

A propos de la détermination des chloritoïdes en frottis : le cas des alluvions de la Meuse et d'affluents ardennais

Etienne Juvigné*

(*) Université de Liège, Laboratoire de Géographie physique, Bât. 11, B-4000 Liège (Sart Tilman)

Résumé

La détermination de chloritoïdes dans des frottis de minéraux denses d'alluvions de la Meuse et de ses affluents a donné lieu à la publication de résultats interpellants. Le présent travail apporte une description détaillée de la présentation en frottis de ces minéraux provenant de sites de référence du massif cambro-ordovicien de Haute Belgique.

A venir...L'analyse par diffractométrie de poudre d'échantillons provenant de plaines alluviales du bassin de la Meuse conduit à une nouvelle approche des variations de la fréquence des chloritoïdes dans ces milieux détritiques.

Mots-clefs : Belgique, Ardenne, Meuse, alluvions, minéraux denses, chloritoïde, diffractométrie

Abstract.

The determination of chloritoids in smears slides of heavy minerals from alluvial deposits of the Meuse and its tributaries has given rise to puzzling results. The present work provides a detailed description of the smear presentation of these minerals from reference sites of the Cambro-Ordovician massif of Haute Belgique.

Coming up... Powder diffractometry analysis of samples from alluvial plains of the Meuse basin leads to a new approach to variations in the frequency of chloritoids in these detrital environments.

Keywords : Belgium, Ardenne, Meuse, alluvia, heavy minerals, chloritoid, diffractometry

1.Introduction

Dans la littérature relative aux associations de minéraux denses des alluvions de la Meuse et d'affluents ardennais, l'évolution géographique de la fréquence des chloritoïdes est interpellante tant sur le plan géographique dans les plaines alluviales (Edelman et Van Baren, 1935 ; Zonneveld, 1947 ; Tavernier et Laruelle, 1952 ; Bustamante, 1973) que sur le plan stratigraphique dans les terrasses de la Meuse (Zonneveld, 1947a et 1947b ; Bustamante, 1973 ; Krook, 1993). Le présent travail a pour objectif de : (1) mettre en évidence de probables erreurs de détermination ; (2) produire une description des propriétés optiques de ces minéraux perçues dans le microscope polarisant ; (3) présenter de nouvelles déterminations optiques conjointement avec la diffractométrie de poudre ; (4) produire un modèle de variations de fréquence dans les plaines alluviales, basé essentiellement sur la diffraction de poudre. La figure 1 permet de visualiser la localisation des cours d'eau évoqués dans le présent travail, des sites d'échantillonnage antérieurs et nouveaux, ainsi que des massifs métamorphiques connus pour leurs roches à chloritoïdes.

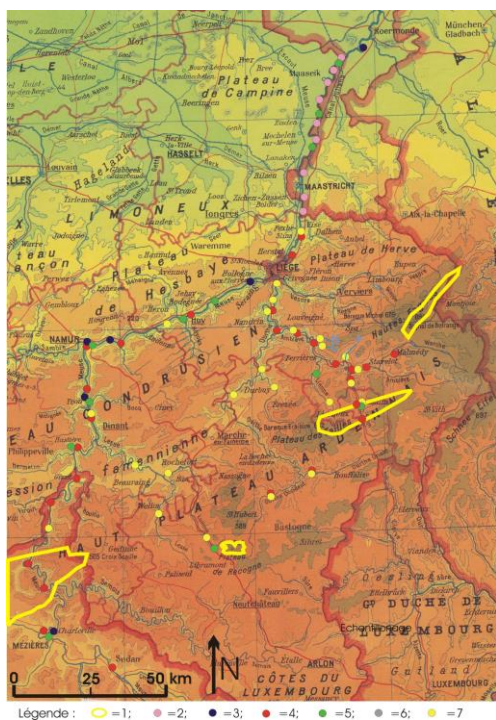


Figure 1. Localisation des sites évoqués dans ce travail. Légende : 1= massifs cambro-ordoviciens avec veines à chloritoïdes connues ; sites d'échantillonnage par : 2= Edelman & Van Baren (1935) ; 3= Zonneveld (1947a) ; 4= Tavernier et Laruelle (1952) ; 5= Bustamante (1973) ; 6= Krook (1993) ; 7= Juvigné et al. (ce travail). Abréviations : N= Ninglinspo ; C= Chefna ; P=Parfondruy.

2.Méthodes

Indépendamment des différences qui existent réellement entre des associations de minéraux denses, des variations qui se présentent dans la littérature pour une même formation sont probablement dues à des causes techniques. (1) Des échantillons prélevés dans des lits de rivières peuvent contenir des sables de construction provenant de régions extérieures aux bassins versants (ex. Edelman et Van Baren, 1935). (2) En général, les associations varient en fonction de la classe granulométrique choisie (ex. : Von Andel, 1950) et plusieurs auteurs n'évoquent même pas la taille des grains investigués. (3) Les traitements chimiques destinés à dissoudre les vernis de fer-manganèse qui couvrent les grains peuvent faire disparaître certains minéraux. (4) Les méthodes de séparation par gravité ou par centrifugation donnent des résultats d'autant plus différents qu'ils concernent des classes granulométriques de plus en plus fines (Juvigné et al., 1999). (5) La densité du bromoforme pouvant diminuer au fil des régénérations peut provoquer la récolte de minéraux nouveaux de moins forte densité. (6) La méthode de détermination va du parcours libre au ruban (Van Harten, 1955) ; la première donne davantage de minéraux bien connus du détermineur, la seconde évite ce type de déviation. (7) La prise en compte ou non des minéraux opaques change le nombre de minéraux transparents déterminés et par le fait même l'intervalle de confiance sur les différentes fréquences. (8) Des déterminations inexactes sont inapparentes si une classe 'indéterminés' n'est prévue. Enfin, il faut savoir que l'ensemble des détails techniques appliqués est rarement exposé, si bien qu'il est difficile de soupçonner les causes de variations d'origine technique.

Dans le présent travail, notre choix a été le suivant. (1) Tous nos prélèvements ont été effectués dans les plaines alluviales au contact des limons de crues et des cailloutis sous-jacents, soit dans des berges, soit par forages à la tarière. (2) La classe granulométrique choisie est celle comprise entre 90 et 355 μm de façon à éliminer les minéraux des loess, et par le fait même la plupart de ceux des altérites du massif paléozoïque. (3) Les vernis ferrugineux ont été dissous par ébullition dans

HCl_{10%vol.} (4) Les séparations densimétriques ont été réalisées en ampoules avec un volume d'échantillon inférieur 10% du volume de bromoforme et en répétant les cycles 'agitations-récoltes' jusqu'à ne plus percevoir de grains denses dans le fond de l'ampoule. (5) La densité du bromoforme a été maintenue à 2,84 par régénération. (6) Les minéraux indéterminables en lumière transmise ont été comptabilisés en parts supplémentaires. (7) Des couvre-objets striés ont été utilisés, et la méthode du ruban a été appliquée. De plus, une partie de la récolte dense a été réduite en poudre et soumise à la diffraction aux rayons X.

3. Analyse critique de la littérature

3.1. Typologies

Edelman et Van Baren (1935) écrivent « ...ont été groupés sous le nom de chloritoïde : 1° de véritables écailles de chloritoïde, 2° des fragments provenant indubitablement de schistes chloritoïdiques à imbrication fine. Ces fragments sont souvent presque opaques, mais présentent encore suffisamment de transparence dans les bords pour permettre la détermination, 3° Les fragments schisteux douteux que l'on pouvait difficilement placer ailleurs. L'addition de cette troisième catégorie de fragments est causée par le fait qu'elle est difficile à différencier de la seconde et qu'en outre elles se présentent toujours ensemble. Il n'est pas toujours facile de faire la distinction entre les chloritoïdes semi-opaques et les saussurites troubles de la "Province saussuritique" (NDR : sédiments du Rhin de la partie septentrionale du Limbourg), mais nous nous portons cependant garants quant à l'ordre des dimensions des rapports exposés. ».

Zonneveld (1947a, 1947b) identifie dans les alluvions de la Meuse, entre autres : (1) des 'chloritoïdes troubles' (*sensu* Van Baren, 1934) ; (2) des chloritoïdes clairs qui se présentent en 'feuilles' de couleur verte assorties d'un pléochroïsme vert-feuille [*« Heldere chloritoïd – de heldere is de normale ottrelite, bekend uit de ottreliteschiefer van de Ardennen (Vielsam, etc.). Komt voor als groene blaadjes en een kenmerkend pleochroïsme naar bladgroen. »* Zonneveld (1949) appelle « otréélite normale » les deux types de chloritoïdes.

Von Andel (1950), dans un travail concernant des plaines alluviales du bassin du Rhin, signale dans les alluvions de la Sauer la présence de grains altérés et sombres identiques à ceux trouvés par Zonneveld (cf. supra). Il écrit : « Very dark alterite grains, perhaps particles of chloritoïd schist, have been found in the Sauer. They resemble the turbid chloritoïd from southern Limburg (J.I.S. Zonneveld, 1947) and also particles of crushed chloritoïd-schist from Vielsalm ».

Tavernier et Laruelle (1952), dans un travail concernant les plaines alluviales de la Meuse et d'affluents ardennais, distinguent trois variétés de chloritoïdes : « chloritoïde clair s.s., de l'otrélite et du chloritoïde trouble ». Par ailleurs, ils précisent : « Les deux premières variétés ont été groupées dans les tables sous la rubrique chloritoïde clair ». Les auteurs reconnaissent entre autres : (1) « une association à fragments schisteux et chloritoïdes troubles dans ... l'Ourthe orientale » ; (2) « une association à grenats troubles et fragments schisteux dans l'Ourthe s.s. » ; (3) « dans les alluvions de la Lesse... le grenat trouble, l'otrélite et les fragments schisteux ».

Bustamante (1973) distingue trois catégories de chloritoïdes basées sur la couleur : brun, vert, vert clair. Bustamante (1974b) distingue : (1) un « chloritoïde manganésifère » dont la couleur est brun-rouge et qui se trouve dans les alluvions de la Lienne ; (2) des « chloritoïdes s.s. » qui sont en général vert clair à foncé et qui se trouvent dans les alluvions de la Lienne et de la Salm (Massif de Stavelot), ainsi que dans celles du Serpont (Massif du Serpont). Bustamante (1990) extrait des minéraux denses d'alluvions de la Lienne à Lierneux, de la Salm à Salm-Château, de l'Ourthe à La Roche, du Serpont à Bra et de la Meuse à Revin. Il en isole à la loupe binoculaire des grains de diverses couleurs : (1) dans la Lienne, ils sont verts, brun-rouge, vert foncé, vert clair, jaunes ; (2) dans la Salm, brun-rouge,

verts ; (3) dans le Serpont, l'Ourthe et la Meuse, verts. Au terme d'analyses diverses (infrarouge, rayons X et thermique différentielle), il conclut que tous les grains qu'il a extraits sont des chloritoïdes.

