, cette schistosité sera dénommée  $S1$ .

L'objet de cet article est d'étudier les marqueurs de la déformation générée lors de la phase majeure hercynienne et son effet sur les structures antérieures (veines d'extension et boudinage).

## 2.- ETUDE DE LA FORME DES BOUDINS

### 2.1.- FORMATION DES BOUDINS

Une discussion détaillée sur le mécanisme de la formation des boudins dépasse le cadre de cet article et le lecteur intéressé par le sujet peut consulter l'ouvrage de Price & Cosgrove (1990). La région étudiée étant le locus typicus de ces structures, un bref historique est cependant présenté ci-dessous.

Lohest (1909), qui a décrit les boudins de Bastogne, fut la première personne à leur donner ce nom. De telles structures avaient cependant été observées précédemment par différents auteurs (parmi d'autres, Ramsay, 1866; Harker, 1889; Stainier, 1907). Des explications divergentes ont été proposées concernant leur origine et une partie de la confusion est née du fait que les boudins définis à Bastogne ont subi une déformation postérieure à leur formation. Le raccourcissement hercynien, qui a plissé les couches boudinées et provoqué l'apparition d'une schistosité, a conduit certains auteurs (Brühl, 1969) à proposer que le boudinage soit le résultat d'une compression parallèle à la stratification.

Suite aux études théoriques et expérimentales (Ramberg, 1955; Stromgard, 1973; Smith, 1977; Woldekiden, 1982) et aux nombreuses observations de terrain dans des régions non soumises à des



Fig. 4.- Boudins affectant une couche gréseuse de 2 m d'épaisseur (carrière A). L'échelle est donnée par un marqueur de 30 cm de long.

déformations ultérieures, il est maintenant généralement admis que le phénomène de boudinage dans des couches compétentes résulte d'un allongement parallèlement à la stratification. L'espacement entre boudins dépend de l'épaisseur de la couche compétente, de ses propriétés rhéologiques et du milieu qui l'entoure. En général, les boudins présentent une forme allongée, c'est-à-dire que le rapport entre la largeur  $L$  et la hauteur  $H$  du boudin (qui est aussi fonction de l'intensité de la déformation), est supérieur à 3.

A cet égard, la forme des boudins de Bastogne apparaît fortement atypique. Un relevé systématique de la dimension des boudins a été réalisé dans les trois carrières. Les résultats sont reportés à la figure 3 dans un diagramme hauteur en fonction de la largeur. La majorité des observations dans les couches de grès (représentées par des carrés sur la figure) montre que les boudins sont caractérisés par une hauteur égale ou supérieure à leur largeur.

Un exemple très frappant de ce phénomène est illustré sur la photo de la figure 4. De plus, les lobes des boudins au contact de la roche incompétente présentent en certains affleurements (figure 4) une courbure très accentuée par rapport aux formes couramment observées.

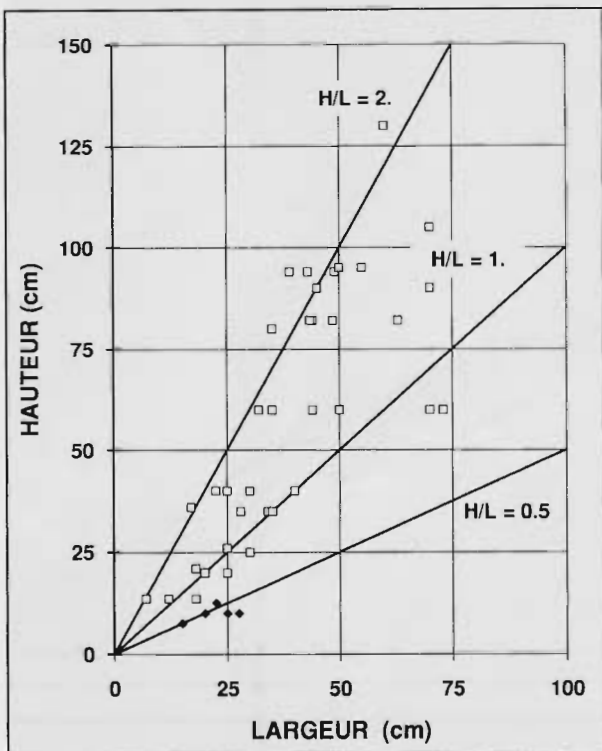


Fig. 3.- Diagramme représentant la relation entre la largeur  $L$  et la hauteur  $H$  des boudins.  
Carrés : boudins dans les couches de grès.  
Losanges : boudins dans les veines de quartz.

