

Structuration et serpentinisation des péridotites de Nouvelle-Calédonie

Rapport final

BRGM/RP-64874-FR

Novembre 2015



DIMENC
Direction de l'Industrie,
des Mines et de l'Energie



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Structuration et serpentinitisation des péridotites de Nouvelle-Calédonie

Rapport final

BRGM/RP-64874-FR
Novembre 2015

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM,
afférente à la convention n° CS13-3160-SGNC-1379/DIMENC

D. Lahondère, S. Lesimple, G. Wille, C. Zammit

Vérificateur :

Nom : Lucien Callier
Responsable Scientifique de
Programme
Date : 03/12/2015

Approbateur :

Nom : Claude Delor
Directeur BRGM
Nouvelle-Calédonie
Date : 07/12/2015

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : Nouvelle-Calédonie, Géologie, Péridotite, Serpentine, Antigorite, Chrysotile, Veine

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Lahondère D., Lesimple S., Wille G., Zammit C. (2015) – Structuration et serpentinisation des péridotites de Nouvelle-Calédonie. Rapport final. BRGM/RP-64874-FR, 124 p., 45 fig., 2 ann.

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le problème de santé publique posé par la présence d'amiante dans certains environnements naturels de Nouvelle-Calédonie constitue à la fois une priorité du gouvernement du territoire et une préoccupation pour l'ensemble de la profession minière.

Depuis 2005, le groupe de travail qui s'est constitué sur ce sujet et qui comprend le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), l'Institut Pasteur de Nouvelle-Calédonie (IPNC), l'Institut pour la Recherche et le Développement (IRD) et l'Université de Nouvelle-Calédonie (UNC), s'est efforcé d'améliorer les connaissances sur cet aléa géologique. La collaboration étroite entre le SGNC et le BRGM, sur la thématique de l'amiante environnemental, a notamment permis de démontrer l'importance et la diversité des occurrences d'amiante dans les massifs de péridotite. Ces résultats, désormais bien connus des mineurs, sont d'une grande importance compte tenu des enjeux industriels et économiques que représentent les massifs de péridotite pour la Nouvelle-Calédonie.

Les études préalablement réalisées ont permis de reconnaître et de décrire toutes les variétés de minéraux fibreux amiantifères ou potentiellement amiantifères présentes dans les roches ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie (Lahondère et *al.*, 2011, 2012), et de les classer en fonction de leur mode d'occurrence. Ces études ont notamment conduit à la différenciation de stades de serpentinisation qualifiés de précoces (lizardite ± chrysotile), d'intermédiaires (antigorite ± chrysotile) et de tardifs (chrysotile). Cependant, de l'échelle de la nappe des péridotites jusqu'à celle du massif voire de l'affleurement, la répartition spatiale, la densité et l'orientation de ces structures précoces, intermédiaires et tardives sont très irrégulières, les hétérogénéités étant notamment relatives au degré de serpentinisation des péridotites et aux types de structures serpentineuses présentes, à la densité des réseaux serpentineux, à la présence de corps filoniens et à l'existence de structures porteuses d'amphiboles fibreuses.

L'objet principal de cette étude a donc été d'analyser l'importance de ces différents stades de serpentinisation à travers i) le développement des occurrences fibreuses amiantifères et potentiellement amiantifères associées à chacun de ces stades et ii) le rôle que ces structures fibreuses ont pu avoir lors de la formation des gisements de nickel, le but étant de fournir aux mineurs de nouveaux éléments permettant de mieux appréhender le risque lié à la présence d'amiante dans les gisements. Pour ce faire, il est apparu nécessaire d'illustrer les relations entre les déformations qui affectent les péridotites et leur serpentinisation à partir de sites choisis pour leurs caractéristiques géologiques, la qualité et l'accessibilité des affleurements.

Dans la nappe des péridotites, les processus de serpentinisation se sont traduits dans un premier temps par le développement de veines serpentineuses précoces à lizardite ± chrysotile. Ce premier réseau est observé dans tous les sites étudiés et découpe les péridotites en blocs grossièrement parallélépipédiques. Dans certaines portions de l'ophiolite, ce réseau a évolué jusqu'à conduire à la formation de veines à antigorite. D'un point de vue géométrique, ces veines à antigorite ne constituent donc pas un réseau indépendant de celui formé par les veines précoces. Les veines précoces correspondent à des structures peu épaisses dans lesquelles les cristallisations fibreuses se limitent à quelques veinules de chrysotile (« *cross-veins* »). En revanche, les veines à antigorite constituent des structures beaucoup plus épaisses et presque entièrement scellées par des cristallisations fibro-lamellaires presque toujours obliques (à très obliques) par rapport aux épontes (« *slip-veins* »). L'ouverture de ces veines dans toutes les directions de l'espace constitue une réponse à l'augmentation des volumes rocheux induit par les réactions de serpentinisation. Les relations très étroites observées à l'échelle de l'affleurement entre les veines à antigorite et les veines à trémolite fibreuse confirment le

caractère synchrone de ces différentes structures ainsi que leurs relations avec le magmatisme d'arc d'âge Eocène inférieur, lequel est sans doute à l'origine d'une augmentation de la température et de la pression des fluides circulant dans l'ophiolite. Les veines à antigorite et les structures à trémolite qui leur sont associées, développées au cours de cette phase d'âge Eocène inférieur, contribuent aujourd'hui, là où elles sont exprimées (Vulcain, Poro), à définir l'enveloppe des zones minéralisées. La contribution de ces structures à la formation de ces zones minéralisées se limite cependant probablement au rôle qu'elles ont pu jouer dans la fracturation tardive des massifs, ce dernier étant souligné par la superposition fréquente des plans à doewellite sur ces structures à antigorite + trémolite, et dans la circulation des fluides supergènes. Elles n'en demeurent pas moins des structures dont il convient d'apprécier l'importance, tant pour ce qui concerne leurs relations avec les zones minéralisées que pour leur potentiel amiantifère et les risques induits par cette présence d'amiante.

Sommaire

1. Contexte de l'étude	9
1.1. INTRODUCTION	9
1.2. TERMES DE LA CONVENTION	9
1.3. PRESENTATION DES TRAVAUX REALISES	11
1.4. ENREGISTREMENT DES DONNEES STRUCTURALES	11
1.5. CALENDRIER DES INTERVENTIONS	12
2. Expertise de terrain	15
2.1. MINES D'OPOUE ET DE TOMO	15
2.2. MINE DE VULCAIN	19
2.2.1. Données préalablement acquises	19
2.2.2. Nouvelles observations	19
2.2.3. Données structurales	23
2.3. MINE DE SIREIS	29
2.3.1. Description des structures observées	29
2.3.2. Données structurales	31
2.4. SECTEUR DE PORO	33
2.4.1. Données préalablement acquises	33
2.4.2. Nouvelles observations	33
2.4.3. Données structurales	38
3. Analyse minéralogique et cristallographique.....	45
3.1. TECHNIQUES ANALYTIQUES.....	45
3.1.1. Analyses par spectroscopie Raman	45
3.1.2. Analyses par microscopie électronique à balayage.....	47
3.2. RESULTATS DES ANALYSES	47
3.2.1. Mine de Vulcain	47
3.2.2. Mines de Poro et du CFTMC	51
3.2.3. Secteur de Sireis	54
3.2.4. Synthèse.....	56
4. Conclusions et perspectives	57
5. Bibliographie	61

Liste des illustrations

Figure 1 : Calendrier et programme de la mission.	12
--	----

Figure 2 : Carte de localisation des principaux sites visités.	13
Figure 3 : Coordonnées des sites visités.	16
Figure 4 : Liste et nature des échantillons prélevés au cours de la mission.	17
Figure 5 : Plans fibreux observés dans les parties supérieures du gisement d'Opoué (ancienne exploitation : a, b). Vues de la zone d'exploitation actuelle d'Opoué (Bwa Chi : c, d).	18
Figure 6 : Fosse de la mine de Tomo, limitée par un plan à doewellite.	18
Figure 7 : Affleurement NC543DL et structure très altérée à longues fibres blanches d'antigorite.	20
Figure 8 : Structures à antigorite très altérées montrant la coexistence de lattes verdâtres rigides, de cristaux rigides aciculaires et d'amas blancs potentiellement asbestiformes (NC544DL).	20
Figure 9 : Détails de la veine à antigorite observée au niveau du site NC546DL. La partie centrale de la veine, de nature fibro-lamellaire, est encadrée par les bandes serpentineuses blanches (a, b). Une veine à chrysotile vert-jaune s'intercale entre l'une de ces bandes et la partie centrale (c, d). A noter que cette structure est parallèle à un système de veines sombres à veinules de chrysotile (e).	21
Figure 10 : Vue générale de la fosse située au sud de Module 3 depuis son extrémité est (a) et ouest (c). Le plan correspondant au mur de la zone exploitée, orienté N090 N60, est visible sur les photos a & c. Ce plan est parallèle à des veines fibreuses observées notamment sous le mur (NC550DL, photos d & e).	22
Figure 11 : Amas fibreux désagrégé, préservé dans une poche latéritique (NC551DL).	23
Figure 12 : Nouvelles données structurales enregistrées dans la mine de Vulcain.	23
Figure 13 : Traces des épontes des veines et des fibres d'antigorite (a). Direction et pendage des plans correspondant aux épontes des veines à antigorite (b). Direction et inclinaison des fibres d'antigorite (c).	24
Figure 14 : Traces des épontes et direction des cristallisations fibro-lamellaires correspondantes pour les veines à antigorite caractérisées par des ouvertures « dextres » et « senestres ».	25
Figure 15 : Veines à antigorite recoupant des péridotites (site NC548DL). Les traits en tiretés matérialisent les épontes des veines, les double-flèches la direction d'ouverture de ces veines. Noter également la présence de lattes d'antigorite dans la veine correspondant au plan principal de la photographie (lattes entourées).	26
Figure 16 : Veines à antigorite à ouverture dextre limitant des blocs rocheux plus ou moins lenticulaires. Les double-flèches matérialisent la direction d'ouverture des veines et la flèche noire la direction N345. La surface photographiée est sub-horizontale (site NC548DL).	26
Figure 17 : Localisation des principaux sites étudiés dans l'emprise de la mine de Vulcain.	27
Figure 18 : Localisation des principaux sites étudiés.	28
Figure 19 : Observations faites le long de la piste d'accès à Sireis. Les photos a à c correspondent à l'affleurement NC553DL et à des veines à trémolite, la photo d à l'affleurement NC555DL.	29
Figure 20 : Aspect macroscopique des veines serpentineuses sombres (NC558DL).	30
Figure 21 : Structure à doewellite (a, b) et plan à cristallisations fibreuses asbestiformes (c, d) observés au niveau du site NC559DL.	30
Figure 22 : Plans fibreux plissés, à fibres asbestiformes (NC561DL).	31
Figure 23 : Aspect des couloirs serpentineux et des nodules de péridotites serpentinisées à veinules de chrysotile (site NC568DL).	31
Figure 24 : Veines à trémolite fibroradiée (a, b) (NC571DL & NC572DL). et péridotites à veinules serpentineuses sombres (c, d) (NC572DL & NC573DL).	33

Figure 25 : Vue générale de la fosse de Stanislas (a) et minerais quadrillés (b). Plans de fracture soulignés par des cristallisations de chlorite (c). Plan à doewellite orienté N110 N50 observé le long de la piste d'accès à la fosse (d).....	34
Figure 26 : Vues générales des affleurements NC581DL (a) et NC582DL (b). Veine classique à antigorite (c) et veines fibroradiées à trémolite (d à f).	35
Figure 27 : Veines à antigorite orientées N090 S50 correspondant au mur de la fosse de Bonini (a, b). Veines serpentineuses à lizardite + chrysotile découpant les péridotites de Bonini (c, d).....	36
Figure 28 : Seconde structure observée au niveau du site NC595DL (a, b). Même structure observée sur le site NC512DL (c à e). Placage de doewellite observé sur la seconde structure (f).....	37
Figure 29 : Vues de la masse de trémolite (1,20 m x 0,30 m) observée sur le site NC587DL. ...	38
Figure 30 : Compilation des données structurales enregistrées dans la fosse de Bonini et dans les environs immédiats de la fosse. Les principales familles sont soulignées en vert.	39
Figure 31 : Traces des épontes des veines et des fibres d'antigorite (a). Direction et pendage des plans correspondant aux épontes des veines à antigorite (b). Direction et inclinaison des fibres d'antigorite (c).	40
Figure 32 : Traces des épontes et direction des cristallisations fibro-lamellaires correspondantes pour les veines à antigorite caractérisées par des ouvertures « dextres » et « senestres ».	41
Figure 33 : Localisation des principaux sites étudiés dans le secteur de Poro.....	42
Figure 34 : Localisation des principaux sites étudiés dans le secteur de Poro-Bonini.	43
Figure 35 : Tableau de synthèse des analyses réalisées.	46
Figure 36 : Images MEB obtenues à partir des fibres de chrysotile des échantillons NC543DL-B2 (Haut) et NC546DL (Bas).	48
Figure 37 : Images MEB obtenues à partir des fibres de chrysotile des échantillons NC550DL-C1 (Haut) et NC550DL-C2 (Bas).....	49
Figure 38 : Morphologie des particules fibriformes d'antigorite observées dans l'échantillon NC544DL-C.	49
Figure 39 : Morphologie des particules fibriformes d'antigorite observées dans les échantillons NC546DL-B2 (Haut), NC550DL-B (Centre) et NC551DL (Bas).	50
Figure 40 : Images MEB obtenues à partir des fibres de chrysotile des échantillons NC592DL (Haut) et NC593DL-B (Bas).....	51
Figure 41 : Images MEB obtenues à partir des fibres d'antigorite des échantillons NC575DL (Haut) et NC595DL-B (Bas).	52
Figure 42 : Morphologie des fibres de trémolite observées dans les échantillons NC584DL et NC585DL.	53
Figure 43 : Association d'antigorite et de trémolite observée dans l'échantillon NC581DL-A à partir de la cartographie de l'aluminium (a) et du calcium (b). L'image (c) correspond à la zone cartographiée.	54
Figure 44 : Morphologie des fibres d'anthophyllite observées dans les échantillons NC559DL-B (Haut/ Centre) et NC561DL (Bas).....	55
Figure 45 : Exemple de fosse limitée par des structures parallèles orientées N000 W40 comprenant des veines à antigorite et des plans à trémolite-amiante (Vulcain : site NC220DL).	58

Liste des annexes

Annexe 1 Cartes des sites visités et localisation des affleurements expertisés	67
Annexe 2 Fiches analytiques.....	75

1. Contexte de l'étude

1.1. INTRODUCTION

Le problème de santé publique posé par la présence d'amiante dans certains environnements naturels de Nouvelle-Calédonie constitue à la fois une priorité du gouvernement du territoire et une préoccupation pour l'ensemble de la profession minière. Depuis 2005, le groupe de travail qui s'est constitué sur ce sujet et qui comprend le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), l'Institut Pasteur de Nouvelle-Calédonie (IPNC), l'Institut pour la Recherche et le Développement (IRD) et l'Université de Nouvelle-Calédonie (UNC), s'est efforcé d'améliorer les connaissances sur cet aléa géologique.

La collaboration étroite entre le SGNC et le BRGM, sur la thématique de l'amiante environnemental, a notamment permis de démontrer l'importance et la diversité des occurrences d'amiante dans les massifs de péridotite (Lahondère et *al.*, 2011 ; Lahondère et *al.*, 2012). Ces résultats, désormais bien connus des mineurs, sont d'une grande importance compte tenu des enjeux industriels et économiques que représentent les massifs de péridotite pour la Nouvelle-Calédonie.

L'accroissement des connaissances relatives à la problématique des occurrences naturelles d'amiante a conduit les autorités de Nouvelle-Calédonie à adopter en 2010 une législation spécifique sur la protection des travailleurs contre les poussières issues de terrains amiantifères dans les activités extractives, de bâtiment et de travaux publics.

La délibération n°82 du Congrès de la Nouvelle-Calédonie, en date du 25 août 2010, comporte un champ d'application élargi par rapport aux textes existant en métropole en matière d'amiante industriel, du fait de la présence avérée dans les sols calédoniens d'autres minéraux que ceux mentionnés à l'article 2 de la directive 2009/148/CE du 30 novembre 2009 et susceptibles de présenter une toxicité comparable, en particulier l'antigorite.

En août 2012, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) a été saisie conjointement par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et par la Direction générale du travail (DGT) à la demande de la Direction des mines et de l'énergie de Nouvelle-Calédonie (DIMENC) pour réaliser une analyse critique de la bibliographie existante sur l'antigorite, l'accent devant être mis sur la distinction des différents faciès d'antigorite et sur leur toxicité éventuelle. Publiés en juin 2014 par l'ANSES, les résultats de cette saisine ont permis de souligner trois points principaux :

- les données géologiques et minéralogiques disponibles montrent que le chrysotile et la trémolite (dont la trémolite-amiante) sont associés de manière étroite à l'antigorite ;
- les données de toxicité spécifiques à l'antigorite sont très insuffisantes et ne permettent pas d'affirmer, ni d'infirmer son potentiel toxique ;
- les données sur les effets toxiques des particules minérales allongées, dont font partie les formes fibreuses d'antigorite, ne permettent pas d'apporter des éléments prédictifs validés sur une éventuelle toxicité de l'antigorite fibreuse.

Concernant la situation particulière de la Nouvelle-Calédonie, le même rapport de l'ANSES recommande l'établissement de cartographies plus fines dans le but de reconnaître les occurrences à serpentines et à amphiboles fibreuses (chrysotile, antigorite, trémolite) et d'identifier les zones présentant les risques les plus élevés.

1.2. TERMES DE LA CONVENTION

Les études préalablement réalisées ont permis de reconnaître et de décrire toutes les variétés de minéraux fibreux amiantifères ou potentiellement amiantifères présentes dans les roches

ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie, et de les classer en fonction de leur mode d'occurrence (Lahondère et al., 2012). Ces études ont notamment conduit à la différenciation :

- de stades de serpentinisation « précoces » à lizardite ± chrysotile associés à des circulations de fluides dont l'origine est encore discutée : hydratation *per descensum* par infiltration d'eau de mer ou hydratation *per ascensum* associée à la circulation de fluides métasomatiques ;
- de stades de serpentinisation « intermédiaires » à antigorite ± chrysotile associés à la mise en place du cortège filonien, au cours de l'Eocène inférieur, et à la circulation de fluides relativement chauds permettant la cristallisation d'amphiboles (trémolite, anthophyllite, gédrite ?), la formation de veines à antigorite et le développement d'associations à amphibole(s) + chlorite-magnésienne + antigorite ;
- de stades « tardifs » accompagnant le charriage de la nappe des péridotites sur la ride continentale de Norfolk, marqués notamment par le développement de « très grandes veines » de chrysotile et par l'individualisation de grands accidents tectoniques dans lesquels les péridotites préalablement serpentinisées sont déformées d'une façon ductile, cisailées et plissées.

Cependant, de l'échelle de la nappe des péridotites jusqu'à celle du massif et de l'affleurement, la répartition spatiale, la densité et l'orientation des structures associées à ces stades précoces, intermédiaires et tardifs sont très irrégulières. Les hétérogénéités induites par cette irrégularité sont notamment relatives au degré de serpentinisation des péridotites et aux types de structures serpentineuses présentes, à la densité des réseaux serpentineux, à la présence ou non de corps filoniens et à l'existence ou non de structures porteuses d'amphiboles fibreuses (auréoles réactionnelles, veines, plans de mouvement). Elles s'ajoutent aux hétérogénéités pétrographiques et structurales déjà connues, relatives notamment à l'identification de lherzolites dans les massifs de Poum et de Tiebaghi et à la caractérisation d'une semelle de serpentinites à la base de tous les massifs. Au final, la caractérisation précise du potentiel amiantifère d'un secteur reste difficile du fait d'un manque de connaissance sur l'importance et le caractère plus ou moins pénétratif (« invasif ») des processus responsables de la cristallisation des occurrences amiantifères.

L'objet principal de cette étude a donc été d'analyser l'importance de ces différents stades de serpentinisation à travers i) le développement des occurrences fibreuses amiantifères et potentiellement amiantifères associées à chacun de ces stades et ii) le rôle que ces structures fibreuses ont pu avoir lors de la formation des gisements de nickel, le but étant de fournir aux mineurs de nouveaux éléments permettant de mieux appréhender le risque lié à la présence d'amiante dans les gisements.

Pour ce faire, il est apparu nécessaire d'illustrer les relations entre les déformations qui affectent les péridotites et leur serpentinisation. Cette étude a concerné plusieurs sites choisis d'une part pour leurs caractéristiques géologiques et d'autre part pour la qualité et l'accessibilité des affleurements. Pour chaque site retenu, l'étude a consisté dans l'analyse des relations entre les structures observées et les occurrences fibreuses amiantifères et potentiellement amiantifères. Les caractéristiques de ces occurrences ont été décrites et mesurées de telle manière à préciser les conditions ayant présidé à leur développement (contexte extensif ?, expansion volumétrique « statique » ?, déformation compressive associée à la fermeture du bassin sud-Loyauté ?). Des échantillons ont été prélevés dans le but de décrire à l'échelle microscopique les relations existant entre ces structures fibreuses et les volumes rocheux environnants.

Les caractérisations minéralogiques et géochimiques qui ont été faites à partir de ces échantillons (roches encaissantes, structures fibreuses) ont permis de compléter les données actuellement disponibles – trop peu nombreuses – et d'affiner la compréhension des conditions qui ont régi le développement des structures fibreuses. La phase analytique a eu pour principal objectif de caractériser les occurrences fibreuses échantillonnées, tant d'un point de vue minéralogique que morphologique. Les techniques analytiques mises en œuvre ont consisté

dans la réalisation d'analyses par microscopie électronique à balayage (MEB) et par spectroscopie RAMAN.

Les sites préalablement retenus pour cette mission étaient les massifs isolés de la côte Ouest (klippes), le massif du Sud, ainsi que les péridotites de la côte Est. Au final, les principaux sites étudiés ont concerné le massif du Kopéto/Sireis pour ce qui concerne le domaine des klippes, la zone de Poro pour les péridotites de la côte Est et la vallée de la Tontouta pour le massif du Sud.

1.3. PRESENTATION DES TRAVAUX REALISES

Afin de réaliser les objectifs de ce programme, plusieurs actions ont été entreprises :

- réalisation d'une mission de terrain de vingt-cinq jours en Nouvelle-Calédonie ;
- échantillonnage des occurrences d'antigorite les plus caractéristiques ;
- réalisation d'un programme analytique incluant la réalisation de lames minces et une caractérisation des échantillons par microscopie électronique à balayage (MEB) et spectroscopie Raman ;
- rédaction d'un rapport de fin d'étude présentant les travaux réalisés et les résultats des analyses effectuées.

1.4. ENREGISTREMENT DES DONNEES STRUCTURALES

Le paragraphe ci-dessous reprend intégralement les données présentées dans le rapport BRGM/RP-63103-FR (Lahondère et al., 2014).

[Les structures à antigorite observées dans les péridotites de Nouvelle-Calédonie s'apparentent par certains aspects à des plans de faille. Elles correspondent en effet à de grands plans porteurs de longues cristallisations fibro-lamellaires. L'observation de petites aspérités perpendiculaires à l'allongement des fibres contribue également à donner un aspect de plan de faille à ces structures. Cependant, ces structures ne peuvent pas être interprétées en termes de plan de faille sur lesquels on observerait des cristallisations en zones abritées.]

Dans le détail, ces structures présentent très souvent une partie centrale, constituée par des lattes d'antigorite, séparée des péridotites encaissantes par des bandes serpentineuses blanches finement cristallisées et sans orientation cristalline apparente, au sein desquelles des veinules de chrysotile sont fréquemment observées (Lahondère et al., 2012). Ces structures à antigorite portent des cristallisations fibro-lamellaires (à fibreuses) mais jamais de stries. Ces cristallisations sont la plupart du temps obliques par rapport aux surfaces qui limitent la structure et ne sont pas associées à des aspérités de ces surfaces. Les lattes situées en position centrale forment ainsi un angle plus ou moins fort avec les épontes et cet angle apparaît d'autant plus faible que la longueur des lattes est élevée. Dans les plans porteurs de très longues lattes, pluri-centimétriques à pluri-décimétriques, cet angle peut être très faible. Par ailleurs, il faut souligner l'absence de cavités et de zones de dissolution au niveau de ces structures à antigorite.

Dans l'interprétation retenue ici, les structures à antigorite correspondent à des veines à croissance syntaxiale, symétriques. Le remplissage de ces veines semble se faire d'une manière continue, au fur et à mesure de leur ouverture. Il n'a pas été observé de mécanisme de croissance de type « crack-seal », comme celui suggéré par Andreani et al. (2004) pour les veines à chrysotile recoupant les serpentinites du complexe franciscain ou par Groppo et Compagnoni (2007) pour les veines à antigorite du massif de Lanzo. Deux incréments peuvent cependant parfois être différenciés, le premier caractérisé par des cristallisations perpendiculaires aux épontes (« cross fiber »), le deuxième par des cristallisations subparallèles à ces mêmes épontes (« slip fiber »). Ces deux incréments peuvent correspondre à un premier

stade d'ouverture suivi d'un second stade caractérisé par un déplacement relatif des deux lèvres de la structure.]

1.5. CALENDRIER DES INTERVENTIONS

La mission du terrain prévue dans le cadre de la convention a été réalisée entre le 23/03/2015 et le 16/04/2015. Elle a été réalisée conjointement par D. Lahondère (BRGM/DGR/GSO) et S. Lesimple (DIMENC/SGNC).

Le calendrier de la mission est précisé ci-après (Figure 1).

<i>Lundi 23 et Mardi 24 mars :</i>	<i>Voyage Orléans-Tokyo-Nouméa</i>
Mercredi 25 mars :	Réunions DIMENC, Induction SMGM
Jeudi 26 mars :	Mine d'Opoué
Vendredi 27 mars :	Mine de Tomo
<i>Samedi 23 novembre :</i>	<i>Nouméa</i>
<i>Dimanche 24 novembre :</i>	<i>Nouméa</i>
Lundi 30 mars :	Mine de Vulcain
Mardi 31 mars :	Mine de Vulcain
Mercredi 01 avril :	Piste d'accès à la mine de Sireis
Jeudi 02 avril :	Mine de Sireis
Vendredi 03 avril :	<i>Aléa climatique, retour sur Nouméa et conditionnement des échantillons</i>
<i>Samedi 04 avril :</i>	<i>Nouméa</i>
<i>Dimanche 5 avril :</i>	<i>Nouméa</i>
<i>Lundi 6 avril :</i>	<i>Nouméa</i>
Mardi 7 avril :	Secteur de Poro
Mercredi 8 avril :	Mine de Poro-CFTMC
Jeudi 9 avril :	Mine de Poro-Bonini
Vendredi 10 avril :	Secteur de Thio – Saint-Gabriel, retour sur Nouméa, réunion avec J.S. Baille
<i>Samedi 11 avril :</i>	<i>Nouméa</i>
<i>Dimanche 12 avril :</i>	<i>Nouméa</i>
Lundi 13 avril :	Secteur de Yaté (13 avril)
Mardi 14 avril :	Vallée de la Doumbéa, restitution (Nouméa), présentation des actions BRGM - MEDDE/DGPR/BSSS liées à la problématique de l'amiante en carrières, présentation du projet PIMAC
Mercredi 15 avril :	Rédaction du rapport de mission, conditionnement des échantillons, réunion du comité de thèse de Stéphane Lesimple
Jeudi 16 avril :	Voyage Nouméa-Tokyo-Orléans

Figure 1 : Calendrier et programme de la mission.

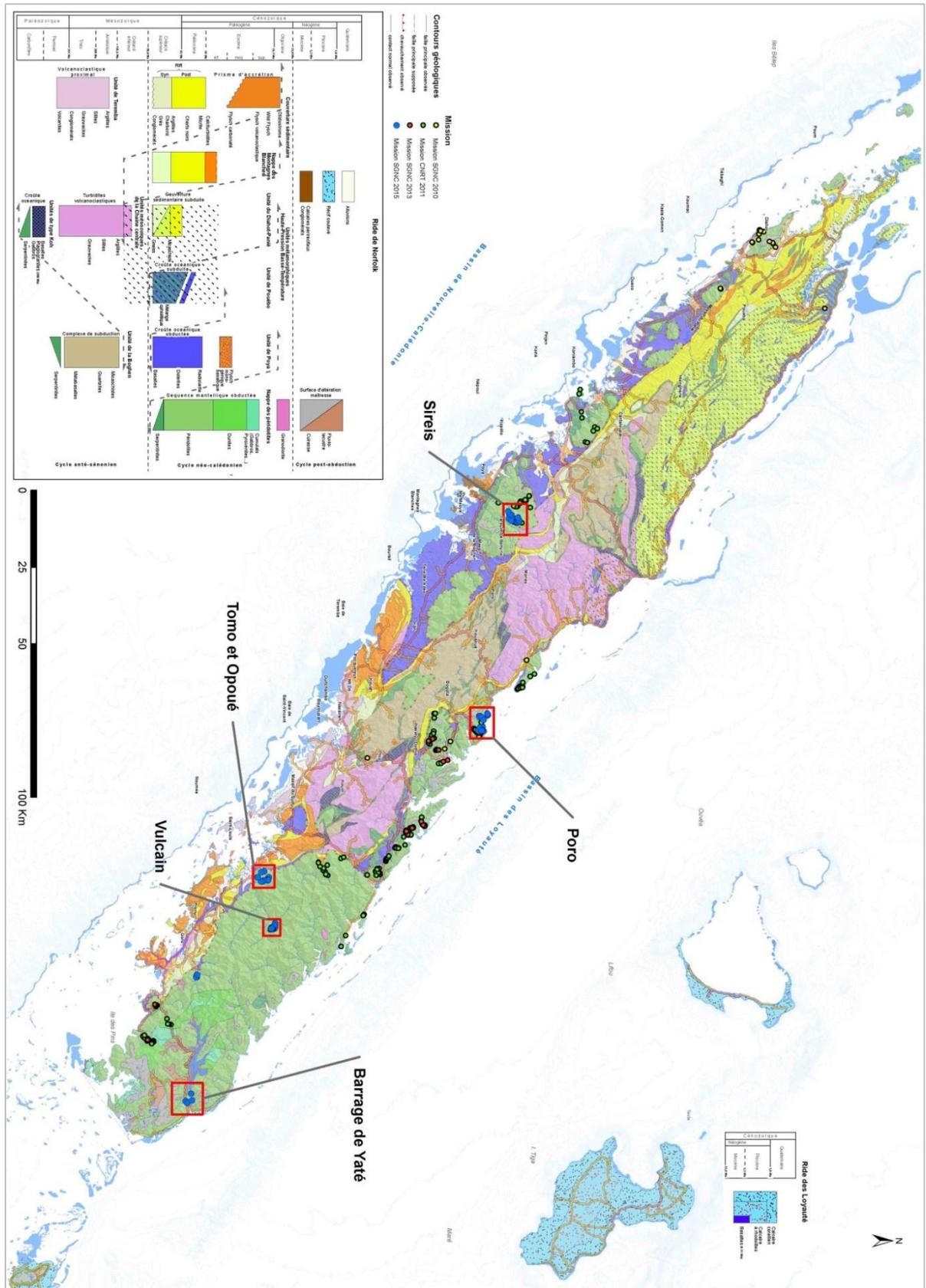


Figure 2 : Carte de localisation des principaux sites visités.

2. Expertise de terrain

Les sites pressentis pour cette mission se devaient d'être représentatifs des grands secteurs de la nappe des péridotites de Nouvelle-Calédonie, à savoir les massifs isolés de la côte ouest (klippes), le massif du Sud et les massifs de la côte Est.

Les principales observations ont donc porté sur les zones minières de Vulcain, Sireis, Poro-CFTMC et Poro-Bonini (Figure 1). Par ailleurs, des informations complémentaires ont été acquises sur les secteurs d'Opoué, de Tomo, de Yaté et de Doumbéa.

Les coordonnées géographiques de tous les points visités sont indiquées ci-après (Figure 3).

La liste présentant la nature des échantillons prélevés est reproduite ci-après (Figure 4).

2.1. MINES D'OPOUE ET DE TOMO

Au niveau de la mine d'Opoué, les premières observations ont été réalisées dans la partie supérieure du gisement, dans des zones anciennement exploitées constituées essentiellement par des dunites à niveaux de pyroxénites. Ces dunites sont localement recoupées par des plans porteurs de cristallisations fibreuses orientés N085 N90, N170 E30 et N170 W55 (Figure 5). Le rubanement mantellique, souligné localement par des alternances de dunites et de harzburgites, est orienté N010 E50 à N045 E40.

Dans la zone en cours d'exploitation (Bwa Chi), le faciès principal correspond à des dunites parfois très peu serpentinisées. Des veinules sombres à lizardite recourent ces dunites, auxquelles sont régulièrement associées des veinules de chrysotile. Ces veines précoces à lizardite sont orientées N150 W50, N170 E50 et N040 N45. A noter que les plans fibreux observés dans les anciennes exploitations semblent ici absents et qu'aucune veine à antigorite n'a été identifiée dans cette fosse.

Les observations suivantes ont été faites le long de la piste d'accès à la mine, en redescendant dans la vallée de la Tontouta. Au niveau du site NC535DL (carrière « Entre-Deux »), la piste recoupe une grande veine à antigorite *pro parte* reprise dans un mur de silice. Plus bas, dans des zones évoquant de plus en plus des faciès de type « *semelle* », des veines de chrysotile parfois épaisses de plusieurs millimètres ont été observées (NC537DL).

Au niveau de la mine de Tomo, les premières observations ont concerné une ancienne zone exploitée, en contrebas du gisement actuel. Dans ce secteur, les anciens fronts permettent d'observer des harzburgites découpés en blocs parallélépipédiques par des veines serpentineuses (« *slip-veins* ») à cristallisations nacrées. Localement, cette organisation précoce est perturbée par le développement de couloirs serpentineux schistosés orientés N010 E50, à valeur de failles normales (NC538DL).

