

MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉCONOMIQUES

ADMINISTRATION DE LA
QUALITÉ ET DE LA SÉCURITÉ



MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN

BESTUUR
KWALITEIT EN VEILIGHEID



**L'INTRUSION DE LA HELLE (HAUTES FAGNES, BELGIQUE)
ET LA MINÉRALISATION
CUPRO-MOLYBDÉNIFÈRE ASSOCIÉE : SYNTHÈSE
BIBLIOGRAPHIQUE, DONNÉES DES
SONDAGES ET INTERPRÉTATION GLOBALE**

par

Léon DEJONGHE & Alain MELCHIOR

1996





MINISTERE DES AFFAIRES ECONOMIQUES - MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN
ADMINISTRATION DE LA QUALITE ET DE LA SECURITE - BESTUUR KWALITEIT EN VEILIGHEID
Service Géologique de Belgique - Belgische Geologische Dienst

MEMOIRS OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF BELGIUM * N. 41

1996, N. 41, 94 p., 38 fig., 6 ph.

L'INTRUSION DE LA HELLE (HAUTES FAGNES, BELGIQUE)
ET LA MINERALISATION
CUPRO-MOLYBDENIFERE ASSOCIEE : SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE, DONNEES DES
SONDAGES ET INTERPRETATION GLOBALE

par

Léon DEJONGHE (1,2) & Alain MELCHIOR (1)

1996

1. Service Géologique de Belgique, 13 rue Jenner, B-1040 Bruxelles
2. Université libre de Bruxelles, Département des Sciences de la Terre et de l'Environnement, Avenue F.D. Roosevelt 50, B-1050 Bruxelles

* Formerly: N. 1 - 40 *Mémoires pour servir à l'Explication des Cartes Géologiques et Minières de la Belgique or Toelichtende Verhandelingen voor de Geologische en Mijnkaarten van België*

Comité éditorial : L. Dejonghe, P. Laga, R. Paepe
Service Géologique de Belgique
Rue Jenner, 13 - 1000 Bruxelles
Avril 1996

Editeur : L. Dejonghe, P. Laga, R. Paepe
Belgische Geologische Dienst
Jennerstraat, 13 - 1000 Brussel
April 1996



L'INTRUSION DE LA HELLE (HAUTES FAGNES, BELGIQUE) ET LA MINERALISATION CUPRO-MOLYBDENIFERE ASSOCIEE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE, DONNEES DES SONDAGES ET INTERPRETATION GLOBALE

par **Léon DEJONGHE** (1, 2) & **Alain MELCHIOR** (1)

- (1) Service Géologique de Belgique, 13 rue Jenner, B-1040 Bruxelles.
(2) Université libre de Bruxelles, Département des Sciences de la Terre et de l'Environnement,
Avenue F.D. Roosevelt 50, B-1050 Bruxelles.

ABSTRACT

The Helle intrusion is located in the eastern part of Belgium and was discovered by the end of last century. Geochronology (U-Pb isotopic ratios of zircon) indicates that the magma emplacement took place between Silurian and Lower Devonian (minimum age of emplacement : around 381 ± 16 Ma). Previous studies have shown that the Helle intrusion is a sill structure with most of its outcropping rocks characterized by a petrographic composition of quartz-diorite (tonalite). The low degree of thermic metamorphism related to the intrusion is reflected by a very thin aureole of hornfels. The rather large zone of pyritic rocks surrounding the igneous rocks was probably generated by an extensive hydrothermal (mainly a sulphidization) episod possibly contemporary of the thermic metamorphism phase. Finally, a main episode of regional metamorphism contemporary of the variscan orogeny induced a metamorphism of low-grade (ACF : paragenesis prehnite-chlorite-epidote) in the igneous rocks of la Helle.

In 1976-1977, at the initiative of Union Minière S.A., the concealed magmatic rocks were recognized by four drillings down to a depth of approximately 100 m. The Belgian Geological Survey supervised the study. Results are included in the present memoir divided into 3 parts.

The first part is devoted to a bibliographic synthesis of the geology and the mineralization of the Helle area. In a second part, results of lithological and petrographical observations are presented. The study under the microscope emphasizes a large variation of petrographic composition ranging from diorites to granodiorites and monzodiorites. Mineralogic variations seem to be related to mechanisms of magmatic differentiation (mainly fractional crystallization) but also to a complex post-magmatic hydrothermal alteration process, which mainly affected the superficial area of the intrusion. That zone is characterized by a secondary K-feldspar occurrence. The hydrothermal alteration also produced silicification and partial albitization with the development of a network of veinlets (locally mineralized) in the magmatic and surrounding Revinian metaquartzopelitic rocks. In this part, lithochemical logs of metallic elements are shown. A three dimensional reconstruction of the intrusion indicates that the structure corresponds to a laccolitic sill-shaped of ± 500 m of NE-SW length, 125 m of maximal thickness and 30° SE dip. Small dykes are also connected to the main sill.

The third part concerns the petrological and metallogenical interpretations. The primary mineralization is mainly formed by sulphide components (chalcopyrite, bornite, molybdenite). The average Cu and Mo content of the igneous rock is low (Cu=0,17 % ; Mo=0,02 %). The low metal stock of the intrusion (Cu : ± 35 000 tons ; Mo : ± 4 000 tons) is the consequence of a reduced volume of mineralized rock as well as common low metal contents. Metallogenically, this type of mineralization can be compared to the porphyry copper model although some important differences appear. The difficulty to distinguish the various concentric patterns of alteration suggests the smash of the alteration zones and is probably due to the small size of the intrusion.

RESUME

L'intrusion de la Helle, située dans l'Est de la Belgique (Hautes Fagnes), a été découverte à la fin du XIX^{ème} siècle. Des études antérieures ont établi qu'il s'agit d'un sill présentant une composition de diorite quartzique, ou, plus restrictivement, de tonalite. A cette intrusion, sont associés, d'une part un faible métamorphisme se traduisant par une ceinture pluridécimétrique de cornéennes et, d'autre part, un dynamométamorphisme caractérisé par une auréole plurihectométrique de schistes tachetés. En outre, une minéralisation cupro-molybdénifère est également présente. Une datation radiométrique par la méthode U-Pb sur zircon attribuée à cette intrusion un âge minimum de mise en place vers 381 ± 16 Ma, c'est à dire silurien ou dévonien inférieur. Enfin, un métamorphisme régional contemporain de l'orogénèse varisque, a donné naissance à une paragenèse ACF (préhnite - chlorite - épidote) de faible degré.

En 1976-1977, l'Union Minière a financé 4 sondages dans le but de préciser la forme de l'intrusion et son potentiel minier. Ils ont été confiés au Service géologique de Belgique qui en a supervisé l'étude dont les résultats sont présentés dans le présent mémoire divisé en 3 parties.

Dans une première partie, on effectue une synthèse bibliographique sur la géologie et la minéralisation de la région de la Helle. Dans une deuxième partie, on présente les résultats des descriptions lithologiques détaillées et des observations pétrographiques consacrées aux sondages. Les observations diascopiques soulignent une importante variation de la composition minéralogique, caractérisée par une gamme de roches allant de la diorite à la diorite quartzique et de la monzodiorite à la granodiorite éventuellement quartzique. Les variations minéralogiques semblent associées à des mécanismes de différenciation magmatique (principalement la cristallisation fractionnée), mais aussi à un processus hydrothermal post-magmatique complexe qui a principalement affecté la partie superficielle de la colonne magmatique actuellement dégagée par l'érosion. Cette zone est marquée par l'occurrence de feldspath potassique. L'altération hydrothermale a également produit une silicification et une albitisation partielle avec développement d'un réseau de veinules/veines localement minéralisées dans la roche magmatique et l'encaissant quartzopélitique revinien. Dans cette partie, on précise également les variations lithogéochimiques des roches ignées pour les éléments métalliques et la géométrie en trois dimensions de l'intrusion. Il s'agit d'un sill laccolitique d'environ 500 m d'extension NE-SW, épais en son centre de 125 m maximum, plongeant à 30° vers le SE, duquel se dégagent des petits dykes.

Une troisième partie est consacrée aux interprétations pétrologiques et métallogéniques. On peut établir un certain parallélisme qualitatif entre l'intrusion faiblement minéralisée de la Helle et un porphyre cuprifère classique. Bien qu'à la Helle, la plupart des zones d'altération hydrothermale soient mélangées et donc quasi indiscernables, la variation spatiale du feldspath potassique semble suggérer la présence d'un début d'altération potassique dans les secteurs périphériques de l'intrusion. Le télescopage des différentes zones d'altération est probablement dû à la petite dimension de l'intrusion. Comme les teneurs sont également faibles (en moyenne : Cu = 0,17 % ; Mo = 0,02 %), le stock métal estimé en première approximation (Cu : environ 35 000 tonnes ; Mo : environ 4 000 tonnes) est également très modeste.

SAMENVATTING

De intrusie van de Helle, gelegen in het oosten van België (Hoge Venen), werd ontdekt op het einde van de XIXste eeuw. Vroegere studiën hebben aangetoond dat het om een sill gaat, met de samenstelling van kwartsdioriet of strikter genomen uit tonaliet. Aan deze intrusie is enerzijds een zwak metamorfisme geassocieerd dat zich vertaald door een gordel van verscheidene dm hoornrots, anderzijds een dynamometamorfisme, gekenmerkt door een aureool van verscheidene honderden m gedekte schisten. Daarnaast is eveneens een koper-molybdeen-mineralisatie aanwezig. Een radiometrische datering met de U-Pb-methode op zirkoon verleent die intrusie een minimum leeftijd van ontstaan rond 381 ± 16 Mj, d.w.z. Silurisch of Onder-Devoon. Tenslotte is door regionaal metamorfisme tijdens de varistische orogeenese een zwake ACF-paragenese gevormd (prehniet-chloriet-epidoot).

In 1976-1977, heeft Union Minière 4 boringen gefinancierd met de bedoeling de vorm van de intrusie en haar ontginbaarheid nauwkeurig te bepalen. Ze werden toevertrouwd aan de Geologische Dienst van België die de studie begeleidde waarvan de resultaten voorgesteld worden in deze toelichtingen verdeeld in 3 delen.

Een eerste deel bevat een bibliographische synthese van de geologie en mineralisatie van de Hellestreek. Een tweede deel geeft de resultaten van de gedetailleerde lithologische beschrijvingen en de petrographische waarnemingen in de boringen. De diascopische waarnemingen wijzen op een belangrijke variatie van de mineralogische samenstelling, gekenmerkt door een gamma gesteenten gaande van dioriet naar kwartsdioriet en van monzodioriet naar eventueel kwartsgranodioriet. De mineralogische variaties blijken samen te gaan met magmatische differentiële mechanismen (voornamelijk de gefractioneerde kristallisatie), maar ook met de ingewikkeld post-magmatisch hydrothermaal proces dat hoofdzakelijk heeft ingewerkt op het bovenste deel van de magmazuil nu blootgelegd door erosie. Die zone wordt gekenmerkt door het voorkomen van kaliumveldspaat. De hydrothermale verwerking heeft eveneens geleid tot silicificatie en gedeeltelijke albitisatie, gepaard gaand met de vorming van een netwerk van gedeeltelijke aders/adertjes in het magmatische gesteente en de omgevende kwartsopelitische Reviniaan eenheden. In dit deel uiten zich ook duidelijk de lithogeochemische variaties van de stollingsgesteenten voor de metallische elementen en de driedimensionele geometrie van de intrusie. Het betreft een laccolitische sill met een omvang van ongeveer 500 m in de NO-ZW richting, in het midden maximum 125 m dik, 30° naar het ZO duikend, waarvan kleine dykes loskomen.

Een derde deel is gewijd aan de petrologische en metallogenetische interpretaties. Men kan een zeker kwalitatief parallelisme vaststellen tussen de zwak gemineraliseerde intrusie van de Helle en een klassieke koperhoudende porfier. Hoewel in het geval van de Helle, de meeste hydrothermale verweringszones vermengd en dus vrijwel niet te onderscheiden zijn, blijkt de ruimtelijke variatie van kaliumveldspaat toch te wijzen op de aanwezigheid van een beginnende potassische verwerking in de randzones van de intrusie. Het telescoperen van de verschillende verweringszones is waarschijnlijk toe te schrijven aan de geringe afmetingen van de intrusie. Daar de gehalten eveneens laag zijn (gemiddeld : Cu = 0,17%; Mo = 0,02%) wordt de metaalreserve in een eerste benadering (Cu ongeveer 35 000 ton; Mo : ongeveer 4 000 ton) eveneens als zeer bescheiden aanzien.

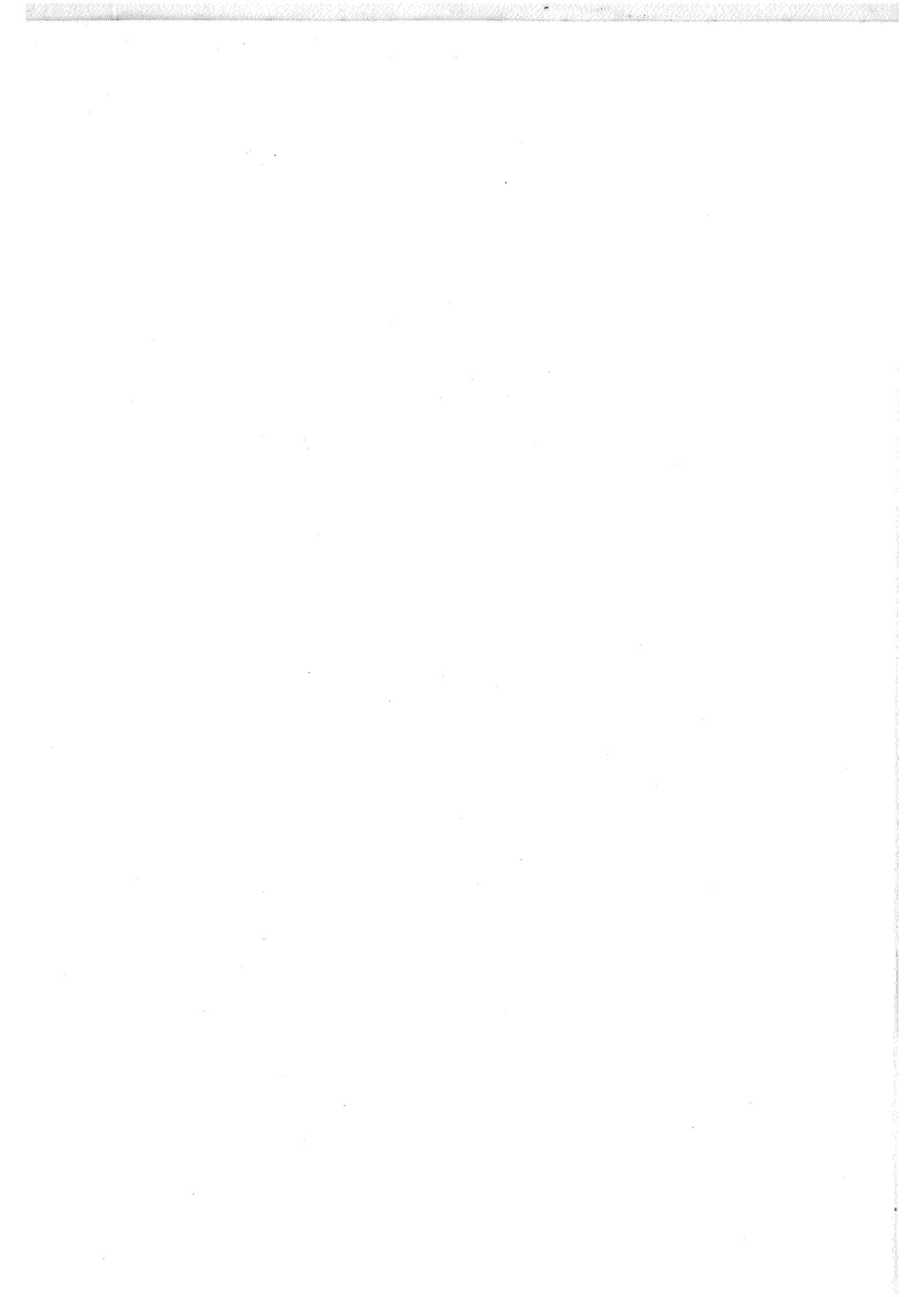


TABLE DES MATIERES

Abstract	1
Résumé	2
Samenvatting	3
A. Introduction	7
B. Bref historique des travaux antérieurs	7

Première partie : Synthèse bibliographique sur la géologie et la minéralisation de la région de la Helle.

1. Roches encaissantes	13
2. Roches intrusives	14
2.1. Texture macroscopique	14
2.2. Structure microscopique	14
2.3. Interprétation magmatique et postmagmatique de Van Wambeke (1956a)	15
2.4. Age de mise en place	16
3. Métamorphisme	17
4. Minéralisations	17
4.1. Paragenèses et morphologie des corps minéralisés	17
4.2. Altération météorique	19
4.3. Géochimie d'exploration	20
4.3.1. Sols	20
4.3.1. Sédiments de ruisseaux	20
4.4. Essais de traitement minéralurgique	21

Deuxième partie : Etude des sondages

1. Descriptions macroscopiques	26
1.1. Description lithologique du sondage He 1 (228W623)	26
1.2. Description lithologique du sondage He 2 (228W624)	36
1.3. Description lithologique du sondage He 3 (228W625)	45
1.4. Description lithologique du sondage He 4 (228W626)	49
1.5. Synthèse des observations macroscopiques	53
1.5.1. Sondage He 1 (228W623)	53
1.5.2. Sondage He 2 (228W624)	53
1.5.3. Sondage He 3 (228W625)	53
1.5.4. Sondage He 4 (228W626)	53
1.6. Conclusions basées sur les observations macroscopiques	58

2. Variations de la composition minérale observée sous le microscope	58
2.1. Sondage He 1 (228W623)	58
2.2. Sondage He 2 (228W624)	66
2.3. Sondage He 3 (228W625)	66
2.4. Sondage He 4 (228W626)	66
2.5. Veinules et filonnets	67
2.5.1. Sondage He 1 (228W623)	67
2.5.2. Sondage He 2 (228W624)	67
2.6. Synthèse et interprétation des observations microscopiques	67
3. Classification des roches magmatiques carottées	67
4. Lithogéochimie	72
5. Géométrie de l'intrusion	76
6. Potentiel minier	81

Troisième partie : Interprétation et conclusions

1. Interprétation pétrologique	83
2. Interprétation métallogénique	87
2.1. Type de minéralisation	87
2.2. Genèse	90
3.3. Conclusions	91

Bibliographie	93
---------------------	----

A. INTRODUCTION

Les pointements magmatiques de la Helle et de Lammersdorf, découverts à la fin du siècle dernier, forment les seuls massifs intrusifs importants de l'Est de la Belgique. Ils sont encaissés dans les formations reviniennes (Rv4) du Massif de Stavelot. L'intrusion de la Helle tire son nom d'une rivière coulant dans la réserve naturelle des Hautes Fagnes. Elle affleure au lieu-dit «Herzogenhügel», à environ 3 km au SW de la route Eupen-Monschau (figs 1 et 2).

La roche ignée est visible principalement à l'extrémité de la colline entaillée par la route forestière (point A de la figure 2 ; photos 1 et 2), en fronts d'exploitation de petites carrières (carrière NW : point B de la figure 2 ; photos 3 et 4 - carrière SE : point C de la figure 2 ; photos 5 et 6), dans les talus et dans le lit des cours d'eau de la région : La Helle, le Spohrbach et le Petit Bonheur (parfois orthographié Boneur ou Bungert).

Le présent travail est subdivisé en trois parties distinctes :

- 1ère partie : synthèse bibliographique reprenant les principales observations et interprétations antérieures.
- 2ème partie : description macroscopique et microscopique des sondages.
- 3ème partie : synthèse de l'ensemble et interprétation globale intégrant des hypothèses pétrogénétiques et métallogéniques.

B. BREF HISTORIQUE DES TRAVAUX ANTÉRIEURS

La roche magmatique de Lammersdorf fut découverte en 1884 lors de la construction du chemin de fer d'Aix-la-Chapelle à Saint-Vith ; celle de la Helle fut repérée en 1896 par J. Winkold (aussi orthographié Winkhold ou Winckhold selon les auteurs), ingénieur à Eupen.

Ces roches furent initialement appelées granite (Von Lasaulx, 1884 ; Dannenberg & Holzapfel, 1898, 1907 ; Holzapfel, 1909, 1910). C'est à partir de 1930 que Ronchesne (1930, 1931a, 1931b) les décrivit comme des tonalites.

Il faut attendre les travaux de Van Wambeke, réalisés dans la décennie 50 (1953, 1954, 1955, 1956a, 1956b, 1958), pour disposer d'une étude détaillée sur l'ensemble du complexe magmato-métamorphique affleurant dans la région de la Helle. On signalera par ailleurs que c'est Van Wambeke qui, pour la première fois, a établi un rapprochement entre la minéralisation de la Helle et les minéralisations de type porphyre cuprifère (Van Wambeke, 1956b). Dans ce même article, il compare la roche minéralisée de la Helle aux gîtes du district minier de Bingham (Utah, USA).

Quelques travaux complémentaires ont ensuite été effectués. Jedwab (1971) a publié des observations sur la ferrimolybdite cristallisée de La Helle. Sacré (1973) a réalisé une étude métallogénique et géochimique sur la roche ignée de la Helle. Cailteux (1974) a procédé à des essais de traitement minéralurgique (par flottation) sur les roches minéralisées de l'intrusion.

Au cours des années 1976 et 1977, à l'initiative de l'«Union Minière SA», une étape supplémentaire sera franchie avec la reconnaissance du corps magmatique par quatre sondages (le plus long, incliné à 45°, atteindra la profondeur de 228,80 m). Les carottes seront mises gracieusement à la disposition du Service géologique de Belgique qui en fera une description détaillée et une étude préliminaire.

En 1979, une étude des paragenèses des roches ignées métamorphisées de la Helle est publiée (Schreyer & Abraham, 1979). L'article reprend les résultats de précédentes analyses chimiques sur roche, les données d'une analyse plus récente sur un échantillon représentatif de la roche ignée de la Helle ainsi que des résultats d'analyses à la sonde électronique sur diverses phases minérales. Les résultats de l'étude épiscopique des minéralisations liées à la roche ignée effectuée sur des échantillons provenant des sondages «Union Minière» ont été publiés en 1980 (Weis *et al.*, 1980). Le travail de Fodé (1981) a été consacré à une étude géochimique de surface dans la région de l'intrusion.

L'étude la plus récente concerne la datation des roches du complexe intrusif de la Helle par la méthode U-Pb (Kramm & Buhl, 1985).

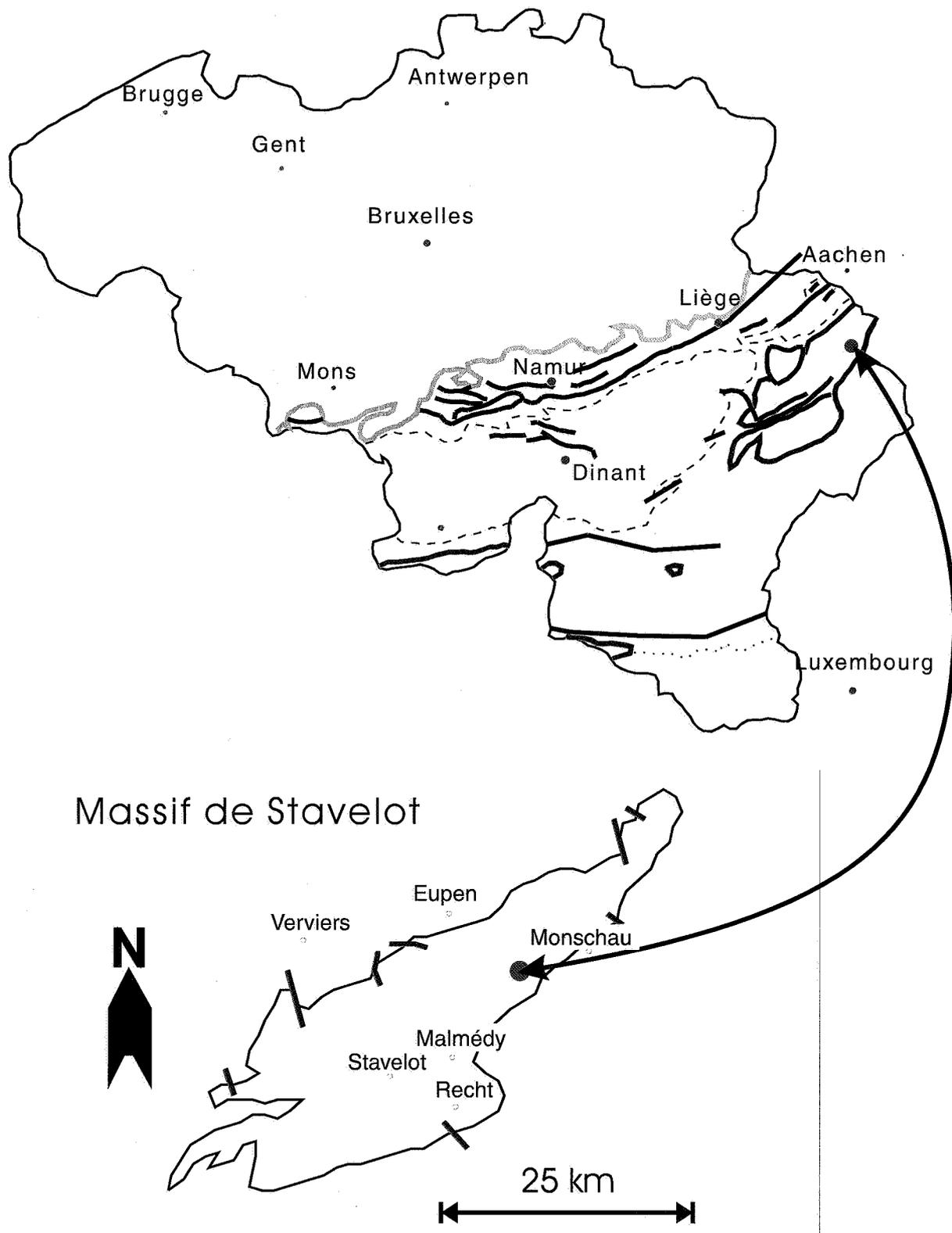


Figure 1. Carte de localisation de l'intrusion de la Helle.

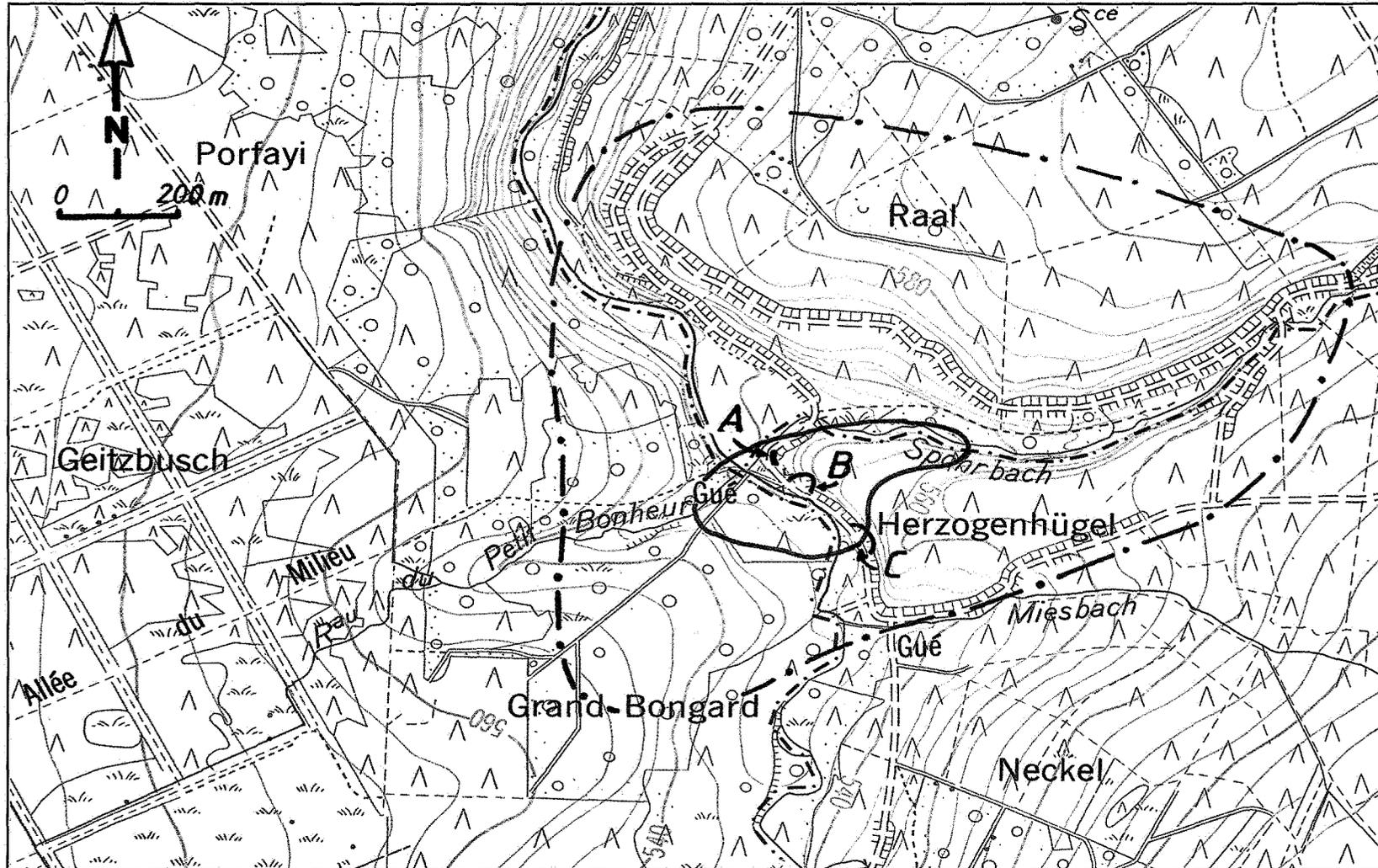


Figure 2. Aire d'affleurement de la roche ignée. En A, promontoire montré aux photos 1 et 2 ; en B carrière NW montrée à la photo 3 ; en C, carrière SE montrée aux photos 5 et 6. La courbe externe en trait mixte matérialise l'aurole de métamorphisme à séricitoschistes tachetés (d'après des levés de Van Wambeke). Extrait de la carte topographique IGN Reinartzhof 43/7.



Photo 1. Promontoire de roche ignée affleurant à l'extrémité W de la colline de l'Herzogenhügel. A l'avant plan, la rivière La Helle. Point A de la figure 2.



Photo 2. Promontoire de roche ignée affleurant à l'extrémité W de la colline de l'Herzogenhügel. Vue plus rapprochée que celle de la photo 1, montrant le flanc SE du promontoire. Point A de la figure 2.



Photo 3. Roche ignée affleurant dans la carrière NW. Point B de la figure 2.



Photo 4. Roche ignée affleurant dans la carrière NW. Vue rapprochée montrant des enduits pelliculaires de malachite et d'oxydes de fer sur une diaclase avec stries de glissement subverticales.



Photo 5. Roche ignée et quartzites reviniens affleurant dans la partie NW de la carrière SE. A cet endroit, la roche ignée est fortement altérée (arène). Point C de la figure 2.



Photo 6. Vue plus rapprochée que celle de la photo 5 montrant des bancs de quartzite blanc (au niveau et à gauche du marteau) alternant avec des petits sills de roche ignée très altérée (arène). Dans le coin supérieur droit, quartzite gris situé sur la photo 5 en face du personnage. Point C de la figure 2.

PREMIERE PARTIE : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA GÉOLOGIE ET LA MINÉRALISATION DE LA RÉGION DE LA HELLE.

1. ROCHES ENCAISSANTES

Comme la région est couverte de dépôts récents et notamment de tourbières, les affleurements de roche ignée sont très rares et principalement concentrés dans les cours d'eau (la Helle et ses affluents : le Spohrbach et le Petit Bonheur). Leur description est consignée dans la banque de données du Service géologique de Belgique. Les roches encaissantes de l'intrusion sont datées du Revinien. Selon Van Wambeke (1955), le sill de La Helle est intrusif dans le Rv4 moyen tandis que celui de Lammersdorf est intrusif dans le Rv4 supérieur. La lithologie locale est assez différenciée. Elle est représentée par :

- des phyllades ;
- des quartzites ;
- des quartzophyllades.

Van Wambeke (1955, 1956a) a décrit la plupart des lithologies rencontrées dans la région de l'intrusion de la Helle. En complément des roches magmatiques, cet auteur a tout particulièrement porté son attention sur les roches métamorphiques associées au massif intrusif. Ses principales observations pétrographiques sont résumées dans les lignes qui suivent.

Plusieurs phases de métamorphisme régional ou associées à différents épisodes tectoniques des orogénèses calédoniennes et varisques ont affecté le Massif de Stavelot où se localise l'intrusion de la Helle. La phase métamorphique la plus récente a faiblement transformé (métamorphisme épizonal) les roches ignées à l'ère varisque. Les plis et les nombreuses stries de glissement (voir photo 4) qui affectent les roches encaissantes de l'intrusion attestent aussi que des efforts tectoniques intenses ont affectés la région de la Helle.

Un métamorphisme thermique (ou de contact) s'exprime par des cornéennes d'épaisseur très limitée. Une auréole de schistes tachetés traduisant un dynamométamorphisme est nettement plus étendue (son extension maximale est d'environ 1500 m - voir figure 2).

Enfin, une altération hydrothermale et localement un processus de métagénèse se sont également manifestés dans la région de la roche ignée. Ces phénomènes ont provoqué la transformation de la biotite en hydrobiotite et, ensuite, en chlorite. Chimiquement, ces phénomènes ont été accompagnés par un apport de silice (filonnets de quartz) et de soude qui a provoqué une albitisation partielle des quartzites de contact.

Les phyllades massifs (argilites métamorphisées dans l'épizone) entourant l'intrusion sont formés d'un mélange de séricite-muscovite. Au contact de la roche ignée, ces phyllades ont été transformés en cornéenne. Pour Van Wambeke, il existe deux types de cornéenne à la Helle :

1. les cornéennes à deux micas (muscovite + biotite) et à andalousite. Ce sont des roches gris foncé, légèrement schistoïdes, avec des taches noires d'andalousite. Microscopiquement, on observe un feutrage de biotite et de muscovite avec parfois un peu de quartz. Des porphyroblastes d'andalousite (chiastolite) se détachent du fond micacé. La biotite est entièrement transformée en hydrobiotite, en chlorite magnésienne (ripidolite = prochlorite) et en chlorite. Elle contient de nombreuses aiguilles de rutile. L'andalousite est souvent séricitisée. La roche est parcourue par de nombreux filonnets d'apatite-quartz \pm feldspath et par des filonnets de quartz-albite à chlorite-séricite.
2. les cornéennes à séricite-muscovite, assez semblables aux cornéennes à deux micas. Cependant, le mica «blanc» (séricite-muscovite) y prédomine sur le mica «noir» ferro-magnésien (biotite).

Tout comme les phyllades, les quartzites ont subi un métamorphisme de contact assez prononcé aux alentours immédiats de l'intrusion. Les quartzites de l'auréole de contact sont de plusieurs types. En s'éloignant du corps intrusif, on trouve :

1. les quartzites assimilés par la roche ignée, formés par un enchevêtrement de quartz et de plagioclase basique à sodique (albite). La zone d'assimilation caractérisant l'interface roche ignée-quartzite met en évidence un mélange de roches ignées très enrichies en silice (excès de quartz) et de quartzites où les grains de quartz plus ou moins arrondis sont localement métasomatés par le plagioclase (labradorite-albite).
2. les quartzites feldspathiques légèrement micacés, constitués d'une petite quantité de séricite-muscovite entre les grains de quartz ainsi qu'un peu d'albite et d'hydrobiotite souvent chloritisée (et à inclusions de zircon et d'épidote).
3. les quartzites à séricite-chlorite dits normaux (c'est-à-dire non métamorphiques). L'épaisseur de l'auréole métamorphique de contact la plus interne (cornéennes générées sous haute température) est très faible. Elle est de quelques cm seulement dans la zone des cornéennes à andalousite et de quelques dizaines de cm au plus dans les quartzites. L'auréole de dynamométamorphisme s'étendant sur quelques hectomètres autour de l'intrusion (fig. 2) est caractérisée par des phyllades à taches (aussi qualifiés de «schistes ou séricitoschistes tachetés») constituées de petits noeuds de chlorite avec pigment charbonneux et probablement aussi de l'hématite finement dispersée. Parfois, la séricite, la zoïsite et le rutile (altéré en leucoxène) sont aussi présents.

2. ROCHES INTRUSIVES

Weis *et al.* (1980) ont précisé que la roche de la Helle a été qualifiée de façons diverses. En effet, Dannenberg et Holzapfel (1898), qui en firent la première description, l'appelèrent granite. Iddings (1913), la rangea dans les «quartz diorites» de sa classification. Ronchesne (1930), tout en confirmant sa nature de diorite quartzique, lui préféra le terme de tonalite sodique. Enfin, Schreyer et Abraham (1979) ont considéré qu'il s'agissait plutôt d'une trondhjemitite dont le chimisme a été modifié par métamorphisme. Ils l'ont dès lors qualifiée de métatonalite. En fait, sur base de la composition minéralogique modale de la roche donnée par Van Wambeke (1956a), il s'agirait d'une granodiorite, en se rapportant à la classification de Streckeisen (1973). Les résultats de notre étude pétrographique montrent de larges variations dans les proportions des minéraux clairs et principalement du rapport plagioclase - feldspath potassique : l'intrusion de la Helle a donc une composition variable, de la diorite à la diorite quartzique et de la monzodiorite à la granodiorite éventuellement quartzique. C'est pourquoi, comme le recommandent Weis *et al.* (1980, p. 17), nous parlerons de roche ignée de la Helle et non plus uniquement de tonalite.

Les principales descriptions et analyses (minéralogiques et chimiques) relatives aux roches magmatiques de la Helle sont reprises dans un article de synthèse intitulé «Compositions minéralogiques et chimiques des tonalites de la Helle et de Lammersdorf (Hautes Fagnes)» (Van Wambeke, 1956a). Une compilation des études consacrées à cette intrusion avant 1961 est due à Corin (1965).

2.1. Texture macroscopique

Macroscopiquement, les roches ignées de la Helle sont des roches à grains moyens dans laquelle on distingue des feldspaths, du quartz, du mica noir et des minéraux opaques (notamment la chalcopyrite et la pyrrhotite). Localement, certaines roches prennent une structure nettement porphyrique marquée par l'individualisation de phénocristaux feldspathiques. Des veinules de quartz lardent les roches ignées à divers endroits. Sous l'effet de l'altération atmosphérique, les roches prennent une couleur blanc brunâtre. Les feldspaths sont kaolinisés superficiellement et la biotite tend à se décomposer. Un enduit ferrugineux recouvre souvent les minéraux. Les roches ignées sont parfois minéralisées en sulfures disséminés, principalement en chalcopyrite et en pyrrhotite. Elles prennent alors une teinte beaucoup plus foncée, dans les tons gris bleuâtre à verdâtre. Les minéraux du groupe de la zoïsite (dont l'épidote) donnent fréquemment une teinte vert sale aux feldspaths.

2.2. Structure microscopique

La structure des roches ignées varie de grenue/microgrenue à porphyrique. Leurs constituants minéraux essentiels sont : le plagioclase, le quartz et la biotite (souvent altérée en hydrobiotite ou prochlorite). Pour Van Wambeke (1956a), l'altération de la biotite a pour conséquence de libérer le potassium qui intervient plus tardivement dans la formation de la séricite hydrothermale. Les minéraux accessoires sont : la séricite, le kaolin, la zoïsite, le zircon, l'apatite, la calcite, la magnétite, la titanite, l'ilménite, le rutile, le leucoxène, les oxydes de Mn et les

minéraux opaques. Pour la description détaillée de chaque phase, on se rapportera aux publications de Van Wambeke (1956a), et de Weis *et al.* (1980).

Pour Ronchesne (1930) et Van Wambeke (1956a), les feldspaths sont représentés exclusivement par des plagioclases. On notera que ces auteurs n'ont pas observé de feldspath potassique dans les roches ignées de surface bien que Dannenberg et Holzapfel (1898) le renseignent. Cela peut s'expliquer par la difficulté d'identifier le feldspath potassique en l'absence de coloration sélective par le cobaltinitrite de Na. L'absence d'orthose avait cependant intrigué Van Wambeke (1956a, pp. 505-506) qui avait conclu : «... un peu d'orthose devrait s'individualiser sous forme de micropertithe (...). Comme ce n'est pas le cas, il faut donc en conclure que les réseaux de l'orthose et des plagioclases sont intimement interpénétrés et qu'aucune séparation n'est donc visible au microscope». Michot (1930) n'avait cependant pas exclu la présence d'orthose dans la roche ignée de la Helle. La présence (Danneberg) ou l'absence (Ronchesne) d'orthose résultaient, selon lui, du prélèvement des échantillons en des endroits différents. Mais le raisonnement qu'il avait suivi avait été critiqué par Corin (1930). En réalité, il semble bien que ce soit Sacré (1973) qui ait le premier confirmé la présence du feldspath potassique à La Helle par coloration sélective de lame mince. Cette présence a été ultérieurement confortée par Weis *et al.* (1980). Elle l'est également par les observations sous le microscope renseignées au point 2.2. de notre étude. La composition du plagioclase varie du labrador à l'albite. Les feldspaths sont rarement bien conservés et sont en général saussuritisés et séricitisés. Trois types d'occurrences coexistent :

- les phénocristaux en général zonés et maclés polysynthétiquement ;
- les microlites souvent maclés polysynthétiquement ;
- l'albite le plus souvent non maclée et xénomorphe. Elle remplace le plus souvent les plagioclases plus basiques.

Van Wambeke (1956a) distingue deux générations de quartz :

- un quartz «primaire» qui forme des plages plus ou moins arrondies et remplit les interstices entre les minéraux. Ce quartz est qualifié de quartz cristallin ;
- un quartz «tardif», associé ou non à l'albite, qui forme non seulement des filonnets mais se développe également au détriment de tous les constituants de la roche. Ce quartz se présente en larges plages irrégulières, métasomatiques, entourant les minéraux des roches. Ce processus de silicification est accompagné par un phénomène d'albitisation intense. La minéralisation disséminée chalcopryrite-pyrrhotite semble principalement liée à ces zones riches en quartz-albite. Ce quartz est qualifié de quartz laiteux.

La distinction sur base microscopique de deux variétés de quartz a été confirmée par une analyse chimique après séparation de la silice libre (quartz) et de la silice combinée (dans le feldspath) en utilisant le caractère de solubilité différentiel des ces deux types de silice dans l'acide phosphorique.

2.3. Interprétation magmatique et postmagmatique de Van Wambeke (1956a)

D'après Van Wambeke (1956a), la séquence de cristallisation des minéraux de la Helle est la suivante :

- 1a. Biotite (avec inclusions de zircon, ilménite, apatite).
- 1b. Plagioclases basiques (andésine-labrador) précipitant sous forme de cristaux zonaires à récurrences.
2. Microlites feldspathiques (andésine-albite) + bordure d'orthose.
3. Quartz remplissant les interstices entre les minéraux.
Fin de la phase de cristallisation magmatique - début de la phase hydrothermale.
4. Albite + quartz. Formation de petites plages d'albite mélangées à des plages de quartz. Processus de silicification et d'albitisation. Remplacement du plagioclase par l'albite.
5. Saussuritisés et séricitisés des plagioclases. Hydrolyse de la biotite et ensuite chloritisation de l'hydrobiotite.
6. Localement, silicification et séricitisation des éponges.

Chimiquement, le magma de la Helle présente une composition initiale intermédiaire (magma calco-alkalin - Ronchesne, 1930 ; Michot, 1930). Après séparation des phases les plus basiques (plagioclases basiques et phases ferro-magnésiennes), le magma résiduel s'enrichit en Na et Si et subit une silicification - albitisation générale, synmagmatique ou postmagmatique, accompagnée par une libération de Ca et éventuellement de K à partir des plagioclases (formation d'orthose tardive, de séricite et d'épidote).

A ce stade, nous signalerons qu'un enrichissement en orthose, tardif par rapport aux plagioclases, suggère la présence d'une altération potassique génétiquement importante lors de la mise en place d'un gîte de type porphyre cuprifère (Lowell et Guilbert, 1970)

2.4. Age de mise en place

Se basant sur l'existence, au sein de l'intrusion, de systèmes de joints conjugués, cicatrisés ou non, et parallèles en direction et même, pour certaines familles, en inclinaison avec la schistosité oblique et les joints associés qui affectent les roches sédimentaires encaissantes, Van Wambeke (1954) a conclu à une communauté d'origine de ces deux groupes d'éléments structuraux dont la direction est varisque. Comme d'autre part, nombre de ces joints sont, dans l'intrusion, cicatrisés par des filonnets de roche ignée porphyrique ou de quartz minéralisés, Van Wambeke (1954) a conclu à un âge de mise en place de l'intrusion contemporain à l'orogénèse varisque (âge syntectonique).

Des données complémentaires sur l'âge de mise en place ont été acquises par une approche isotopique due à Kramm et Buhl (1985). Les mesures isotopiques U-Pb ont été réalisées sur zircon. Le diagramme $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ montre que la droite Discordia d'alignement des zircons de quatre fractions granulométriques intercepte la courbe Concordia en deux endroits : à 381 ± 16 Ma et 1928 ± 64 Ma. Les rapports isotopiques U-Pb ont été corrélés avec la taille des grains de zircon : en effet, l'âge radiométrique semble augmenter avec la taille des cristaux. L'héritage protérozoïque des ces minéraux accessoires est le mieux préservé dans les cristaux de grande taille. L'âge le plus ancien peut être attribué à une première formation de zircon au Protérozoïque inférieur (probablement dans la croûte inférieure), ce qui correspond aux datations sur zircon réalisées sur de nombreuses roches magmatiques et métamorphiques d'Europe occidentale. Ces zircons ont pu être par la suite régénérés (avec perte de Pb) lors des événements intrusifs paléozoïques. Il est bon de noter que le métamorphisme régional varisque a également pu induire dans les roches de la Helle une deuxième perte de Pb dans les zircons tout comme c'est le cas dans certaines régions d'Allemagne (Massif de Bohême, Forêt Noire, et Odenwald ; Grauert *et al.*, 1973 ; Todt et Büsch, 1981).

D'après Kramm et Buhl (1985), l'âge modèle minimum de l'intrusion de la Helle serait très proche de l'âge d'emplacement du magma et serait Silurien ou Dévonien inférieur. Des hypothèses sur le contexte géologique général de l'épisode intrusif de la Helle ont été suggérées par les deux auteurs à partir des datations réalisées sur d'autres roches magmatiques d'Europe centrale. Selon eux, la mise en place de l'intrusion de la Helle est contemporaine de l'activité intrusive acadienne dans les Appalaches (ceinture mobile appalachienne) s'échelonnant d'environ -373 à -410 Ma, (Rodgers, 1970). En Europe, les événements géologiques datés de l'Acadien (documentés particulièrement en Allemagne, Angleterre, Ecosse, Groenland, Norvège) comprennent des phases magmatiques aussi bien que des épisodes métamorphiques (voir Kramm et Buhl, 1985). Par contre, dans la région du Limousin (France), l'Acadien semble être caractérisé uniquement par des processus tectonométamorphiques qui ont été suivis par un métamorphisme thermique vers -373 Ma (Bernard-Griffiths *et al.*, 1977).