Juvigné (1977) mentionne la présence de « volumineux chloritoïdes et grenats des alluvions de l'Ourthe » dans des dépôts éoliens du coude de l'Ourthe en Famenne. Il n'en donne aucune description. Juvigné (*in* Houbrechts, 2005) mentionne la présence de chloritoïdes dans des altérites de terrains emsiens sous la plaine alluviale de l'Aisne. Il ne donne aucune description des minéraux.

En résumé, un seul auteur (Bustamante, 1973) décrit les conditions de prélèvement, le traitement imposé à ses échantillons ainsi que les classes granulométriques en relation avec les déterminations. Aucun auteur ne produit de description du comportement optique des chloritoïdes dans le microscope polarisant, si ce n'est occasionnellement le pléochroïsme. Sur les trois auteurs qui ont utilisé l'expression « chloritoïdes clairs » (cf. supra), seul Zonneveld (1947a) leur attribue une couleur, le vert. Enfin, aucun auteur ne produit de description des grains avec lesquels ils invoquent des confusions possibles, à savoir des fragments de schiste, voire la saussurite ou l'altérite.

3.2. Essais de comparaison de résultats

En raison des différences méthodologiques évoquées plus haut, la comparaison des associations produites par les différents auteurs ne devrait même pas être abordée. Néanmoins, nous allons essayer de le faire en respectant les nomenclatures appliquées par chacun.

3.2.1. Comparaison de résultats dans un même site

Les alluvions de la Salm à Grand Halleux ont été étudiées par Tavernier et Laruelle (1952) ainsi que par Bustamante (1973). Les premiers ont traité un seul échantillon, dont ils ont déterminé 100 minéraux denses. Bustamante (1973) a déterminé 1413 minéraux répartis en 3 échantillons dont nous avons totalisé les résultats (Tab. 1).

	Grand-Halleux			
	Tavernier et Laruelle 1952		Bustamante 1973	
	1 échantillon	I.C. 3 σ	3 échantillons	I.C. 3 σ
n=	100		1413	
Zircon	3	5,12	7,7	2,13
Tourmaline	7	7,65	6,1	1,91
Rutile	0	-	2,1	1,14
Anatase	0	-	0,2	0,36
Brookite	0	-	0	-
Corindon		-	0,1	0,25
Staurotide	0	-	0	-
Disthène	0	-	0	-
Andalousite	0	-	0,1	0,25
Sillimanite	0	-	0	-
Grenat clair	2	4,20		
Grenat trouble	0	-		
Grenat rose-		-	3,2	1,40
Grenat incolore+inclusions		-	17,1	3,00
Chloritoïde clair	0	-		
Chloritoïde trouble	3	5,12		
Chloritoïde brun		-	27,2	3,55
Chloritoïde vert		-	9,4	2,33
Chloritoïde vert clair		-	2,6	1,27
Zoïsite	4	5,88	0	-
Epidote et clinzoïsite		-	1,8	1,06
Orthite				
Hornblende verte		-	0,1	0,25
Augite	3	5,12	0,5	0,56
Titanoaugite		-	0,6	0,62
Sphène		-	0,8	0,71
Enstatite		-	2,6	1,27
Picotite	1	2,98		
Basaltine		-	2,6	1,27
Schiste	77	12,62	15,1	2,86
Total	100		99,9	
Opaques: 100%+	52		1,3	

Tableau 1. Fréquence de minéraux denses des alluvions de la Salm à Grand-Halleux par Tavernier et Laruelle (1952) et Bustamante (1973). Les classifications respectives des auteurs sont respectées et la présentation des résultats a été uniformisée en recalculant les fréquences en fonction du tableau de résultats le moins détaillé, c'est à dire celui de Tavernier et Laruelle.

Sur le plan quantitatif, les différences les plus interpellantes portent sur la fréquence des éléments : grains opaques (52% vs 1,3%) ; fragments de schistes (77% vs 15,1%) ; chloritoïdes (3% vs 39,2%) ; grenats (2% vs 20,3%). Même en totalisant les fragments de schiste et les chloritoïdes, un écart important subsiste : 80% vs 54,3%. Enfin, les intervalles de confiance au niveau de 3 sigmas, appliqués en raison du nombre très différent de minéraux déterminés, n'éliminent pas les énigmes précitées. Par ailleurs, de telles considérations statistiques ne sont applicables que pour des items clairement identifiés, ce qui est loin d'être le cas pour les minéraux concernés dans les deux travaux.

Terrasse de Caberg/Maastricht. Bien qu'il ne s'agisse pas de la plaine alluviale de la Meuse mais d'une basse terrasse, cet exemple est retenu parce : (1) Zonneveld (1949) et Bustamante (1973) y ont trouvé environ 14% de chloritoïdes ; (2) Krook (1992) écrit n'en avoir pas trouvé malgré l'application de diverses techniques ; (3) Bustamante (1995) produisant de nouvelles analyses n'en trouve plus que 5%.

3.2.2. Evolution spatiale de la fréquence des chloritoïdes

Si en principe on attend une diminution de la fréquence des chloritoïdes à partir les massifs métamorphiques et vers l'aval des cours d'eau, les exemples de variations non conformes à ce principe sont nombreux. Ci-après, nous commentons à titre d'exemple, les données relatives à la Meuse depuis Sedan en France jusqu'à Roermond aux Pays-Bas (Tab. 2).

	Edel & VB (1934)	Zonneveld (1947)		Tavernier & Lar. (1952)		Bustamante (1973)		
	Chloritoïde & schiste chlor.	Heldere chl. chloritoid	Troebele chloritoid	Heldere chl. chloritoid	Troebele chloritoid	Chloritoïde brun	Chloritoïde vert	Chloritoïde vert clair
Sedan				0	0			
Charleville-Mézières		1	2	0	0	0	0	0
Confluence Semois								
Deville				0	0			
Revin				2,4	0			
Vireux-Wallerand				0	0			
Givet				2,2	0			
Hastière-Lavaux				0	0	0	0	1,8
Confluence Lesse								
Houx				0	1,1			
Yvoir						0	0	1,8
Hun		3	12					
Profondeville				0	0			
Namur		3	16	0	0			
Erpent						0	0	6,6
Marche-les-Dames		0	7					
Namèche				0	2,1			
Huy						0	0	2
Neuville-sous-Huy				0	3,4			
Hermalle-sous-Huy						0	0	1,4
Flémalle		0	11					
Confluence Durthe								
Jupille				0	4,1			
Argenteau/Visé				1	9,3			
Km2: Ejsden	24							
Km7: Gronsveld	21							
Km12: Amby	17							
Boorseem/Maasmechelen						10,9	1,7	1,7
Km17: Elsloo	24							
Km22: Urmond	24							
Km27: Grevenbich	30							
Dielsen						6,2	2,9	2,3
Km32: Roosteren	20							
Km37: Echt	23							
Kessenich						2,5	3,8	1,3
Km42: Maasbracht	24							
Weerterhof/Roermond		1	40					

Tableau 2. Pourcentages de chloritoïdes dans les associations de minéraux denses transparents de la plaine alluviale de la Meuse depuis Sedan (amont) jusqu'à Roermond (aval) sans tenir compte de la distance. Les affluents susceptibles de fournir des chloritoïdes à la Meuse sont intercalés.

Les résultats du tableau 2 sont représentés sous la forme d'un graphique (Fig. 2) afin de faciliter les comparaisons des données.

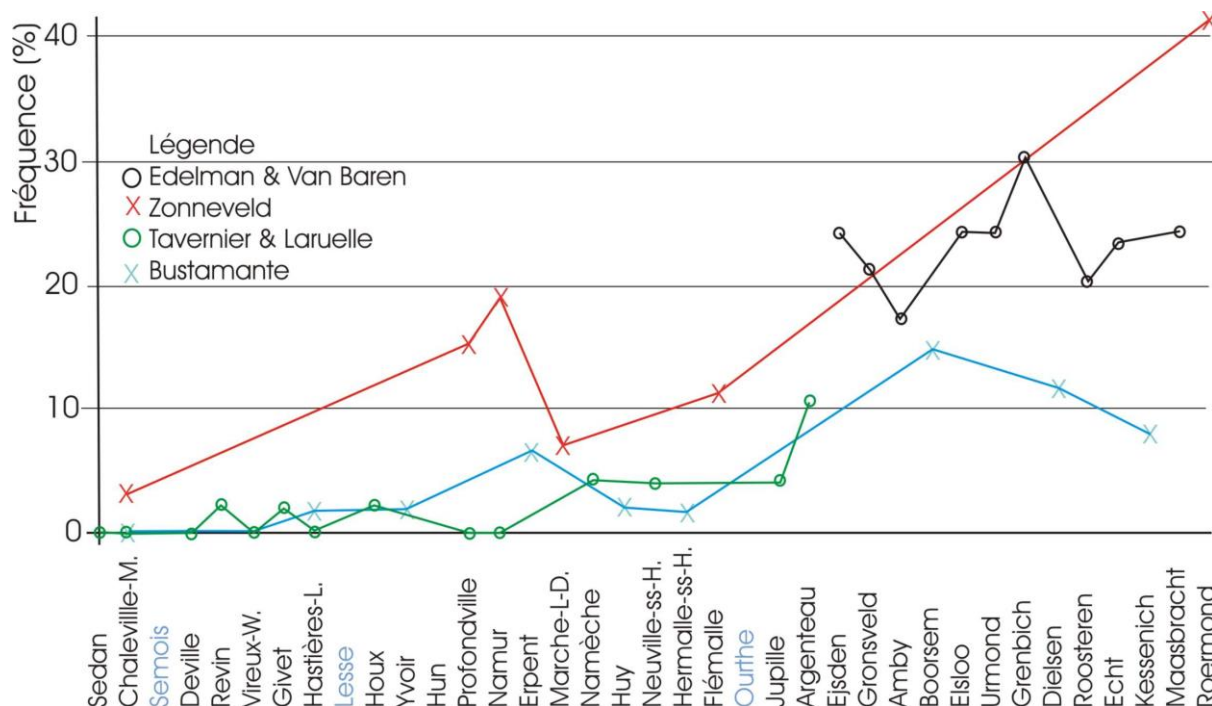


Figure 2. Evolution de la fréquence des chloritoïdes dans les associations de minéraux denses transparents des alluvions de la Meuse depuis Sedan jusqu'à Roermond par différents auteurs.