Au niveau des zones d'exploitation actuelles, les veines à antigorite et les structures amiantifères apparaissent exceptionnelles, les principales structures observées correspondant au réseau précoce à lizardite (\pm chrysotile).

Au final, il apparaît que les secteurs exploités dans les mines d'Opoué et de Tomo n'ont que très peu été affectés par les processus ayant conduit à la formation des veines à antigorite. Ceci est surprenant au regard des observations faites dans la mine « voisine » de Vulcain et démontre une fois de plus l'existence, d'un site à l'autre, d'hétérogénéités très importantes dans les processus de serpentinisation.

Structuration et serpentinitisation des péridotites de Nouvelle-Calédonie

Date	Site	Coordonnées		Mine
26/03/2015	NC530DL	S 21,92643	E 166,20110	Opoué
26/03/2015	NC531DL	S 21,92599	E 166,19983	Opoué
26/03/2015	NC532DL	S 21,93166	E 166,20862	Opoué
26/03/2015	NC533DL	S 21,92792	E 166,20842	Opoué
26/03/2015	NC534DL	S 21,92838	E 166,20891	Opoué
26/03/2015	NC535DL	S 21,93995	E 166,21002	Opoué
26/03/2015	NC536DL	S 21,94497	E 166,21325	Opoué
26/03/2015	NC537DL	S 21,94844	E 166,21288	Opoué
27/03/2015	NC538DL	S 21,95839	E 166,20016	Tomo
27/03/2015	NC539DL	S 21,95804	E 166,20002	Tomo
27/03/2015	NC540DL	S 21,93923	E 166,18099	Tomo
27/03/2015	NC541DL	S 21,94807	E 166,18367	Tomo
28/03/2015	NC542DL	S 21,90751	E 166,34417	Vulcain
28/03/2015	NC543DL	S 21,90756	E 166,34690	Vulcain
28/03/2015	NC544DL	S 21,90794	E 166,36028	Vulcain
28/03/2015	NC545DL	S 21,90951	E 166,35308	Vulcain
28/03/2015	NC546DL	S 21,91342	E 166,36340	Vulcain
28/03/2015	NC547DL	S 21,91405	E 166,36352	Vulcain
31/03/2015	NC548DL	S 21,91503	E 166,36173	Vulcain
31/03/2015	NC549DL	S 21,91543	E 166,36053	Vulcain
31/03/2015	NC550DL	S 21,91569	E 166,35977	Vulcain
31/03/2015	NC551DL	S 21,92000	E 166,36245	Vulcain
31/03/2015	NC552DL	S 21,91819	E 166,36185	Vulcain
01/04/2015	NC553DL	S 21,22031	E 165,06064	Sireis
01/04/2015	NC554DL	S 21,21308	E 165,06933	Sireis
01/04/2015	NC555DL	S 21,21466	E 165,07418	Sireis
01/04/2015	NC556DL	S 21,22279	E 165,07350	Sireis
01/04/2015	NC557DL	S 21,21536	E 165,06231	Sireis
02/04/2015	NC558DL	S 21,19850	E 165,08135	Sireis
02/04/2015	NC559DL	S 21,19936	E 165,08598	Sireis
02/04/2015	NC560DL	S 21,20055	E 165,08589	Sireis
02/04/2015	NC561DL	S 21,19846	E 165,08601	Sireis
02/04/2015	NC562DL	S 21,19800	E 165,08508	Sireis
02/04/2015	NC563DL	S 21,19491	E 165,08446	Sireis
02/04/2015	NC564DL	S 21,19187	E 165,08237	Sireis
02/04/2015	NC565DL	S 21,19332	E 165,07887	Sireis
02/04/2015	NC566DL	S 21,19565	E 165,07087	Sireis
02/04/2015	NC567DL	S 21,19634	E 165,07091	Sireis
02/04/2015	NC568DL	S 21,21582	E 165,08023	Sireis
02/04/2015	NC569DL	S 21,21971	E 165,05891	Sireis
03/04/2015	NC570DL	S 21,22400	E 165,05067	Sireis
07/04/2015	NC571DL	S 21,28613	E 165,68895	Poro
07/04/2015	NC572DL	S 21,28630	E 165,68818	Poro
07/04/2015	NC573DL	S 21,28714	E 165,68611	Poro
07/04/2015	NC574DL	S 21,30194	E 165,72746	Poro
07/04/2015	NC575DL	S 21,30743	E 165,74129	Poro
07/04/2015	NC576DL	S 21,30805	E 165,74211	Poro
08/04/2015	NC577DL	S 21,30949	E 165,69393	Poro-CFTMC
08/04/2015	NC578DL	S 21,31057	E 165,69258	Poro-CFTMC
08/04/2015	NC579DL	S 21,31014	E 165,69265	Poro-CFTMC
08/04/2015	NC580DL	S 21,30937	E 165,69691	Poro-CFTMC
08/04/2015	NC581DL	S 21,30336	E 165,69707	Poro-CFTMC
08/04/2015	NC582DL	S 21,30398	E 165,69593	Poro-CFTMC
08/04/2015	NC583DL	S 21,29938	E 165,70442	Poro-CFTMC
08/04/2015	NC584DL	S 21,31348	E 165,73819	Poro
08/04/2015	NC585DL	S 21,30836	E 165,72814	Poro
09/04/2015	NC586DL	S 21,30272	E 165,73984	Poro_Bonini
09/04/2015	NC587DL	S 21,30376	E 165,73936	Poro_Bonini
09/04/2015	NC588DL	S 21,30356	E 165,74053	Poro_Bonini
09/04/2015	NC589DL	S 21,30292	E 165,74135	Poro_Bonini
09/04/2015	NC590DL	S 21,30370	E 165,74023	Poro_Bonini
09/04/2015	NC591DL	S 21,30405	E 165,73992	Poro_Bonini
09/04/2015	NC592DL	S 21,29865	E 165,73965	Poro_Bonini
09/04/2015	NC593DL	S 21,30251	E 165,73614	Poro_Bonini
09/04/2015	NC594DL	S 21,30349	E 165,73769	Poro_Bonini
09/04/2015	NC595DL	S 21,30373	E 165,73787	Poro_Bonini
13/04/2015	NC596DL	S 22,16693	E 166,90716	Yaté
13/04/2015	NC597DL	S 22,16222	E 166,91414	Yaté
13/04/2015	NC598DL	S 22,14811	E 166,90586	Yaté
13/04/2015	NC599DL	S 22,15102	E 166,88379	Yaté
14/04/2015	NC600DL	S 22,13501	E 166,50808	Doumbea
14/04/2015	NC601DL	S 22,13620	E 166,51553	Doumbea
14/04/2015	NC602DL	S 22,13798	E 166,51580	Doumbea
14/04/2015	NC603DL	S 22,13483	E 166,50846	Doumbea

Figure 3 : Coordonnées des sites visités.

Structuration et serpentinisation des péridotites de Nouvelle-Calédonie

Mine	Echantillon	Description_Echantillon
Opoué	NC531DL-A	Fibres isolées issues d'un plan serpentineux
Opoué	NC531DL-B	Fibres isolées issues d'un plan serpentineux
Opoué	NC533DL-A	Dunite peu altérée
Opoué	NC533DL-B	Harzburgite peu altérée
Opoué	NC534DL	Dunite peu altérée à veinules à lizardite + chrysotile
Opoué	NC535DL-A	Structure à antigorite rigide mais altérée (mur de silice)
Opoué	NC535DL-A2	Structure à antigorite rigide mais altérée (mur de silice)
Opoué	NC535DL-B	Structure à antigorite très altérée (mur de silice), pro parte asbestiforme ?
Opoué	NC535DL-B2	Structure à antigorite très altérée (mur de silice), pro parte asbestiforme ?
Opoué	NC537DL	Dunite à veinules de chrysotile
Tomo	NC539DL	Fibres issues d'un plan fibro-lamellaire
Tomo	NC540DL	Structure à antigorite très altérée (mur de silice), pro parte asbestiforme ?
Tomo	NC541DL	Structure à antigorite très altérée
Vulcaïn	NC542DL	Fibres isolées issues d'une structure à antigorite
Vulcaïn	NC543DL	Fibres isolées issues d'une structure à antigorite
Vulcaïn	NC543DL-A	Structure à antigorite très altérée (mur de silice), pro parte asbestiforme ?
Vulcaïn	NC543DL-B1	Structure à antigorite (+ chrysotile ?)
Vulcaïn	NC543DL-B2	Structure à antigorite (+ chrysotile ?)
Vulcaïn	NC544DL-A	Structure serpentineuse complexe à veines sombres et lattes d'antigorite en position centrale
Vulcaïn	NC544DL-B	Structure à antigorite rigide mais altérée (mur de silice)
Vulcaïn	NC544DL-C	Structure à antigorite très altérée (mur de silice), pro parte asbestiforme ?
Vulcaïn	NC544DL-D	Structure à antigorite très altérée (mur de silice)
Vulcaïn	NC545DL	Eponte serpentineuse blanche
Vulcaïn	NC546DL	Eponte serpentineuse blanche et veine de chrysotile à grenat
Vulcaïn	NC546DL-B1	Structure à antigorite très altérée (mur de silice), pro parte asbestiforme ?
Vulcaïn	NC546DL-B2	Structure à antigorite très altérée (mur de silice), pro parte asbestiforme ?
Vulcaïn	NC546DL-C	Eponte serpentineuse blanche
Vulcaïn	NC547DL	Structure à antigorite très altérée (mur de silice)
Vulcaïn	NC548DL	Fibres isolées issues d'une structure à antigorite
Vulcaïn	NC549DL	Fibres vertes isolées issues d'un plan recoupant des serpentinites (mur de minéralisation)
Vulcaïn	NC549DL-B	Fibres isolées issues d'une structure à antigorite
Vulcaïn	NC550DL	Fibres isolées issues d'une structure à antigorite
Vulcaïn	NC550DL-B	Amas fibro-lamellaire
Vulcaïn	NC550DL-C1	Fibres vertes rigides issues d'une veine à antigorite
Vulcaïn	NC550DL-C2	Fibres vertes asbestiformes issues d'une veine à antigorite
Vulcaïn	NC550DL-D	Fibres asbestiformes isolées issues d'un plan parallèle à une veine à antigorite (anthophyllite possible)
Vulcaïn	NC550DL-E	Structure serpentineuse complexe à veines sombres et lattes d'antigorite en position centrale
Vulcaïn	NC550DL-F	Eponte serpentineuse blanche et lattes centrales
Vulcaïn	NC551DL	Fibres asbestiformes issues d'une veine à antigorite
Vulcaïn	NC551DL-B	Structure à antigorite très altérée, pro parte asbestiforme ?
Vulcaïn	NC551DL-C	Structure à antigorite très altérée, pro parte asbestiforme ?
Vulcaïn	NC552DL	Structure à antigorite très altérée, pro parte asbestiforme ?
Sireis	NC553DL-A	Veine pluricentimétrique à trémolite
Sireis	NC553DL-B	Veine à trémolite et encaissant
Sireis	NC553DL-C	Plan à trémolite et trémolite-amiante
Sireis	NC553DL-D	Veine à antigorite cisailée
Sireis	NC554DL	Fibres isolées issues d'une structure à antigorite
Sireis	NC555DL-A	Leucodiorite filonienne
Sireis	NC555DL-B	Serpentinites riches en chrysotile
Sireis	NC558DL-A	Dunite peu altérée à veinules de lizardite
Sireis	NC558DL-B	Dunite peu altérée à veinules de lizardite + chrysotile
Sireis	NC559DL-A	Veine à antigorite, à longues fibres
Sireis	NC559DL-B	Fibres asbestiformes isolées issues d'une veine à antigorite, à longues fibres
Sireis	NC561DL	Plan fibreux plissé au dessus d'un contact serpentineux (mur de minéralisation)
Poró	NC571DL	Structure fibreuse à trémolite (+ antigorite ?)
Poró	NC572DL	Grande veine fibreuse à trémolite + chlorite et/ou serpentine (3 fragments)
Poró	NC573DL	Veine à antigorite
Poró	NC574DL	Veine à antigorite plissée issue d'une structure reprise par des injections siliceuses
Poró	NC574DL-B	Fibres isolées issues d'une veine à antigorite (plan repris par des injections de silice)
Poró	NC575DL	Fibres isolées issues d'une veine à antigorite, certaines d'apparence asbestiforme
Poró	NC576DL-A	Trémolite
Poró	NC576DL-B	Structure fibreuse à trémolite (+ antigorite ?)
Poró-CFTMC	NC579DL	Veine épaisse (50 cm) à bordures serpentineuses blanches et structure centrale à antigorite et pétales
Poró-CFTMC	NC581DL-A	Fibres isolées rigides issues d'un plan à cristallisations fibreuses (trémolite ?)
Poró-CFTMC	NC581DL-B	Fibres isolées souples issues d'un plan à cristallisations fibreuses (trémolite ?)
Poró-CFTMC	NC582DL	Fibres isolées
Poró-CFTMC	NC582DL-C1	Fibres isolées issues d'une veine-type à antigorite
Poró-CFTMC	NC582DL-C2	Fibres isolées issues d'une veine de type slip-vein à trémolite
Poró-CFTMC	NC582DL-D1	Trémolite
Poró-CFTMC	NC582DL-D2	Structure-type à antigorite prélevée en bordure d'une poche à trémolite
Poró-CFTMC	NC582DL-D3	Structure à trémolite (+ chromite ?)
Poró-CFTMC	NC583DL	Péridotite recoupée par des veines noires (lizardite) et veinules blanches amorphes au centre
Poró	NC584DL	Fibres isolées issues d'une veine à antigorite, certaines rigides d'autres à morphologie asbestiforme
Poró	NC585DL	Fibres isolées issues d'une veine à antigorite, certaines d'apparence asbestiforme
Poró_Bonini	NC586DL	Fibres isolées issues d'une veine à antigorite, certaines rigides d'autres à morphologie asbestiforme
Poró_Bonini	NC587DL	Fibres isolées issues d'une veine à antigorite, dans le prolongement d'une poche à trémolite
Poró_Bonini	NC588DL-A	Trémolite fibreuse se dissociant en fibrilles asbestiformes
Poró_Bonini	NC588DL-B	Gros cristaux de chlorite associés à la poche à trémolite
Poró_Bonini	NC592DL	Structure serpentineuse avec possible veine centimétrique de chrysotile "scratch"
Poró_Bonini	NC593DL-A	Fibres isolées issues d'une veine à antigorite altérée
Poró_Bonini	NC593DL-B	Veine à chrysotile "scratch" associée à plan fibreux à antigorite
Poró_Bonini	NC594DL	Réseau à veines noires de lizardite et veinules de chrysotile
Poró_Bonini	NC595DL-A	Fibres isolées issues d'un plan à cristallisations fibreuses repris par plan à doewellite
Poró_Bonini	NC595DL-B	Fibres isolées issues d'un plan à trémolite (fibres rigides et asbestiformes)
Yaté	NC596DL	Fibres isolées issues d'un plan à cristallisations lamellaires
Yaté	NC597DL	Fibres isolées issues d'un plan à cristallisations lamellaires
Yaté	NC597DL-B	Fibres isolées issues d'une veine à antigorite
Yaté	NC599DL	Fibres isolées issues d'un plan à cristallisations lamellaires, certaines souples
Doumbea	NC601DL	Filon de microgranite ou granophyre
Doumbea	NC602DL	Fibres isolées issues d'un plan à cristallisations lamellaires
Doumbea	NC603DL	Structures-type à antigorite (deux plans inversés)

Figure 4 : Liste et nature des échantillons prélevés au cours de la mission.



Figure 5 : Plans fibreux observés dans les parties supérieures du gisement d'Opoué (ancienne exploitation : a, b). Vues de la zone d'exploitation actuelle d'Opoué (Bwa Chi : c, d).



Figure 6 : Fosse de la mine de Tomo, limitée par un plan à doewellite.

2.2. MINE DE VULCAIN

Les études préalablement réalisées ont montré que les veines fibro-lamellaires à antigorite étaient particulièrement abondantes au niveau de la mine de Vulcain (Lahondère et *al.*, 2011 ; Lahondère et *al.*, 2012 ; Lahondère et *al.*, 2014). Deux nouvelles journées ont donc été consacrées à l'acquisition de nouvelles observations dans cette mine, au cours desquelles onze sites ont été visités et géoréférencés (*cf.* Annexe 1).

2.2.1. Données préalablement acquises

Les veines fibro-lamellaires à antigorite sont abondantes dans toute la zone exploitée. Les plus saines d'entre elles correspondent à de grandes surfaces tapissées par des lattes vertes d'antigorite de longueur pluri-centimétrique, d'aspect rigide. Une fois mises à jour à l'occasion des travaux d'exploitation, ces veines se fragmentent et les lattes se dissocient en morceaux fibriformes plus ou moins épais et allongés. Cette fragmentation s'accompagne d'un blanchiment des fibres. Avec l'augmentation de l'altération, ces lattes rigides se dissocient en fibres à la fois plus fines et plus courtes, d'aspect généralement rectiligne. Dans la partie supérieure de la saprolite et à la base de la couche de latérite, les veines fibro-lamellaires sont très altérées et *pro parte* transformées en amas microfibreux et en « mottes » blanches. En fonction du site et de l'importance de l'altération supergène, les veines fibro-lamellaires sont donc plus ou moins préservées. Au niveau d'un même site, tous les stades d'altération sont parfois observés.

En 2012, des occurrences particulières à chrysotile avaient été décrites de façon ponctuelle dans les massifs de Poro, du Koniambo et du Kopéto (Sireis), étroitement associées aux structures à antigorite (Lahondère et *al.*, 2012). Ce type d'occurrence a également été mis en évidence en 2014 sur le site de Vulcain (NC446DL, NC450DL, NC451DL), sous la forme de petites veines fibreuses ou de plans à petites pelotes fibreuses (Lahondère et *al.*, 2014).

2.2.2. Nouvelles observations

Les nouvelles observations ont porté sur différents secteurs de la mine (*cf.* Annexe 1). Le long de la piste ont été observées plusieurs veines à antigorite d'épaisseur centimétrique à pluri-centimétrique, localisées à proximité d'un filon acide orienté N070 N25. Dans une zone *pro parte* silicifiée, des fibres blanches d'antigorite, très altérées et présentant des morphologies d'apparence asbestiforme, ont été identifiées et prélevées (NC543DL) (Figure 7).

Des structures à antigorite toujours très altérées ont été également observées dans la partie supérieure de Module 1, au niveau du mur de la zone minéralisée. Ces structures sont épaisses de 1 à 5 cm, espacées de quelques centimètres seulement et toutes subparallèles les unes aux autres (N050 S80 à N080 N85). Les fibres altérées se désagrègent sous la seule pression des doigts en fibres très fines, rigides et aciculaires (Figure 8). De petits amas de fibres potentiellement asbestiformes ont également été observés et échantillonnés (NC544DL). A noter que les structures à antigorite sont ici très obliques par rapport à l'accident siliceux qui limite la minéralisation vers le Nord-Est, lequel apparaît orienté N140 W50.

Les autres observations ont concerné la zone de Module 3 qui correspond à un secteur caractérisé par la présence de très nombreuses veines à antigorite. L'une de ces veines, orientée N030 W60, se suit sur plusieurs mètres de longueur et montre une morphologie classique, à laquelle s'ajoute un niveau de 1 à 2 cm constitué de chrysotile verdâtre, lequel est associé à de petits grenats¹ en tête d'épingle (éch. NC546DL) observé sur l'un des contacts entre la partie fibro-lamellaire centrale et l'éponte blanche (Figure 9).

¹ Détermination réalisée par Stéphane Lesimple.

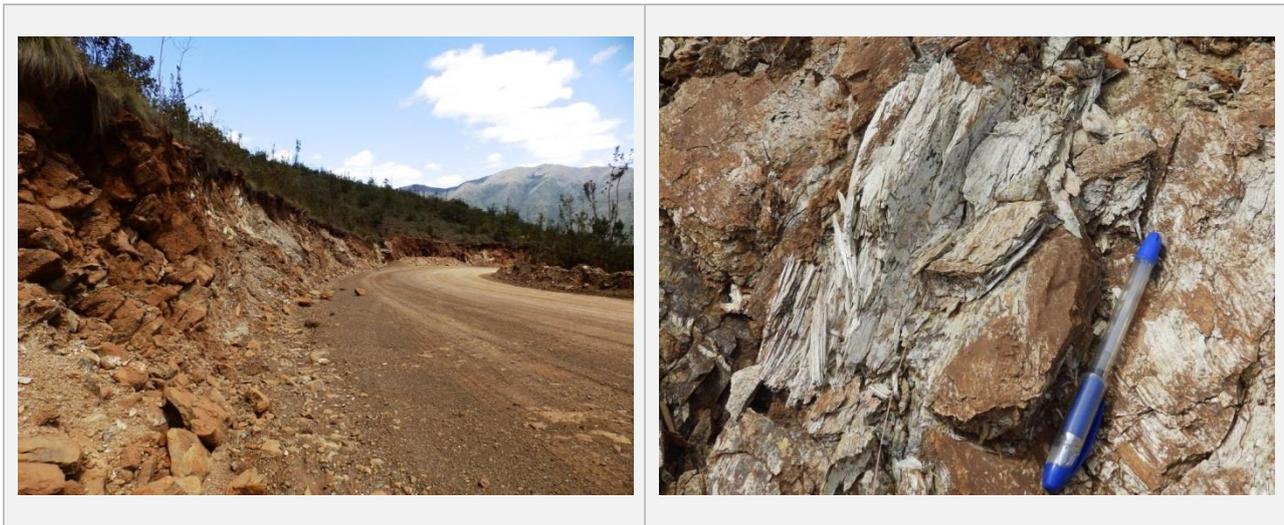


Figure 7 : Affleurement NC543DL et structure très altérée à longues fibres blanches d'antigorite.



Figure 8 : Structures à antigorite très altérées montrant la coexistence de lattes verdâtres rigides, de cristaux rigides aciculaires et d'amas blancs potentiellement asbestiformes (NC544DL).

Au niveau de la fosse située sur la bordure sud de Module 3, le mur de la zone minéralisée exploitée correspond à une surface plane orientée N090 N 60 au niveau de laquelle ont été observées des serpentinites nacrées surmontées par un niveau bréchique d'épaisseur pluridécimétrique. Des plans striés, localement à doewellite, découpent le niveau bréchique. Au-dessus de la brèche, le minerai correspond à un minerai quadrillé « classique », à veines de garniérite. Des veines à antigorite recoupent régulièrement les péridotites situées au-dessus du mur (Figure 15). Ces veines découpent les péridotites en blocs grossièrement parallélépipédiques à lenticulaires, chaque surface de ces blocs correspondant à une veine à antigorite (Figure 15).

De nombreuses veines fibrolamellaires à antigorite ont été identifiées, immédiatement sous la surface correspondant au mur de la zone minéralisée (Figure 10). La plupart de ces veines sont subparallèles au mur. Les déplacements correspondant à l'ouverture de ces veines ont une composante horizontale senestre et une composante verticale normale. Sur un bloc déplacé ont été observées des fibres d'apparence rigides, parfois lamellaires, et des fibres très fines d'apparence asbestiforme (NC550DL) (Figure 10).

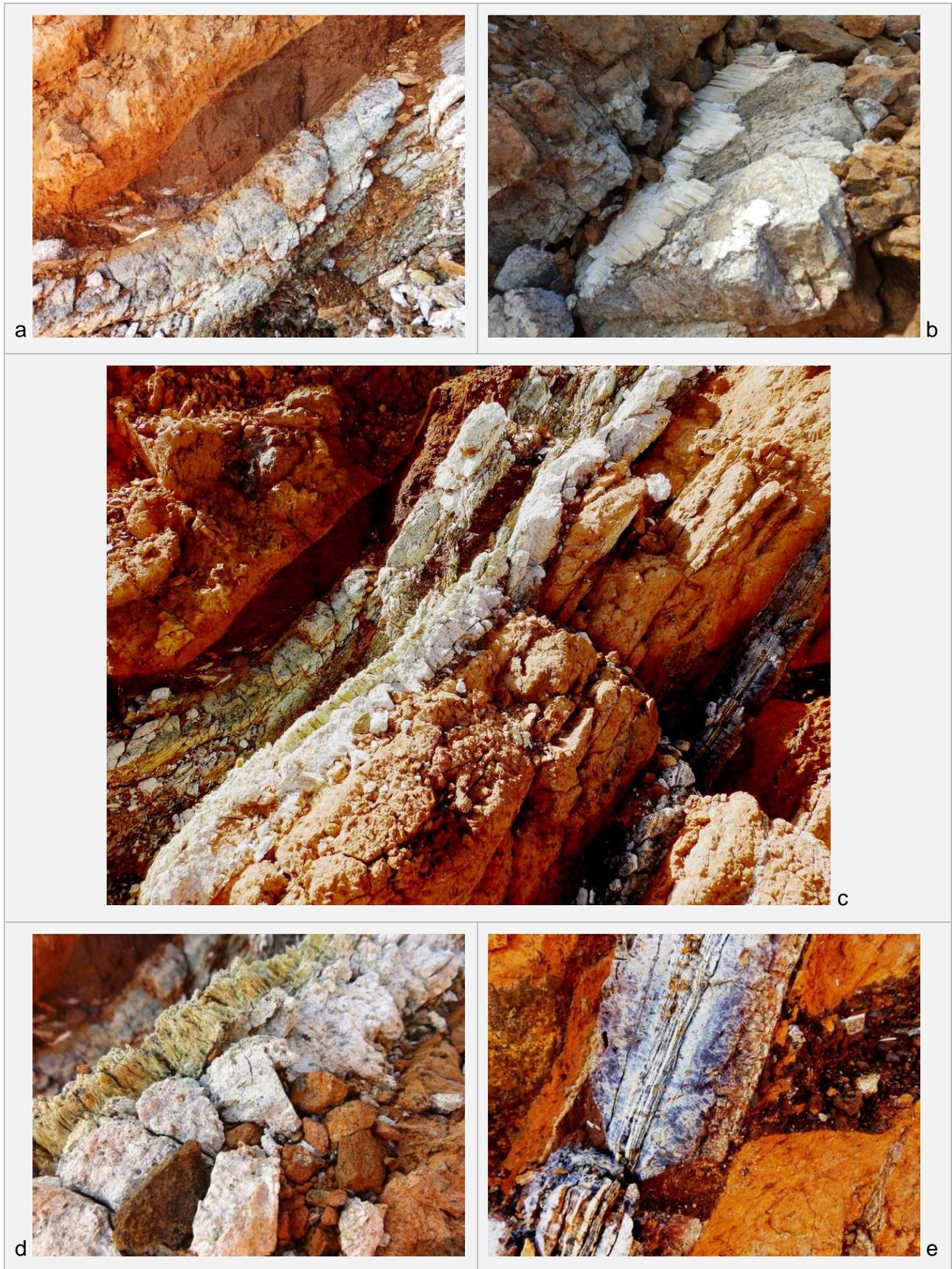


Figure 9 : Détails de la veine à antigorite observée au niveau du site NC546DL. La partie centrale de la veine, de nature fibro-lamellaire, est encadrée par les bandes serpentineuses blanches (a, b). Une veine à chrysotile vert-jaune s'intercale entre l'une de ces bandes et la partie centrale (c, d). A noter que cette structure est parallèle à un système de veines sombres à veinules de chrysotile (e).

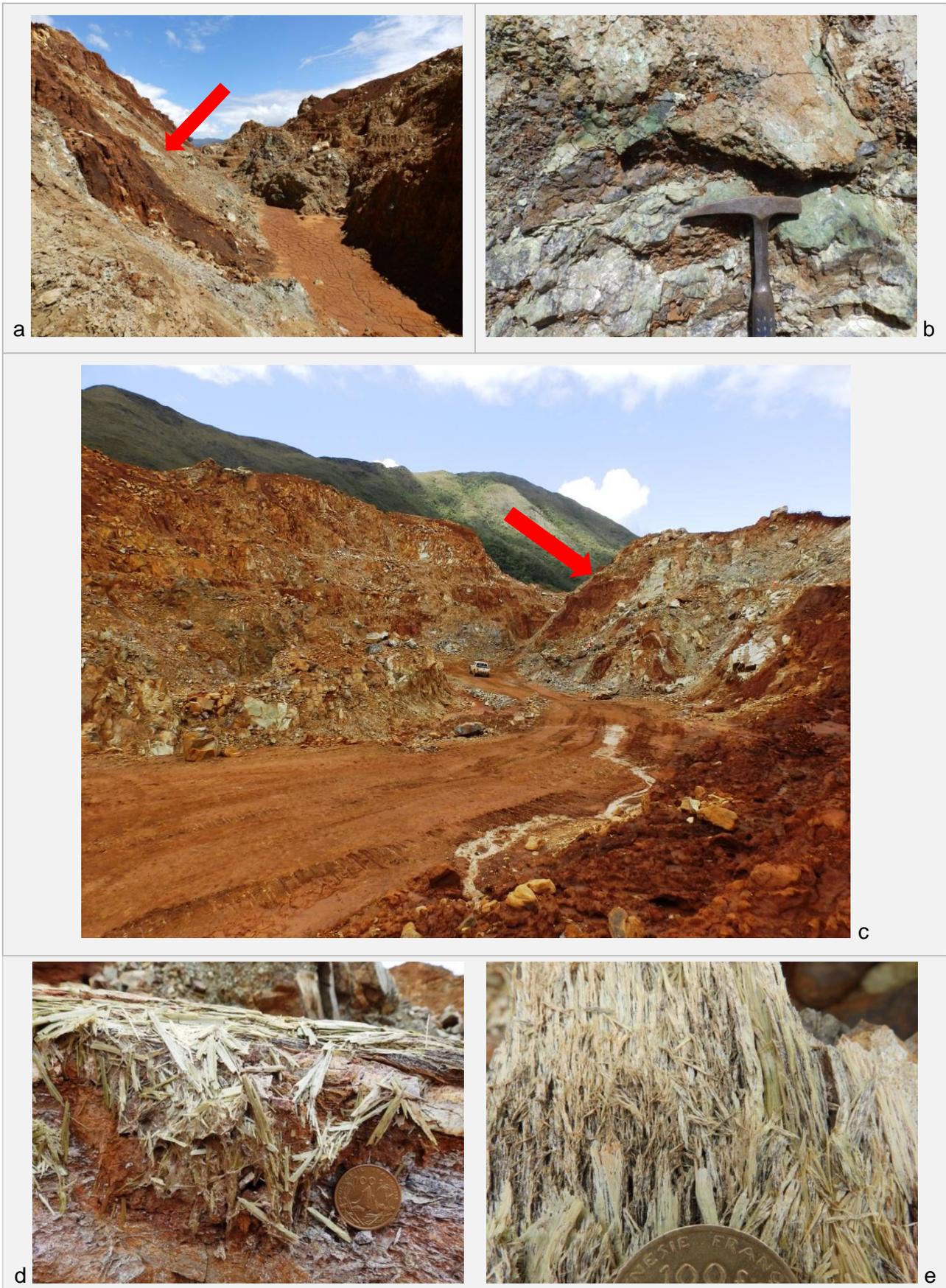


Figure 10 : Vue générale de la fosse située au sud de Module 3 depuis son extrémité est (a) et ouest (c).
Le plan correspondant au mur de la zone exploitée, orienté N090 N60, est visible sur les photos a & c.
Ce plan est parallèle à des veines fibreuses observées notamment sous le mur (NC550DL, photos d & e).

Les dernières observations ont concerné la partie sud-est du gisement (Module 4 Haut). Ces observations ont permis d'identifier plusieurs veines à antigorite, lesquelles apparaissent très altérées au niveau de la transition saprolite/latérite, avec présence de fibres d'apparence asbestiforme (Figure 11).

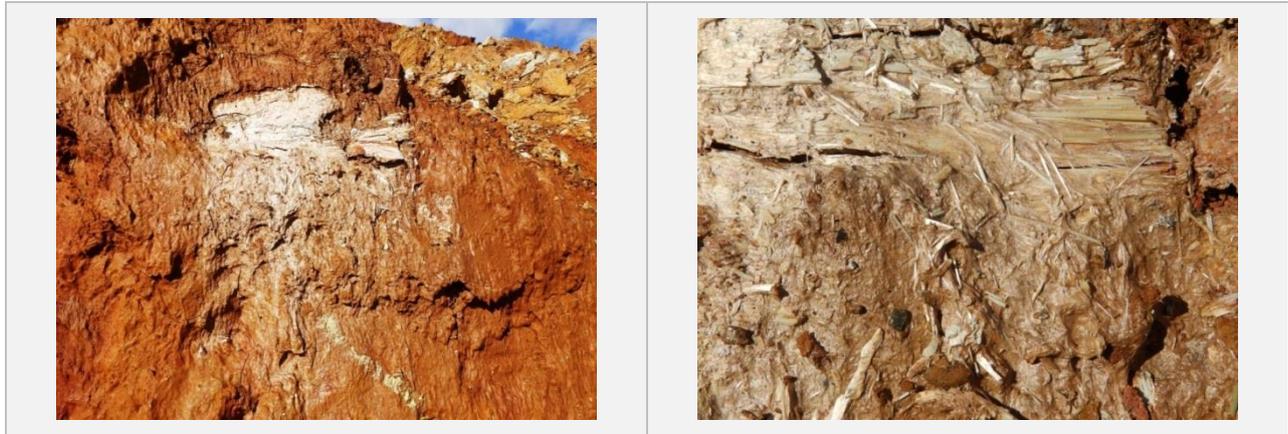


Figure 11 : Amas fibreux désagrégé, préservé dans une poche latéritique (NC551DL).

2.2.3. Données structurales

De nouvelles mesures structurales ont été faites à partir des veines fibrolamellaires observées. Les valeurs des nouvelles mesures effectuées sur la mine de Vulcain sont indiquées dans le tableau ci-dessous (Figure 12). Sont reportés dans ce tableau la direction et le plongement des surfaces correspondant aux deux épontes de la veine ainsi que la direction et le plongement des fibres minérales². Les composantes horizontale et verticale du mouvement relatif entre les deux lèvres de la veine sont également indiquées dans le même tableau, la composante principale étant souligné en gras (Figure 12).