Le développement de la sédimentation dévonienne contemporaine du métamorphisme des roches du Harz et du Massif gneissique de Munchberg en Bavière ainsi que la formation et l'emplacement de magmas granitiques et trondhjemitiques sont expliqués par Kramm et Buhl (1985) par une mégastructure de stockwerk en Allemagne centrale pendant l'époque acadienne. Par ailleurs, cet épisode magmato-métamorphique a pu être localement favorable au développement de minéralisations métallifères.

En outre, Goffette *et al.* (1991) signalent que le magmatisme du massif de Rocroi date probablement du Dévonien moyen ou supérieur. L'étude sur deux occurrences magmatiques montre que l'âge radiométrique fourni par la méthode U-Pb sur zircon est déduit d'une droite Discordia ayant une intersection inférieure avec la courbe Concordia à $373 \pm 8/9$ Ma (Dévonien moyen à supérieur) et une intersection supérieure à $2997 \pm 640/548$ Ma (Protérozoïque inférieur). L'âge radiométrique le plus récent est interprété classiquement comme reflétant l'âge du dernier événement tectonométamorphique ayant provoqué une modification du système isotopique U-Pb de la roche magmatique alors que l'âge protérozoïque résulte probablement d'un héritage crustal des zircons. Les auteurs de l'étude proposent également une interprétation géodynamique. Ils signalent qu'en Ardenne méridionale, la reprise de la sédimentation marine liée à l'initiation, en contexte extensif, de la marge méridionale du Continent des Vieux Grès Rouges, s'effectue à la limite Silurien-Dévonien (Meilliez, 1989) et que le magmatisme bimodal du Massif de Rocroi correspond vraisemblablement à un pic d'activité de l'extension qui a perduré en Ardenne méridionale au moins jusqu'au Dévonien moyen à supérieur. La similitude des âges des filons magmatiques de Rocroi avec plusieurs intrusions (dont notamment les sills de la Helle et de Bierghes) suggèrent que ce pic d'ac-

tivité extensive vers 370-380 Ma est très probablement d'ampleur régionale. Les auteurs signalent également que cet épisode magmatique est contemporain d'un métamorphisme de faible degré qui a provoqué une réhomogénéisation du système isotopique Rb/Sr des minéraux de la microdiorite quartzique de Quenast (André et Deutsch, 1985).

Enfin, tout en sachant qu'un âge radiométrique est défini par rapport à un modèle, il faut souligner l'incompatibilité des âges de mise en place varisque (Van Wambeke, 1954) et silurien ou dévonien inférieur (Kramm et Buhl, 1985). En outre, André (1983) précise qu'il existe aussi des arguments supportant un âge calédonien.

3. METAMORPHISME

L'épisode métamorphique régional qui a affecté les roches ignées de la Helle est de faible degré (Schreyer et Abraham, 1979). La paragenèse ACF (Na+K, Ca, Fe+Mg) qui le caractérise est constituée de prehnite-chlorite-épidote. Cet ensemble minéral est associé à un métamorphisme dans l'épizone supérieure, voire dans l'anchizone, où les valeurs de P-T sont faibles ; au maximum, la température est d'environ 320° à 360° C et la pression lithostatique est basse (équivalent $PH_2O = 2,5 \pm 1$ kb). Ce métamorphisme pourrait avoir provoqué une perte de CaO et un enrichissement en SiO_2 et en alcalins par métasomatisme postmagmatique de la roche ignée originelle. Les basses teneurs en CaO et SiO_2 suggèrent à Schreyer et Abraham (1979) que la roche ignée de la Helle est une trondhjemite dont le chimisme a été modifié par métamorphisme et l'ont qualifiée de métatonalite.

Par ailleurs, l'existence d'une activité hydrothermale avec métasomatisme liée à une phase tardive de l'intrusion suppose une certaine modification chimique de la roche magmatique originelle décrite comme tonalite à cause de son plagioclase basique (An_{50}) et de son absence de feldspath K. Les observations minéralogiques de Schreyer et Abraham sont confirmées par les observations microscopiques des roches ignées des sondages (Weis *et al.*, 1980 et ce travail). Elles démontrent la présence de minéraux non signalés dans certains travaux précédents, c'est-à-dire le feldspath potassique (orthose et rarement perthite), la prehnite et la titanite (sphène).

Les analyses à la microsonde électronique citées par Schreyer et Abraham (1979) montrent que :

- le plagioclase a une composition d'albite assez pure : $Ab_{98,5}An_{1,3}Kf_{0,3}$
- le feldspath potassique a une composition également assez pure : $KF_{96,7}Ab_{3,1}An_{0,2}$ avec des teneurs assez anormales en Ba, Fe, Ti.
- le mica blanc, anormalement riche en Si et Mg, devrait être appelé phengite.
- les minéraux du groupe de l'épidote ont une composition assez variable, de Ps_9 à Ps_{14} (pistachite). Cela signifie qu'il existe mélange de clinzoïsite et d'épidote. Ils sont enrichis en Sr.
- la prehnite est très pure : $Ca_2Al_2Si_3O_{10}(OH)_2$.

L'assemblage ternaire AKF de la métaroché ignée est constitué de chlorite - feldspath K - phengite. La présence de prehnite impose une température maximale de 400° C sur base des études expérimentales de Liou (1971). L'assemblage ternaire ACF de la métaroché ignée est : prehnite - chlorite - épidote ± calcite. Sur base de la réaction : prehnite + chlorite + épidote = épidote + actinolite, la température maximale de l'assemblage est d'environ 360° C. A une température plus basse (320-330°C), la réaction prehnite + chlorite + épidote = pumpellyite + quartz devrait intervenir. L'absence de pumpellyite suggère que la gamme de température du métamorphisme devrait se situer entre 320° et 350° C, à moins que l'assemblage originel du métamorphisme P-T faible (pumpellyite-quartz) ait donné naissance à la prehnite sous un métamorphisme gagnant en intensité.

4. MINERALISATIONS

4.1. Paragenèses et morphologie des corps minéralisés

Le travail le plus récent relatif à l'étude des minéraux opaques de la Helle est du à Weis *et al.* (1980). Antérieurement, les principales phases opaques avaient été décrites par Dannenberg et Holzapfel (1898), Ronchesne (1930) et Van Wambeke (1956a). Il s'agit de la chalcopryrite, la pyrite, la molybdénite, la pyrrhotite, la sphalérite, la scheelite et la tétradymite. Les minéraux opaques accessoires sont la ferrimolybdite (Van Wambeke, 1958 ; Jedwab, 1971), la malachite, les oxydes de Mn, l'ilménite, le rutile, la titanite, le leucoxène et la magnétite.

Weis *et al.* (1980) mentionnent la présence des minéraux suivants, cités par ordre décroissant d'abondance :

- minéraux hypogènes : pyrite, chalcopyrite, rutile, molybdénite, pyrrhotite, sphalérite, marcasite, titanite, galène, un tellure de bismuth (série tellurobismuthite-hedleyite, Bi_2Te_3 à Bi_2Te_7), ilménite, cobaltite ($(\text{Fe},\text{Co})\text{AsS}$) et hessite (AgTe_2).

- minéraux supergènes : goethite, malachite, covellite, chalcocite, lépidocrocite, néodigénite et cuivre natif.

Le schéma de succession des minéraux dans la minéralisation de l'intrusion de la Helle est montré à la figure 3.

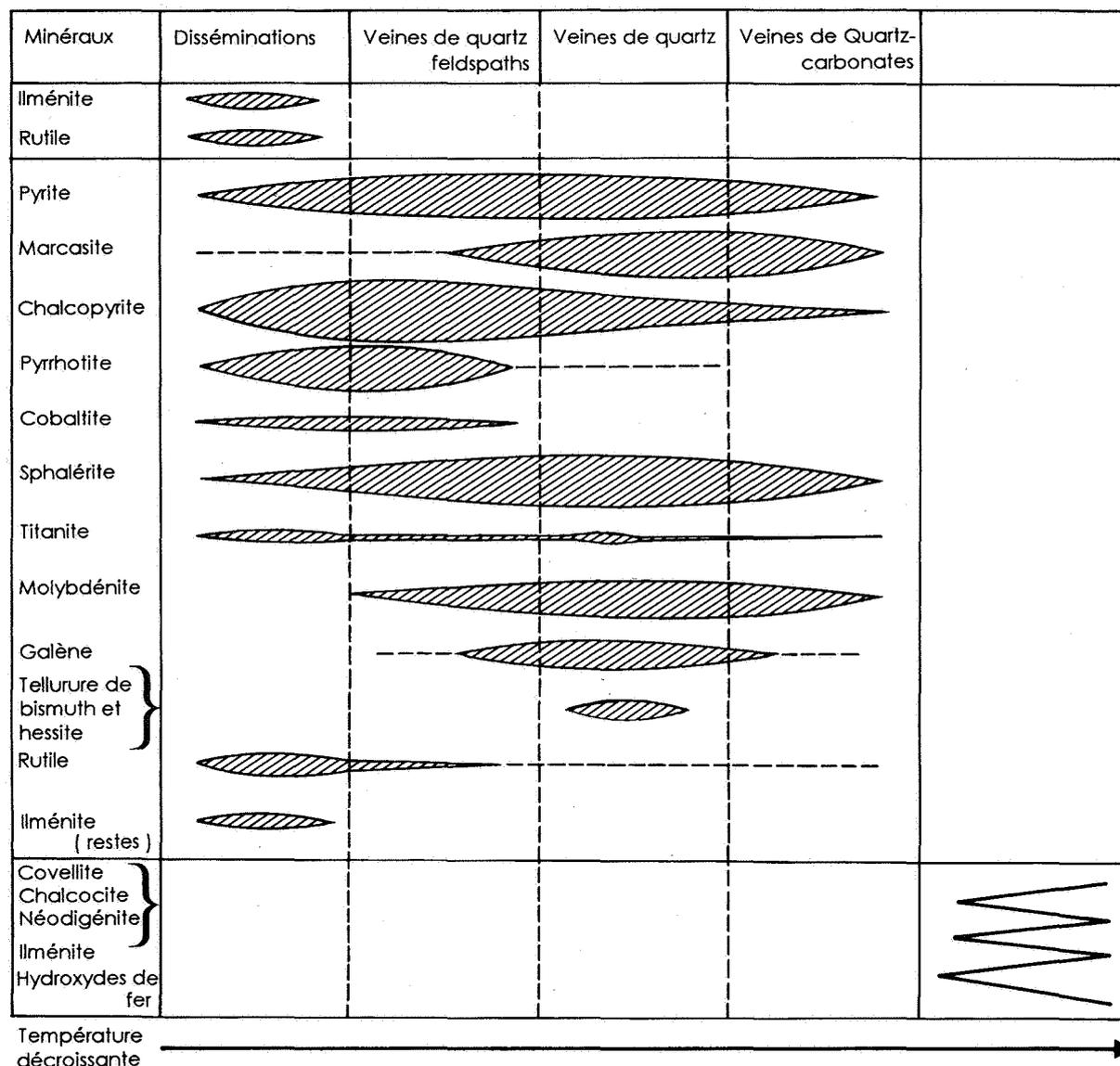


Figure 3. Schéma de succession des minéraux dans la minéralisation liée à l'intrusion de la Helle (partie supérieure, association originelle ; partie médiane association hydrothermale ; partie inférieure association d'altération supergène) (reproduction de la figure 2 de Weis *et al.*, 1980).

La répartition spatiale des minéralisations de la roche ignée de la Helle a été mise en rapport avec la température de l'intrusion : la minéralisation disséminée et la minéralisation filonienne à quartz-feldspaths (située dans la partie la plus interne de l'intrusion) seraient de plus haute température que la minéralisation des veines de quartz (située dans la partie la plus externe de l'intrusion).

Les veines de quartz seules présentent des associations minérales qui correspondraient à une gamme de températures plus faibles indiquées par la disparition progressive de la pyrrhotite et par l'apparition de la marcasite. Ces températures seraient néanmoins encore assez élevées, vu la présence de la molybdénite (Ramdohr, 1969). Enfin, les phénomènes d'altération superficielle ont donné naissance aux phases supergènes classiques.

La minéralisation hypogène de la roche ignée de la Helle est donc essentiellement sulfurée. Au coeur de l'intrusion, elle se présente sous forme disséminée. Elle évolue vers une forme filonienne au fur et à mesure que l'on se rapproche des épontes. Weis *et al.* (1980) ont noté qu'une évolution semblable a été constatée dans la plupart des porphyres cuprifères de l'ouest des Etats-Unis correspondant au modèle de Lowell et Guilbert (1970, 1974). A la Helle, c'est dans l'encaissant que le cortège filonien est le plus développé. De plus, la variation minéralogique de la minéralisation en fonction de sa morphologie est bien décrite par Weis *et al.* (1980). Dans la roche ignée de la Helle, la minéralisation disséminée est principalement constituée par la chalcopryrite et la pyrrhotite étroitement associés avec pyrite, marcasite, sphalérite et cobaltite. La galène est absente. Les veines de quartz-albite/feldspath K, recoupant uniquement l'intrusion et contenant pyrrhotite, chalcopryrite, pyrite, sphalérite et un peu de rutile, exhibent la même paragenèse que la roche ignée. Les veines de quartz sans feldspath ni carbonates se présentent essentiellement dans l'enveloppe externe du corps intrusif. Elles sont minéralisées en pyrite, marcasite, sphalérite, chalcopryrite, molybdénite, galène et cobaltite. La pyrrhotite est beaucoup moins abondante qu'au centre du corps igné. Les veines de quartz qui recoupent l'encaissant de la roche magmatique sont formées de sphalérite, galène, chalcopryrite, tellure de bismuth, hessite, pyrite, marcasite et rarement de rutile et de molybdénite. Weis *et al.* (1980) signalent que la distribution des veines de quartz-carbonates (à sidérite, dolomite et/ou calcite) n'est pas marquée par une tendance évolutive claire au sein de l'intrusion. Ces veines présentent une minéralisation plus pauvre aussi bien en ce qui concerne les variétés de minéraux que leur abondance ; il s'agit généralement de pyrite et de marcasite, quelquefois associées à la chalcopryrite et la pyrrhotite.

4.2. Altération météorique

Les produits et mécanismes d'altération supergène à l'aplomb de l'intrusion de la Helle ont été décrits en détail par Fodé (1981). L'altération climatique, surtout intense dans les fissures, a essentiellement engendré des produits ferrugineux (oxydes/hydroxydes de Fe, phases amorphes riches en Fe et minéraux argileux riches en Fe). La goéthite est le minéral ferrugineux supergène le plus abondant. L'eau météorique est le principal agent responsable de l'altération climatique. La présence simultanée de blocs non altérés à côté de débris de roche altérée renforce l'explication d'une altération essentiellement véhiculée par le degré de fracturation de la roche. Le mécanisme d'altération secondaire est également similaire à l'échelle microscopique avec un envahissement par néoformation de minéraux argileux formés préférentiellement à partir des clivages (001) des micas. La séricitisation et la saussuritisation des plagioclases accompagne également l'altération des roches ignées. L'association minéralogique de l'horizon d'altération est constant :

- illite+kaolinite+chlorite+feldspath \pm vermiculite ;
- illite, chlorite et feldspaths diminuent vers la surface.

Dans l'horizon organique A tamisé à 80 mesh (180 μ m), les éléments Fe, Cu, Co, Ni ont une teneur minimale qui augmente vers la base de l'horizon d'altération (horizon C). Les éléments Pb et \pm Zn montrent une évolution inverse. Le sol riche en matière organique a donc tendance à concentrer ces deux derniers éléments. On observe également une diminution des teneurs en Pb, Zn et Mn au passage de la roche altérée désagrégée (horizon C1) vers la roche altérée compacte (horizon C2) tandis que les autres éléments ne varient quasi pas. Le pH augmente en passant de l'horizon superficiel (pH=3-4) à C2 (pH= \pm 7) en passant par C1 (pH=5-6). Le carbone organique montre une évolution inverse. Dans l'horizon d'altération C2 (roche altérée compacte), on distingue deux groupes d'association élémentaire qui peuvent être interprétés de la façon suivante :

- une affinité du Cu pour des oxydes de Fe.
- une affinité de Co, Ni et Zn pour des oxydes de Mn ou pour des silicates contenant Mn.

Les résultats des extractions chimiques sélectives montrent que 20 à 40 % du Cu et du Fe sont associés dans des phases sulfurées (primaires ou secondaires) au sein de l'horizon altéré compact (C2). Dans l'horizon A, Fe est surtout lié à la matière organique. Le pourcentage élevé d'extraction de Pb par H₂O₂ démontre que Pb est principalement lié à la matière organique dans les sols alors que Zn montre une affinité moins prononcée pour la matière

organique. Fodé (1981) note l'absence de sulfures de Pb-Zn dans la roche altérée compacte. En résumé, les oxydes de Fe jouent un rôle dominant dans l'immobilisation du Cu à partir des fluides propageant l'altération superficielle préférentiellement par les fissures de la roche.

4.3. Géochimie d'exploration

4.3.1. Sols

Un échantillonnage des sols recouvrant les roches magmatiques de la Helle a été réalisé par Fodé (1981). Les sols recueillis sont de couleur brune et de composition acide. Ils ont été séchés et tamisés à 180 µm. Les résultats géochimiques montrent les faits suivants :

- les plus hautes intercorrélations linéaires sont observées pour les paires de variables suivantes (r à 99.5 % degré de confiance) : Fe-Mo : $r=0.60$; Fe-Mn : $r=0.50$; Cu-pH : $r=0.59$; Cu-Zn : $r=0.41$; Pb-C : $r=0.46$; Zn-Ni : $r=0.69$; Zn-Mn : $r=0.68$; Zn-Co : $r=0.49$; Co-Ni : $r=0.81$; Ni-Mn : $r=0.66$; Mo-C : $r=0.60$;
- existence d'une coïncidence entre la distribution pédologique de Fe, Cu et pH avec leur distribution en roche ;
- la répartition de Mn, Zn, Co et Ni est semblable. Elle est caractérisée par une large zone de hautes valeurs qui s'étend du nord à l'ouest de l'aire prospectée ;
- la similarité de la distribution du Pb et du C organique ;
- la répartition de Mo semble suivre la limite entre roche magmatique et encaissant ;
- l'association Cu-pH peut s'interpréter par la dépendance du Cu vis-à-vis des conditions redox ;
- l'association Pb-Mo-C traduit l'affinité de Pb et Mo pour la matière organique ;
- Le groupe Zn-Co-Ni-Mn traduit l'association d'éléments sidérophyles hérités des silicates de la roche mère ;
- la paire Mo-Fe traduit peut-être l'effet de piégeage du Mo par les oxydes de Fe.

Les extractions sélectives indiquent que les sols contiennent préférentiellement Fe et Cu dans des oxydes de fer amorphes. Les autres principaux résultats sont les suivants :

- environ 25 % de Mo accompagne la matière organique ;
- environ 60 % de Mo est inclus dans les oxydes de fer cristallins ;
- environ 50 % du Pb est lié à la phase organique et environ 20 % est contenu dans les oxydes de fer amorphes.

D'autre part, 14 % du Zn est associé à la matière organique et environ 30 % aux oxydes de Fe amorphes. Pour les éléments Zn, Co, Ni et Mn, environ 50 % sont toujours liés aux phases silicatées résiduelles. Cu est généralement corrélé (par coprécipitation et/ou adsorption) aux oxydes de fer et préférentiellement avec les oxydes amorphes. L'absence de corrélation linéaire entre Fe et Cu s'explique par la tendance du fer à être préférentiellement complexé par la matière organique du sol, ce qui rompt l'affinité Cu-Fe dans la roche altérée.

L'occurrence minéralogique des éléments en traces conditionne évidemment, au même titre que les paramètres physico-chimiques, le degré et le type de l'altération météorique. C'est ainsi que les métaux (Zn, Co, Ni, Mn) contenus essentiellement dans les phases silicatées résiduelles montrent une corrélation négative avec les éléments chalcophyles (Cu, Mo) localisés dans les sulfures (chalcopyrite, molybdénite). Les conditions acides imposées par la présence d'une grande quantité de matière organique dans le sol favorisent le lessivage intense des éléments en traces en solution issus préférentiellement de l'altération rapide par oxydation des sulfures.

4.3.2. Sédiments de ruisseaux

Les résultats les plus significatifs de la prospection géochimique dans les sédiments de ruisseaux dus à Fodé (1981) sont les suivants :

- la conservation de la signature lithologique ;
- la caractérisation de l'intrusion par le cuivre ;
- comme dans les sols, la forte affinité du Cu pour les oxydes de fer amorphes et du Mo pour les oxydes les plus cristallins ;
- l'association entre Pb et la matière organique ;
- l'association géochimique Zn-Co-Ni-Mn tout comme dans la roche inaltérée et les sols.

Les quatre éléments en traces Zn-Co-Ni-Mn étant présents majoritairement dans les silicates (essentiellement ferromagnésiens), leur association à tous les degrés d'altération représente la seule empreinte/signature permanente et inaltérable de la roche mère, ceci jusque dans les sols et les sédiments de ruisseaux.

Les différences entre la distribution des éléments en traces dans les sols et les sédiments de ruisseaux résident dans la nature des phases secondaires abritant les éléments mineurs. Dans les sédiments de ruisseaux, la proportion des métaux associés aux phases cristallines est plus élevée que dans les sols, alors que c'est l'inverse pour les phases amorphes. On peut l'expliquer par le rôle prépondérant de l'altération mécanique dans la formation des sédiments de ruisseaux.

La proportion de Cu et Zn organique est plus importante dans les sédiments de ruisseaux et c'est l'inverse pour le fer. Cette observation peut être expliquée par des conditions redox distinctes régnant dans les deux milieux. La réduction de Fe^{+3} en Fe^{+2} dans les sédiments et son lessivage entraîne un départ de Fe alors que la matière organique reste in situ (traduisant la corrélation négative entre Fe et C organique).

En résumé, l'enveloppe altérée de la roche magmatique est caractérisée par un envahissement progressif de l'altération à partir d'un milieu superficiel où règnent des conditions acides et oxydantes jusqu'à la roche saine où prévalent des conditions alcalines et réductrices. La nature des phases secondaires contenant les éléments en traces dépend évidemment de la composition minéralogique de la roche mère mais surtout, en ce qui concerne les phases issues de l'oxydation des sulfures, des conditions physico-chimiques Eh-pH du milieu d'oxydation ainsi que des paramètres mécaniques tels que la granularité et le degré de fracturation de la roche. Les caractères lithophyles, sidérophyles et chalcophyles des éléments vont conditionner leur distribution et leur affinité dans les processus d'altération climatique.

4.4. Essais de traitement minéralurgique

Des essais de concentration des minéraux de cuivre et molybdène contenus dans la roche ignée de la Helle ont été publiés par Cailteux (1974). L'essai a porté sur un kg de matière. Les analyses chimiques de Cailteux montrent que le minerai de la Helle (éch. MN 84) contient 0,18 % de cuivre et 0,03 % de molybdène. Ce minerai est difficile à flotter à cause des faibles teneurs en Cu et Mo. Des essais d'orientation de flottation différentielle ont été réalisés pour pouvoir concentrer séparément Mo et Cu. La séparation Mo-Cu se fait le plus favorablement pour :

Mo :

- contrôle du pH (\pm 10-11) par ajout de CaO (\pm 2000 g/t) ;
- un moussant comme l'huile de pin et MIBC (méthyl isobutyl carbinol) à raison de 100 g/t de minerai ;
- 250 g/t de FeNaCN pour déprimer la chalcopirite ;
- 1000 g/t de NaCN, agent déprimant de la chalcopirite et des sulfures de fer (pyrite, pyrrhotite, marcasite) ;
- éventuellement un déprimant de la gangue: Na_2SiO_3 ;
- le collecteur de la molybdénite est l'acide oléique et le fuel oil ;

Cu :

- contrôle du pH (\pm 6-6,5) par ajout d'acide sulfurique (5 %) ;
- un moussant comme l'huile de pin et MIBC (méthyl isobutyl carbinol) à raison de 50 g/t de minerai ;
- le collecteur de la chalcopirite est le KEX (Ethyl Xanthate de potassium) à raison de 50 g/t ;
- le réactivant de la chalcopirite est $CuSO_4$ à 1000 g/t. Il forme un cyanure de cuivre soluble et a donc une action favorable par destruction de l'effet déprimant.

Le résultat est l'obtention d'un rapport Mo/Cu de 9,4 dans le concentré. La récupération est de 66% de Mo. Le procédé utilisé dans l'étude semble satisfaisant pour l'auteur.

En réalité, au sien de l'intrusion, les teneurs en Cu et Mo varient fortement de place en place, mais une tendance générale est de trouver des teneurs plus élevées vers les bordures. Des analyses communiquées par l'Union Minière et effectuées sur des carottes de sondage de la campagne 1976-1977 ont donné : Cu : moyenne 0,17 % - extrema 0,01 %-0,45 % ; Mo : moyenne 0,01 % - extrema 0,001 %=0,097 %. Le minerai étudié par Cailteux (1974) était donc tout à fait représentatif de l'ensemble de la minéralisation.

DEUXIEME PARTIE : ETUDE DES SONDAGES

Quatre sondages ont été financés par l'Union Minière pour percer la masse intrusive de la Helle. Leur emplacement est précisé aux figures 4 et 5. Les sondages devaient permettre de répondre à plusieurs questions concernant notamment :

- la géométrie et l'origine de l'intrusion de la Helle (pointement d'un massif granitique qui s'évase en profondeur ou sill/laccolite détaché d'un pluton enfoui à grande profondeur) ;
- l'origine des sulfures de cuivre, de fer, de zinc et de molybdène parfois abondants dans des veinules de quartz qui lardent localement la roche ignée ;
- le potentiel économique des roches minéralisées.

Rappelons que Van Wambeke (1956b) avait émis l'hypothèse d'une minéralisation de type porphyre cuprifère à la Helle.

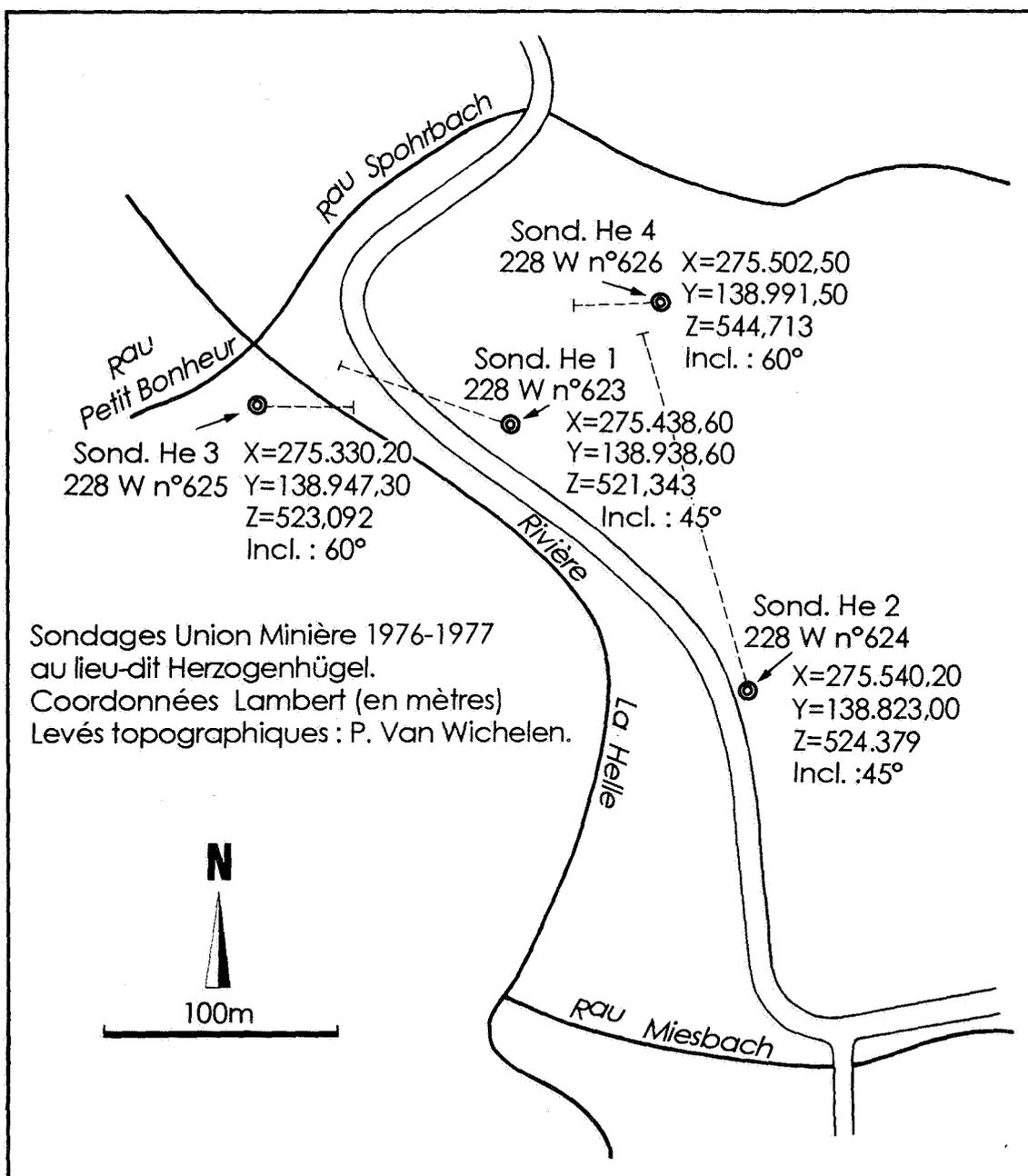


Figure 4. Plan de situation des sondages Union Minière - campagne 1976-1977 - au lieu-dit «Herzogenhügel».

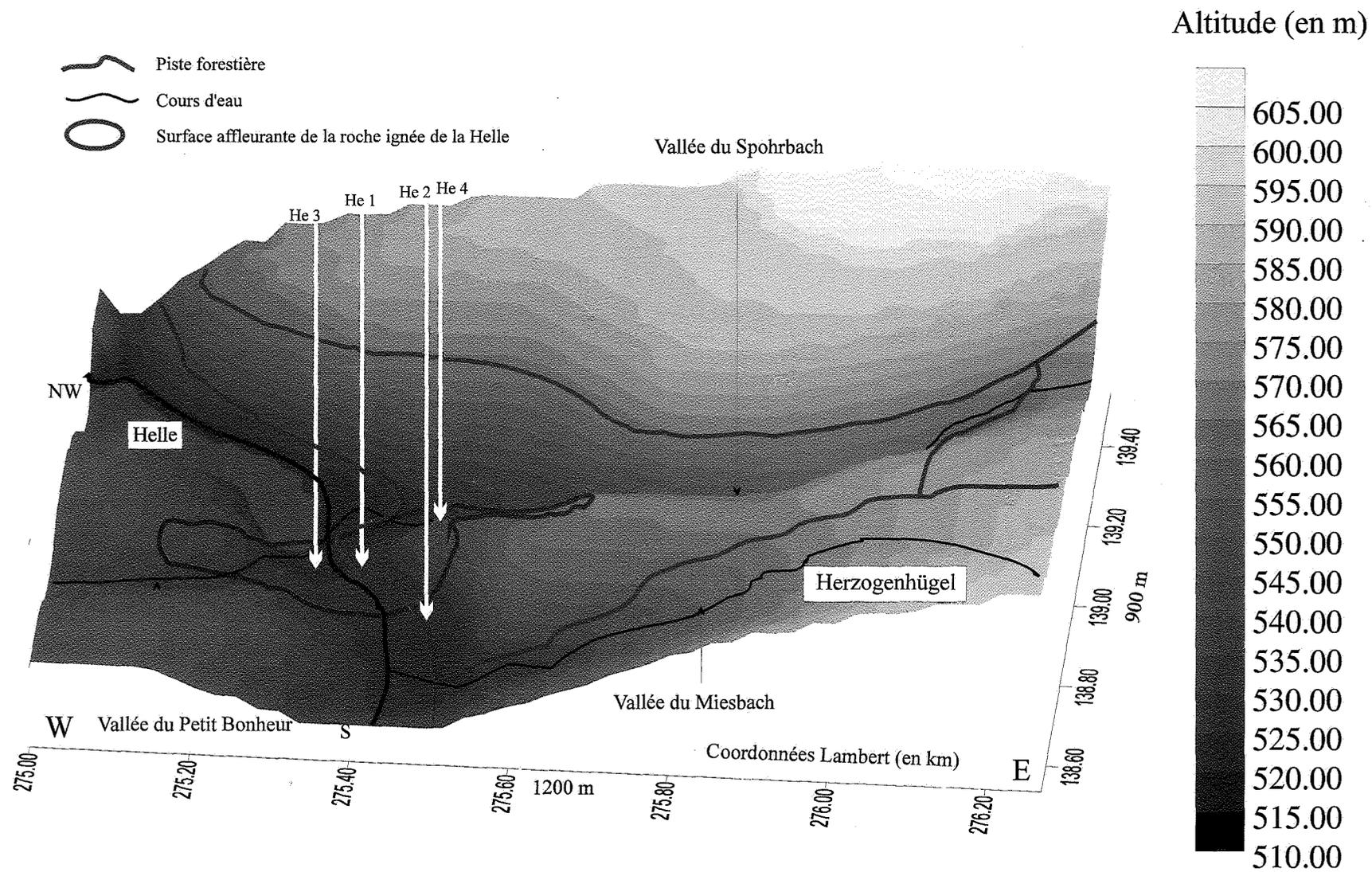


Figure 5. Topographie de la région de l'intrusion en vue tridimensionnelle, représentation du corps magmatique affleurant au lieu-dit Herzogenhügel et visualisation de la projection des quatre sondages sur la surface topographique.

SONDAGE 228 W 623

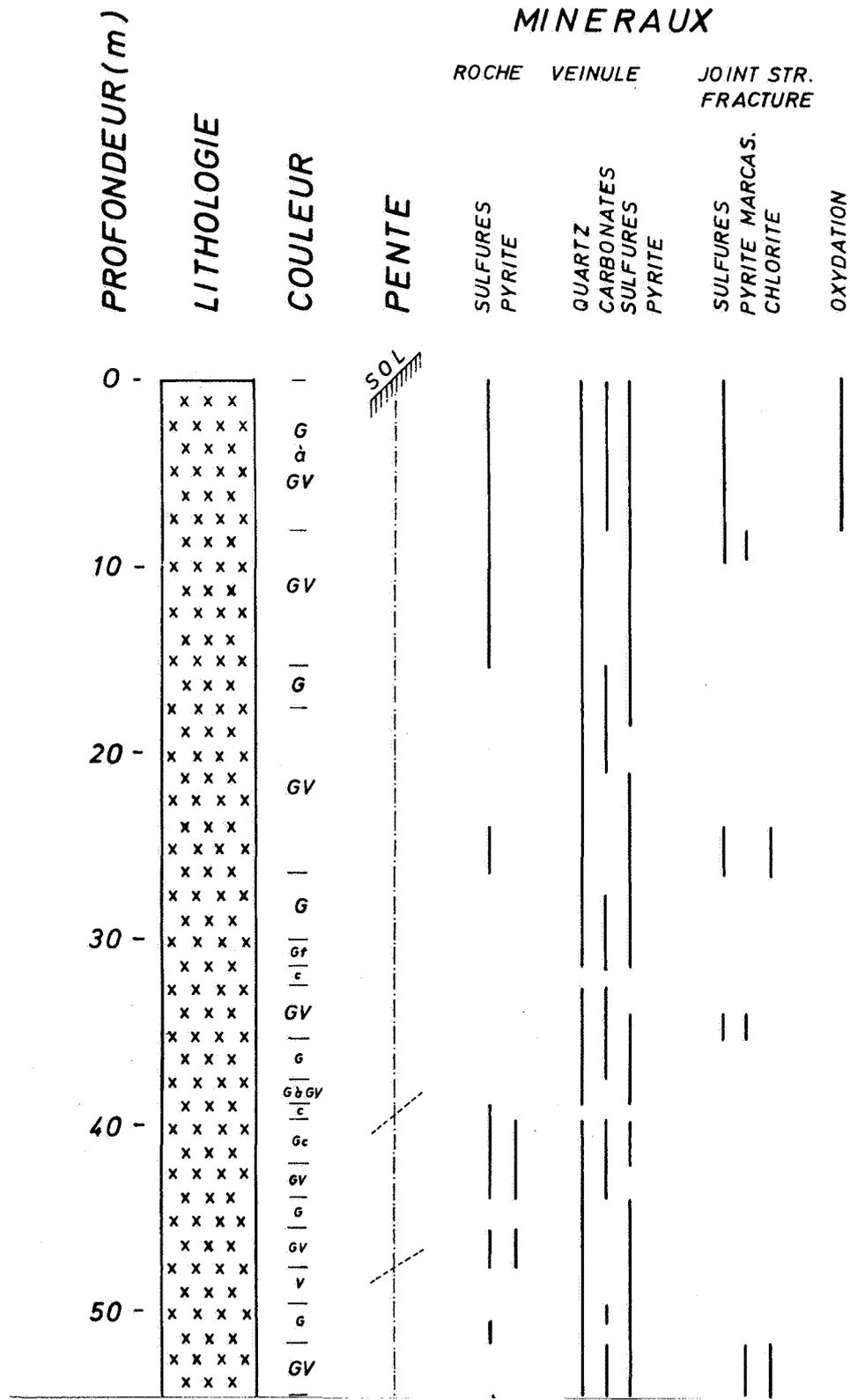


Figure 6a. Colonne lithologique du sondage He 1 (228W62).

1. DESCRIPTIONS MACROSCOPIQUES

Les quatre sondages désignés dans ce travail par He 1 à He 4 ont été repérés au Service géologique de Belgique sous les numéros 228W623 à 626. La colonne lithologique recoupée par chaque sondage est illustrée schématiquement dans les figures 6, 7, 8 et 9. Les pentes ont été mesurées sans tenir compte de l'inclinaison du forage. Pour le sondage He 1, les observations ont été effectuées par passes de forage successives. Pour les sondages He 2, He 3 et He 4, les observations sont consignées par zones possédant des caractéristiques lithologiques semblables. Le mot "grès" est employé dans un sens large par opposition au véritable quartzite à cassure esquilleuse. Néanmoins, cette appellation recouvre probablement certaines variétés de quartzite micacé ou d'arkose. Dans tous les cas, les grès semblaient toujours plus ou moins recristallisés. Lorsque cette recristallisation paraissait très importante, la roche a été désignée comme un quartzite grossièrement grenu. Il n'a pas toujours été possible de distinguer pyrite et marcasite lorsque le sulfure de fer se présentait en lamelles ou plaquettes dans les joints et les fractures. Néanmoins, chaque fois qu'une texture fibroradiée ou en véritable rosette a été observée, FeS₂ a été appelé marcasite. Les figurés des logs sont ceux utilisés traditionnellement (croix pour roche ignée, pointillé pour roche siliceuse, tireté pour roche argileuse). Les couleurs des logs sont abrégées comme suit : B = brun, Bl = blanc, J = jaune, G = gris, V = vert, N = noir, c = clair, f = foncé.

1.1. Description lithologique du sondage He 1 (228W623) - Figure 6

Longueur : 110,00 m - Inclinaison : 45° dans la direction N71°W.

Coordonnées Lambert :

X = 275.438,60 m

Y = 138.938,60 m

Z = 521,343 m

0,00 à 8,00 m : roche ignée grise à gris verdâtre, à mouchetures de sulfures. Quelques filonnets quartzo-carbonatés centimétriques à sulfures et chevelu de molybdénite. Le quartz des filonnets est souvent carié. Les feuilletts de molybdénite dans le quartz se prolongent également dans la roche ignée. La texture orientée (litée) provoquée par le placage de molybdénite dans les microjoints affectant la roche est parfois très bien marquée. Ces joints portent souvent des empreintes de stries de glissement. La roche est cohérente (macroscopiquement non altérée) mais diaclasée (fissures ouvertes à tapissage de produit brunâtre, principalement jusqu'à 4,20) parfois avec un peu de malachite (surtout de 1,40 à 1,60 m) et, exceptionnellement, des traces de cuivre natif.

8,00 à 9,50 m : roche ignée gris verdâtre à mouchetures de sulfures. Filonnets centimétriques de quartz à mouchetures de molybdénite à 8,20 m (ép. 1 cm) ; à 8,34 m (ép. 3cm) ; à 8,72 m (ép. 2 cm) ; à 8,91 m (ép. 3 cm). Tous ces filonnets ont la même orientation ($i=38^\circ$). Quelques fractures fermées à traces de molybdénite ou à pyrite et limonite. Ces fractures sont subparallèles à l'allongement de la carotte.

9,50 à 12,30 m : roche ignée gris verdâtre. Filonnets centimétriques de quartz à mouchetures de pyrite, molybdénite, chalcopryrite, à 9,61 m (ép. 0,5 cm) ; à 10,50 m (ép. 3 cm - décalé par une petite faille sur 10 cm) ; à 10,57 m (ép. 1 cm - sulfures abondants) ; à 10,67 m (ép. 1 cm - molybdénite), à 10,76 m (ép. <cm) ; à 10,86 m (ép. < cm) ; à 10,98 m (ép. < cm) ; à 11,09 m (ép. < cm) ; à 11,20 m (ép. < cm). Des cristaux verdâtres (probablement altération de feldspaths) s'individualisent dans la roche ignée de 10,50 à 10,94 m. Ils sont très abondants de 10,75 à 10,94 m. Vers 9,70 m, la roche prend une texture faiblement orientée (aspect de litage gneissique).

12,30 à 13,00 m : fissures à traces de glissement en début de passe. Roche ignée verdâtre. Filonnets centimétriques de quartz à molybdénite de 12,60 à 12,85 m.

13,00 à 13,40 m : roche ignée gris verdâtre. De 13,20 à 13,40 m, filonnets centimétriques de quartz, à mouchetures de chalcopryrite, disposés dans plusieurs directions.

13,40 à 15,40 m : roche ignée gris verdâtre, plus sombre que précédemment. De 14,48 à 14,70 m, 4 filonnets centimétriques de quartz, décalés par une petite faille. A 15,38 m, filonnet de quartz à molybdénite (ép. 1 cm).

15,40 à 17,50 m : roche ignée grisâtre à minéralisation dispersée nettement moins abondante que précédemment. Filonnets quartzeux centimétriques à 15,40 et 15,92 m. Abondance de ségrégations quartzueuses parfois accompagnées de calcite de 16,10 à 16,86 m et de 17,35 à 17,45 m.

17,50 à 17,80 m : roche ignée grisâtre. Petit filonnet de quartz à 17,95 m.

17,80 à 18,40 m : roche ignée gris verdâtre à cristaux verdâtres (feldspaths altérés ?). A 17,97 m, lacis quartzeux, parfois accompagné de calcite, à chevelu de molybdénite (?) et à chalcopyrite (localisée au centre des filonnets).

18,40 à 21,20 m : roche ignée gris verdâtre. Le lacis quartzeux s'arrête à 18,56 m. Filonnets de quartz à 19,00 m (avec sidérite) et de 19,50 à 19,70 m. De 20,00 à 20,70 m, zone à chevelu formé d'un minéral noirâtre (molybdénite ?), quartz et sidérite. En débris à partir de 20,70 m.

21,20 à 21,80 m : débris de roche ignée gris verdâtre à chevelu quartzeux.

21,80 à 23,10 m : roche ignée gris verdâtre. De 21,80 à 22,40 m, filonnets de quartz peu minéralisés. A 23,00 m, petits filonnets à sulfures apparemment sans quartz.

23,10 à 24,10 m : roche ignée gris verdâtre. A 23,50 m, filonnet centimétrique de quartz à sulfures (chalcopyrite) et calcite.

NB: depuis quelques mètres, le degré de minéralisation dans les fractures et filonnets semble diminuer notablement.

24,10 à 24,80 m : roche ignée gris verdâtre à texture orientée par la présence d'un chevelu noir avec sulfures dans les premiers décimètres ($i=25$ à 30°). Filonnets de quartz de 24,30 à 24,57 m et de 24,80 à 24,94 m, cariés vers 24,40 m.

24,80 à 26,60 m : roche ignée gris verdâtre très quartzeuse, à faible dissémination de sulfures de 25,26 à 25,74 m. Quelques filonnets de quartz avec sulfures à 24,90 m, 25,00 m, 25,10 m. A partir de 25,74, la roche ignée est nettement moins quartzeuse.

26,60 à 27,60 m : roche ignée gris verdâtre non minéralisée. A 27,20 m filonnet quartzeux centimétrique avec sulfures. De 27,20 à 27,60 m : ségrégations quartzieuses (ép. < cm) peu ou pas minéralisées, parfois décalées par une petite faille sur quelques cm.

27,60 à 30,00 m : roche ignée grisâtre. A 27,90 m, filonnet quartzeux d'épaisseur variable (ép. 1 à 2 cm), très légèrement minéralisé. Ailleurs, chevelu ou ségrégations quartzo-carbonatées à mouchetures de sulfures, souvent cariés.

30,00 à 30,50 m : roche ignée, par endroit gris foncé et finement grenue, ailleurs gris clair et grossièrement grenue. Nombreux filonnets et ségrégations quartzo-carbonatées avec sulfures, parfois très fortement cariés et certains, plusieurs fois décalés par un réseau de petites failles à rejet centimétrique.

30,50 à 31,60 m : roche gris foncé et finement grenue jusqu'à 31,20 m, claire et grossièrement grenue jusqu'à 31,60 m. Rares petits filonnets quartzeux (ép. = quelques mm.), parfois décalés par d'autres filonnets quartzo-carbonatés (ép. = quelques mm). De 30,20 à 30,40 m, les filonnets sont très fortement cariés. Présence de quelques veinules millimétriques à concentration de sulfures.

31,60 à 32,40 m : roche ignée gris verdâtre grossièrement grenue, fortement cariée à partir de 32,00 m. Fractures glissées à tapissage de sulfures dont molybdénite (porosité élevée).

32,40 à 33,90 m : roche ignée gris verdâtre à filonnets et ségrégations quartzieuses (ép. : du mm au cm), minéralisée à 33,30 m (dont molybdénite). A 33,85 m, une série de filonnets quartzo-carbonatés, plus ou moins cariés, recoupe à angle droit un filonnet quartzeux.

33,90 à 35,30 m : roche ignée gris verdâtre. A 34,60 m, filonnets quartzeux lenticulaires (ép. : 2 à 5 cm) contenant des feuilletés et mouchetures sulfurés (galène ?, pyrite). Ailleurs, on observe quelques filonnets quartzo-carbonatés, plus ou moins cariés, stériles. Joints glissés à tapissage de marcasite et molybdénite (ou graphite ?).

35,30 à 37,50 m : roche ignée grise. Rares filonnets quartzeux (ép. : mm) stériles, chevelu quartzo-carbonaté, et rares veinules millimétriques à concentration de sulfures (dont molybdénite).

37,50 à 38,80 m : roche ignée grise à gris verdâtre. A 37,60 m, 37,70 m, 38,50 m, filonnets quartzeux centimétriques à mouchetures de sulfures partiellement altérés (irrisation bleu verdâtre).

38,80 à 39,60 m : roche ignée claire, d'aspect faiblement lité (vague rubanement de zones plus feldspathiques et de zones plus quartzieuses [$i=45^\circ$]). Mouchetures sulfurées.