Ce boudinage, atypique par rapport à des considérations théoriques et aux observations dans d'autres régions, peut s'expliquer de deux manières :

- par l'influence de phénomènes synsédimentaires susceptibles d'influencer la périodicité et la forme des boudins lors de leur formation.
- par l'effet du raccourcissement varisque.

## 2.2.- INFLUENCE DES PHENOMENES SEDIMENTAIRES SUR LA DEFORMATION

Les roches éodévoniennes de la région de Bastogne se sont formées dans des conditions variables de sédimentation, faisant alterner rapidement des couches de sable et de silt ou d'argile. Des structures sédimentaires classiques - granoclassement, variations latérales de faciès, lentilles - qui sont observées en plusieurs endroits influencent la déformation tectonique.

Deux exemples de ce type de phénomènes sont présentés aux figures 5 et 6. Sur la figure 5, on observe une couche de grès de 80 cm d'épaisseur environ comprise entre des niveaux plus pélitiques affectés d'une schistosité à pendage sud. Cette

couche de grès présente à sa base un phénomène de boudinage associé à des fentes d'extension disparaissant vers le sommet de la couche. L'examen de lames minces prises à différents niveaux (voir figure 5), a montré que le pourcentage de quartz diminuait régulièrement de la base (90 %) jusqu'au sommet de la couche (60 %). La variation de compétence au sein de la couche perpendiculairement à la stratification provient de l'existence à sa base d'un niveau riche en quartz (grès) se déformant de manière cassante et à son sommet d'un niveau plus pélitique caractérisé par une déformation ductile. L'extension agissant parallèlement à la stratification se marque par la présence d'une veine d'extension bien développée à la base de la couche et disparaissant vers son sommet.

D'autre part, un phénomène de variation latérale de faciès est présenté à la figure 6 qui montre la manière dont le boudinage affecte des couches gréseuses lenticulaires interstratifiées dans des roches pélitiques.

Durant la diagenèse, des figures de charges se forment fréquemment à l'interface entre une couche argileuse surmontée de sable plus dense qui s'en-

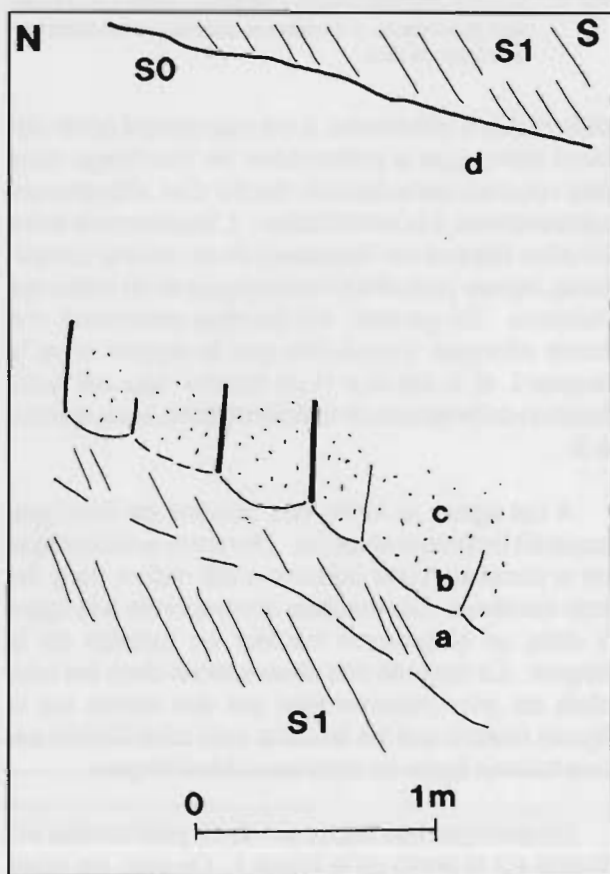


Fig. 5.- Photo et dessin montrant la relation entre le boudinage et la compétence pour un banc de grès présentant un granoclassement et interstratifié dans du phyllade (carrière A).