Affleurement	Type de structure	Epontes		Fibre minérale		Composantes		Echantillon correspondant
		Direction	Plongement	Azimut	Plongement	Horizontale	Verticale	
NC542DL	Fibro-lamellaire	297	40	297	40		Normale	NC542DL
	Fibro-lamellaire	265	48	320	28	Dextre	Normale	
	Fibro-lamellaire	280	45	340	15	Dextre	Normale	
	Fibro-lamellaire	320	70	320	70		Normale	
NC543DL	Fibro-lamellaire	355	68	20	55	Dextre	Normale	NC543DL
	Fibro-lamellaire	315	80	40	20	Dextre	Normale	
	Fibro-lamellaire	56	61	81	53	Dextre	Normale	
	Fibro-lamellaire	325	85	305	70	Senestre	Normale	
	Fibro-lamellaire	40	50	352	38	Senestre	Inverse	
NC544DL	Fibro-lamellaire	315	72	315	72		Inverse	NC544DL-A
	Fibro-lamellaire	322	80	8	50	Dextre	Normale	NC544DL-B, C, D
	Fibro-lamellaire	320	32	8	30	Dextre	Normale	
NC545DL	Fibro-lamellaire	182	25	147	22	Dextre	Inverse	NC545DL
NC546DL	Fibro-lamellaire	155	25	65	0	Senestre		
	Fibro-lamellaire	258	52	344	5	Dextre	Normale	NC546DL
	Fibro-lamellaire	260	48	325	3	Dextre	Normale	
	Fibro-lamellaire	295	32	18	9	Dextre	Normale	NC546DL-B1, B2, C
NC547DL	Fibro-lamellaire	215	38	190	30	Dextre	Inverse	
	Fibro-lamellaire	246	37	190	24	Dextre	Inverse	NC547DL
NC548DL	Fibro-lamellaire	100	90	10	23	Dextre		
	Fibro-lamellaire	75	90	165	25	Dextre		NC548DL
	Fibro-lamellaire	207	67	153	40	Dextre	Inverse	
	Fibro-lamellaire	225	48	145	25	Dextre	Inverse	
NC549DL	Fibro-lamellaire	208	22	198	20	Dextre	Inverse	
	Serpentineuse, nacrée	0	60					NC549DL
NC550DL	Fibro-lamellaire	8	55	330	56	Senestre	Normale	
	Fibro-lamellaire	10	60	295	34	Senestre	Normale	
	Fibro-lamellaire	5	62	5	62		Normale	
	Fibro-lamellaire	305	58	320	58	Dextre	Normale	
NC551DL	Fibro-lamellaire	259	30	335	22	Dextre	Normale	NC551DL

Figure 12 : Nouvelles données structurales enregistrées dans la mine de Vulcain.

² La direction des fibres d'antigorite étant oblique aux épontes, les points représentatifs des directions mesurées ne sont pas contenus dans la trace des plans correspondant à ces épontes.

L'orientation des épontes des veines à antigorite est très variable, même si une direction NE-SW semble légèrement prédominer (Figure 13)³. Les lattes fibreuses sont majoritairement à plongement vers le Nord (à NNE), d'un angle faible (< 30°) (Figure 13). Une analyse plus détaillée des mesures enregistrées met cependant en évidence plusieurs points importants.

Les veines à antigorite correspondant à une ouverture de type « *dextre-normale* » semblent les plus représentées. Dans cette famille de veines, les épontes pendent vers le Nord ou vers l'Ouest et les lattes d'antigorite sont presque toujours inclinées dans une direction comprise entre N320 et N040 (Figure 14a). Les veines à antigorite correspondant à une ouverture de type « *dextre-inverse* » pendent très majoritairement vers le Sud-Ouest, les lattes d'antigorite associées étant inclinées dans une direction comprise entre N140 et N200 (Figure 14b). Pour les veines caractérisées par une ouverture de type « *senestre-normale* », les épontes pendent vers le Nord et les lattes d'antigorite sont inclinées dans une direction comprise entre N280 et N340 (Figure 14c). Enfin, pour les veines de type « *senestre-inverse* », les épontes pendent vers le Nord (à Nord-Ouest) et les lattes d'antigorite sont majoritairement inclinées dans une direction comprise entre N020 et N050 (Figure 14d).

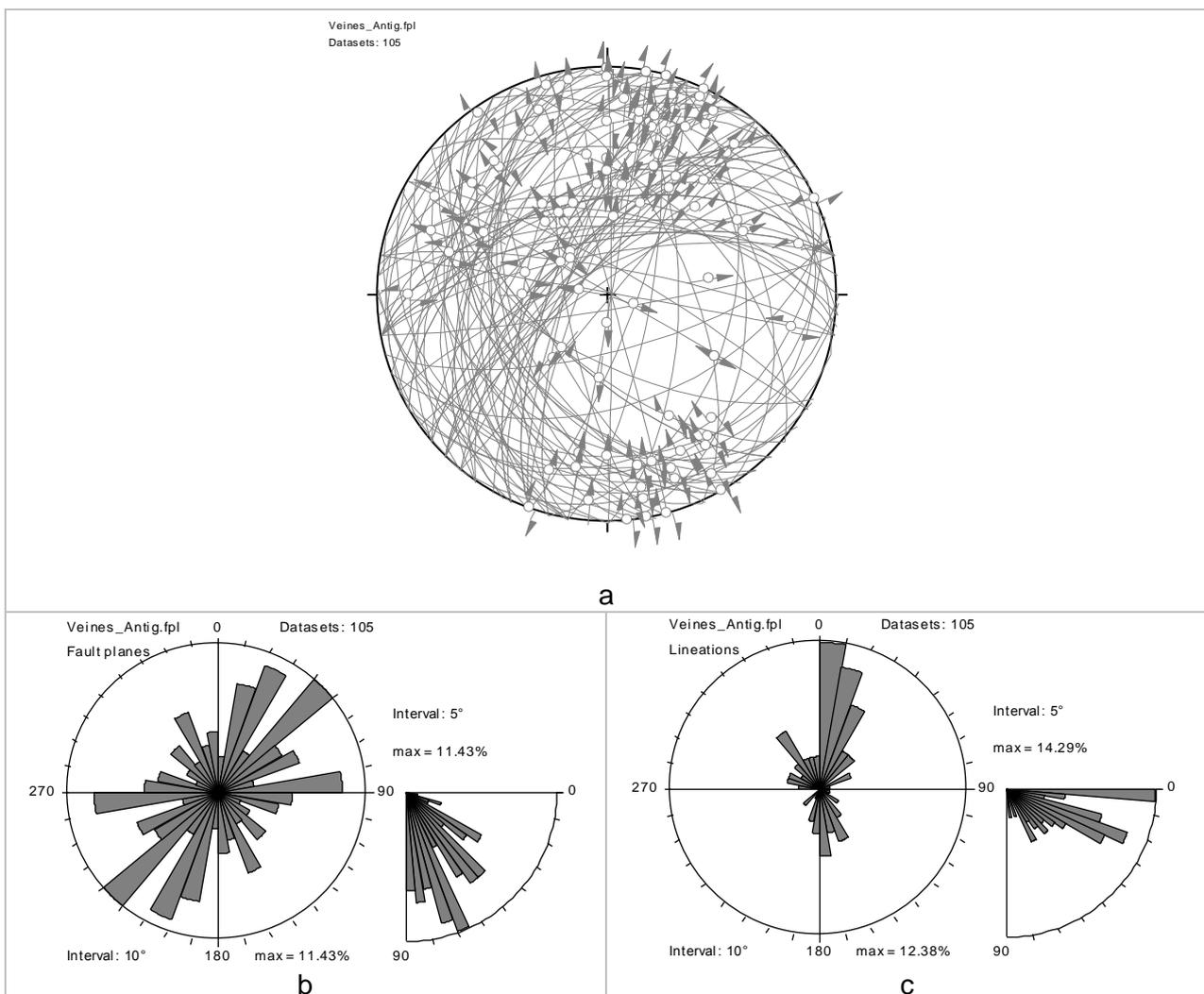


Figure 13 : Traces des épontes des veines et des fibres d'antigorite (a).
 Direction et pendage des plans correspondant aux épontes des veines à antigorite (b).
 Direction et inclinaison des fibres d'antigorite (c).

³ Les données utilisées sont celles acquises dans le cadre de la présente étude et celles acquises précédemment (Lahondère et al., 2014).

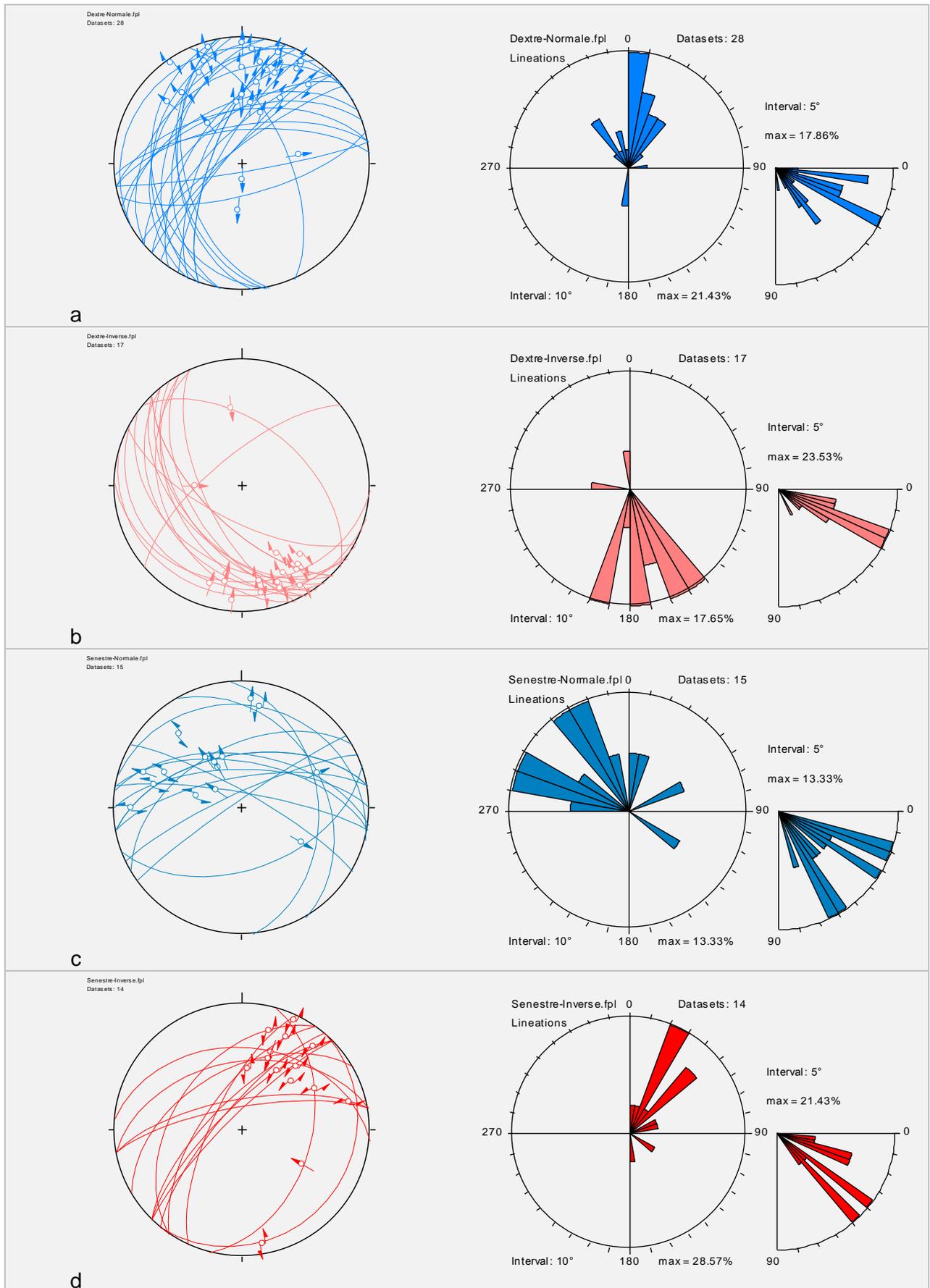


Figure 14 : Traces des épontes et direction des cristallisations fibro-lamellaires correspondantes pour les veines à antigorite caractérisées par des ouvertures « dextres » et « senestres ».

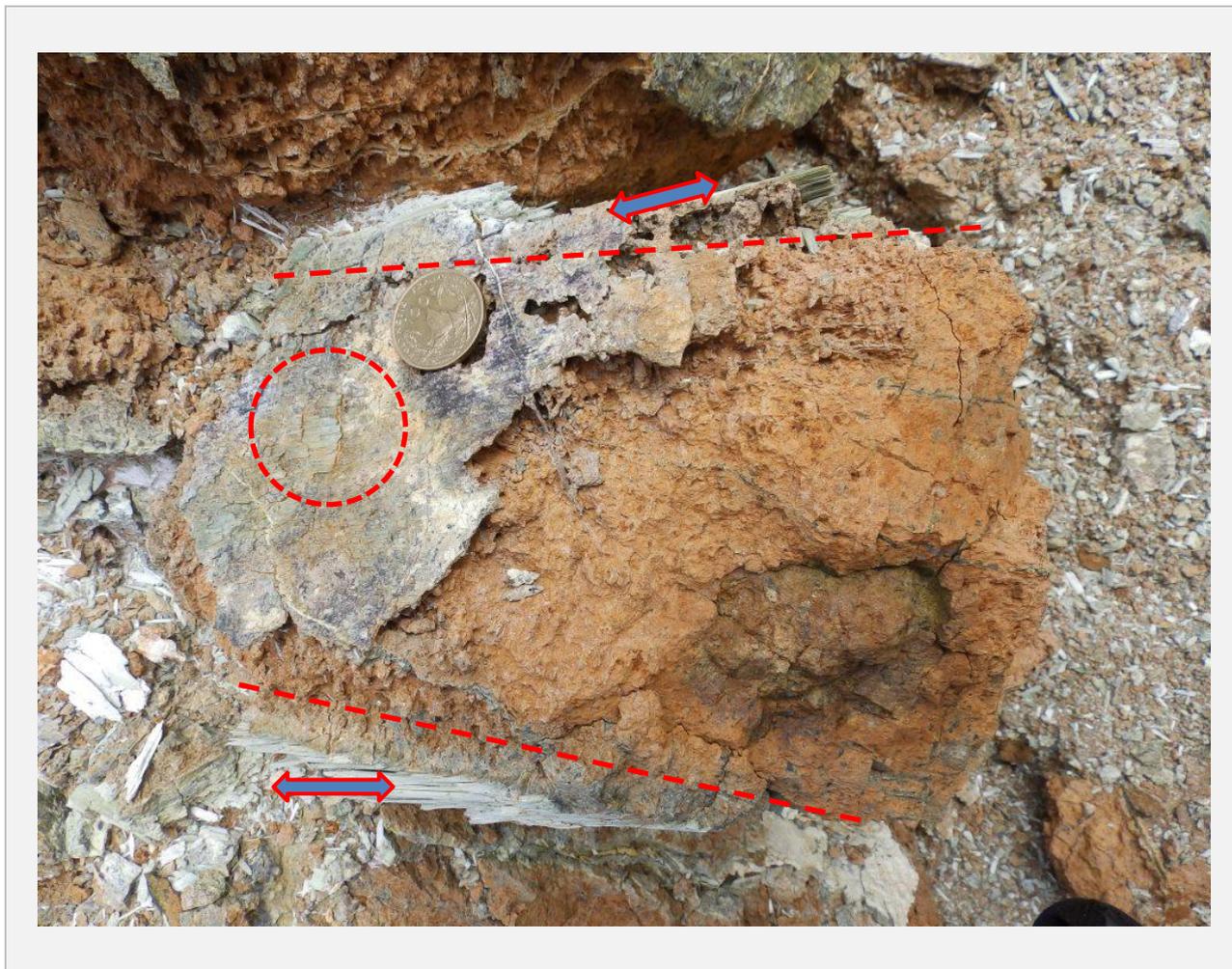


Figure 15 : Veines à antigorite recoupant des péridotites (site NC548DL).
Les traits en tirets matérialisent les épontes des veines, les double-flèches la direction d'ouverture de ces veines. Noter également la présence de lattes d'antigorite dans la veine correspondant au plan principal de la photographie (lattes entourées).

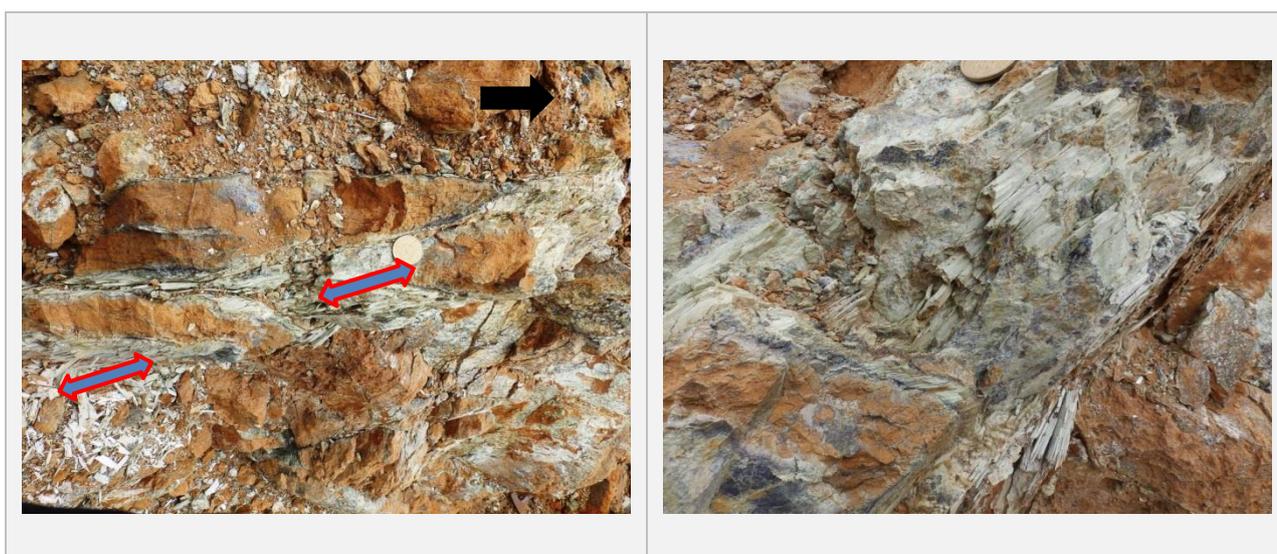


Figure 16 : Veines à antigorite à ouverture dextre limitant des blocs rocheux plus ou moins lenticulaires.
Les double-flèches matérialisent la direction d'ouverture des veines et la flèche noire la direction N345.
La surface photographiée est sub-horizontale (site NC548DL).

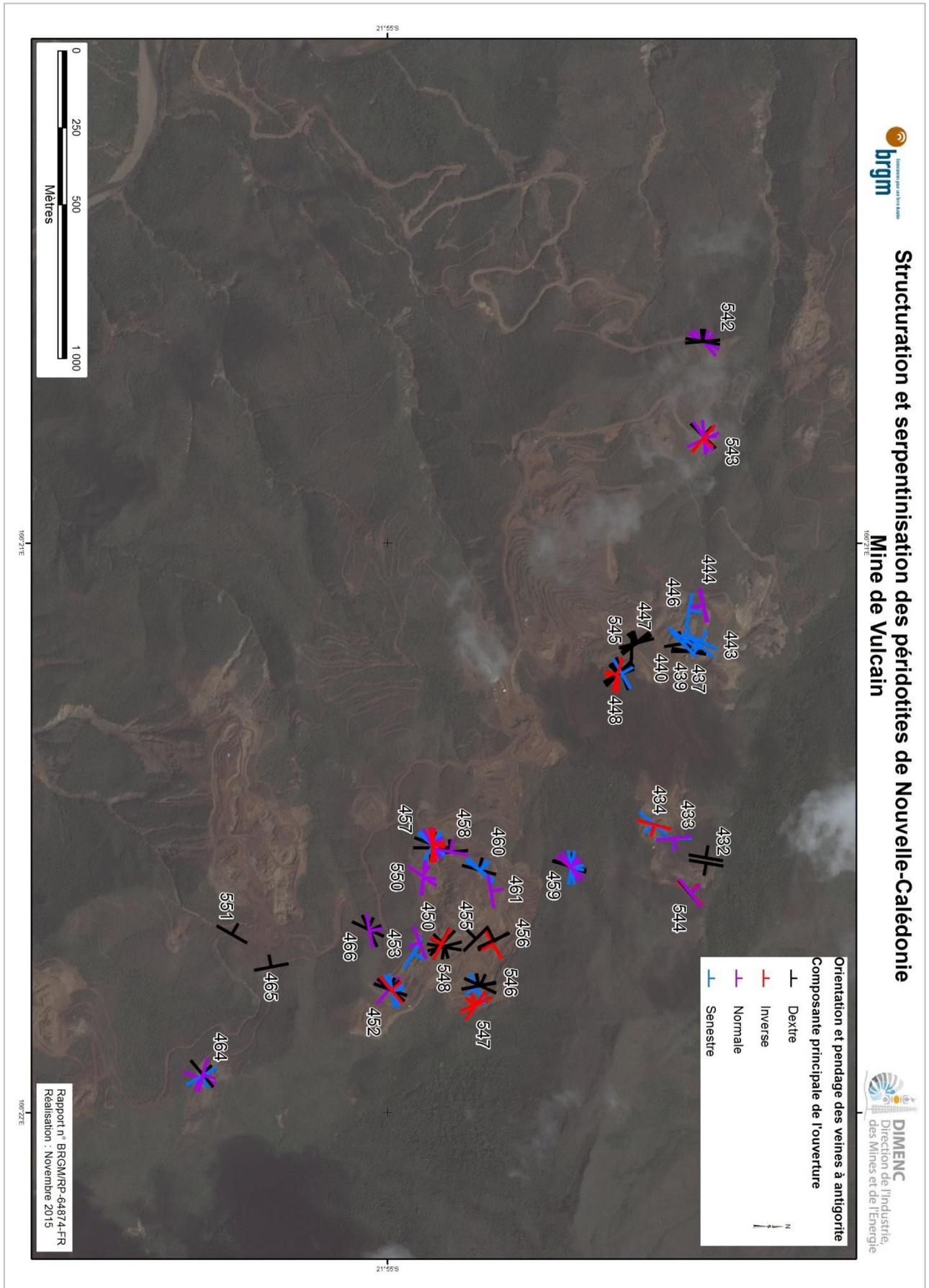


Figure 17 : Localisation des principaux sites étudiés dans l'emprise de la mine de Vulcaïn.

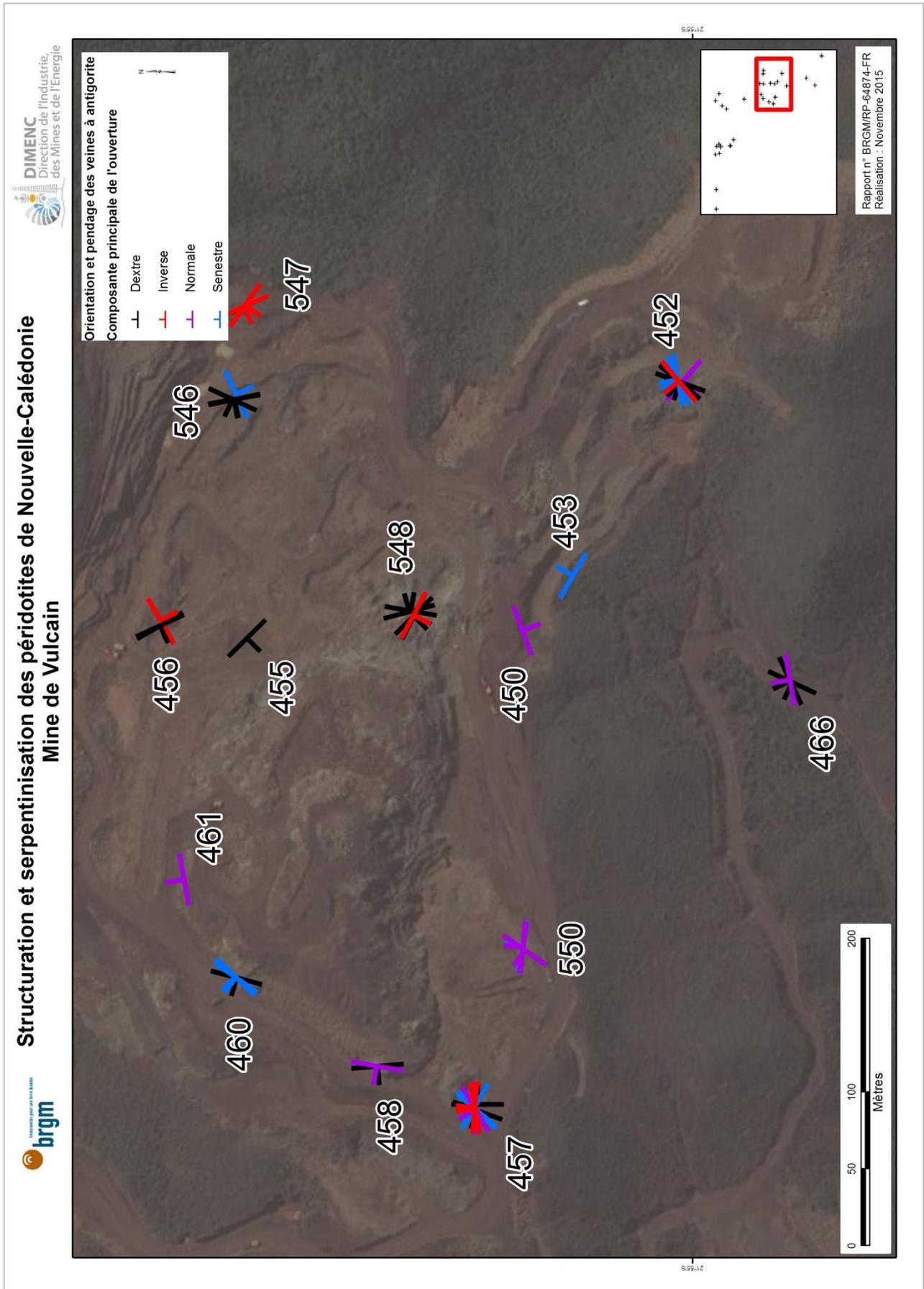


Figure 18 : Localisation des principaux sites étudiés.

2.3. MINE DE SIREIS

La mine de Sireis est localisée dans le massif du Kopéto. Les observations ont principalement été faites le long de la piste d'accès et dans la partie haute de la mine (cf. Annexe 1).

2.3.1. Description des structures observées

Les premières observations ont concerné une zone de la piste au niveau de laquelle plusieurs veines fibreuses ont été identifiées (NC553DL) (Figure 19). Ces veines d'épaisseur centimétrique à pluri-décimétrique sont orientées NW-SE et proches de la verticale. Une veine subméridienne a également été mesurée (N010 E80).

Plusieurs filons leucocrates ont été observés le long de la piste, de même nature (microdiorite ?) que ceux qui recoupent les péridotites du massif du Kopéto (Lahondère et *al.*, 2012). Au niveau du point NC554DL, le filon observé est orienté N060, subvertical. Quelques veines à antigorite ont été observées à proximité, orientées N 090 N85. Plus haut sur la piste, un filon d'épaisseur métrique a été observé dans une masse de serpentinites noires riches en veinules de chrysotile (NC555DL) (Figure 19). La serpentinisation apparaît ici postérieure à la mise en place du filon et les structures observées sont très comparables à celles observées dans la semelle de la nappe des péridotites (NC568DL). Cette observation conforte celles préalablement réalisées dans la partie basale du massif du Kopéto où des corps filoniens sont boudinés dans la semelle de la nappe.



Figure 19 : Observations faites le long de la piste d'accès à Sireis. Les photos a à c correspondent à l'affleurement NC553DL et à des veines à trémolite, la photo d à l'affleurement NC555DL.

Dans la mine de Sireis, les péridotites sont affectées par un réseau de veines sombres qui découpent la roche en blocs grossièrement parallélépipédiques (Figure 20). Ces veines sont toutes connectées les unes aux autres et se sont développées de façon simultanée. Elles sont orientées N35 E90, N130 N45 et N110 S50. Des veinules de chrysotile sont régulièrement observées dans la partie centrale de ces veines sombres. Les veines N110 S50 présentent parfois des cristallisations lamellaires subparallèles aux épontes (lizardite ?).



Figure 20 : Aspect macroscopique des veines serpentineuses sombres (NC558DL).

Au niveau d'une ancienne petite fosse a été observée une structure à doewellite orientée N060 N65. Cette structure est constituée par environ 30 cm de doewellite « massive » surmontée par un niveau de brèches cataclastiques d'épaisseur pluridécimétrique et représenterait le mur (?) de la zone minéralisée (Figure 21). Dans cette fosse, au-dessus du mur, a été observé un grand plan porteur de cristallisations fibreuses *pro parte* asbestiformes, longues de plusieurs centimètres (NC559DL) (Trémolite-amiante ?).



Figure 21 : Structure à doewellite (a, b) et plan à cristallisations fibreuses asbestiformes (c, d) observés au niveau du site NC559DL.

Plus haut, une autre structure à doewellite a été également observée, orientée N035 S45 (NC561DL). Au-dessus du plan strié affleurent des harzburgites recoupées par de nombreuses veines amiantifères plissées (anthophyllite-amiante ?) (Figure 22).

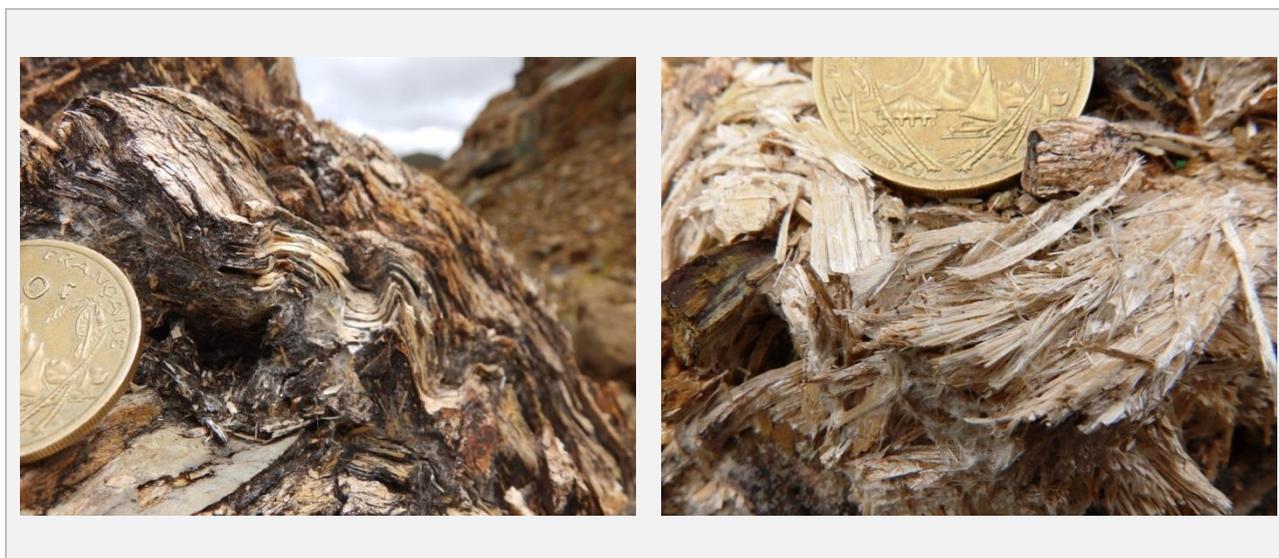


Figure 22 : Plans fibreux plissés, à fibres asbestiformes (NC561DL).

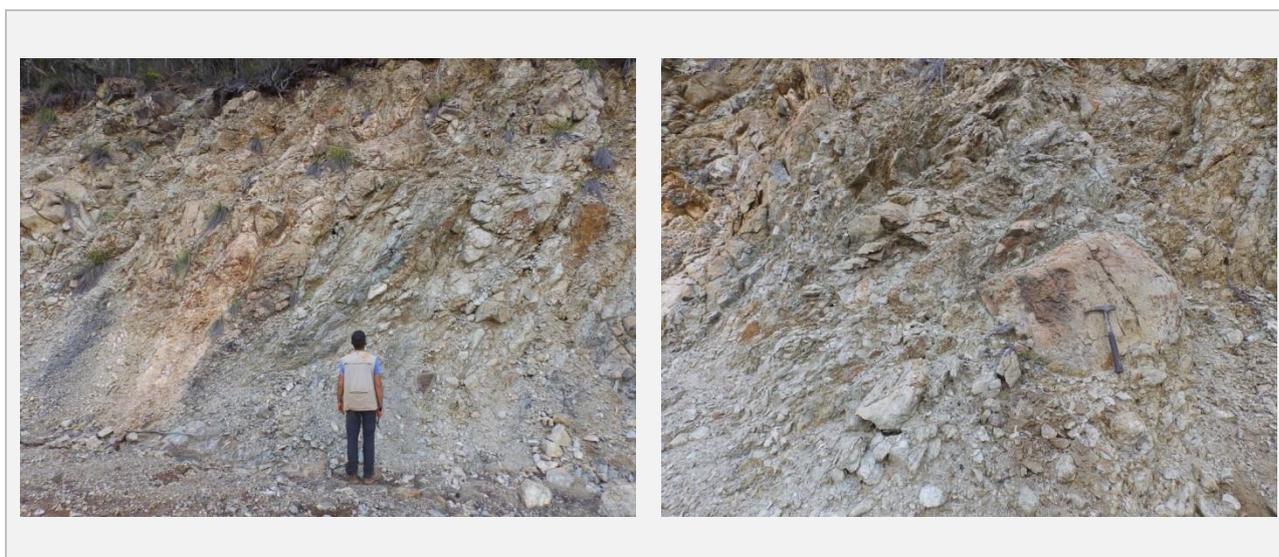


Figure 23 : Aspect des couloirs serpentineux et des nodules de péridotites serpentinisées à veinules de chrysotile (site NC568DL).