39,60 à 42,10 m : roche ignée gris clair à filonnets et ségrégations quartzeux et quartzo-carbonatés, faiblement minéralisés. Certains filonnets sont décalés par de petites failles sur quelques centimètres. A 40,40 m, texture subbréchique dans la roche ignée (matrice de roche ignée vert sombre ; éléments figurés millimétriques et centimétriques de quartz et roche ignée vert clair). A cet endroit, cubes et mouchetures de pyrite abondants.

42,10 à 43,80 m : roche ignée gris verdâtre. Quelques filonnets quartzo-carbonatés. Rares mouchetures de sulfures. De 43,15 à 43,20 m : brèche. Les contacts supérieurs et inférieurs de cette zone bréchique sont tranchés et à pente d'environ 20° . Les éléments figurés sont constitués de fragments hétérogranulaires (mm à plusieurs cm) de roche ignée et de quartz. La matrice est une roche gris sombre à noire. En outre, cette zone est pètrie de pyrite.

43,80 à 44,30 m : roche ignée gris verdâtre. A 44,10 m, filonnet quartzeux centimétrique minéralisé.

44,30 à 45,50 m : roche ignée grise. Rares filonnets centimétriques à concentration de sulfures.

45,50 à 47,70 m : de 45,50 à 46,20 m : roche ignée gris verdâtre à texture litée (texture orientée par la présence de niveaux feldspathiques clairs, blanc légèrement verdâtre, alternant avec des zones très verdâtres dans lesquelles s'individualisent des phénocristaux feldspathiques vert herbe ($i=35^\circ$ à 46,10)). De 46,20 à 46,25, zone à lacis quartzeux minéralisé. A 46,30 m, niveau bréchique lenticulaire (ép. : 1 à 2 cm), analogue à celui décrit de 43,15 à 43,20 m. Ce niveau bréchique est souligné par une semelle quartzeuse d'un cm d'épaisseur.

De 46,30 à 47,20 m : roche ignée gris verdâtre avec quelques mouchetures de sulfures et filonnets quartzeux millimétriques (dont un minéralisé à 46,35 m).

De 47,20 à 47,70 m : roche ignée claire à cristaux verdâtres (feldspaths altérés). Texture rubanée ($i=32^\circ$) marquée par des niveaux très riches en phénocristaux vert herbe, contenant en outre, des espèces d'enclaves homogènes gris clair, de taille nuculaire à pugilaire. A 47,30 m, on observe un filonnet quartzeux minéralisé. De 47,60 à 47,70 m, zone fortement minéralisée dans les ségrégations quartzieuses (galène, sphalérite, mouchetures pyriteuses). Galène et sphalérite ont été confirmées par rayons X (clichés Debye-Scherrer).

De 47,70 à 48,70 m : roche ignée verdâtre. Quelques filonnets quartzeux (ép max. : 1 cm) contenant parfois des mouchetures de sulfures. Parfois, ces filonnets sont décalés par de petites failles dans lesquelles se concentrent des minéraux de néoformation.

De 48,70 à 49,50 m : roche ignée verdâtre jusqu'à 49,20 m, ensuite gris blanc et grossièrement grenue. Filonnets quartzeux à 48,75 et 48,90 m (à cet endroit, avec concentration de sulfures).

De 49,50 à 50,50 m : roche ignée grise, grossièrement grenue. A partir de 50,30 m, abondance de ségrégations quartzieuses blanches à chevelu carbonaté jaunâtre. A 50,40 m, sulfures dans le quartz.

De 50,50 à 51,70 m : roche ignée grise contenant de rares mouchetures de sulfures. De 50,50 à 50,90 m, abondance de ségrégations quartzieuses, renfermant quelques mouchetures de sulfures et, en outre, parfois décalées par des petites failles.

De 51,70 à 54,40 m : roche ignée gris verdâtre, à texture grossièrement grenue à partir de 54,00 m. A 52,42 m, filonnet quartzeux (ép. 3 cm) frangé de sulfures au toit. A partir de 53,70 m, les ségrégations quartzieuses à chevelu carbonaté et concentration de sulfures augmentent. Joints glissés à tapissage de produits verdâtres et de marcasite.

De 54,40 à 54,70 m : roche ignée grise, grossièrement grenue, avec mouchetures sulfurées disséminées dans la masse.

De 54,70 à 55,70 m : roche ignée grise, grossièrement grenue, à fins filonnets quartzeux et chevelu carbonaté jaunâtre. A partir de 55,40 m, ces filonnets s'épaississent (ép. max. 1 cm), deviennent plus abondants et sont accompagnés de sulfures.

De 55,70 à 56,70 m : roche ignée gris verdâtre, grossièrement grenue, à filonnets quartzeux abondants, parfois accompagnés de carbonate jaunâtre et de rares mouchetures de sulfures.

De 56,70 à 57,60 m : roche ignée grise, grossièrement grenue. Filonnets et ségrégations quartzeux, centimétriques, parcourus d'un chevelu carbonaté jaunâtre avec de rares mouchetures de sulfures.

De 57,60 à 57,80 m : idem avec sulfures dans les ségrégations quartzes.

De 57,80 à 59,30 m : roche ignée claire. Filonnets et ségrégations quartzes (ép. max: 1 cm), parcourus par un chevelu carbonaté (parfois carié) et renfermant une abondance de sulfures de 57,80 à 58,20 m et de 58,90 à 59,10 m.

De 59,30 à 60,80 m : roche ignée grise, à tendance grossièrement grenue. Ségrégations quartzes minéralisées de 59,60 à 59,80 m. A 60,00 m, présence d'une enclave homogène de 2 cm de diamètre, de couleur gris sombre et de nature phylliteuse, dont une partie du pourtour est circulaire et l'autre rectangulaire.

De 60,80 à 62,00 m : roche ignée gris clair grossièrement grenue. A 61,00 m, 61,10 m, 61,30 à 61,35 m et 61,70 m, ségrégations quartzes et filonnets (ép. max : 2cm) à mouchetures de sulfures (galène, chalcopryrite, pyrrhotite ou sphalérite ?). Chevelu carbonaté abondant de 61,80 à 61,90 m.

De 62,00 à 63,80 m : roche ignée gris verdâtre renfermant de 62,20 à 62,30 m et de 62,35 à 62,40 m des inclusions lenticulaires centimétriques de même texture mais de couleur grise (sortes d'enclaves homogènes). Localement, roche à texture orientée par des nuances de coloration : teintes plus grises ou moins verdâtres ($i=45^\circ$; direction variable). Mouchetures sulfurées également présentes dans la roche ignée. Filonnets et ségrégations quartzes, minéralisés et, de 63,30 à 63,50 m, accompagnés d'un important composé carbonaté jaunâtre.

De 63,80 à 64,20 m : roche ignée gris verdâtre.

De 64,20 à 66,60 m : minéralisation abondante. Mouchetures de sulfures et chevelu noir (molybdénite ?) rubanant la roche. Dans les zones claires, abondantes ségrégations quartzes avec composant carbonaté très fortement carié. De 65,90 à 66,00 m : zone très quartzes à sulfures et chevelu de molybdénite, du type «filon concordant» ($i=35^\circ$). Le contact avec les épontes est tranché. Ces dernières ont une texture litée, parallèle au contact.

De 66,60 à 67,20 m : roche ignée très claire, très finement grenue et légèrement verdâtre avec des ségrégations et veinules quartzes plus ou moins cariées. Mouchetures sulfurées et chevelu de molybdénite. Nombreux joints glissés. Roche en débris.

De 67,20 à 68,80 m : de 67,20 à 67,80 m : roche blanche (probablement essentiellement feldspathique) très finement grenue (aplite) renfermant quelques inclusions (ségrégations ou enclaves ?) allongées de roche ignée. Feuilletés de molybdénite ou galène parallèles à l'allongement de ces inclusions de roche ignée ($i=60^\circ$). Mouchetures de sulfures régulièrement réparties dans toute cette zone. De 67,80 à 68,80 m : roche ignée grise à gris verdâtre, sombre. Nombreux filonnets quartzes (ép. max. : 3 cm) à composant carbonaté jaunâtre, parfois carié et à concentration de sulfures. Certains filonnets sont plissés et cette texture est soulignée par la cristallisation du quartz. En fin de passe : roche en débris.

De 68,80 à 69,90 m : la nouvelle passe commence directement dans des phyllades gris foncé, alternant avec des petits bancs de quartzite gris clair. Les bancs de quartzite sont parfois très fracturés, aussi bien parallèlement que transversalement à la stratification et sont alors entrelardés de phyllades. Epaisseur des bancs de quartzite : cm à dm, pendage : $i=40^\circ$. A cause de la fracturation, le contact roche ignée et série quartzophylladeuse n'est pas bien visible. Néanmoins, en reconstituant la carotte de sondage à partir des débris, on peut mesurer une pente de 40° au contact des deux formations. Précisons encore que les roches voisines du contact ne sont pas altérées macroscopiquement (roche fracturée, mais cohérente) ni plus glissées qu'ailleurs. Filonnets quartzes très abondants, principalement localisés dans les zones quartzitiques. Les épontes de ces filonnets sont souvent minéralisées (galène ? molybdénite ?). Mouchetures de pyrite abondantes de 69,65 à 69,75 m et, en général, principalement localisées dans les bancs de quartzite. Rosettes de marcasite sur certaines strates.

De 69,90 à 70,10 m : quartzite gris veinulé de quartz blanc.

De 70,10 à 70,20 m : idem avec petits cubes de pyrite (millimétriques). Filonnets de quartz très abondants, épais de 5 cm maximum, parfois géodiques et, à ces endroits, cristaux à faces cristallines bien développées. A 70,15 m : un filonnet dont le centre est minéralisé.

De 70,20 à 71,70 m : de 70,20 à 70,45 m : quartzite gris veinulé de quartz blanc. De 70,45 à 70,50 m : roche verdâtre, sombre, à points noirs (probablement, schiste tacheté ; pendage $i=45^\circ$). De 70,50 à 70,52 m : quartzite gris. De 70,52 à 70,72 m : zone blanchâtre : roche quartzitique ou quartzo-feldspathique à mouchetures et cubes pyriteux très abondants ainsi que grosses tâches sombres aux contours diffus (zones argileuses partiellement assimilées ?).

De 70,52 à 70,87 m : quartzite gris à mouchetures, cubes (millimétriques) et feuillets pyriteux passant brutalement (pente de contact : $i=30^\circ$) à un schiste tacheté verdâtre sombre, straticulé de feuillets sombres. De 70,87 à 71,50 m : roche blanche, avec des zones aux reflets verdâtres, de nature probablement quartzo-feldspathique. Cette roche est parsemée de traînées grises aux contours diffus (zones schisteuses partiellement assimilées ?). Mouchetures et cubes (millimétriques) pyriteux très abondants. De 71,50 à 71,55 m : quartzophyllade très finement litée (pendage $i=35^\circ$). De 71,55 à 71,70 m : quartzite gris. Sur toute la passe, les joints phylladeux sont glissés.

De 71,70 à 72,60 m : roche quartzo-feldspathique caractérisée par d'abondantes «marbrures» gris clair à gris foncé. Mouchetures, cubes et octaèdres (sections hexagonales atteignant 5 mm) pyriteux régulièrement disséminés sur toute la passe. Présence de plusieurs enclaves enallogènes lenticulaires (ép. max : 1 cm), verdâtres à rubanements grisâtres et brunâtres (enclaves de schiste tacheté ?). Localement, la roche quartzo-feldspathique a elle-même une texture rubanée (pente moyenne $i=30^\circ$).

De 72,60 à 72,70 m : idem.

De 72,70 à 73,20 m : de 72,70 à 72,78 m : schiste tacheté (verdâtre à taches gris sombre). Contact planaire avec la roche sus-jacente (pente $i=60^\circ$) mais légèrement «en escalier» (contact décalé par de petites failles suborthogonales à l'allongement des carottes). De 72,78 à 72,80 m : quartzite (pendage $i=55^\circ$). De 72,80 à 73,10 m : schiste tacheté. La structure orientée est constituée par les taches dont l'allongement est ici parallèle au pendage. De 73,10 à 73,20 m : roche quartzo-feldspathique blanche, à nuances verdâtres, parsemée de nombreuses mouchetures et cubes de pyrite. Sur toute la passe, les joints phylladeux sont glissés et à tapissage de marcasite.

De 73,20 à 73,70 m : quartzophyllade gris foncé (pendage $i=60^\circ$), avec strates lenticulaires quartzitiques (ép. max : 2 à 3 cm) parfois cisailés par de petites failles. Dans les fissures, quelques mouchetures et cubes de pyrite accompagnés parfois d'autres sulfures.

De 73,70 à 74,30 m : idem. De 74,55 à 74,60 m : zone quartzo-feldspathique à rubanement pyriteux très abondant (mouchetures et cubes).

De 74,80 à 75,60 m : de 74,80 à 75,20 m : quartzite gris clair à lakis de quartz localement corrodé. De 75,20 à 75,60 m : débris de quartzite mélangés à des fragments de roche ignée (roche gris verdâtre à phénocristaux feldspathiques jaune verdâtre).

De 75,60 à 77,20 m : de 75,60 à 75,90 m : roche ignée à texture à tendance porphyrique (mésostase microgrenue grisâtre à phénocristaux verdâtres). De 75,90 à 76,85 m : roche ignée à texture porphyrique très bien marquée (abondance de phénocristaux blanchâtres de quelques millimètres de côté compris dans une mésostase microgrenue gris verdâtre). Rares filonnets quartzeux plus ou moins cariés. Quelques mouchetures de sulfures apparaissent ici et là. A 76,85 m : contact roche ignée - roche sédimentaire selon une surface irrégulière à pente moyenne de 35° . De 76,85 à 76,87 m : schiste gris brunâtre. De 76,87 à 76,97 m : quartzite gris abondamment veinulé de quartz blanc. Rares mouchetures de sulfures. De 76,97 à 77,02 m : schiste gris brunâtre. Le contact avec la roche surincombante est légèrement faillé (pendage $i=45^\circ$). De 77,02 à 77,20 m : roche très fracturée. Débris de quartzophyllade et quartzite gris (abondamment veinulé de quartz blanc) dans lesquels réapparaissent des débris de roche ignée à texture porphyrique.

De 77,20 à 78,20 m : de 77,20 à 77,45 m : roche ignée blanc verdâtre, localement finement grenue (texture aplitique) et à d'autres endroits, à texture porphyrique. Mouchetures de minéraux noirs. De 77,45 à 77,90 m :

roche ignée à texture porphyrique (phénocristaux blancs de quelques millimètres compris dans une mésostase grise). La variation de texture et de couleur avec la roche surincombante est tranchée et s'effectue selon une surface de pente d'environ 50°. Joints glissés tapissés de rosettes de marcasite. Ségrégations quartzzeuses accompagnées de minéraux gris verdâtres sombres (chlorite ?, épidote ?).

A 77,90 m : nombreux débris de quartz. De 77,90 à 78,10 m : roche ignée complètement altérée, réduite à des composants argileux.

Le contact roche ignée - quartzite sous-jacent se situe à 78,10 m selon une pente de 60°. De 78,10 à 78,20 m : quartzite gris foncé.

De 78,20 à 79,10 m : de 78,20 à 78,35 m : intercalations filandreuses (ép. max. : 1 cm) de schiste tacheté brun dans quartzite gris à filonnets quartzzeux et gros cubes de pyrite (certains atteignent 6 mm), pendage $i=60^\circ$. De 78,35 à 78,55 m : schiste tacheté brun clair à brun verdâtre légèrement cisailé par des petites failles (rejet centimétrique). Pendage: $i=50^\circ$. De 78,55 à 78,80 m : quartzite gris. Joints argileux glissés à enduit verdâtre (chlorite ?) et rosettes de marcasite. De 78,80 à 79,05 m : alternance de quartzite et de schiste tacheté brunâtre (pendage : $i=45^\circ$). Mouchetures de pyrite, et parfois placage de molybdénite. De 79,05 à 79,10 m : quartzite gris.

De 79,10 à 79,70 m : alternance de quartzite gris et de schiste tacheté. Filonnets de quartz (ép. max. : 3 cm). Quelques mouchetures et cubes de pyrite.

De 79,70 à 80,50 m : alternances centimétriques à décimétriques de quartzite gris clair, veinulé de quartz et de schiste tacheté. Zones à roche cohérente mais tectonisée (bancs cisailés et déplacés ; fourrures biseautées de schiste tacheté). Linéaments vert sombre (chlorite ou épidote ?).

De 80,50 à 80,80 m : idem (pendage : $i=50^\circ$). Ségrégations quartzzeuses dans quartzite. A 80,65 m, fissure de quartz (ép. 3 cm) plissée (ou décalée ?) en chevrons.

De 80,80 à 82,00 m : de 80,80 à 81,00 m : quartzite gris clair à filonnets de quartz blanc (ép. mm). Rares cubes de pyrite (taille max. : 3 mm de côté). De 81,00 à 82,00 m : alternances décimétriques de schiste tacheté brunâtre et de quartzite gris avec filonnets de quartz blanc ainsi que mouchetures et cubes de pyrite. Pendage $i=45^\circ$.

De 82,00 à 84,50 m : idem. Le quartzite est parfois straticulé par un chevelu gris sombre, traversant les filonnets de quartz mais, néanmoins, parallèle à la stratification (pendage : $i=60^\circ$). Nombreuses petites failles déplaçant les couches de quelques cm. De 84,00 à 84,50 m : roche en débris, avec des passages schisteux très altérés (kaolin ?) et, à ces endroits, nombreuses mouchetures pyriteuses.

De 84,50 à 85,10 m : alternances de quartzite gris veinulé à quartz blanc et de schiste tacheté brunâtre (pendage $i=45^\circ$). Zones à fractures décalées et ressoudées. Mouchetures et cubes de pyrite dans quartzite.

De 85,10 à 86,60 m : de 85,10 à 85,15 m : quartzite argileux à mouchetures pyriteuses abondantes. De 85,15 à 86,60 m : alternance de quartzite argileux et de schiste tacheté. En outre, de 86,20 à 86,50 m, la roche est traversée par des filonnets quartzo-feldspathiques (couleur gris blanc à gris légèrement verdâtre), bourrés de petits cubes de pyrite et veinulés en sens divers par un fin chevelu gris sombre.

De 86,60 à 88,20 m : de 86,60 à 88,50 m : quartzite gris. Quelques veinules de quartz blanc avec mouchetures pyriteuses. De 88,50 à 90,20 m : schiste gris à gris brun, légèrement tacheté, à tendance gréseuse, renfermant des intercalations quartzitiques centimétriques (pendage $i=40^\circ$). Concentration de mouchetures et de petits cubes de pyrite dans certaines strates.

De 88,20 à 90,20 m : de 88,20 à 88,50 m : quartzite gris. Quelques veinules de quartz blanc avec mouchetures pyriteuses. De 88,50 à 90,20 m : schiste gris à gris brun, légèrement tacheté, à tendance gréseuse, renfermant des intercalations quartzitiques centimétriques (pendage $i=40^\circ$). Concentration de mouchetures et de petits cubes de pyrite dans certaines strates.

De 90,20 à 91,20 m : de 90,20 à 91,00 m : schiste gréseux, gris. Rares veinules de quartz avec pyrite. De 91,00 à 91,20 m : quartzite gris clair à nombreuses veinules et ségrégations quartzzeuses. Minéral brunâtre dans quartz. Rares mouchetures et cubes de pyrite.

De 91,20 à 91,80 m : quartzite gris clair à filonnets et ségrégations de quartz blanc, renfermant de rares cristaux d'un minéral brun ne réagissant pas à l'acide. En début de passe : deux strates (ép. 3 cm) de schiste tacheté brun légèrement verdâtre.

De 91,80 à 92,50 m : quartzite gris clair. Filonnets de quartz blanc avec concentration de pyrite.

De 92,50 à 93,10 m : lacune.

De 93,10 à 93,30 m : débris de quartzite avec des nodules pyriteux d'aspect cellulaire et de taille nuclaire.

De 93,30 à 93,90 m : débris de quartzite gris clair veinulé de quartz blanc.

De 93,90 à 94,10 m : roche en menus débris (principalement, quartzite gris veinulé de quartz blanc, mélangé à des débris de schiste tacheté brunâtre).

De 94,50 à 95,10 m : de 94,50 à 94,55 m : schiste tacheté brun (pente $i=45^\circ$). De 94,55 à 95,10 m : quartzite gris clair fortement veinulé de quartz gris blanc avec mouchetures pyriteuses et minéral gris verdâtre (chlorite?, épidote?). Roche très fracturée.

De 95,10 à 95,50 m : roche très fragmentée. Débris de quartzite gris clair à veinules et ségrégations de quartz. Quelques débris de schistes tachetés bruns. A 95,15 m : strate millimétrique brunâtre d'aspect «slumpé».

De 95,50 à 95,90 m : quartzite gris clair veinulé de quartz blanc. Cubes pyriteux, millimétriques.

De 95,90 à 96,30 m : quartzite gris clair.

De 96,60 à 96,70 m : quartzite gris clair veinulé de quartz blanc. Rares cubes millimétriques de pyrite.

De 96,70 à 97,30 m : schiste gréseux, tacheté, gris brun. Pente $i=25^\circ$. Veinules de quartz avec pyrite.

De 97,30 à 99,30 m : de 97,30 à 99,00 m : quartzite gris clair. Quelques strates centimétriques de schiste tacheté brun clair (pendage $i=30^\circ$). Quelques veinules de quartz blanc avec pyrite. De 99,00 à 99,30 m : roche quartzophylladeuse à chevelu gris sombre. Strates et lentilles quartzitiques. Plusieurs zones plissotées. A 99,20 m : surface axiale plus ou moins orthogonale à l'allongement de la carotte. Placage pyriteux abondant dans les fissures.

De 99,30 à 99,80 m : de 99,30 à 99,60 m : quartzophyllade. Sur les dix premiers centimètres : allure redressée et plissotée en chevrons. A cet endroit, abondance de mouchetures de pyrite en dissémination dans la roche et également en concentration dans les filonnets quartzeux. De 99,60 à 99,70 m : quartzite gris clair. De 99,70 à 99,80 m : quartzophyllade. Pendage $i=25^\circ$.

De 99,80 à 100,40 m : alternance de quartzite gris clair, localement finement straticulé (pendage $i=30^\circ$). De 101,30 à 101,45 m : schiste tacheté brun.

De 101,45 à 102,50 m : quartzite gris à veinules de quartz blanc. Plus argileux et altéré de 101,80 à 102,00 m. Nombreuses mouchetures et cubes pyriteux (2 à 3 mm) distribués de 102,30 à 102,40 m.

De 102,50 à 107,00 m : quartzite gris clair veinulé de quartz blanc.

De 107,00 à 108,00 m : de 107,00 à 107,40 m : idem. Placages pyriteux dans les fissures. De 107,40 à 108,00 m : schiste tacheté brunâtre à grisâtre avec quelques strates quartzitiques.

De 108,00 à 109,60 m : alternances centimétriques à décimétriques de schiste gris à chevelu noir et de quartzite. De 109,50 à 109,60 m : concentration de pyrite dans les fissures.

De 109,60 à 110,00 m : idem. Concentration de pyrite dans certaines fissures. Base du sondage à 110,00 m.

SONDAGE 228 W 624

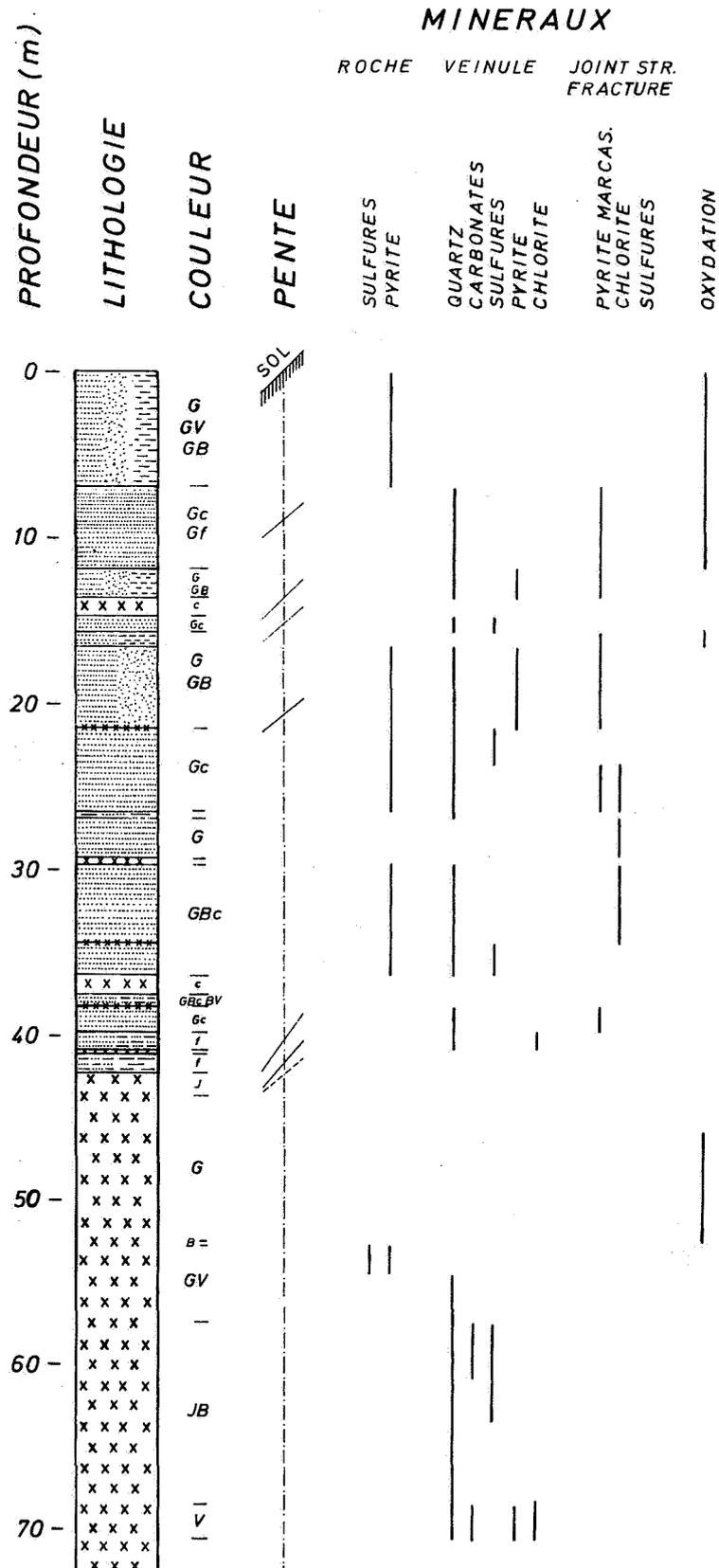


Figure 7a. Colonne lithologique du sondage He 2 (228W624).

SONDAGE 228 W 624

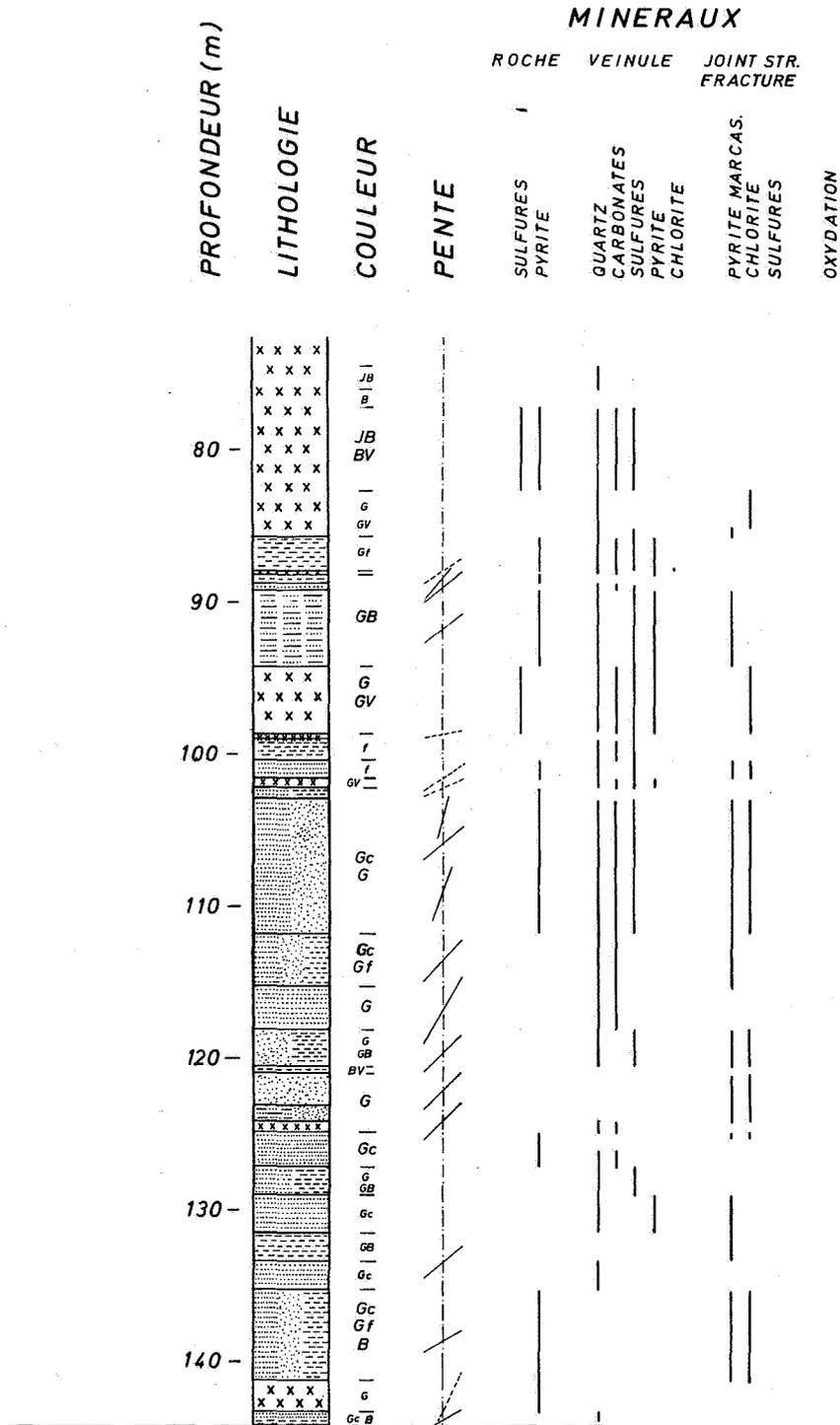


Figure 7b. Colonne lithologique du sondage He 2 (228W624).

SONDAGE 228 W 624

MINERAUX

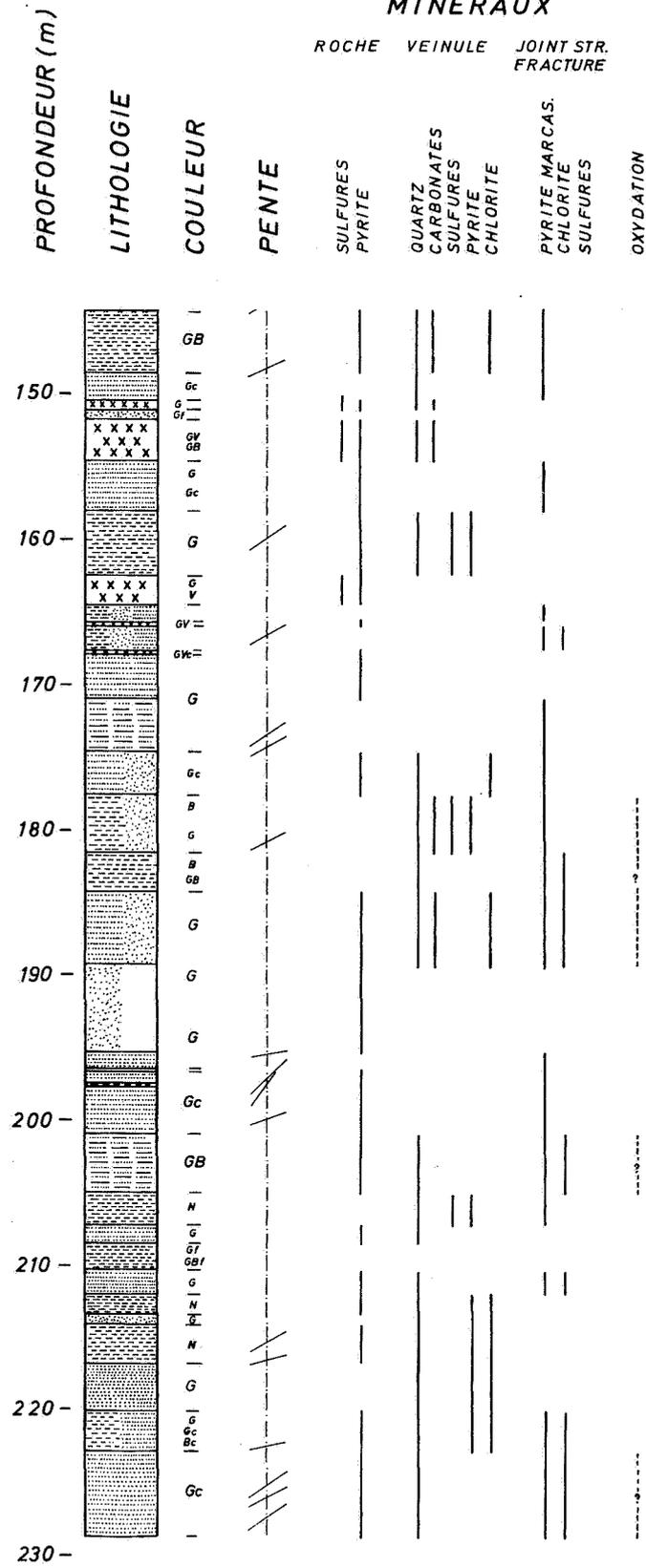


Figure 7c. Colonne lithologique du sondage He 2 (228W624).

1.2. Description lithologique du sondage He 2 (228W624) - Figure 7

Longueur: 228,80 m - Inclinaison: 45° dans la direction N16°W.

Coordonnées Lambert :

X = 275.540,20 m

Y = 138.823,00 m

Z = 524,379 m

De 0,00 à 3,30 m : débris de roche de natures diverses, emballés dans une terre brunâtre. Parmi les débris de roche, on distingue : quartzite gris et gris verdâtre, parfois avec cubes millimétriques de pyrite ; grès argileux gris à gris brunâtre légèrement micacé ; grès à pigment ferrifère ; quartz. Enduit limoniteux sur les fractures, parfois avec pigment rouge écarlate (hématite). Interprétation probable : remblai de carrière.

De 3,30 à 4,00 m : idem, mais certains fragments rocheux présentent des contours émoussés, voire roulés. Néanmoins, la plupart des débris offrent un contour anguleux. Interprétation probable : remblai de carrière.

De 4,00 à 6,20 m : débris de roches de toutes tailles, emballés dans une argile brun ocre. Parmi les débris de roche, on distingue : grès plus ou moins argileux, plus ou moins micacé, parfois à pigment limoniteux, souvent bordé d'une auréole d'altération rougeâtre ; phyllade décoloré à pigment hématitique, veinulé de quartz tapissé d'un produit limoniteux ; quartzite gris renfermant quelques cubes millimétriques de pyrite, parfois complètement oxydés et entourés d'une auréole rougeâtre ; petits cailloutis quartzeux. Contours parfois émoussés. Interprétation probable : remblai de carrière constitué principalement de roche abattue lors de l'exploitation et, accessoirement, peut-être d'alluvions de la Helle (débris émoussés, petits cailloutis).

De 6,20 à 6,80 m : sable gris brunâtre, renfermant quelques débris de roches analogues à celles décrites précédemment. Interprétation probable : alluvions de la Helle.

De 6,80 à 11,80 m : débris de roches. Quartzite gris clair, gris brunâtre ou gris foncé, veinulé de quartz, parfois micacé ou straticulé (pendage $i=40^\circ$). Enduit limoniteux en grande quantité sur les fractures mais, parfois, des plaquettes et des cubes de pyrite subsistent dans ces fractures.

De 11,80 à 13,60 m : débris de roches, parmi lesquels on rencontre : quartzite gris, parfois finement straticulé (pendage $i=44^\circ$), veinulé de quartz (ce dernier, parfois, chargé d'un fin chevelu noirâtre et de mouchetures pyriteuses) ; grès argileux, brunâtre, parfois micacé ; schiste gris et brunâtre maculé de quelques taches sombres (schiste tacheté ?). Quelques débris montrent des alternances de schiste tacheté et de quartzite. Rares enduits pyriteux sur les fractures.

De 13,60 à 14,70 m : roche claire, non cohérente, résultant de l'altération d'une roche ignée (arène). Pas de contact visible, mais la roche surmontant immédiatement cette arène est un grès à pendage de 45°.

De 14,70 à 15,50 m : roche localement en débris. Quartzite gris clair, par places, finement straticulé (pendage $i=45^\circ$) à veinules et corps informes de quartz. Des feuillettes pelliculaires noirâtres (molybdénite ?) recourent les filonnets quartzeux. Très rares mouchetures de sulfures.

De 15,50 à 16,50 m : roche en débris. Mélange de quartzite gris et de schiste gris brun. Enduit pyriteux sur joints. Limonite sur joints et fractures.

De 16,50 à 19,80 m : roche en débris. Quartzite gris veinulé de quartz; grès argileux micacé gris brunâtre ; passages schisteux. Plaquettes de pyrite et enduits limoniteux sur joints et fractures. Rem. : vers 19,00 m, on trouve quelques débris de roche ignée très altérée. Ceux-ci ne sont peut-être pas en place (tombés dans le trou de forage ?).

De 19,80 à 21,40 m : roche localement en débris. Quartzite gris par places finement straticulé (pendage : $i=40^\circ$). Passages de grès argileux, micacé, gris brunâtre. Parfois, pyrite en cubes isolés, éventuellement imparfaitement formés (quelques mm à 0,5 cm de côté), ou en nids allongés parallèlement à la stratification. Enduits lamellaires de marcasite sur certains joints. Quelques filonnets quartzeux à mouchetures pyriteuses.

De 21,40 à 21,50 m : arène de roche ignée.

De 21,50 à 21,70 m : débris de quartzite et de schiste pourri.

De 21,70 à 23,50 m : grès quartzitique, plus ou moins argileux, avec quelques cubes millimétriques de pyrite. Parfois, la roche présente une texture subnoduleuse (zones plus quartzieuses comprises dans une matrice plus argileuse). Rares veinules de quartz, millimétriques, à mouchetures de sulfures.

De 23,50 à 24,20 m : quartzite gris clair veinulé de quartz. Très rares cubes de pyrite. Enduits lamellaires et mouchetures de pyrite dans les fractures. Rares feuillettes noirâtres (chlorite ? molybdénite ?).

De 24,20 à 26,50 m : roche en menus débris jusqu'à 25,10 m. Grès quartzitique, légèrement argileux (zones sombres aux limites floues), avec quelques veinules de quartz. Vers 24,90 m, quelques débris de quartzophyllade, puis quartzite gris clair, parfois légèrement brunâtre, renfermant des cubes millimétriques de pyrite et de nombreuses veinules de quartz blanc. Feuillettes sombres (chlorite ?) dirigés en sens divers.

De 26,50 à 26,90 m : quartzophyllade. A 26,70 m, veinule centimétrique de quartz, plissotée.

De 26,90 à 29,30 m : roche en débris. Quartzite à linéaments et mouchetures sombres (chlorite ?). Quelques strates phylladeuses. La roche est parfois décolorée le long de certaines fractures.

De 29,30 à 29,70 m : arène de roche ignée.

De 29,70 à 34,30 m : roche en débris. Quartzite gris brunâtre, clair, rarement foncé, veinulé de quartz à linéaments et mouchetures chloriteuses (?). Très rares cubes de pyrite (taille inférieure au mm).

De 34,30 à 34,40 m : arène de roche ignée.

De 34,40 à 36,40 m : quartzite gris brunâtre, clair. Petits cubes de pyrite (taille inférieure au mm), disséminés dans la roche. Quelques veinules de quartz blanc dont, une, à 36,30 m, centimétrique, minéralisée (mouchetures de galène, sphalérite, pyrite).

De 36,40 à 37,60 m : arène de roche ignée. Certains gros fragments permettent d'observer une texture porphyrique (phénocristaux feldspathiques de plusieurs mm de grandeur).

De 37,60 à 38,35 m : roche en menus débris. Quartzite gris brunâtre, clair et quartzophyllade brun verdâtre.

De 38,35 à 38,50 m : arène de roche ignée claire à texture porphyrique (phénocristaux feldspathiques subautomorphes de plusieurs mm de grandeur, compris dans une mésostase très légèrement verdâtre).

De 38,50 à 39,80 m : quartzite gris clair à feuillettes noirâtres. Veinules de quartz blanc non minéralisées. Enduit pelliculaire de FeS_2 sur les fractures.

De 39,80 à 40,90 m : roche en débris. Quartzite sombre et quartzophyllade (pendage: $i=55^\circ$). Enduits de FeS_2 sur les fractures. Veinules de quartz blanc, non minéralisées, mais certaines sont légèrement cariées.

De 40,90 à 41,15 m : arène de roche ignée.

De 41,15 à 42,30 m : quartzophyllade sombre (pendage: $i=50^\circ$) et phyllade sombre (gris verdâtre) à lentilles quartzitiques.

De 42,30 à 43,70 m : roche en débris. Roche ignée, jaunâtre, très fortement altérée, avec des passages arénitiques. Le contact entre roche ignée et quartzophyllade sus-jacent n'est pas net car la roche est fragmentée. En rassemblant les débris, la pente du contact peut être estimée à 40° .

De 43,70 à 46,70 m : sable d'altération de roche ignée (petits grains feldspathiques encore visibles), très fin, de couleur grisâtre. Mouchetures de limonite à partir de 45,70 m. Interprétation possible : faille, probablement avec circulation d'eau suffisamment importante pour avoir fait disparaître les minéraux phylliteux.

De 46,70 à 47,00 m : roche ignée très fortement altérée à tendance arénitique. (La carotte de forage a cependant gardé un contour cylindrique). Rem. : à 46,70 m, présence d'un morceau de quartzite reforé dans plusieurs directions, probablement tombé de la partie supérieure du forage.

De 47,00 à 52,50 m : sable fin, d'altération de roche ignée, pétri de mouchetures de limonite.

De 52,50 à 52,70 m : roche ignée à texture grenue formée de cristaux de couleurs très différentes : on distingue des cristaux blancs (quartz), verdâtre clair, gris foncé, brun rougeâtre, mais la roche présente une couleur dominante brune très caractéristique.

De 52,70 à 54,40 m : roche ignée à texture grenue. Présence de cristaux millimétriques clairs (jaune verdâtre) et sombres (grisâtres). A 54,30 m, zone centimétrique, lenticulaire (épaisseur maximum : 2 cm), à contours flous, de coloration gris verdâtre au centre, gris blanchâtre en périphérie, très riche en cubes de pyrite et mouchetures de sphalérite.

De 54,40 à 57,30 m : roche ignée gris verdâtre. Rares veinules de quartz.

De 57,30 à 60,70 m : roche ignée à texture grenue, plus fragmentée (très fragmentée à partir de 58,70 m), et, macroscopiquement, plus altérée. On distingue deux types principaux de cristaux :

1. cristaux grisâtres
2. cristaux jaune verdâtre ou jaune brunâtre.

A certains endroits, la roche présente une coloration dominante jaune brunâtre. Rares filonnets quartzeux renfermant quelques mouchetures de sulfures (dont galène ?, à 57,60 m). A partir de 57,70 m, en supplément de quelques veinules de quartz, présence de veinules millimétriques (mm) à centimétriques (cm) de carbonate rose (dolomite). A 58,70 m, une veinule de dolomite contient un fragment de roche ignée.

De 60,70 à 63,60 m : roche fragmentée. Roche ignée à texture grenue (dimension moyenne des cristaux : 3 mm). Deux types de cristaux se distinguent par leur coloration :

1. Cristaux blanc jaunâtre ou brunâtre.
2. Cristaux grisâtres cimentant les précédents.

Vers le bas, tendance au brunissement généralisé des feldspaths. Filonnets de quartz mm à cm renfermant quelques mouchetures de sulfures (peu abondantes). Parfois, ces filonnets montrent une texture corrodée fortement marquée (interprétation probable de cette texture : disparition d'un minéral carbonaté accompagnateur).

De 63,60 à 68,50 m : roche ignée fortement à très fortement altérée. Quelques passages, longs de 10 à 20 cm, sont transformés en arène (non cohérente).

- Coloration dominante de la roche ignée : jaune brunâtre.

- Présence de quelques filonnets de quartz carié, sans sulfures. Ces veinules quartzieuses, d'épaisseur mm à cm, sont abondantes de 68,10 à 68,50 m et lardent la roche ignée en sens divers. Entre 68,40 et 68,50 m, 2 minéraux sont associés au quartz de ces filonnets.

1. Minéral verdâtre, assez rare, probablement chlorite.
2. Minéral rosé (dolomite) cimentant des zones où le quartz est fragmenté (texture bréchiq). Parfois, en veinules transversales aux veinules quartzieuses.

De 68,50 à 70,60 m : roche ignée, grenue, à couleur verdâtre dominante, avec des nuances de colorations - jaune verdâtre, brun verdâtre, gris verdâtre - variant progressivement. Des cristaux vert herbe (feldspaths altérés) se détachent de la masse dans certaines zones. Parfois, leur orientation préférentielle confère à la roche une texture litée. Veinules de quartz (mm à cm), abondantes, dirigées en sens divers, parfois en cisailant et en décalant une série d'autres veinules. A 69,80 m, veine de quartz, de 6 cm de puissance, à texture bréchiq (ciment de dolomite rose). Parmi les fragments, présence d'un bloc anguleux de roche ignée, mesurant plusieurs centimètres de long et épais d'un cm, renfermant de rares cubes et mouchetures de pyrite. Deux cm plus bas, parallèlement au mur de cette veine, veinule lenticulaire de dolomite rose (ép. max. 3 mm), soulignée par une semelle gris verdâtre (chlorite ?). Notons que la dolomite rose se présente également en fin chevelu à d'autres endroits. Sur toute la passe, des

fines lamelles (chevelu inframillimétrique) noires (chlorite ?, molybdénite ?), recoupent les autres textures ou corps figurés.

De 70,60 à 74,50 m : le sondeur renseigne un vide à cet endroit. La présence d'un vide de cette importance est très étrange en lithologie magmatique. Peut-être s'agit-il plutôt d'une zone très altérée dans laquelle le sondeur n'a pas réussi à remonter d'échantillon.

De 74,50 à 76,00 m : roche ignée très fortement altérée. Quelques fragments d'arène plus ou moins cohérente dans lesquels on distingue des veinules de quartz fracturé. Coloration jaune brunâtre dominante.

De 76,00 à 77,10 m : arène pulvérulente, brunâtre, d'aspect sableux à la base.

De 77,10 à 82,30 m : roche ignée grenue, à alternance de zones où les feldspaths ont des colorations jaunâtres, jaune brunâtre ou blanc verdâtre. En plus de minéraux grisâtres (ferromagnésiens), la roche renferme aussi des mouchetures de sulfures (chalcopyrite, pyrrhotite, pyrite, galène). Vers 81,10 m, minéraux noirs mm énigmatiques. Lacis quartzeux à mouchetures de sulfures relativement abondantes (chalcopyrite, pyrrhotite, pyrite, galène, sphalérite). Linéaments de carbonate brunâtre souvent associé au quartz. Remarque : le contact entre le sable arénitique de la zone précédente (76,00 à 77,10 m) et la roche ignée de cette zone, macroscopiquement non altérée, est tranché et planaire (pente du contact : $i=5^\circ$).