a : 50 % Qz - b : 90 % Qz - c : 70 à 80 % Qz - d : 60 à 70 % Qz.



Fig. 6.- Lentilles gréseuses boudinées dans un milieu plus pélitique (carrière C). l'échelle est donnée par le marteau.

fonce dans l'argile en formant des lobes et des points de rebroussement. Lors de l'extension, ces points de rebroussement peuvent être à l'origine de la fracturation et leur longueur d'onde est susceptible d'influencer l'espacement entre les veines de quartz. Ce processus pourrait expliquer en partie les faibles valeurs de largeur des boudins dans la région étudiée.

D'un autre côté, les boudins, ainsi que les veines les limitant, apparaissent généralement très réguliers et rectilignes. Les figures de charge présentent rarement une telle continuité et sont généralement caractérisées par une géométrie irrégulière en dôme. Il apparaît donc difficile de déterminer si ces figures sédimentaires, qui ont certainement été largement déformées lors des processus tectoniques ultérieurs, ont joué un rôle dans le contrôle de la périodicité des boudins montrée à la figure 6.

Par ailleurs l'examen des boudins qui se sont développés dans des lentilles de grès (figure 6) montre une relation entre la largeur des boudins et l'épaisseur de la couche. Cette observation, en accord avec les études théoriques sur le boudinage de couches compétentes dans un milieu incompetent menées par Fletcher (1974) et Smith (1977), est en faveur d'un contrôle de la largeur des boudins par la déformation tectonique.

Quoi qu'il en soit, l'orogénèse varisque, qui a provoqué un raccourcissement de toute la région, a affecté de manière très nette toutes les structures antérieures y compris le boudinage.

### 3. STRUCTURES DE DEFORMATION LIEES A L'OROGENESE HERCYNIEUNE COMPRESSIVE

#### 3.1.- PLIS ET FAILLES

Le raccourcissement NW-SE résultant de l'orogénèse varisque a entraîné la formation dans la région

de Bastogne d'une série de structures de déformation constituées principalement de plis et de failles orientés NE-SW. Les plis sont généralement déjetés ou déversés vers le NW.

Dans les carrières visitées, les plis, de longueur d'onde et d'amplitude variables (entre quelques mètres et quelques centaines de mètres), sont orientés N45 à 50°E et sont déjetés vers le nord. La schistosité, inclinée de 50 à 60° vers le SE, est compatible avec les plissements observés. La figure 7A présente la distribution des pôles des plans de schistosité pour l'ensemble de la zone étudiée. La carrière C est caractérisée par la présence d'une grande structure anticlinale de plusieurs centaines de mètres de longueur d'onde. Les mesures de stratification (voir figure 7B) illustrent l'allure asymétrique du pli. Le plissement des couches boudinées s'est accompagné d'une rotation des veines d'extension. Ce phénomène est clairement visible à la figure 7C qui reprend la distribution des pôles des veines d'extension dans la carrière.

Outre le plissement, les formations éodévoniennes sont également affectées par de petites failles inverses de même orientation que les couches et pendant de 20 à 40° vers le sud. Deux exemples de ce type de failles sont bien visibles dans la carrière B où un petit pli d'entraînement est généré par le jeu de la faille dans les couches supérieures (figure 8).

#### 3.2.- EFFET DU RACCOURCISSEMENT VARISQUE SUR LES BOUDINS

L'effet le plus apparent du raccourcissement varisque sur les boudins et les veines associées est le boudinage de ces veines de quartz. Ce phénomène est bien visible en de nombreux endroits dans les carrières A et B (figures 4 et 9). Il indique qu'après avoir subi une phase d'extension de direction NW-SE générant le boudinage des couches de grès, la région a été soumise à un raccourcissement approximativement orienté perpendiculairement au plan des veines de quartz (N40°E).