2.3.2. Données structurales

Les observations faites montrent que dans le secteur de Sireis, les veines à antigorite sont relativement rares, voire totalement absentes de certaines zones. Cette mine apparaît donc très différente de la mine de Vulcain où les veines à antigorite sont ubiquistes. On notera également que les veines à trémolite et les filons leucocrates observés le long de la piste n'ont pas été retrouvés dans la mine elle-même.

En raison du nombre très faible de structures observées, les données structurales mesurées n'ont pas été analysées plus en détail.

2.4. SECTEUR DE PORO

Les études préalablement réalisées ont aussi montré que les veines fibro-lamellaires à antigorite étaient abondantes dans le secteur de Poro (Lahondère et *al.*, 2011 ; Lahondère et *al.*, 2012 ; Lahondère et *al.*, 2014). Trois autres journées ont donc été consacrées à l'acquisition de nouvelles observations dans ce secteur, principalement au niveau de la mine du CFTMC et dans la fosse de Bonini (cf. Annexe 1).

2.4.1. Données préalablement acquises

De nombreuses veines à antigorite ont été préalablement identifiées dans le secteur de Poro (Lahondère et *al.*, 2011, 2012, 2014). Ces veines présentent les mêmes caractéristiques morphologiques que celles observées dans la mine de Vulcain. Le secteur de Poro se caractérise également par l'abondance des structures à trémolite (veines, plans fibreux).

2.4.2. Nouvelles observations

De nouvelles observations ont été faites le long de la route littorale, sur le site du CFTMC et dans la mine de Bonini (cf. Annexe 1).



Figure 24 : Veines à trémolite fibroradiée (a, b) (NC571DL & NC572DL).
et péridotites à veinules serpentineuses sombres (c, d) (NC572DL & NC573DL).

Les observations réalisées en bordure de route ont notamment permis d'identifier de nouvelles structures à trémolite. Ces structures correspondent à des plans de mouvement porteurs de cristallisations fibreuses (NC571DL) et à des veines fibroradiées discontinues d'épaisseur pluricentimétrique à pluri-décimétrique (NC572DL), très comparables à celles préalablement identifiées dans le secteur de Poro (Figure 24). Les plans fibreux sont parfois observés au niveau des épontes de ces veines et les fibres qu'ils portent possèdent très régulièrement une morphologie asbestiforme.

Une grande veine à antigorite, orientée N070 S35, d'épaisseur pluri-décimétrique et *pro parte* injectée par des veines siliceuses brunes, a également été observée (NC573DL). Cette veine à antigorite est parallèle à un système de veines serpentineuses sombres à lizardite, d'épaisseur millimétrique à centimétrique (Figure 24), dans lesquelles des veinules à chrysotile sont régulièrement présentes.

Les premières observations faites sur le site du CFTMC sont localisées dans le secteur de Stanislas. Dans ce secteur, les péridotites et le minerai quadrillé riche en garniérite sont recoupés par plusieurs types de structures :

- des veines à antigorite (très rares) ;
- des fractures soulignées par des cristallisations de grandes chlorites magnésiennes ;
- des veines serpentineuses noires (lizardite probable) à veinules de chrysotile.

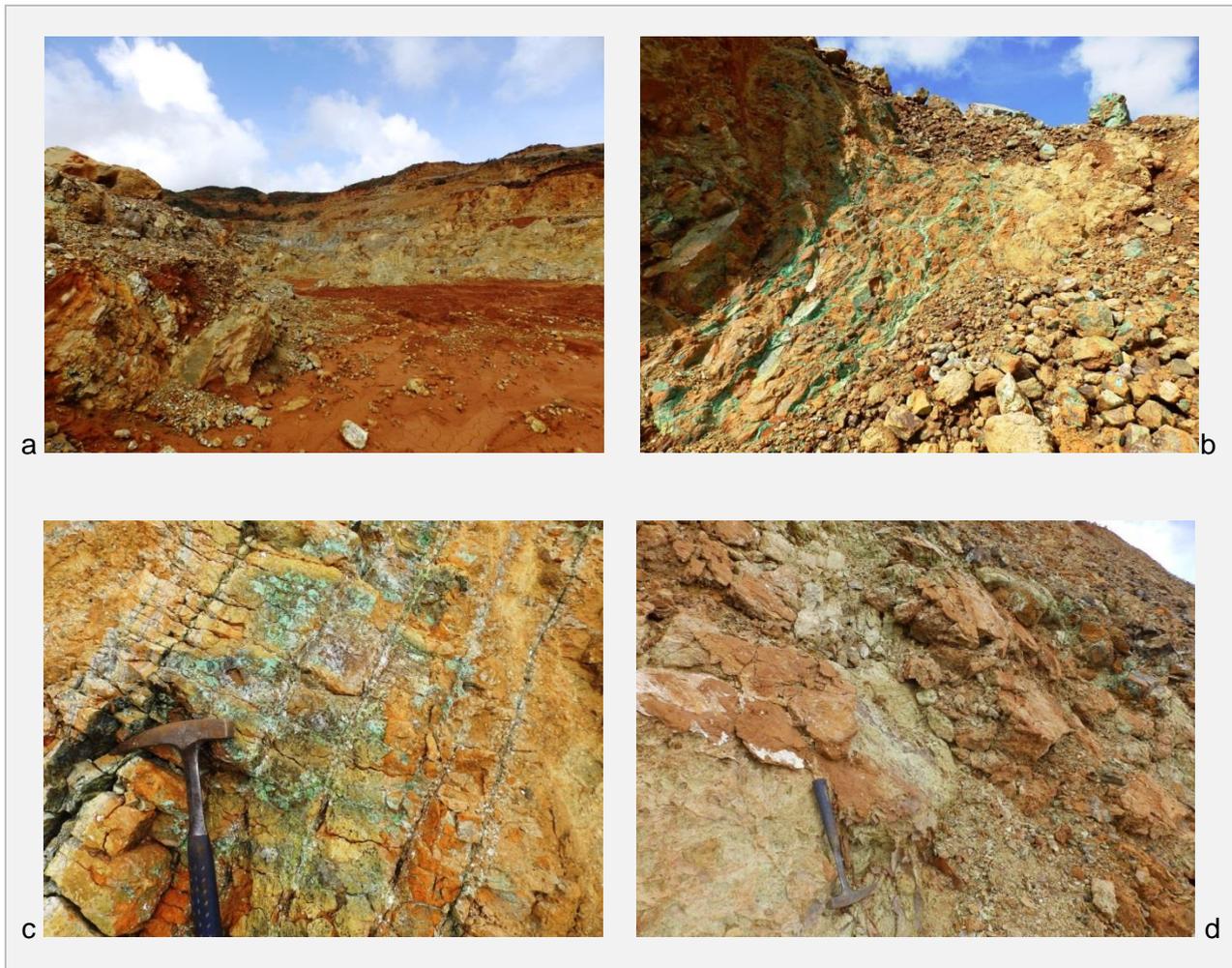


Figure 25 : Vue générale de la fosse de Stanislas (a) et minerai quadrillé (b).
Plans de fracture soulignés par des cristallisations de chlorite (c).
Plan à doewellite orienté N110 N50 observé le long de la piste d'accès à la fosse (d).

Les observations montrent que les veines à antigorite sont exceptionnelles dans la fosse de Stanislas. Les principaux marqueurs de la serpentinisation correspondent à des veinules sombres à lizardite (\pm chrysotile) orientées N090 S70, N060 N50 et N065 S65 et à des fractures soulignées par des cristallisations statiques de grands blastes de chlorite magnésienne (Figure 25).

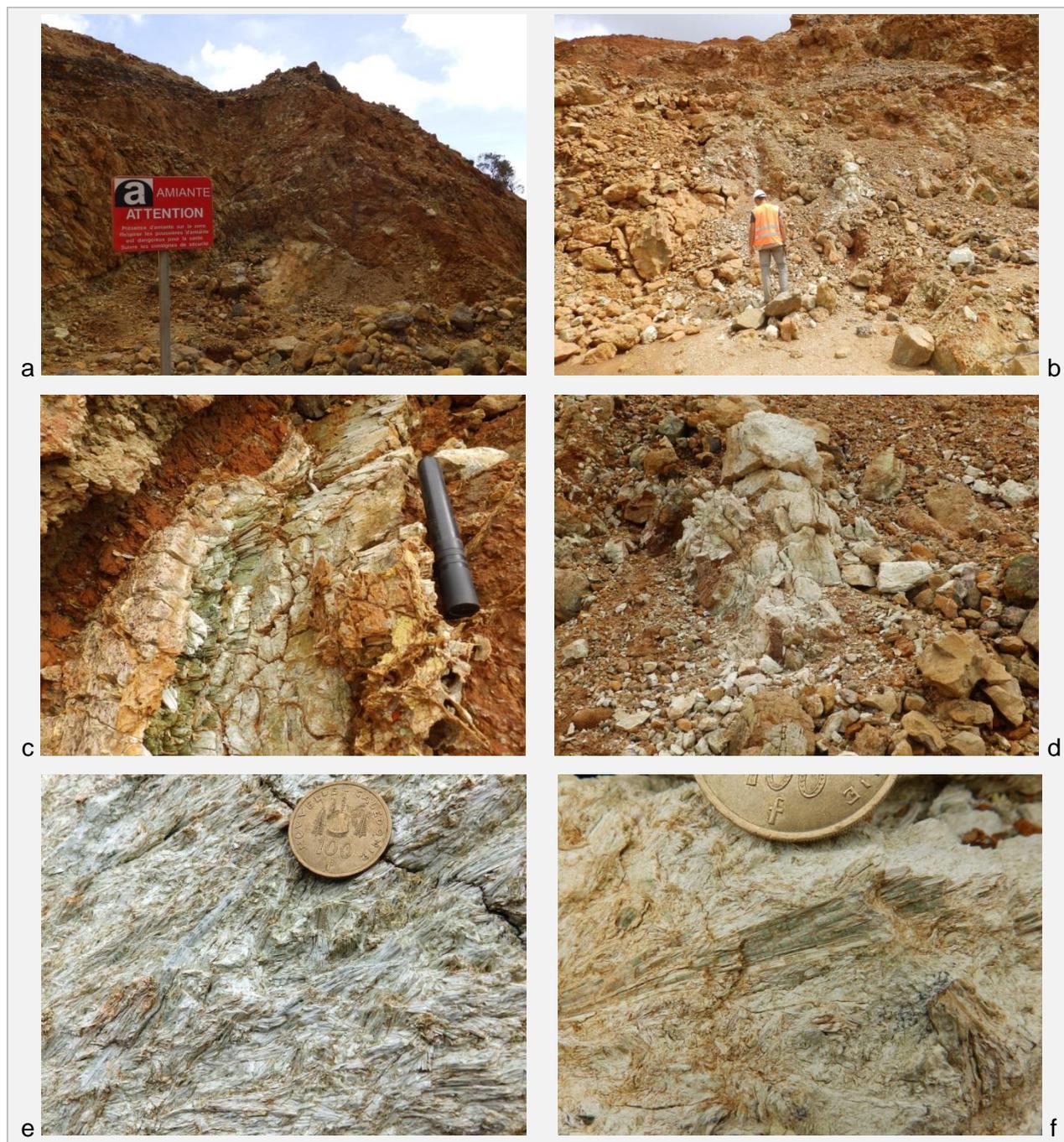


Figure 26 : Vues générales des affleurements NC581DL (a) et NC582DL (b).
Veine classique à antigorite (c) et veines fibroradiées à trémolite (d à f).

Les autres observations ont concerné une fosse au niveau de laquelle deux occurrences amiantifères ont été repérées et marquées à la peinture (NC581DL). Ces deux occurrences correspondent pour la première à une structure à trémolite plus ou moins démembrée dans une poche latéritique, et pour la seconde à une veine (à antigorite ?) orientée N170 E40 dans laquelle coexistent des lattes rigides et des fibres d'apparence asbestiforme. Dans cette même

fosse a été observée une zone complexe (NC582DL) caractérisée par la présence de veines à antigorite orientées N065 S55, de veines fibroradiées à trémolite + chromite, et de plans très minces porteurs de fibres asbestiformes orientés N085 S50 à N110 S50 (Figure 26).

Les observations complémentaires réalisées sur le site de Bonini (C1) ont permis de conforter plusieurs points importants concernant notamment les relations entre les veines à antigorite et les structures à trémolite. La géométrie de la fosse apparaît contrôlée par deux structures majeures, la première à valeur de mur, la seconde localisée dans le centre du gisement.

La structure à valeur de mur a notamment été observée au niveau du point NC593DL où elle se matérialise par la présence de nombreuses veines à antigorite orientées N090 S55 à N100 S65 (Figure 27). Des veines plus tardives à très longues fibres de chrysotile ont également été formellement identifiées dans cette première structure, de même que des veines à antigorite obliques sur les précédentes et orientées N045 W85.

Au-dessus de cette première structure ont été observées des péridotites régulièrement découpées par des veinules sombres à lizardite + chrysotile, d'épaisseur centimétrique, orientées N115 N70 à N135 N70, N030 W60 et N015 E40 (Figure 27). Ces veinules découpent ici encore les péridotites en blocs grossièrement parallélépipédiques (NC594DL, NC595DL).



Figure 27 : Veines à antigorite orientées N090 S50 correspondant au mur de la fosse de Bonini (a, b). Veines serpentineuses à lizardite + chrysotile découpant les péridotites de Bonini (c, d).

La seconde structure qui semble contrôler la géométrie de la fosse a été observée en plusieurs points et suivie sur plusieurs centaines de mètres (Figure 28). Elle se matérialise par l'existence d'un grand plan orienté N085 S35 à N090 S40, porteur de longues cristallisations fibreuses à morphologie parfois asbestiforme (NC512DL, NC595DL). Ces plans ont fréquemment été réutilisés, avec cristallisation de placages de doewellite (Figure 28). Dans le prolongement de

l’affleurement NC512DL a été identifiée une structure à antigorite orientée N110 S30 le long de laquelle des masses discontinues de trémolite sont présentes (NC587DL) (Figure 29). Cette structure est parallèle à des plans très minces porteurs de fibres asbestiformes de trémolite. Des veinules sombres à lizardite + chrysotile, orientées pour les unes entre N125 N75 et N135 N75 et pour les autres entre N015 W75 et N020 W55 découpent les péridotites environnantes. Ces veinules à lizardite + chrysotile et les structures à antigorite + trémolite forment ici encore un réseau qui découpe la roche en éléments grossièrement parallélépipédiques. Dans cette seconde structure, les principales masses fibreuses sont associées aux plans E-W à pendage faible vers le Sud.

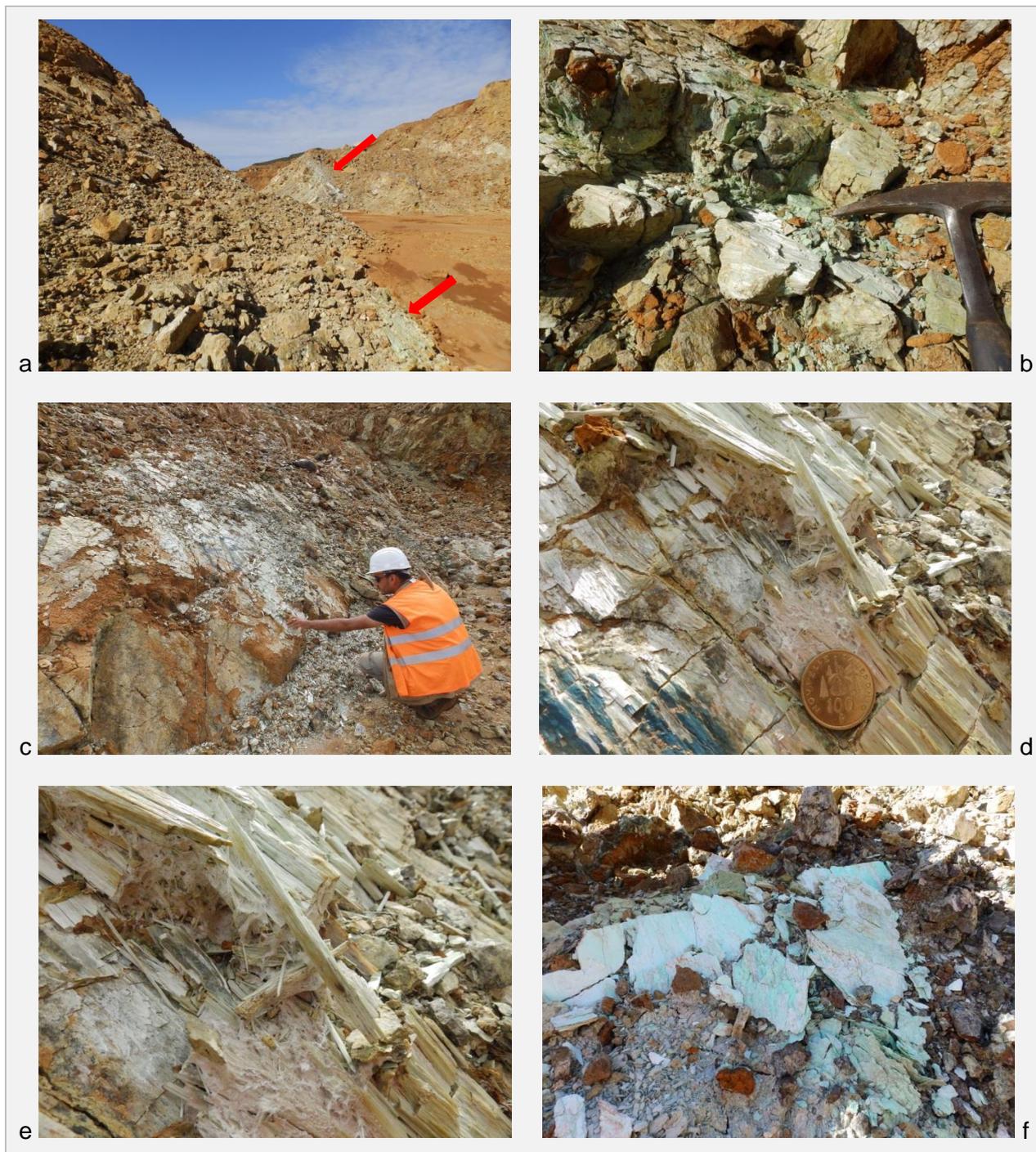


Figure 28 : Seconde structure observée au niveau du site NC595DL (a, b).
Même structure observée sur le site NC512DL (c à e).
Placage de doewellite observé sur la seconde structure (f).



Figure 29 : Vues de la masse de trémolite (1,20 m x 0,30 m) observée sur le site NC587DL.

2.4.3. Données structurales

Plusieurs structures fibreuses et fibro-lamellaires ont été mesurées au niveau de la fosse de Bonini et dans les environs immédiats de la fosse. Les données sont présentées dans le tableau ci-dessous (Figure 30).

Au niveau de la fosse de Bonini et de ses environs, les veines à antigorite mesurées sont majoritairement orientées selon une direction NE-SW à ENE-WSW (Figure 31). Une direction plus discrète, proche de la direction NW-SE, est également représentée dans les enregistrements (Figure 31). On notera que la direction E-W correspondant à celle des deux grandes structures qui contrôlent la géométrie de la fosse est au final peu représentée en dehors des structures elles-mêmes.

Les veines orientées NE-SW à ENE-WSW pendent tantôt vers le SE (à SSE), tantôt vers le NW (à NNW) d'un angle généralement moyen ($\sim 60^\circ$). La composante principale de l'ouverture de ces veines NE-SW à ENE-WSW est normale ou décrochante (dextre ou senestre), et ce quelle que soit la direction du pendage.

Les veines orientées NW-SE pendent très majoritairement vers le SW d'un angle très variable (entre 10 et 80°). La composante principale de l'ouverture de ces veines NW-SE est normale ou senestre.

Date	Affleurement	Epontes		Fibre minérale		Composantes de l'ouverture	
		Direction	Pendage	Azimuth	Plongement	Principale	Subordonnée
09/04/2015	NC589DL	2	86	90	10	Senestre	-
29/11/2013	NC213DL(2)	45	35	105	20	Senestre	<i>Inverse</i>
08/04/2015	NC581DL	80	40	61	11	Normale	<i>Senestre</i>
30/11/2013	NC508DL	120	89	210	50	Dextre	-
30/11/2013	NC510DL	125	88	35	0	Dextre	-
30/11/2013	NC508DL	125	75	40	35	Dextre	<i>Inverse</i>
02/12/2013	NC205DL(2)	135	20	165	15	Normale	<i>Dextre</i>
30/11/2013	NC508DL	140	45	50	0	Dextre	-
09/04/2015	NC590DL	140	90	230	37	Senestre	-
30/11/2013	NC508DL	140	45	140	45	Normale	-
30/11/2013	NC508DL	145	75	55	0	Dextre	-
30/11/2013	NC508DL	145	70	240	40	Senestre	<i>Inverse</i>
30/11/2013	NC509DL	150	55	100	20	Dextre	<i>Inverse</i>
30/11/2013	NC227DL(2)	150	80	215	40	Senestre	<i>Inverse</i>
30/11/2013	NC229DL(3)	150	55	190	30	Normale	<i>Dextre</i>
30/11/2013	NC229DL(3)	155	55	205	45	Dextre	<i>Normale</i>
30/11/2013	NC508DL	155	70	80	15	Senestre	<i>Normale</i>
08/04/2015	NC584DL	155	42	120	26	Inverse	<i>Senestre</i>
08/04/2015	NC582DL	157	55	210	40	Normale	<i>Dextre</i>
08/04/2015	NC582DL	157	50	222	20	Normale	<i>Dextre</i>
08/04/2015	NC585DL	165	42	155	41	Normale	-
30/11/2013	NC229DL(3)	165	50	105	30	Senestre	<i>Normale</i>
08/04/2015	NC582DL	173	52	250	20	Normale	<i>Dextre</i>
29/11/2013	NC213DL(2)	175	40	250	10	Dextre	<i>Normale</i>
01/12/2013	NC196DL(2)	180	50	180	50	Normale	-
01/12/2013	NC511DL	180	50	180	50	Normale	-
09/04/2015	NC593DL	180	56	114	36	Senestre	<i>Normale</i>
09/04/2015	NC591DL	183	30	130	11	Senestre	<i>Normale</i>
09/04/2015	NC593DL	187	65	128	36	Senestre	<i>Normale</i>
01/12/2013	NC511DL	190	45	270	10	Dextre	<i>Normale</i>
29/11/2013	NC502DL	195	60	115	50	Dextre	<i>Inverse</i>
29/11/2013	NC505DL	195	75	230	70	Inverse	<i>Senestre</i>
01/12/2013	NC196DL(2)	200	80	200	80	Normale	-
01/12/2013	NC511DL	200	80	200	80	Normale	-
07/04/2015	NC573DL	200	15	250	12	Senestre	<i>Inverse</i>
01/12/2013	NC511DL	200	60	160	45	Normale	<i>Senestre</i>
01/12/2013	NC196DL(2)	200	60	160	45	Normale	<i>Senestre</i>
01/12/2013	NC196DL(2)	205	55	140	30	Senestre	<i>Normale</i>
02/12/2013	NC205DL(2)	205	45	130	10	Senestre	<i>Normale</i>
29/11/2013	NC505DL	210	50	165	40	Senestre	<i>Normale</i>
29/11/2013	NC503DL	210	70	265	50	Senestre	<i>Inverse</i>
29/11/2013	NC503DL	210	70	290	15	Senestre	<i>Inverse</i>
01/12/2013	NC511DL	220	50	175	35	Senestre	<i>Normale</i>
09/04/2015	NC588DL	220	44	165	24	Senestre	<i>Normale</i>
01/12/2013	NC511DL	225	70	150	25	Senestre	<i>Normale</i>
01/12/2013	NC196DL(2)	225	70	150	25	Senestre	<i>Normale</i>
29/11/2013	NC505DL	265	40	265	40	Inverse	-
29/11/2013	NC213DL(2)	305	70	260	55	Senestre	<i>Normale</i>
09/04/2015	NC589DL	310	73	40	0	Senestre	-
29/11/2013	NC502DL	310	60	225	5	Senestre	<i>Normale</i>
09/04/2015	NC590DL	310	62	240	25	Senestre	<i>Normale</i>
09/04/2015	NC591DL	310	70	254	38	Senestre	<i>Normale</i>
30/11/2013	NC508DL	315	70	25	35	Dextre	<i>Normale</i>
09/04/2015	NC593DL	315	84	248	18	Dextre	<i>Inverse</i>
30/11/2013	NC510DL	320	55	20	25	Dextre	<i>Normale</i>
30/11/2013	NC510DL	320	55	20	25	Dextre	<i>Normale</i>
29/11/2013	NC213DL(2)	320	60	245	25	Senestre	<i>Normale</i>
30/11/2013	NC508DL	320	80	280	50	Normale	<i>Senestre</i>
09/04/2015	NC589DL	321	65	22	35	Senestre	<i>Inverse</i>
30/11/2013	NC508DL	325	80	350	55	Dextre	<i>Normale</i>
09/04/2015	NC588DL	325	75	240	21	Dextre	<i>Inverse</i>
29/11/2013	NC502DL	325	25	270	5	Senestre	<i>Normale</i>
29/11/2013	NC213DL(2)	330	45	60	0	Dextre	-
29/11/2013	NC502DL	330	15	275	10	Dextre	<i>Inverse</i>
09/04/2015	NC586DL	330	75	245	4	Senestre	<i>Normale</i>
09/04/2015	NC586DL	340	84	361	35	Senestre	<i>Normale</i>
30/11/2013	NC508DL	345	88	75	0	Senestre	-
30/11/2013	NC509DL	345	60	45	45	Dextre	<i>Normale</i>
09/04/2015	NC588DL	345	65	70	3	Senestre	<i>Inverse</i>
29/11/2013	NC502DL	350	40	270	10	Senestre	<i>Normale</i>
30/11/2013	NC508DL	350	65	280	40	Senestre	<i>Normale</i>

Figure 30 : Compilation des données structurales enregistrées dans la fosse de Bonini et dans les environs immédiats de la fosse. Les principales familles sont soulignées en vert.

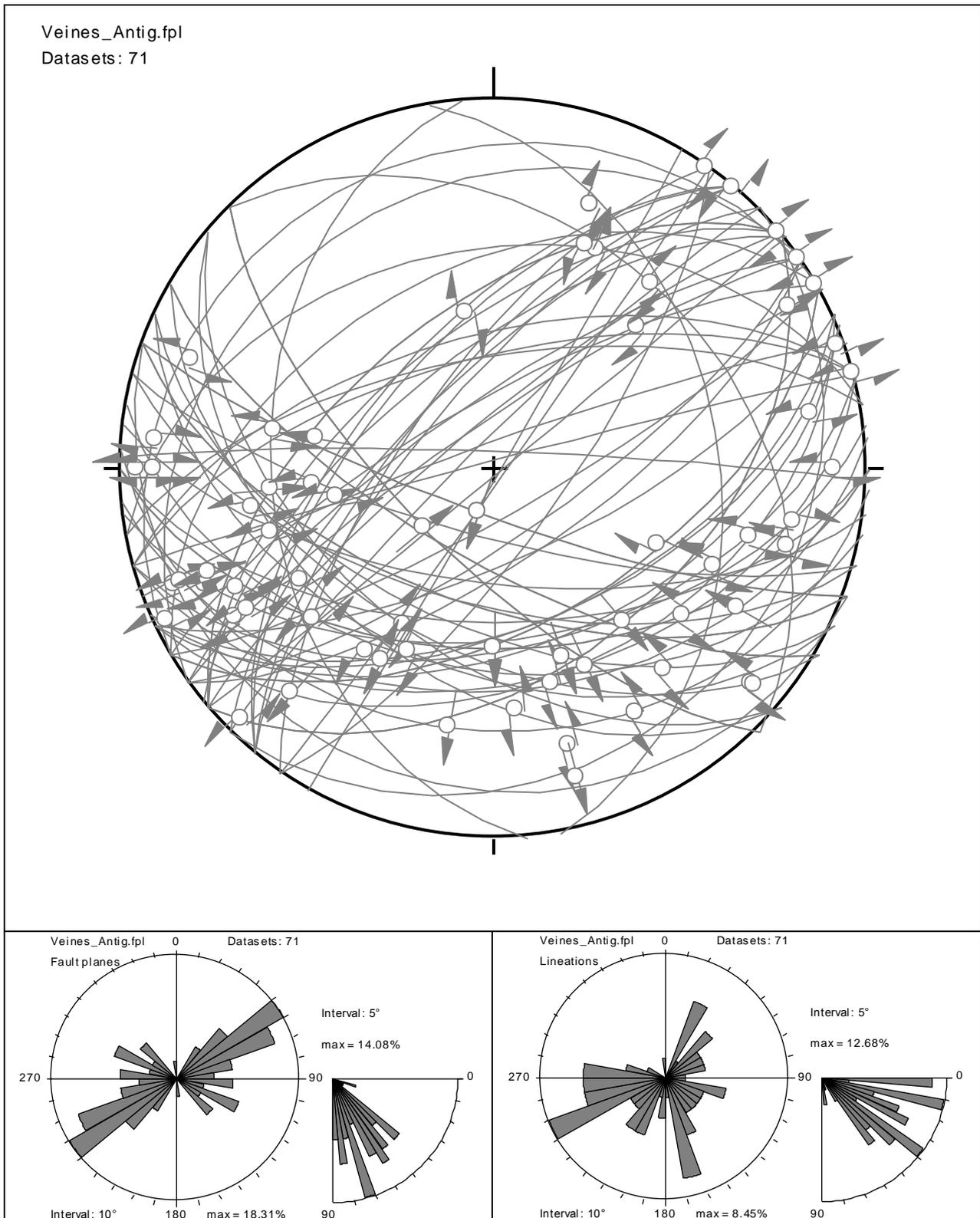


Figure 31 : Traces des épontes des veines et des fibres d'antigorite (a).
Direction et pendage des plans correspondant aux épontes des veines à antigorite (b).
Direction et inclinaison des fibres d'antigorite (c).

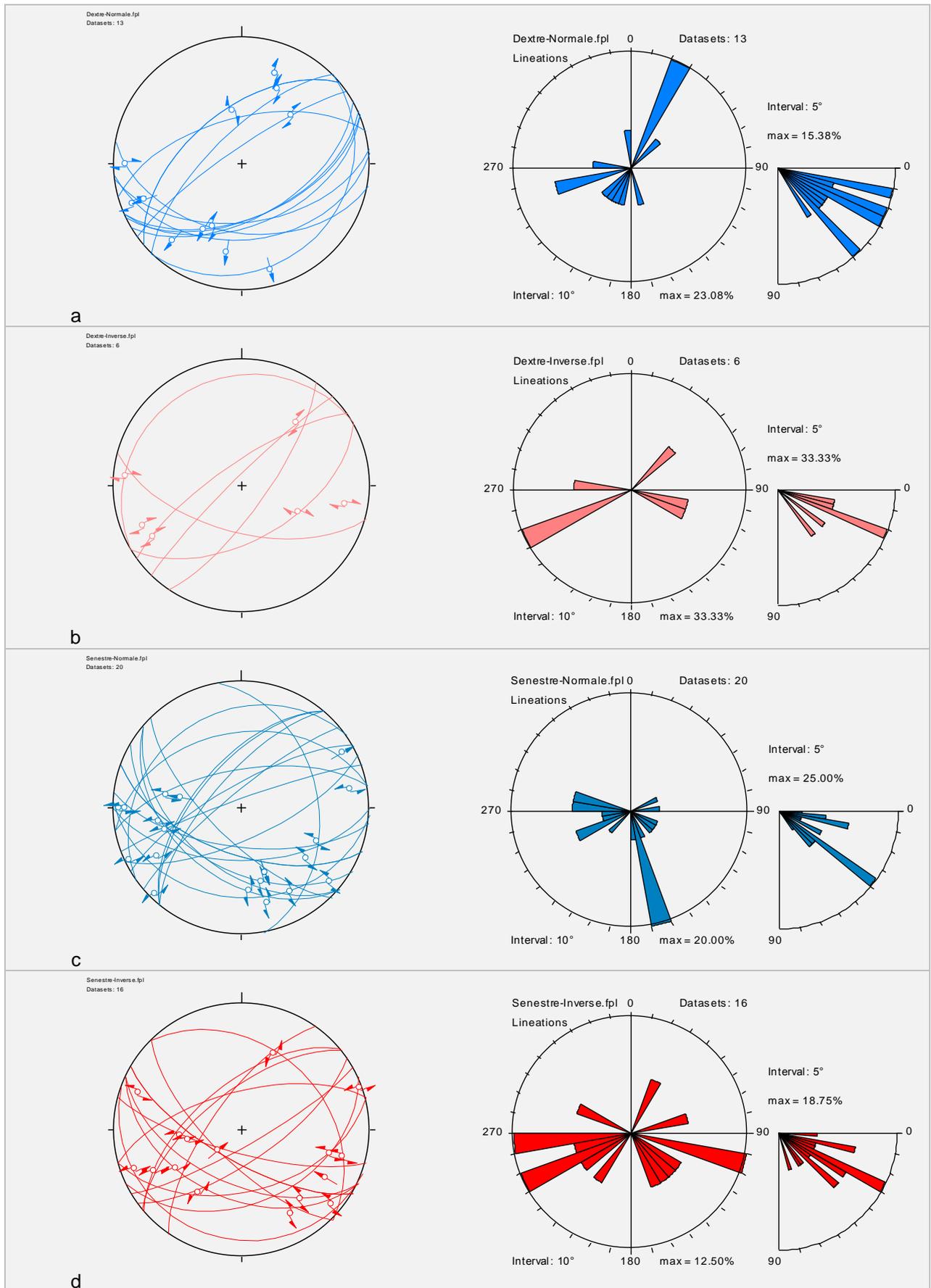


Figure 32 : Traces des épontes et direction des cristallisations fibro-lamellaires correspondantes pour les veines à antigorite caractérisées par des ouvertures « dextres » et « senestres ».