Dans l'ensemble, les pourcentages sont systématiquement plus élevés d'une part chez Edelman & Van Baren et Zonneveld que d'autre part chez Tavernier & Laruelle et Bustamante. Zonneveld est le seul qui signale la présence de chloritoïdes à l'amont de la confluence du Massif de Revin. Les faibles fréquences à partir de Revin jusqu'à Namur peuvent s'expliquer par la contribution du Massif de Rocroi, puis à Anseremme du Massif de Recogne qui contribue à alimenter la Lesse. Entre Namur et Liège, on peut s'étonner de l'accroissement des fréquences à Namèche et Neuville-sous-Huy, puisqu'aucun affluent n'est censé apporter des chloritoïdes. A l'aval de Liège, il est inattendu de ne constater aucun accroissement à Jupille, premier site à l'aval de la confluence de l'Ourthe, alors que la fréquence double de Jupille à Argenteau. L'accroissement systématique à travers le Limbourg est aussi interpellante. Dans tous les cas évoqués à l'aval de Namur, pour expliquer les accroissements de fréquence constatés, tous facteurs techniques exclus, on ne peut guère faire appel qu'à des apports d'affluents qui auraient prélevé des chloritoïdes dans les lambeaux de terrasses de la Meuse qu'ils recourent.

3.3. Synthèse

Les minéraux nommés « chloritoïdes » dans des frottis d'alluvions de cours d'eau ardennais et de la Meuse n'ont fait l'objet d'aucune description précise de leur comportement optique dans le microscope polarisant, et les relations entre les typologies des auteurs respectifs ne peuvent être établies. Les analyses minéralogiques effectuées afin de déterminer des chloritoïdes n'ont jamais été mises en relation avec les fréquences de ces minéraux dans les alluvions. Les résultats contradictoires évoqués pourraient n'avoir que des causes méthodologiques. Toutes ces constatations justifient une mise au point sur la description des chloritoïdes tels qu'ils se présentent dans le microscope polarisant, ainsi qu'une révision de la façon de rapporter leur fréquence dans les associations de minéraux denses des alluvions fluviales.

4. Identification des chloritoïdes en frottis

Les descriptions qui suivent ont pour seul objectif d'apporter des faits d'observations qui permettent de reconnaître des chloritoïdes du massif cambro-ordovicien ardennais dans des frottis de minéraux denses obtenus au départ d'échantillons de plaines alluviales de la Meuse et de plusieurs de ses affluents. La description des propriétés observées est donc privilégiée par rapport aux propriétés physiques et chimiques bien connues et disponibles dans des ouvrages spécialisés.

4.1. Échantillons choisis et mode opératoire

Des échantillons provenant du terrain ou du musée de minéralogie ont été analysés (Fig. 3). Dans tous les cas, à l'œil nu, les phénocristaux de chloritoïdes sont d'apparence noire, mais en réalité vert très foncé, et ils ne représentent qu'une part minoritaire de la veine qui les contient. Ils s'y trouvent dispersés dans une matrice dont les cassures fraîches sont grises, mais exposées à l'altération, elles acquièrent une couleur verdâtre. La taille des minéraux varie de quelques dizaines de microns jusqu'à 1 mm (Massifs de Stavelot et de Rocroi), tandis que dans l'échantillon du Massif du Serpont, elle atteint le centimètre.

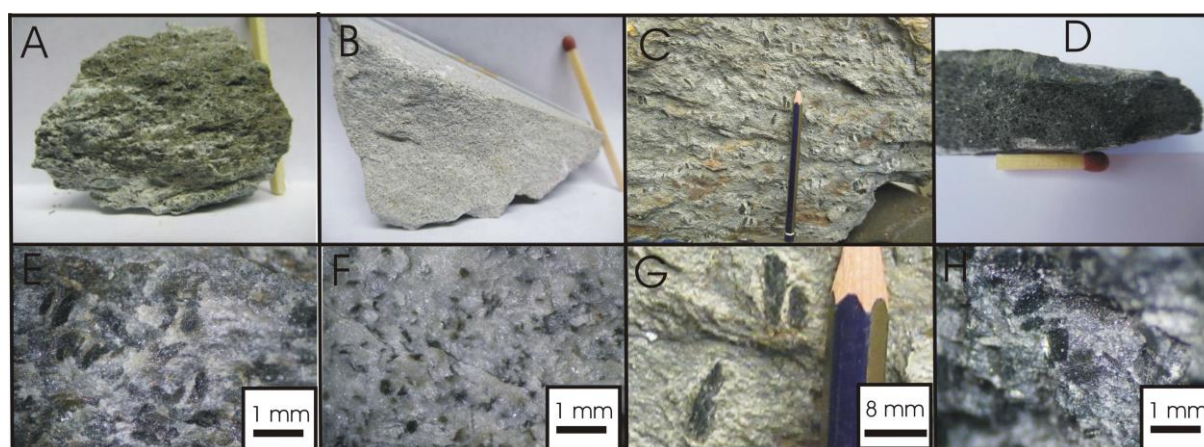


Figure 3. Échantillons de roches à chloritoïdes étudiés dans le présent travail : A et E, veine provenant de la Formation de Jalhay, Membre de Lierneux à Vielsalm-Sud (prélèvement par Jean-Marc Marion) ; B et F, veine provenant de la Formation d'Otré, Membre de Bihain à Recht, mine Hinter den Sandgruben (prélèvement par Jean-Marc Marion) ; C et G, dalle de phyllade provenant du Massif du Serpont (musée de minéralogie, ULiège) ; D et H, veine provenant du Massif de Rocroi (musée de minéralogie ULiège). Dans tous les cas, les chloritoïdes sont les cristaux d'apparence noire à l'œil nu.

De façon à préparer des frottis comparables à ceux des sédiments fluviatiles dans lesquels les chloritoïdes sont recherchés, dans chaque cas, un éclat de la roche a été : (1) broyé ; (2) tamisé de façon à récolter les éléments dont la taille est comprise entre 90 et 355 μm ; (3) séparé par gradient de densité dans un mélange de bromoforme-acétone ; (4) examiné à la loupe et au microscope polarisant ; (5) des aliquotes de quelques échantillons ont été pulvérisées au mortier pour être soumises à la diffraction des rayons X.

4.2. Chloritoïde du Massif de Stavelot

Les deux échantillons du Massif de Stavelot ont donné des résultats identiques, si bien que seuls ceux de l'échantillon de Vielsalm (Fig.1 : échantillon A et E) sont rapportés ci-dessous à titre d'exemple parce que ses chloritoïdes sont plus volumineux que ceux de Recht

4.2.1. Examen à la loupe

Le broyat de cette roche a été soumis à une séparation par gradient de densité. Les récoltes des différentes fractions sont représentées à la figure 4.

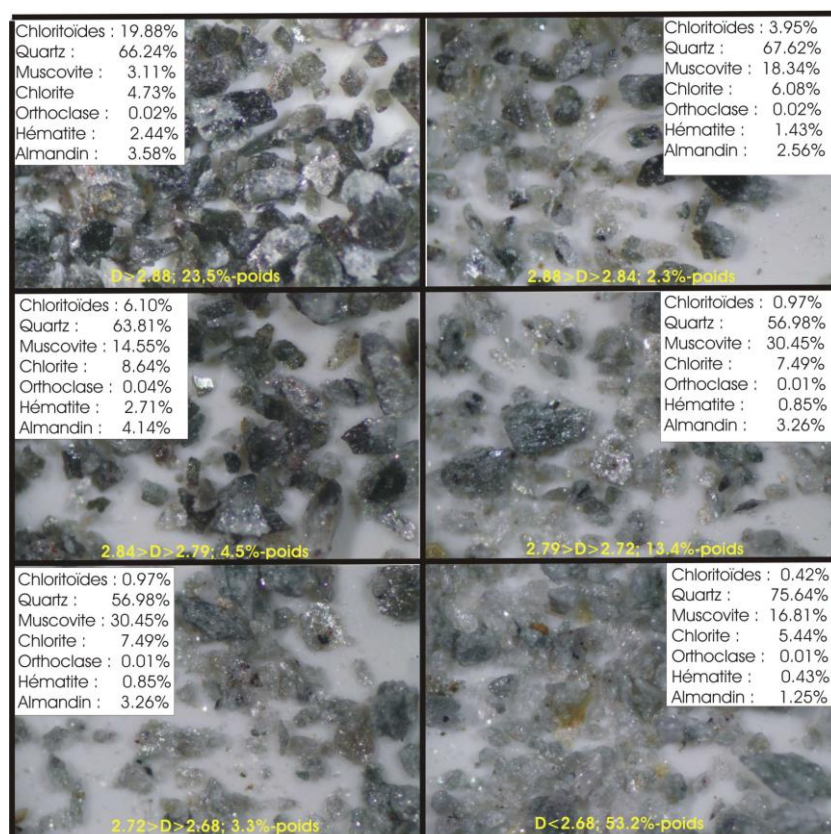


Figure 4. Broyat d'un éclat de la veine à chloritoïdes de Vielsalm (cf. supra). Explications : (1) en jaune, la fourchette de densité de chaque récolte, ainsi que la part pondérale de l'échantillon global ; (2) en encart la composition minéralogique obtenue par diffraction sur poudre ; (3) dans tous les cas, la taille des grains du broyat est comprise entre 90 et 355 μm (tamisage).

En %-poids, les fractions des deux plages de densité extrême sont les plus riches : 53% de grains dans la fraction la moins dense ($\delta < 2,68$), et 23,5% dans la fraction la plus dense ($\delta > 2,88$).

On constate que : (1) dans la fraction la plus dense, les grains opaques noirs en apparence sont les plus fréquents, et ils portent des amas gris clair et translucides sur lesquels on voit briller des cryptocristaux ; (2) dans la fraction la moins dense, les grains sont en général incolores et translucides avec des cryptocristaux brillants ; quant aux grains noirs, ils sont petits et rares ; (3) dans les récoltes de densité intermédiaire, on constate que la part de grains noirs diminue, et celle des grains incolores augmente avec la décroissance de la densité.

4.2.2. Identification par diffraction sur poudre à venir

...

La plupart des grains du broyat sont des complexes de grains noirs (chloritoïdes) auxquels est accolée de la matrice cryptocristalline faite essentiellement de minéraux dits 'légers' ; dans ces conditions l'une et l'autre de ces deux composantes se retrouvent dans toutes les fractions de densité.

Compte tenu du problème posé dans l'introduction, on retiendra ici que dans les séparations densimétriques d'alluvions fluviales, les parts de chloritoïdes récoltées dans la fraction dense et

perdus dans la fraction 'légère' peuvent varier en fonction de la densité du bromoforme utilisé, voire (partiellement) régénéré.