De 82,30 à 85,20 m : roche localement très fragmentée. Roche ignée moyennement à finement grenue, de couleur jaune verdâtre jusqu'à 82,80 m, puis grisâtre. Veinules et corps informes quartzeux, très faiblement minéralisés (quelques mouchetures aux irisations bleues et vertes). De 82,90 à 83,00 m, linéaments subhorizontaux vert sombre à noirs (chlorite ?, molybdénite ?).

De 85,20 à 85,70 m : roche ignée, moyennement grenue, de couleur gris verdâtre. Nombreuses fractures glissées (pente : $i=30$ à 50°), certaines tapissées de marcasite. Veinules de quartz à mouchetures sulfurées.

De 85,70 à 85,80 m : mélange de débris de roche ignée et de quartzite gris foncé à veinules de quartz blanc. Le contact roche ignée - quartzite n'est pas visible.

De 85,80 à 88,05 m : roche argileuse gris sombre (schiste tacheté ou cornéenne), localement à nids riches en pyrite microgrenue. Veinules de quartz, mm à cm, renfermant des sulfures (molybdénite, pyrite, chalcopyrite) auxquels un carbonate brunâtre est souvent associé. En outre, présence de petits dykes de roche ignée, de puissance cm, à directions et pentes variables, contenant des sulfures disséminés. Ces petits dykes sont, par endroits, plissotés. D'autre part, ils sont aussi recoupés (sans être décalés) par des veinules de quartz. A l'endroit de l'intersection, des fantômes de roche ignée subsistent dans le quartz. Les épontes de ces petits dykes de roche ignée sont tapissées de pyrite.

De 88,05 à 88,20 m : dyke de roche ignée, grenue, à certains endroits, de couleur grisâtre, à d'autres, blanc jaunâtre ou verdâtre sombre. En outre, les épontes sont à texture bréchique. La roche ignée cimente des fragments anguleux de schiste tacheté. La semelle de ce dyke est riche en mouchetures pyriteuses. Notons encore que cette zone est recoupée par des veinules mm, quartzo-carbonatées. Pente des contacts du dyke : $i=34^\circ$.

De 88,20 à 88,75 m : schiste tacheté (pente: $i=50^\circ$). A certains endroits, abondance de mouchetures pyriteuses soulignant le litage.

De 88,75 à 89,25 m : quartzite gris clair, zonaire à partir de 89,05 m (pendage : $i=40^\circ$). Lacis de quartz blanc en veinules cm, parfois contenant des inclusions de carbonate jaunâtre ou rosé. En outre, le lacis quartzeux est recoupé par des grosses masses informes de quartz contenant localement des sulfures. Ceux-ci se présentent en inclusions soit dispersées soit frangeant les épontes. La sphalérite est le plus abondant des sulfures, suivi par la chalcopyrite et la galène.

De 89,25 à 94,25 m : quartzophyllade ; pendage: $i=30$ à 35° .

Localement, mouchetures et plaquettes de pyrite, parfois très abondantes, et, parfois, confinées aux joints de stratification. Quelques cubes de pyrite mm. Veinules de quartz, mm à cm, contenant de rares mouchetures de sulfures (pyrite principalement ; à 92,10 m, pyrrhotite, pyrite, chalcopyrite). A 89,80 m, petit filonnet de roche

ignée recoupant la stratification (épaisseur : 2 cm ; pente: $i=70^\circ$). En outre, cette zone est très riche en mouchetures et cubes de pyrite. A 93,30 m, texture de brèche sédimentaire.

De 94,25 à 98,65 m : roche ignée. De 94,25 à 95,00 m : roche ignée à mésostase microgrenue grisâtre ou gris verdâtre dans laquelle se détachent quelques phénocristaux vert clair (grandeur moyenne : 2 mm). Dans les 75 cm supérieurs de l'intrusion, la texture porphyrique est donc très peu marquée. Par contre, à partir de 95,00 m, la texture porphyrique est très prononcée (mésostase microgrenue grisâtre ; phénocristaux feldspathiques mm - en moyenne : 2 à 3 mm - blanc verdâtre ou vert herbe lorsque plus altérés). A 98,60 m, la roche devient plus foncée. Cette roche ignée contient des sulfures disséminés (chalcopyrite, sphalérite, pyrrhotite, molybdénite, cubes de pyrite). A 94,50 m, présence d'une enclave enallogène de schiste tacheté (4 cm de long, 3 cm de large, bords anguleux, couleur brun verdâtre). En outre, une veinule de quartz intercepte la base de l'enclave sans l'altérer. Néanmoins, à cet endroit, on peut observer une abondance de sulfures (principalement pyrite - dont quelques cubes - et molybdénite). Sur toute la longueur de la roche ignée, présence de veinules, mm à cm, de quartz blanc contenant parfois de la dolomite rose. Ce carbonate est souvent situé au centre des veinules de quartz. Des cristaux idiomorphes de quartz pointent vers le centre des plages de carbonate rose, comme si la dolomite rose consistait en un remplissage de géodes de quartz. En outre, les veinules de quartz sont souvent mouchetées ou frangées de sulfures (pyrite, pyrrhotite, sphalérite, chalcopyrite, molybdénite). Entre 98,10 et 98,30 m, les fractures affectant la roche sont remplies d'un mélange complexe, chlorito-(verdâtre sombre) -carbonate (rosé) - quartzueux (blanc translucide). Le contact inférieur entre roche ignée et roche sédimentaire s'effectue à 98,65 m selon une surface plane à très faible pente ($i=10^\circ$).

A partir de 95,00, diminution du diamètre des carottes.

De 98,65 à 98,95 m : schiste tacheté, gris brunâtre, foncé.

De 98,95 à 99,05 m : petit dyke de roche ignée à texture porphyrique. Coloration dominante: gris verdâtre. Pente des contacts supérieurs et inférieurs : $i=45^\circ$.

De 99,05 à 100,40 m : schiste tacheté avec, de 99,60 à 99,85 m, un banc de quartzite argileux grisâtre à cubes de pyrite. Quelques filonnets de quartz (épaisseur : 1/2 cm), renferment des mouchetures de carbonate brunâtre et de sulfures. A 100,35 m, présence d'une veinule de roche ignée (épaisseur : 1,5 cm ; pente: $i=40^\circ$), à texture grenue, contenant du quartz et des feldspaths verdâtres et blanchâtres.

De 100,40 à 101,60 m : quartzite gris foncé plus ou moins argileux, parfois avec cubes de pyrite (2 à 3 mm de côté). Sur les joints, présence fréquente d'un enduit pelliculaire de pyrite microgrenue, parfois accompagné d'un composé chloriteux sur lequel se marquent des stries de glissement. Quelques petites veines de quartz contiennent parfois des sulfures (chalcopyrite, pyrrhotite).

De 101,60 à 102,20 m : roche ignée. Pente du contact supérieur (toit) : $i=35^\circ$. Pente du contact inférieur (mur) : complexe. Il s'agit d'une surface irrégulière dont la pente moyenne peut être estimée à 25° . Elle est décalée par une petite faille (rejet cm).

Cette roche ignée se compose principalement (80 %) d'une mésostase microgrenue grisâtre à nuances verdâtres dans laquelle se détachent quelques (20 %) phénocristaux feldspathiques vert herbe. Quelques veinules, mm à cm, de quartz blanc et dolomite rose, renferment parfois des mouchetures de sulfures (pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite).

De 102,20 à 103,10 m : les 10 premiers cm situés immédiatement sous la roche ignée montrent une texture bréchique bien marquée. On distingue des éléments anguleux de quartzite compris dans une matrice schisteuse brunâtre. De 102,30 à 103,10 m, la texture bréchique est plus ou moins nébuleuse. Cependant, on distingue bien 2 composants : fragments de quartzite, parfois légèrement zonés, cimentés par des schistes tachetés. Cubes de pyrite abondants.

Remarque générale : pour tout le reste du forage : carottes toujours fragmentées.

De 103,10 à 109,00 m : quartzite gris clair et grès micacé, plus ou moins argileux (plus foncé). A 104,50 m, pendage : $i=75^\circ$; à 105,60 m : pendage: $i=40^\circ$. A 109,00 m, pendage : $i=70^\circ$. Entre 106,00 et 109,00 m, rares

strates de schiste tacheté. Mouchetures et cubes de pyrite (mm) dans les parties franchement quartzitiques. Quelques veinules (cm) de quartz blanc, parfois accompagnées de mouchetures de sulfures (chalcopirite, pyrrotite), de carbonate rosé ou brunâtre et de feuillettes de molybdénite. Ces veinules sont souvent décalées par des petites failles. Joints glissés à enduit pelliculaire de chlorite et marcasite.

De 109,00 à 111,80 m : zone principalement constituée de grès-quartzite gris (avec cubes de pyrite), sauf de 109,00 à 109,70 m, où on observe quelques couches de schiste tacheté. Quelques veinules de quartz contiennent parfois de la dolomite rose et de rares mouchetures de chalcopirite et pyrrotite.

De 111,80 à 115,20 m : alternances de quartzite gris clair, grès micacé, schiste tacheté et de quartzophyllade. Pendage à 113,50 m : $i=50^\circ$; pendage à 114,50 m : $i=45^\circ$. Mouchetures et plaquettes de pyrite soulignent certains joints de stratification. Quelques veinules de quartz blanc, parfois accompagné de dolomite rose.

De 115,20 à 118,10 m : quartzite avec rares straticules schisteuses. A 117,20 m, pendage : $i=60^\circ$. Veinules de quartz blanc et dolomite rose, le composant carbonaté étant beaucoup plus abondant que la fraction siliceuse.

De 118,10 à 120,50 m : grès argileux et schiste tacheté. A 119,50 m, pendage : $i=45^\circ$. Quelques veinules de quartz blanc, mm à cm, souvent frangées d'un peu de molybdénite. Joints tapissés de petites rosettes de marcasite et d'enduits pelliculaires de chlorite.

De 120,50 à 120,90 m : en début de passe, roche en débris. Schiste brun et verdâtre, puis, schiste tacheté. Localement, texture de brèche tectonique (feuillettes ouverts de schiste, voire fracturés, cimentés par la dolomite rose).

De 120,90 à 123,15 m : grès argileux, légèrement micacé. Enduits pelliculaires de chlorite et rosettes de marcasite sur les joints. A 122,00 m, strate (épaisseur : 2,5 cm ; pendage : $i=45^\circ$) dans laquelle des minéraux lamellaires (barite ?) sont concentrés.

De 123,15 à 124,10 m : quartzophyllade et grès-quartzite à straticules phylladeuses. Surface de stratification très souvent bosselée ou affectée de petits kinks. A 124,00 m, pendage : $i=45^\circ$. Enduits pelliculaires de chlorite et rosettes de marcasite sur les joints.

De 124,10 à 124,85 m : roche ignée grisâtre. De 124,10 à 124,70 m, texture microgrenue (aplite). De 124,70 à 124,85 m, quelques (5 %) phénocristaux de feldspaths, vert herbe, se détachent de la mésostase microgrenue (tendance de texture porphyrique). Filonnets de quartz renfermant un peu de carbonate brun rosé.

De 125,10 à 125,50 m : grès-quartzite, argilo-miacé, gris sombre. Enduit chloriteux et rosettes de marcasite sur les joints.

De 125,50 à 127,10 m : quartzite gris clair avec cubes de pyrite de quelques mm. Lacis quartzeux très abondant de 126,50 à 127,10 m. Le quartz renferme quelques mouchetures de dolomite rose.

De 127,10 à 128,90 m : alternances de quartzite gris clair, grès quartzitique argilo-miacé et schiste tacheté. Rares veinules de quartz avec de rares mouchetures de sulfures.

De 128,90 à 130,70 m : grès-quartzite argilo-miacé. Parfois, évidence de sédimentation perturbée. Débris de strates nettement quartzitiques. Mouchetures et cubes de pyrite abondants dans certains joints et fractures.

De 130,70 à 131,60 m : quartzite gris clair. Veinules et corps informes de quartz contenant quelques mouchetures et cubes de pyrite.

De 131,60 à 133,20 m : schiste tacheté avec quelques couches de grès-quartzite argilo-miacé. A 133,20 m : pendage : $i=40$. Enduit marcasite ou pyrro-chloriteux sur joints glissés.

De 133,20 à 135,20 m : quartzite gris clair, veinulé de quartz blanc.

De 135,20 à 141,15 m : roche très fragmentée. Alternances de quartzite gris clair (avec cubes de pyrite), grès argilo-miacé plus foncé et schiste tacheté brunâtre. A 138,50, pendage : $i=30^\circ$. Mouchetures et cubes de pyrite soulignent très souvent la stratification. Rosettes de marcasite et enduit chloriteux sur joints glissés.

De 141,15 à 143,20 m : roche ignée. Texture porphyrique, mais contour des phénocristaux mal marqué. Mésostase microgrenue grisâtre ; phénocristaux (2 à 3 mm), blanc verdâtre, généralement bien isolés les uns des autres, mais dont les contours sont imprécis. Dissémination de petites mouchetures et petits cubes de pyrite. A 143,10 m, enclave enallogène de schiste brunâtre. Le contact à 143,20 avec le schiste brunâtre sous-jacent est fort perturbé. Pente moyenne : $i=65^\circ$. Surface de contact plusieurs fois décalée par des petites failles au rejet cm. Tendance à texture de brèche tectonique (roche ignée et schiste se cimentant mutuellement).

De 143,20 à 143,30 m : schiste brunâtre avec nids de pyrite.

De 143,30 à 143,60 m : quartzite gris clair veinulé de quartz blanc. Pendage à 143,30m : $i=30^\circ$.

De 143,60 à 144,00 m : schiste brunâtre à chevelu sombre (molybdénite ?, chlorite ?). Joints glissés. Cubes, mouchetures et plaquettes de pyrite (les plaquettes de pyrite étant localisées aux joints).

De 144,00 à 144,20 m : roche ignée de couleur grisâtre contenant des phénocristaux feldspathiques verdâtres, mm, aux contours diffus. De 144,15 à 144,20 m, la roche présente une texture bréchique (la roche ignée cimente des fragments anguleux de schiste tacheté brunâtre). Le contact avec la roche sous-jacente (1 cm de schiste brunâtre, puis, quartzite) est très irrégulier et une pente ne peut pas être mesurée.

De 144,20 à 146,00 m : schiste tacheté. De nombreuses minces veinules recoupent la roche de façon désordonnée et sont constituées d'un composant noirâtre (probablement chlorite) auquel s'ajoute parfois un composant quartzo-carbonaté. Mouchetures de pyrite, localement abondantes. Plaquettes de pyrite sur les joints généralement glissés (les slickensides sont souvent orientées dans des directions différentes dénotant des mouvements relativement complexes). A 145,20 m, présence d'une veinule centimétrique de roche ignée, claire. Le contact supérieur (toit) n'est pas visible car la roche est fragmentée. Le contact inférieur (mur) est complexe. D'une part, le contact immédiat roche ignée - schiste sous-jacent montre un contour en dents de scie. D'autre part, des fragments anguleux de roche ignée, de 2 à 3 mm de diagonale, sont cimentés par le schiste sous-jacent (texture bréchique). Enfin, à cet endroit, une veinule centimétrique, de dolomite rose, contenant des fragments de schiste (texture bréchique) recoupe toutes les autres textures orientées.

De 146,00 à 148,50 m : roche très fragmentée. Schiste tacheté gris brunâtre. Quelques strates quartzitiques gris clair ou quartzophylladeuses. Pendage à 148,30 m : $i=25^\circ$. Localement, la stratification semble fortement perturbée (espèce de slumping complexe). Mouchetures, petits cubes et plaquettes de pyrite sur les joints généralement chloriteux et glissés. Quelques veinules de quartz blanc, de dolomite rose ou d'un mélange des deux.

De 148,50 à 150,50 m : principalement, quartzite gris clair, abondamment veinulé et moucheté de quartz blanc. De 149,40 à 149,50 m, couche constituée de schiste tacheté. Des straticules schisteuses s'observent parfois dans le quartzite. Elles présentent une texture ondulée, voire microplissée. Plaquettes de pyrite sur les joints glissés. Roche en menus débris en fin de passe.

De 150,50 à 151,20 m : roche ignée à texture porphyrique, mieux marquée aux épontes qu'au centre (matrice grisâtre ; phénocristaux feldspathiques vert clair à vert herbe, mm). Localement, dissémination de très petites (mm) mouchetures de pyrite et pyrrhotite. Quelques veinules, mm à cm, de quartz et dolomite (respectivement blanc et rose).

De 151,20 à 151,40 m : grès-quartzite, plus ou moins argileux, gris, plutôt foncé.

De 151,70 à 154,45 m : roche ignée fragmentée ; surfaces glissées.

A 151,70 m, le toit de roche ignée est formé par une roche argileuse, gris foncé, sans schistosité (cornéenne ?). De 151,70 à 151,75 m : présence d'enclaves enallogènes de schiste brunâtre, clair, dans la roche ignée. La roche ignée est à texture porphyrique (matrice grisâtre, tantôt légèrement verdâtre, tantôt à tendance blanchâtre). Des décolorations se marquent le long de certaines fractures. Phénocristaux, mm, blanc verdâtre et gris foncé. Les sulfures sont très rares (mouchetures et cubes de pyrite ; quelques rarissimes mouchetures de pyrrhotite). Quelques veinules mm, quartzo-dolomitiques (blanc et rose) contiennent quelques fragments de roche ignée. De 154,00 à 154,30 m : brèche tectonique (faille ?). Éléments figurés de roche ignée, anguleux de tailles et de formes variables (longueur des diagonales de ces éléments variant du mm à 2 ou 3 cm). Matrice de quartz (blanc) et dolomite (blanc légèrement rosé), localement à texture cariée. Le contact inférieur (mur) à 154,45 n'est pas observable car la roche est en débris.

De 154,45 à 158,10 m : roche localement très fragmentée. Quartzite argileux gris et quartzite gris clair, veinulé de quartz blanc, accidentellement accompagné de carbonate légèrement rosé (dolomite). Rares intercalations schisteuses peu épaisses. Rares cubes mm de pyrite. Enduits pyriteux sur joints glissés.

De 158,10 à 162,50 m : schiste tacheté grisâtre avec quelques bancs, cm à dm, de grès-quartzite argileux, gris. A 159,80 m, pendage : $i=35^\circ$. Quelques cubes de pyrite atteignent le 1/2 cm. Rares veinules mm de quartz contenant des mouchetures de pyrite et entourés aux épontes par des enduits lamellaires de molybdénite. Rem. : de 160,25 à 163,15 m, la roche est très fragmentée. D'autre part, on trouve dans les caisses environ 80 cm de débris pour 2,90 m de roche forée ce qui témoigne d'une perte importante de carottes.

De 162,50 à 164,50 m : roche ignée à texture porphyrique mal marquée. Le contour des phénocristaux feldspathiques est diffus. Ces phénocristaux s'observent néanmoins facilement à cause de leur coloration vert clair différente de celle de la mésostase. Cette dernière est grisâtre jusqu'à 163,20 m puis, verdâtre. Après 163,20 m, les phénocristaux feldspathiques sont plus altérés (coloration vert herbe bien marquée) et se détachent mieux de la mésostase. Les sulfures sont finement disséminés. Dans la partie de couleur grisâtre, la pyrrhotite semble abondante. Par contre, dans la partie gris verdâtre, la pyrite et la chalcopyrite dominent. Mais tous les types de sulfures coexistent. Les contacts roche ignée-toit et mur ne sont pas observables (roche en débris).

De 164,50 à 165,60 m : roche localement très fragmentée. Alternances dm à pluridm de schiste tacheté, grès-quartzite argileux et quartzite. Parfois, évidence de tectonique cassante (strates cisailées, décalées et recimentées). Enduits pelliculaires de chlorite et pyrite sur joints glissés.

De 165,60 à 165,85 m : roche ignée à texture porphyrique peu marquée. Coloration grise légèrement verdâtre dominante. Sulfures rarissimes (pyrite).

De 165,85 à 166,60 m : roche en menus débris. Grès argileux, quartzite, schiste tacheté. Pendage : $i=30^\circ$. Enduits pelliculaires de pyrite et chlorite sur joints bosselés.

De 166,60 à 166,90 m : roche ignée à texture porphyrique, en menus débris aux épontes. Phénocristaux feldspathiques, mm, vert herbe (clair). Matrice grise, légèrement verdâtre, claire. Absence quasi totale de sulfures (rarissimes mouchetures et cubes de pyrite).

De 166,90 à 170,90 m : roche très fragmentée. Quartzite gris veinulé de quartz blanc. Très localement, grès-quartzite argileux. Cubes de pyrite (mm à 1/2 cm).

De 170,90 à 174,60 m : roche très fragmentée. Quartzophyllade (texture rubanée très bien marquée). A 173,50 m, pendage : $i=35^\circ$; à 174,20 m, pendage : $i=30^\circ$. A 174,60 m, présence d'une veinule de quartz, épaisse de 0,5 cm, renfermant de la pyrrhotite et de la pyrite. Plaquettes de pyrite et rosettes de marcasite sur joints.

De 174,60 à 177,60 m : roche localement très fragmentée. Quartzite gris clair et grès quartzitique. Quelques strates, cm, de schiste tacheté, brun clair, fortement perturbées (étranglements, biseautages, cisaillements, microfailles, ...). Cubes de pyrite abondants (mm à 1/2 cm). Veinules de quartz blanc, parfois accompagné de chlorite. A certaines endroits, nids de pyrite dans les fractures.

De 177,60 à 182,00 m : alternances cm à dm de schiste tacheté (à 179,00 m, les taches sont très bien marquées) et grès quartzitique gris. A 181,20 m, pendage : $i=25$ à 30° . Manifestations de tectonique cassante affectant les strates. Sur les joints, présence d'enduits pelliculaires de pyrite accompagnés d'un produit rougeâtre (probablement hématite). Plaquettes lenticulaires de pyrite dans fractures. Quelques veinules de quartz avec pyrite et pyrrhotite. De 180,40 à 180,60 m, veinules brunâtres, à texture cellulaire d'apparence quartzo-sidéritique (interprétation probable : dissolution du carbonate et dépôt du fer sous forme de limonite).

De 182,00 à 184,50 m : roche très fragmentée. Schiste tacheté brunâtre à gris brunâtre. Quelques straticules et couches de grès-quartzite. Veinules de quartz blanc. Pyrite abondante dans certaines fractures. Un enduit pyrito-chloriteux, parfois accompagné d'un produit rougeâtre (hématite ?), tapisse des joints glissés.

De 184,50 à 189,35 m : grès-quartzite gris. Quelques strates de schiste tacheté brunâtre. Quelques cubes de pyrite (mm à 1/2 cm). Rares veinules de quartz, parfois à cœur de chlorite. Enduit pelliculaire chlorito-pyrito-hématitique sur joints glissés. Localement, veinules de sidérite à texture bréchique (fragments anguleux de quartzite).

De 189,35 à 195,50 m : roche en menus débris, souvent reforés.

Perte importante de carotte (perte renseignée par le sondeur de 189,35 à 190,25 m), mais il n'existe qu'environ 2,50 m de débris pour 6,15 m de forage !). Les débris de roche sont constitués essentiellement de grès quartzitique, micacé, parfois à cubes de pyrite.

De 195,50 à 197,65 m : quartzite légèrement grenu, gris, localement à straticules schisteuses (quartzophyllade). Pendage variable d'un endroit à l'autre (à 195,60 m, $i=10^\circ$; à 197,40 m, $i=45^\circ$; à 197,65 m, $i=55^\circ$). Vide renseigné par le sondeur de 196,50 à 195,85 m. Plaquettes de pyrite dans les fractures.

De 197,65 à 198,00 m : schiste brunâtre, clair, à fin chevelu sombre dans les joints.

De 198,00 à 201,00 m : quartzite gris, clair, localement plus grossièrement grenu. Quelques rares strates schisteuses brun verdâtre (par exemple, à 200,00 m, pendage : $i=20$). Cubes de pyrite, mm, localement abondants. Plaquettes de pyrite dans fractures.

De 201,00 à 205,00 m : roche très fragmentée. Quartzophyllade à alternances cm. Joints bosselés, parfois glissés, à enduits pelliculaires de pyrite, chlorite et parfois produit rougeâtre (hématite). Quelques cubes de pyrite dans les parties quartzitiques. Nids de pyrite dans fractures. Rarissimes veinules de quartz blanc.

De 205,00 à 207,40 m : roche très fragmentée. Schiste noir, puis, gris très foncé, à petites taches noires. Plaquettes de pyrite dans joints et fractures. Parfois, veinules ou yeux de quartz avec sulfures (pyrite, pyrrhotite ?).

De 207,40 à 208,85 m : quartzite grossièrement grenu. Quelques cubes de pyrite. Quelques veinules, cm, de quartz blanc.

De 208,85 à 210,40 m : schiste gréseux gris, plutôt foncé, et schiste tacheté, gris brun, foncé.

De 210,40 à 212,40 m : quartzite gris, parfois, grossièrement grenu. Quelques cubes de pyrite mm. Joints, parfois glissés, à enduits pelliculaires de chlorite et pyrite. Quelques veines de quartz gris blanc. Plaquettes de pyrite dans fractures.

De 212,40 à 216,10 m : roche localement très délitée. Schiste gris foncé à noir, avec un passage de grès argileux gris de 213,70 à 214,20 m. Localement, straticules gris foncé, probablement schisto-gréseuses. A 215,60 m, pendage : $i=30^\circ$. Dans ces schistes noirs, présence de plusieurs niveaux cm apparemment stratigraphiques, très riches en pyrite (cristaux idiomorphes-cubes et autres formes cristallographiques - de taille variant du mm au 1/2 cm). Quelques veinules de quartz, cm, avec un peu de pyrite et de chlorite.

De 216,10 à 216,20 m : schiste brun verdâtre à taches noires (chlorite ?). Strates ondulées. A 216,20 m, pendage subhorizontal.

De 216,20 à 216,45 m : quartzite gris, grossièrement grenu, avec quelques cubes de pyrite, mm.

De 216,45 à 216,80 m : schiste noirâtre à straticules quartzitiques gris sombre. Surfaces de stratification bosselées. A 216,60 m, pendage : $i=15^\circ$.

De 216,80 à 220,05 m : roche très fragmentée avec des vides renseignés par les sondeurs de 217,50 à 218,90 m et de 219,20 à 220,05 m. Les débris de roche sont constitués de schiste tacheté gris clair ou brun clair (taches noires, mm, très bien marquées) et de quartzite gris, à cubes de pyrite mm, veinulé ou moucheté de quartz blanc (renfermant parfois des inclusions de pyrite ou chlorite). Stratification localement perturbée. A 222,80, pendage : $i=12^\circ$. Enduits pelliculaires de pyrite et chlorite sur joints souvent bosselés.

De 222,80 à 228,80 m : quartzite gris clair contenant parfois des cubes de pyrite (néanmoins peu abondants), mesurant généralement 1 à 2 mm de côté, mais certains individus atteignent le 1/2 cm. Quelques strates cm à dm de schiste tacheté. Pendage à 225,30 m, $i=35^\circ$; à 226,25 m, $i=28^\circ$; à 227,45 m, $i=35^\circ$. Dans les passages schisteux, joints glissés à plaquettes ou rosettes de pyrite et enduits pelliculaires de chlorite et produit rougeâtre (hématite). Quelques veinules quartziques. De 228,00 à 228,45 m, lacis quartzeux très important. Base du sondage à 228,80 m.

1.3. Description lithologique du sondage He 3 (228W625) - Figure 8

Longueur : 82,30 m - Inclinaison: 60° dans la direction N91°E

Coordonnées Lambert :

X = 275.330,20 m

Y = 138.947,30 m

Z = 523,092 m

De 0,00 à 0,20 m : terre arable, brun sombre, d'aspect tourbeux, pénétrée de nombreuses petites racines.

De 0,20 à 2,00 m : limon brun clair, contenant des débris de roche, de taille variable. Les débris sont principalement constitués de quartzite gris foncé, à veinules de quartz blanc. Vers la base, on trouve aussi quelques débris de roche ignée, gris jaunâtre, à mouchetures de minéraux ferromagnésiens, veinulés de quartz blanc.

De 2,00 à 3,00 m : sable grossièrement grenu, très argileux, brun clair, composé de grains de quartz non arrondis (non roulés) et de feldspath. Présence de nodules argileux aplatis bruns, mais absence de gros fragments rocheux. Interprétation probable : sable d'altération de roche ignée (arène).

De 3,00 à 4,00 m : roche en gros débris, parfois reforés. Roche ignée, jaune verdâtre (le ton verdâtre est lié à la présence de feldspaths altérés), grossièrement grenue, à mouchetures noires (ferro-magnésiens). Présence de pyrite. Enduit limoniteux brun clair sur fractures. Quelques veinules de quartz avec pyrite.

De 4,00 à 5,20 m : roche ignée, microgrenue, grisâtre, à texture porphyrique mal marquée (présence de quelques rares phénocristaux jaune verdâtre). Enduits pelliculaires de pyrite et limonite sur fractures glissées. Veinules et corps informes de quartz blanc.

De 5,20 à 6,10 m : roche fracturée. Roche ignée, jaune verdâtre, grossièrement grenue, à mouchetures noires très abondantes. Veinules de quartz blanc, stériles.

Rem. : diminution du diamètre du forage à partir de 5,50.

De 6,10 à 14,40 m : roche peu fracturée. Roche ignée, gris verdâtre, grossièrement grenue, à mouchetures de ferro-magnésiens très abondantes. Dissémination de pyrite. Veinules et corps informes de quartz, parfois légèrement carié. A certains endroits, présence d'agrégats pyriteux et, plus rarement (par exemple à 7,60), chalcopryrite et molybdénite. Vers 12,35 m, présence d'un composant carbonaté brunâtre. Fractures glissées à rosettes de marcasite et enduit pelliculaire limoniteux, brun clair et/ou, chloriteux, verdâtre.

De 14,40 à 15,00 m : roche ignée d'aspect plus blanchâtre, légèrement litée par des alignements de ferro-magnésiens (pente moyenne : $i=35^\circ$).

De 15,00 à 18,00 m : roche ignée, gris blanchâtre à gris verdâtre, grossièrement grenue, à mouchetures de pyrite disséminées. Quelques mouchetures de molybdénite et de pyrrhotite (?). Enduit pelliculaire marcasite (rosettes)-chloriteux sur fractures glissées. Veinules quartzo-chloriteuse plus ou moins fortement cariées. De 17,00 à 17,20 m, veine de quartz blanc, épaisse de 5 cm, très fortement cariée, renfermant une proportion importante d'agrégats pyriteux, localement cristallisée en cubes très bien formés (côté : 3 à 5 mm).

De 18,00 à 21,00 m : très bonnes carottes. Roche ignée, gris verdâtre, moyennement grenue. Fractures glissées à enduit marcasite-chloriteux. Abondance de veinules et corps informes, quartzo-carbonatés, plus ou moins cariés. Le carbonate est brunâtre jusqu'à 19,50 m puis, il devient rosé. En outre, ces veinules sont minéralisées (lamelles et mouchetures de molybdénite, mouchetures de pyrite et de chalcopryrite).

De 21,00 à 24,00 m : roche diaclasée, localement en débris.

Roche ignée, gris blanchâtre à gris verdâtre, moyennement grenue. Veinules (mm à cm) et corps informes de quartz blanc accompagné d'un composé carbonaté brunâtre et de mouchetures de sulfures peu abondantes (molybdénite frangeant les épontes ; pyrite). Parfois, dans le quartz, présence de noeuds chloriteux, verdâtres. Ces veinules, dirigées dans toutes les directions, sont localement très fortement cariées.

De 24,00 à 27,00 m : très bonnes carottes. Roche ignée, gris verdâtre, claire, moyennement grenue. Quelques feuillettes, mm, de molybdénite. Localement, fractures glissées, à cicatrisation quartzo-chloriteuse. Veinules et corps informes, quartzo-carbonatés (brunâtres), parfois chloriteux. Rarissimes sulfures (pyrite, molybdénite). A certains endroits, des veinules essentiellement carbonatées (brunâtres) recoupent les veinules quartzueuses. Toutes ces veinules sont plus ou moins cariées.

De 27,00 à 36,00 m : roche très fragmentée de 28,60 à 30,00 m ; fragmentée de 30,00 à 33,00 m ; diaclasée de 33,00 à 34,50 m ; fragmentée de 34,50 à 34,70 m ; diaclasée de 34,70 à 36,00 m.

Roche ignée, gris verdâtre, moyennement grenue sauf de 35,70 à 36,00 m où elle devient grossièrement grenue. Veinules et corps informes de quartz blanc, parfois accompagné d'un composé carbonaté jaunâtre ou rosé, peu abondant et de quelques mouchetures de sulfures (molybdénite, pyrite). Localement, présence de noeuds chloriteux. Ces veinules sont moyennement cariées. Quelques fractures glissées, à cicatrisation chloriteuse, quartzo-chloriteuse, ou carbonatée brunâtre (33,00 à 36,00 m), recoupent toutes les autres textures.

De 36,00 à 38,40 m : roche ignée, gris blanchâtre ou gris verdâtre, grossièrement grenue. Malgré la présence de mouchetures sombres (ferromagnésiens), la coloration dominante de la roche est claire. Quelques mouchetures de sulfures (pyrite, chalcopryrite ?, pyrrhotite ?) disséminées dans la masse. Quelques fractures, glissées, à cicatrisation quartzo-chloriteuse. Veinules, mm à cm, de quartz blanc, translucide, accompagné d'un composé blanc laiteux ou rosé ne faisant pas effervescence à HCl 1/10 N (feldspath ?). Absence de sulfures.

De 38,40 à 38,80 m : bonnes carottes, non fracturées. La roche est très fortement cariée et à coloration dominante, jaunâtre. Cette texture est liée à une altération qui n'est pas due à la présence d'une faille (pas de fractures, pas de laminage). A notre avis, elle résulte d'une circulation abondante des eaux vadoses favorisée par les vides consécutifs à la dissolution du carbonate des veinules quartzo-carbonatées. Dissémination de mouchetures de pyrite dans la masse.

De 38,80 à 39,70 m : roche ignée, gris verdâtre à jaune verdâtre (coloration dominante: jaune verdâtre sombre), moyennement à grossièrement grenue, renfermant des mouchetures sombres (ferromagnésiens). Quelques sulfures (principalement pyrite), disséminés dans la masse. Quelques veinules, cm, de quartz blanc, recoupées transversalement par des feuillettes carbonatées, jaune brunâtre. Mouchetures et lamelles de molybdénite. Des fractures, à cicatrisation carbonato-chloriteuse, recoupent toutes les autres textures sans nécessairement les décaler.

De 39,70 à 41,00 m : très bonnes carottes. Roche ignée, à couleur dominante grise à tendance sombre (ferromagnésiens gris plus abondants que feldspaths blancs et blanc verdâtre), grossièrement grenue. Quelques sulfures disséminés dans la masse (pyrite, chalcopryrite). Quelques fractures glissées à cicatrisation quartzo-carbonato-chloriteuse. Rares veinules, mm, de quartz blanc.

De 41,00 à 45,50 m : très bonnes carottes. Roche ignée, grisâtre (légères nuances verdâtres), finement grenue, avec localement d'abondantes mouchetures de ferromagnésiens (dont pyrrhotite et chalcopryrite). La roche est recoupée par des veinules quartzo-feldspathiques, plus grossièrement grenues et de couleur claire. Le centre de ces veinules est souvent carbonaté. On observe aussi des veinules de quartz blanc à lamelles de carbonate et molybdénite ainsi que des fractures remplies de molybdénite et de marcasite. Enfin, des fractures à cicatrisation essentiellement carbonatée recoupent toutes les textures.

De 45,50 à 54,30 m : le faciès de la roche change de façon progressive. La roche la plus caractéristique de cette zone est une roche ignée gris clair, légèrement verdâtre, finement grenue, à «taches» subcirculaires, cm, gris foncé. Ces taches sont généralement non jointives et régulièrement réparties à travers la roche. Elles se superposent souvent à des agrégats de pyrrhotite et de chalcopryrite. Elles sont fréquemment entourées par une couronne, mm, de feldspaths, plus clairs que ceux de la matrice. Cette texture rappelle de façon très lointaine celle de la diorite orbiculaire. A certains endroits, la «matrice» offre un faciès différent. Elle est gris clair et à porosité élevée. Des sulfures, principalement pyrrhotite et chalcopryrite, sont régulièrement disséminés dans la roche ignée. Parfois, ils se concentrent en agrégats atteignant 1 cm de diamètre. A 49,20 m, veinule de molybdénite de 2 mm de puissance. Localement, abondance de veinules lenticulaires de quartz et calcite (blanc laiteux, forte effervescence à HCl 1/10 N). Ces veinules sont parfois fortement cariées. Les veinules essentiellement quartzueuses sont beaucoup plus rares. Ces dernières renferment néanmoins des mouchetures de molybdénite, pyrite et chalcopryrite. Enfin, signalons quelques fractures glissées à cicatrisation quartzo-carbonato-chloriteuse et rosettes de marcasite.

De 54,30 à 55,15 m : roche analogue à celle décrite de 45,50 à 54,30 m sauf en ce qui concerne la granularité. Ici, la mésostase, composée notamment de feldspaths, mm, blanc jaunâtre et blanc verdâtre, est moyennement grenue. Cette particularité confère à la roche ignée une coloration à dominante plus jaunâtre précédemment.

De 55,15 à 56,30 m : roche ignée, grisâtre, localement à nuances verdâtres, finement grenue. Mouchetures de pyrrhotite disséminées dans la masse. Quelques feldspaths, blancs, mm, se détachent également de cette masse. Il nous semble néanmoins inapproprié de parler de texture porphyrique, tant ce caractère est accessoire (cette texture est à rapprocher de la texture porphyrique «mal marquée» des sondages précédents). Minces veinules quartzo-carbonato-chloriteuse, plus ou moins cariées.

A 56,30 m : contact planaire entre roche ignée et schiste fritté, sombre. Pente de contact : $i=50^\circ$.

De 56,30 à 56,40 m : phyllade sombre à joints chloriteux glissés, tapissé d'enduits pelliculaires de marcasite. Présence d'un corps quartzeux, cm, auréolé de pyrite et molybdénite.

De 56,40 à 56,50 m : quartzite gris veinulé de quartz blanc. Très rares cubes de pyrite de taille infra mm.

De 56,50 à 56,75 m : roche ignée, essentiellement feldspathique, claire (blanc légèrement verdâtre), avec agrégats chloriteux lamellaires de forme irrégulière et cubes de pyrite très abondants. Les contacts avec les roches sédimentaires voisines sont tectonisés.

De 56,75 à 60,90 m : roche très fragmentée. Alternances dm de quartzites massifs, gris, à mouchetures et cubes (mm) de pyrite, de quartzophyllades, finement rubanés, parfois slumpés, et de schistes tachetés. Les contacts sont fréquemment tectonisés. Les schistes sont souvent comprimés, épousant le contour des bancs de quartzite décalés par des petites failles. A 59,60 m, pendage : $i=55^\circ$. Très rares veinules de quartz à rarissimes mouchetures de sulfures.

De 60,90 à 61,35 m : roche ignée, essentiellement feldspathique, gris clair, localement légèrement verdâtre, finement grenue (aplite), abondamment veinulée de quartz blanc, carié. Aux épontes, cette roche renferme des enclaves de schiste tacheté. Rares agrégats pyriteux. Aux endroits essentiellement gris clair, la roche ressemble exactement à un quartzite. Les variations lithologiques sont imperceptibles et ne permettent pas de situer une frontière entre les deux types. Interprétation : il est possible qu'à cet endroit, la roche ignée ait presque complètement assimilé un banc de quartzite.

De 61,35 à 62,50 m : idem que de 56,75 à 60,90 m. A 61,50 m : pendage: $i=65^\circ$. De 61,80 à 61,90 m, présence d'agrégats de cristaux lamellaires, mm à cm, brun très clair (presque blanc), qui semblent se greffer sur des filonnets de quartz tout en se développant préférentiellement dans le quartzite environnant. Un enregistrement Debye-Scherrer a été effectué sur ces cristaux. Le dépouillement nous a livré le mélange calcite-quartz-anorthite.

De 62,50 à 63,50 m : roche ignée, essentiellement feldspathique. On distingue une mésostase microgrenue grise à gris verdâtre, dans laquelle s'individualisent quelques phénocristaux (mm) feldspathiques, vert herbe (au point de vue de la texture porphyrique, remarque analogue à celle faite de 55,15 à 56,30 m). La coloration dominante est sombre. Nombreuses fractures glissées à enduit chloriteux et rosettes de marcasite. La roche est lardée de veinules quartzocalciques (forte effervescence à HCl 1/10 N). A partir de 63,35 m, la texture change. La roche ignée, de coloration générale claire, devient grossièrement grenue. Elle est formée de cristaux feldspathiques et de mouchetures grisâtres (ferromagnésiens). Quelques rares mouchetures de sulfures. En outre, on observe la présence de cristaux lamellaires de calcite identiques à ceux observés de 61,80 à 61,90 m. Ces cristaux sont régulièrement répartis dans la roche et de plus en plus abondants vers la base. Pente de contact inférieur (toit) : $i=34^\circ$. Pente de contact supérieur (mur) : $i=65^\circ$.

De 63,50 à 64,95 m : idem que de 56,75 à 60,90 m.

De 64,95 à 65,30 m : roche ignée, feldspathique, à tendance porphyrique (mésostase microgrenue grisâtre, phénocristaux, mm, blanc verdâtre et vert herbe, peu abondants. Contact supérieur (toit): fracturé. Contact inférieur (mur) : pente: $i=50^\circ$.

De 65,30 à 65,50 m : schiste foncé et quartzite. Abondance de mouchetures de pyrite soulignant la stratification. Pendage : $i=55^\circ$.

De 65,50 à 68,80 m : roche ignée, analogue à celle décrite de 62,50 à 63,35 m. Rares petits (mm) cubes de pyrite. Vers la base, la texture devient essentiellement microgrenue et les rares phénocristaux disparaissent complètement. Pente de contact supérieur (toit) : $i=65^\circ$. Pente de contact inférieur : $i \text{ moy.}=60^\circ$.

De 68,80 à 69,50 m : quartzite gris clair, veinulé et moucheté de quartz blanc. Quelques cubes, mm, de pyrite. A 69,50 m : contact diffus entre quartzite et roche ignée microgrenue (aplite).

De 69,50 à 70,40 m : apélite, gris verdâtre clair, lardée de nombreuses courtes veinules lenticulaires, plus ou moins cariées de quartz et de calcite rose. Elle contient, en abondance, des mouchetures et cubes de pyrite, mm à cm, parfois avec pyrrhotite. A partir de 70,00 m, on observe une roche hétérogène composée d'apélite et de quartzite. Les limites lithologiques ne sont pas discernables. Interprétation probable : enclaves de quartzite non assimilés par l'apélite. Au toit de l'apélite, au contact avec le quartzite, présence de calcite (+ quartz et anorthite ? - cf de 61,80 à 61,90 m), en agrégat massif.

De 70,40 à 79,00 m : alternances dm de quartzite gris, à cubes de pyrite, mm à cm, veinulé de quartz blanc, de quartzite rubané sombre, de schiste brun clair à taches noires (schiste tacheté), et de phyllade, grossier, sombre. La lithologie schisteuse domine vers la base. Pendage à 71,20 m : $i=58^\circ$; à 74,00 m : $i=45^\circ$. Dans les quartzites rubanés, la stratification est très souvent onduleuse. Les strates sont parfois biseautées. Joints très souvent glissés, chloriteux, avec lamelles et rosettes de marcasite. La marcasite est souvent altérée en limonite. Parfois, on note aussi la présence d'un produit rougeâtre ou violacé (hématite ?).

De 79,00 à 82,20 m : phyllade sombre avec quelques grosses veines de quartz stérile. Base du sondage à 82,30 m.

1.4. Description lithologique du sondage He 4 (228W626) - Figure 9

Longueur : 71,90 m - Inclinaison: 60° dans la direction N92W

Coordonnées Lambert :

X = 275.502,50 m

Y = 138.991,50 m

Z = 544,713 m

De 0,00 à 0,40 m : terre arable, brun sombre, avec nombreux débris végétaux.

De 0,40 à 0,80 m : mélange de terre arable, de limon brun clair très argileux et d'arène de roche ignée.

De 0,80 à 3,50 m : arène de roche ignée, brun clair, dans laquelle subsistent des blocs, nuculaires à pugilaires, de quartz et de roche ignée, claire, grossièrement grenue, à mouchetures sombres. Ces blocs sont anguleux, tantôt relativement frais, tantôt très altérés. Leur abondance augmente vers la base.

A 6,00 m, diminution du diamètre des carottes.