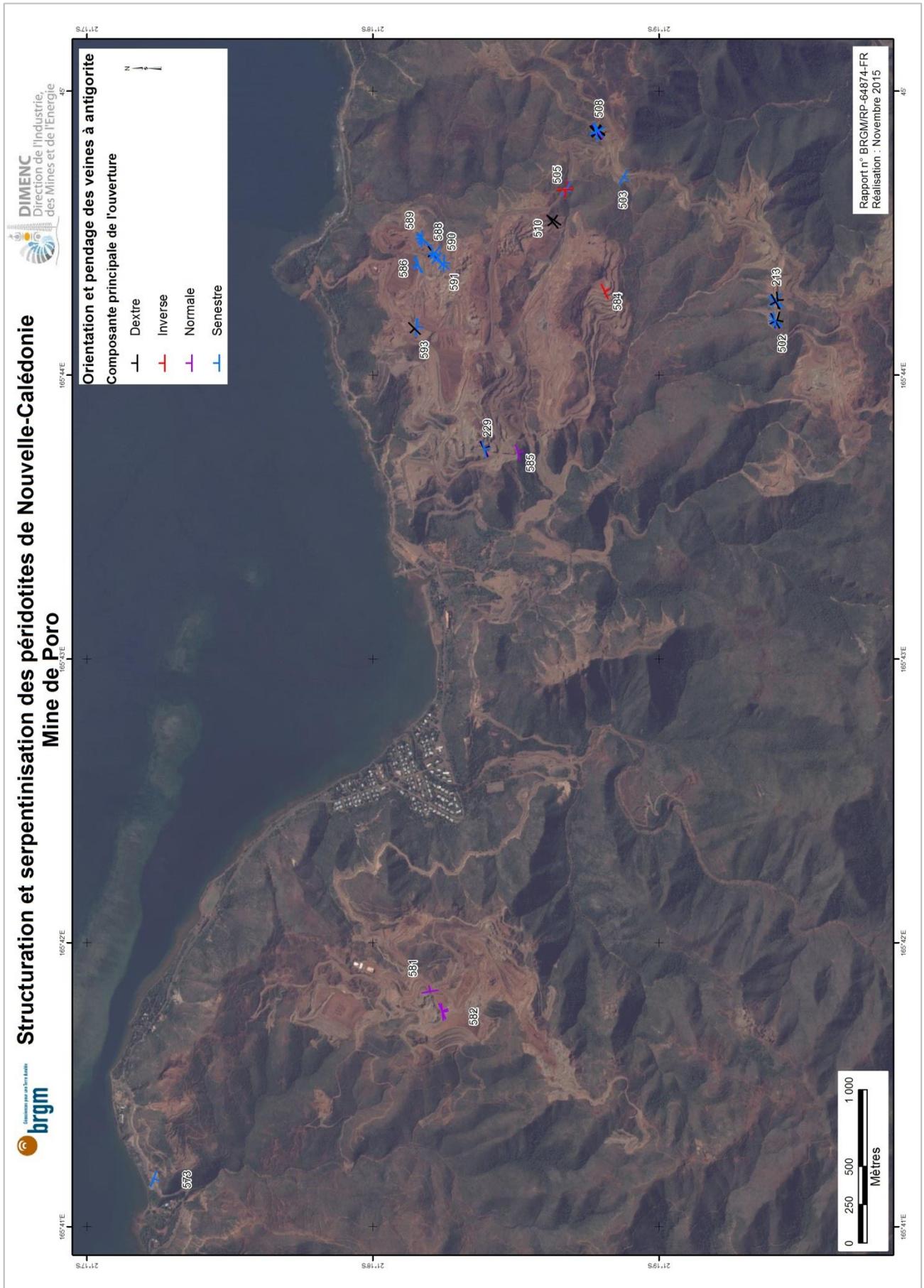


Figure 33 : Localisation des principaux sites étudiés dans le secteur de Poro.

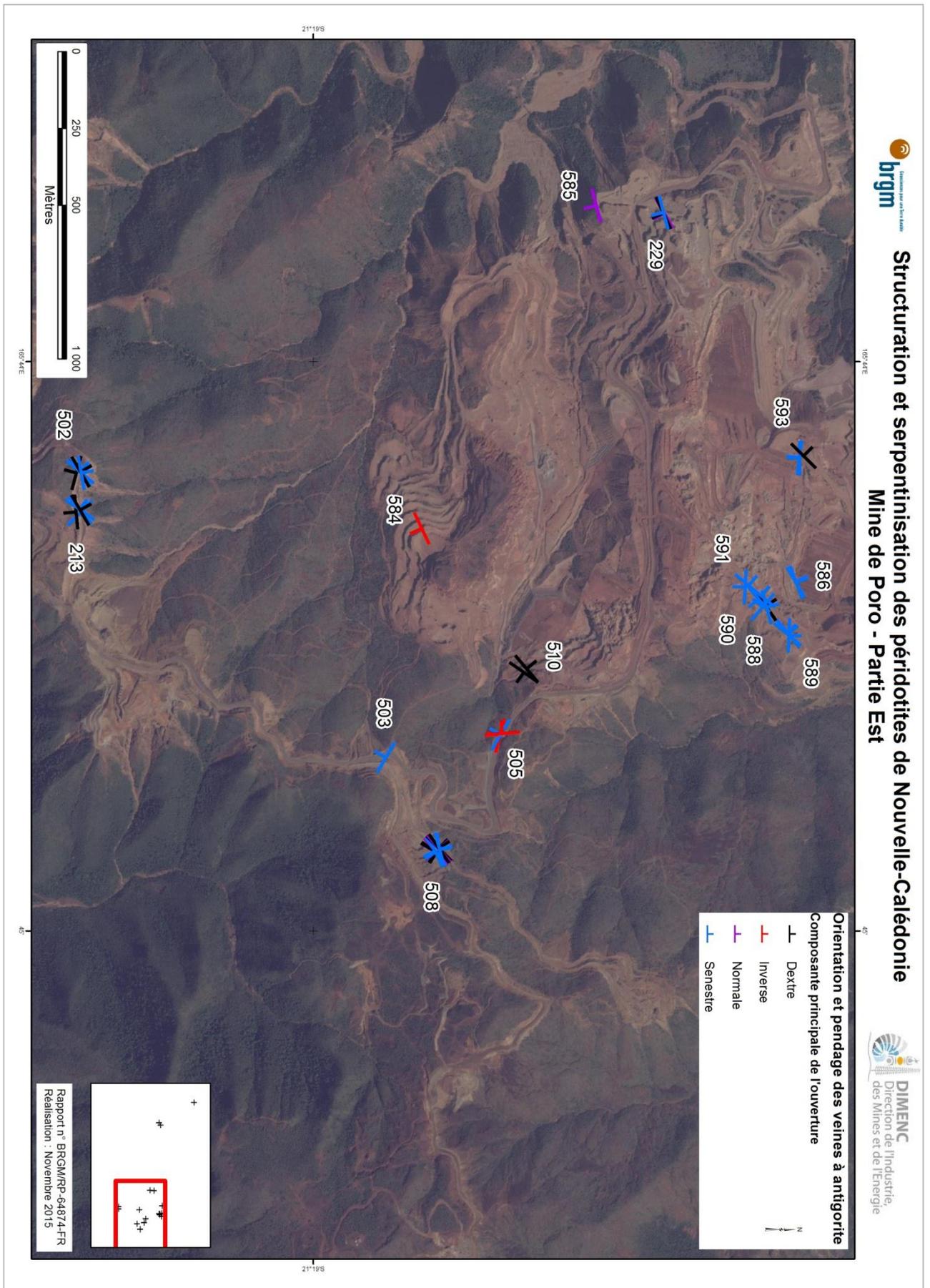


Figure 34 : Localisation des principaux sites étudiés dans le secteur de Poro-Bonini.

3. Analyse minéralogique et cristallographique

3.1. TECHNIQUES ANALYTIQUES

Dans le but de préciser la morphologie et la nature des fibres étudiées, des échantillons ont fait l'objet d'analyses par spectroscopie Raman et/ou par microscopie électronique à balayage (MEB). Une synthèse des résultats obtenus est présentée ci-dessous (Figure 35).

3.1.1. Analyses par spectroscopie Raman

Plusieurs études récentes ont utilisé la spectroscopie RAMAN pour distinguer les différents types de serpentine en fonction de leurs propriétés structurales et des spectres de référence ont été proposés (Lemaire, 2000 ; Auzende, 2003 ; Rinaudo et Gastaldi, 2003 ; Auzende et *al.*, 2004 ; Groppo et *al.*, 2006).

Les pics de basse fréquence (bf) obtenus permettent de différencier d'une manière assez simple l'antigorite des autres serpentines, grâce à sa raie caractéristique à 1044 cm^{-1} et à la position autour de $370/375\text{ cm}^{-1}$ du pic $\nu_5(\text{e})\text{SiO}_4$.

Pour différencier les autres serpentines entre elles, il apparaît plus pertinent d'analyser également la position des pics de haute fréquence (hf). La lizardite possède un pic hf très important à 3684 cm^{-1} et un second, moins marqué, autour de 3704 cm^{-1} . Le chrysotile présente une bande unique entre 3695 et 3700 cm^{-1} , précédé d'un pic peu important mais identifiable à 3651 cm^{-1} . Pour l'antigorite, les pics hf sont décalés entre 3665 et 3670 cm^{-1} et entre 3697 et 3700 cm^{-1} . La serpentine polygonale se caractérise pour sa part par un pic « composite » associant deux fréquences très proches (3689 cm^{-1} et 3696 cm^{-1}).

Le système utilisé dans le cadre de cette étude est un spectromètre Raman Renishaw InVia Reflex utilisant 3 sources d'excitation laser à $514,5$, $632,8$ et 785 nm .

Le faisceau laser est focalisé sur l'échantillon à travers un microscope de recherche Leica DM2500 spécialement adapté au système et doté de 4 objectifs Nplan [x5, x20, x50 (Ouverture Numérique = 0.75), x100 (ON=0.90)], 1 objectif longue frontale (x50LW), 2 bagues d'adaptation pour objectifs Olympus, un dispositif d'illumination en réflexion, un éclairage en lumière transmise et une caméra vidéo couleur.

La diffusion Rayleigh est éliminée grâce aux filtres diélectriques. Le signal Raman est ensuite dispersé à l'aide d'un réseau holographique et mesuré par un détecteur CCD NIR/UV deep depletion 1024×256 pixels refroidi par effet Peltier.

L'obtention de spectres de qualité exige que les paramètres d'acquisition (temps d'acquisition, nombre d'accumulation et fenêtre spectrale) soient bien ajustés.

La durée d'obtention d'un spectre est courte et varie de 40s au minimum à quelques minutes. Cette durée dépend du matériel à analyser et de sa qualité.

Afin d'améliorer les signaux, il est possible de faire varier le nombre d'accumulations (nombre d'acquisition par analyse) sans modifier la puissance du laser. Le nombre d'acquisition varie dans cette étude, de 1 à 2 accumulations.

Afin d'avoir les informations complètes sur les matériaux analysés, les spectres ont été acquis en utilisant une gamme spectrale centrée à 1000 cm^{-1} environ couvrant les basses fréquences (bf) de 100 à 2000 cm^{-1} et une gamme centrée à 3200 cm^{-1} couvrant les hautes fréquences (hf) de 2500 à 4000 cm^{-1} .

Structuration et serpentinisation des péridotites de Nouvelle-Calédonie

Site	Echantillon	Type d'échantillon	MOLP	RAMAN	MEB-EDS
Mine de Vulcaïn	NC467DL(2)	Plan fibreux			X Anthophyllite
Mine de Poro-Bonini	NC512DL(2)	Plan fibreux		X Trémolite	X Trémolite
Mine d'Opoué	NC533DL-A	Dunite peu serpentinisée, à veinules sombres à lizardite ± chrysotile	X		
Mine d'Opoué	NC533DL-B	Harzburgite peu serpentinisée	X		
Mine d'Opoué	NC534DL	Dunite peu serpentinisée, à veinules sombres à lizardite ± chrysotile	X		
Mine de Vulcaïn	NC543DL-B1	Veine à antigorite, à fibres d'apparence asbestiforme		X Chrysotile	
Mine de Vulcaïn	NC543DL-B2	Fibres isolées issues d'une veine à antigorite altérée		X Chrysotile	X Chrysotile
Mine de Vulcaïn	NC544DL-C	Amas fibreux (antigorite-amiante ?)		X Antigorite	X Antigorite
Mine de Vulcaïn	NC545DL	Veine à antigorite, à épontes blanches	X		
Mine de Vulcaïn	NC546DL	Veine à chrysotile verdâtre, associée à une veine à antigorite	X	X Chrysotile	X Chrysotile
Mine de Vulcaïn	NC546DL-B1	Fibres rigides se fragmentant en aiguilles		X Antigorite	
Mine de Vulcaïn	NC546DL-B2	Fibres asbestiformes associées à une veine à antigorite		X Antigorite	X Antigorite
Mine de Vulcaïn	NC546DL-C	Veine à antigorite, à épontes blanches	X		
Mine de Vulcaïn	NC549DL	Plan serpentineux à longues fibres rigides nacrées		X Chrysotile	
Mine de Vulcaïn	NC549DL-B	Fibres issues d'une veine à antigorite		X Chrysotile	
Mine de Vulcaïn	NC550DL-B	Amas fibreux (antigorite-amiante ?)		X Antigorite	X Antigorite
Mine de Vulcaïn	NC550DL-C1	Fibres rigides isolées issues d'une veine à antigorite		X Chrysotile	X Antigorite/Chrysotile
Mine de Vulcaïn	NC550DL-C2	Fibres asbestiformes isolées issues d'une veine à antigorite		X Chrysotile	X Chrysotile
Mine de Vulcaïn	NC550DL-D	Fibres isolées issues d'un plan fibreux		X Antigorite	X Anthophyllite ?
Mine de Vulcaïn	NC550DL-E	Veine noire, à cristallisations fibro-lamellaires en position centrale	X		
Mine de Vulcaïn	NC550DL-F	Veine à antigorite, à épontes blanches	X		
Mine de Vulcaïn	NC551DL	Fibres souples préservées dans la latérite		X Antigorite	X Antigorite
Mine de Vulcaïn	NC551DL-C	Fibres souples préservées dans la latérite		X Chrysotile	X Antigorite
Mine de Vulcaïn	NC552DL	Amas fibreux (antigorite-amiante ?)		X Chrysotile	X Antigorite
Mine de Sireis	NC553DL-A	Filon de trémolite	X		
Mine de Sireis	NC553DL-B	Filon de trémolite	X		
Mine de Sireis	NC553DL-C	Trémolite-amiante associée à filon de trémolite		X Trémolite	
Mine de Sireis	NC555DL-A	Filon de microdiorite (?)	X		
Mine de Sireis	NC555DL-B	Serpentine à chrysotile (de type semelle)	X		
Mine de Sireis	NC558DL-A	Dunite peu serpentinisée, à veinules sombres à lizardite (± chrysotile ?)	X		
Mine de Sireis	NC559DL-A	Fibres rigides		X Trémolite	
Mine de Sireis	NC559DL-B	Fibres asbestiformes isolées		X Trémolite	X Anthophyllite
Mine de Sireis	NC561DL	Fibres asbestiformes isolées		X Trémolite	X Anthophyllite
Poro (route côtière)	NC571DL	Filon de trémolite (+ antigorite ?)	X		
Poro (route côtière)	NC572DL	Filon de trémolite (+ antigorite ?)	X		
Poro	NC574DL	Veine à antigorite, plissée		X Chrysotile	
Poro	NC575DL	Amas fibreux (antigorite-amiante ?)		X Antigorite	X Antigorite
Mine de Poro	NC576DL-A	Veine de trémolite	X		
Mine de Poro	NC576DL-B	Veine de trémolite (+ antigorite ?)	X		
Mine du CFTMC	NC579DL	Plan fibreux		X Antigorite	
Mine du CFTMC	NC581DL-A	Plan fibreux	X		
Mine du CFTMC	NC581DL-B	Fibres asbestiformes isolées		X Antigorite	X Trémolite
Mine du CFTMC	NC582DL-C1	Plan fibreux		X Antigorite	
Mine du CFTMC	NC582DL-D1	Veine de trémolite	X		
Mine du CFTMC	NC582DL-D2	Veine à antigorite (+ trémolite ?)	X		
Mine du CFTMC	NC582DL-D3	Veine de trémolite à chromite	X		
Poro	NC584DL	Fibres asbestiformes isolées		X Trémolite	X Trémolite
Poro	NC585DL	Fibres asbestiformes isolées		X Trémolite	X Trémolite
Mine de Poro-Bonini	NC587DL	Fibres prélevées dans une veine à antigorite		X Antigorite	
Mine de Poro-Bonini	NC588DL-A	Veine de trémolite	X		
Mine de Poro-Bonini	NC592DL	Veine à chrysotile		X Chrysotile	X Chrysotile
Mine de Poro-Bonini	NC593DL-A	Veine à antigorite altérée		X Antigorite	X Antigorite
Mine de Poro-Bonini	NC593DL-B	Veine à chrysotile	X	X Chrysotile	X Chrysotile
Mine de Poro-Bonini	NC594DL	Péridotite peu serpentinisée, à veinules sombres à lizardite ± chrysotile	X		
Mine de Poro-Bonini	NC595DL-A	Plan fibreux repris par plan à doewellite		X Trémolite	
Mine de Poro-Bonini	NC595DL-B	Fibres isolées issues d'un plan à fibres asbestiformes		X Antigorite	X Antigorite

Figure 35 : Tableau de synthèse des analyses réalisées.

3.1.2. Analyses par microscopie électronique à balayage

Vingt-trois échantillons ont fait l'objet d'analyses par microscopie électronique à balayage (MEB). Les caractéristiques de l'équipement utilisé et les procédures analytiques sont les suivantes :

Microscopie Electronique à Balayage (MEB) : L'échantillon est dispersé manuellement sur un adhésif conducteur, puis il est recouvert d'un dépôt conducteur par évaporation de carbone pour l'observation par microscopie électronique à balayage (MEB JEOL JSM-6100) et microanalyse par spectrométrie de rayons X (EDS NORAN QUEST), à HV = 25. Des images en électrons secondaires (SE) sont réalisées pour chaque échantillon à des grossissements adaptés, et des analyses EDS sont effectuées.

3.2. RESULTATS DES ANALYSES

3.2.1. Mine de Vulcain

Des spectres de chrysotile ont été obtenus par spectroscopie RAMAN à partir des échantillons NC543DL-B1 & B2, NC546DL, NC549DL, NC549DL-B, NC550DL-C1 & C2, NC551DL-C et NC552DL, des spectres d'antigorite à partir des fibres des échantillons NC544DL-C, NC546DL-B1 & B2, NC550DL-B & D et NC551DL (Figure 35).

Les fibres correspondant aux échantillons NC543DL-B1 & B2 ont été prélevées sur la piste d'accès à la mine de Vulcain, au niveau d'une veine à antigorite très altérée (Figure 7). Ces fibres étaient très étroitement associées à des lattes verdâtres d'antigorite d'aspect plus rigide. La morphologie très clairement asbestiforme de ces fibres a été contrôlée par microscopie électronique (Figure 36) (cf. Annexe 2).

Les fibres de l'échantillon NC546DL sont issues d'une veine verdâtre d'épaisseur centimétrique observée dans une grosse veine à antigorite, entre une éponte serpentineuse blanche et les lattes fibro-lamellaires en position centrale (Figure 9). Dans cette veine centimétrique, les fibres étaient disposées perpendiculairement aux épontes (cross-fiber). La morphologie très clairement asbestiforme de ces fibres a également été contrôlée par microscopie électronique (Figure 36).

L'échantillon NC549DL a été prélevé dans la mine de Vulcain, au niveau d'un grand plan serpentineux nacré à valeur de mur (Figure 10), et correspond à des fibres de longueur pluricentimétrique. Des spectres de chrysotile ont été enregistrés à partir de ces fibres et dans un échantillon prélevé quelques mètres au-dessus de ce mur, au niveau d'une veine à antigorite (NC549DL-B).

Les échantillons NC550DL-C1 & C2 ont été prélevés dans une veine fibreuse (slip-vein) dans laquelle avaient été reconnues des fibres d'aspect rigide (C1) et des fibres asbestiformes (C2) (Figure 10). Des spectres « composites » (antigorite/chrysotile) et de chrysotile ont été obtenus, respectivement à partir des fibres des échantillons C1 et C2. La morphologie asbestiforme de ces fibres a été confirmée par microscopie électronique (Figure 37).

L'échantillon NC551DL-C correspond à des fibres d'apparence souple, prélevées au niveau d'une veine à antigorite très altérée (Figure 11). On notera cependant que sur les images obtenues par microscopie électronique (cf. infra), les fibres observées possèdent une morphologie plus aciculaire qu'asbestiforme (antigorite ?). Des résultats similaires ont été acquis à partir des fibres correspondant à l'échantillon NC552DL, pour lesquelles des spectres caractéristiques du chrysotile ont été obtenus alors que les images réalisées par microscopie électronique révèlent des morphologies plutôt aciculaires.

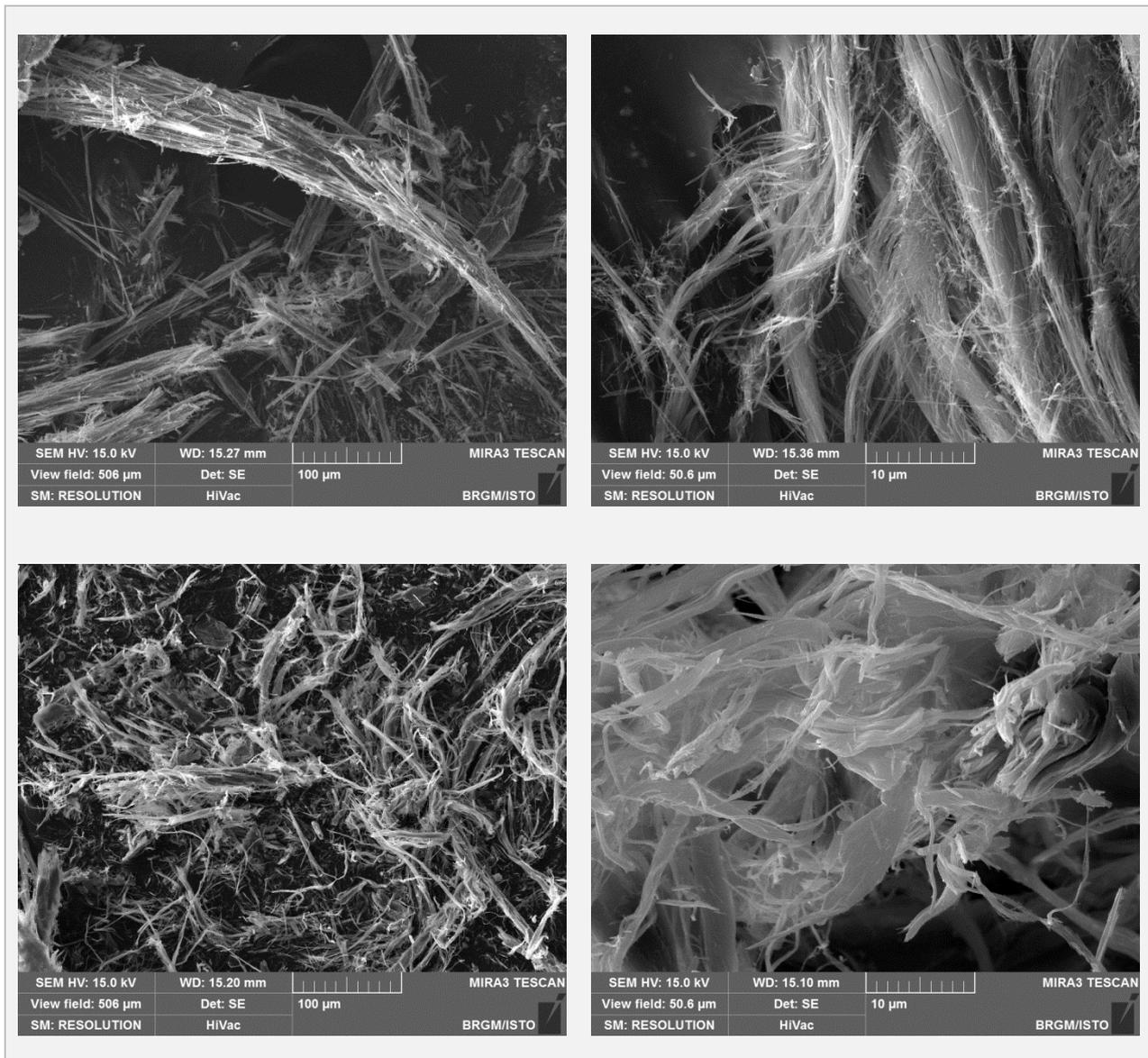


Figure 36 : Images MEB obtenues à partir des fibres de chrysotile des échantillons NC543DL-B2 (Haut) et NC546DL (Bas).

Les fibres correspondant à l'échantillon NC544DL-C ont été prélevées dans un amas microfibreux issu de l'altération d'une veine à antigorite (« *antigorite-amiante* ») (Figure 8). Sur les images acquises par microscopie électronique, les particules observées présentent une morphologie fibreuse non asbestiforme (Figure 38) mais dont les dimensions répondent très souvent aux critères d'une fibre inhalable au sens de l'OMS.

Les fibres des échantillons NC546DL-B1 et NC546DL-B2 correspondent respectivement à des fibres d'antigorite rigides, à morphologie aciculaire, et à des fibres d'apparence asbestiforme (« *antigorite-amiante* »). Sur les images acquises par microscopie électronique, les fibres de l'échantillon NC546DL-B2 ne possèdent pas une morphologie asbestiforme. Il s'agit de fibres rectilignes, très fines ($D \ll 3 \mu\text{m}$), à rapport d'allongement généralement élevé ($L/D \gg 3$) (Figure 39). Des caractéristiques dimensionnelles très comparables ont été observées pour les fibres des autres échantillons analysés au microscope électronique à balayage (Figure 39).

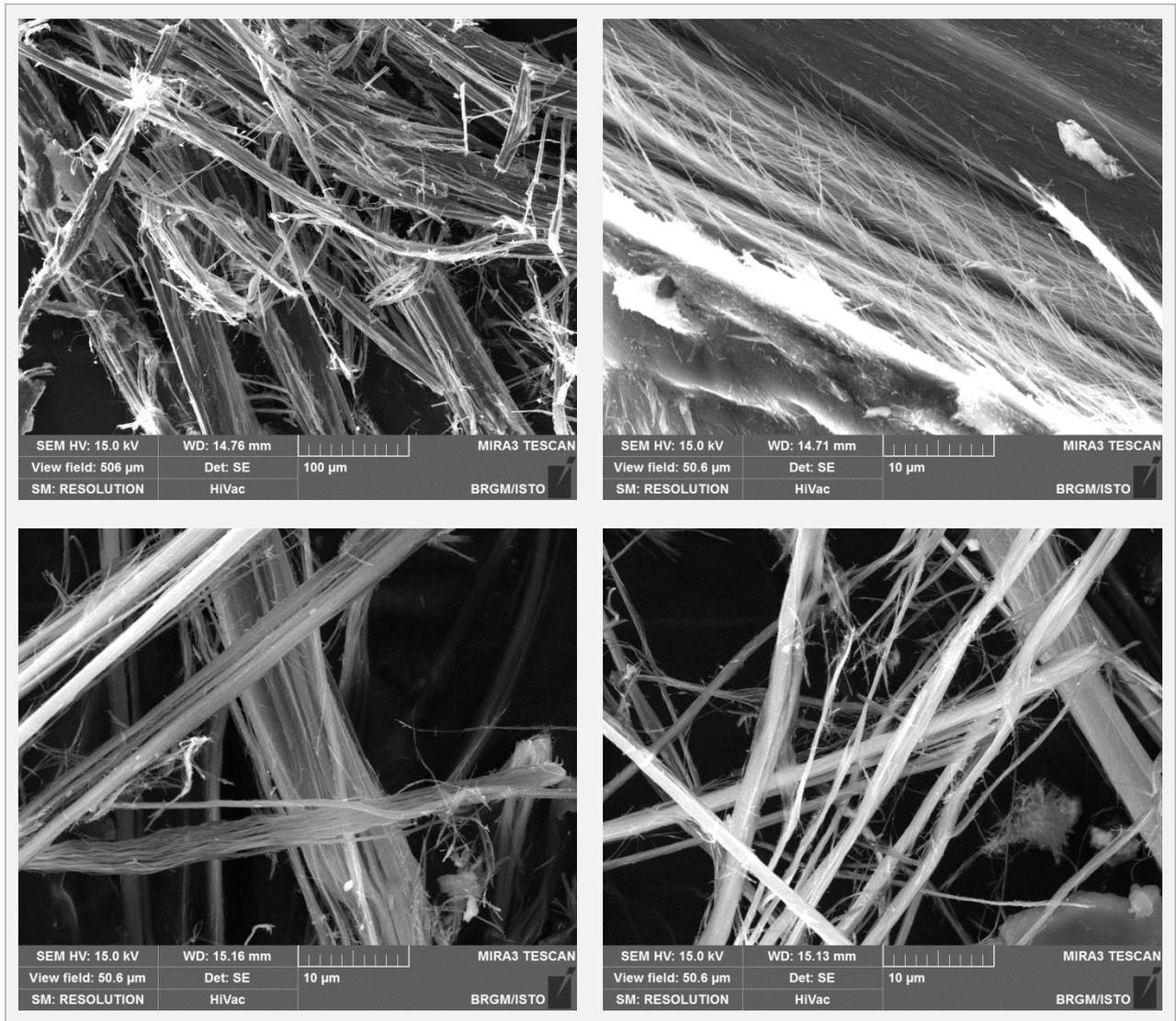


Figure 37 : Images MEB obtenues à partir des fibres de chrysotile des échantillons NC550DL-C1 (Haut) et NC550DL-C2 (Bas).

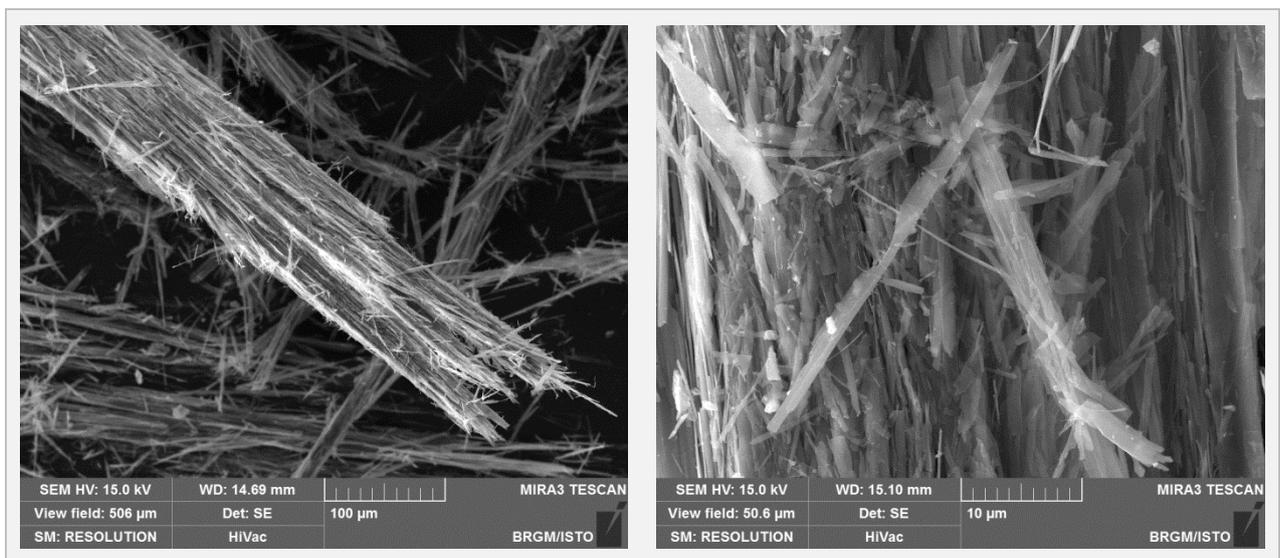


Figure 38 : Morphologie des particules fibriformes d'antigorite observées dans l'échantillon NC544DL-C.

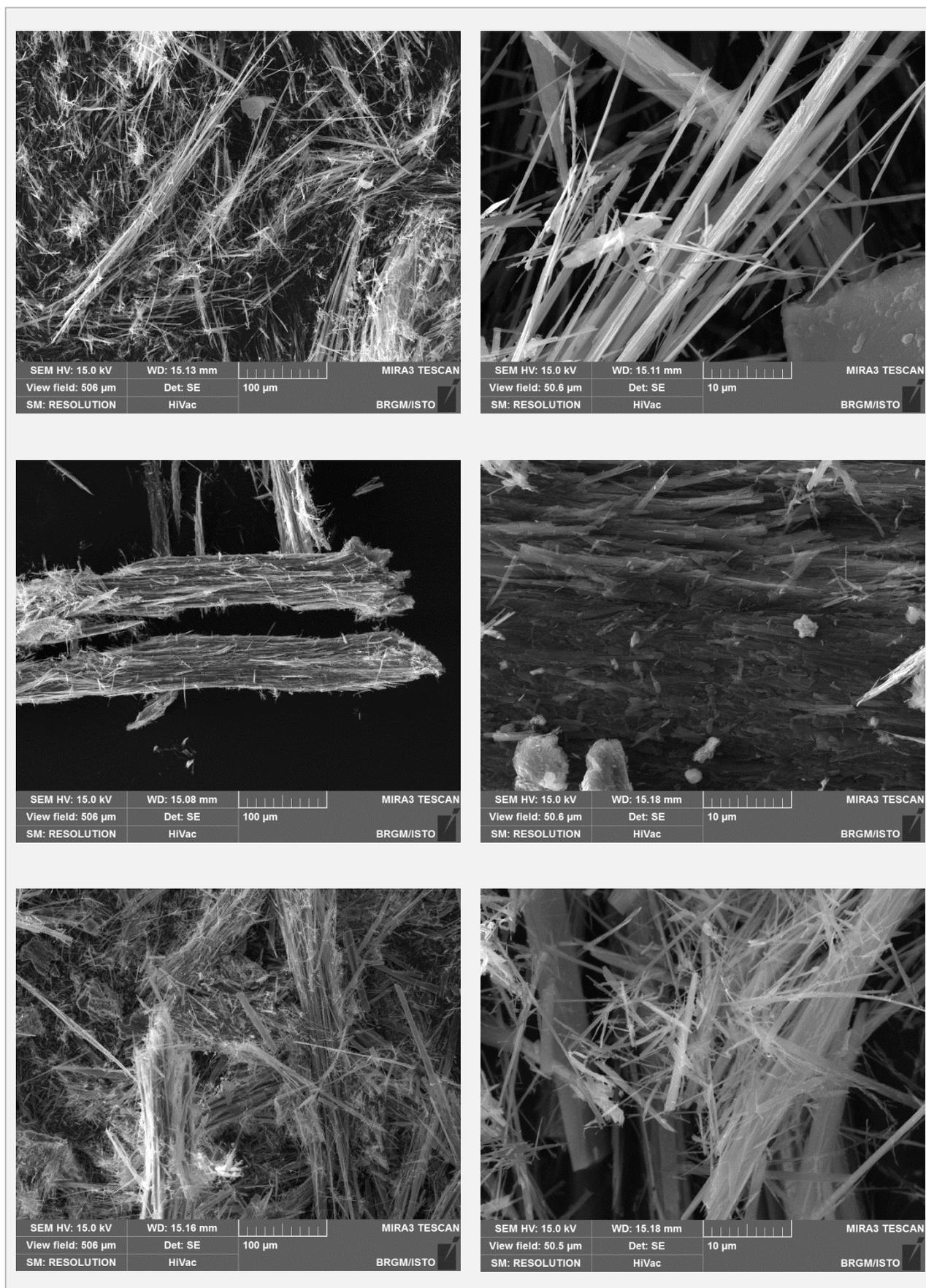


Figure 39 : Morphologie des particules fibriformes d'antigorite observées dans les échantillons NC546DL-B2 (Haut), NC550DL-B (Centre) et NC551DL (Bas).