4.2.3. Identification au microscope polarisant

Comme l'habitude est de ne déterminer au microscope polarisant que les minéraux denses, nous ne traitons ici que cette seule fraction. Des grains noirs portant le moins possible de matrice ont été extraits à l'aiguille sous la loupe, et montés en frottis pour être examinés au microscope polarisant. Tous les grains sont du type représenté à la figure 55.

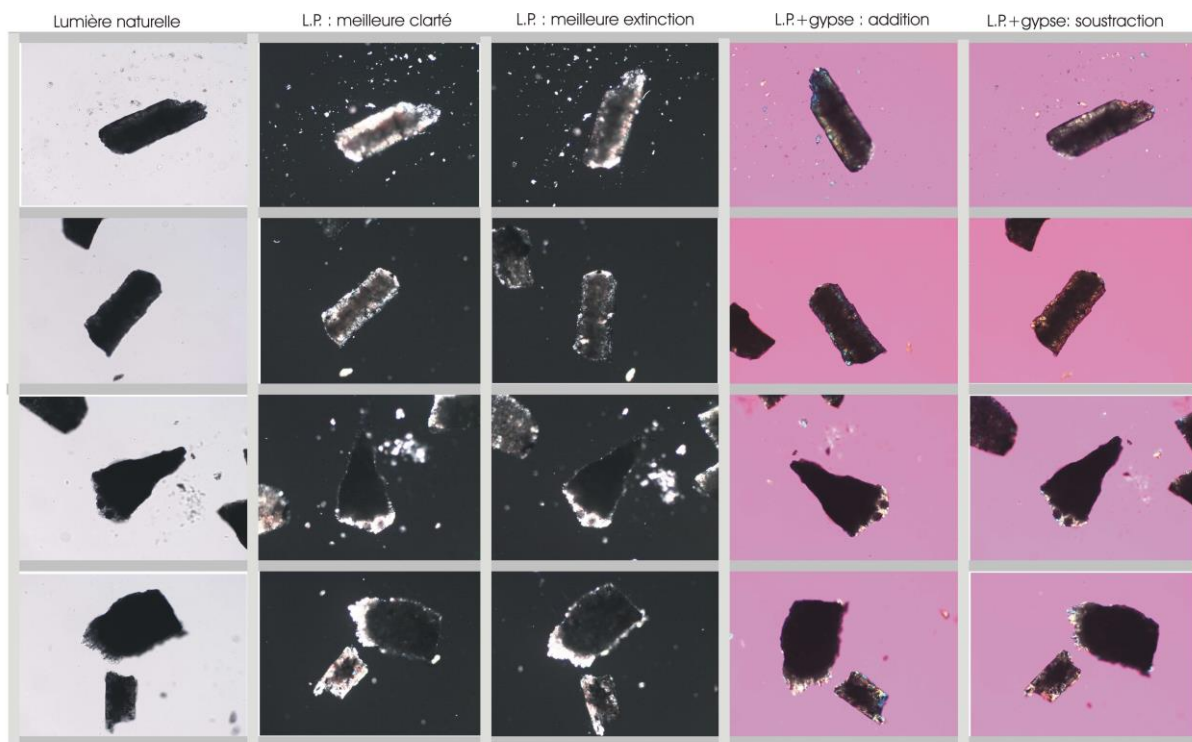


Figure 5. Chloritoïdes extraits à l'aiguille de la fraction dense de la veine à chloritoïde de Vielsalm, et examinés au microscope polarisant.

Lumière naturelle (LN). Tous les noyaux des grains sont pratiquement opaques (phénocristaux de chloritoïde), nous dirons sub-opaques, ce qui est probablement dû au fait qu'ils sont criblés d'hématite cryptogrenue. Aucun grain ne laisse apparaître ni la couleur verte, ni un quelconque pléochroïsme. Seules les adhérences de matrice cryptocristalline visibles sur les bords sont vaguement translucides.

Lumière polarisée (LP). Le contraste entre l'extinction et la clarté est en général faible. Pour chaque phénocristal de chloritoïde, les propriétés optiques attendues pour la détermination sont réduites aux teintes de retard correspondant à une très faible biréfringence ($0.006 < b < 0.011$). En général, ces teintes n'apparaissent que très localement dans les parties les plus minces des grains où, avec le gypse, elles varient du jaune du 1^{er} ordre au bleu de 2^e ordre, ce qui implique que les épaisseurs correspondantes soient inférieures à une soixantaine de microns. Dans des cas rares, des minéraux qui ont un tel comportement optique sont prismatiques (Fig. 4 : rangées 1 et 2), on peut alors vérifier l'extinction oblique (extinction théorique : 30°) et l'allongement négatif.

Lumière convergente (LC). La figure d'interférence est toujours fantômatique et inexploitable, car : (1) la dispersion des axes optiques théorique est forte ; (2) les inclusions nuisent à sa formation ; (3)

pour les formes prismatiques, la bissectrice des axes optiques est couchée comme le prisme sur le porte-objet et la figure est donc à l'infini.

Conclusion. Quand on a la certitude que les minéraux examinés proviennent d'une veine à chloritoïdes, les couleurs de retard exprimant une très faible biréfringence ($0,006 < b < 0,011$) permettent de soupçonner l'identité d'un chloritoïde. Si le minéral est de forme prismatique, l'angle d'extinction oblique (jusqu'à 30°) et le signe de l'allongement (négatif) contribuent à conforter la conviction du déterminateur. Malheureusement, dans l'échantillon examiné de tels minéraux ne représentent qu'une infime minorité.

Retour à Edelman et Van Baren (1935). Ces auteurs écrivent : « ... Ces fragments sont souvent presque opaques, mais présentent encore suffisamment de transparence dans les bords pour permettre la détermination, ... ». Une telle phrase désigne de toute évidence des grains sub-opaques dont des parties marginales sont limpides. Ces dernières sont en général peu épaisses, et on ne peut guère y attendre que des teintes de retard très basses, sans aucune autre propriété optique perceptible. Toutefois dans le cas d'une population détritique à large spectre, les parties minces de la plupart des minéraux donneront nécessairement des teintes de retard basses, et il est inacceptable d'attribuer nécessairement ces dernières à des chloritoïdes.

4.2.4. Apparence de la matrice cryptocristalline au microscope polarisant

Des grains contenant un maximum de matrice cryptocristalline ont été extraits à l'aiguille de la fraction de plus faible densité ($\delta < 2.68$) (Fig. 6). Il s'agit d'enchevêtrements de crypto-cristaux limpides et transparents dont la taille individuelle est de quelques microns. Des micro-prismes (environ $2\mu\text{m}/10\mu\text{m}$) incolores, probablement de quartz (revoir diffractométrie) constituent la plus grande partie de la masse ; ils sont souvent groupés en bouquet. Des plages légèrement verdâtres dans certains grains attestent probablement la présence d'une plus forte concentration en chlorite (revoir diffractométrie). Des micro-inclusions opaques peuvent diminuer la transparence de l'agglomérat. En lumière polarisée, ces grains se présentent comme une constellation de cryptocristaux dont les teintes, compte tenu de la taille du broyat, et de l'orientation diverse des cristaux ne dépassent pas le bleu de 2^e ordre avec intercalation du gypse et en addition.

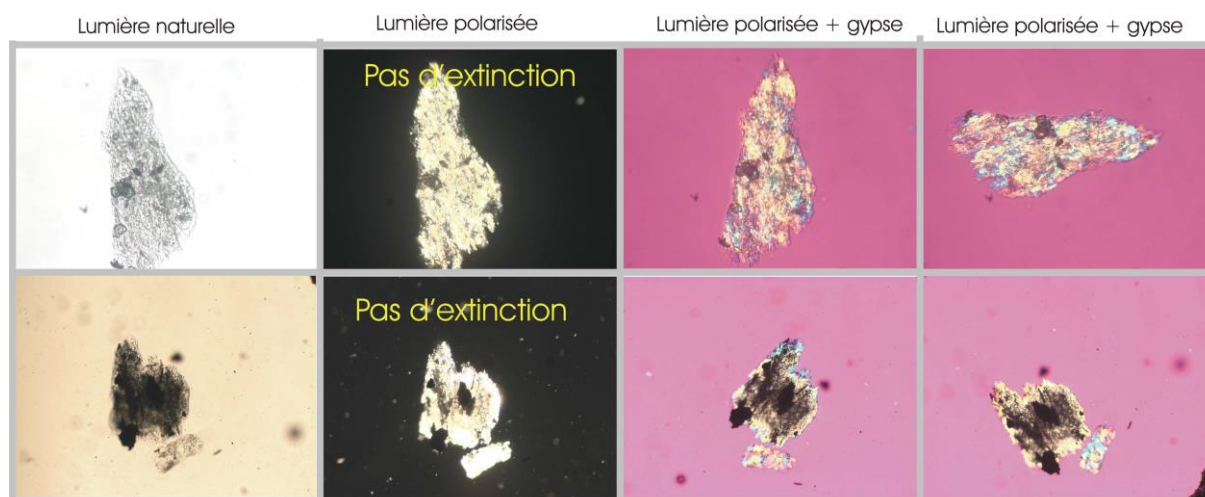


Figure 6. Fragments de matrice cryptocristalline de la veine à chloritoïdes de Vielsalm au microscope polarisant.

4.2.6. Synthèse

De la matrice cryptocristalline identifiable en bordure d'un minéral sub-opaque peut permettre de supposer que celui-ci est un chloritoïde. Toutefois, lors de l'examen des frottis d'alluvions, il faut tenir compte du fait que les agglomérats cryptocristallins ne sont pas nécessairement ceux de veines à chloritoïdes.

4.3. Chloritoïde du Massif de Serpont

Dans les minéraux denses des alluvions de la Meuse entre Liège et Namur, la présence de chloritoïdes est connue de façon discontinue et dans tous les cas, inférieure à 3%. Le Massif du Serpont (plateau de Recogne) constitue une source possible. Dans le cas présent, des esquilles de ce chloritoïde de taille centimétrique (revoir la figure 1 : C et G) ont pu être prélevées en limitant au minimum le prélèvement de roche hôte (Fig. 7). Un tel échantillon a été broyé et tamisé (voir plus haut), mais il n'a pas été soumis à la séparation densimétrique.

4.3.1. Examen à la loupe

Les chloritoïdes sont les minéraux verts, tandis que les grains incolores sont des fragments de matrice de la roche hôte dont la présence s'explique par le fait que l'aliquote n'a pas été soumise à la séparation densimétrique (Fig.7).