Quelques mesures de forme des boudins dans les veines d'extension sont reportées à la figure 3. Elles montrent que la largeur de ces boudins est au moins deux fois supérieure à leur hauteur (H/L 0.5).

Un deuxième marqueur de la compression est le glissement banc sur banc des strates à l'intérieur des boudins, qui est observé au sommet et à la base des boudins (voir figure 10). Le glissement banc sur banc, mis en évidence par le déplacement de petites veines de quartz, résulte de la flexion des strates (de quelques cm d'épaisseur) qui localement peuvent devenir perpendiculaires au plan général de stratification défini par l'alternance de couches gréseuses et pélitiques

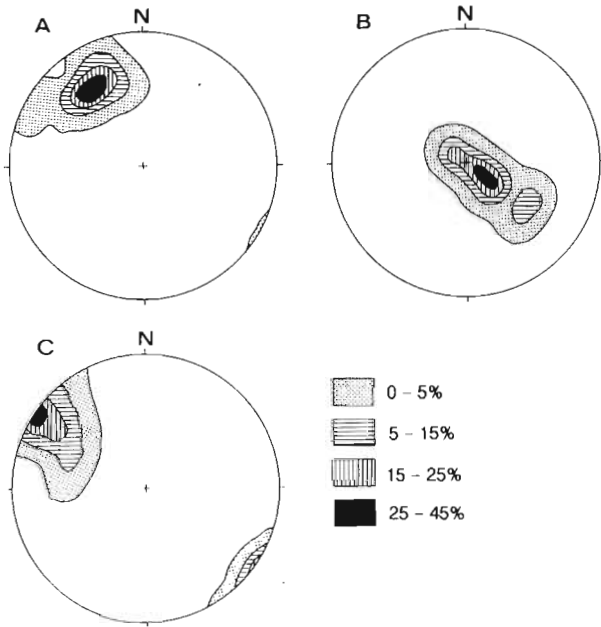


Fig. 7.- Diagrammes stéréographiques présentant la distribution de (A) la schistosité, (B) la stratification et (C) les veines de quartz.



Fig. 9.- Boudinage des veines de quartz (carrière B). L'échelle est donnée par un marqueur de 30 cm de long.

(voir figure 10). Lorsque ces dernières sont de faible épaisseur, la schistosité se présente généralement en éventail à partir des noeuds des boudins (figure 10)

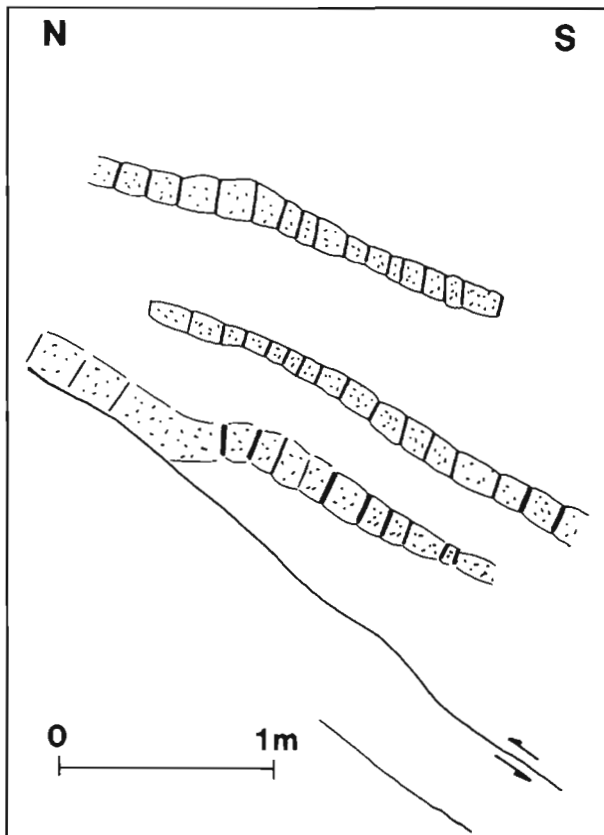


Fig. 8.- Pli d'entraînement généré par le jeu d'une petite faille inverse (carrière B).