De 3,50 à 15,00 m : roche très fracturée, en débris de 3,50 à 7,00 m ; de 8,60 à 8,80 m ; et de 9,40 à 11,00 m. Roche ignée, grossièrement grenue, équi-granulaire, composée de feldspaths mm à cm, blanc laiteux et brun jaunâtre, de quartz blanc translucide et de mouchetures de ferromagnésiens, grisâtres. Très rares mouchetures de sulfures (pyrite et pyrrhotite). La coloration de la roche est liée à son degré d'altération, lui-même lié à l'importance de la fracturation. Les parties macroscopiquement saines montrent une couleur dominante grisâtre, les parties altérées, jaunâtre. Les fractures sont dirigées dans toutes les directions. Elles sont fermées ou, localement ouvertes. Elles sont toujours tapissées d'un enduit pelliculaire limoniteux variant de brun clair à noir (oxydes de

SONDAGE 228 W 626

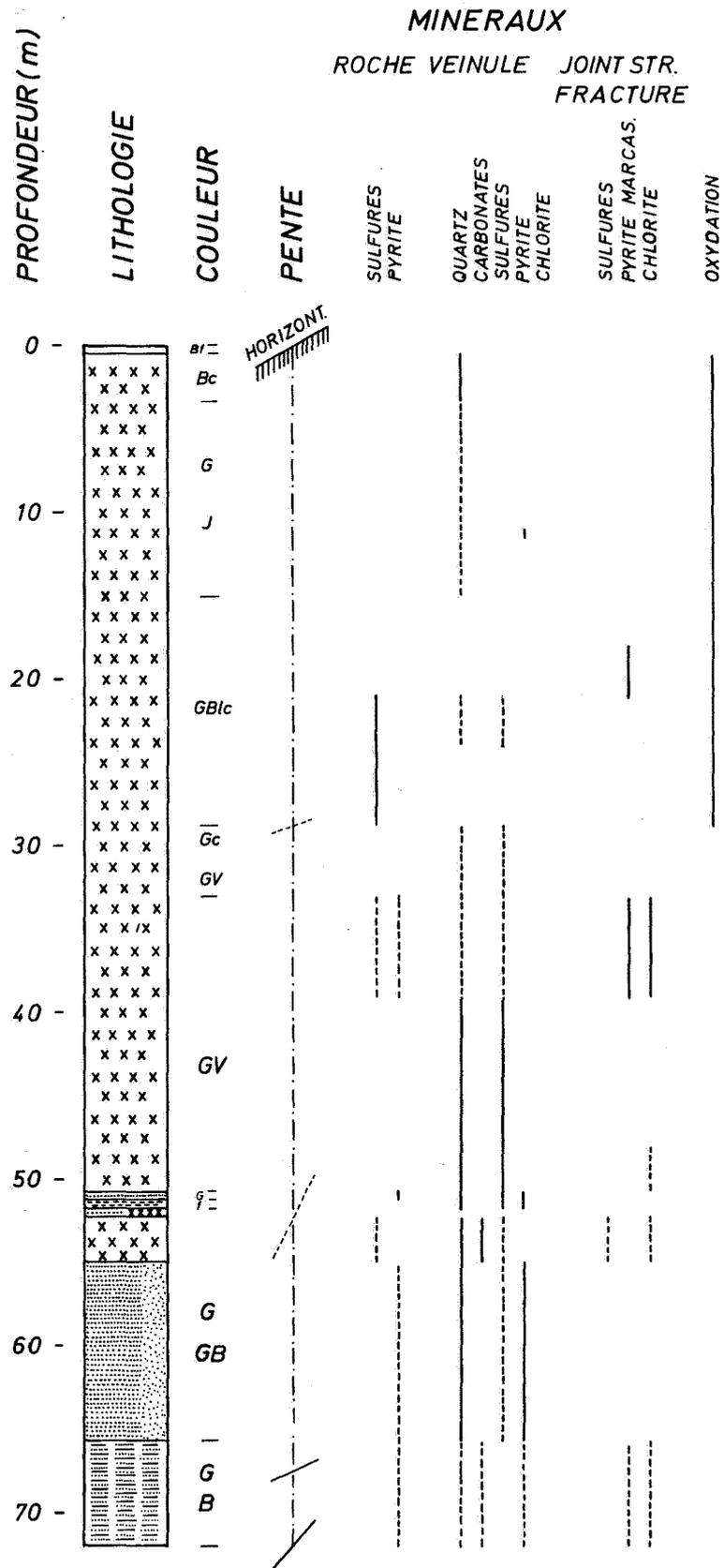


Figure 9. Colonne lithologique du sondage He 4 (228W626).

manganèse ?). Rarissimes stries de glissement. Parmi ces minéraux d'oxydation, pas de traces de minéraux cuivreux. Autour de ces fractures, la coloration de la roche ignée est fortement affectée sur une épaisseur totale atteignant plusieurs centimètres. Il en résulte un rubanement d'altération, symétrique par rapport à la fracture, se décomposant de la façon suivante :

- roche ignée (claire ou sombre), non altérée ;
- bande gris sombre à noire : max. : 1 cm ;
- roche ignée, grisâtre, apparemment non altérée : ± 1 cm ;
- roche ignée brun rouille, altérée : $\pm 1,5$ cm. Fracture \pm fermée ;
- roche ignée brun rouille, altérée: $\pm 1,5$ cm ;
- roche ignée, grisâtre, apparemment non altérée : ± 1 cm ;
- bande gris sombre à noire : max. : 1 cm ;
- roche ignée, grisâtre, apparemment non altérée ;

Bref, nous distinguons deux types d'altération :

1. une altération affectant toute la masse de la roche ;
2. une altération localisée le long des fractures, à texture rubanée.

Quelques rares veinules et corps informes de quartz blanc parfois légèrement rougeâtres, parcourus de minuscules fractures à enduit pelliculaire limoniteux. A 11,10 m, mouchetures de pyrite.

De 15,00 à 28,80 m : roche très fracturée, localement en débris.

De 27,10 à 27,20 m, la roche prend un faciès arénitique. Idem, au point de vue lithologique. La couleur dominante de la roche non altérée dans la masse est gris blanchâtre (très clair). A partir de 21,00 m, la teneur en sulfures semble augmenter très légèrement. Altération variable selon la profondeur. Entre 18,00 et 21,00 m, certaines fractures sont glissées et tapissées de minuscules (infra mm) rosettes de marcasite. De 21,00 à 24,00 m, très rares veinules de quartz blanc, cm, à mouchetures de molybdénite (par exemple à 21,90 m).

De 28,80 à 33,00 m : roche ignée très semblable à celle décrite précédemment, mais s'en distinguant néanmoins par les caractères suivants :

1. absence totale d'altération macroscopique aussi bien dans la masse que le long des fractures ;
2. par places, la coloration de la roche, à dominante gris très clair, prend des nuances verdâtres ;
3. de 28,80 à 30,00 m, la roche semble écrasée et recristallisée. Elle prend une texture orientée (à 28,90 m : pente : $i = \pm 20^\circ$). Faciès de blastomylonite ;
4. de 30,00 à 30,20 m et de 30,50 à 31,00 m : roche à texture porphyrique (mésostase gris verdâtre; phénocristaux blancs très légèrement verdâtres). Pas de frontières nettes (il ne s'agit pas de filons sécants). Au contraire, les variations sont progressives, attestant qu'il s'agit d'une variation de faciès au sein de l'ensemble de roche ignée. Rares veinules de quartz à mouchetures de sulfures (dont molybdénite et chalcopyrite).

De 33,00 à 39,00 m : roche fracturée, localement fragmentée (totalement fragmentée de 36,00 à 39,00 m). Roche ignée, gris verdâtre, légèrement plus sombre que précédemment, grossièrement grenue. Quelques mouchetures de sulfures (chalcopyrite, pyrite) disséminées dans la masse. A 36,70 m, parmi d'autres débris, aplite (roche microgrenue, blanc légèrement verdâtre). Fractures glissées à cicatrisation chloriteuse, parfois avec pyrite et/ou marcasite. Quelques veinules anastomosées, sans direction préférentielle, d'épaisseur cm, de quartz blanc, à mouchetures de molybdénite et chalcopyrite. Ces veinules sont souvent décalées en escalier (déplacements cm) par d'autres fractures.

De 39,00 à 48,00 m : roche fracturée, localement fragmentée. Roche ignée, gris verdâtre, localement hétérogranulaire (sans qu'on puisse pour autant parler de texture porphyrique). Ces variations de granularité sont progressives et s'accompagnent de variations de coloration (une roche grossièrement grenue étant toujours plus claire qu'une roche plus finement grenue). Lacis de minces (mm à cm, en moyenne 1/2 cm) veinules de quartz blanc à mouchetures et agrégats lamellaires de chalcopyrite (avec parfois irisations d'altération - covellite ?), de pyrite, de pyrrotite et de molybdénite. La molybdénite rubane parfois ces veinules. Entre 40,50 et 41,80 m, un minéral rosé, accompagne le quartz. Il ne fait pas effervescence à HCl 1/10 N (dolomite ?, feldspath ?).

De 48,00 à 50,80 m : roche fracturée, localement fragmentée. Roche ignée, gris verdâtre, moyennement grenue (tendance finement grenue). Vers la base, la texture évolue vers une texture porphyrique très mal marquée. Fractures, parfois glissées, parfois à enduit pelliculaire de marcasite. Veinules de quartz blanc, mm à cm, (certaines dépassent le cm) contenant surtout des mouchetures et/ou agrégats lamellaires de molybdénite et quelques mouchetures de chalcopyrite et pyrrhotite.

De 50,80 à 51,20 m : quartzite gris à mouchetures et cubes de pyrite de quelques mm de côté. Veinules de quartz blanc à mouchetures de pyrite et agrégats lamellaires de molybdénite.

De 51,20 à 51,80 m : schiste verdâtre, sombre, à joints glissés. Nombreuses veinules de quartz blanc, parfois de plusieurs cm d'épaisseur. Mouchetures et agrégats lamellaires de molybdénite en abondance. Les autres sulfures (chalcopyrite ?) sont rares. Ces veinules sont glissées. Une striation se marque sur les agrégats de molybdénite.

De 51,80 à 52,25 : roche localement fragmentée. Roche complexe, hétérogène. On observe des «blocs» (corps figurés) de nature et de taille différentes, cimentés par une matrice. Parmi les blocs de taille pisaire à nuculaire, on distingue :

- 70 % : quartzite gris clair, localement à nuances verdâtres, lardé de veinules de quartz blanc contenant de rares mouchetures de pyrite. Le contour de ces blocs est soit anguleux, soit légèrement arrondi ;
- 30 % : roche ignée, gris verdâtre clair, grossièrement grenue, à mouchetures de ferromagnésiens. la section de ces blocs est souvent elliptique ;
- rares blocs de schiste tacheté brun sombre. La matrice est une roche ignée, grisâtre, sombre, localement riche en agrégats pyriteux. Quelques mouchetures de chalcopyrite.

Les quartzites sont plus abondants vers la base. Ils semblent en voie d'assimilation par la matrice de nature ignée.

A 52,25 m : contact tectonique selon une surface plane (pente : $i=64^\circ$) parcourue de stries de glissement très bien marquées. Enduit pelliculaire chloriteux (molybdénite ?).

De 52,25 à 54,90 m : roche ignée homogène analogue aux blocs observés entre 51,80 et 52,25 m. Elle est verdâtre clair, grossièrement grenue et contient des mouchetures de ferromagnésiens. Très rares mouchetures de sulfures. Quelques fractures glissées, à cicatrisation chloriteuse, parfois avec enduit lamellaire de molybdénite. Très nombreuses veinules de quartz blanc, mm à cm, anastomosées. Parfois, le quartz est accompagné d'un composé carbonaté rosé ou brunâtre. Rares mouchetures de sulfures.

A 54,05 m, présence d'un bloc (enclave ?) de quartzite gris sombre, avec quelques cubes de pyrite de plusieurs mm de côté. Cette enclave est auréolée sur 1 cm d'épaisseur par une roche ignée très claire, jaune verdâtre. Immédiatement sous cette enclave, roche ignée en menus débris parmi lesquels on retrouve des débris de quartzite.

De 54,90 à 63,30 m : roche localement très fragmentée. Quartzite gris, par places argileux (présence de linéoles ou dendrites gris sombre ou verdâtre - chlorite). Le quartzite passe de façon continue à un grès grossier, très argileux, gris brunâtre. Très rares cubes de pyrite de quelques mm de côté. Le quartzite est lardé de veinules et corps informes de quartz blanc à mouchetures et agrégats lenticulaires de pyrite, frangeant parfois les épontes. Molybdénite (?) parfois associée à la pyrite. L'épaisseur de certaines veines atteint le dm. A 55,15 et 56,70 m, veines cm de roche ignée, identique à celle décrite de 52,25 à 54,90 m. Ces veines sont recoupées par des veinules de quartz.

De 63,30 à 71,90 m : roche fragmentée, localement en débris.

Quartzophyllade. Les strates quartzitiques sont grises, les intercalations phylladeuses brunâtres. Les strates quartzitiques contenant de rares cubes de pyrite de quelques mm de côté sont fréquemment ondulées et lenticulaires. A certains endroits, la lithologie siliceuse prédomine (quartzite rubané ou grès argileux très grossier). Les variations lithologiques sont très progressives. Dans les quartzites rubanés, on relève des signes de dérangements probablement sédimentaires de type slumping (par exemple entre 65,40 - 65,50 m et 71,80 - 71,90 m). Pendage à 67,50 m : $i=25^\circ$; à 71,80 m : $i=50^\circ$. En outre, une tectonique de cisaillement hache toutes les textures. Les strates quartzitiques sont souvent décalées en escalier. Les phyllades intercalaires moulent parfaitement les irrégularités de contour. Relevons aussi quelques fractures importantes, glissées, à cicatrisation chloriteuse, et parfois, enduit pelliculaire de pyrite ou marcasite. Entre 68,60 et 68,70 m, la roche quartzitique, légèrement décolorée, d'aspect saccharoïde, montre une très grande porosité. Zone de faille recristallisée ? Veinules de quartz

blanc, mm à cm, sans direction préférentielle. Quelques mouchetures de pyrite. Localement, le quartz est accompagné de carbonates (rosés ou brunâtres) et/ou chlorite. Base du sondage à 71,90 m.

1.5. Synthèse des observations macroscopiques

Les roches ignées recoupées par les sondages appartiennent à deux groupes distincts. L'ensemble principal, appelé par la suite masse principale du corps magmatique, est formé par la plus grande épaisseur de roche ignée qui ne présente aucune intercalation métasédimentaire. Le second groupe rassemble les nombreuses intercalations centimétriques, métriques ou plurimétriques de roche ignée insérées dans l'encaissant. Ce second ensemble igné correspond probablement le plus souvent à un cortège filonien émanant du corps magmatique principal avec quelques fois des contacts diffus entre l'intrusion et l'encaissant.

1.5.1. Sondage He1 (228W623) - Figure 10

La masse principale du corps magmatique est recoupée de 0,00 à -68,80 m. Au-delà de cette profondeur, le sondage traverse à plusieurs reprises des niveaux, le plus souvent métriques, de roche ignée : de -71,70 à -72,60 m (roche ignée leucocrate), de -75,90 à -76,85 m (texture porphyrique) et de -77,20 à -78,10 m (texture finement grenue à porphyrique).

1.5.2. Sondage H 2 (228W624) - Figure 11

Le sondage recoupe le corps igné principal de -42,30 à -85,80 m. Par ailleurs, des plus minces niveaux de roche ignée sont traversés par le forage. Dans la partie supérieure de l'intrusion, on trouve des intercalations de roche ignée de -13,60 à -14,70 (arène leucocrate), de -21,40 à -21,50 (arène), de -29,30 à -29,70 (arène) et de -36,40 à 37,60 m (arène avec débris à texture porphyrique). Dans la partie inférieure du corps, on observe des passes magmatiques de -88,05 à -88,20 m (dyke), de -94,25 à -98,65 m (texture porphyrique), de -98,95 à -99,05 m (petit dyke à texture porphyrique), de -101,60 à -102,20 m, de -124,10 à -124,85 m (texture faiblement porphyrique), de -141,15 à -143,20 m (texture porphyrique), de -144,00 à -144,20 m (texture bréchique), de -150,50 à -151,20 m (texture porphyrique), de -151,70 à -154,45 m (texture porphyrique), de -162,50 à -164,50 m (texture faiblement porphyrique), de -165,60 à -165,85 (texture faiblement porphyrique) et finalement de -166,60 à -166,90 m (texture porphyrique).

La zone située sous l'intrusion principale du sondage He 2 présente de nombreuses intercalations de roche ignée, principalement concentrées de -94 à -102 m et de -141 à -167 m. Ces manifestations secondaires de roche ignée correspondent probablement à un cortège filonien (formé principalement par de petits dykes) situé dans la partie sous-jacente à intrusion principale.

1.5.3. Sondage He 3 (228W625) - Figure 12

Le sondage recoupe le corps magmatique principal de 0,00 à -56,75 m. Les niveaux de roche ignée plus profonds se trouvent de -60,90 à -61,35 m (roche ignée leucocrate de type aplite), de -62,50 à -63,50 m (roche ignée feldspathique à tendance porphyrique), de -64,95 à -65,30 m (roche ignée feldspathique à tendance porphyrique), de -65,50 à -68,80 m et de -69,50 à -70,40 m (aplite).

1.5.4. Sondage He 4 (228W626) - Figure 13

Le sondage traverse la partie massive de l'intrusion de 0,00 à -54,90 m. Le sondage n'a pas traversé de niveaux de roche ignée dans les roches métasédimentaires situées sous cette partie de l'intrusion.

Sondage He 1 (228W623) colonne lithologique simplifiée

X = 275.438,60 m
 Y = 138.938,50 m
 Z = 521,343 m
 Direction: N71°W
 Inclinaison: 45°NW

○ Echantillon examiné en lame mince

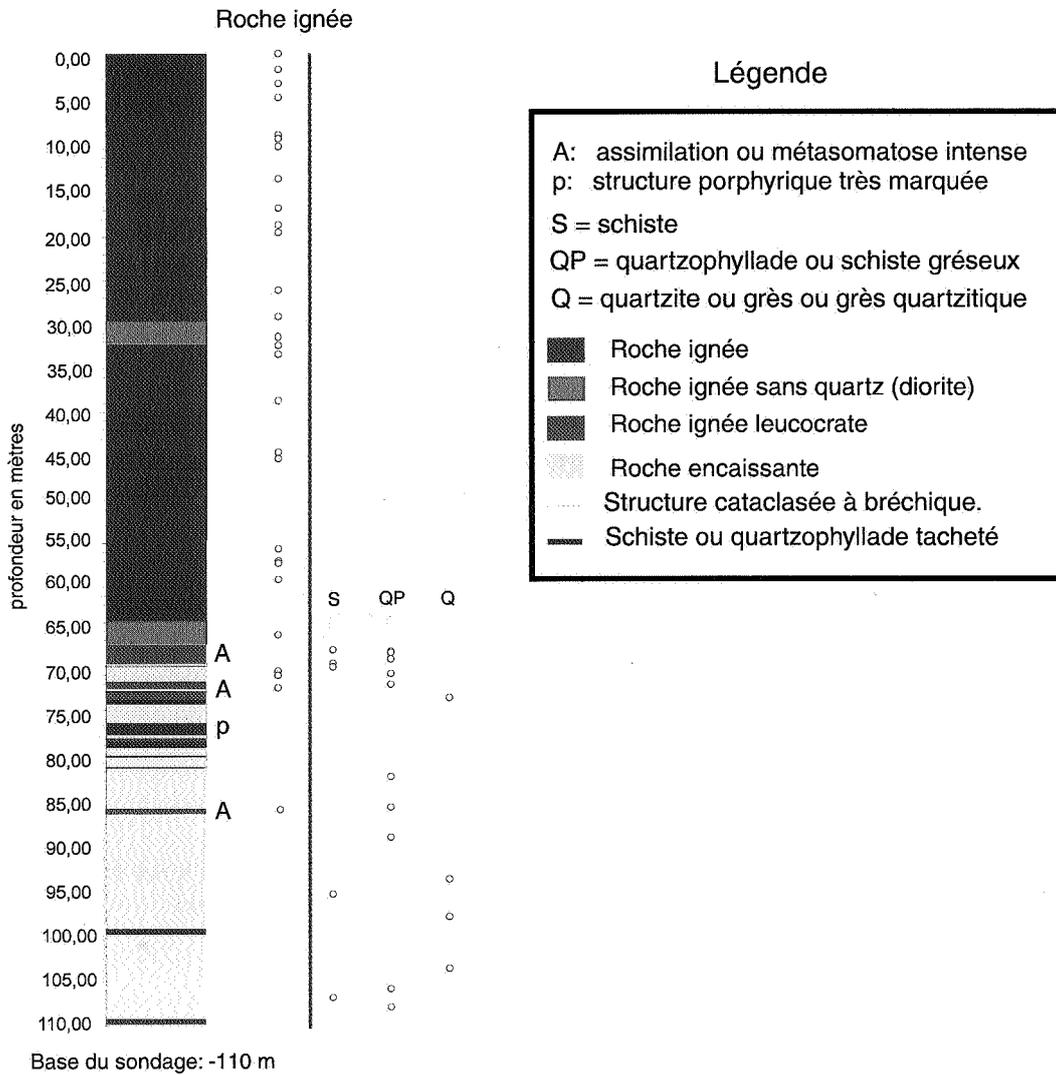


Figure 10. Sondage He 1 (228W623) : colonne lithologique simplifiée.

Sondage He 2 (228W624) Colonne lithologique simplifiée

X = 275.540,20 m
Y = 138.823,00 m
Z = 524,379 m
Direction: N16°W
Inclinaison: 45°N

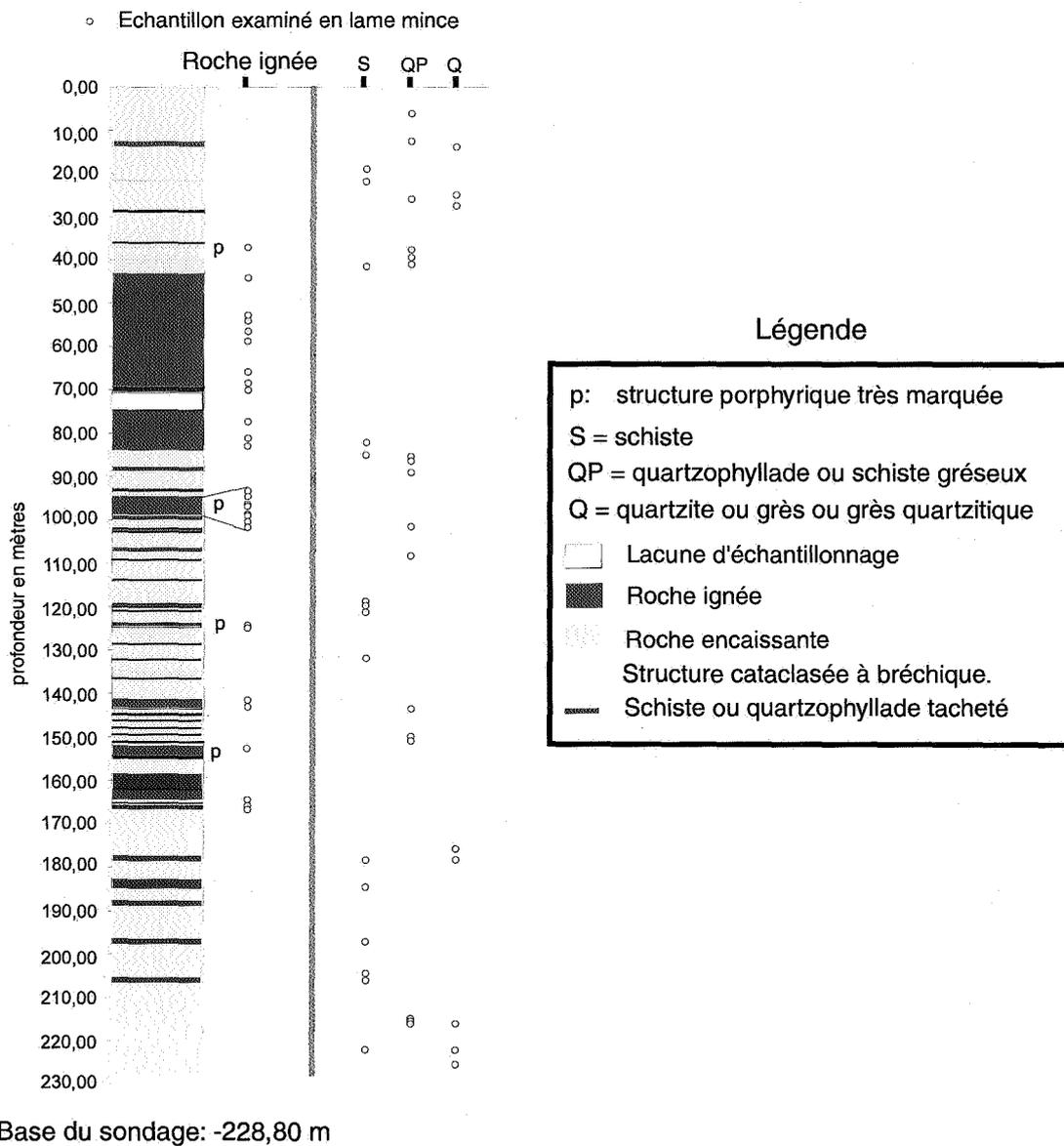


Figure 11. Sondage He 2 (228W624) : colonne lithologique simplifiée.

Sondage He 3 (228W625) Colonne lithologique simplifiée

X = 275.330,20 m
Y = 138.947,30 m
Z = 523,092 m
Direction: N91°E
Inclinaison: 60°E

- o Echantillon examiné en lame mince

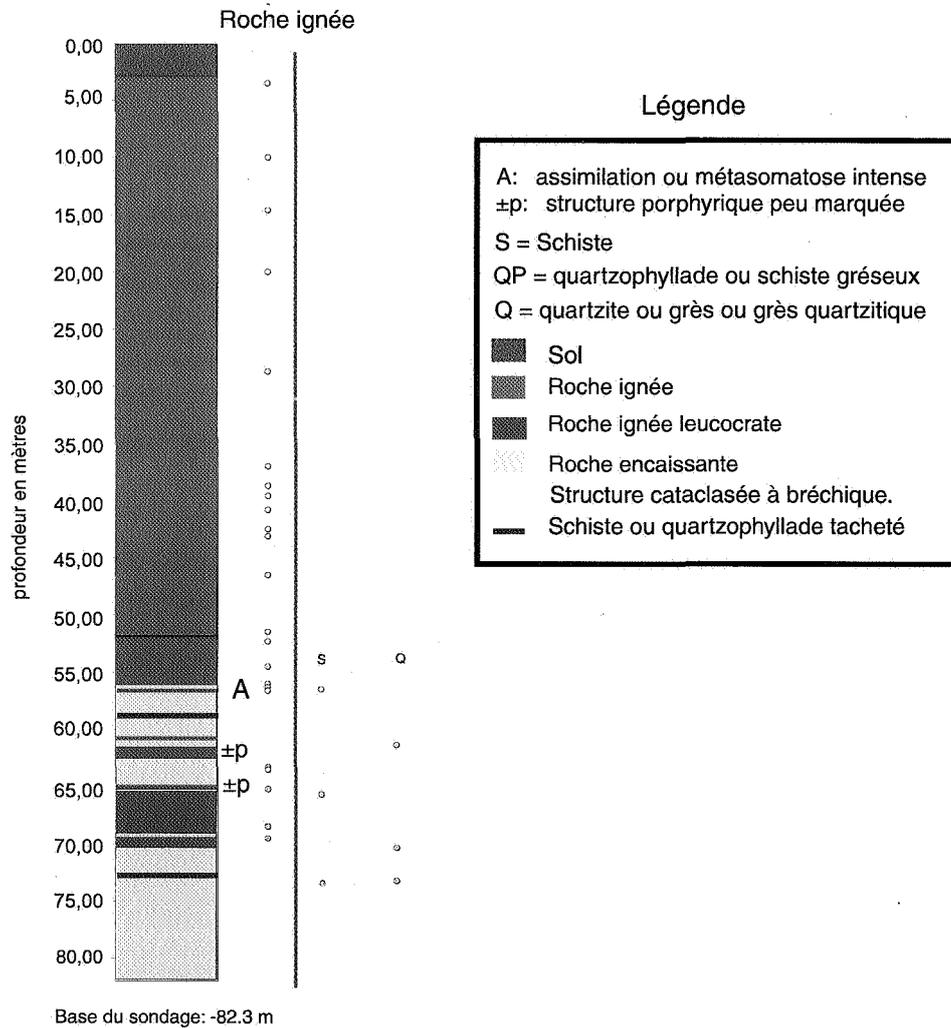


Figure 12. Sondage He 3 (228W625) : colonne lithologique simplifiée.

Sondage He 4 (228W626) Colonne lithologique simplifiée

X = 275.502,50 m
Y = 138.991,50 m
Z = 544,713 m
Direction: N92°W
Inclinaison: 60°W

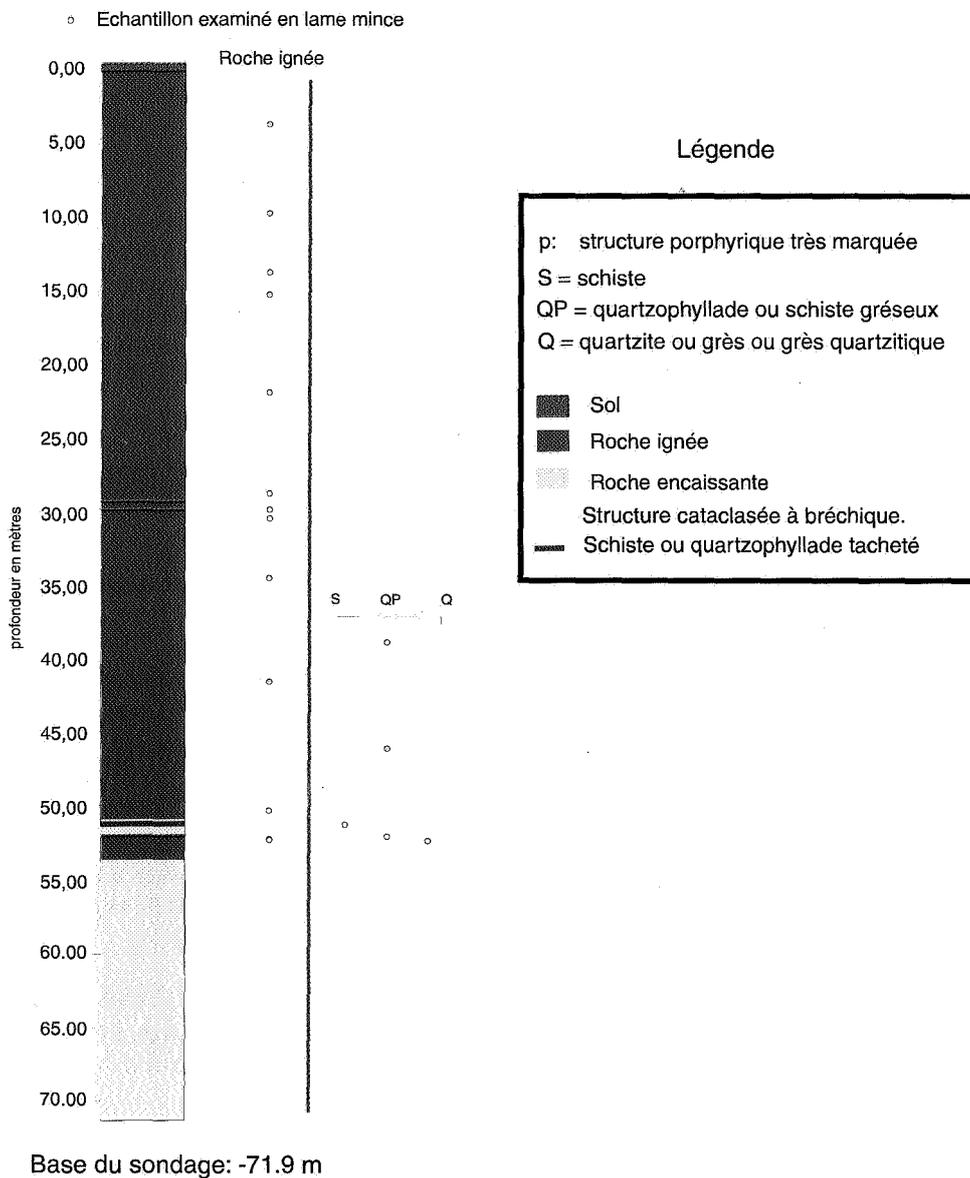


Figure 13. Sondage He 4 (228W626) : colonne lithologique simplifiée.

1.6. Conclusions basées sur les observations macroscopiques

La figure 14 présente une vue d'ensemble des données lithologiques principales pour les quatre sondages. Les roches ignées présentent en général une structure granulaire (hétéro ou équi-granulaire) sauf au contact supérieur (voir He 2) ou inférieur (voir He 1, He 2, He 3, He 4) avec l'encaissant métasédimentaire où la structure est franchement porphyrique avec occurrence de phénocristaux plagioclasiques pouvant être fortement zonés. Les zones de contact sont caractérisées généralement par des roches ignées montrant des signes de déformation et dont la structure cataclasée évolue vers une structure bréchique. La généralisation du phénomène pourrait suggérer que la roche magmatique formant l'enveloppe externe de l'intrusion a pu être déformée mécaniquement lors de la mise en place d'un magma en voie de solidification. Néanmoins, la présence de nombreuses roches porphyriques au contact de l'encaissant témoigne d'une intrusion de magma de haute température et relativement fluide. D'un point de vue génétique, la composition chimique intermédiaire des roches suggère la cristallisation d'un magma résiduel, à viscosité moyenne, probablement issu d'un magma plus basique par séparation des phases mafiques (cristallisation fractionnée).

Une déformation (variant probablement d'un caractère plastique lors de la mise en place du magma à un caractère cassant au stade postmagmatique), accompagnant la phase d'intrusion et de refroidissement de l'ensemble magmatique, peut expliquer l'existence de structures de contraintes qui peuvent se superposer aux structures cataclasées/bréchiques induites par les épisodes tectoniques cassants plus récents. Le refroidissement brutal au contact de l'encaissant pourrait également favoriser une cristallisation rapide avec effet de compression de la masse résultant en une fracturation plus ou moins intense du matériau solidifié. Un tel processus pourrait en conséquence préparer la roche ignée à des phénomènes locaux de décrochement (failles) sous l'effet de la poussée magmatique persistante. Ce mécanisme est suggéré par la présence d'une première population de nombreuses veinules et filonnets quartzo-feldspathiques et quartzitiques aux abords du contact. Cet ensemble initial de microfractures est peut-être sans relation avec l'épisode hydrothermal. Néanmoins, il prépare la roche magmatique pour la future circulation des fluides hydrothermaux tardimagmatiques. Le fait que le contact entre la roche magmatique et l'encaissant métamorphique soit presque toujours faillé supporte l'hypothèse d'une fracturation syn- ou légèrement postmagmatique qui est contemporaine du développement du système de veinules accompagnant l'épisode hydrothermal.

2. VARIATIONS DE LA COMPOSITION MINÉRALE OBSERVÉE SOUS LE MICROSCOPE

Les pourcentages des minéraux ont été estimés visuellement à l'aide d'un canevas tenant compte de la granularité et de la structure (équi-granulaire, hétérogène, porphyrique, ...) de la roche.

Les constituants minéraux principaux des roches traversées par les sondages sont similaires à ceux décrits pour les roches de surface. Les différences principales apparaissent au niveau de la proportion et du degré d'altération des minéraux. L'étude pétrographique montre des variations assez importantes au sein de l'intrusion de la Helle.

2.1. Sondage He 1 (228W623) - Figures 15, 16

La proportion de quartz varie de 0 à 65 % et la moyenne est de 21,9 %. Le sondage a recoupé des niveaux magmatiques pauvres ou totalement dépourvus de quartz à -30,00 m, à -32,50 m, à -62,37 m, à -66,50 m, à -67,40 m, à -72,40 m, à -75,40 m, à -76,20 m, à -76,85 m, à -79,10 m et à -86,20 m.

Le pourcentage de plagioclase varie de 15 à 95 % et la moyenne est de 57,9 %. Les roches les plus riches en plagioclase sont souvent les plus pauvres en quartz et sont situées à -30,00 m, à -66,50 m, à -67,40 m, à -72,40 m, à -75,40 m, à -76,20 m, à -76,85 m, à -79,10 m et à -86,20 m. Le plagioclase montre une légère tendance d'enrichissement vers le bas de la colonne magmatique recoupée par He 1.

La fraction de feldspath potassique varie de 0 à 20 % et la moyenne est de 2,4 %. Le diagramme de variation minéralogique montre que le feldspath potassique est principalement concentré dans la partie supérieure de la colonne magmatique, plus précisément dans la zone située entre la surface et -20 m. L'examen microscopique indique que les roches contenant du feldspath potassique sont localisées à 0,00 m, à -1,80 m, à -3,40 m, à -5,00 m, à -9,30 m, à -9,70 m, à -10,60 m, à -14,30 m, à -17,60 m, à -20,40 m, à -56,50 m et à -58,10 m.

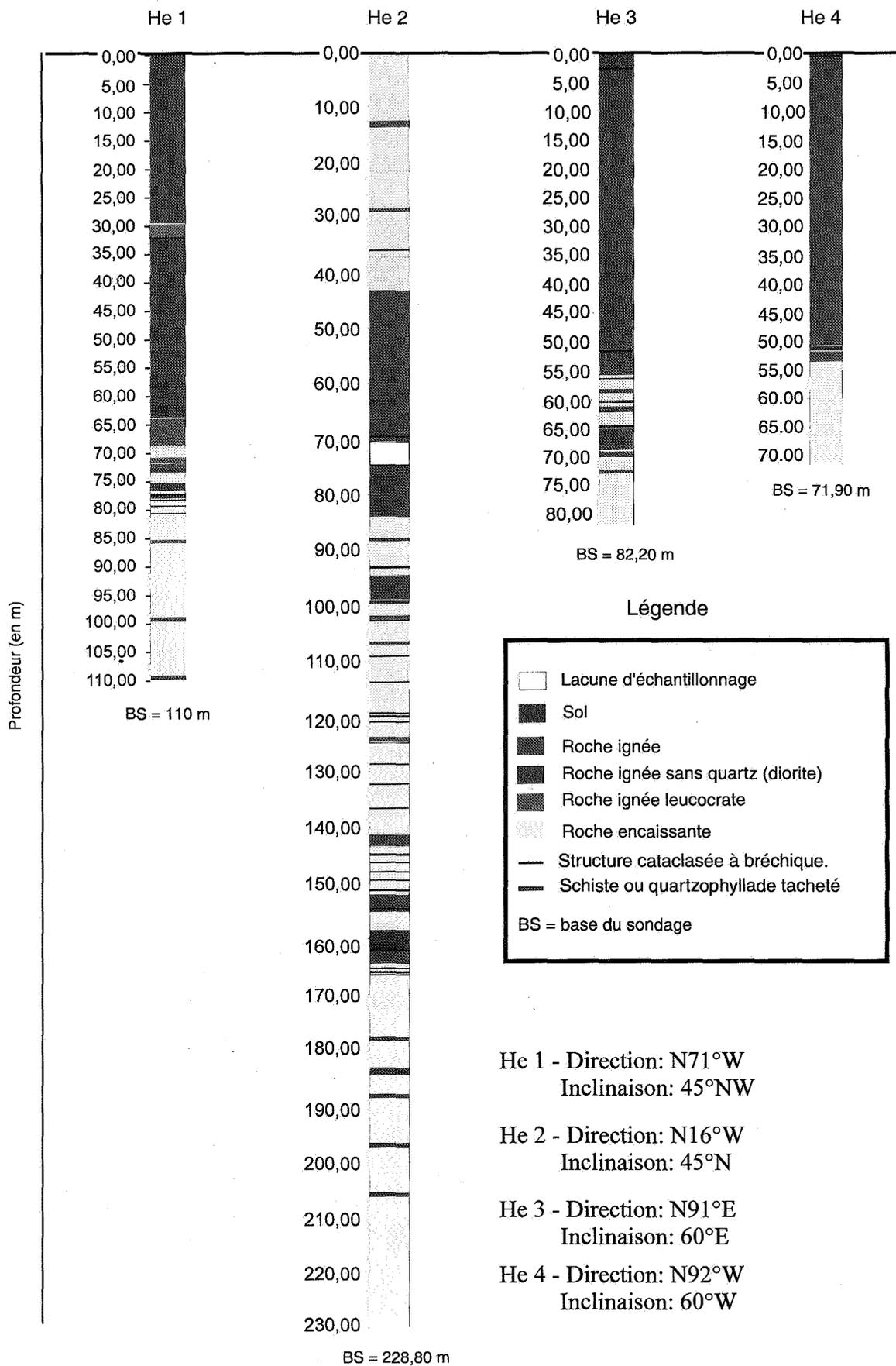


Figure 14. Vue d'ensemble des colonnes lithologiques des quatre sondages perçant l'intrusion de la Helle.

Sondage He 1 (228W623)

X = 275.438,60

Y = 138.938,60

Z = 521,343

Direction: N 71°W

Inclinaison: 45° NW

Log lithologique simplifié

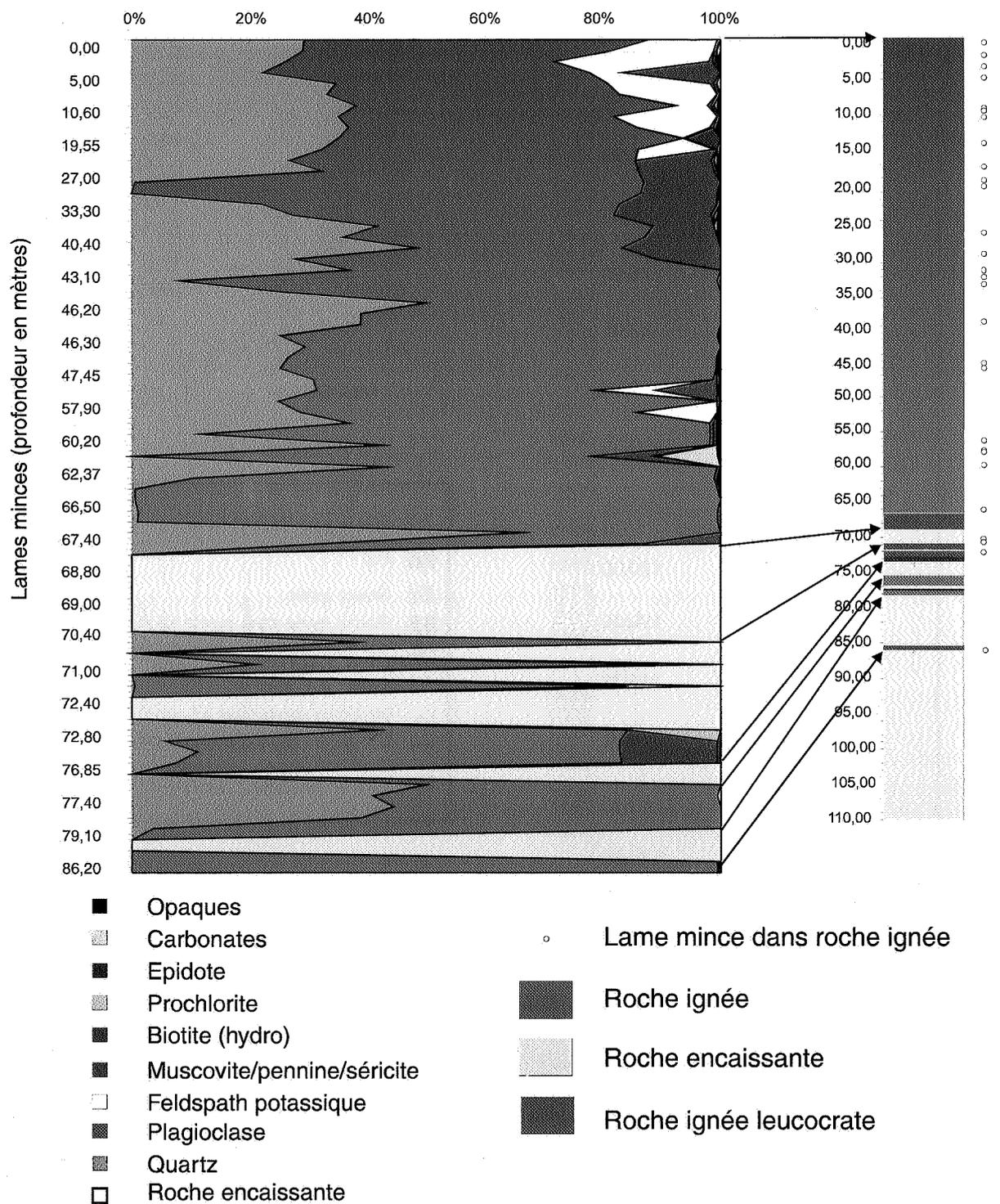


Figure 15. Sondage He 1 (228W623) : variations minéralogiques dans les roches ignées.

Sondage He 1 (228W623)
 X = 275.438,60
 Y = 138.938,60
 Z = 521,343
 Direction: N 71°W
 Inclinaison: 45° NW

Log lithologique simplifié

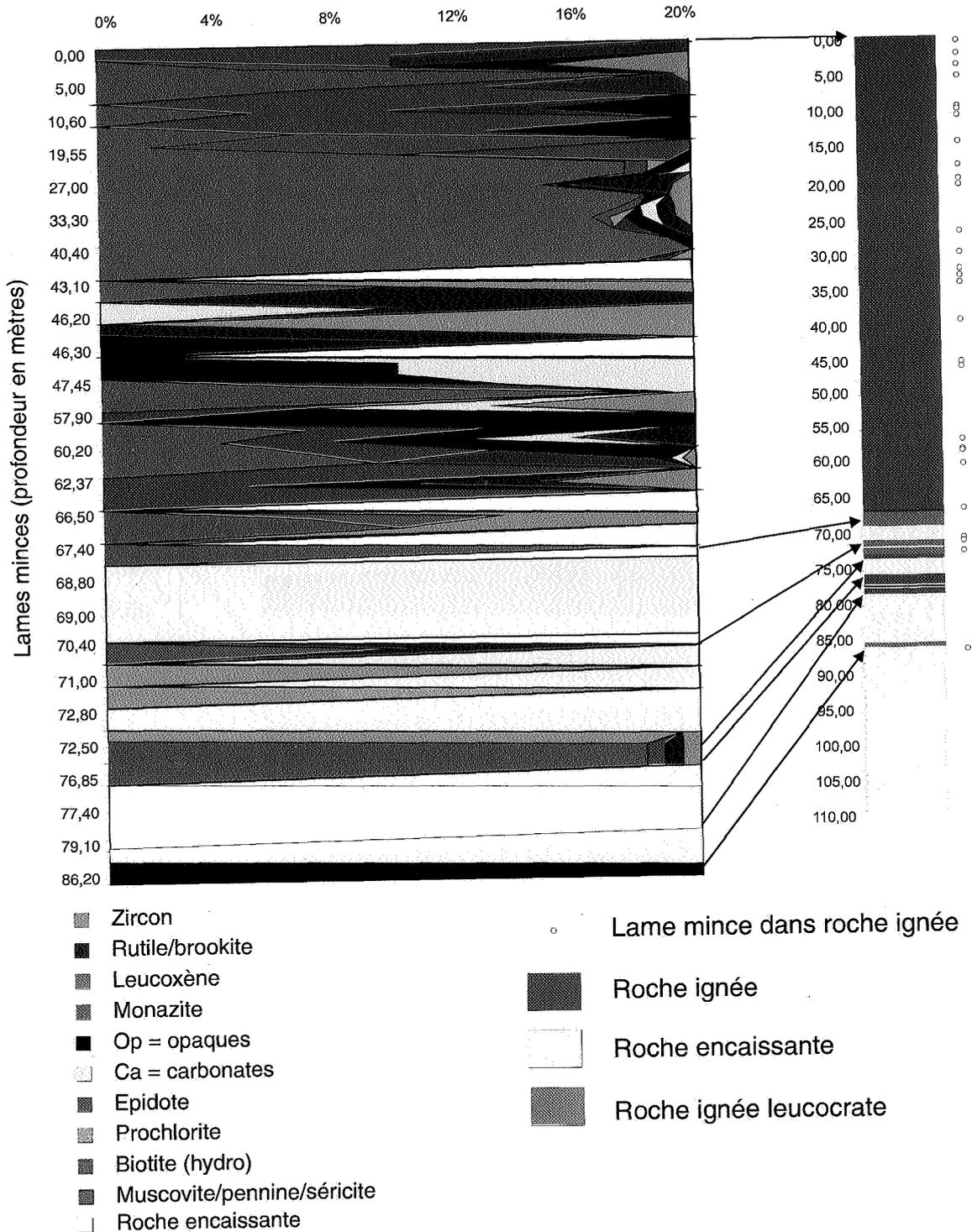


Figure 16. Sondage He 1 (228W623) : distribution des minéraux accessoires dans les roches ignées.