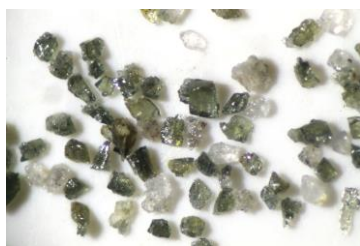


Figure 7. Eclats de chloritoïdes du Massif du Serpont vus à la loupe.

4.3.2. Au microscope polarisant

Quelques exemples représentatifs du broyat d'un cristal sont présentés à la figure 8.

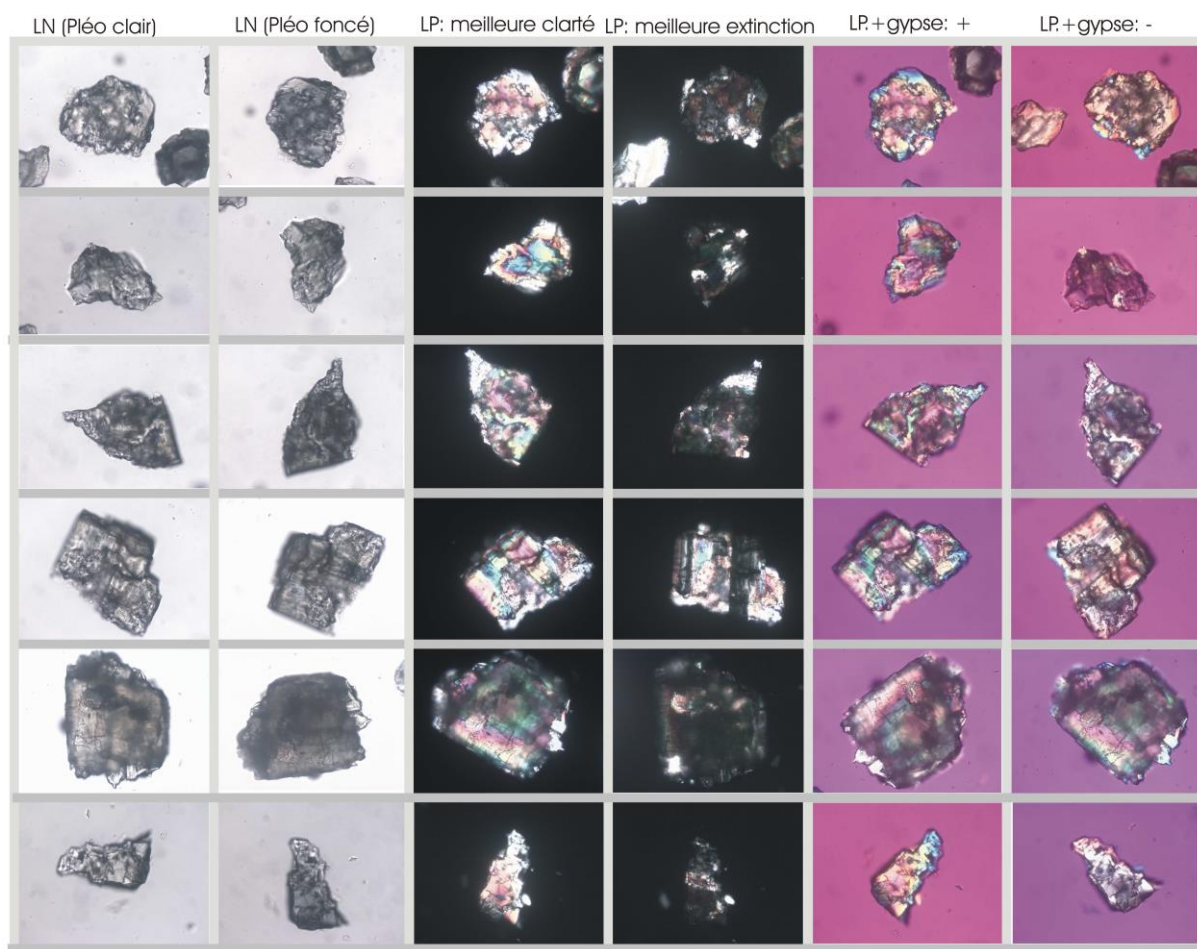


Figure 7. Chloritoïdes du Massif du Serpont. Remarque : dans le microscope polarisant, la couleur verte est très discrète, mais elle n'apparaît pas sur les photos.

LN : Les éclats du broyat sont limpides, mais la couleur verte n'apparaît nettement au microscope polarisant que sans filtre bleu. Le pléochroïsme est souvent nettement perceptible.

LP : la structure complexe s'exprime de façon renforcée, car chaque cristal réagit individuellement. Les teintes de retard sont rarement supérieures au vert de 2^e ordre en addition dans cette gamme de taille, et traduisent ainsi la très faible biréfringence ($0.006 < b < 0.011$).

LC : bien que la dispersion des axes optiques ($r > v$) soit forte, la figure d'interférence est exploitable pour plusieurs minéraux : dans 10% des cas, les deux branches d'hyperboles se croisent dans le champ microscopique, pour les autres, une branche d'hyperbole suffisamment nette est déterminante pour être déterminante. Dans ces conditions, la biaxie positive est déterminable, mais l'estimation de l'angle $2V$ ($30 < 2V < 68^\circ$) est d'autant plus difficile que l'unique branche d'hyperbole est floue et fugace.

On peut donc raisonnablement estimer que le chloritoïde du Massif du Serpont soit identifiable dans une population de minéraux détritiques, même en présence de minéraux limpides du groupe de l'épidote. Toutefois, si la biréfringence de la zoïsite ($b = 0,006$) et de la clinozoïsite ($b = 0,005$) est effectivement du même ordre de grandeur que celle des chloritoïdes ($0,006 < b < 0,011$), celle de l'épidote s.s. varie dans une large gamme de valeur ($0,010 < b < 0,060$). Les différences essentielles (vs chloritoïdes) que l'on peut souvent percevoir sur les minéraux de très faible biréfringence du groupe de l'épidote sont : le vert-pelouse, la limpidité inhérente à la rareté des inclusions opaques, les irisations bleutées pour la clinozoïsite. Par ailleurs, si la figure d'interférence est en général

fantômatique pour les chloritoïdes, elle est généralement claire pour les minéraux du groupe de l'épidote. Le signe optique (B^+ pour les chloritoïdes) n'est discriminatoire que par rapport à l'épidote (B^-). Quant à l'angle $2V$, les recouvrements sont importants pour les trois minéraux B^+ : chloritoïdes, $30^\circ-68^\circ$; zoïsite, $0^\circ-60^\circ$; clinozoïsite, $14^\circ-90^\circ$. Concernant la confusion possible avec l'altérite et/ou la saussurite, elle est à notre sens non-avenue dans la mesure où ces deux derniers ne diffusent pas les propriétés optiques nécessaires à leur détermination (*cf supra*) et devraient être classés systématiquement dans les minéraux indéterminés sous le label largement usité de 'minéraux troubles'.

4.4.Chloritoïde du Massif de Rocroi

La Meuse traverse le Massif de Rocroi et y reçoit des affluents qui eux-mêmes drainent les terrains cambro-ordoviciens. Un échantillon d'une veine à chloritoïde a été examiné (revoir la figure 1 : D et H). Seule la fraction de dense a été examinée.

4.4.1..Examen à la loupe

Les minéraux sont noirs en apparence, mais en réalité vert très foncé. Les enrobages incolores et brillants consistent en matrice crypto-cristalline (Fig.9).

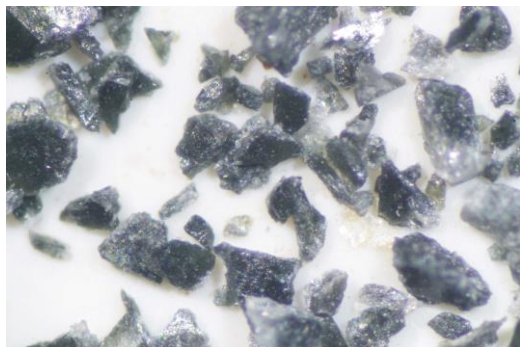


Figure 9. Eclats de chloritoïdes du Massif de Rocroi vus à la loupe.

4.4.2..Au microscope polarisant

Quelques exemples représentatifs du broyat sont présentés à la figure 10.

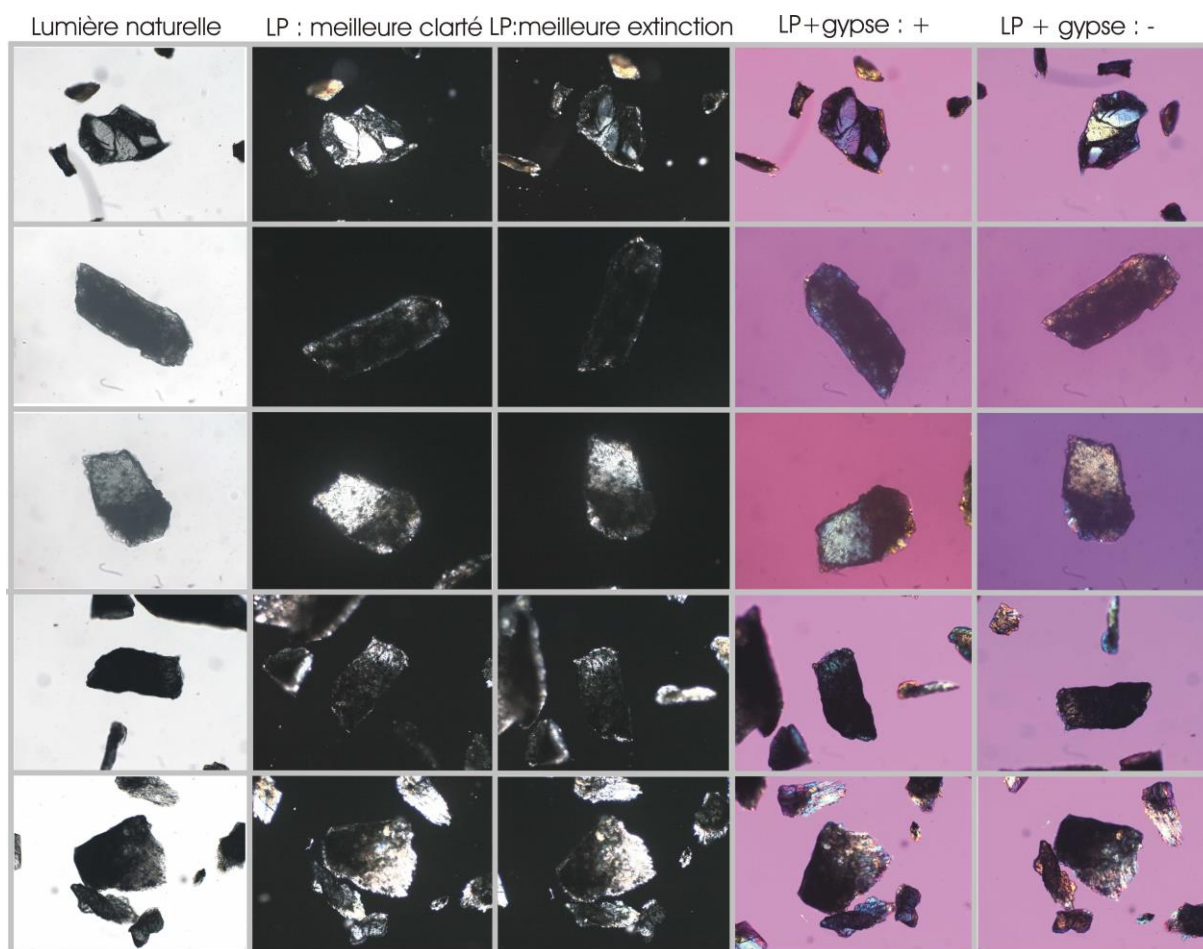


Figure 10. Chloritoïdes du Massif de Rocroi.