3.2.2. Mines de Poro et du CFTMC

Pour le secteur de Poro, des spectres de chrysotile ont été obtenus à partir des échantillons NC574DL, NC592DL et NC593DL-B, des spectres d'antigorite à partir des fibres des échantillons NC575DL, NC579DL, NC581DL-B, NC582DL-C1, NC587DL, NC593DL-A NC595DL-B (Figure 35).

Des spectres correspondant à des amphiboles de type trémolite ont été enregistrés à partir des fibres des échantillons NC584DL, NC585DL et NC595DL-A (Figure 35).

Les fibres de chrysotile de l'échantillon NC574DL ont été prélevées au niveau d'une veine à antigorite plissée et *pro parte* reprise par des accidents siliceux.

Les fibres de chrysotile de l'échantillon NC592DL ont été prélevées en bordure de la piste menant à la fosse de Bonini, dans une veine centimétrique associée à des veines serpentineuses sombres orientées N055 N75 (Figure 40).

Les fibres de chrysotile correspondant à l'échantillon NC593DL-B ont été prélevées au niveau de la structure qui forme le mur du gisement de Bonini (Figure 40).

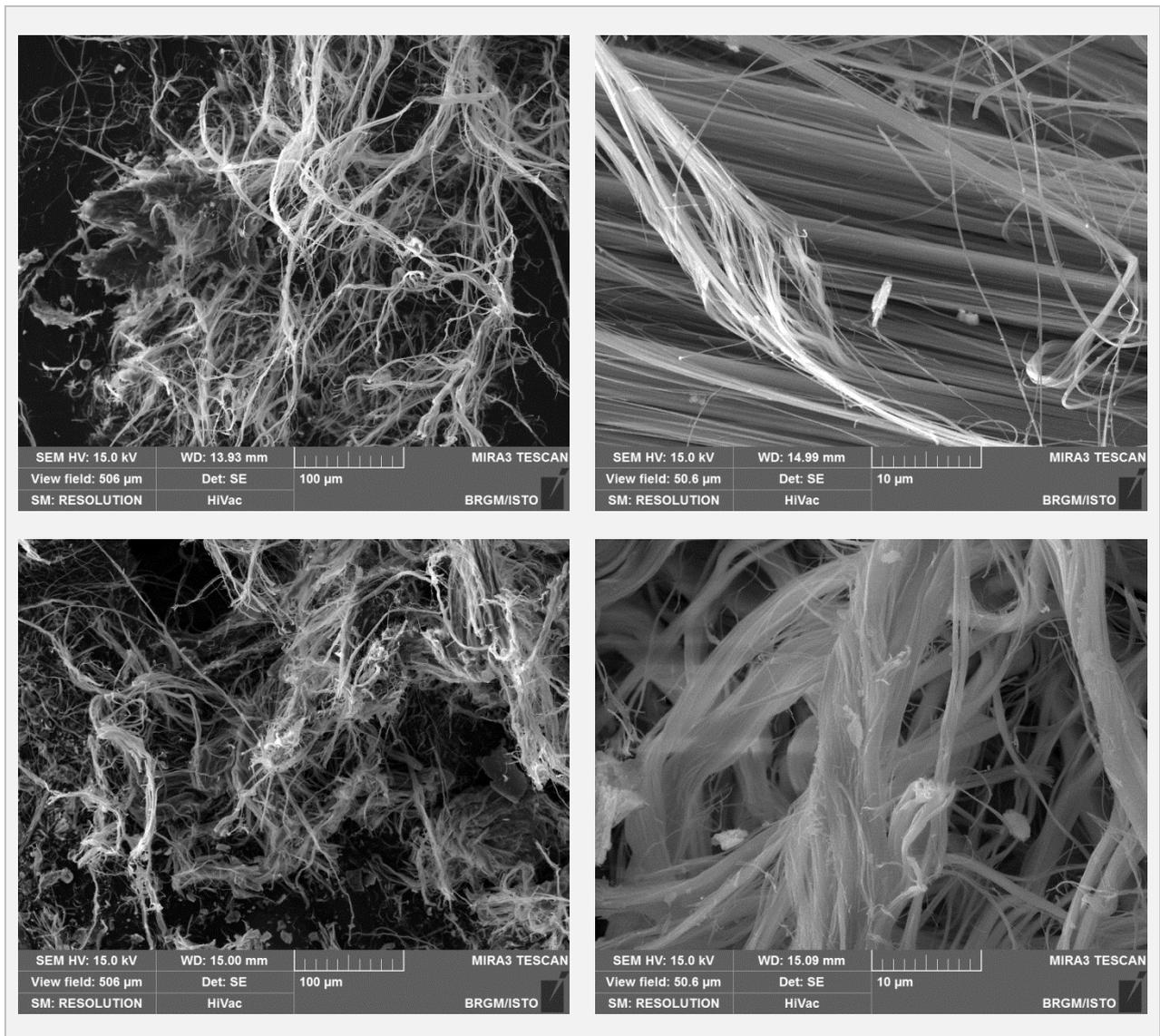


Figure 40 : Images MEB obtenues à partir des fibres de chrysotile des échantillons NC592DL (Haut) et NC593DL-B (Bas).

Les fibres de l'échantillon NC575DL proviennent d'un amas fibreux issu de l'altération d'une veine à antigorite (« *antigorite-amiante* ») (Figure 41).

Les fibres d'antigorite correspondant à l'échantillon NC595DL-B ont été prélevées au niveau de la seconde structure qui contrôle le gisement de Bonini (Figure 28). Il s'agit d'une veine à antigorite (slip-vein) parallèle à des plans porteurs de fibres asbestiformes de trémolite. En microscopie optique, les fibres de cet échantillon apparaissent très fines ($D \ll 3 \mu\text{m}$) et sont pour les unes rectilignes et pour les autres courbes, ces dernières correspondant aux fibres les plus fines ($D < 0,5 \mu\text{m}$) (Figure 41).

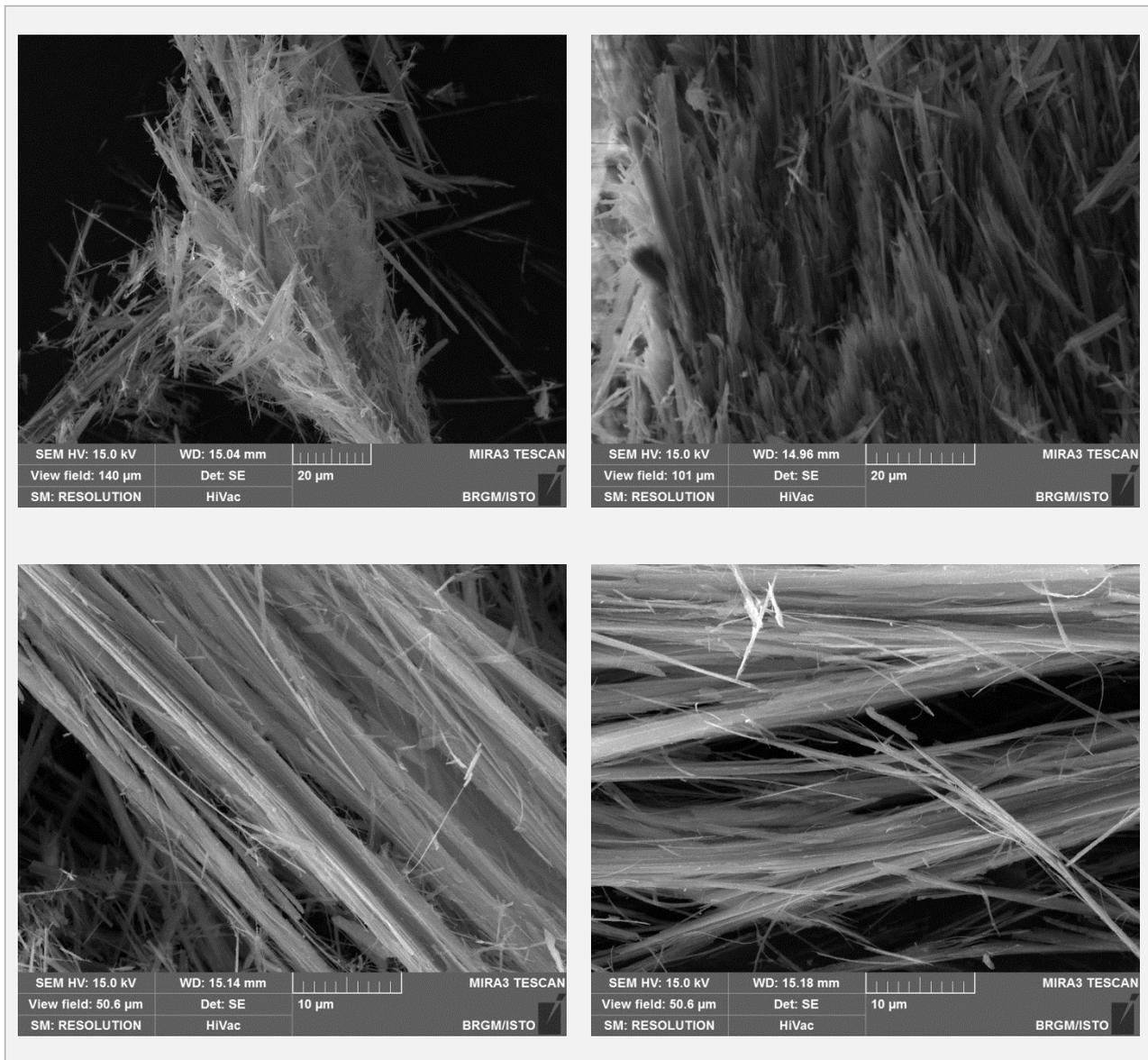


Figure 41 : Images MEB obtenues à partir des fibres d'antigorite des échantillons NC575DL (Haut) et NC595DL-B (Bas).

Des spectres RAMAN correspondant à des amphiboles trémolitiques ont également été obtenus à partir des fibres des échantillons NC584DL et NC585DL (Figure 35). Les images acquises par microscopie électronique montrent que ces fibres de trémolite sont très fines, parfois organisées en faisceaux, et caractérisées par un rapport d'allongement toujours très élevé ($L/D \gg 20$) (Figure 42). Les fibres sont généralement rectilignes, à l'exception des plus fines d'entre elles qui sont souvent courbes (Figure 42).

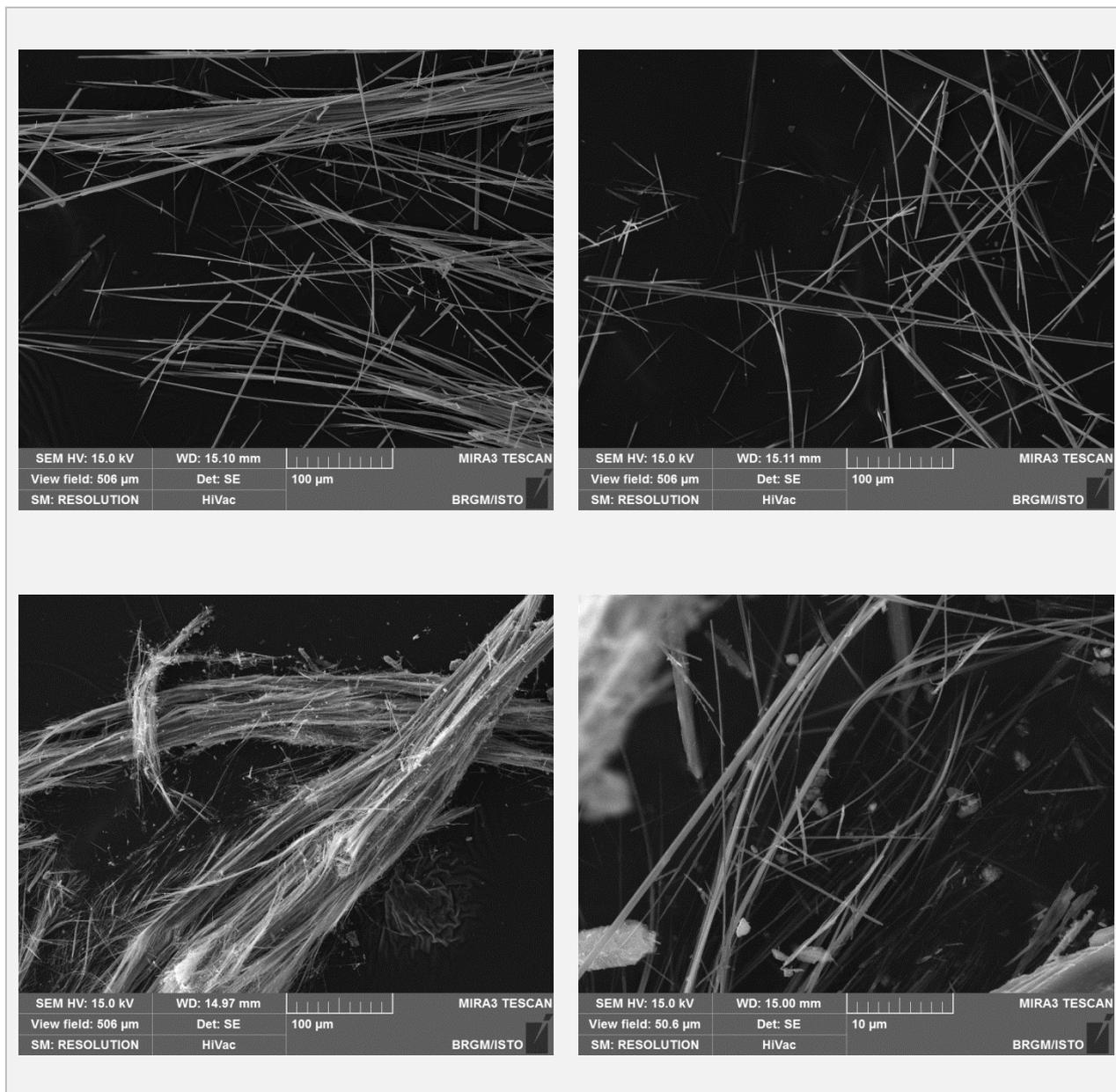


Figure 42 : Morphologie des fibres de trémolite observées dans les échantillons NC584DL et NC585DL.

Un échantillon en particulier a retenu l'attention. Il s'agit de l'échantillon NC581DL-B, prélevé sur le site du CFTMC, au niveau d'un site préalablement reconnu par l'exploitant comme étant amiantifère. La structure échantillonnée correspond à une veine (slip-vein) dans laquelle des lattes rigides (antigorite ?) coexistaient avec des fibres asbestiformes (trémolite-amiante ?). Les données obtenues par spectroscopie RAMAN ont conduit à la caractérisation d'antigorite, les données acquises par microscopie électronique à l'identification de fibres de trémolite. Dans le but de mieux caractériser cette association, une cartographie multi-élémentaire a été faite sur une portion d'une lame mince taillée dans la structure. Les résultats de cette cartographie permettent d'illustrer l'imbrication très étroite – cogénétique – entre les lattes d'antigorite et les fibres de trémolite (Figure 43).

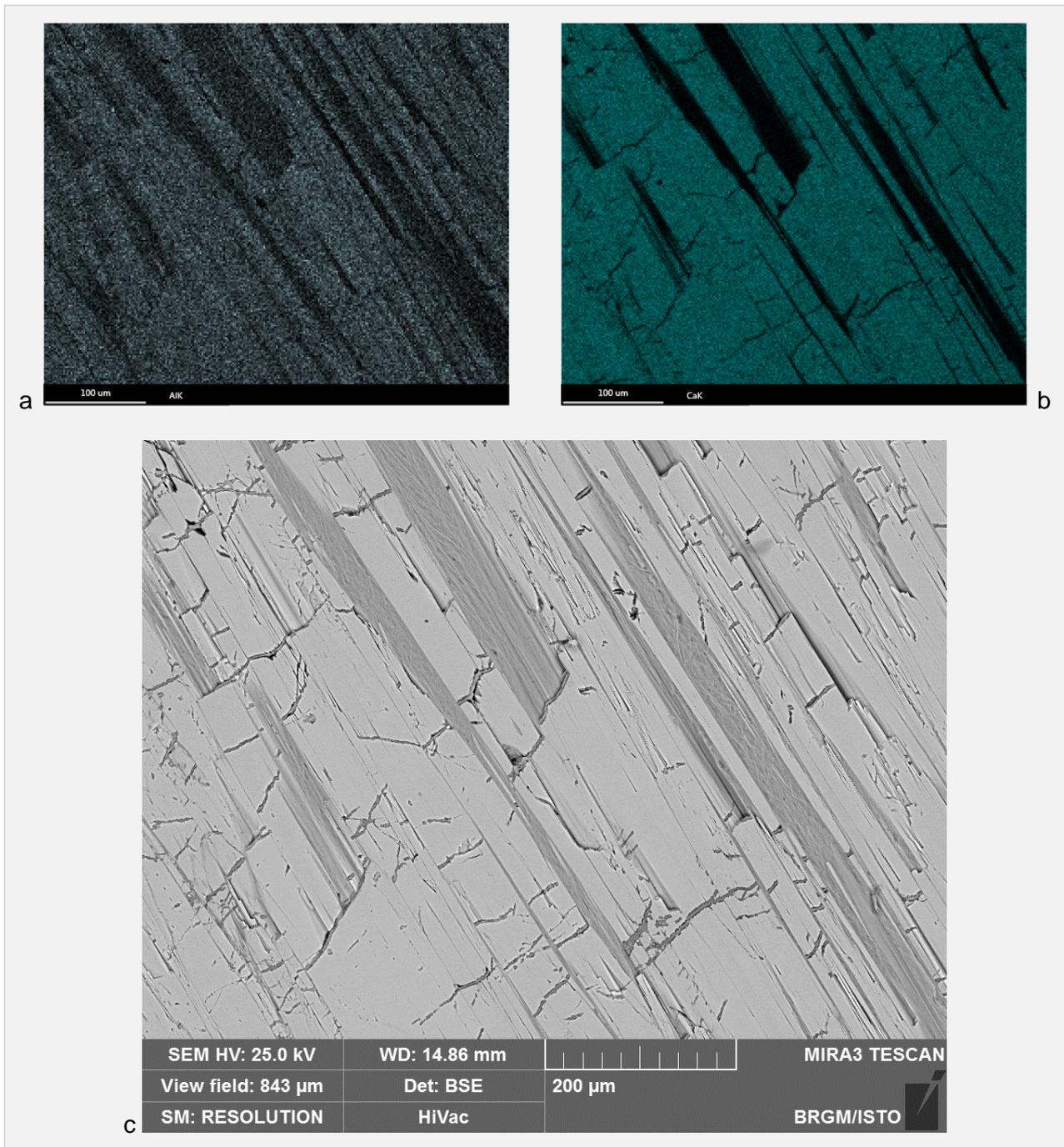


Figure 43 : Association d'antigorite et de trémolite observée dans l'échantillon NC581DL-A à partir de la cartographie de l'aluminium (a) et du calcium (b). L'image (c) correspond à la zone cartographiée.

3.2.3. Secteur de Sireis

Les analyses réalisées à partir des échantillons fibreux prélevés le long de la piste d'accès à la mine (NC553DL-C) ou dans la mine elle-même (NC559DL-A & B, NC561DL) démontrent la présence de trémolite et d'anthophyllite.

La trémolite a été identifiée dans l'échantillon NC553DL-C, l'anthophyllite dans les échantillons NC559DL-B et NC561DL (Figure 44).

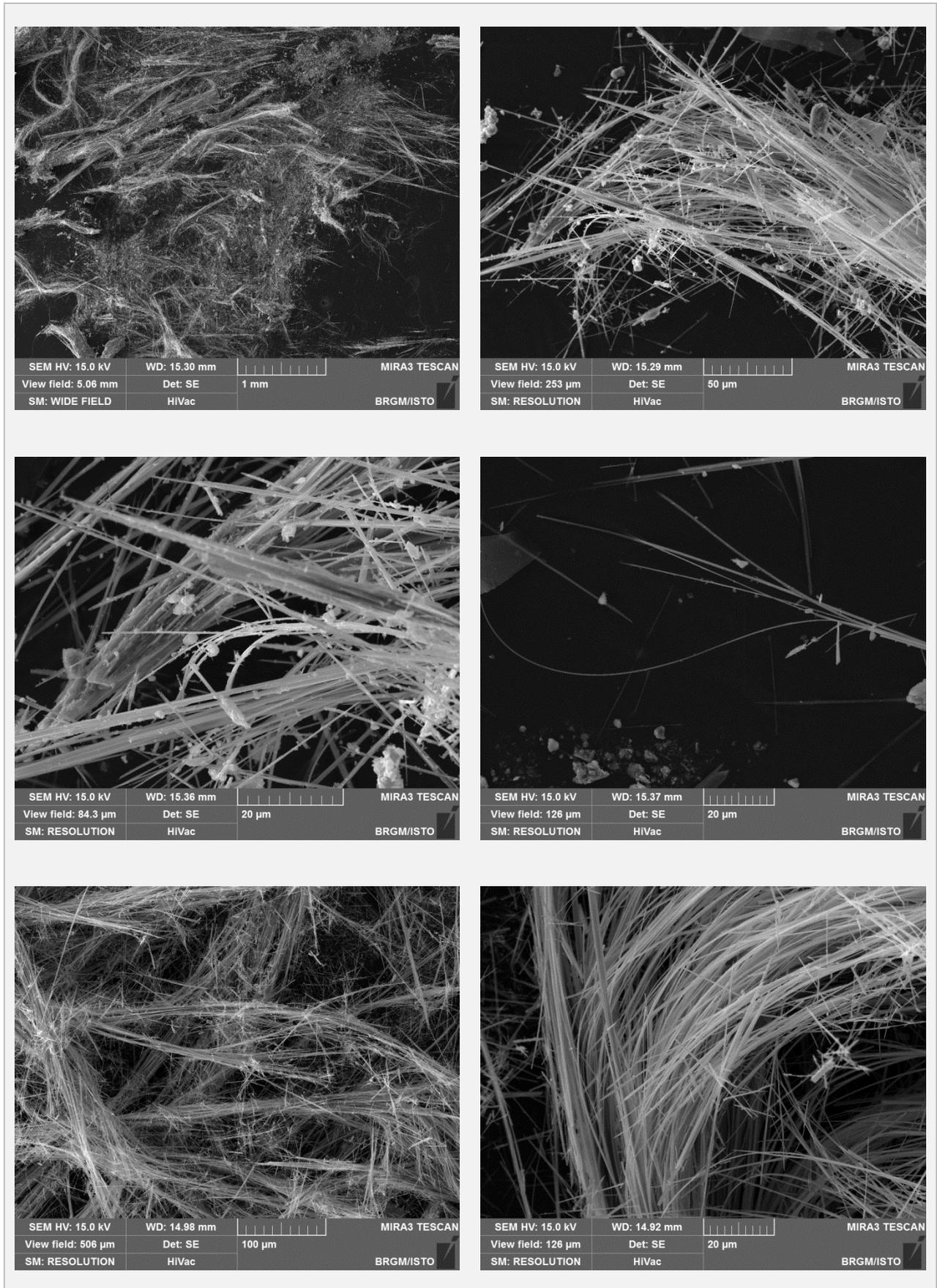


Figure 44 : Morphologie des fibres d'anthophyllite observées dans les échantillons NC559DL-B (Haut/ Centre) et NC561DL (Bas).

3.2.4. Synthèse

Les principaux résultats obtenus par spectroscopie RAMAN et par microscopie électronique (MEBA) sont présentés dans l'annexe 2 du présent rapport sous la forme de fiches distinctes. Quatre phases minérales fibreuses ont été identifiées dans ces échantillons (chrysotile, antigorite, trémolite, anthophyllite).

Les occurrences à amphiboles asbestiformes sont ubiquistes dans le secteur de Poro, moins abondantes mais présentés également dans les mines de Vulcain et de Sireis. Il s'agit pour les unes d'occurrences à trémolite-amiante (NC581DL-B, NC584DL, NC585DL) et pour les autres d'occurrences à anthophyllite-amiante (NC550DL-D, NC559DL, NC561DL). Aucune occurrence à amphiboles fibreuses n'a été caractérisée dans les mines non affectées par la présence de veines à antigorite.

Dans les veines d'antigorite les plus altérées, les particules fibriformes observées au microscope électronique à balayage ne possèdent pas une morphologie asbestiforme⁴ mais une fraction importante de ces particules correspond néanmoins à des fibres inhalables au sens de l'OMS (NC544DL, NC546DL-B2, NC550DL-B, NC551DL, NC551DL-C, NC575DL, NC595DL). Associées à ces veines à antigorite, des fibres de chrysotile ont régulièrement été mises en évidence (NC543DL, NC546DL, NC550DL-C1 & C2, NC592DL, NC593DL-B).

⁴ Au sens de l'EPA.

4. Conclusions et perspectives

Les veines à serpentine sont des structures très fréquemment observées dans les péridotites serpentinisées (Wicks et Whittaker, 1977 ; Puffer et *al.*, 1980 ; Viti et Mellini, 1996 ; Dilek et *al.*, 1997 ; Andreani et *al.*, 2004 ; Groppo et Compagnoni, 2007a, b ; Frost et *al.*, 2013). Si les veines à chrysotile sont les plus fréquemment décrites et étudiées, notamment d'un point de vue de leur mécanisme de formation, les veines à antigorite ont également fait l'objet de plusieurs descriptions. En Pennsylvanie, Puffer et *al.* (1980) ont décrit des veines fibreuses épaisses de 1 mm à 10 cm, apparaissant habituellement le long de plans de cisaillement, composées de serpentine « picrolitique »⁵. Ces mêmes auteurs soulignent que ces veines picrolitiques évoluent localement vers une serpentine plus souple, à éclat soyeux. Dans les serpentinites de l'île d'Elbe, Viti et Mellini (1996) ont décrit des veines à antigorite, constituées par des lattes disposées parallèlement aux limites des veines (*slip-veins*) et enrobant des corps massifs de serpentinites sombres. Les analyses réalisées à partir de ces veines ont montré que des fibres de chrysotile étaient fréquemment associées aux lattes d'antigorite, ces fibres présentant un tube central plus grand et des parois plus fines par rapport aux fibres de chrysotile « classiques ». Des veines à antigorite ont également été décrites dans le massif ultrabasique de Lanzo par Groppo et Compagnoni (2007). Il s'agit de veines de 1 à 20 cm d'épaisseur et longues de quelques centimètres à plusieurs décimètres, constituées par des fibres d'antigorite. Pour ces auteurs, les veines se sont formées à une température de 350-400°C et à des pressions comprises entre 0,3 et 0,6 GPa, dans les conditions du faciès schiste vert. Dans ces veines, la morphologie fibreuse de l'antigorite est expliquée par le fonctionnement de deux mécanismes (« crack-seal process » et/ou « dissolution-precipitation creep mechanism »). Ces veines se seraient formées avant le développement des veines de chrysotile exploitées dans la mine de Balangero. Groppo et Compagnoni (2007) signalent que les cristaux d'antigorite, d'apparence rigide dans les échantillons sains, présentent une morphologie plus franchement fibreuse sur les surfaces des particules altérées.

Dans la partie supérieure des massifs ophiolitiques néo-calédoniens, les péridotites sont plus ou moins affectées par les processus de serpentinisation mais généralement exemptes de toute déformation ductile. Dans ces péridotites très peu à pas déformées, plusieurs générations de veines serpentineuses peuvent être différenciées et leurs relations analysées.

Parmi toutes les veines serpentineuses préalablement recensés (Lahondère et *al.*, 2011, 2012), les veines les plus précoces, à lizardite, sont très régulièrement identifiées dans les gisements étudiés. Dans certains sites (Opoué, Tomo, ...), le réseau constitué par ces veines précoces constitue pratiquement les seules structures serpentineuses observées. Ces structures correspondent à des veines sombres d'épaisseur millimétrique à centimétrique, rarement plus, auxquelles sont très régulièrement associées des veinules de chrysotile d'épaisseur infra-millimétrique à millimétrique. Dans les autres sites étudiés, ces veines précoces peuvent également constituer localement le réseau dominant. C'est par exemple le cas pour plusieurs secteurs de la mine de Sireis ou pour la fosse de Stanislas (CFTMC). Dans les sites caractérisés notamment par l'abondance des veines à antigorite (Vulcain, Bonini, ...), ce réseau précoce à lizardite ± chrysotile est également identifié, et ce de façon très régulière. Quel que soit le site considéré, ces veines précoces constituent toujours un réseau qui découpe les péridotites en blocs grossièrement parallélépipédiques. Dans les veinules de chrysotile associées à ce réseau précoce, les fibres sont toujours perpendiculaires aux épontes (« *cross-fibers* »).

Les veines à antigorite constituent un réseau intermédiaire très irrégulièrement représenté au niveau des sites étudiés, ces veines étant pratiquement absentes dans certains secteurs (Opoué, Tomo, Stanislas, ...) et ubiquistes dans d'autres (Vulcain, Poro-Bonini, ...). Du fait de

⁵ Association d'antigorite et de chrysotile.

leurs dimensions, de leur abondance dans certains secteurs de la nappe actuellement concernés par l'activité minière et de leurs relations étroites avec les structures porteuses d'amphiboles asbestiformes (trémolite, anthophyllite), ces veines d'antigorite constituent un réseau particulièrement important à caractériser. Les informations les plus pertinentes acquises dans le cadre de cette étude proviennent de la mine de Vulcain et du secteur de Poro-Bonini. Les structures à antigorite correspondent à des veines syntaxiales au niveau desquelles les lattes d'antigorite forment un angle généralement faible ($< 30^\circ$) avec les parois de la veine (« *slip-fibers* »). Dans certains cas, cet angle est tellement faible que les lattes apparaissent subparallèles aux bordures de la veine (Figure 27, Figure 28). L'orientation des cristallisations fibro-lamellaires d'antigorite matérialise pour chaque structure étudiée la direction d'ouverture de la veine. A l'échelle d'un bloc de péridotite grossièrement parallélépipédique, il n'est pas rare d'observer que les différentes faces de ce bloc sont tapissées par des lattes d'antigorite (Figure 15). Ces observations montrent donc que des ouvertures simultanées dans plusieurs directions de l'espace ont présidé à la formation de ces veines. Les mesures faites à l'échelle d'un gisement montrent une dispersion plus ou moins importante de l'orientation de ces veines. Dans la mine de Vulcain, leur orientation apparaît très variable, même si une direction NE-SW semble prédominer (Figure 13 ; Figure 17). Dans le secteur de Poro-Bonini, cette même direction NE-SW, ici plus nettement prédominante, a également été retrouvée (Figure 31 ; Figure 34). A l'échelle de l'affleurement, ces veines NE-SW sont connectées à de grandes veines orientées E-W au niveau desquelles les cristallisations fibreuses et fibro-lamellaires sont subparallèles aux épontes. Ces veines E-W apparaissent moins nombreuses que les veines NE-SW mais semblent néanmoins avoir contrôlé ultérieurement la géométrie de plusieurs gisements. Ces veines E-W ont notamment été reconnues dans la mine de Vulcain (Figure 10 ; Figure 18) et en différents points de la fosse de Bonini (Figure 28 ; Figure 34).

Les observations faites dans la mine de Vulcain montrent que ces veines E-W, ici à pendage nord, sont localement abondantes, notamment sous le mur de la fosse située au sud de Module 3, lequel correspond à un plan serpentineux orienté N090 N60 repris par un plan à doewellite (Figure 10). A l'échelle du gisement, une autre direction subméridienne, à pendage ouest, semble également contrôler la géométrie des fosses exploitées, cette direction correspondant à des veines à antigorite et à des veines à amphiboles asbestiformes (trémolite) au niveau desquelles les cristallisations fibreuses et fibro-lamellaires sont subparallèles aux épontes (NC219DL, NC220DL ; Lahondère et al., 2011) (Figure 45).