Sondage He 2 (228W624)
 X = 275.540,20
 Y = 138.823,00
 Z = 524,380
 Direction: N 16°W
 Inclinaison: 45° N

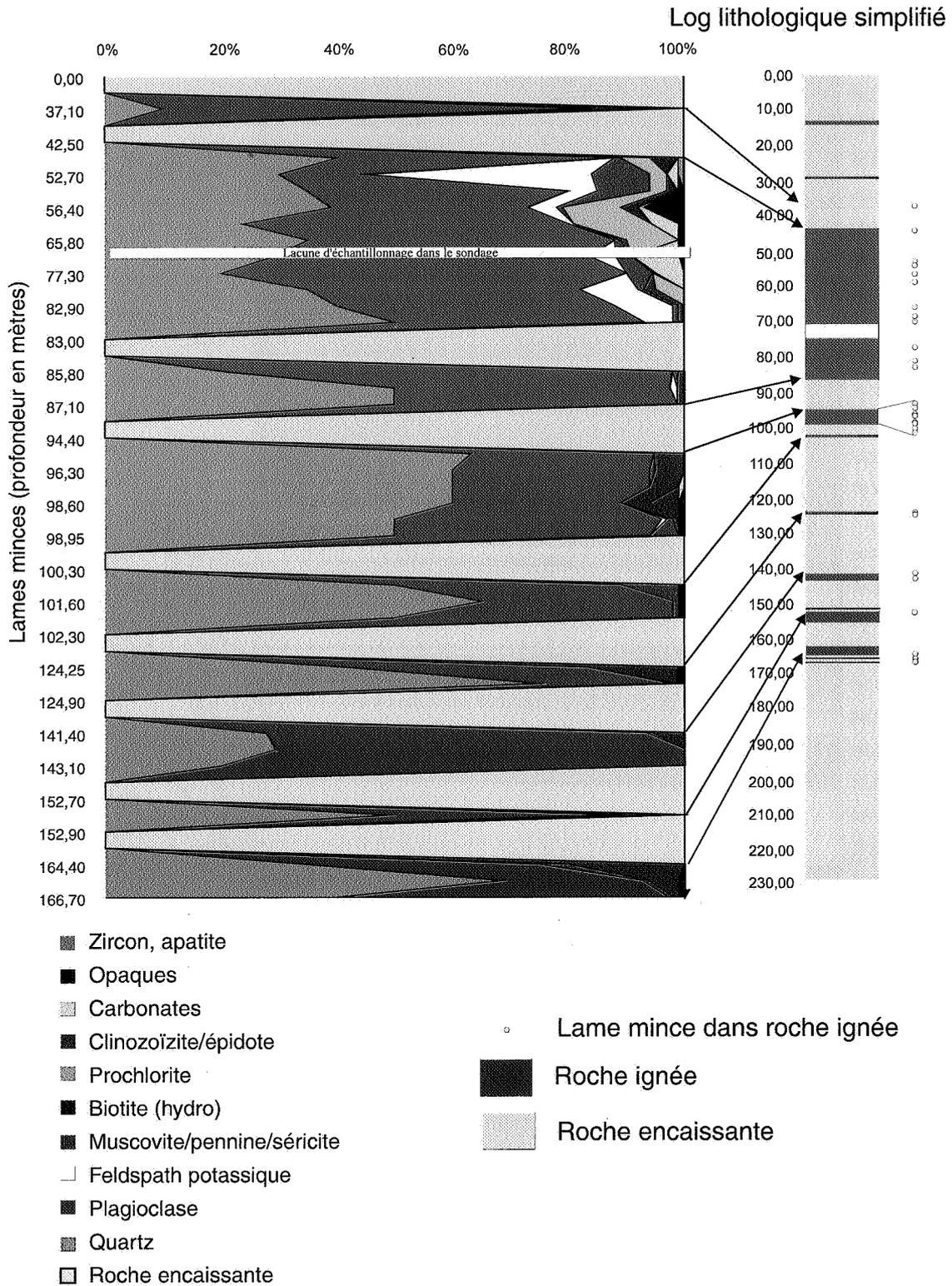
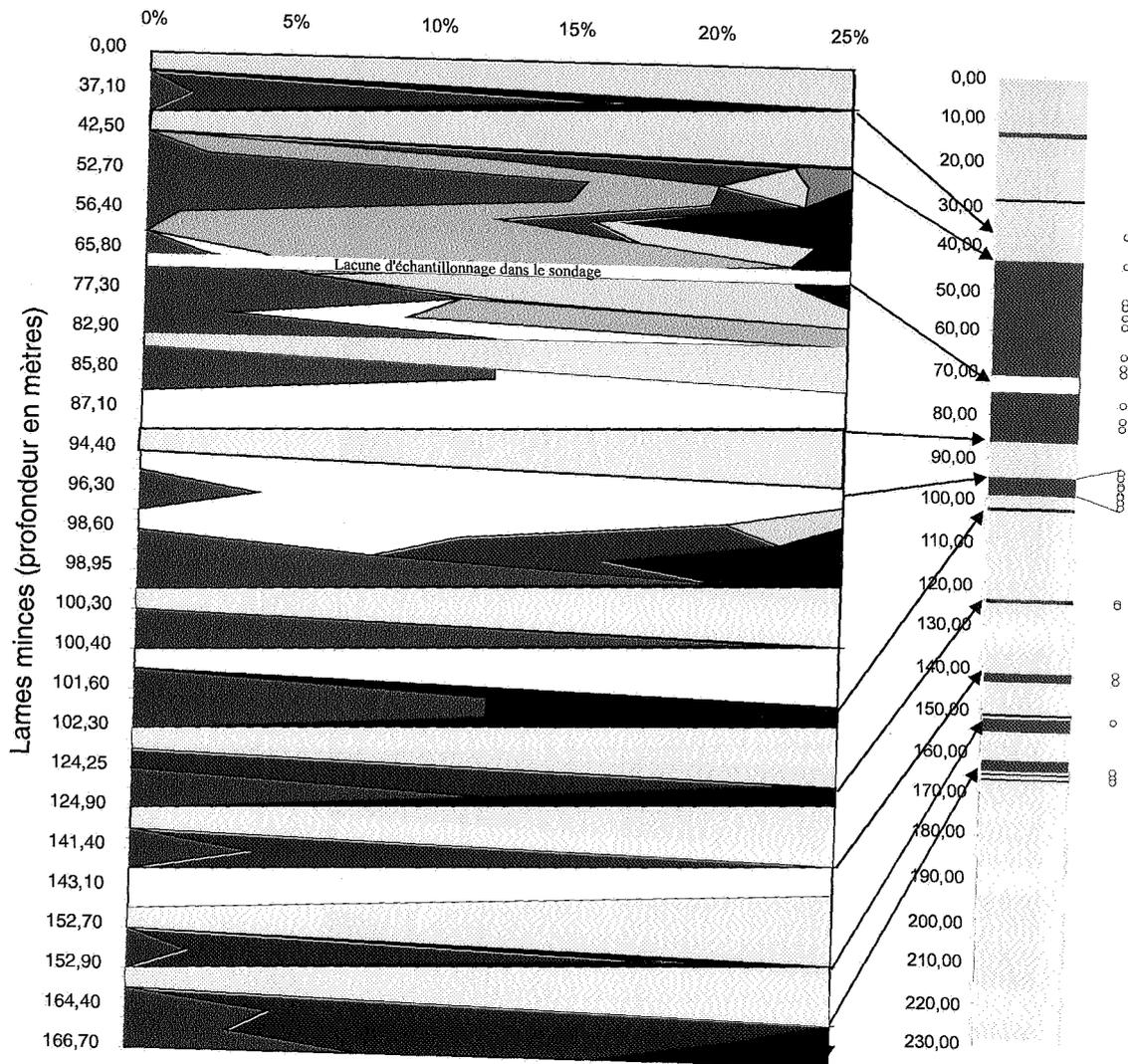


Figure 17. Sondage He 2 (228W624) : variations minéralogiques dans les roches ignées.

Sondage He 2 (228W624)
 X = 275.540,20
 Y = 138.823,00
 Z = 524,380
 Direction: N 16°W
 Inclinaison: 45° N

Log lithologique simplifié



- Opaques
- Zircon, apatite
- Carbonates
- Clinozoïzite/épidote
- Prochlorite
- Biotite (hydro)
- Muscovite/pennine/séricite
- Roche encaissante
- lame mince dans roche ignée
- Roche ignée
- Roche encaissante

Figure 18. Sondage He 2 (228W624) : distribution des minéraux accessoires dans les roches ignées.

Sondage He 3 (228W625)
 X = 275.330,20
 Y = 138.947,30
 Z = 523,090
 Direction: N 91°E
 Inclinaison: 60° E

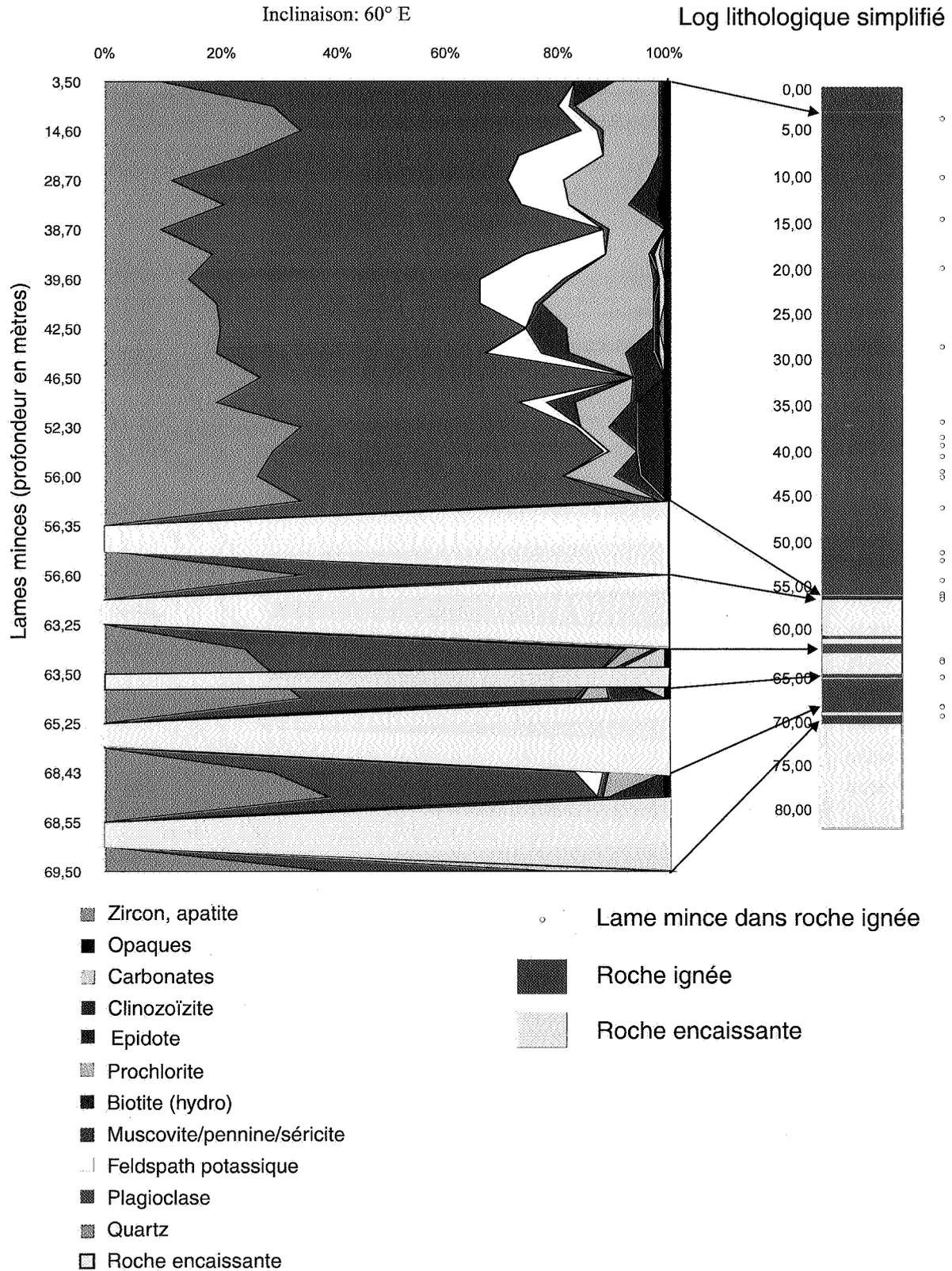


Figure 19. Sondage He 3 (228W625) : variations minéralogiques dans les roches ignées.

Sondage He 3 (228W625)
 X = 275.330,20
 Y = 138.947,30
 Z = 523,090
 Direction: N 91°E
 Inclinaison: 60° E

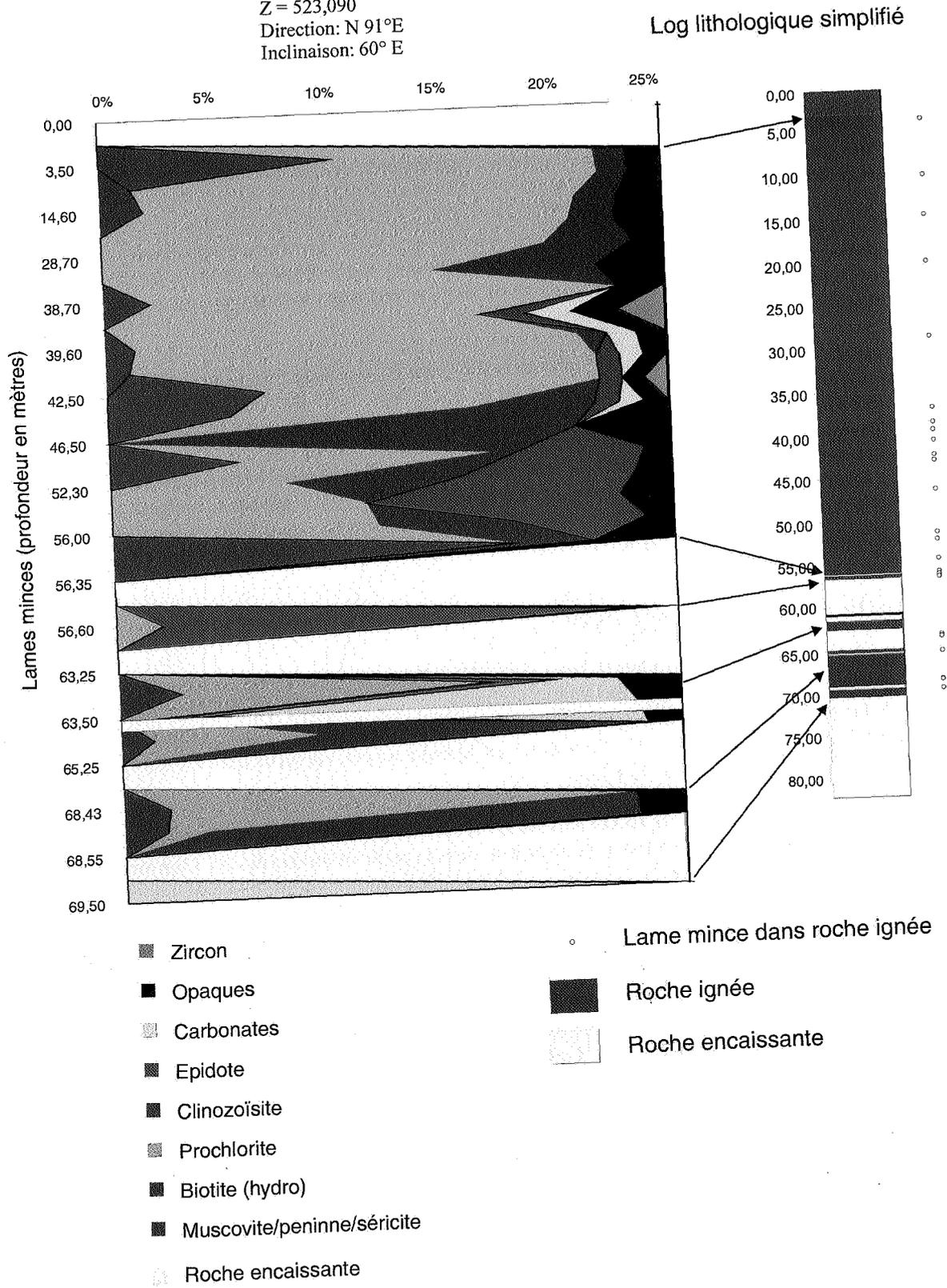


Figure 20. Sondage He 3 (228W625) : distribution des minéraux accessoires dans les roches ignées.

Les minéraux de la famille de l'épidote apparaissent principalement dans la zone supérieure (de 0 à -20 m) et au centre (de -50 à -66,50 m) de la colonne magmatique. A -62,37 m, on trouve une zone riche visiblement enrichie en Ca, caractérisée par une proportion relativement élevée de carbonates et d'épidote. La prochlorite est surtout abondante de -71,0 à -72,5 m.

2.2. Sondage He 2 (228W624) - Figures 17, 18

La proportion de quartz varie de 10 à 65 % et la moyenne est de 41 %. La quantité de quartz est légèrement plus élevée dans la partie inférieure du corps magmatique principal recoupé par He2. Cette tendance se confirme dans les dykes sous-jacents sauf entre -141,20 et -144,20 m. La fraction de plagioclase varie de 20 à 75 % et la moyenne est de 46,3 %.

Le feldspath potassique varie de 0 à 25 % et la moyenne est de 2,6 %. Le feldspath potassique est présent à -52,70 m (39 %), à -54,00 m (5 %), à -56,40 m (5 %), à -58,70 m (1 %), à -69,95 m (5 %), à -81,10 m (10 %), à -82,90 m (8 %) et à -86,10 m (1 %). Dans cette partie du corps magmatique, la tendance globale pour ce minéral est une diminution de la teneur du haut vers le bas.

La prochlorite et la biotite apparaissent presque exclusivement dans le corps magmatique principal. La prochlorite s'observe à -42,60 m, à -52,70 m, à -54,00 m, à -56,40 m, à -58,70 m, à -65,80 m et à -81,10 m. La biotite est présente à -65,80 m, à -81,10 m, à -82,90 m, à -85,80 m, à -87,10 m, à -94,50 m, à -96,30 m, à -96,80 m et à -98,60 m. Des carbonates sont épisodiquement présents de -52,70 à -77,30 m.

L'hydrobiotite semble plus concentrée dans le niveau magmatique situé juste sous le corps intrusif principal (de -94,50 m à -98,60 m) alors que les micas blancs sont quasi ubiquistes. Les minéraux opaques ainsi que les minéraux de la famille épidote/clinozoïsite semblent plus abondants dans les zones supérieures et inférieures de l'intrusion. Ponctuellement, on observe un enrichissement en épidote à -37,10 m et à -124,25 m et en carbonates à -69,95 m.

2.3. Sondage He 3 (228W625) - Figures 19, 20

La proportion de quartz varie de 10 à 40 % (moyenne : 25,9 %) et ne montre, tout comme les plagioclases (pourcentage variant de 40 à 79 % ; moyenne = 55,3 %), aucune tendance spatiale particulière. Quasi toutes les roches ignées du corps magmatique principal traversé par He 3 contiennent du feldspath potassique. Sa teneur varie de 0 à 15 % et la moyenne est de 4 %. Ce minéral est légèrement plus abondant dans la zone médiane et la masse ignée principale (de -20,00 m à -40,80 m).

Les variations de la prochlorite et de la biotite suivent des tendances parallèles à celle du feldspath potassique. Les minéraux de la famille de l'épidote sont plus abondants dans la partie inférieure du sill. Une quantité élevée de carbonates est observée à -69,50 m.

2.4. Sondage He 4 (228W626) - Figures 21, 22

La proportion de quartz varie de 10 à 35 % et la moyenne est de 21,1 %. La variation de ce minéral ne montre aucune tendance particulière au sein de la colonne de roche ignée traversée.

Le pourcentage de plagioclase varie de 37 à 84 % (moyenne = 55,7 %) et ne présente aucune évolution particulière des teneurs.

Le feldspath potassique varie de 0 à 25 m et la moyenne est de 6,9 %. Ce minéral est surtout fréquent de 0 à -22 m.

La distribution de la prochlorite suit celle du feldspath potassique et est particulièrement abondante dans les 20 premiers mètres du sondage. Une roche riche en épidote existe à -30,60 m. La biotite est inexistante dans les roches ignées traversées par ce sondage.

2.5. Veinules et filonnets - Figures 23, 24

La description de la minéralogie identifiable par diascopie est brève étant donné l'homogénéité des paragenèses. La composition et la teneur des minéraux opaques varient plus largement. C'est pourquoi la distribution de ces derniers sera examinée ultérieurement plus en détail.

2.5.1. Sondage He 1 (228W623) - Figure 23

Les constituants minéralogiques majeurs des veinules de la roche ignée sont le quartz, les opaques, les micas blancs (muscovite/séricite), la prochlorite, les carbonates, les feldspaths et l'épidote/clinozoïsite. Le feldspath potassique est localisé de -45,0 m à -65,0 m. La distribution du plagioclase est plus dispersée.

2.5.2. Sondage He 2 (228W624) - Figure 24

La quantité de veinules est beaucoup moins importante que dans le sondage He 1. Quartz, micas blanc et carbonates sont les minéraux les plus représentés.

2.6. Synthèse et interprétation des observations microscopiques

En moyenne, la proportion de quartz est plus élevée dans les roches ignées recoupées par le sondage He 2 alors que c'est l'inverse pour le plagioclase. Le feldspath potassique est particulièrement abondant dans les roches traversées par le sondage He 3 et surtout He 4. En général, on observe que le feldspath potassique est surtout présent dans la masse principale du corps magmatique.

Les micas blancs sont ubiquistes. L'hydrobiotite est absente dans le sondage He 4. La prochlorite est surtout abondante dans les sondages He 3 et He 4 et montre une distribution similaire à celle du feldspath potassique. Les autres minéraux présentent des variations moins importantes dans les roches ignées recoupées par les quatre sondages.

La figure 25 illustre la distribution des groupements des teneurs (populations statistiques) pour les trois composants felsiques principaux. Les graphiques montrent l'existence d'une variation latérale et verticale assez importante au sein du corps intrusif. Pour les minéraux leucocrates, essentiellement feldspaths et quartz, la variation la plus significative est observée pour le feldspath potassique. Ce dernier minéral est généralement plus fréquent dans la partie supérieure de la séquence magmatique principale recoupée par les sondages plutôt que dans les dykes sous-jacents. Par ailleurs, l'analyse des teneurs moyennes a montré que les parties NE (He 4) et SW (He 3) de l'intrusion sont approximativement deux fois plus riches en feldspath potassique que les zones centrales (He 1) et sud (He 2).

Examinons à présent les variations des micas et minéraux accessoires (figures 16, 18, 20, 22). La partie médiane de l'intrusion (recoupée par He 1) est sensiblement plus riche en micas blancs (séricite/muscovite) alors que la prochlorite est nettement plus abondante dans les parties E (He 4) et W (He 3). En revanche, les minéraux de la famille de l'épidote sont moins abondants dans les roches ignées recoupées par He 1. En allant du N vers le S (de He 4 vers He 2), la tendance à une augmentation de la proportion d'hydrobiotite et de minéraux opaques et, dans une moindre mesure, de micas blancs et d'épidote. La biotite est absente dans les roches ignées de la partie E (He 4). Au S (dans He 2), les carbonates sont surtout situés dans la partie supérieure de la colonne. Ils sont absents dans He 4, peu abondants dans He 1 et sont principalement observés à l'W, dans la partie inférieure recoupée par He 3.

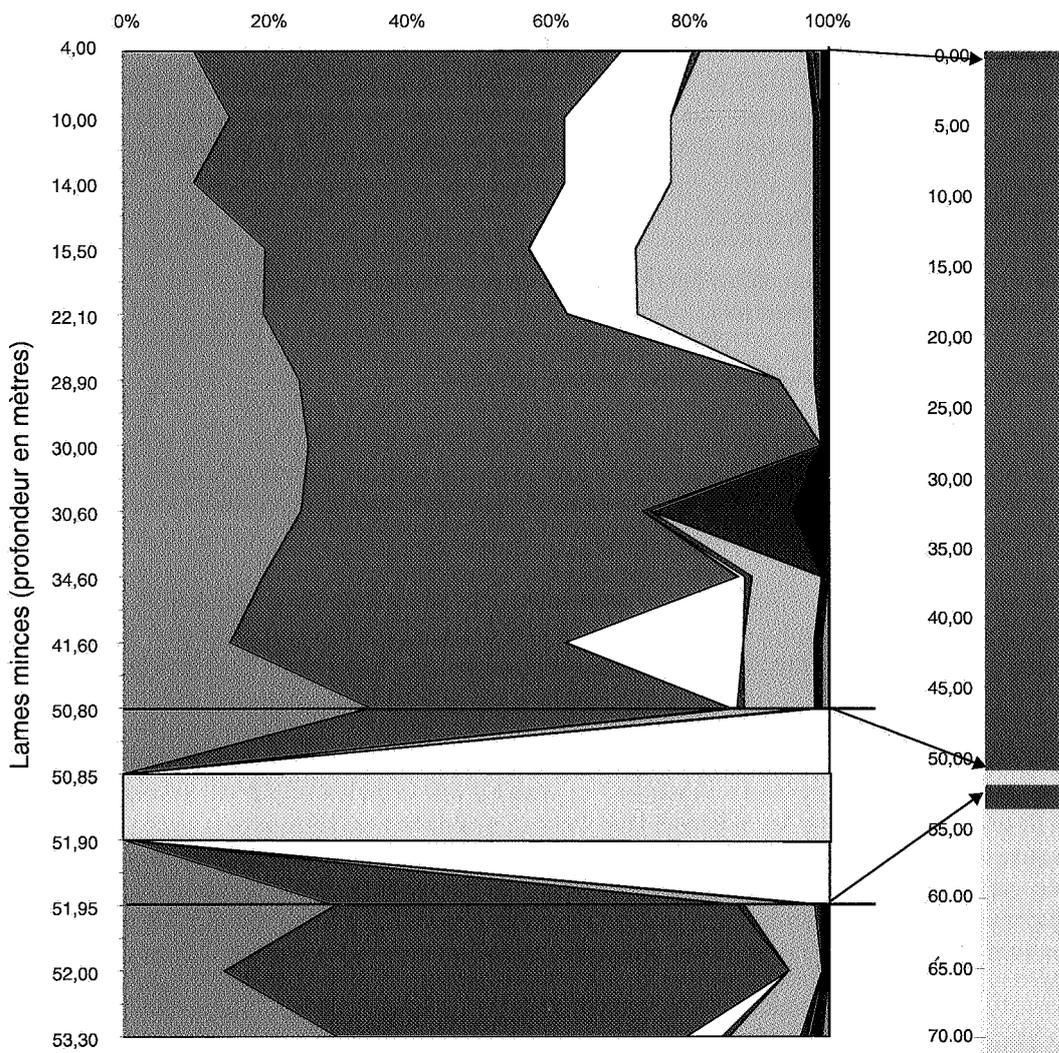
Les observations microscopiques indiquent donc que l'intrusion de la Helle présente une variation minéralogique assez importante, aussi bien latéralement que verticalement.

3. CLASSIFICATION DES ROCHES MAGMATIQUES CAROTTEES

La nomenclature choisie pour la classification des roches magmatiques provenant des sondages de la Helle est celle de Streckeisen (1973) parce qu'elle est la plus facile à mettre en oeuvre à partir des compositions minéralogiques modales obtenues par examen microscopique. Ce type de classification est en outre généralement assez proche des classifications pétrochimiques obtenues à partir des données chimiques (utilisation dans ce cas des

Sondage He 4 (228W626)
 X = 275.502,50
 Y = 138.991,50
 Z = 544,710
 Direction: N 92°W
 Inclinaison: 60° W

Log lithologique simplifié



- Zircon, apatite
- Opaques
- Epidote
- Clinozoïzite
- Prochlorite
- Biotite (hydro)
- Muscovite/pennine/séricite
- Feldspath potassique
- Plagioclase
- Quartz
- Roche encaissante
- lame mince dans roche ignée
- Roche ignée
- Roche encaissante

Figure 21. Sondage He 4 (228W626) : variations minéralogiques dans les roches ignées.

Sondage He 4 (228W626)
 X = 275.502,50
 Y = 138.991,50
 Z = 544,710
 Direction: N 92°W
 Inclinaison: 60° W

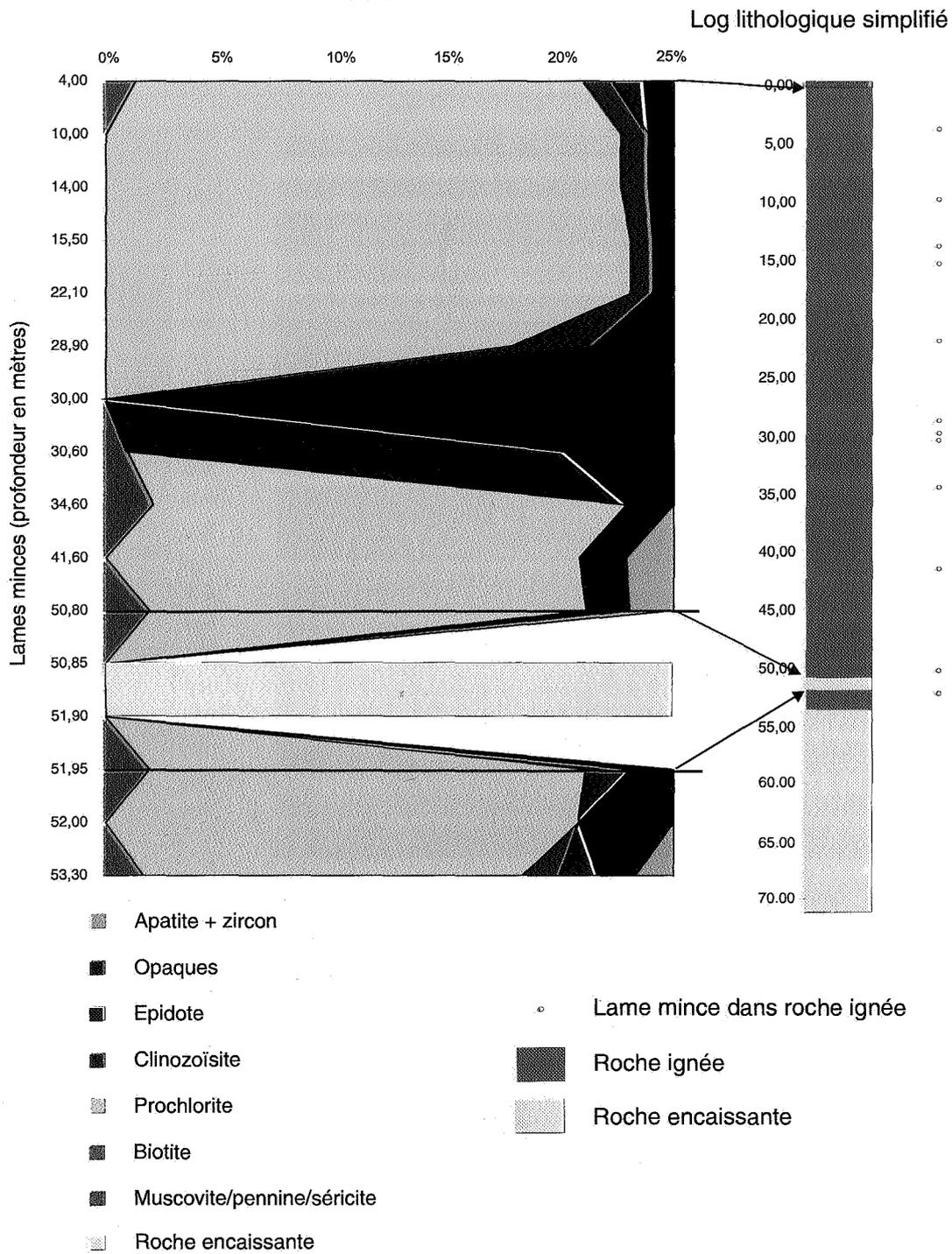


Figure 22. Sondage He 4 (228W626) : distribution des minéraux accessoires dans les roches ignées.

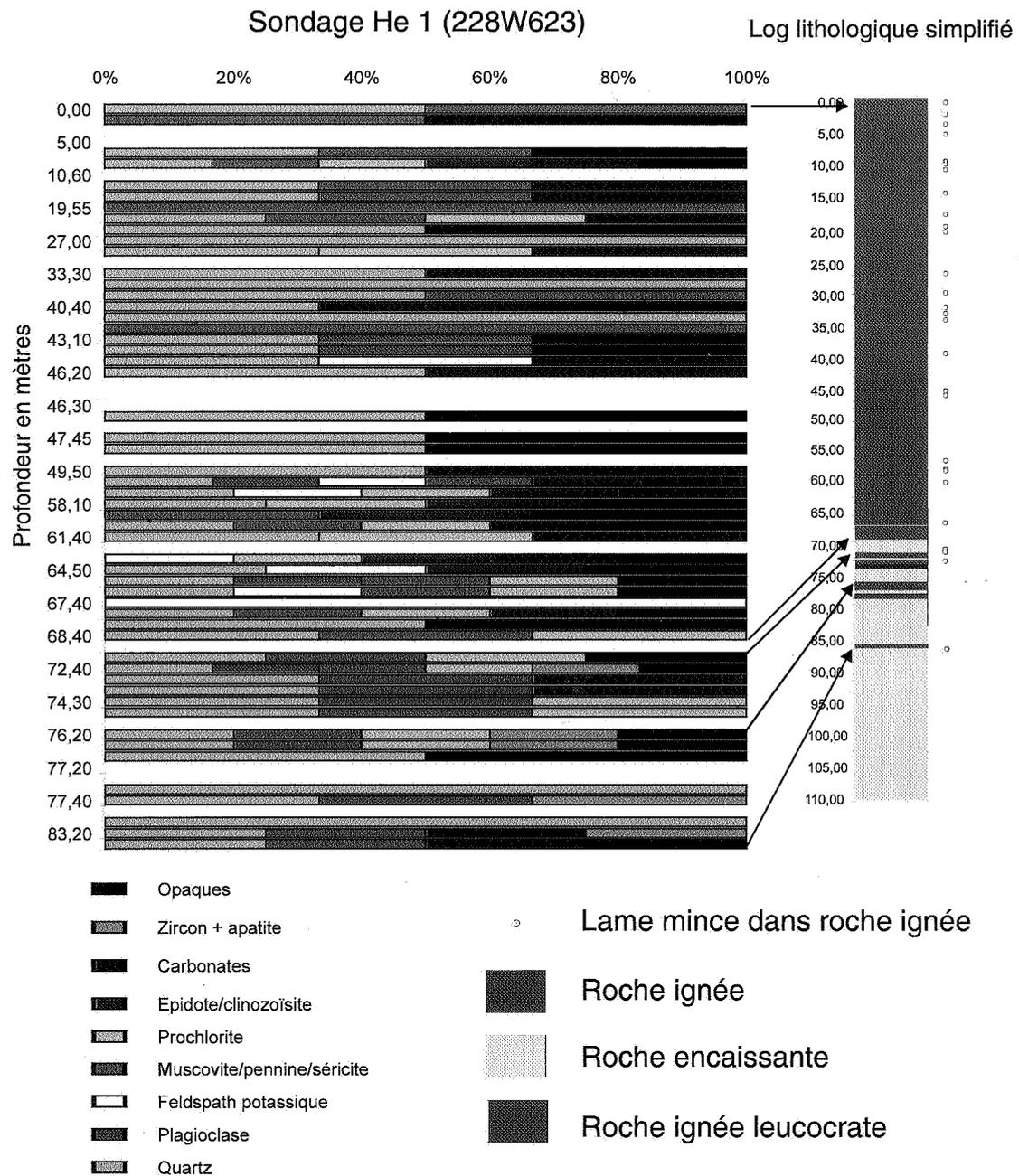


Figure 23. Sondage He 1 (228W623) : variations minéralogiques dans les veinules recoupant les roches ignées.

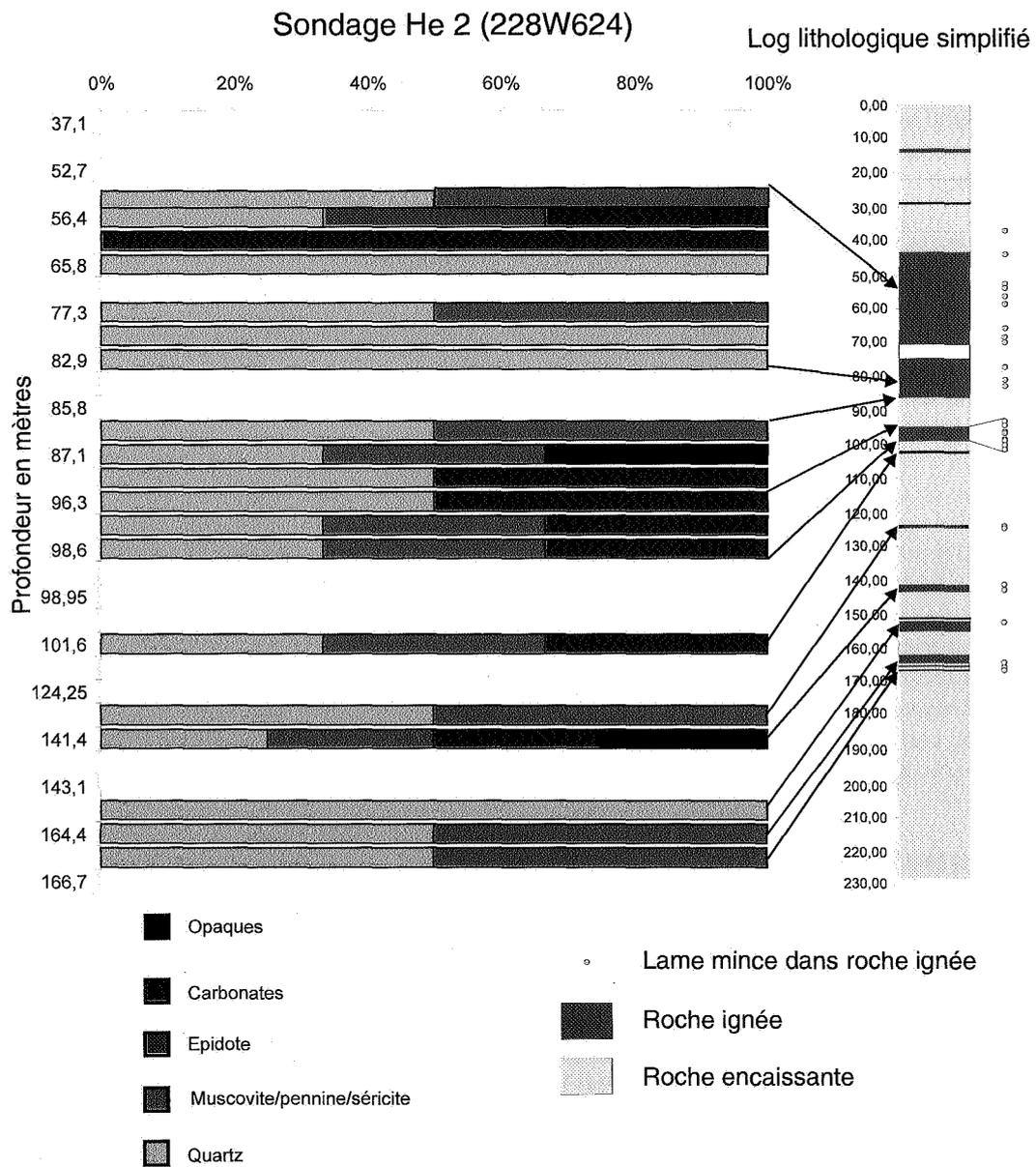


Figure 24. Sondage He 2 (228W624) : variations minéralogiques dans les veinules recoupant les roches ignées.

normes CIPW), et peut généralement fournir des informations utilisables pour une interprétation pétrogénétique. Le pôle alcalin (feldspaths alcalins) a néanmoins été réduit au pôle feldspath potassique pour deux raisons :

- d'une part, il est difficile de quantifier l'albite souvent mêlé au plagioclase sous forme de petits grains interstitiels ;
- d'autre part, l'examen microscopique des roches montre que l'albite est surtout un minéral issu de l'altération hydrothermale postmagmatique par enrichissement de Na_2O et SiO_2 .

Pour cette dernière raison, l'albite ne sera par conséquent pas considérée comme un minéral de cristallisation magmatique de première importance.

La figure 26a montre que les roches plutoniques de la Helle ont une composition minéralogique variée allant de la diorite et de monzodiorite à la granodiorite quartzique en passant par la granodiorite et la diorite quartzique. Les roches sont pour la plupart situées dans le champ des diorites quartziques (trondhjemite et tonalite) et dans une moindre mesure dans celui des granodiorites. Par ailleurs, il existe une roche à composition granitique dans le sondage He 1.

La figure 26b illustre les champs englobant les variations minéralogiques de chaque sondage.

Les roches du sondage He 1 sont pour la plupart des diorites quartziques ainsi que quelques granodiorites riches en quartz et des granodiorites quartziques.

Les roches du sondage He 2 sont surtout des diorites quartziques, des granodiorites pauvres en quartz ainsi que quelques monzodiorites et diorites.

Les roches du sondage He 3 sont principalement des diorites quartziques ainsi que quelques granodiorites pauvres en quartz, des monzodiorites et une diorite.

Les roches du sondage He 4 sont formées en grande partie par des diorites quartziques, des granodiorites moyennement riches en quartz ainsi que par quelques diorites et granodiorites quartziques.

La plupart des roches ignées de la Helle sont des diorites quartziques. Le deuxième groupe pétrographique important est représenté par des granodiorites. Enfin, les trois groupes pétrographiques accessoires sont d'égale importance et sont formés par des diorites, des monzodiorites et des granodiorites quartziques.

Les données de la fig. 26b montrent qu'il existe une certaine évolution pétrographique au sein de la partie de l'intrusion reconnue par sondage. On observe que les roches ignées recoupées par He 2, He 3 et He 4 sont relativement plus riches en feldspaths (plagioclase + feldspath potassique) que les roches de He 1. Comme nous l'avons déjà signalé au point 2.6, le feldspath potassique est distinctement plus abondant dans He 3 et He 4. Spatialement, ces variations semblent correspondre à un enrichissement feldspathique à la périphérie du corps intrusif, et particulièrement à une importante augmentation de feldspath potassique dans les parties NE et SW.

4. LITHOGEOCHIMIE

Des analyses chimiques des éléments majeurs ont été réalisées sur quatre échantillons de roche ignée. Les résultats dus à Dannenberg et Holzapfel (1898), Ronchesne (1930), Van Wambeke (1955) et Schreyer et Abraham (1982) sont présentés à la figure 27. Nous les commenterons dans la troisième partie de ce travail.

Les logs géochimiques des éléments métalliques des sondages de la Helle ont été élaborés par Martin et Lecomte (1977) pour le sondage He 1 et Fodé (1981) pour les sondages He 2 et He 4.

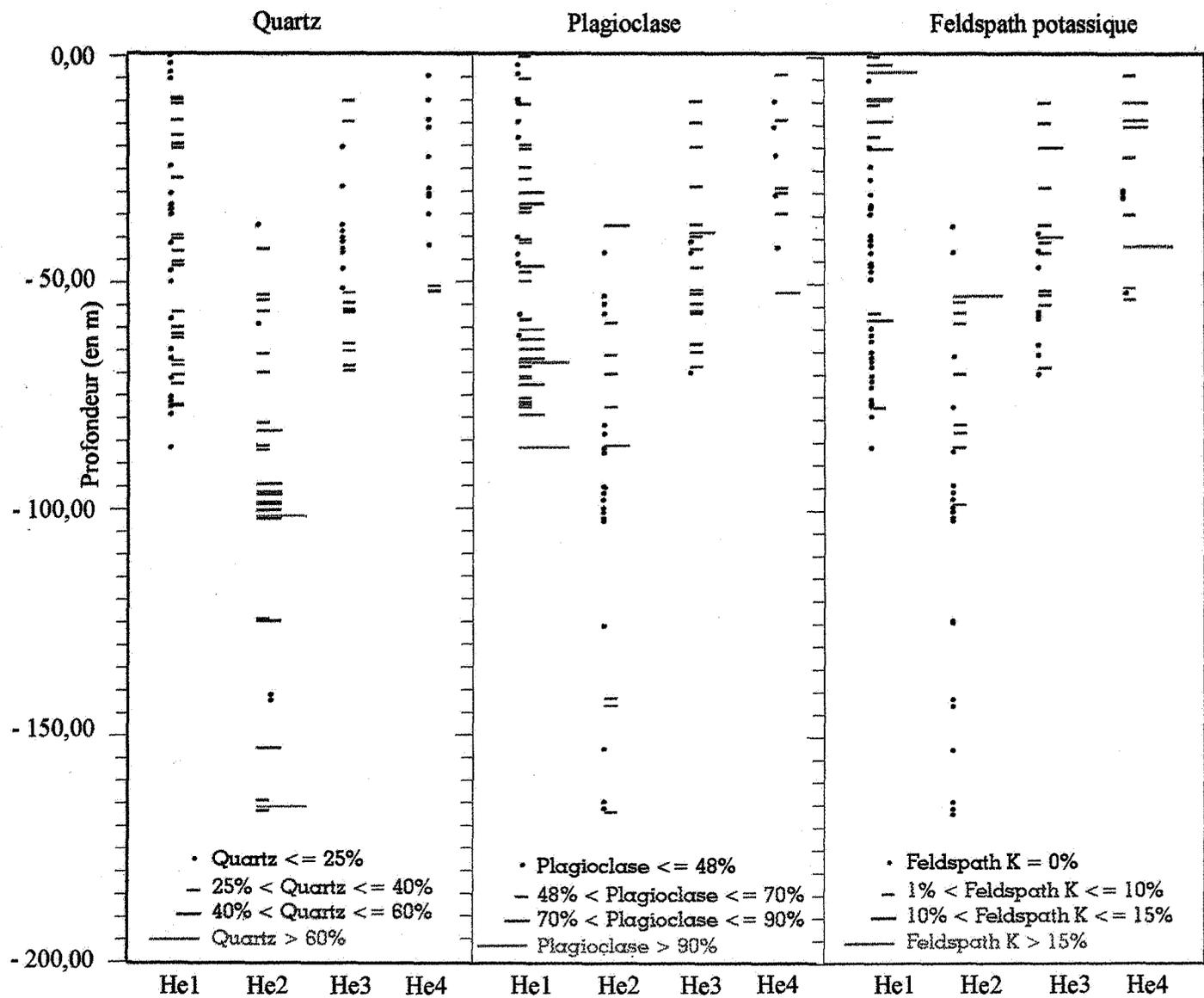
La distribution de Fe, Cu, Pb, Zn, Co, Ni, Mn, Co dans le sondage He 1 (228W623) est représentée aux figures 28 et 29. 111 échantillons ont été prélevés par passe métrique. Les métaux ont été dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique après mise en solution par attaque triacide (HF , HCl , HNO_3) avec reprise à HCl 10%.

La variation des éléments est la suivante :

Fe : il est nettement plus élevé dans la roche sédimentaire que dans la roche ignée. L'échantillon de la cote -93 m est très riche en Fe parce que très minéralisé en pyrite (de 93,10 à 93,30 m : présence de nodules d'aspect cellulaire et de taille nuculaire).

Mn : sa distribution est assez régulière et homogène dans tout le sondage. On ne relève pas de différence majeure entre les lithologies sédimentaires et magmatiques.

Figure 25. Distribution des classes statistiques majeures pour le quartz, le plagioclase et le feldspath potassique.