Un grain exceptionnel, composé d'au moins deux cristaux limpides et incolores, sans pléochroïsme perceptible a été trouvé (rangée 1). Pour l'essentiel de la masse, le comportement optique dans le microscope polarisant est pratiquement identique à celui des chloritoïdes de Vielsalm (voir plus haut).

4.5. Un chloritoïde en feuillets

Antérieurement, la présence d'un minéral tabulaire appelé chloritoïde a été signalée dans : (1) des dépôts éoliens partiellement issus de la plaine alluviale de l'Ourthe en Famenne (Juvigné, 1977) ; (2) des altérites du socle emsien sous les alluvions de l'Aisne (Juvigné, in Houbrechts, 2005) ; (3) des dépôts sableux d'une grotte mise au jour dans la carrière de Préalles à Aisne, environ 30 m plus haut que la plaine alluviale mitoyenne (Juvigné, in Marion et al, en préparation). Dans le cadre du présent travail, ce minéral a été trouvé systématiquement dans les alluvions des cours d'eau ardennais, mais jamais dans les échantillons de référence décrits plus haut, si bien qu'une détermination géochimique s'est imposée. Leur comportement optique dans le microscope polarisant est représenté à la figure 11.

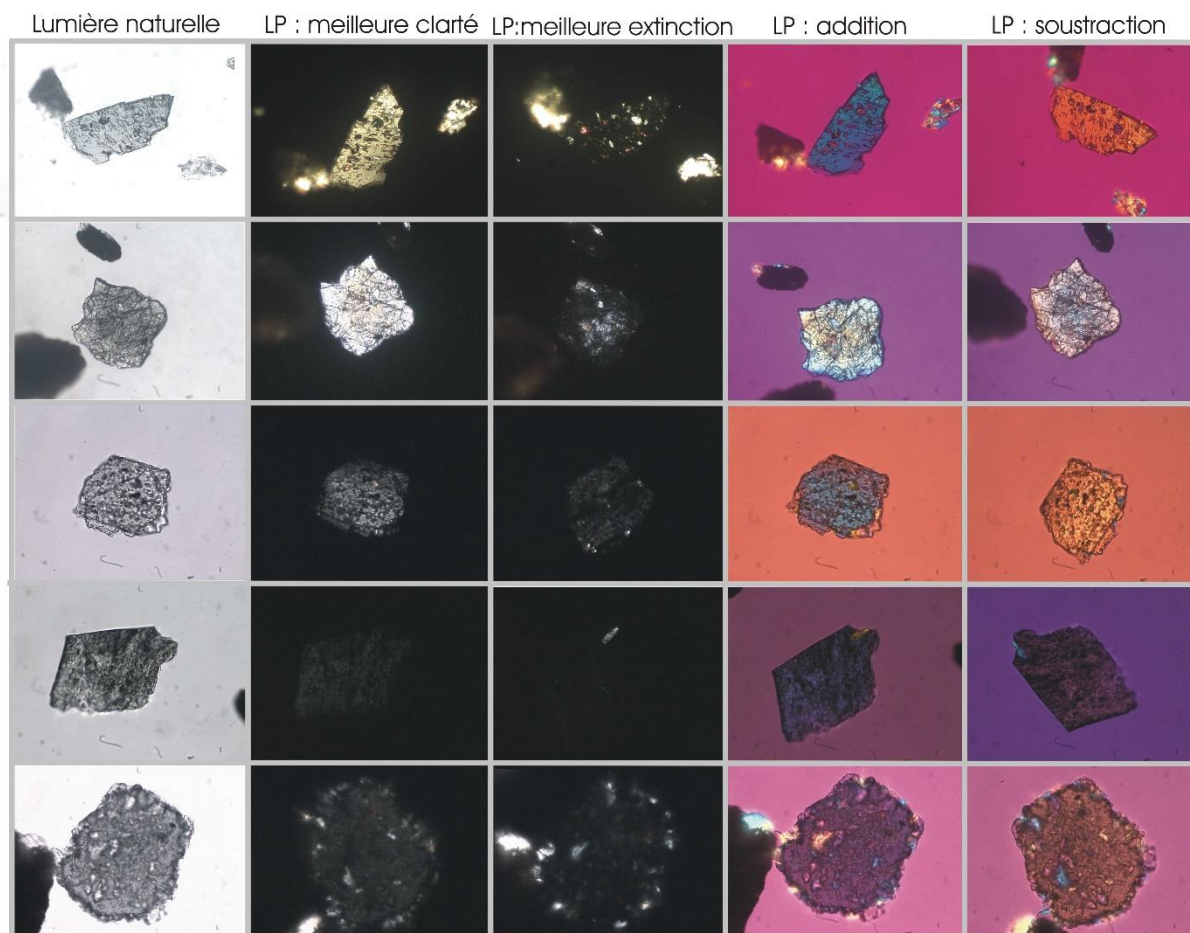


Figure 11. Tablette d'un minéral tabulaire avec notamment des inclusions en gouttelettes transparentes.

LN. Ces tablettes sont limpides et gris bleuâtre, parfois discrètement pléochroïques du bleu au vert. Elles contiennent des inclusions transparentes, mais aussi des crypto-cristaux.

LP. L'extinction est de qualité très variable, mais les inclusions crypto-cristallines scintillent lors de la rotation de la platine ; les teintes de retard ne sortent pas du premier ordre ce qui est confirmé par l'introduction du gypse (N.B. l'épaisseur ne peut être estimée, mais la biréfringence peut être très faible).

LC. La dispersion des axes optiques est forte, et on ne voit généralement qu'une branche d'hyperbole dans le champ, l'angle $2V$ est donc très grand. Dans les meilleurs cas, la biaxie positive est reconnaissable.

4.5.2. Détermination géochimique

Cinq grains (As0, Bs1, Cs2, Ds3 et Es4) ont été extraits à l'aiguille afin d'être analysés au Microscope Électronique à Balayage. Les photos obtenues en mode électrons secondaires montrent une morphologie en feuillets (Fig. 12A). Les analyses chimiques indiquent la présence d'aluminium, de silice, de fer, de manganèse et de magnésium (Fig. 12B). Les pourcentages poids moyens en oxyde, repris en détails dans le tableau 3, sont de 43,87% d' Al_2O_3 , 23,36% de SiO_2 , 24,03% de FeO , 7,15% de MnO et 1,59% de MgO . Le diagramme triangulaire $FeO - MnO - MgO$ montre que les minéraux analysés appartiennent aux chloritoïdes *sensu stricto* (Fig. 12C).

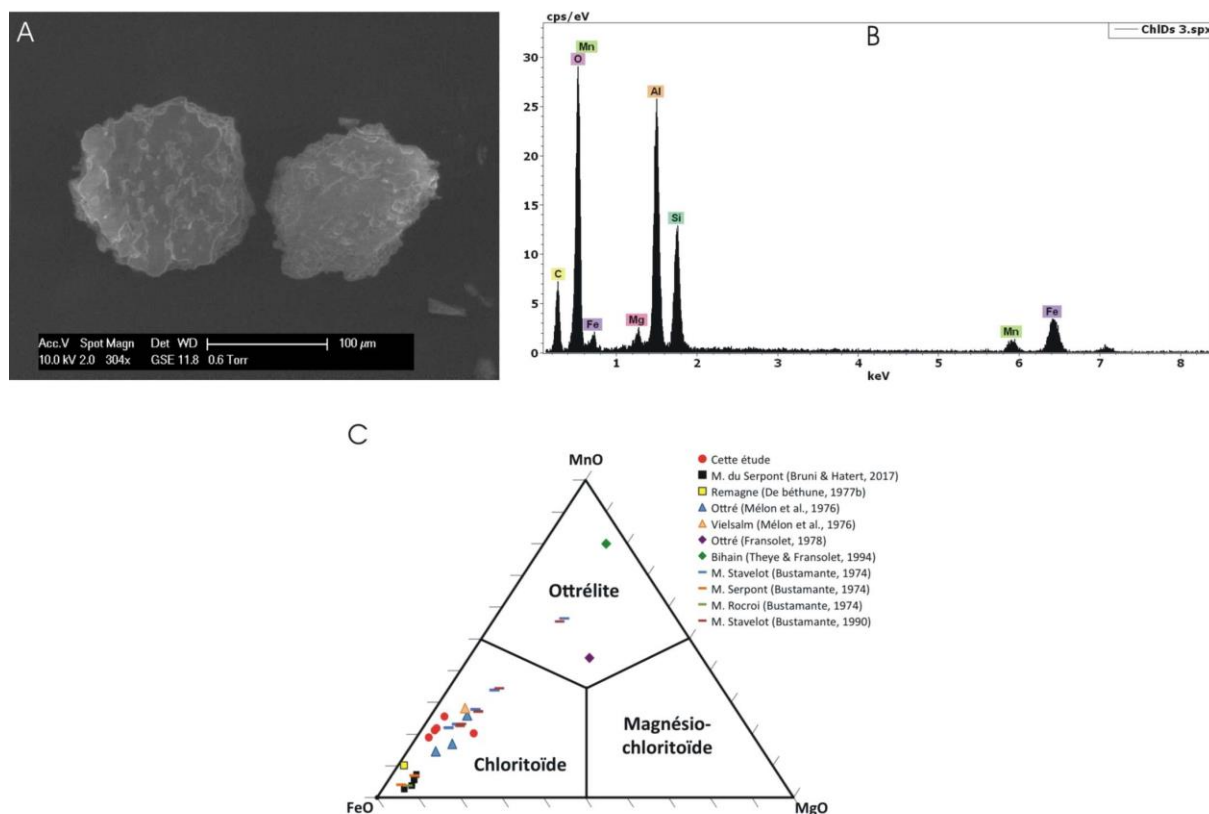


Figure 12. (A) Photo de l'échantillon DS3 au MEB ; (B) Spectre MEB avec les éléments chimiques ; (C) Position des analyses dans le diagramme triangulaire Fe^{2+} - Mn – Mg.