Le taux de raccourcissement subi par les boudins peut être obtenu de manière approximative à partir de l'examen de lames minces prises dans de petites veines de quartz. Au microscope, les cristaux de quartz constituant ces veines montrent des structures d'impressionnement résultant de processus de dissolution-cristallisation et des extinctions onduleuses. De manière générale, on observe un allongement des cristaux parallèlement au plan de la veine selon la pente. La dimension des cristaux selon cette direction est en moyenne trois fois supérieure à celle qui est mesurée selon la direction perpendiculaire au plan de la veine. En se basant sur l'hypothèse que ces deux dimensions étaient du même ordre de grandeur avant déformation et que cette dernière est plane, on obtient une ellipse de déformation dont le grand axe vertical vaut 3 et le petit axe horizontal  $1/3$ , traduisant un raccourcissement horizontal de 42 %. Ces premiers résultats, qui sont compatibles avec ceux obtenus par Mukhopadhyay (1973) à partir de l'étude de la déformation de grains de quartz, doivent cependant être validés par une étude plus importante à l'échelle régionale.

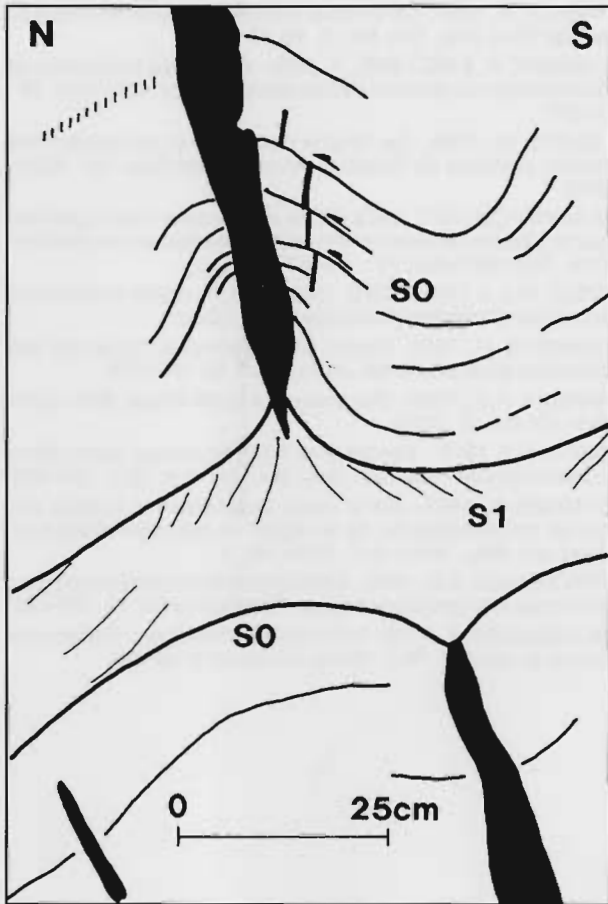


Fig. 10.- Couches de grès boudinées séparées par une roche pélitique plus sombre (carrère B).  
La flexion et le glissement banc sur banc se marquent par le décalage successif d'une petite veine de quartz.

L'ensemble des données montre que les boudins ont subi un raccourcissement important et que leur forme atypique (valeurs élevées de H/L) peut être expliquée par la déformation varisque. En effet, la forme des boudins avant l'orogénèse varisque peut être calculée sur base de l'ellipse de déformation déterminée ci-dessus. Le paramètre H/L caractérisant les boudins avant déformation aurait été en moyenne compris entre 0.3 et 0.6. Ces valeurs sont compatibles avec l'aspect généralement allongé des boudins décrits dans la littérature.