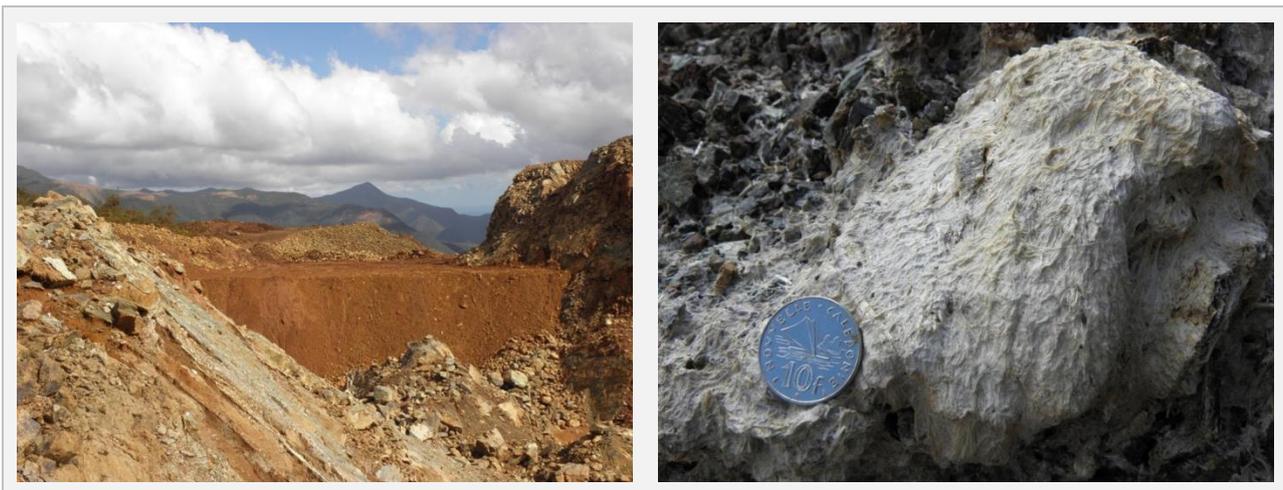


Figure 45 : Exemple de fosse limitée par des structures parallèles orientées N000 W40 comprenant des veines à antigorite et des plans à trémolite-amiante (Vulcain : site NC220DL).

Les observations faites dans la fosse de Bonini montrent que ces veines E-W à antigorite (NC595DL), à pendage sud, sont parallèles à des structures à trémolite-amiante correspondant tantôt à des veines dans lesquelles les fibres de trémolite sont subparallèles aux épontes

(NC512DL(2)) tantôt à des poches à texture fibroradiée (Figure 29), toutes ces structures contrôlant très clairement la géométrie de la fosse (Figure 28)⁶. Dans les péridotites situées de part et d'autre de ces structures, la serpentinisation apparaît uniquement contrôlée par le développement des veines précoces à lizardite ± chrysotile orientées N120 N70 et N020 W70, ces deux familles formant au final, avec les veines à antigorite, un réseau complexe mais caractérisé par trois directions majeures (N120 N70, N090 S35 (à N110 S55), N015 W70 (à N055 N70)). Il est important de noter que l'ouverture des veines à antigorite ne s'effectue pas d'une manière totalement indépendante par rapport aux veines précoces à lizardite ± chrysotile mais que cette ouverture semble de préférence se greffer sur les veines préexistantes, lesquelles se caractérisent donc par une évolution continue et prograde en température. Au final, les veines à antigorite présentent toujours les mêmes caractéristiques morphologiques, quelle que soit la zone de la nappe des péridotites dans laquelle elles sont observées. Ces veines à croissance syntaxiale appartiennent à un seul et même réseau et se sont formées d'une manière à peu près synchrone dans toute la nappe des péridotites, en réponse à un même processus de serpentinisation en lien avec la mise en place d'un cortège filonien au cours de l'Eocène inférieur (Lahondère et *al.*, 2012).

Les dernières structures observées correspondent à la formation de « très grandes veines à chrysotile » (Lahondère et *al.*, 2012). Préalablement identifiées en différents points de la nappe des péridotites (Lahondère et *al.*, 2012, 2014), ces veines ont également été observées dans la fosse de Bonini (NC592DL, NC593DL) ainsi que dans la mine de Vulcain (NC546DL ; Figure 9). Dans la fosse de Bonini, les nouvelles occurrences découvertes dans le cadre de cette étude sont très étroitement associées aux structures qui constituent le mur nord du gisement. Ces occurrences sont greffées sur des veines à antigorite préexistantes et correspondent à l'ouverture de veines d'épaisseur centimétrique à pluri-centimétrique dans lesquelles les fibres de chrysotile sont orientées perpendiculairement aux épontes (« *cross-fibers* »). Au niveau du point NC593DL, les fibres de chrysotile sont ainsi plus ou moins perpendiculaires aux veines à antigorite orientées N090 S60 et aux lattes fibro-lamellaires d'antigorite associées à ces veines, lesquelles sont inclinées au N120 d'environ 35°. Dans la mine de Vulcain, le même type de géométrie (« *cross-veins* ») a été observé au niveau de la veine à antigorite du point NC546DL (Figure 9) mais des structures plus difficiles à interpréter ont également été identifiées qui correspondent à des pelotes subsphériques de chrysotile dispersées dans les parties centrales des veines à antigorite (NC451DL ; Lahondère et *al.*, 2014). Ces structures à pelotes subsphériques sont ici interprétées comme le résultat de processus tardifs se traduisant par la cristallisation de chrysotile rétrograde aux dépens des lattes fibro-lamellaires d'antigorite. La formation de pelotes peut s'expliquer dans un contexte d'écrasement des veines à antigorite engendrant la déformation et le plissement des lattes situées en position centrale. Cette interprétation est cohérente avec l'observation régulière de veines d'antigorite plissées. Au final, les nouvelles observations faites confortent l'interprétation selon laquelle les structures correspondant aux très grandes veines à chrysotile ont cristallisé d'une manière tardive, probablement en liaison avec les processus hydrothermaux et les déformations accompagnant le charriage de la nappe ophiolitique sur la ride de Norfolk.

D'un point de vue minéralogique et cristallographique, les analyses réalisées dans le cadre de la présente étude ont permis de confirmer que les veines à antigorite devaient être considérées par la profession minière comme des occurrences amiantifères ou à fort potentiel amiantifère, rejoignant en cela nos propres conclusions (Lahondère et *al.*, 2012) et celles du rapport de l'ANSES (2014). Le caractère amiantifère de ces veines à antigorite est notamment lié à :

- la présence de fibres de chrysotile dans le cœur de ces veines, associées aux lattes d'antigorite ;

⁶ Les plans à trémolite-amiante préalablement identifiées en bordure de la route Poro-Kouaoua sont également proches de cette direction (N110 S50) (site NC228DL ; Lahondère et *al.*, 2011).

- la présence de veines de chrysotile d'épaisseur pluri-millimétrique à pluri-centimétrique le long de certaines épontes, dont le développement apparaît relativement tardif ;
- l'existence de fibrilles d'antigorite très fines ($D < 1 \mu\text{m}$; $L/D > 20$), facilement libérables et donc potentiellement inhalables, dans les structures à antigorite altérées régulièrement observées dans la saprolite et à la base de la latérite ;
- la caractérisation d'associations minérales à antigorite + trémolite-amiante ;
- la caractérisation à l'échelle d'un même affleurement de veines synchrones et parallèles d'antigorite et de trémolite-amiante.

Dans la nappe des péridotites, les processus de serpentinisation se sont traduits dans un premier temps par le développement de veines serpentineuses précoces à lizardite \pm chrysotile. Ce premier réseau est observé dans tous les sites étudiés et découpe les péridotites en blocs grossièrement parallélépipédiques. Dans certaines portions de l'ophiolite, ce réseau a évolué jusqu'à conduire à la formation de veines à antigorite. D'un point de vue géométrique, ces veines à antigorite ne constituent donc pas un réseau indépendant de celui formé par les veines précoces. Les veines précoces correspondent à des structures peu épaisses dans lesquelles les cristallisations fibreuses se limitent à quelques veinules de chrysotile (« *cross-veins* »). En revanche, les veines à antigorite constituent des structures beaucoup plus épaisses et presque entièrement scellées par des cristallisations fibro-lamellaires presque toujours obliques (à très obliques) par rapport aux épontes (« *slip-veins* »). L'ouverture de ces veines dans toutes les directions de l'espace constitue une réponse à l'augmentation des volumes rocheux induit par les réactions de serpentinisation. Les relations très étroites observées à l'échelle de l'affleurement entre les veines à antigorite et les veines à trémolite fibreuse confirment le caractère synchrone de ces différentes structures ainsi que leurs relations probables avec le magmatisme d'arc d'âge Eocène inférieur, lequel est sans doute à l'origine d'une augmentation conjuguée de la température et de la pression des fluides circulant dans l'ophiolite. Les veines à antigorite et les structures à trémolite qui leur sont associées, développées au cours de cette phase d'âge Eocène inférieur, contribuent aujourd'hui, là où elles sont exprimées (Vulcain, Poro), à définir l'enveloppe des zones minéralisées. La contribution de ces structures à la formation de ces zones minéralisées se limite cependant probablement au rôle qu'elles ont pu jouer dans la fracturation tardive des massifs, ce dernier étant souligné par la superposition fréquente des plans à doewellite sur ces structures à antigorite + trémolite, et dans la circulation des fluides supergènes.

5. Bibliographie

- Aitchison, J.C., Clarke, G.L., Meffre, S., Cluzel, D., (1995).** Eocene arc-continent collision in New Caledonia and implications for regional Southwest Pacific tectonic evolution. *Geology* v. 23; n° 2, pp. 161-164.
- Agrinier, P., Cannat, M., (1997).** Oxygen-isotope constraints on serpentinization processes in ultramafic rocks from the Mid-Atlantic Ridge (23° N). *Proceedings of Ocean drilling Program, Scientific results*, 153, pp. 381-388.
- Andréani, M., (2003).** Les microstructures de déformation des serpentines et la partition sismique/asismique : exemple de la Californie. Thèse Université Joseph Fourier, Grenoble, 216 pages.
- Audet, M.A., (2008).** Le Massif du Koniambo, Nouvelle-Calédonie. Formation et obduction d'un complexe ophiolitique de type SSZ. Enrichissement en nickel, cobalt et scandium dans les profils résiduels. Thèse, Univ. Nouvelle-Calédonie et Univ. du Québec, 355 pages.
- Auzende, A.L., Guillot, S., Devouard, B., Baronnet, A., (2006).** Serpentinities in an alpine convergent setting: effects of metamorphic grade and deformation on microstructures. *Eur. J. Mineral.*, 18, pp. 21-33.
- Avias, J., (1949).** Note préliminaire sur quelques observations et interprétations nouvelles concernant les péridotites et serpentines de Nouvelle-Calédonie (secteur central). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5, XIX, pp. 439-451.
- Avias, J., (1967).** Overthrust structure of the main ultrabasic New Caledonian massives. *Tectonophysics*, vol. 4, pp. 531-541.
- Bailey, K.F., Kelse, J., Wylie, A.G., Lee, R.J., (2003).** The asbestiform and nonasbestiform mineral growth habit and their relationship to cancer studies.
- Baldwin, S.L., Rawling, T., Fitzgerald, P.G., (2007).** Thermochronology of the New Caledonian high pressure terrane - Implications for the middle Tertiary plate boundary process in the SW Pacific. *Geological Society of America Special Paper* 419, pp. 117-134.
- Barnes, I., O'Neil, J., Trescases, J., (1978).** Present day serpentinization in New-Caledonia, Oman and Yugoslavia. *Geochemica Cosmochimica Acta*, 42, pp. 144-145.
- Baumann, F., Rougier, Y., Ambrosi, J.P., Robineau, B., (2007a).** Pleural Mesothelioma in New Caledonia : An acute environmental concern, *Cancer Detection and prevention*; 3, pp. 70-76.
- Baumann, F., Maurizot, P., Ambrosi, J.P., Robineau, B., (2007b).** Facteurs de risque du mésothéliome en Nouvelle-Calédonie : données épidémiologiques et géologiques. Confrontation des données épidémiologiques et des données géologiques pour étudier l'étiologie du mésothéliome environnemental en Nouvelle-Calédonie : application dans les deux zones test des communes de Houailou et de Bourail. Rapport au Ministère de l'Outre-Mer.
- Baumann, F., Maurizot, P., Robineau, B., Ambrosi, J.P., (2008a).** L'amiante environnemental en Nouvelle-Calédonie : Confrontation des données épidémiologiques et des données géologiques dans le secteur de Koné-Touho-poindimié, et Identification des fibres aériennes d'amiante dans les zones à risques de Houailou-Bourail. Rapport IPNC FB MOM 2008.
- Baumann, F., Maurizot, P., Robineau, B., Viel, J.F., (2008b).** Facteurs de risque du mésothéliome en Nouvelle-Calédonie : données épidémiologiques et géologiques. 11th Pacific Science Inter-Congress 2009, Tahiti, Polynésie Française.

Baumann, F., (2010). Le mésothéliome malin pleural en Nouvelle-Calédonie : analyse spatiale et déterminants environnementaux – Facteurs de risque d'exposition à l'amiante naturel. Thèse, Univ. Nouvelle-Calédonie.

Baumann, F., et al. (2010). Pleural Mesothelioma in New Caledonia: associations with environmental risk factors. EHP (accepted).

Berman, R., Engi, M., Greenwood, H., Brown, T., (1986). Derivation of internally-consistent thermodynamic data by the technique of mathematical programming: a review with application to the system MgO-SiO₂-H₂O. *Journal of Petrology*, 27, 6, pp. 1331-1364.

Blake, M.C. Jr., Brothers, R.N., Lanphere, M.A., (1977). Radiometric ages of blueschists in New Caledonia. In : International symposium on geodynamics in South-West Pacific, pp. 279-281.

Boulmier, J.L., (2009). Expertise indépendante sur l'amiante dans la chaîne de production minière – Mission préparatoire. Rapport BRGM/RP-57421-FR, 149 pages.

Boulmier, J.L., (2010). Examen d'un échantillon d'antigorite prismatique altérée, à l'état brut et après broyage ménagé. Projet PSP10NCL05/1, Octobre 2010, 10 pages.

BRGM-LEPI-INSERM, (2007). Rapport de mission du 23 avril au 4 mai 2007 – Amiante environnemental en Nouvelle-Calédonie – Recommandations concernant les mesures de réduction du risque et l'évaluation du risque sanitaire. 56 pages, 2 annexes.

Caillère, S., (1936). Contribution à l'étude des minéraux, des serpentines. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. 59, Thèse, Paris.

Campbell, W.J., Blake, R.L., Brown, L.L., Cather, E.E., Sjöberg, J.J., (1977). Selected Silicate Minerals and their Asbestiform Varieties. Bureau of Mines Information Circular, IC 8751, United States Department of the Interior, 56 pages.

Cardile, V, Lombardo, L, Belluso, E, Panico, A, Capella, S, Balazy, M., (2007). Toxicity and carcinogenicity mechanisms of fibrous antigorite. *Int J. Environ. Res. Public Health*, 4, pp. 1–9.

Caruso, L., Chernosky, J., (1979). The stability of lizardite. *Canadian Mineralogist*, 17, 4, pp. 757-769.

Clarke, G.L., Aitchison, J.C., Cluzel, D., (1997). Eclogites and blueschists of the Pam Peninsula, NE New Caledonia ; a reappraisal. *Journal of Petrology*, vol. 38/7, pp. 843-876.

Cluzel, D., (1995). Dénudation tectonique du complexe à noyau métamorphique de haute pression d'âge tertiaire (Nord de la Nouvelle-Calédonie, Pacifique, France). Données cinématiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 321, série II a, pp. 57-64.

Cluzel, D, Pelletier, B., (1994). Compte-rendu préliminaire de la visite géologique du secteur de Montfaoué (Poya). 1994 ; rapport UNC-SLN.

Cluzel, D., Clarke, G., Aitchison, J., (1995). Northern New Caledonia high-pressure metamorphic core complex; from continental subduction to extensional exhumation. In : Proceedings of the 1995 PACRIM congress; Exploring the rim. Publication Series - Australasian Institute of Mine.

Cluzel, D., (1996). Affinités intra-océaniques des métavolcanites de l'unité de la Boghen (ex-"anté-Permien" de Nouvelle-Calédonie, Pacifique sud-ouest) : conséquences paléogéographiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série II. Sciences de la Terre et des Planètes*. 323; 8, pp. 657-664.

- Cluzel, D., Aitchison, J.C., Picard, C., (2001).** Tectonic accretion and underplating of mafic terranes in the Late Eocene intraoceanic fore-arc of New Caledonia (Southwest Pacific) : geodynamic implications. *Tectonophysics*, vol. 340, pp. 23-59.
- Cluzel, D., Meffre, S., (2002).** L'unité de la Boghen (Nouvelle-Calédonie, Pacifique sud-ouest) : un complexe d'accrétion jurassique. Données radiochronologiques préliminaires U-Pb sur les zircons détritiques. *C. R. Geoscience*, vol. 334, pp. 867-874.
- Cluzel, D., Meffre, S., Maurizot, P., Crawford, A.J., (2006).** Earliest Eocene (53 Ma) convergence in the Southwest Pacific ; evidence from preobduction dikes in the ophiolite of New Caledonia. *Terra Nova*. Doi: 10.1111./j.1365-3121.2006.00704.x.
- Collot, J.Y., Malahoff, A., Récy, J., Latham, G., Missegue, F., (1987).** Overthrust emplacement of New Caledonia ophiolite ; geophysical evidence. *Tectonics*. 6; 3, pp. 215-232.
- Evans, B., Johannes, W., Oterdoom, H., Trommsdorff, V., (1976).** Stability of chrysotile and antigorite in the serpentine multisystem. *Schw. Mineral. und Petrog. Mitt.*, 56, pp. 79-93.
- Fitz Gerald, J.D., Eggleton, R.A., Keeling, J., (2010).** Antigorite from Rowland Flat, South Australia: asbestiform character. *Eur. J. Mineral.*, 22, pp. 525-533.
- Fitzherbert, J.A., Clarke, G.L., Powell, R., (2005).** Preferential retrogression of HP metasediments and the preservation of blueschist to eclogite facies metabasite during exhumation, Diahot terrane, NE New Caledonia, *Lithos*, 83, pp. 67-96.
- Früh-Green, G., Plas, A., Lécuyer, C., (1996).** Petrologic and stable isotope constraints on hydrothermal alteration and serpentinisation of the EPR shallow mantle at Hess Deep (site 895). *Proceedings of Ocean drilling Program, Scientific results*, 147, pp. 255-291.
- GéolImpact, (2007).** Cartographie des formations géologiques de la région de Houailou. Identification des sites aménagés potentiellement amiantifères.
- GéolImpact, (2008a).** Etude de l'amiante environnemental des régions de Houailou et de Bourail. Inventaire des sites aménagés potentiellement amiantifères.
- GéolImpact, (2008b).** Etude de l'amiante environnemental - Commune de Hienghène. Inventaire des sites aménagés potentiellement amiantifères.
- Germine, M., Puffer, J.H., (1989).** Origin and development of flexibility in asbestiform fibres. *Mineralogical Magazine*, 53, pp. 327-335.
- Ghent, E.D., Roddick, J.C., Black, P.M., (1994).** $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of white micas from the epidote to the omphacite zones, northern New Caledonia ; tectonic implications. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 31/6, pp. 995-1001.
- Groppo, C., Compagnoni, R., (2007).** Ubiquitous fibrous antigorite veins from the Lanzo ultramafic Massif; Internal western Alps (Italy): characterisation and genetic conditions. *Per. Mineral.*, 76, pp. 169-181.
- Harf, R., Laval, I., Davezies, P., Prost, G., (1993).** Unrecognized occupational risk of pleural mesothelioma. The example of the Rhone-Alps region, *Rev. Mal. Respir.*, 10, pp. 453-458.
- Harris, K.E., Bunker, K.L., Strohmeier, B.R., Hoch, R., Lee, R.J., (2007).** Discovering the True morphology of Amphibole Minerals: Complementary TEM and FESEM Characterization of Particles in Mixed Mineral Dust. *Modern Research and Educational Topics in Microscopy*, A. Méendez-Vilas et J. Diaz (Eds), pp. 643-650.
- Hekinian, R., (1970).** Gabbro and pyroxenite from a deep-sea core in the Indian ocean. *Marine Geology*, 9, pp. 287-294.

Hendrickx, M., (2008). Naturally occurring asbestos in eastern Australia: a review of geological occurrence, disturbance and mesothelioma risk. *Environ Geol* (2009) , 57, pp. 909–926.

Ingémine, (2008). Inventaire des sites aménagés potentiellement amiantifères, commune de Poindimie.

INRS, (1997). Fibres minérales artificielles et amiante. Rapport du Groupe scientifique pour la surveillance des atmosphères de travail (G2SAT). DMT 69TE46, pp. 45-54.

IODP, (2005). Integrated Ocean Drilling Program. Expedition 304. Preliminary Report.

Keeling, J.L., Raven, M.D., McClure, S.G., (2006). Identification of fibrous mineral from Rowland Flat area, south Australia. Department Primary Industries and Resources, South Australia, report book 2006/02.

Keeling, J.L., Raven, M.D., Self, P.G., Eggleton, R.A., (2008). Asbestiform antigorite occurrence in South Australia. Proceedings 9th International Congress for applied Mineralogy (ICAM), Brisbane, September 2008, AusIMM, Melbourne, pp. 329-336.

Komor, S.C., Grove, T.L., Hébert, R., (1990). Abyssal peridotites from ODP Hole 670A : residues of mantle melting exposed by non-constructive axial divergence. *Proc. ODP, Sci. Results*, 106/109, pp. 85-101.

Lahondère, D., (2007). L'amiante environnemental en Nouvelle-Calédonie : Expertise géologique des zones amiantifères. Evaluation des actions engagées. Rapport BRGM/RP-55894-FR, 55 pages, 5 figures, 9 planches.

Lahondère, D., Maurizot, P., (2009). Typologie et protocole d'échantillonnage des occurrences naturelles d'amiante en Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM/RP-57334-FR, 164 pages, 11 tableaux, 10 figures, 37 planches, 1 annexe.

Lahondère, D., Maurizot, P., (2011). L'amiante dans les massifs de péridotite de Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM/RP-59252-FR, Rapport final, 302 pages.

Lahondère, D., Lesimple, S., Cagnard, F., Lahfid, A., Wille, G., Maurizot, P., (2012). Serpentinisation et fibrogenèse dans les massifs de péridotite de Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM/RP-60192-FR, Rapport final, 114 pages.

Lahondère, D., Lesimple, S., Wille, G., Lahfid, A., (2014). Géologie et minéralogie des veines à antigorite de Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM/RP-63103-FR, Rapport final, 458 pages.

Maurizot, P., Eberlé, J.M., Habault, C., Tessarolo, C., (1989). Carte géol. Territoires d'Outre-Mer, Nouvelle-Calédonie (1/ 50000), feuille Pam-Ouégoa, 2e édition, B.R.G.M., Notice explicative par Maurizot, P., Eberlé, J.M., Habault, C., Tessarolo, C., 81 pages.

Maurizot, P., Baumann, F., Robineau, B., Baltassat, J.M., (2008). Amiante environnemental en Nouvelle-Calédonie : Identification des fibres aériennes d'amiante dans les zones à risques de mésothéliome révélées par l'enquête épidémiologique dans le secteur de Koné-Touho-Poindimié. Rapport BRGM/RP-56198-FR, 75 pages.

Mellini, M., (1982). The crystal structure of lizardite 1T: hydrogen bonds and polytypism. *American Mineralogist*, 67, pp; 587-598.

Mellini, M., Zanazzi, P., (1987). Crystal structure of lizardite 1T and lizardite 2H1 from Coli, Italy. *American Mineralogist*, 72, 9-10, pp. 943-948.

Mével, C., (2003). Serpentinisation of abyssal peridotites at mid-ocean ridges. *C. R. Geosciences*, 335, pp. 825-852.

Moutte, J., (1982). Chromite deposits of the Tiebaghi ultramafic massif, New Caledonia, *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*. 77; 3.

- Normand, C., Williams-Jones, A.E., Martin, R.F., Vali, H., (2002).** Hydrothermal alteration of olivine in a flow-through autoclave: nucleation and growth of serpentine phases. *American Mineralogist*, 87, pp. 1699-1709.
- O'Hanley, D., Wicks, F., (1995).** Conditions of formation of lizardite, chrysotile and antigorite, Cassiar, British Columbia. *Canadian Mineralogist*, 33, 4, p. 753.
- Orloff, O., (1968).** Etude géologique et géomorphologique des massifs d'ultrabasites compris entre Houailou et Canala (Nouvelle-Calédonie). Thèse, Faculté des Sciences de Montpellier, 189 pages + annexes.
- Pelletier, B., (2003).** Les minerais de nickel de Nouvelle-Calédonie. *Géologues*, 138, pp. 30-38.
- Pelletier, B., (2006).** L'altération supergène de l'antigorite. *Mines*.
- Picard, C., (2004a).** L'aléa amiante environnemental dans le Nord de la nouvelle-Calédonie. Géologie, distribution et caractéristiques des affleurements à minéraux fibriformes de talc-trémolite-antigorite et chrysotile de la région de Hienghène. Rapport Univ. Nouvelle-Calédonie, LGPMC, EA 3325, 79 pages.
- Picard, C., (2004b).** Caractéristiques des serpentines et des minéraux asbestiformes dans les matériaux ophiolitiques et les latérites du Massif du Koniambo. Rapport Univ. Nouvelle-Calédonie, LGPMC, EA 3325.
- Picard, C., (2005).** Caractéristiques minéralogiques de la Pierre à Savon (Stéatite) utilisée par les sculpteurs de la région de Hienghène et Pouébo (Nouvelle-Calédonie). Laboratoire des Géosciences et Physique de la Matière Condensée, Université de la Nouvelle-Calédonie, Nouméa.
- Prinzhofer, A., Nicolas, A., Cassard, D., Moutte, J., Leblanc, M., Paris, J.P., Rabinovitch, M., (1980).** Structures in the New Caledonia peridotites-gabbros ; implications for oceanic mantle and crust. *Tectonophysics*, vol. 69; 1-2, pp. 85-112.
- Pugnali, A., et al. (2010).** Effects of asbestiform antigorite on human alveolar epithelial A549 cells : A morphological and immunohistochemical study. *Acta histochemica*, 112, pp 133-146.
- Rawling, T.J., (1998).** Oscillating orogenesis and exhumation of high-pressure rocks in New Caledonia, SW Pacific. Thèse Phd, Monash University, Department of Earth Sciences, Melbourne, Australia.
- Ribeiro da Costa, I., Barriga, F., Viti, C., Mellini, M., Wicks, F., (2008).** Antigorite in deformed serpentinites from the Mid-Atlantic Ridge. *Eur. J. Mineralogy*, 20, pp. 563-572.
- Robineau, B., (2006).** Amiante environnemental en terrain minier. Note de synthèse fin octobre 2006 sur les campagnes de mesure. Rapport DIMENC.
- Sécher, D., (1981).** Les lherzolites ophiolitiques de Nouvelle-Calédonie et leur gisements de chromite, Déformation de la chromite. Thèse Institut des Sciences de la Nature de l'Université de Nantes.
- Spandler, C., Rubatto, D., Hermann, J., (2005).** Late Cretaceous-Tertiary tectonics of the southwest Pacific: Insights from U-Pb sensitive, high-resolution ion microprobe (SHRIMP) dating of eclogite facies rocks from New Caledonia. *Tectonics*, vol. 24, pp. 1-16.
- Stamoudi, C., Mével, C., Agrinier, P., Gaudichet, A., (1995).** Nature et signature des phases serpentineuses dans les péridotites océaniques serpentinisées de Hess Deep et MARK. *Journ. Spéc. Soc. Géol. France, Géosciences marines, Brest, Abstr.* 66.
- Trescases, J., (1969).** Premières observations sur l'altération des péridotites de Nouvelle-Calédonie. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 1, 1, pp. 27-57.

Ulrich, M., (2010). Péridotites et serpentinites du complexe ophiolitique de la Nouvelle-Calédonie. Etudes pétrologiques, géochimiques et minéralogiques sur l'évolution d'une ophiolite de sa formation à son altération. Thèse Doctorat, Univ. de Nouvelle-Calédonie et Univ. Joseph Fourier (Grenoble), 212 Pages + annexes.

Whittaker, E.J.W., (1953). The structure of chrysotile. *Acta Crystallographica*, 6, pp. 747-748.

Wicks, F.J., O'Hanley, D.S., (1988). Serpentine minerals: structures and petrology. In Bailey, S.W., ed., *Hydrous Phyllosilicates (exclusive of micas)*, *Reviews in Mineralogy*, 19, Washington, D.C. Mineralogical Society of America, pp. 125-128.

Wicks F.J., Whittaker, E.J.W., (1975). A reappraisal of the structures of the serpentine minerals. *Canadian Mineralogist*, 13, 3, pp. 227-243.

Wicks F.J., Whittaker, E.J.W., (1977). Serpentine textures and serpentinisation, *Canadian Mineralogist*, Vol. 15, pp. 459-488.

Wozniak, H., Wiecek, E., Stetkiewicz, J., (1988). Fibrogenic and carcinogenic effects of antigorite. *Polish Journal of Occupational Medicine*, Vol. 1, N° 3, pp. 192-202.

Wozniak, H., Wiecek, E., (1991a). Evaluation of occupational exposure of workers engaged in mining of rock raw materials in the Sleza massif. [Med Pr.](#), 42(6), pp. 411-417.

Wozniak, H., Wiecek, E., (1991b). Maximum permissible levels of asbestos and other natural minerals with fibrous structure--necessity of verification. [Med Pr.](#), 42(4), pp. 249-255.

Wozniak, H., Wiecek, E., (1992). Various ecological problems related to mining and processing of serpentine. Evaluation of non-occupational exposure of the population of Nasławice to fibrous mineral dust; [Med Pr.](#), 43(3), pp. 235-243.

Wozniak H., Wiecek, E., Stetkiewicz, J., (1993). Experimental carcinogenicity and mutagenicity of non-asbestos natural fibres--preliminary report. *Polish Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 6(1), pp. 55-60.

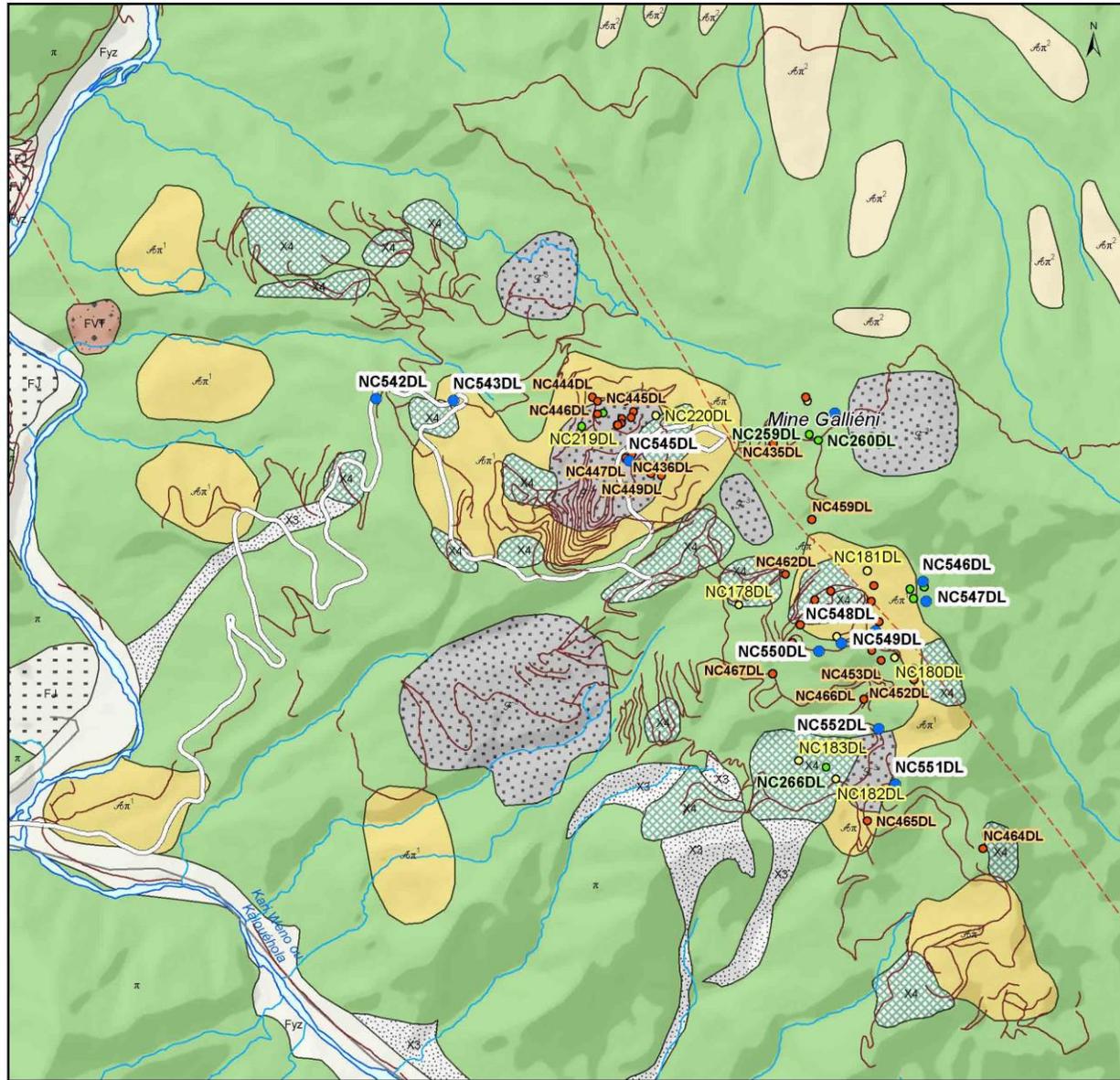
Yada, K., (1967). Study of chrysotile asbestos by a high resolution electron microscope. *Acta Crystallographica*, 23, pp. 704-707.

Yada, K., (1971). Study of microstructure of chrysotile asbestos by high-resolution electron microscope. *Acta Crystallographica Section A : Crystal physics*, 27, pp. 659-664.

Zoltai, T., Wylie, A.G., (1979). Definitions of asbestos-related mineralogical terminology.