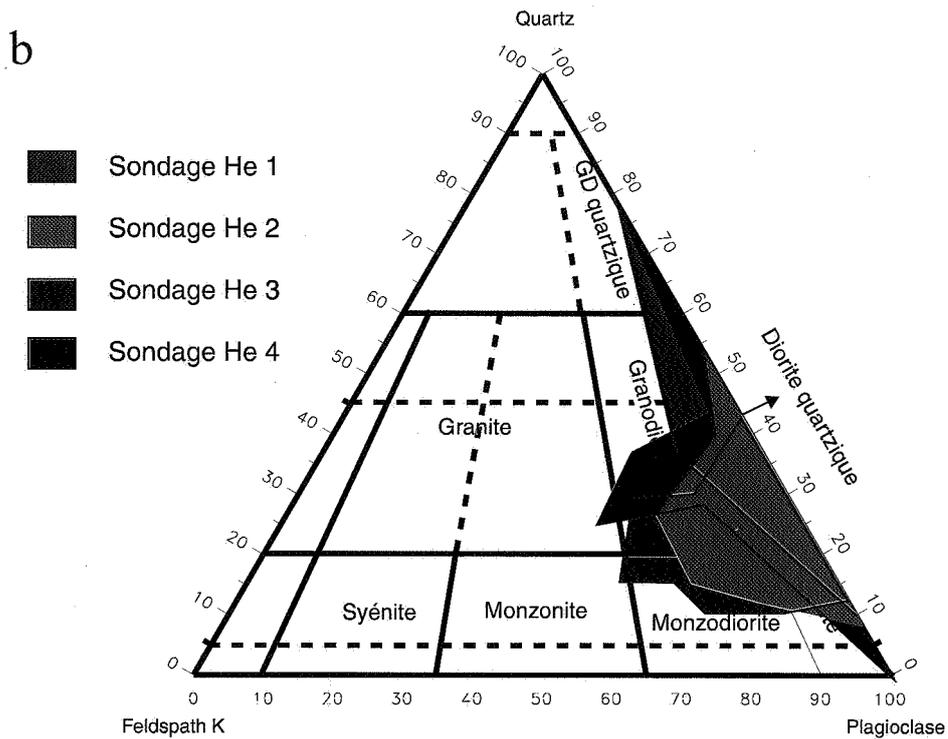
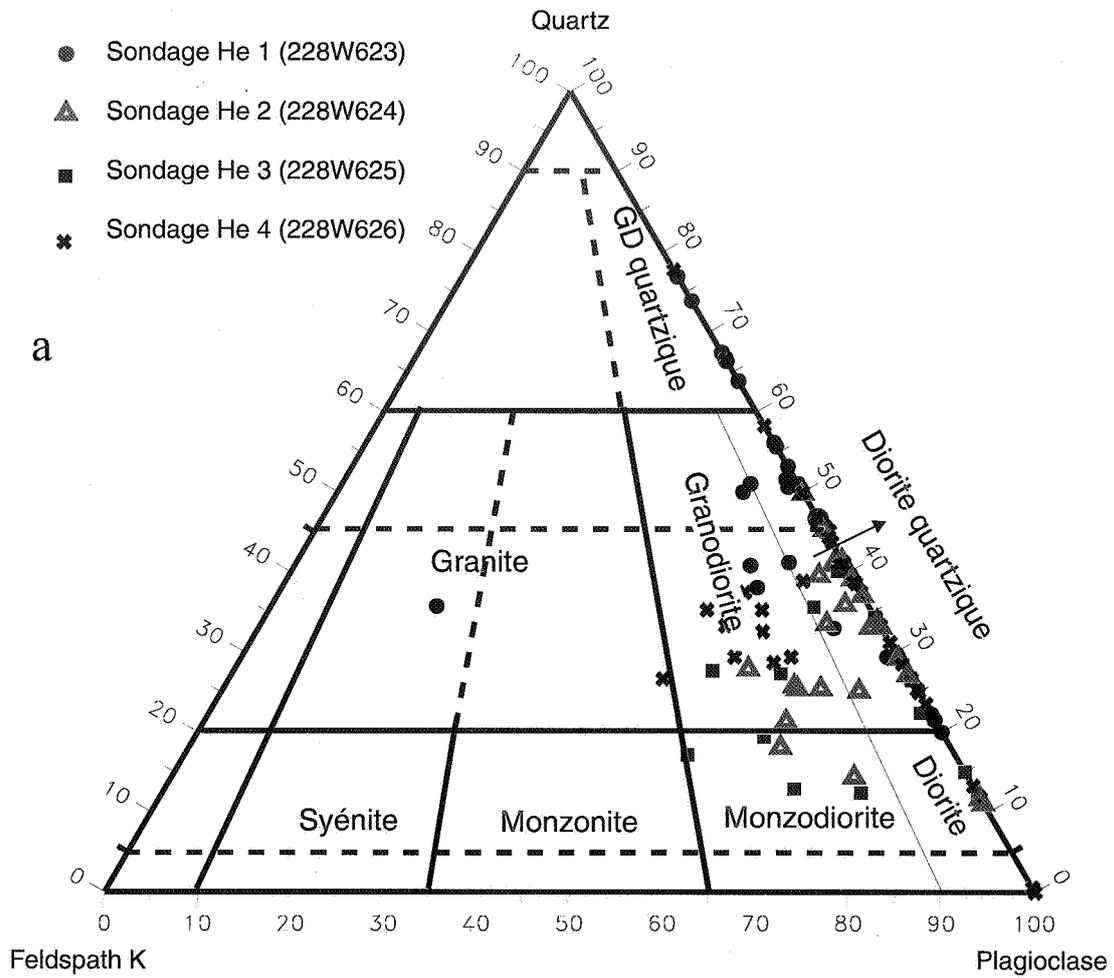
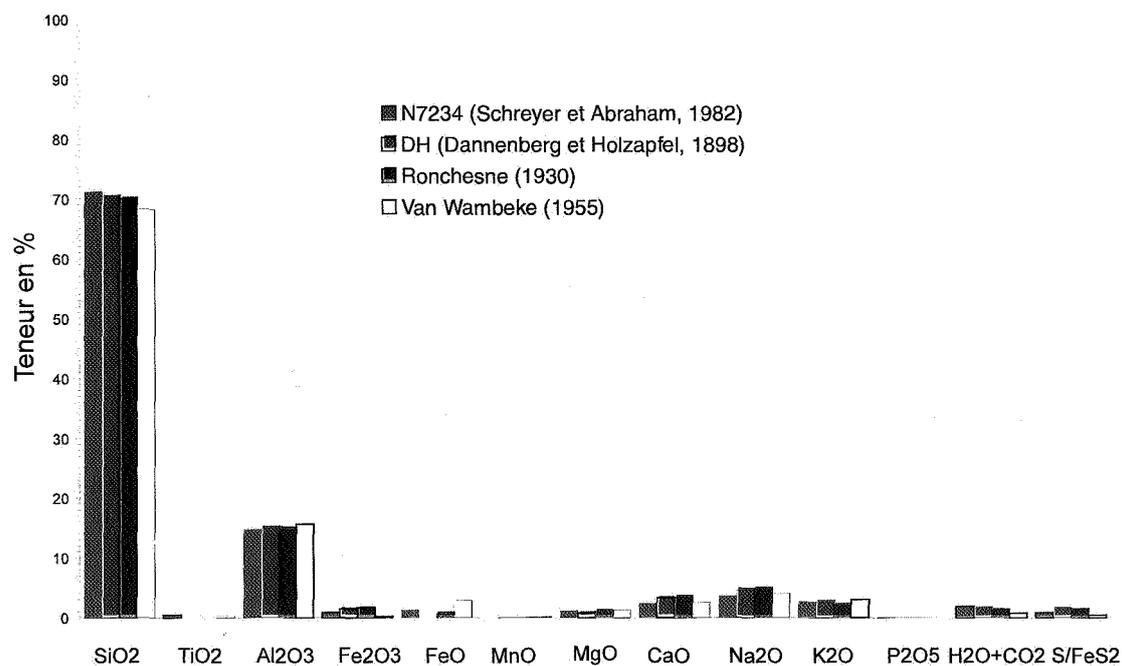


Figure 26. a. Partie supérieure. Classification des roches ignées de la Helle sur base de la nomenclature de Streckeisen (1973).
 b. Partie inférieure. Illustration des champs de composition pour chaque sondage.



Année	1982	1898	1930	1955
SiO ₂	71,2	70,28	70,06	68,28
TiO ₂	0,4	n.a.	n.a.	0,37
Al ₂ O ₃	14,7	14,93	14,86	15,59
Fe ₂ O ₃	0,8	1,42	1,64	0,2
FeO	1,2	n.a.	0,63	2,9
MnO	0,02	0,06	0,06	0,18
MgO	1,1	0,76	1,02	1,37
CaO	2,3	3,29	3,45	2,52
Na ₂ O	3,6	4,57	4,83	3,98
K ₂ O	2,6	2,62	2,06	3,03
P ₂ O ₅	0,04	n.a.	n.a.	n.a.
H ₂ O+	1,4	1,44	1,24	0,77
H ₂ O-				
CO ₂				
S	0,8	1,34	1,28	0,44
Total	100,64	100,71	101,13	99,63

Figure 27. Analyses chimiques (éléments majeurs) de quatre roches magmatiques de la Helle.

Co : idem que pour Mn.

Ni : les teneurs différencient nettement les lithologies sédimentaires et magmatiques. Sa distribution est similaire à celle de Fe. La variation de Ni est plus grande dans l'encaissant.

Zn : la roche intrusive est plus riche en Zn que les métasédiments.

Pb : la distribution de cet élément se subdivise en trois parties. Dans les 44 premiers mètres, les teneurs sont basses et très homogènes alors que de -44 à -54 m, elles sont plus élevées et plus dispersées. A partir de -54 m, les teneurs redeviennent plus faibles et plus hétérogènes.

Cu : la teneur de ce métal est cinq fois plus élevée dans la roche ignée que dans la roche encaissante. Sa dispersion est aussi plus large dans la roche intrusive.

Mo : Les teneurs sont en général plus élevées dans la roche intrusive mais sont aussi très variables.

Fodé (1981) a effectué une étude géochimique dans la région de la roche ignée de la Helle portant sur des roches ignées non altérées, sur des roches ignées altérées, sur des sols et sur des sédiments de ruisseau. Les logs géochimiques qu'il a réalisés sur les sondages He 2 et He 4 sont montrés respectivement aux figures 30 et 31. Ses conclusions peuvent être résumées comme suit :

- Les roches ignées très altérées (arènes) contiennent des teneurs en Pb, Zn, Ni et Fe plus élevées que dans les roches non altérées ;
- A l'inverse, la teneur moyenne en Cu est plus faible dans les roches ignées altérées (arènes) que dans les roches ignées saines ;
- La distribution très irrégulière des teneurs en Cu, Pb, Zn, Co, Ni et Mo ne semble suivre aucune tendance particulière dans les roches ignées des sondages He 2 et He 4 (figs 30, 31). La présence de sulfures disséminés et l'hétérogénéité lithologique (observée en lame mince) peut expliquer l'absence de tendance chimique verticale ;
- Les plus hautes teneurs en Ni et Fe apparaissent dans l'encaissant. Les relations statistiques les plus étroites existent entre Fe-Mn-Co-S, Cu-S-Zn-Co, Pb-Co, Zn-Ni-S, Co-Fe-Cu-Pb-Ni-Zn-S. Les éléments Fe, Cu, Co, Ni sont particulièrement liés à S, probablement dans les sulfures tels que pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite et \pm sphalérite ;
- Les plus fortes affinités chimiques se traduisent surtout par de bonnes corrélations linéaires dans les paires d'éléments suivantes : Pb-Co, Fe-Mn, Ni-Zn. Ce sont principalement les métaux inclus dans les silicates ferromagnésiens ;
- Des extractions chimiques sélectives ont permis de montrer que Mo est surtout lié à S malgré une mauvaise corrélation linéaire entre les deux éléments. Fodé (1981) explique cette constatation par l'effet d'écran joué par le quartz dans les veinules enrichies en molybdénite. Le résultat du traitement statistique pour cette étude démontre que la valeur du coefficient de corrélation linéaire doit être considérée avec prudence pour l'interprétation des données au plan minéralogique.

Par ailleurs, des analyses de Au et Ag ont été réalisées en 1988 par la compagnie minière Cominco S. A. sur dix échantillons de roche ignée sélectionnés dans les sondages. La méthode analytique n'a pas été précisée. Les résultats indiquent des teneurs inférieures au seuil de détection (< 20 ppb pour Au et < 1 ppm pour Ag). Ces résultats suggèrent que la roche ignée ne contient pas d'éléments précieux.

5. GEOMETRIE DE L'INTRUSION

A propos de la géométrie de l'intrusion de la Helle, Denaeyer et Mortelmans (1954, p. 780) ont écrit : «Une visite effectuée en 1953, en compagnie de L. Van Wambeke, qui venait d'en entamer l'étude détaillée, a montré à l'un de nous (G.M.) qu'il s'agissait d'un laccolite ou d'un sill laccolitique d'un diamètre voisin de 400 m et puissant, en son centre, d'une centaine de m au maximum (fig. 5)» (la figure 5 de Denaeyer et Mortelmans - 1954 - est montrée à la figure 32). Un contact roche ignée - encaissant de type concordant est effectivement celui visible au toit de l'intrusion dans la carrière SE (photos 5 et 6).

Sondage He 1 (228W623)

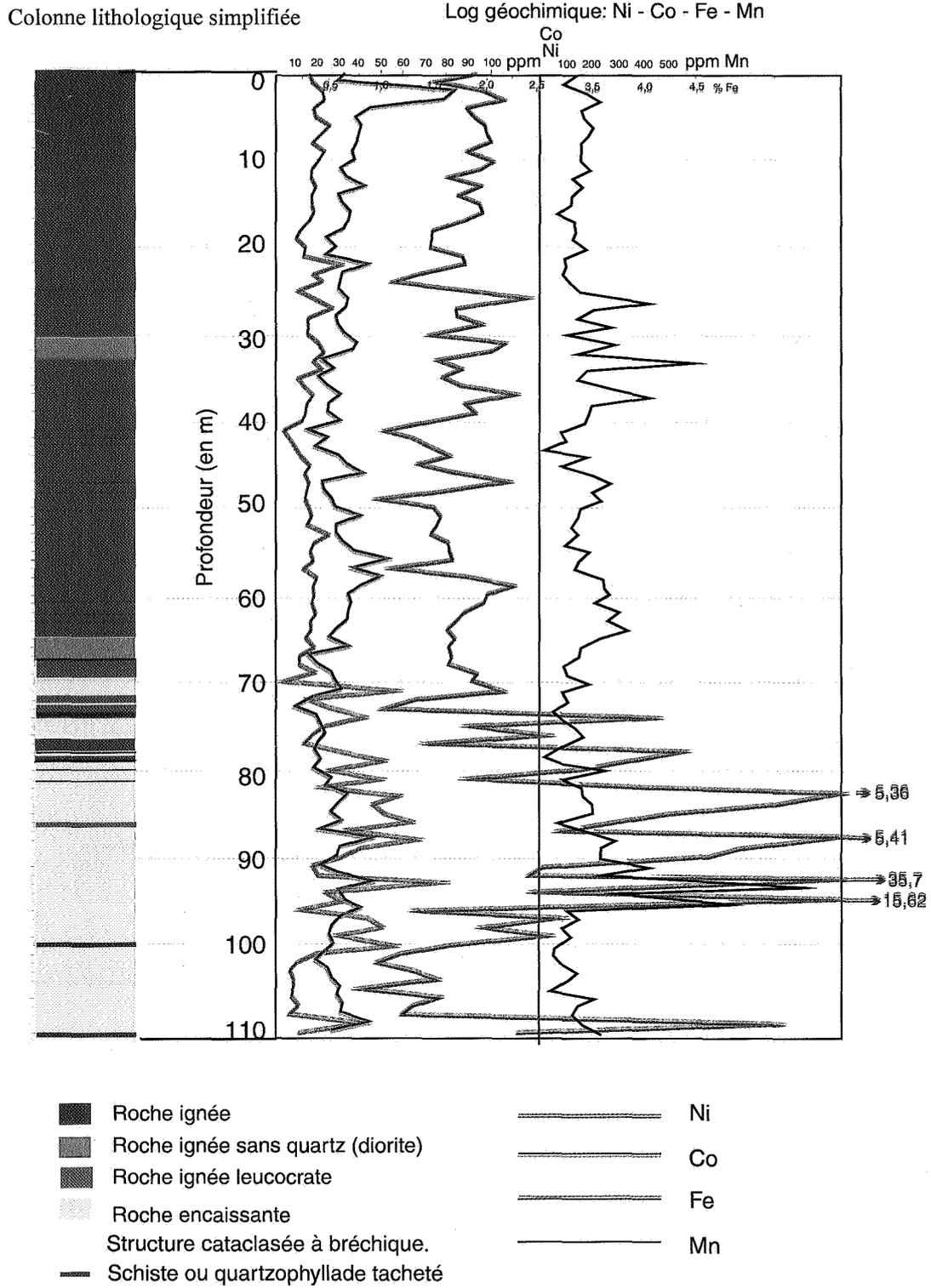


Figure 28. Sondage He 1 (228W623) : log géochimique pour Ni, Co, Fe, Mn (d'après Martin et Lecomte, 1979).

Sondage He 1 (228W623)

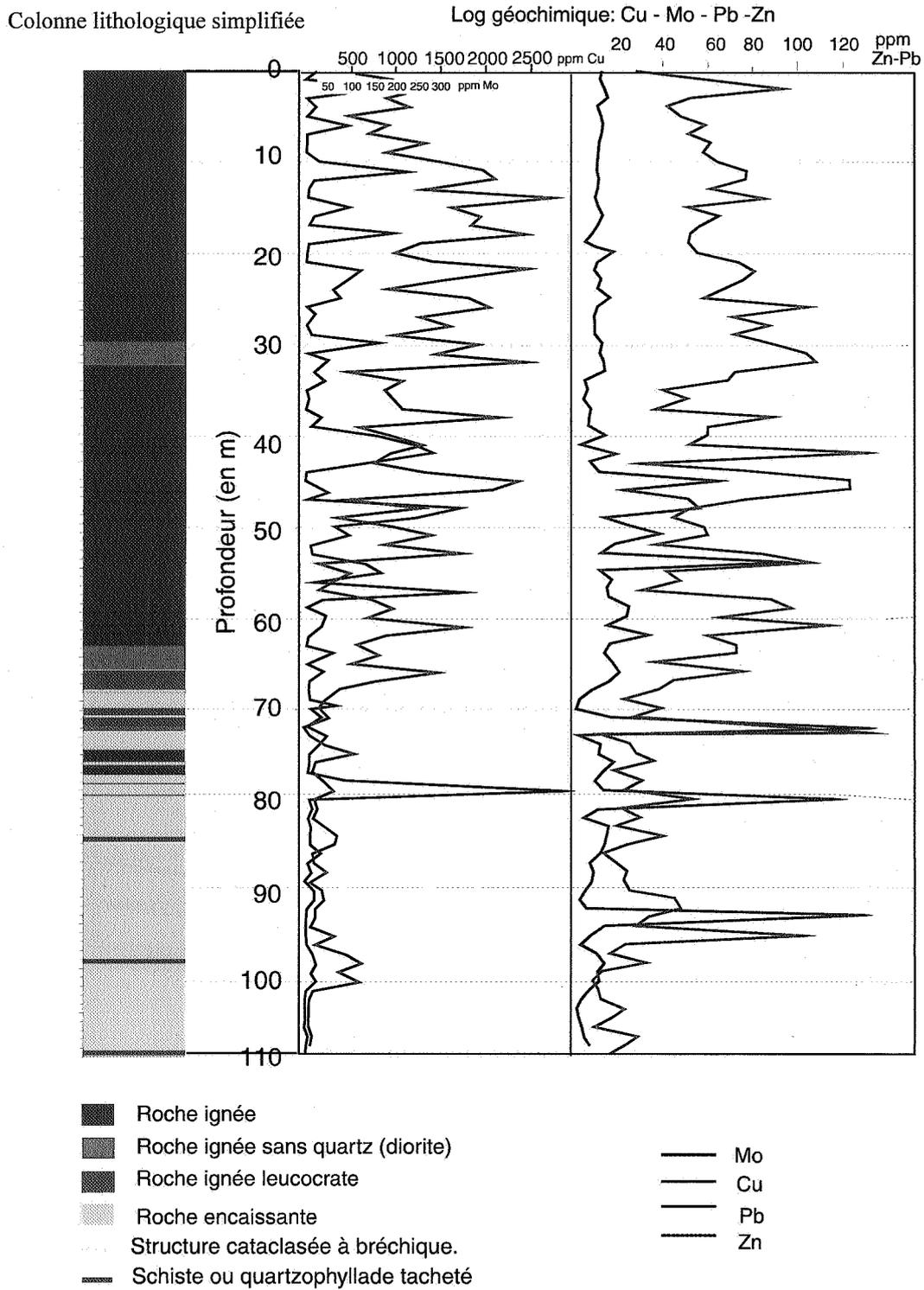
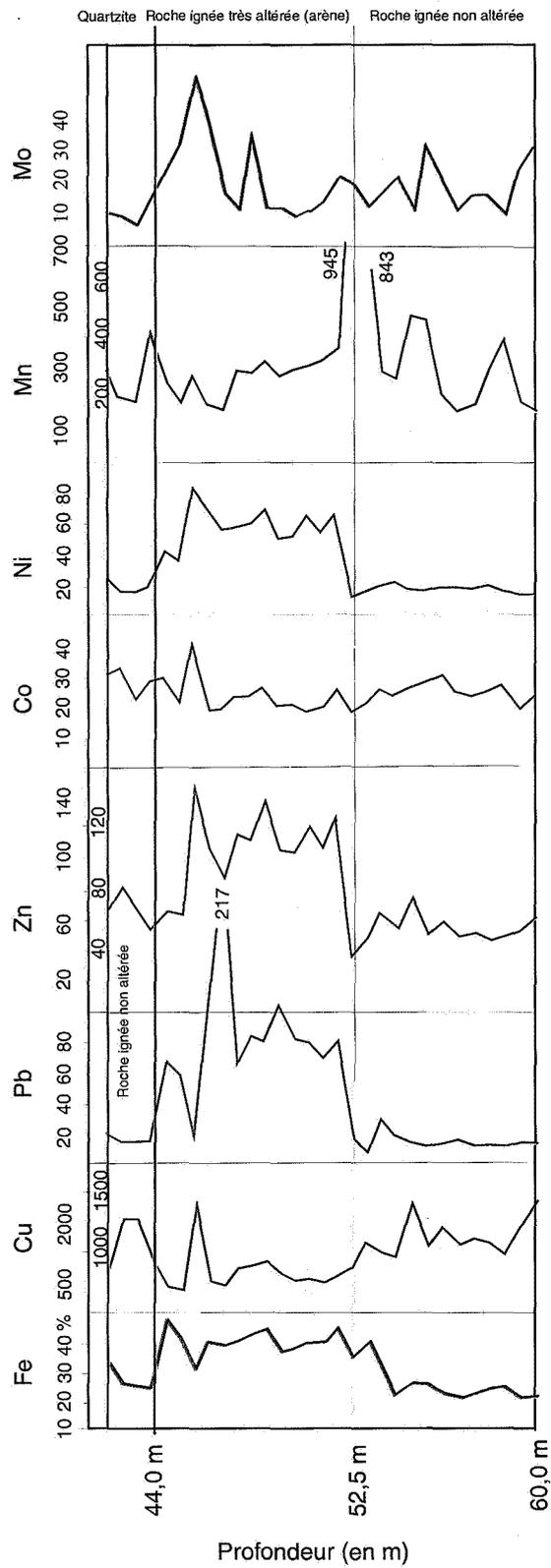


Figure 29. Sondage He 1 (228W623) : log géochimique pour Mo, Cu, Pb, Zn (d'après Martin et Lecomte, 1979).

Sondage He 2 (228W624)



Tous les éléments sont exprimés en ppm, excepté Fe qui est exprimé en %

Figure 30. Sondage He 2 (228W624) : log géochimique pour Fe, Zn, Pb, Cu, Co, Ni, Mn, Mo (d'après Fodé, 1981).

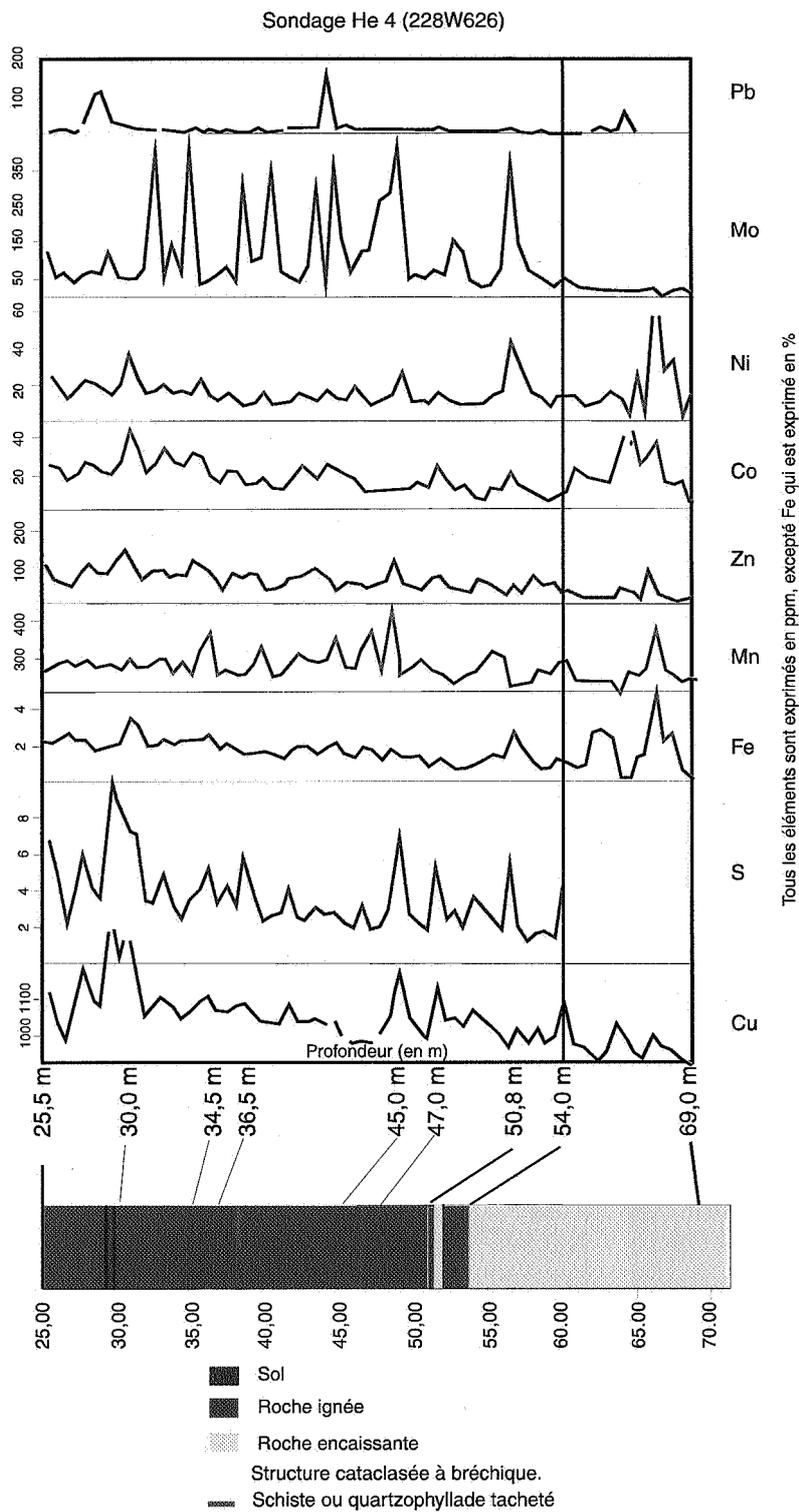


Figure 31. Sondage He 4 (228W626) : log géochimique pour Cu, S, Fe, Mn, Zn, Co, Ni, Mo, Pb (d'après Fodé, 1981).

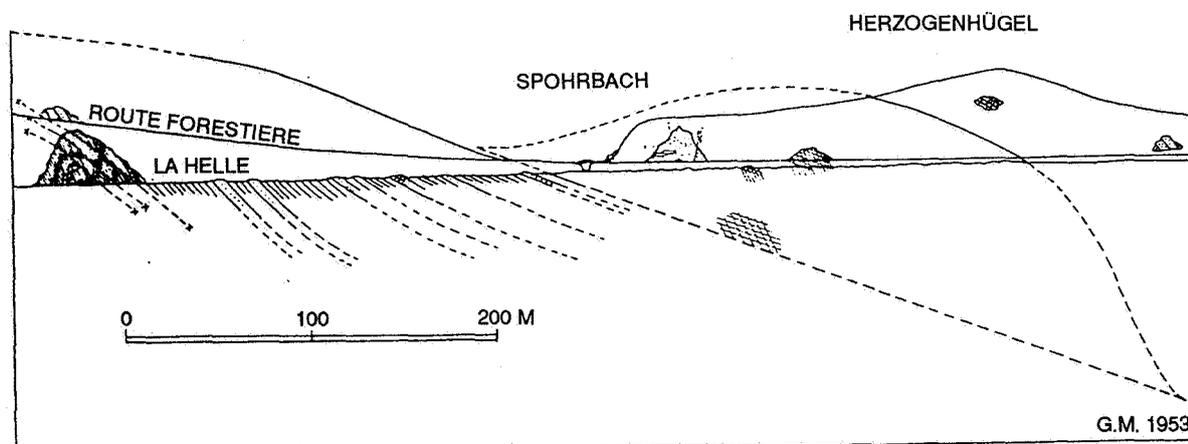


Figure 32. Coupe transversale à travers le laccolite de la Helle (NN à gauche, SE à droite). Le plan de coupe passe par la vallée de la Helle et est perpendiculaire à la direction du système prédominant de joints qui traversent l'intrusion. Le mur du laccolite est formé de phyllades reviniens avec intercalations de quartzites, le toit est constitué de quartzites (reproduction de la figure 5 de Denaeyer et Mortelmans, 1954).

En se basant sur les données d'affleurements suivantes :

- stratification moyenne au NW de l'intrusion : direction N55°E ; pendage 32°SE ;
- stratification moyenne au SE de l'intrusion : direction N50°E ; pendage 30°SE ;
- extension en surface de l'intrusion, perpendiculairement à la direction des couches : au maximum 250 m :
on peut calculer que l'épaisseur maximale au centre de l'intrusion est de 125 m.

Sachant qu'au sondage He 2, le corps principal de roches ignées a été recoupé de 42,30 à 85,80 m en profondeur inclinée à 45° dans la direction N16°W, soit sur environ 40 m d'épaisseur perpendiculairement à la direction des couches (± 55 m si on y ajoute les dykes recoupés jusqu'à 102,20 m de profondeur inclinée), on se rend compte immédiatement de sa diminution d'épaisseur dans la direction SE. A partir des relevés d'affleurements, on peut aussi préciser que l'intrusion possède une extension parallèlement à la direction des couches d'environ 500 m. Ces chiffres sont donnés à titre indicatif puisqu'il n'est pas tenu compte des effets perturbateurs de la tectonique qu'il est quasi impossible de quantifier.

Les sondages He 1 à He 4 permettent une meilleure représentation géométrique l'intrusion en trois dimensions (figs 33, 34). Le corps modélisé par ordinateur visualise le volume minimum calculé à partir des données des quatre sondages. Chaque face quadrangulaire a été dessinée en joignant deux points arbitrairement choisis du périmètre d'affleurement de la roche ignée à un ou deux points situé au contact inférieur limitant la roche ignée et l'encaissant. Par ailleurs, le pendage de l'encaissant sédimentaire est également visualisé par rapport à celui de l'intrusion. La figure 34 montre que la structure la plus probable du corps magmatique principal est effectivement celle d'un sill lacolitique plongeant vers le SE.

L'âge de mise en place de ce sill a été discuté au point 2.4. Rappelons que Van Wambeke (1954) a suggéré une intrusion syntectonique à l'orogénèse varisque tandis que Kramm et Buhl (1985) ont déterminé un âge radiométrique minimum à 381Ma \pm 16Ma (Silurien ou Dévonien inférieur).

6. POTENTIEL MINIER

Une estimation des réserves possibles en Cu et Mo a été réalisée par Dejonghe (1983) en se basant sur une géométrie simplifiée du corps intrusif. Les calculs fondés sur la distinction de deux panneaux miniers aboutissent à un tonnage d'environ 20 millions de tonnes de roche minéralisée. A partir d'analyses effectuées par l'Union Minière, on a pu constater que les teneurs en Cu et Mo variaient assez largement. La teneur moyenne de Cu est de 0,17 % (variation de 0,01 % à 0,45 %) et celle en Mo de 0,02 % (variation de 0,001 % à 0,097 %). Le stock métal estimé en première approximation à partir des concentrations moyennes aboutit au résultat suivant :

Cu : environ 35 000 tonnes
Mo : environ 4 000 tonnes

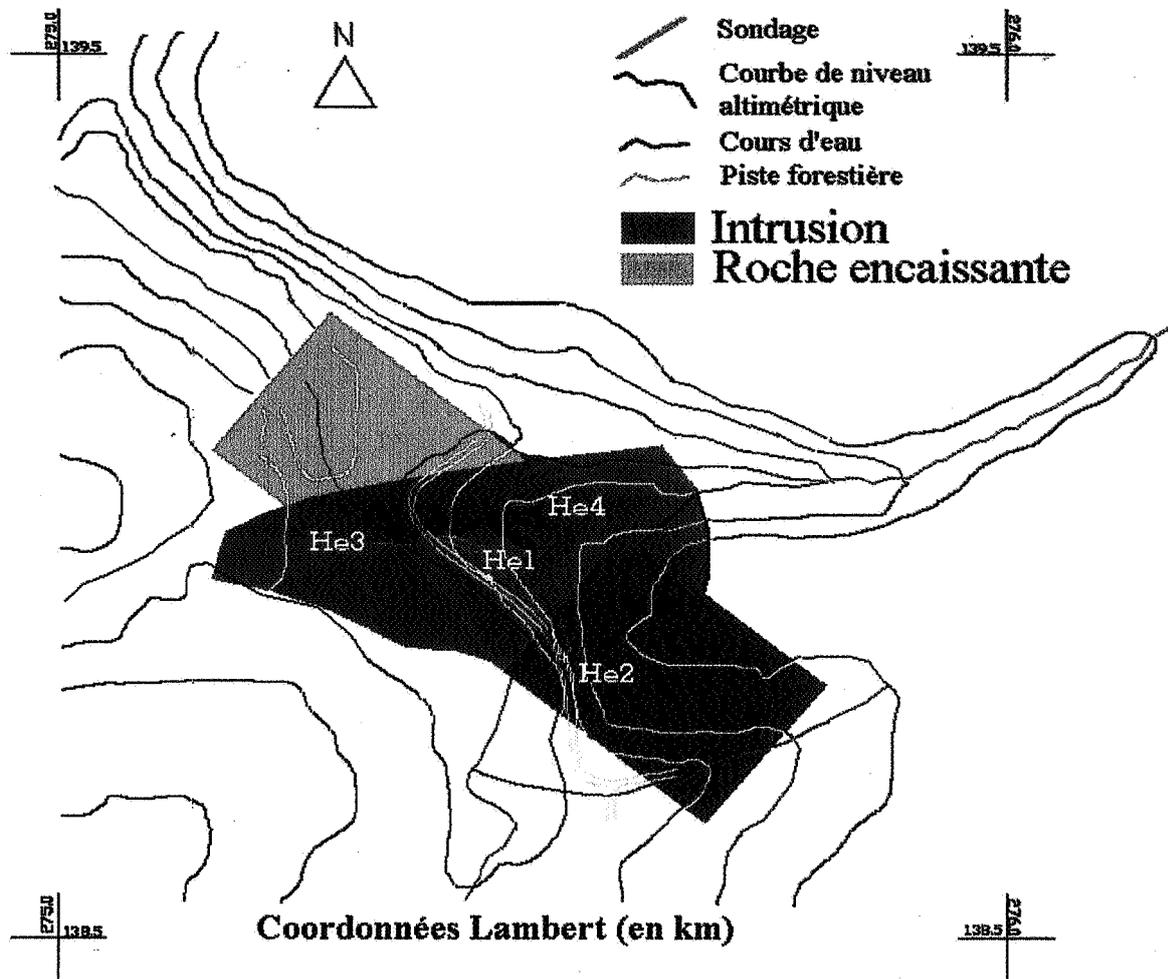


Figure 33. Morphologie de l'intrusion de la Helle : reconstruction géométrique modélisée à partir des données d'affleurement et des sondages (élaborée au moyen du logiciel Autocad rel. 11, Autodesk Inc.) : vue en plan (+ 90°). La couche de roche encaissante qui a été schématisée (rectangle jaune) passe sous l'intrusion dont la racine est également schématisée par un rectangle (en rouge).

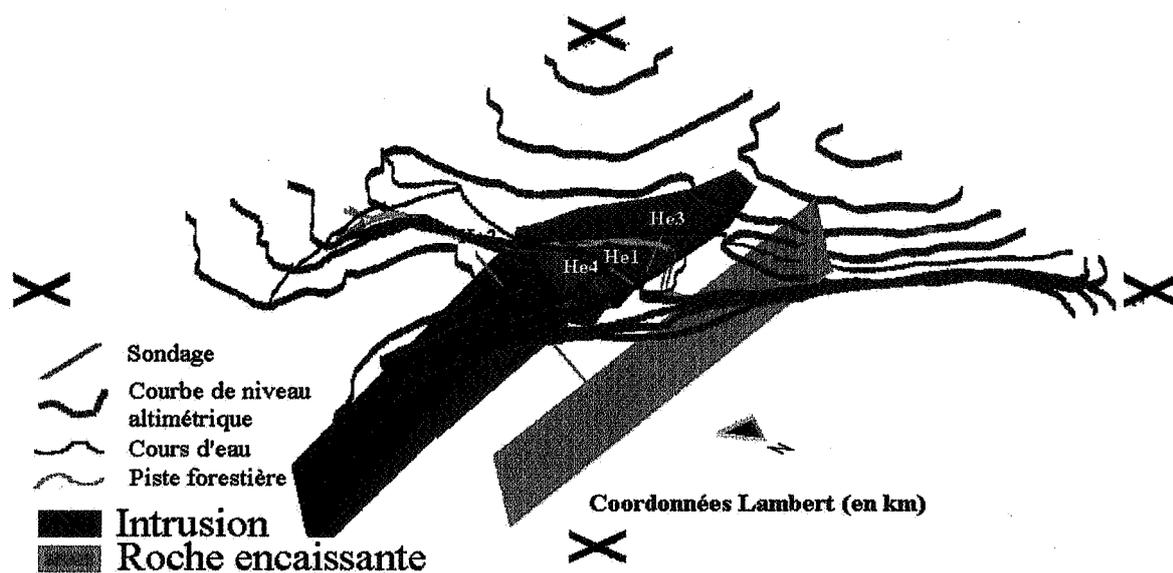


Figure 34. Morphologie de l'intrusion de la Helle : reconstruction géométrique tridimensionnelle modélisée à partir des données d'affleurement et des sondages (élaboré au moyen du logiciel Autocad rel. 11, Autodesk Inc.) : vue du NE à 30° au-dessus de l'horizon.

TROISIEME PARTIE : INTERPRÉTATION ET CONCLUSIONS

1. INTERPRÉTATION PETROLOGIQUE

Les diagrammes de la figure 35 illustrent la distribution du rapport X/quartz (X = minéraux calciques excepté le plagioclase ; micas mafiques ; plagioclase) dans les roches ignées. La figure indique que certaines roches des sondages He 1 et surtout He 2 sont plus riches en quartz par rapport au plagioclase que celles des sondages He 3 et He 4. Il s'agit des roches situées à droite de la composition à 50 % relatif de quartz. Les roches de la partie la plus basse du corps intrusif, recoupées par le sondage He 2, ont probablement subi une «silicification» plus intense que celles de la partie supérieure du corps magmatique recoupée par les sondages He 1, He 3 et He 4. On peut expliquer cette observation par la prédominance de roches encaissantes siliceuses (quartzites et quartzophyllades) dans le sondage He 2. Les roches classifiées comme granodiorites quartziques (nomenclature de Streckeisen, 1973) semblent être issues de magmas enrichis en SiO_2 par différenciation magmatique. Elles pourraient aussi avoir été conditionnées par l'assimilation des roches encaissantes siliceuses (quartzites, quartzophyllades).

La figure 35 montre aussi que les roches de composition intermédiaire (entre 25 et 40 % SiO_2) sont les plus riches en minéraux calciques. Cette observation est confirmée par les données chimiques de la figure 27. On pourrait émettre l'hypothèse que la plupart des minéraux calciques n'ont peut-être pas précipité suite à un apport de CaO (par altération propylitique ou carbonatation) lors d'une phase de «silicification». Les minéraux calciques ont peut-être cristallisé lors d'un épisode métamorphique régional (altération isochimique de type : saussuritisation, chloritisation, épidotisation, ...). C'est ainsi que les minéraux calciques hypogènes de type pyroxènes ou amphiboles, titanite, plagioclase se transforment en minéraux de basse P-T tels que les épidotes, leucoxènes et carbonates. Le processus d'enrichissement calcique semble par conséquent indépendant de la silicification de la roche magmatique. La variation de CaO peut aussi s'expliquer par un processus classique de différenciation magmatique (par exemple par fractionnement de plagioclase et/ou de pyroxènes calciques).

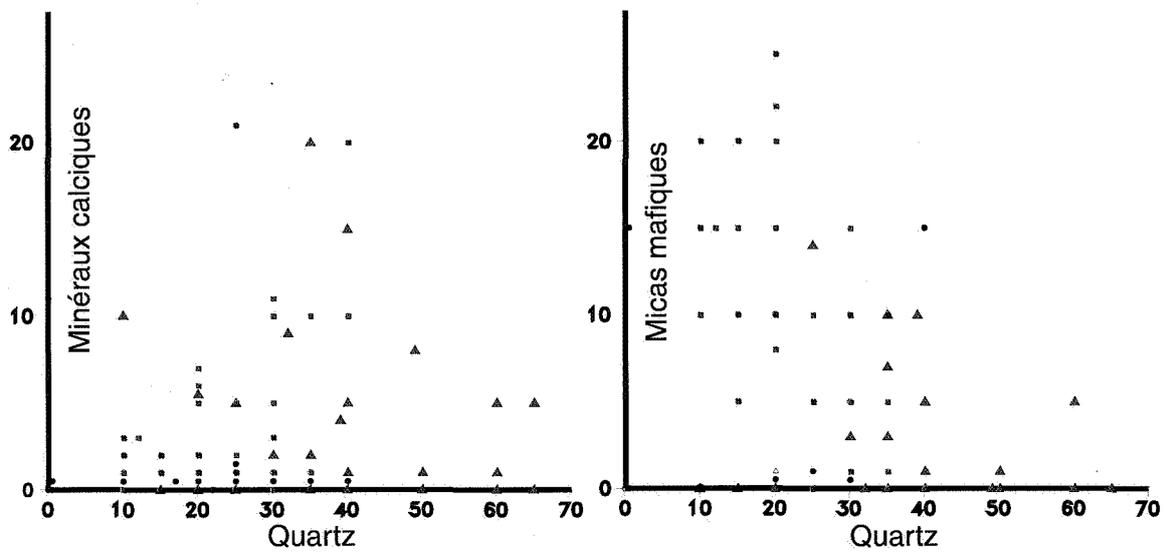
La seconde tendance est une variation d'un pôle pauvre en feldspath K vers un pôle potassique dans la zone de 10 % à 30 % de quartz. Cette évolution correspond au passage d'une diorite quartzique à une granodiorite ou d'une diorite à une monzodiorite. La variation semble être évolutive puisque il y a une tendance d'enrichissement en feldspath K en passant des sondages médians He 1 et He 2 vers les sondages latéraux He 3 et He 4 situés respectivement à l'W et à l'E (figs 25, 26). Ces données correspondent à une tendance non uniforme (ou plus erratique) dans la direction N-S et plus particulièrement avec un enrichissement potassique ponctuel dans la partie nord de l'intrusion.

Les analyses chimiques (éléments majeurs) réalisées sur quatre échantillons de la roche ignée de la Helle (figs 27, 36) montrent qu'il existe une variation en SiO_2 , certes faible, mais cependant suffisante pour pouvoir discuter l'évolution chimique de la roche. Néanmoins, une certaine prudence s'impose pour l'interprétation de ces données chimiques. Les raisons principales en sont les suivantes :

- le petit nombre d'analyses disponibles (4) et le manque d'information sur la pétrographie de chaque échantillon;
- l'échelonnement des analyses dans un laps de temps très important (de 1898 à 1982). Différentes méthodologies ont probablement été utilisées pour l'analyse chimique des échantillons, ce qui peut évidemment influencer sur les résultats analytiques ;
- la difficulté d'interpréter la variation géochimique d'une roche solidifiée suite à l'interdépendance des constituants solides (cristaux) et liquides (magma *sensu stricto*) dans la roche. L'interprétation s'applique à l'évolution chimique d'un matériau formé d'un mélange liquide + solide et non à l'évolution chimique d'un magma ;
- la superposition d'assez nombreux phénomènes postmagmatiques (hydrothermalisme, métamorphisme régional, altération météorique) ne permet qu'une approche très incertaine sur l'évolution magmatique originelle.

Les diagrammes binaires de la figure 36 révèlent toutefois que les tendances chimiques classiques d'une différenciation magmatique sont observées :

Nous proposons de choisir la teneur en SiO_2 comme indicateur d'évolution chimique des roches analysées. En terme d'interprétation génétique, SiO_2 est généralement considéré comme un indice de différenciation magmatique. Les évolutions chimiques seront commentées par rapport au contenu en SiO_2 croissant.