#### 4.- CONCLUSIONS

L'histoire tectonique de la région de Bastogne a été marquée par deux principaux épisodes de déformation. Le premier a consisté en une extension orientée NW-SE qui a entraîné la formation des bou-

dins et des veines d'extension associées. Lors de l'orogénèse varisque, s'est superposée une phase compressive qui a créé ses structures de déformation propres (plis, failles inverses, schistosité) mais qui a également affecté les structures antérieures. Les principaux phénomènes étudiés dans le cadre de cette étude sont le boudinage des veines d'extension et le changement de forme des boudins.

L'effet de la déformation varisque permet d'expliquer le caractère atypique (largeur égale ou plus faible que la hauteur) des boudins de Bastogne sur base d'un raccourcissement horizontal moyen de l'ordre de 40 %. Lors des différentes phases, la déformation a sans doute également été influencée par des structures sédimentaires préexistantes comme le granoclassement ou les variations latérales de faciès. Leur influence sur la périodicité et la forme des boudins est cependant difficile à cerner.

## 5.- REMERCIEMENTS

Nous remercions J.Bellièrre et A.Monjoie pour leurs conseils et commentaires lors de la lecture de ce manuscrit.

## 6.- BIBLIOGRAPHIE

- ASSELBERGHS, E., 1946.- L' Eodévonien de L'Ardenne et des régions voisines. *Mém.Inst.Géol.Univ.Louvain*, 14.
- AUTUN, P., 1971.- Le prolongement de la zone métamorphique de Bastogne au Grand-Duché de Luxembourg, *Ann.Soc.Géol.Belg.*, 45 : 101-111.
- BRUHL, H.K.,1966.- Ein Beitrag zur Geologie der Siegener Schichten im Gebiet von Laroche-Bastogne-Houffalize. *Geol. Mitteil.*, B 5, 4 S : 301-376.
- BRUHL, H.K., 1969.- Boudinage in den Ardennen und in der Nordeifel als Ergebnis der inneren Deformation. *Geol. Mitteil.*, 8 : 263-308.
- CORIN, F., 1932.- A propos du boudinage en Ardennes. *Bull.Soc.Belg.Geol.*, XIII : 101-118.
- FLETCHER, R.C., 1974, Wavelength selection in the folding of a single layer with power-law rheology. *Am. J. Sci.*, 274 : 1029-1043.
- HARKER, A., 1889.- On the local thickening of dykes and beds by folding. *Geol. Mag. New Ser.*, 6, 69-70.
- LAMBERT, A. & BELLIERE, J., 1976.- Caractères structuraux de l'Eodévonien aux environs de Bastogne. *Ann.Soc.Géol.Belg.*, 99 : 83-297.
- LOHEST, M., 1909.- De l'origine des veines et des géodes des terrains primaires de Belgique. *Ann.Soc.Géol.Belg.*, 36 : B275-B282.
- MUKHOPADHYAY D., 1973.- Strain measurements from deformed quartz grains in the slaty rocks from the Ardennes and the Northern Eifel. *Tectonophysics*, 16 : 279-296.
- PRICE, N.J. & COSGROVE, J.W., 1990.- Analysis of geological structures. *Cambridge University Press*, 502 p.
- RAMBERG, H., 1955.- Natural and experimental boudinage and pinch-and-swell structures. *Journ. Geol.*, 63 : 512-516.
- RAMSAY, A.C., 1866.- The geology of North Wales. *Mem. Geol. Surv. Gr. Brit.*, 3 : 611p.
- SMITH, R.B, 1977.- Formation of folds, boudinage and mullions in non-Newtonian materials. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88, 2 : 312-320.
- STAINIER X., 1907.- Sur le mode de gisement et l'origine des roches métamorphiques de la région de Bastogne (Belgique). *Acad. roy. Belg., mém. in-4°*, 2ème sér., t. 1.
- STROMGARD, K.E., 1973.- Stress distribution during formation of boudinage and pressure shadow. *Tectonophysics*, 16 : 215-248.
- WOLDEKIDEN, T., 1982.- Deformation of multilayers compressed normal to layering. *Ph.D. thesis*, University of London.