	As0	BS1	Cs2	Ds3	Es4
SiO ₂	27,07	22,95	23,52	24,73	18,51
Al ₂ O ₃	41,81	45,33	43,28	48,43	40,51
FeO	23,27	24,76	25,09	17,90	29,11
MnO	6,82	6,03	7,02	5,43	10,46
MgO	1,03	0,93	1,09	3,51	1,41

Tableau 3. Fréquence des éléments chimiques dans les cinq minéraux analysés.

4.6. Fragments de schiste ou de chloritoïdes

Le risque de confondre des chloritoïdes avec des fragments de schiste a été évoqué par plusieurs auteurs en étudiant les frottis d'alluvions fluviales du bassin ardennais de la Meuse (*cf. supra*). Disons d'abord qu'il doit s'agir de débris phyllade plutôt que de schiste. En effet, lorsqu'ils sont pris en charge par un cours d'eau, les débris de schistes dévoniens à houillers disparaissent rapidement du spectre du gravier et du sable par altération et érosion mécanique. Pour évaluer les risques de confusions entre des fragments de phyllade et des chloritoïdes, des échantillons de quelques galets ont été examinés après avoir subi le traitement appliqué aux échantillons de veines à chloritoïdes (voir plus haut).

4.6.1. Phyllade violet

Il existe dans le bassin de la Lienne un phyllade violet bien connu dans le Salmien qui a libéré dans le lit du cours d'eau, des galets très reconnaissables par leur couleur rougeâtre, mais à l'état sec, leur cassure est de couleur violette (Fig. 13), et on y voit briller des micas. Cette roche a été retenue parce que Bustamante (1973, 1974a, 1974b) a décrit un chloritoïde tantôt rouge, tantôt brun rouge dans les alluvions de la Lienne.

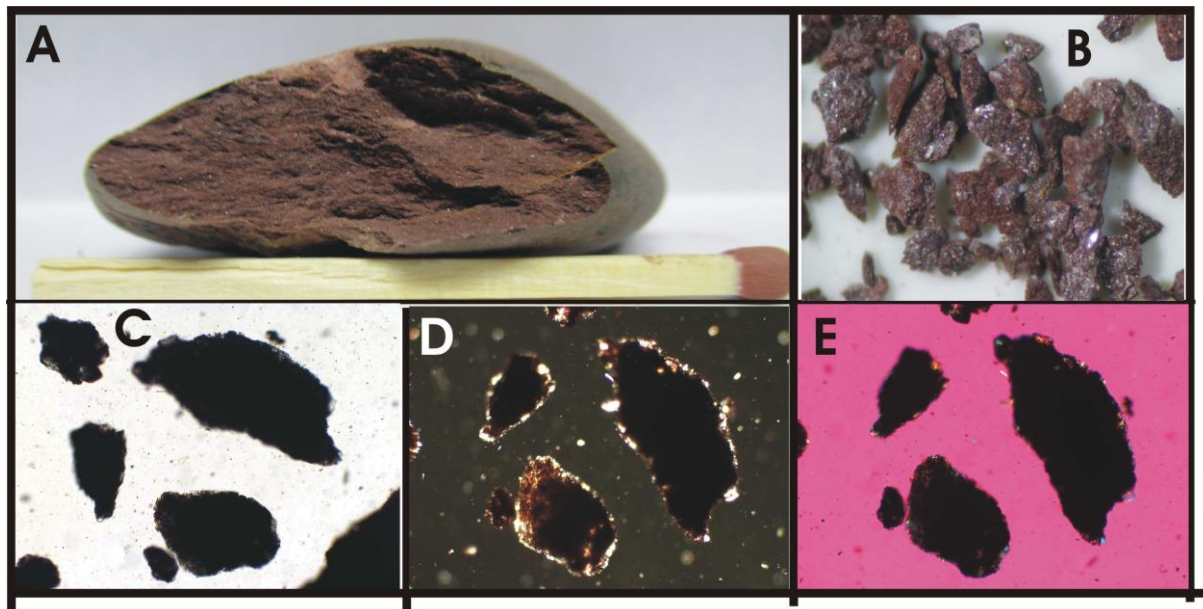


Figure 13. Phyllade violet des alluvions de la Lienne à Trou de Bra. (A), galet ; (B) broyat sous la loupe ; (C, D, E) au microscope polarisant : (C) en LN ; (D) en LP ; (E) en LP+gypse.

A la loupe

Tous les grains sont opaques. La couleur violette permet d'identifier aisément la roche. Les micas (cristaux incolores brillants) y sont abondants.

Au microscope polarisant

LN : Les grains sont opaques, mais en bordure, quelques microcristaux peuvent apparaître.

LP : Les parties épaisses restent opaques, mais les marges sont translucides et brunâtres, les microcristaux sont davantage discernables par leur luminosité. Il faut remarquer que ces cristaux ne peuvent être confondus avec ceux de la matrice des veines à chloritoïdes (revoir plus haut).

LP+gypse : les microcristaux qui émergent à la périphérie sont très petits et diffusent nécessairement des couleurs qui ne dépassent pas le bleu de 2^e ordre (en addition).

Diffraction. À venir

4.6.2. Phyllade gris et verdâtre

Cette roche a été retenue parce que les plages verdâtres font penser à la possibilité de la présence de chloritoïdes. Aucune granularité n'est identifiable à l'œil nu sur la cassure (Fig. 14).

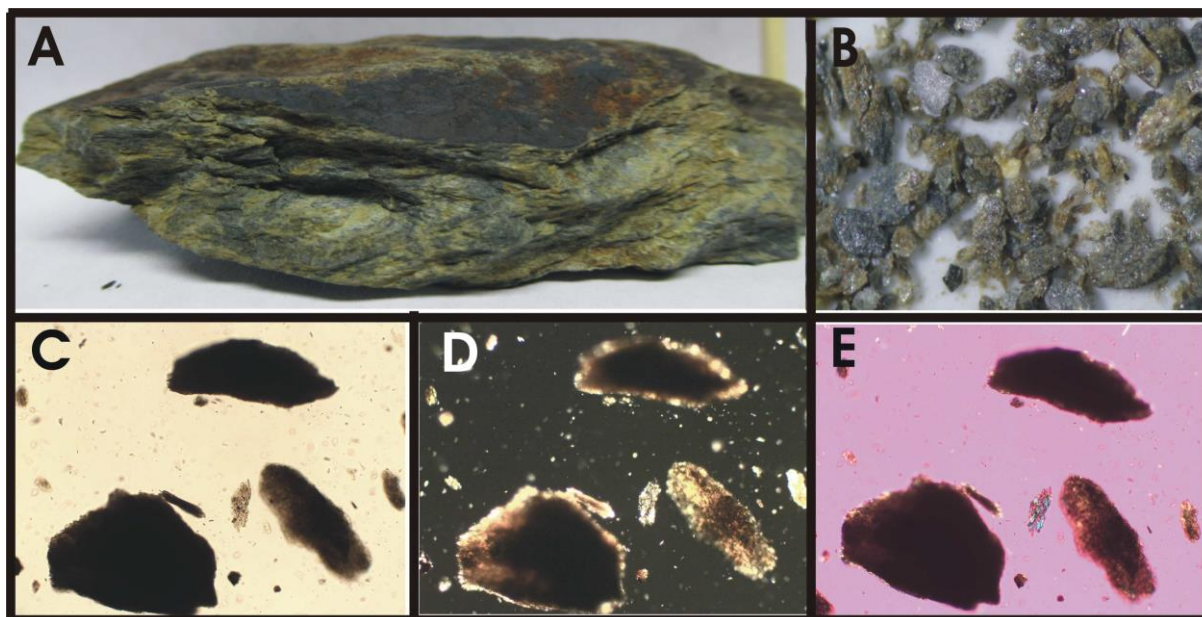


Figure 14. Phyllade gris et verdâtre des alluvions de la Lienne à Trou de Bra. (A) Galet ; (B) broyat vu à la loupe ; (C à E) ; grains représentatifs du broyat vus au microscope polarisant : en LN (C) ; en LP (D) ; en LP+gypse (E).

A la loupe

Il existe une population de grains gris et une autre de grains verdâtres.

Au microscope polarisant

LN : En fonction de leur épaisseur, les grains sont opaques (noirs) ou sub-opaques (gris et translucides dans des parties marginales très minces).

LP : Les parties les plus épaisses restent opaques, mais les moins épaisses s'éclairent davantage dans les tons de brun.

LP + gypse : quelques microcristaux scintillent nécessairement dans les teintes inférieures au bleu de 2^e ordre lors de la rotation de la platine.

Diffraction à venir

4.6.3. Phyllade altéré verdâtre

L'échantillon est un galet prélevé dans le lit de la Salm à l'aval immédiat de Grand-Halleux. Cette roche est très altérée et quasi friable. Néanmoins, il y subsiste des noyaux de roche non altérée. La couronne d'altération verdâtre et d'épaisseur constante a dû être acquise dans le lit de la rivière. Cette couleur, évoquant celle des chloritoïdes, nous a conduits à retenir cette roche pour un examen en frotti (Fig. 15).