- Sondage He 1
- ▲ Sondage He 2
- Sondage He 3
- * Sondage He 4

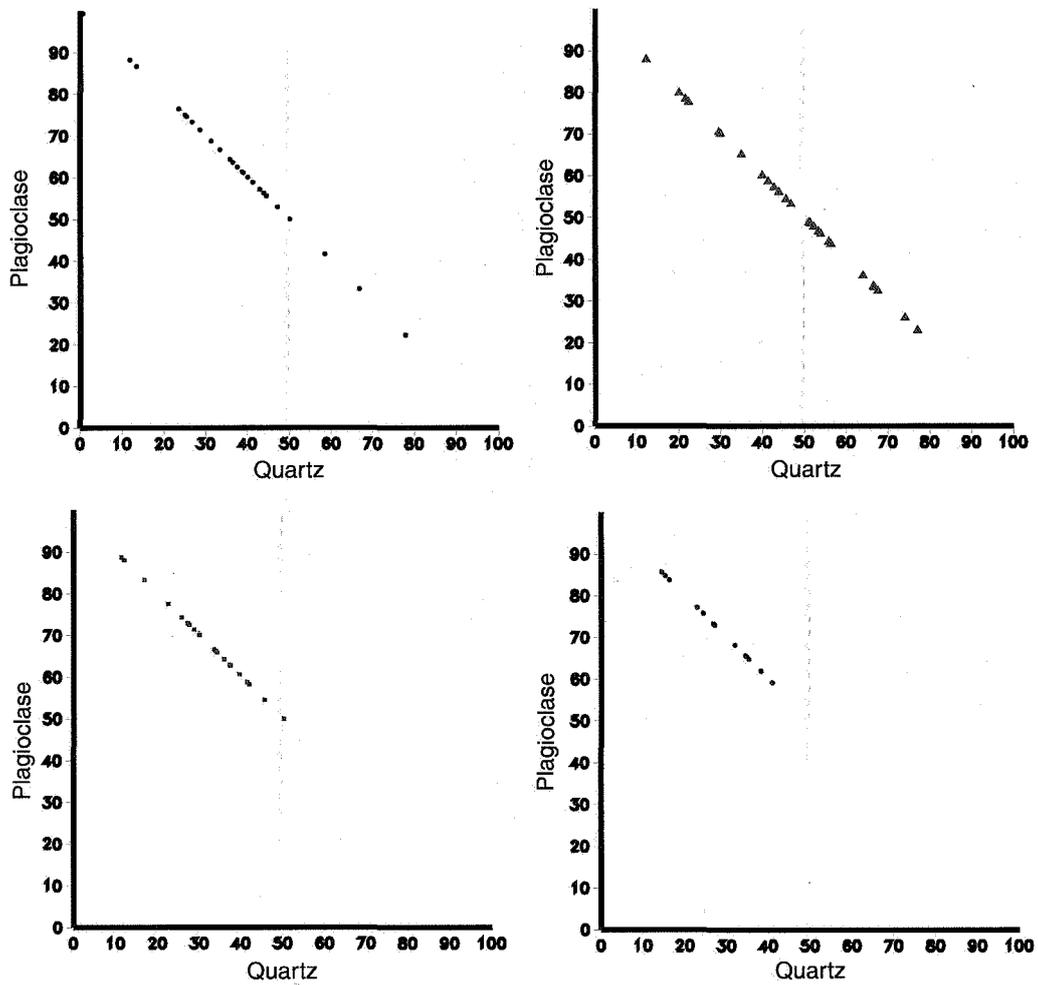
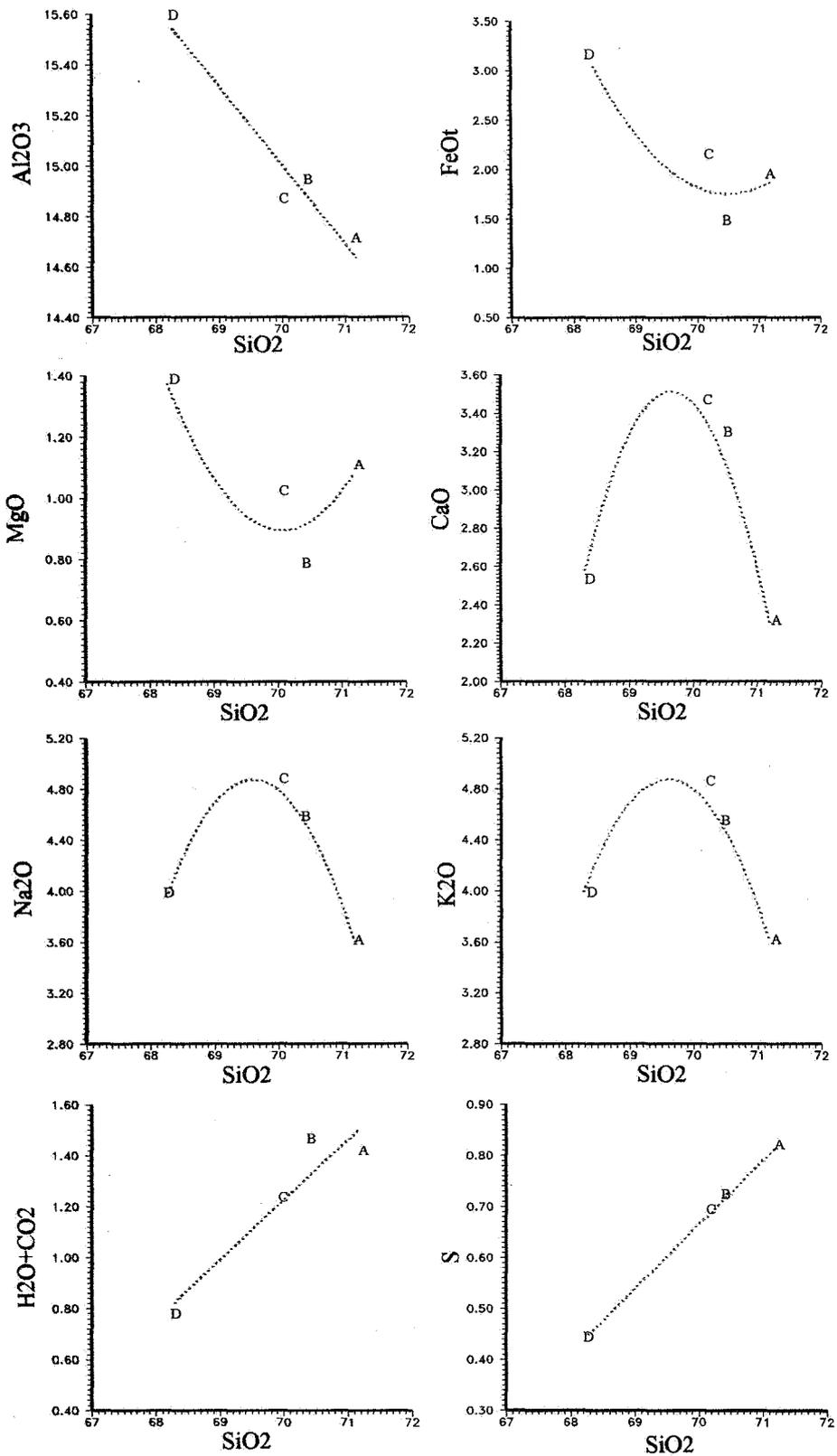


Figure 35. Variation des minéraux calciques (famille de l'épidote, carbonates, titanite, leucoxène) et des micas ferro-magnésiens (hydrobiotite, ripidolite) en fonction de la proportion de quartz et de plagioclase pour les quatre sondages.



- A Schreyer et Abraham (1982)
- B Dannenberg et Holzapfel (1898)
- C Ronchesne (1930)
- D Van Wambeke (1955)

Figure 36. Diagrammes de Harker (oxyde élément vs SiO₂) pour quatre roches dont les analyses et les sources sont précisées à la figure 27.

Certaines tendances chimiques sont clairement caractérisées par une évolution linéaire. D'autres néanmoins significatives ne sont pas linéaires. Les meilleures tendances minimisant l'écart entre les données et la courbe d'évolution théorique ont été calculées par ordinateur. Après plusieurs essais, les relations polynomiales (de degré 2 ou 3) et les corrélations linéaires semblent les mieux adaptées à l'ensemble des données.

Les tendances chimiques suivantes sont observées :

- similitude de l'évolution de $\text{FeO}_{\text{total}}$ et MgO vs SiO_2 caractérisée par une diminution suivie par une stabilisation. Cette évolution correspond probablement, dans un premier temps, au fractionnement de phases mafiques telles que pyroxènes pauvres en calcium (orthopyroxène de composition hypersthène ?) et micas ferromagnésiens (surtout chlorite). La présence de micas mafiques et de reliques d'orthopyroxène dans le clinopyroxène appuient cette interprétation. Les phases mafiques fractionnées doivent nécessairement être relativement pauvres en Ca et K si l'on tient compte de l'augmentation initiale de ces deux éléments avec SiO_2 . En conséquence, le fractionnement d'une quantité importante de clinopyroxène calcique, d'amphibole et de mica est peu probable à ce stade d'évolution magmatique. La stabilisation de Fe et Mg à partir d'un contenu en SiO_2 d'environ 70% suggère également l'arrêt à ce moment du fractionnement des phases mafiques.
- similitude de l'évolution de Na_2O , K_2O et CaO vs SiO_2 suggérant une histoire commune au cours de la différenciation. L'évolution de ces trois oxydes est probablement liée aux feldspaths, plus particulièrement aux feldspaths de Ca-Na (andésine, labradorite) et de Ca-K-Na (anorthoclase). L'évolution chimique suggère une cristallisation fractionnée de feldspath Ca-K-Na à partir d'un magma contenant environ 70 % de SiO_2 .
- augmentation de H_2O , CO_2 et S vs SiO_2 indiquant un enrichissement classique de ces constituants dans les liquides résiduels. L'enrichissement en S provoque certainement la cristallisation de sulfures tardifs comme la pyrite.
- faible variation de Al_2O_3 inversement linéairement corrélé avec SiO_2 . L'évolution de cet oxyde suggère un fractionnement de phases alumineuses. Vu l'augmentation initiale de Ca, il est peu probable que cette phase soit un plagioclase. Par contre, la cristallisation fractionnée d'une faible quantité de chlorite alumineuse (prochlorite) pourrait expliquer la tendance observée.

En conclusion, les tendances chimiques inverses marquées par les associations FeO-MgO et $\text{CaO-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ ainsi que l'évolution propre de ces deux groupes appuient l'hypothèse d'une évolution magmatique essentiellement marquée par un mécanisme de cristallisation fractionnée.

Les données géochimiques suggèrent que l'altération potassique est localisée dans les roches moyennement différenciées les plus riches en K (voir fig. 36) minéralogiquement caractérisées par un enrichissement en feldspath K et micas (séricite et biotite). Dans le modèle classique de porphyre cuprifère (Lowell et Guilbert, 1970), on distingue quatre zones concentriques d'altération hydrothermale dont une zone potassique marquée par l'assemblage quartz-feldspath K-biotite (fig. 38). Cet assemblage, reconnu dans la partie supérieure de l'intrusion de la Helle, pourrait signifier la présence d'une altération hydrothermale de type potassique à cet endroit.

L'existence de phases mafiques hydratées, de minéraux calciques et d'une quantité importante de quartz d'origine magmatique suggère que le magma de la Helle était riche en H_2O , CaO et SiO_2 . La composition du magma originel est d'affinité calco-alkaline (fig. 37) moyennement hydratée. Au stade tardimagmatique, les circulations et les transferts de fluides issus d'un tel magma ont engendré une altération hydrothermale suite à l'interaction du magma avec les roches encaissantes phylliteuses (apport de H_2O , CO_2 , autres volatils) et l'assimilation du quartz des quartzites (apport de SiO_2) de la région. Le diagramme AFM de la figure 37 montre que les roches de la Helle ont une affinité pétrochimique calco-alkaline qui est généralement associée à un magmatisme en contexte tectonique global de convergence et compression lithosphérique (subduction).

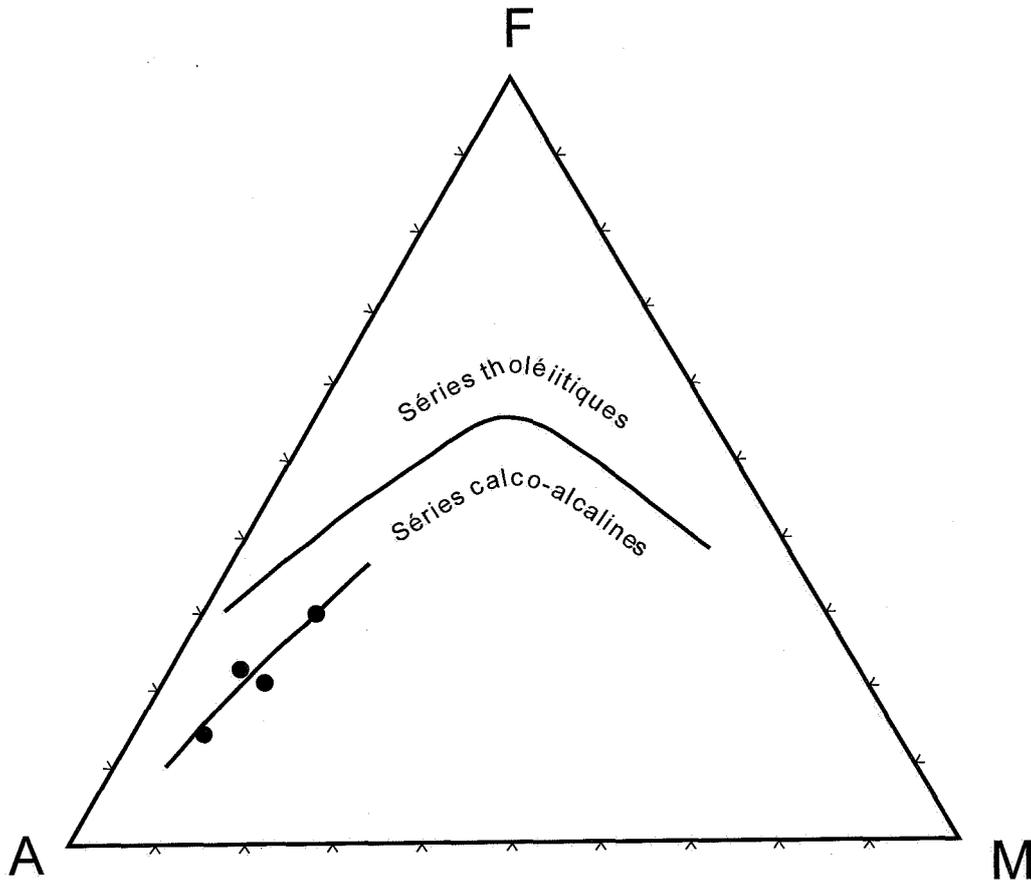


Figure 37. Position de 4 roches de l'intrusion de la Helle (dont la composition est donnée à la figure 27) dans un diagramme AFM (A = Na₂O + K₂O ; F = FeO + Fe₂O₃ ; M = MgO).

2. INTERPRÉTATION MÉTALLOGÉNIQUE

2.1. Type de minéralisation

Van Wambeke (1956b) a révélé pour la première fois une certaine similitude entre la roche ignée minéralisée de la Helle et les minéralisations de type porphyre cuprifère sur base des données bibliographiques disponibles à l'époque (notamment, les travaux de Boutwell (1905) sur le district minier de Bingham aux États Unis).

Un modèle global de porphyre cuprifère basé sur la synthèse de 27 gisements a été proposé en 1970 par Lowell et Guilbert. Ces auteurs définissent un porphyre cuprifère comme étant un gîte sulfuré à cuivre et/ou molybdène caractérisé par une minéralisation sulfurée sous forme de disséminée et sous forme de veinules/stockwerk mise en place dans des roches hôtes variées qui ont été altérées par des solutions hydrothermales selon des zones grossièrement concentriques. Les minéralisations précipitent du stade orthomagmatique au stade mésothermal (200-300°C). Dans un porphyre cuprifère typique :

- les sulfures principaux sont la pyrite, la chalcopryrite et la molybdénite. Les métaux accompagnateurs sont l'or, l'argent, le plomb et le zinc ;
- le gîte est généralement associé à des cheminées bréchiques («breccia pipes») généralement entourées par une minéralisation périphérique de basse température ;
- la teneur de la minéralisation primaire varie de 0,8 % de Cu et 0,02 % de Mo pour les porphyres cuprifères riches en cuivre et de 0,6 % de Mo et 0,05 % Cu pour les porphyres riches en molybdène.

Plusieurs modèles génétiques de porphyre cuprifère ont été proposés dans la littérature (Burnham, 1967 ; Nielsen, 1968 ; Fournier, 1967, 1968 ; White, 1968 ; etc..). Le modèle orthomagmatique est basé sur un mélange fondu

formé à proximité de la frontière manteau - croûte et intrusif à de faibles profondeurs (1000-1500 m ; parfois même 500 m). Au cours de sa remontée vers la surface, ce magma se sature progressivement en eau. Les autres modèles modifient légèrement et complètent le modèle orthomagmatique. Ils font intervenir l'apport externe de fluides, surtout d'eau connée et météorique, et de métaux. L'eau se déplace sous forme de cellules de convection entretenues par les différences de température générées par l'intrusion magmatique.

En général, le refroidissement se fait progressivement en allant de l'intérieur vers l'extérieur de l'intrusion et du bas vers le haut du corps magmatique. De même, la circulation d'eau est plus intense à proximité de la surface (dans ce cas, il s'agit surtout d'eau météorique) qu'en profondeur. Les gradients principaux gouvernant l'évolution du corps intrusif et de son enveloppe sont ceux de température et de pression des fluides. La minéralisation et l'altération chimique sont gouvernés par ces gradients. Les quatre zones d'altérations hydrothermales schématisées à la figure 38 sont :

- zone potassique : quartz, orthose, biotite, chlorite et, dans des proportions moindres, séricite et anhydrite.
- zone phyllique : quartz, séricite, pyrite avec des quantités moindres de chlorite et des traces de rutile.
- zone argilique : kaolinite et montmorillonite (zone parfois absente).
- zone propylitique : chlorite, épidote, calcite et, en quantité plus faible, albite et adulaire.

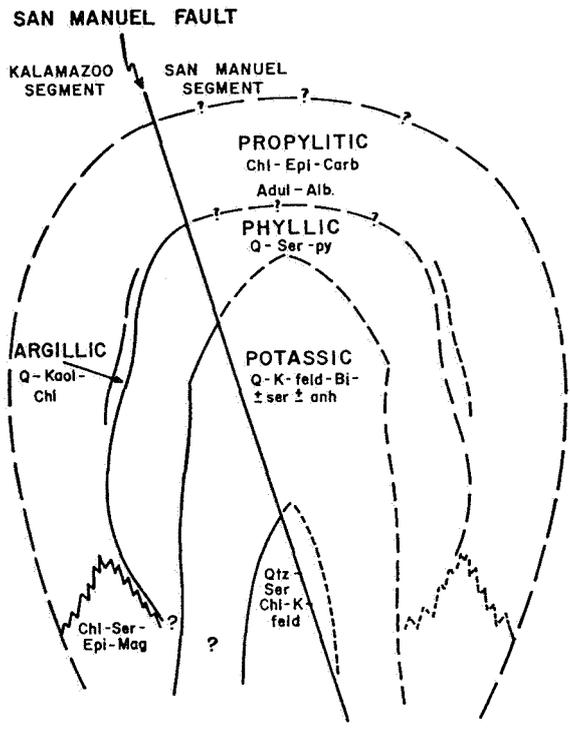
Dans le même espace, l'association sulfurée évolue du centre vers la périphérie d'un pôle chalcopryrite-molybdénite-pyrite à un pôle galène-sphalérite (\pm or et argent). La minéralisation pyriteuse et cuprifère trouve son développement maximal à cheval sur les zones potassique et phyllitique. Les sulfures sont disséminés au coeur de l'intrusion et se concentrent dans des veinules/filonnets/filons vers les zones supérieures et extérieures du corps magmatique.

En résumé, les dépôts de porphyre cuprifère sont le résultat d'une variation physico-géochimique progressive allant de conditions magmatiques à hydrothermales résultant du refroidissement de la masse magmatique. Un cas typique de porphyre cuprifère a été décrit et étudié en détail par Lowell et Guilbert (1970) ; il s'agit du dépôt de San Mamuel-Kalamazoo en Arizona (USA). Il est intéressant de noter que la roche magmatique de cette intrusion est caractérisée par une variation compositionnelle marquée par le passage d'une diorite quartzique à une monzonite quartzique. La présence de cheminées bréchiques et d'un système de dykes radiaux suggère une mise en place à de faibles profondeurs où régnait des conditions de basse pression et température.

La comparaison du schéma classique de porphyre cuprifère avec les roches ignées de la Helle est intéressante malgré la petite taille de l'intrusion belge.

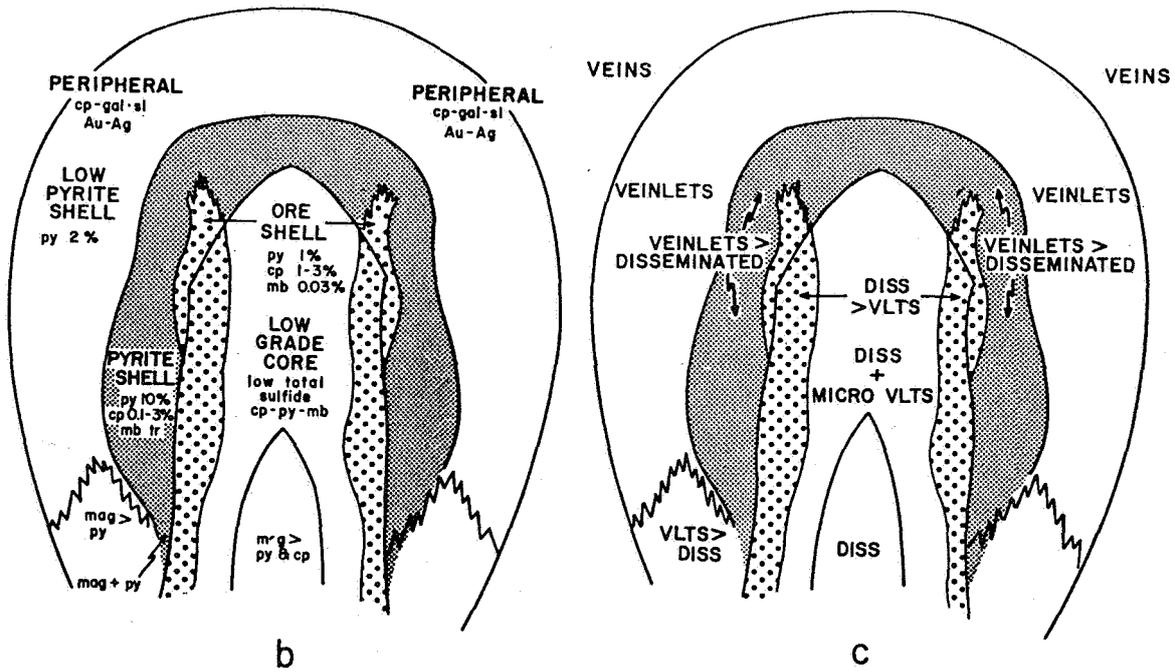
Analogies :

- Les roches ignées de la Helle sont différenciées. Elles évoluent essentiellement à partir de diorites vers des diorites quartziques, des monzonites et des granodiorites.
- A la Helle, le feldspath potassique se rencontre principalement dans la partie supérieure du corps intrusif et est souvent associé à l'(hydro)biotite. Cela marque un enrichissement en potasse. Dans le sondage He 2, l'hydrobiotite est clairement rétrotransformée en prochlorite dans la partie supérieure du corps magmatique. Elle domine en périphérie septentrionale (He 3 et He 4). L'hydrobiotite est nettement plus abondante dans la partie médiane et plus profonde de la colonne magmatique. Dans le schéma modélisateur général (Lowell et Guilbert, 1970), une telle variation minéralogique suggère que la partie du corps igné de la Helle se situe dans la zone potassique caractérisée par la persistance du feldspath K. Toutefois, la superposition d'un assemblage composé d'hydromicas - séricite - quartz - chlorite - pyrite, caractéristique d'une altération phyllique, et d'un assemblage de carbonates (\pm associés à l'épidote), caractéristique de la zone propylitique, montre néanmoins un télescopage des zones d'altération. Ce télescopage peut s'expliquer par la dimension réduite de l'intrusion.
- L'altération des feldspaths est le plus souvent forte à très forte (essentiellement saussuritisation).
- A la Helle, on trouve une minéralisation de type disséminée (principalement à chalcopryrite et pyrrotite accessoirement à pyrite, sphalérite, cobaltite, rutile, titanite et ilménite) coexistant avec une minéralisation filonienne de plus en plus développée vers la périphérie de l'intrusion. A des veinules de quartz-feldspaths sont associés des minéraux identiques à ceux de la minéralisation disséminée. Vers les zones externes du corps intrusif, ces



d

VEINS



b

c

Figure 38. Modèle de minéralisation de type porphyre cuprifère (reproduction de la figure 3 de Lowell et Guilbert, 1970).

veinules passent à des veines de quartz sans feldspath ni carbonate. Elles sont minéralisées en pyrite, marcasite, sphalérite, chalcopryrite, pyrrhotite (toutefois absente dans les veines les plus externes), molybdénite, galène, cobaltite et titanite. Les veines de quartz recoupant l'encaissant contiennent : pyrite, marcasite, sphalérite, galène, chalcopryrite, un tellure de bismuth de la série tellurobismuthinite - hedleyite, hessite, parfois du rutile et rarement de la molybdénite.

Les veines de quartz - carbonates présentes dans toute l'intrusion ne sont que faiblement minéralisées (généralement en pyrite et marcasite, quelquefois associées à la chalcopryrite et la pyrrhotite).

Différences :

- A l'inverse des porphyres cuprifères, il n'existe pas de cheminée bréchique dans le corps magmatique de la Helle.
- Le sill de la Helle n'est pas formé majoritairement par des roches porphyriques. Ces dernières sont présentes, mais uniquement en bordure de l'intrusion et témoignent probablement d'un processus de prise rapide aux épontes de la structure intrusive.
- Les analyses chimiques montrent que le corps faiblement minéralisé de la Helle n'est que légèrement plus riche en Cu par rapport à Mo ($Cu/Mo = 8,5$) alors que le rapport moyen Cu/Mo dans un porphyre riche en Cu est d'environ 40 et de 0,08 dans un porphyre riche en Mo.

Nos travaux montrent que la minéralisation filonienne (sous forme de stockwerk et/ou filonnets-veinules) n'est pas insérée dans une zone d'altération hydrothermale périphérique claire (par exemple au sein d'une zone d'altération propylitique). Au contraire, l'altération syn- à postmagmatique de l'encaissant est quasi absente si on exclut le processus de métasomatisme albitique.

Il semble que la partie visible de l'intrusion en surface corresponde au secteur compris entre la zone interne stérile et la zone d'altération potassique/phyllique. Si on se rapporte au modèle de Lowell et Guilbert (1970), cette observation pourrait expliquer le faible degré de minéralisation de la roche et son caractère très disséminé. Le faible développement de l'aurole potassique et le télescopage des zones d'altération pourrait être corrélé à la dimension réduite de l'intrusion. Le faible degré de minéralisation peut également s'expliquer par la taille réduite du corps magmatique, par un stock métal magmatique peu important et par l'absence ou la faible importance d'un processus de décharge violente de fluides/solutions due à l'absence de pipe bréchique.

Il est intéressant de noter que l'association chlorite-épidote-carbonates \pm (feldspath K, adulaire, albite) est rencontrée localement dans le toit du corps intrusif, principalement dans la direction NW (sondages He1 et He 2). Dans le modèle de Lowell et Guilbert (1970), une telle association minéralogique marque la zone d'altération propylitique caractérisée par un enrichissement notable en Ca \pm Mg. Dans le cas de la Helle, cet assemblage a peut-être été engendré par un métamorphisme régional postmagmatique (zone épizonale à chlorite-épidote) avec transformation des roches magmatiques les plus riches en Ca. L'origine probablement magmatique des feldspaths potassiques et l'absence d'albite pure étayent cette interprétation.

La petite taille du corps intrusif, le degré d'altération peu élevé des roches périphériques, la faible extension du cortège filonien et l'absence de structure bréchique développée suggèrent que le corps minéralisé de la Helle ne s'inscrit pas un modèle de porphyre cuprifère typique et bien développé. Cependant, certaines observations montrent qu'il existe des similarités minéralogiques, pétrographiques et morphologiques avec un porphyre cuprifère de taille très réduite.

2.2. Genèse

Trois modèles principaux ont été proposés pour interpréter la genèse des porphyres à Cu-Mo.

La genèse d'un système de porphyre cuprifère a d'abord été décrite par Burnham (1967) et Nielsen (1968). Ces auteurs proposent une intrusion à faible profondeur avec refroidissement important produisant une cristallisation marginale précoce sous forme de croûte solidifiée. Sous l'effet de tensions internes, la rupture de cette carapace solide donne naissance à des roches à texture aphanitico-porphyrétique. Les fluides dégagés par la prise rapide

migrent vers l'extérieur à travers un réseau de craquelures. Il en résulte la formation de zones de stockwerk et des zones bréchiques en périphérie plus froide où l'altération et la minéralisation sont gouvernées par des gradients négatifs de température du centre de l'intrusion vers les roches encaissantes.

Des variantes de ce modèle ne limitent pas la phase de libération des fluides aqueux et volatils à la rupture de la carapace solide. Ils énoncent la libération d'eau de façon quasi-continue, non seulement en bordure de l'intrusion mais dans aussi tout le corps magmatique dès que la pression interne de vapeur développée par sursaturation dépasse la pression lithostatique.

Fournier (1968) suggère que le magma initial du porphyre cuprifère est sous-saturé en eau à l'origine. La diminution de plasticité de ce type de magma lors de son refroidissement engendrerait la formation d'un système faillé qui provoquerait, par chute brutale de pression, la volatilisation de l'eau et des événements explosifs (formation de brèches). Il semble qu'à la Helle, la masse de magma ne soit pas assez importante pour engendrer une volatilisation significative à l'échelle du corps magmatique. Dans cette intrusion, un réseau de roches ignées cataclasées et bréchiques situé au contact avec l'encaissant est néanmoins suffisamment développé pour témoigner d'une volatilisation partielle de fluides.

White (1968) constate que des saumures chlorurées sodiques et calciques (teneurs en équivalent NaCl comprises entre 5 et 40 %) et déficientes en S, sont responsables de la formation de beaucoup de gîtes de métaux de base. Il suggère que de tels fluides ont été générés dans les systèmes de porphyres cuprifères par une réaction deutérique des liquides résiduels avec les minéraux précoces (plagioclase et ferro-magnésiens) afin d'acquérir des hautes teneurs en Ca et métaux de base. En outre, il développe un modèle qui implique une circulation à des niveaux multiples, soit de telles saumures, soit de saumures riches en métaux mais d'origine connue ou météorique. Ce mécanisme a lieu sous l'influence de gradients thermiques mis en place par une source de chaleur magmatique adjacente ou subjacente. Son modèle diffère grandement du modèle orthomagmatique par le fait que la source des solutions, et peut-être des métaux, est quasi complètement externe au système magmatique. Les solutions migrant de façon convective produisent les enveloppes et les zones d'altération-minéralisation.

À la Helle, l'hypothèse la plus vraisemblable est celle qui implique le refroidissement rapide par effet de prise rapide («quenching») avec relâchement soudain de la pression des fluides par expulsion brutale de composants volatils. Ce processus a pu donner naissance aux roches bréchiques et porphyriques situées le plus souvent à la bordure de l'intrusion. Par ailleurs, la présence d'hydrobiotite dans la plupart des roches de la Helle (surtout dans la partie centrale) suggère que la magma différencié était assez riche en eau pour engendrer une volatilisation significative.

D'autre part, la relative abondance de molybdénite par rapport aux minéraux cuivrés se traduit par un assez faible rapport Cu/Mo (8,5). Les travaux de Woodcock et Hollister (1978) établissent une nette distinction génétique entre les porphyres enrichis en Mo par rapport à Cu et les porphyres cuprifères typiques (rapport Cu/Mo élevé). Les gîtes à molybdène recèlent souvent des minéraux fluorés (fluorite, ...) et contiennent des teneurs relativement élevées en éléments lithophyles tels que tungstène et étain. Par ailleurs, le traitement des données recueillies par ces deux auteurs montrent que les tonnages élevés de Mo sont spécifiques aux régions à croûte sialique anormalement épaisse. Parallèlement, les porphyres riches en Mo sont associés à des intrusions nettement plus acides que pour les porphyres cuprifères *sensu stricto*. L'assez large gamme de composition des roches ignées de la Helle est peut-être corrélable avec son rapport Cu/Mo moyen.

3. CONCLUSIONS

La composition des roches ignées de la Helle varie d'un pôle basique (diorite) à un pôle intermédiaire à acide (granodiorite quartzique). Dans la nomenclature de Streckeisen (1973), la plupart de ces roches ignées se trouvent dans le champ des diorites quartziques et des granodiorites. Des roches de compositions monzodioritique, granodioritique quartzique et même granitique ont aussi été rencontrées. Par ailleurs, les données des sondages suggèrent une certaine évolution spatiale caractérisée par un relatif enrichissement de feldspath potassique du centre (He 1) vers la périphérie de l'intrusion (He 2, He 3, He 4).

Une reconstitution géométrique en trois dimensions a été élaborée par ordinateur à partir des données provenant des affleurements et des sondages. Elle montre que l'intrusion de la Helle est un sill interstratifié dans les phyllades,

quartzophyllades et quartzites du Revinien. De nombreux petits dykes émanant du sill constituent un cortège filonien assez large autour de l'intrusion aussi bien latéralement que verticalement.

Selom Kramm et Buhl (1985), l'âge radiométrique de mise en place du sill devrait se situer vers 381 ± 16 Ma soit entre le Silurien et le Dévonien inférieur.

Les variations minéralogiques dans les roches ignées sont relativement importantes. Les principales sont, par ordre d'importance décroissante, les suivantes :

- le feldspath potassique est presque exclusivement présent dans le corps magmatique principal (sill). Son abondance tend à décroître vers la partie inférieure de l'intrusion. Les données des sondages suggèrent que ce minéral est quasi inexistant dans le cortège filonien sus et sous-jacent à la masse intrusive principale ;
- le quartz est plus abondant dans les roches ignées recoupées par le sondage He 2 ;
- le plagioclase montre une distribution plus ou moins inverse à celle du quartz ;
- la prochlorite et le feldspath potassique sont surtout abondants dans les roches ignées traversées par les sondages He 3 et He 4, c'est-à-dire dans les parties E et W de l'intrusion.

Les minéraux opaques, essentiellement sulfurés dans les conditions hypogènes, sont identiques dans la minéralisation disséminée de l'intrusion et dans le cortège filonien périphérique à quartz-feldspaths. Il s'agit de : chalcopyrite, pyrrhotite et, accessoirement, pyrite, sphalérite, cobaltite, rutile, titanite et ilménite.

Les veines de quartz sans feldspath et carbonates sont minéralisées en pyrite, marcasite, sphalérite, chalcopyrite, pyrrhotite (toutefois absente dans les veines les plus externes), molybdénite, galène, cobaltite et titanite. Les veines de quartz recoupant l'encaissant contiennent : pyrite, marcasite, sphalérite, galène, chalcopyrite, un tellure de bismuth de la série tellurobismuthinite - hedleyite, parfois du rutile et rarement de la molybdénite.

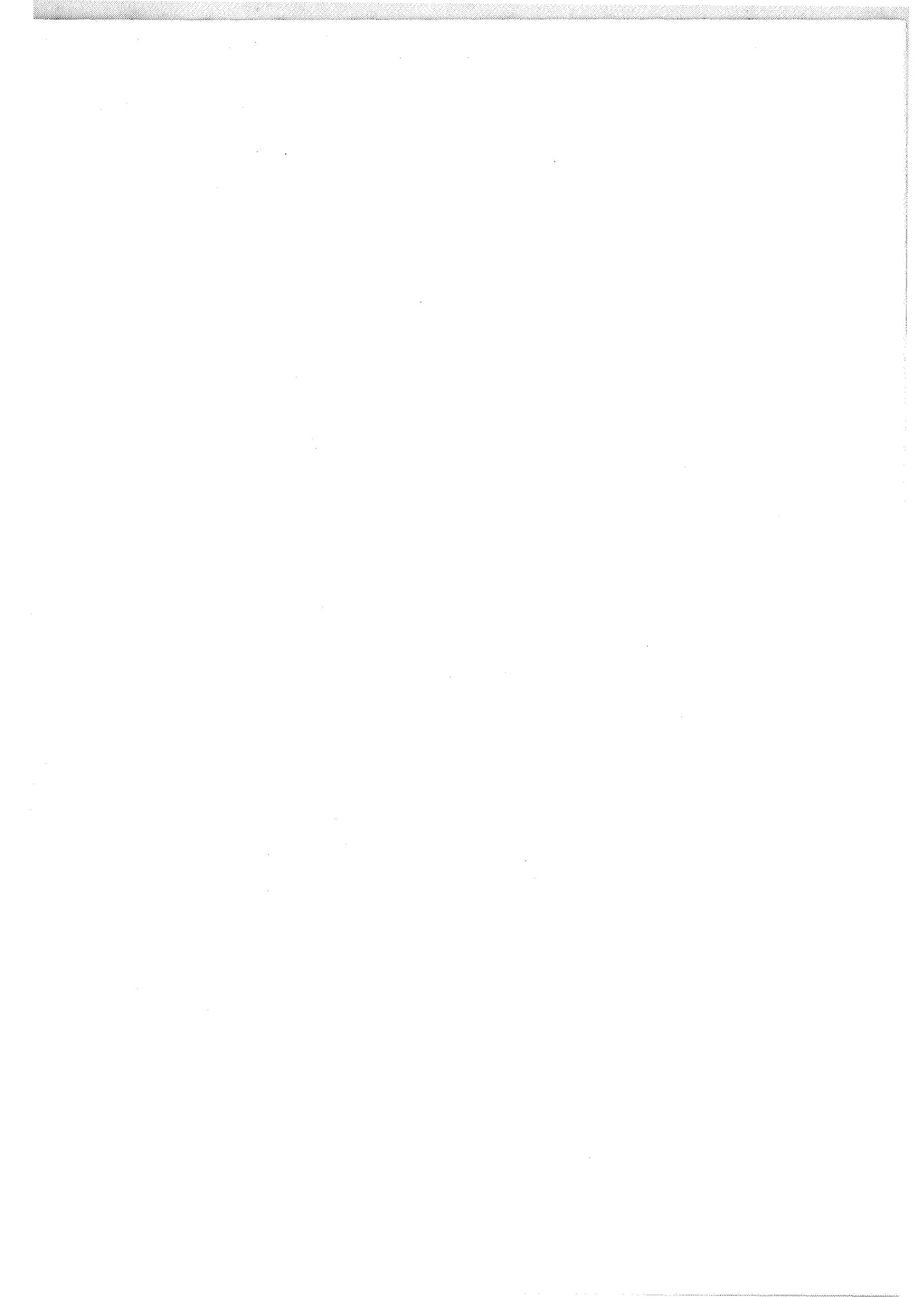
Les veines de quartz-carbonates présentes dans toute l'intrusion ne sont que faiblement minéralisées (généralement en pyrite et marcasite, quelquefois associées à la chalcopyrite et la pyrrhotite).

On peut établir un certain parallélisme qualitatif entre l'intrusion faiblement minéralisée de la Helle et un porphyre cuprifère classique. Bien que la plupart des zones d'altération hydrothermale soient mélangées et donc quasi indiscernables, la variation spatiale du feldspath potassique semble suggérer la présence d'un début d'altération potassique dans les secteurs périphériques de l'intrusion, ce qui est conforme au modèle classique de ce type de minéralisation. Une autre similitude est le développement plus important du cortège filonien dans l'encaissant. La petite taille du corps intrusif et le faible degré de la minéralisation associée réduisent toutefois considérablement son intérêt minier en vue d'une éventuelle exploitation, en tout cas dans les conditions économiques et technologiques actuelles.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRE, L., 1983 - Quelques types de roches magmatiques en Belgique. In : Guides géologiques régionaux. Belgique par F. Robaszynski, C. Dupuis et coll., Masson, 171-176.
- ANDRE, L. & DEUTSCH, S., 1985 - Very low-grade metamorphism Sr isotopic resetting of magmatic rocks and minerals : evidence for a late Givetian strike-slip division of the Brabant massif, Belgium. *J. geol. Soc. London*, **142**: 911-923.
- BERNARD-GRIFFITH, J., CANTAGREL, J.-M. & DUTHON, J.-L., 1977 - Radiometric evidence for an Acadian tectonometamorphic event in Western Massif Central Français. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **61**: 199-212.
- BOUTWELL, J.-M., 1905 - Economic geology of the Bingham mining District. *U.S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, **58**.
- CAILTEUX, J., 1974 - Concentration par flottation des minéraux de cuivre et molybdène dans des porphyres cuprifères. *Ann. Mines Belgique*, 17 p.
- CORIN, F., 1930 - A propos de la note de M. P. Michot sur les plagioclases de la roche éruptive de la Helle. *Ann. Soc. géol. Belgique*, **54**: B92-99.
- CORIN, F., 1965 - Atlas des roches éruptives de Belgique. *Mém. Explic. Cartes géol. minières Belgique*, **4**, 190 p.
- DANNENBERG, A. & HOLZAPFEL, E., 1898 - Die Granite der Gegend von Aachen. *Jarh. Kön. Preuss. Geol. Landesanstalt u. Bergakademie*, 1-19.
- DANNENBERG, A. & HOLZAPFEL, E., 1907 - Les granites des environs d'Aix-la-Chapelle. Traduction de leur article de 1898 par A. Renier, *Ann. Soc. géol. Belgique*, **35**: B415-434 ; *Bull. Soc. belge Géol.*, **22**: 513-530.
- DEJONGHE, L., 1983 - Les minéralisations de la Belgique. In : Guides géologiques régionaux. Belgique par F. Robaszynski, C. Dupuis et coll., Masson, 174-180.
- DENAEYER, M.E. & MORTELMANS, G., 1954 - Les roches éruptives. In : Prodrôme d'une description géologique de la Belgique, 747-792.
- FODE, D., 1981 - Surface geochemistry of a granodiorite intrusion at the Helle in Belgium and of an amphibolite-granite complex at Dalakuru in Sierra Leone. Thèse de Doctorat non publiée, Université de Louvain-la-Neuve, 309 p.
- FOURNIER, R.O., 1968 - Depths of intrusion and conditions of hydrothermal alteration in porphyry copper deposits. *Geol. Soc. Amer. Program Annual Meetings*, p. 101.
- GOFFETTE, O., LIEGEOIS, J.-P. & ANDRE, L., 1991 - Age U-Pb sur zircon dévonien moyen à supérieur du magmatisme bimodal du massif de Rocroi (Ardenne, France) : implications géodynamiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, **312/II**: 1155-1161.
- GRAUERT, B., HÄNNY, R. & SOPTRAJANOVA, G., 1973 - Age and origin of detrital zircons from the pre-Permian basement of the Bohemian Massif and the Alps. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **40**: 105-130.
- GUILBERT, J.-M. & LOWELL, J.D., 1974 - Variations in zoning patterns in porphyry ore deposits. *Can. Min. Metall. Bull.*, **67/742**: 99-109.
- HOLZAPFEL, E., 1909 - Über die neueren Beobachtungen in den metamorphischen Gebieten der Ardennen. *N. Jahrb. Min. Geol. Paleont.*, **1**: 108-128.
- HOLZAPFEL, E., 1910 - Die geologie des Nordabfalles der Eifel mit besonderer Berücksichtigung der Gegend von Aachen. *Abh. Kon. Preuss. Geol. Landesanstalt u. Bergakademie*, **66**.
- IDDINGS, J.-P., 1913 - Igneous rocks. 2ème vol., 133 p.
- JEDWAB, J., 1971 - Ferrimolybdate cristallisée de la Helle. *Bull. Soc. belge Géol.*, **80**: 159-164.
- JONES, B.K., 1992 - Application of metal zoning to gold exploration in porphyry copper systems. *J. Geoch. Expl.*, **43**: 127-155.
- KRAMM, U. & BUHL, D., 1985 - U-Pb zircon dating of the Hell tonalite, Venn-Stavelot Massif, Ardennes. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, **171**: 329-337.
- LASAULT von, A., 1884 - Der Granit unter dem Cambrium des Hohen Venn. *Verhand. Naturhist. Verein Rheinland Westfalens*, Bonn, **41**: 418-450.
- LIU, J.G., 1971 - Synthesis and stability relations of prehnite, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. *Amer. Mineral.*, **56**: 507-531.
- LOWELL, J.D. & GUILBERT, J.M., 1970 - Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ. geol.*, **65/4**: 373-408.
- MARTIN, H. & LECOMTE, P., 1977 - Résultats géochimiques du sondage He 228W623, inédit.
- MEILLIEZ, F., 1989 - Importance de l'évènement calédonien dans l'allochtone ardennaise; essai sur une cinématique paléozoïque de l'Ardenne dans la chaîne varisque. Thèse Doct. Etat, Le Mans, Université du Maine, 518 p.
- MICHOT, P., 1930 - Les plagioclases de la roche éruptive de la Helle. *Ann. Soc. géol. Belgique*, **54**: B44-B48.
- NIELSEN, R.L., 1968 - Hypogene texture and mineral zoning in a copper-bearing granodiorite porphyry stock, Santa Rita, New Mexico. *Econ. Geol.*, **63**: 37-50.
- RAMDOHR, P., 1969 - The ore minerals and their intergrowth. Pergamon Press, London, 769 p.
- RODGERS, J., 1970 - The tectonics of the appalachians. Wiley Eds, 271 p.
- RONCHESNE, P., 1930 - Contribution à la roche éruptive de la Helle (Hautes Fagnes). *Ann. Soc. géol. Belgique*, **54**: 35-43.
- RONCHESNE, P., 1931a - Contribution à la roche éruptive de Lammersdorf (Hautes Fagnes). *Ann. Soc. Sci. Bruxelles*, **51**: 52-57.
- RONCHESNE, P., 1931b - L'auréole de métamorphisme de contact de la roche éruptive de la Helle. *Ann. Soc. Sci. Bruxelles*, **50**: 258-261.
- SACRE, T., 1973 - Contribution à l'étude métallogénique et géochimique de la Helle (Hautes Fagnes). Mém. licence non publié, Univ. Cath. Louvain, 94 p.
- SCHREYER, W. & ABRAHAM, K., 1979 - Prehnite/chlorite and actinolite/epidote bearing mineral assemblages in the metamorphic igneous rocks of La Helle and Challes, Venn-Stavelot massif, Belgium. *Ann. Soc. géol. Belgique*, **101**: 227-241.
- STRECKEISEN, A.L., 1973 - Plutonic rocks. Classification and nomenclature recommended by the USGS. *Geotimes*, **10**: 26-30.

- TODT, W. & BÜSCH, W., 1981 - U-Pb investigations on zircons from Prevariscian gneisses. I. A study from the Schwarzwald, Germany. *Geochem. Cosmochim. Acta*, **45**: 1789-1801.
- VAN WAMBEKE, L., 1953 - Note préliminaire sur la minéralisation de la tonalite de la Helle. *Bull. Soc. belge Géol.*, **62**: 36-38.
- VAN WAMBEKE, L., 1954 - Etude de la minéralisation des tonalites (Hautes Fagnes). Thèse Doctorat non publiée Univ. libre Bruxelles.
- VAN WAMBEKE, L., 1955 - Contribution à l'étude de l'auréole métamorphique des massifs tonalitiques de la Helle et de Lammersdorf. *Bull. Soc. belge Géol.*, **64**: 21-37.
- VAN WAMBEKE, L., 1956a - Compositions minéralogiques et chimiques des tonalites de la Helle et de Lammersdorf. *Bull. Soc. belge. Géol.*, **64/3**: 477-509.
- VAN WAMBEKE, L., 1956b - La minéralisation des tonalites de la Helle et de Lammersdorf et leurs relations avec les autres minéralisations. *Bull. Soc. belge Géol.*, **64/3**: 534-580.
- VAN WAMBEKE, L., 1958 - Deux nouveaux minéraux belges : la turquoise d'Otré et la ferrimolybdite de la tonalite de la Helle. *Bull. Soc. belge Géol.*, **67**: 455-459.
- WEIS, D., 1979 - Etude des minéraux opaques et semi-opaques de la tonalite de la Helle. Mém. licence non publié, Univ. libre Bruxelles, 98 p.
- WEIS, D., DEJONGHE, D. & HERBOSCH, A., 1980 - Les associations des minéraux opaques et semi-opaques de la roche ignée de la Helle. *Ann. Soc. géol. Belgique*, **103**: 15-23.
- WHITE, D.E., 1968 - Environments of generation of some base-metal ore deposits. *Econ. Geol.*, **63**: 301-335.



Editeur responsable : L. RZONZEF
North Gate III
Bd. Emile Jacqmain 154
1000 Bruxelles
Dépôt légal : D 1996/0880/1

Verantwoordelijke uitgever : L. RZONZEF
North Gate III
Emile Jacqmainlaan 154
1000 Brussel
Wettelijk depot : D 1996/0880/1