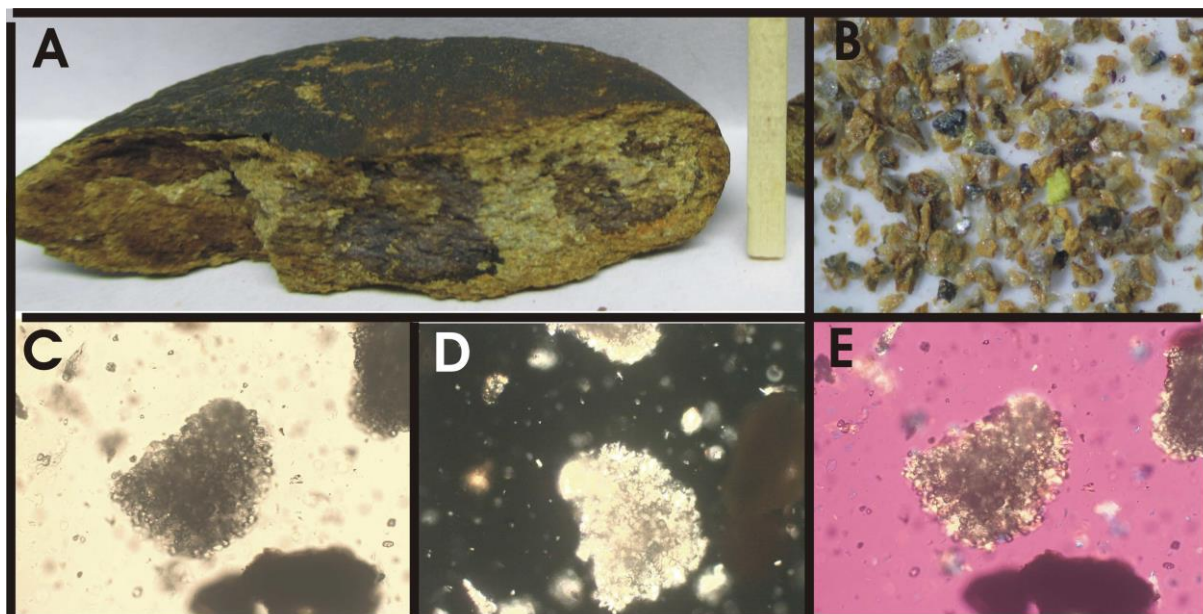


Figure 15. Phyllade altéré des alluvions de la Lienne à Trou de Bra. (A) galet ; (B) broyat vu à la loupe ; (C à E) ; grains représentatifs du broyat vus au microscope polarisant : en LN (B) ; LP (C) ; en LP+gypse (E).

A la loupe

Pratiquement tous les grains sont opaques. La variété des couleurs reflète celle des parties de la roche selon le degré d'altération. Le grain verdâtre est le plus fréquent ; il a été retenu pour être décrit au microscope polarisant.

Au microscope polarisant

LN : au premier coup d'œil, les éclats se présentent comme des nébuleuses grisâtres sub-opaques dans les parties les plus épaisses. Dans les parties périphériques les moins épaisses, on distingue nettement des crypto-cristaux transparents, trapus et à fort relief qui devraient être des grenats. De nombreux autres grains de même taille sont dispersés dans la masse.

LP : les grains sont dans l'ensemble translucides et les couleurs dominantes du retard sont du 1^{er} ordre (blanc à orange) même dans les parties les plus épaisses ; la charge en minéraux opaques est suffisamment faible pour ne pas opacifier même les zones les plus épaisses. La dispersion des orientations individuelles des cryptocristaux transparents fait que globalement le grain ne s'éteint pas lors de la rotation de la platine. Quant aux grenats, leur isotropie consiste à adopter la couleur imposée par les cryptocristaux transparents qui se trouvent sur la même trajectoire.

LP+gypse : il s'agit d'une constellation de grains microscopiques qui lors de la rotation de la platine ne s'éteint pas, mais échange les plages du 1^{er} ordre (soustraction) avec celles qui atteignent le bleu de 2^e ordre (addition).

Diffraction à venir

4.7.Synthèse

Les fragments des phyllades examinés ne contiennent qu'un faible pourcentage de chloritoïdes attesté par la diffractométrie, mais on ne dispose d'aucune indication sur leur taille, et il est peu probable qu'il s'agisse de phénocristaux. La texture est fondamentalement différente de celle de la

matrice des veines à chloritoïde. Il n'y a donc pas de confusions possibles, ni avec les phénocristaux de chloritoïdes, ni avec la matrice des veines qui contient ces derniers.

Chaque lecteur intéressé peut maintenant s'interroger sur les typologies des chloritoïdes qui ont été proposées dans la littérature relatives aux frottis réalisés à partir d'alluvions de la Meuse et d'affluents ardennais (voir plus haut), mais il ne pourra s'agir que de conjectures laissées à l'appréciation de chacun.

5. Nouvelles déterminations dans des alluvions fluviales

Compte tenu de la difficulté, voire l'impossibilité, d'obtenir des résultats quantitatifs fiables en matière d'identification de chloritoïdes au microscope polarisant, nous avons choisi d'étudier par la diffractométrie de poudre, l'évolution de la fréquence des chloritoïdes dans des alluvions des principaux cours d'eau, depuis la sortie des massifs métamorphiques cambro-ordoviciens jusque dans la Basse-Meuse.

Dans tous les cas, les prélèvements ont été effectués à la tarière à la base des dépôts de crues (limon sableux), c'est-à-dire à la profondeur du refus sur le cailloutis. Cette méthode a été appliquée de façon à éviter les minéraux issus des sables et des débris rocheux de la construction dont la présence est maintenant généralisée dans les lits des cours d'eau. Tous les échantillons ont été préparés conformément à la méthode décrite plus haut de façon à limiter la recherche à la fraction dense pour éviter des concentrations trop faibles de chloritoïdes propres à des échantillons bruts. De chaque récolte, une aliquote a été montée en frottis et une autre pulvérisée pour être soumise à la diffractométrie. La confrontation des résultats est présentée dans le tableau 4. Il s'agit de confrontation dans la mesure où les résultats ne sont pas comparables d'un point de vue quantitatif. Pour un même échantillon, la détermination en frottis ne porte que sur les minéraux denses transparents et limpides, et il est apparu que 78,9 à 98,3% des grains ont échappé à toute détermination. La diffractométrie s'applique à l'ensemble des grains de toute taille au sein des éléments composites. On constate ainsi que les fréquences obtenues par la diffractométrie sont en général supérieures à celles des frottis, ce qui implique que les chloritoïdes sont plus fréquents dans les classes granulométriques fines inaccessibles en lumière transmise au microscope.

Diffractométrie à venir

6. Conclusions

En matière de détermination en frottis à l'aide du microscope polarisant, les chloritoïdes se présentent de façon polymorphe. Deux types diffusent les propriétés optiques qui permettent de les identifier : (1) le plus répandu (de la Salm jusqu'à la Lesse) a une morphologie en feuillets, il est gris bleuâtre et contient énormément d'inclusions qui ne nuisent pas au succès des manipulations dans le microscope ; (2) le second est limpide incolore à vert clair, et il est bien représenté dans les alluvions qui dérivent du Massif du Serpont (Lhomme, Ourthe occidentale). Par contre, une variété qui est largement dominante dans les veines des Massifs de Stavelot, de Serpont et de Rocroi est criblée d'inclusions opaques, si bien qu'elle ne délivre aucune des propriétés optiques requises pour la détermination. De cet état de fait, il résulte que cette dernière a été abusivement confondue avec des débris de schiste, si bien que dans la littérature, les pourcentages de chloritoïdes exprimés dans des associations de minéraux denses transparents ne sont pas crédibles.

Partim diffractométrie à venir

Bibliographie

- BÉTHUNE de P. 1977. La composition chimique des chloritoïdes belges. *Bulletin de la Société belge de géologie*, 86, 9-11.
- BRUNI Y. et HATERT F. 2017. Etude minéralogique de l'or et de ses minéraux accompagnateurs sur le pourtour du massif cambro-ordovicien de Serpont, Belgique. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 86, 113-168.
- BUSTAMANTE-SANTA CRUZ L. 1973. Les minéraux lourds des alluvions sableuses du bassin de la Meuse. Thèse de doctorat, Katholieke Universiteit te Leuven, Faculteit der Wetenschappen, 355 p., Leuven.
- BUSTAMANTE-SANTA CRUZ L. 1974a. Les minéraux lourds des alluvions du bassin de la Meuse. *Compte rendu de l'Académie des Sciences de Paris, Série D*, 278, 561-564.
- BUSTAMANTE-SANTA CRUZ L. 1974b. Contribution à l'étude des chloritoïdes belges. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 97, 273-279.
- BUSTAMANTE-SANTA CRUZ L. 1990. New contribution to the Belgian chloritoid study. *Natuurwet. Tijdschrift (Gent)*, 7, 61-69.
- BUSTAMANTE-SANTA CRUZ L. 1995. Contribution to the petrographical characterization of Quaternary Meuse alluvia river terraces by way of heavy mineral analyses. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatsheft*, Jg. 1995, H. 12, 529-552.
- EDELMAN C.H. & VAN BAREN F.A. 1935. *Sedimentpetrologische Onderzoekingen, II. Veenman & Zonen, Wageningen. Overgedrukt uit de Mededeelingen van de Landbouwhogeschool, Deel 39, Verhandeling 2.*
- FRANSOLET A. 1978. Données nouvelles sur l'ottrélite d'Ottré, Belgique. *Bulletin de Minéralogie*, 101, 548-557.
- HOUBRECHTS G. 2005. Utilisation des macroscories et des microscories en dynamique fluviale : application aux rivières du massif ardennais (Belgique). PhD Thesis, University of Liège ; 328 pp.
- JUVIGNÉ E. 1977. Déflation éolienne sur les alluvions de l'Ourthe au Pléistocène. *Revue belge de Géographie*, 101, 175-185.
- JUVIGNÉ E., RENSON V. & SEMITITA P. 1999. Microprobe analyses of transparent heavy minerals of Belgian loess. *Terrestrische Quartär Geologie*, R. Becker-Hauman und M. Frechen, eds Logabook, Köln, 1999, 23-38.
- KROOK L. 1993. Heavy minerals in the Belvédère deposits. *Mededelingen Rijks Geologische Dienst*. 47, 25-30.
- MÉLON J., BOURGUIGNON P. & FRANSOLET A.-M. 1976. *Les minéraux de Belgique*. Ed. Lelotte, Dison, 285 p.
- TAVERNIER R. & LARUELLE J. 1952. Bijdrage tot de petrologie van de recente afzettingen van het Ardennese Massbeken. *Nat. Wet. Tijdschrift*, 34, 81-98.
- THEYE T. & FRANSOLET A.-M. 1994. Virtually pure ottrelite from the region of Ottré, Belgium, *European Journal of Mineralogy*, 6/4, 547-556.
- VAN BAREN F.A. 1934. Het voorkomen en de beteekenis van kalihoudende mineralen in nederlandsche gronden. *Dissertatie, Wageningen*.

VON ANDEL T.H. 1950. Provenance, transport and deposition of Rhine sediments. Veenman & Zonen, Wageningen.

ZONNEVELD J.I.S., 1947a. Het Kwartair van het Peel-Gebiet en de naaste omgeving (een sediment-petrologische studie. Mededeelingen Geologische Stichting, Serie C-IV-3, 221 p.N.S.

ZONNEVELD J.I.S., 1947b. Zonneveld J.I.S., 1947. Quelques remarques sur la stratigraphie et la paléogéographie quaternaires du Sud-Est des Pays-Bas. Session extraordinaire des Sociétés belges de Géologie : 372-383.

ZONNEVELD J.I.S., 1949. Zand-petrologische onderzoeken in de terrassen van Zuid-Limburg. Mededeelingen Geologische Stichting, N.S., 3, 103-123.