Annexe 1

Cartes des sites visités et localisation des affleurements expertisés



CARTE GEOLOGIQUE

Légende

Contours Géologiques

- Chevauchement observé
- Faille principale observée
- Faille principale supposée
- Normal observé
- Trait de cote observé

Surfaces Géologiques

Formations anthropiques

- Zones d'exploitations et déblais miniers, X4
- Décharges minières non contrôlées et coulées

Formations fluviales et littorales

- Cônes de déjection indifférenciés, FJ
- Alluvions actuelles et récentes, Fyz
- Brèche, conglomérat, grès de la haute

Formations d'altération

- Cuirasses disloquées et démantelées, σ^3
- Latérites minces sur péridotites, $\sigma\pi^2$
- Latérites épaisses sur péridotites, $\sigma\pi^1$

Nappe des péridotites

- Péridotites indifférenciées, π

Année d'acquisition

- Mission SGNC 2010
- Mission CNRT 2011
- Mission SGNC 2013
- Mission SGNC 2015

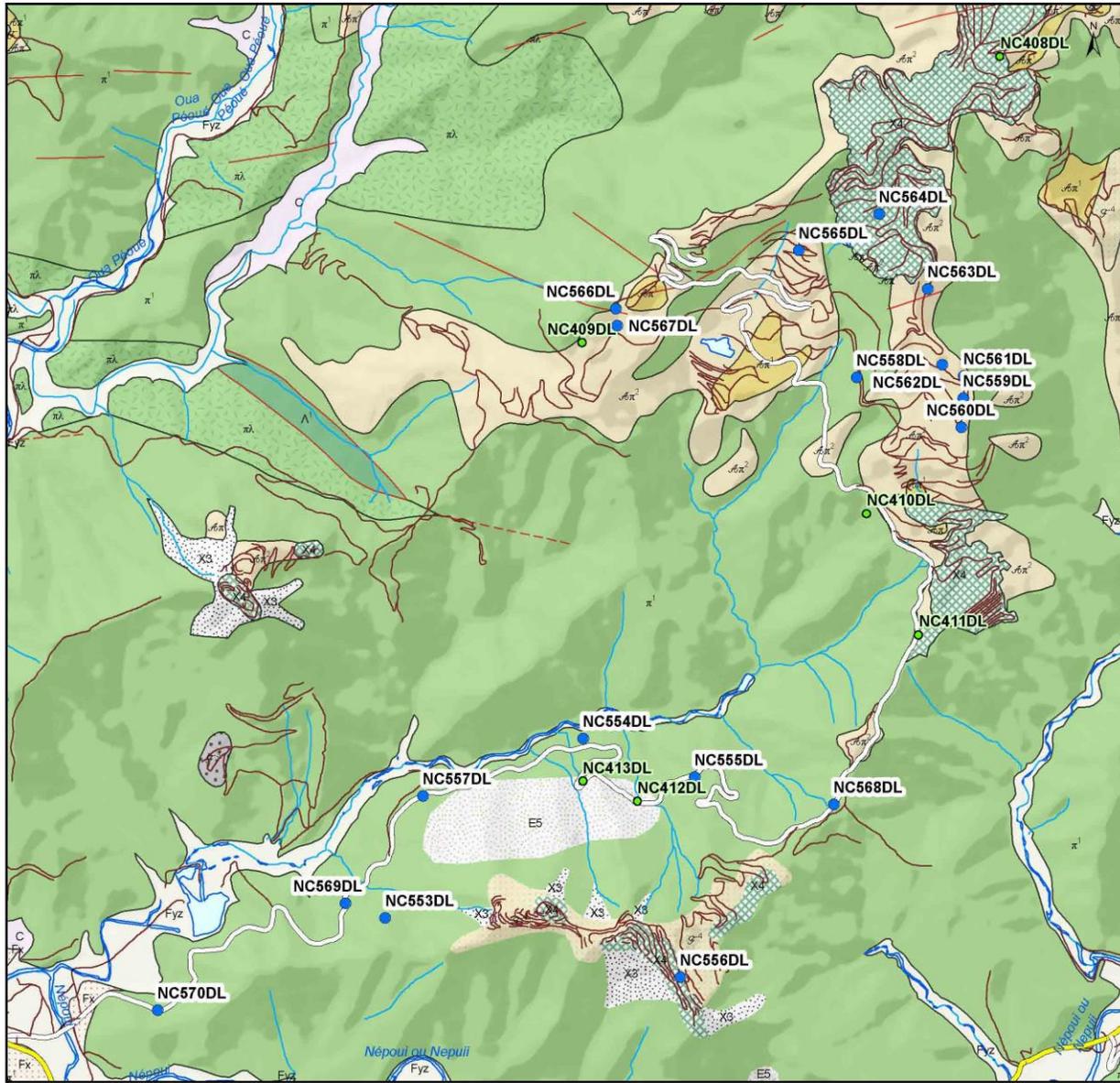


Source
 Service de la Géologie de Nouvelle-Calédonie (SGNC)
 Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de Nouvelle-Calédonie (DIMENC)
 1, ter rue E. Unger, Vallée du Tir - BP 465 - 98845 Nouméa Cédex, Nouvelle-Calédonie

Fonds topographiques : BDTOP0,
 Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports Terrestres (DITTT)

RGNC91-93 - LambertNC

MINE DE VULCAIN



CARTE GEOLOGIQUE

Légende

Surfaces Géologiques

Formations anthropiques

- Zones d'exploitations et déblais miniers, X4
- Décharges minières non contrôlées et coulées

Formations fluviales et littorales

- Alluvions actuelles et récentes, Fyz
- Alluvions anciennes associées à une altération

Formations d'épandages et de versants

- Colluvions indifférenciées, C
- Eboulis de blocs de péridotites, E5

Formations d'altération

- Gravrillons ferrugineux sur roches et altérites, $\mathcal{A}\pi^2$
- Cuirasses disloquées et démantelées, \mathcal{G}^3
- Cuirasses en place sur péridotites
- Latérites minces sur péridotites, $\mathcal{A}\pi^2$
- Latérites épaisses sur péridotites, $\mathcal{A}\pi^1$

Nappe des péridotites

- Harzburgites, π^1
- Péridotites indifférenciées serpentinisées, π^2
- Serpentinites, Λ^1

Année d'acquisition

- Mission SGNC 2010
- Mission CNRT 2011
- Mission SGNC 2013
- Mission SGNC 2015

Contours Géologiques

- Faille principale observée
- Faille principale supposée
- Normal observé



Source
Service de la Géologie de Nouvelle-Calédonie (SGNC)
Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Énergie de Nouvelle-Calédonie (DIMENC)
1, ter rue E. Unger, Vallée du Tir - BP 465 - 98845 Nouméa Cédex, Nouvelle-Calédonie

Fonds topographiques : BDTOP0,
Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports Terrestres (DITTT)
RGNC91-93 - LambertNC

MASSIF DE SIREIS



CARTE GEOLOGIQUE

Légende

Surfaces Géologiques

Formations anthropiques

- Zones d'exploitations et déblais miniers, X4
- Décharges minières non contrôlées et coulées

Formations fluviales et littorales

- Formations littorales indifférenciées, M
- Alluvions actuelles et récentes, Fyz
- Alluvions anciennes, Fy

Formations d'épandages et de versants

- Eboulis de blocs de péridotites, E5

Formations d'altération

- Cuirasses disloquées et démantelées, \mathcal{C}^3
- Cuirasses en place sur péridotites
- Péridotites saines pouvant comporter des
- Altérites sur péridotites fortement tectonisées,
- Latérites minces sur péridotites, $\mathcal{A}\pi^2$
- Latérites épaisses sur péridotites, $\mathcal{A}\pi^1$
- Latérites indifférenciées sur péridotites, $\mathcal{A}\pi$

Nappe des péridotites

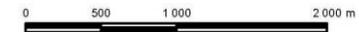
- Péridotites indifférenciées, π

Année d'acquisition

- Mission SGNC 2010
- Mission CNRT 2011
- Mission SGNC 2013
- Mission SGNC 2015

Contours Géologiques

- Faille principale observée
- Faille principale supposée
- Normal observé
- Trait de cote observé



Source
 Service de la Géologie de Nouvelle-Calédonie (SGNC)
 Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Énergie de Nouvelle-Calédonie (DIMENC)
 1, ter rue E. Unger, Vallée du Tir - BP 465 - 98845 Nouméa Cédex, Nouvelle-Calédonie

Fonds topographiques : BDTOP0,
 Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports Terrestres (DITTT)

RGNC91-93 - LambertNC

SECTEUR DE PORO

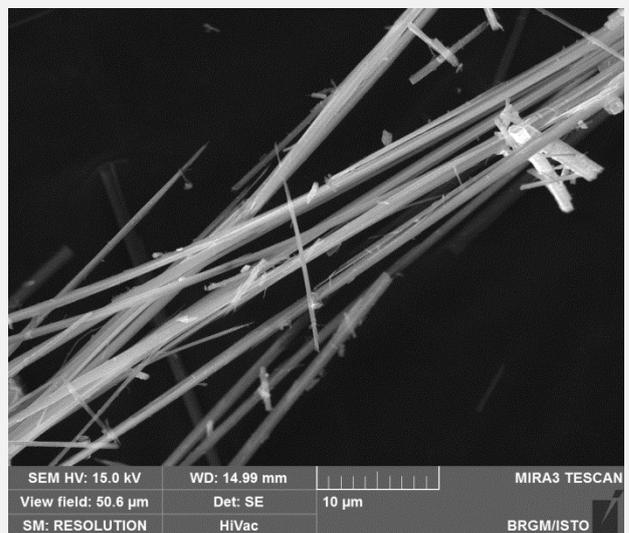
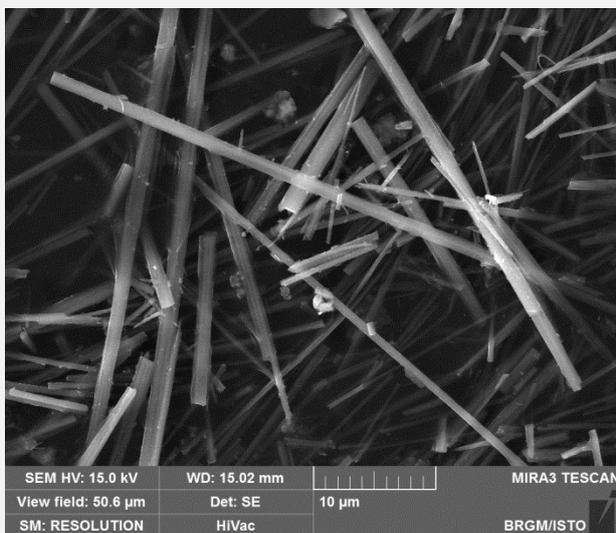
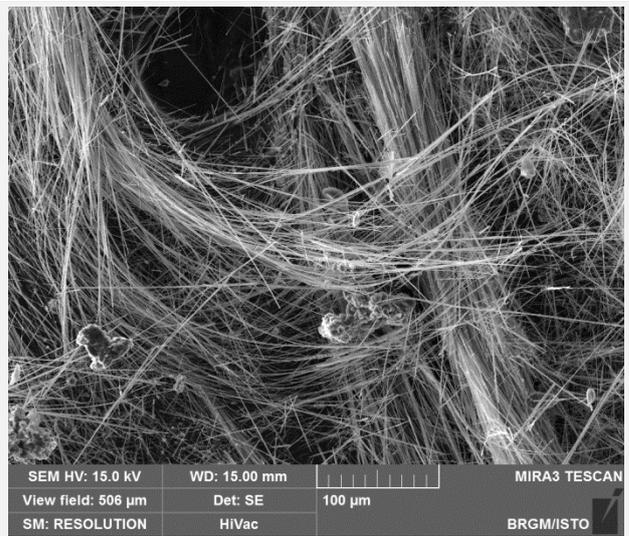
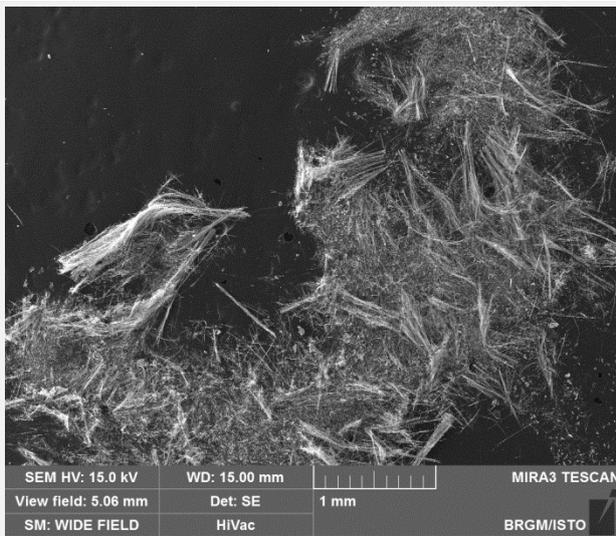
Annexe 2

Fiches analytiques

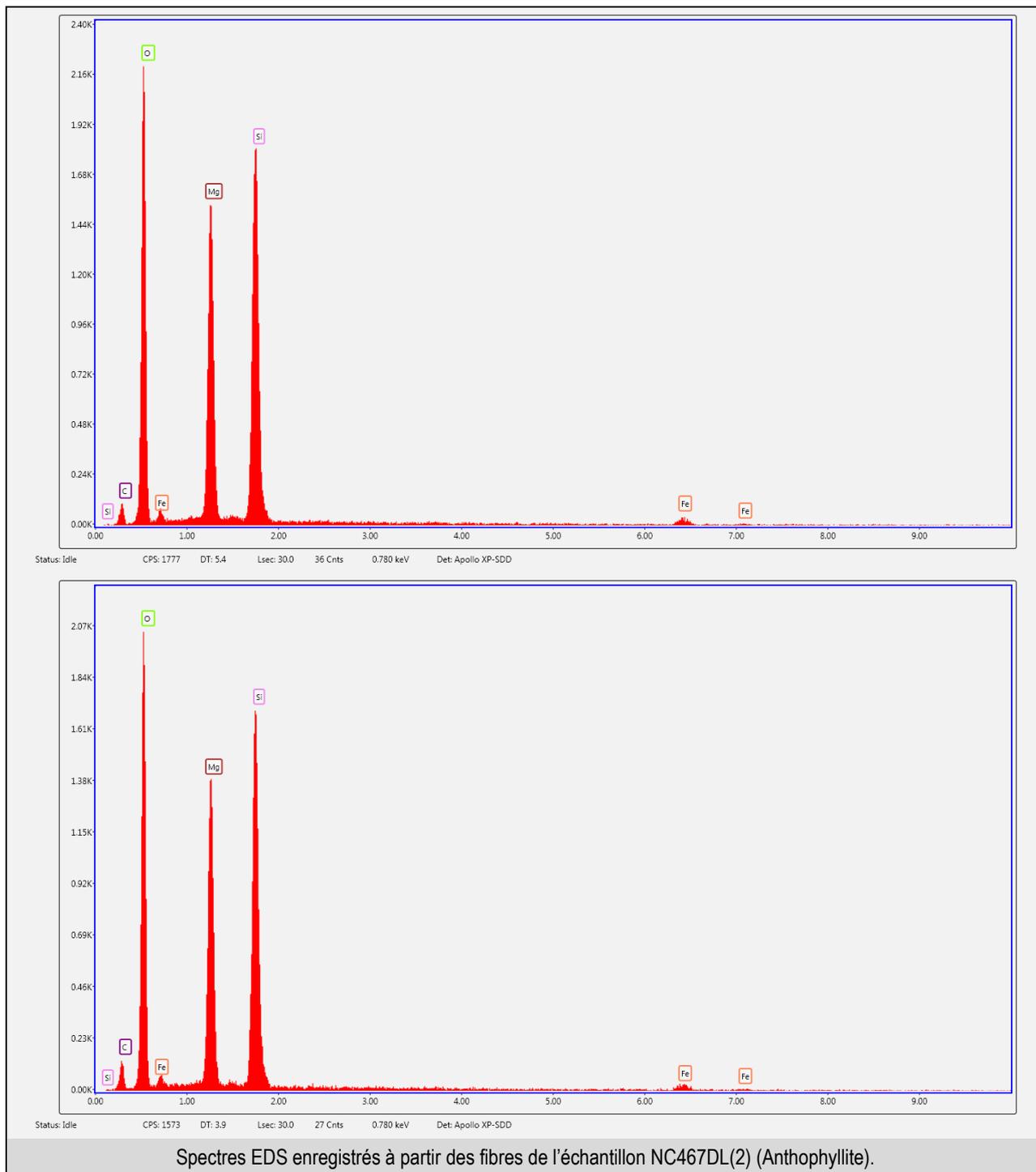
Mine : VULCAIN	Site : NC467DL(2)	XWGS84 : 166,35818	YWGS84 : -21,91645
Date de la visite : 31/03/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		



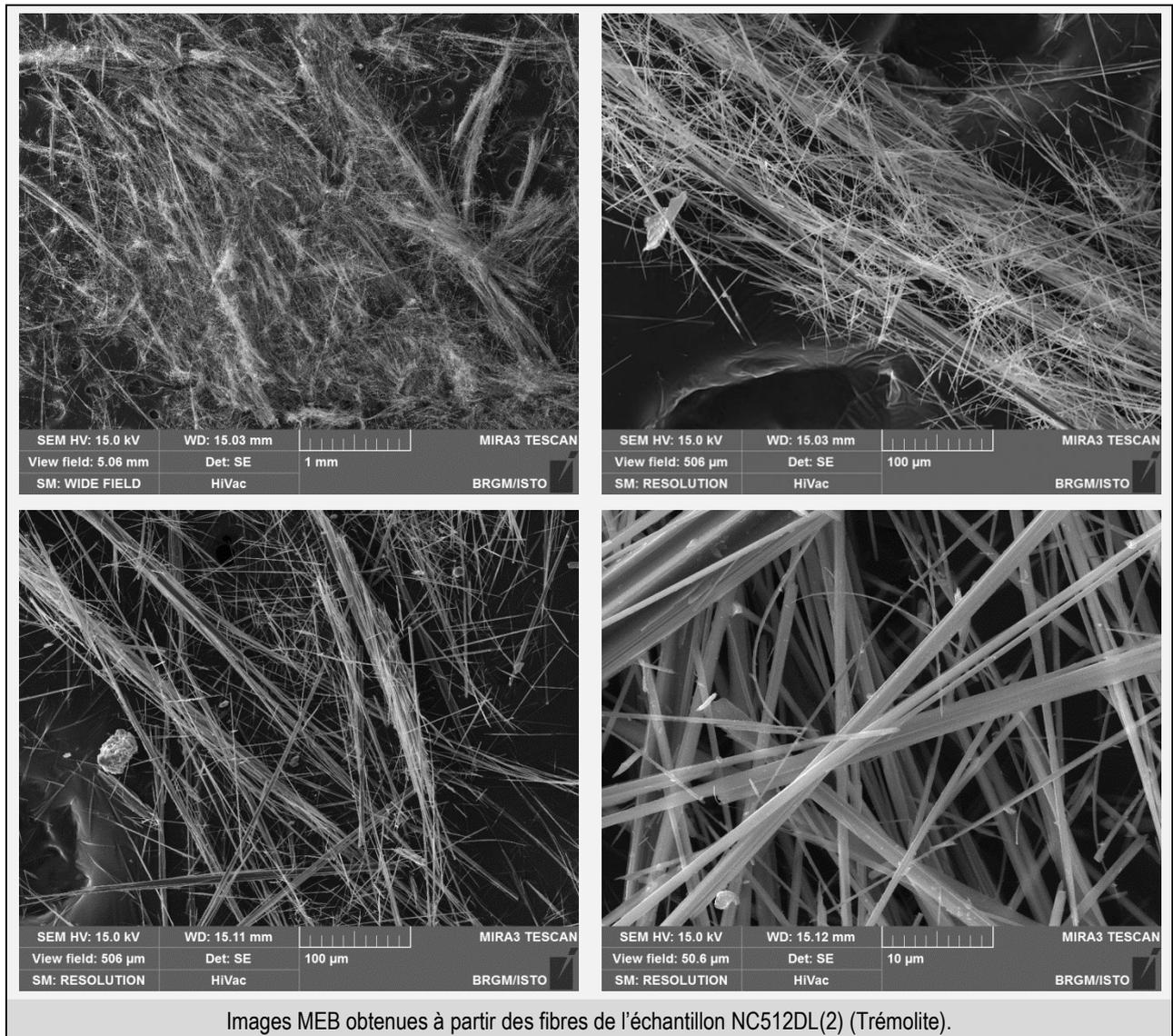
Veine à longues fibres blanches correspondant à l'échantillon NC467DL(2).
Sur la photo de droite, des fibres nacrées et souples se détachent des grandes fibres rigides.

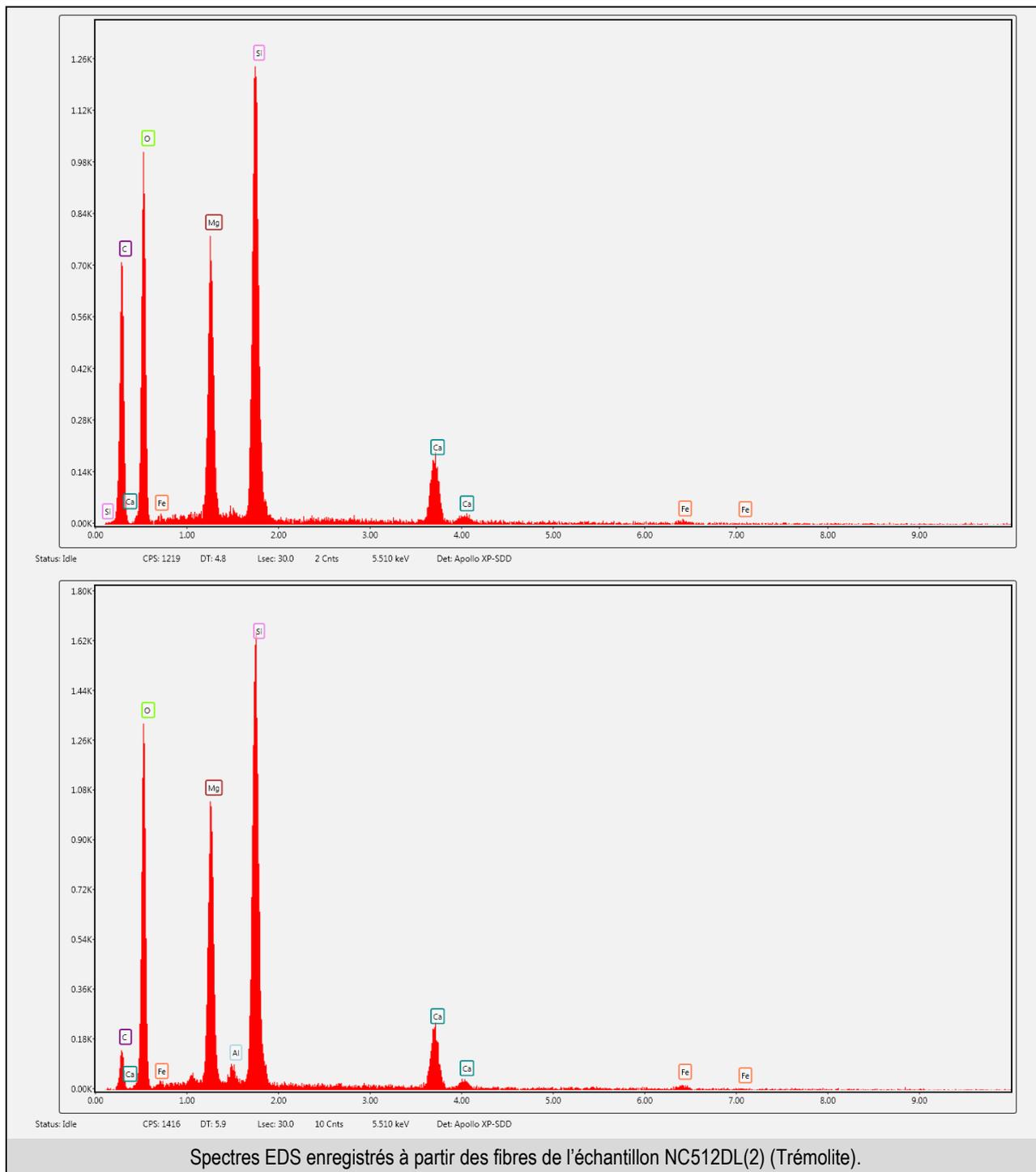


Images MEB obtenues à partir des fibres de l'échantillon NC467DL(2) (Anthophyllite).

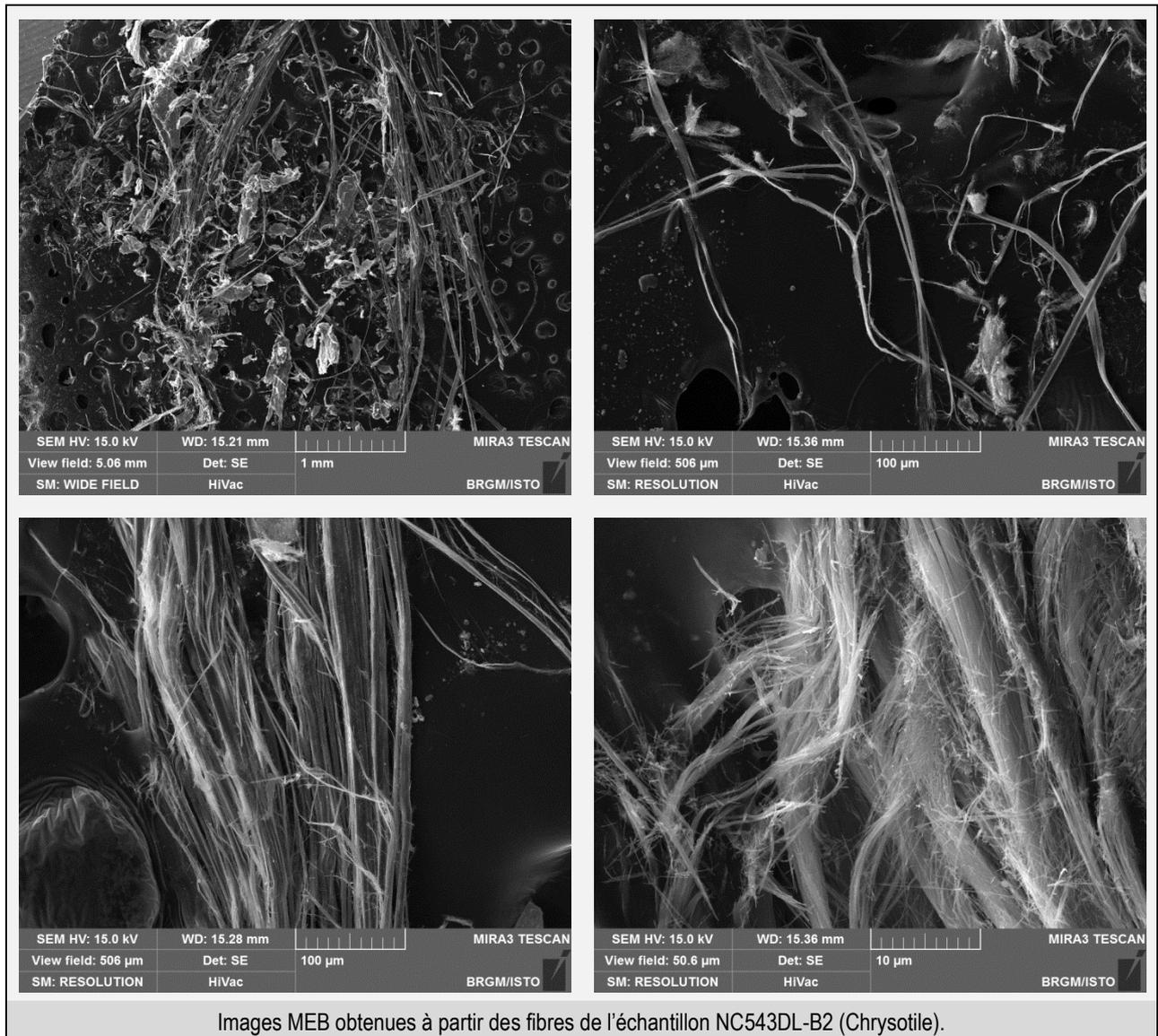
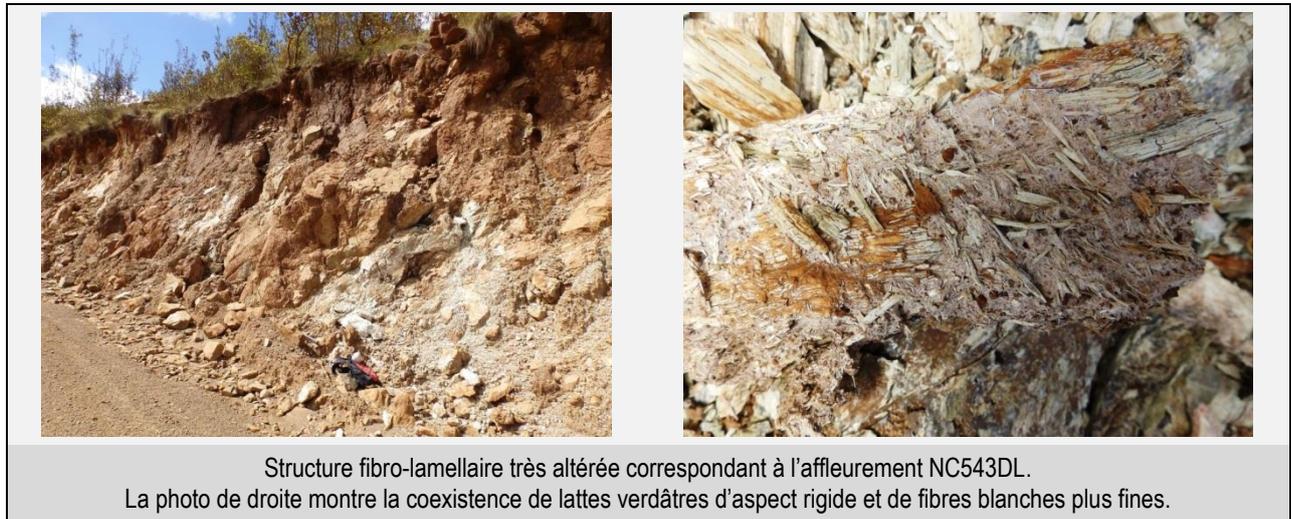


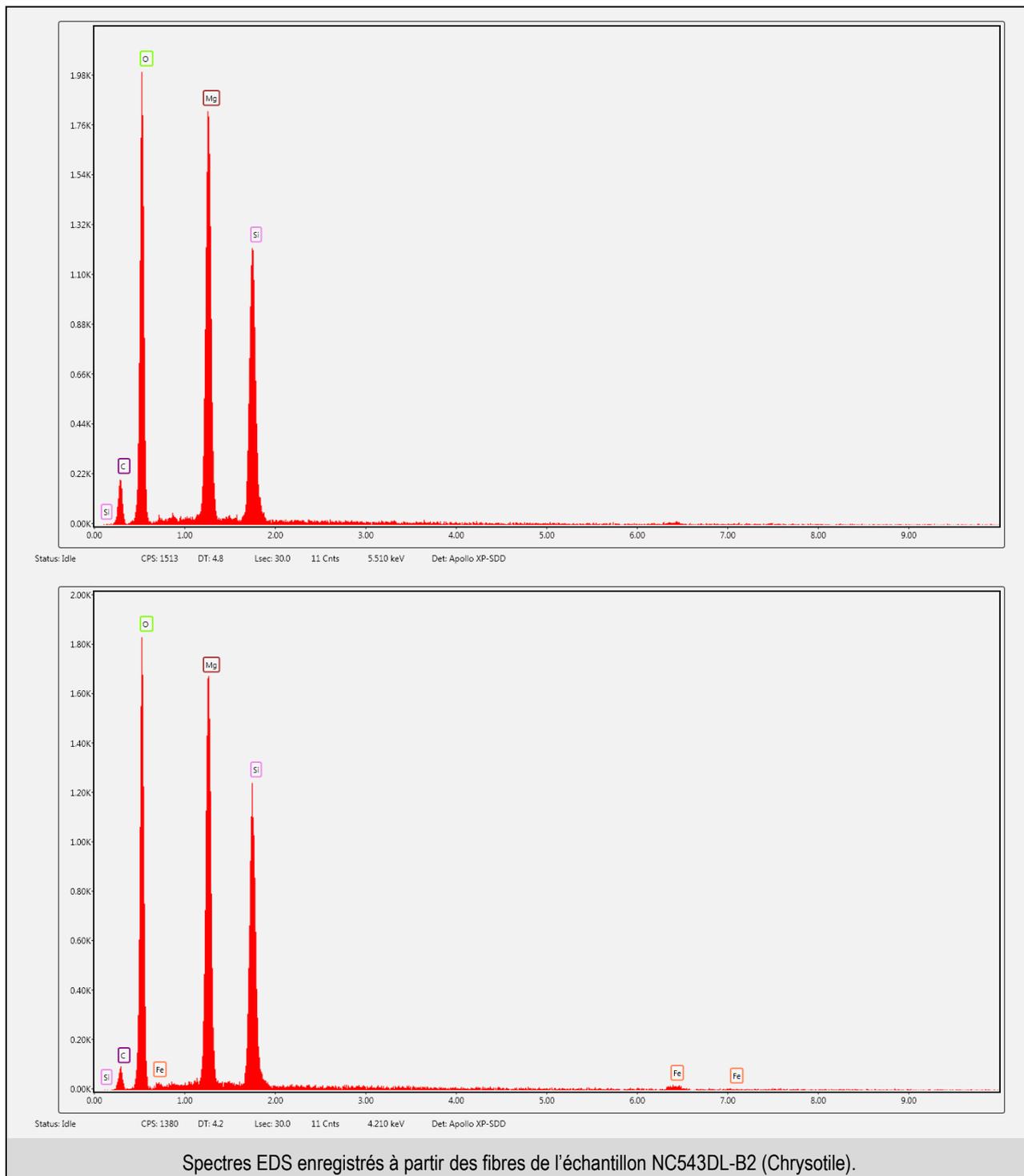
Mine : PORO-BONINI	Site : NC512DL(2)	XWGS84 : 165,73763	YWGS84 : -21,30308
Date de la visite : 09/04/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		





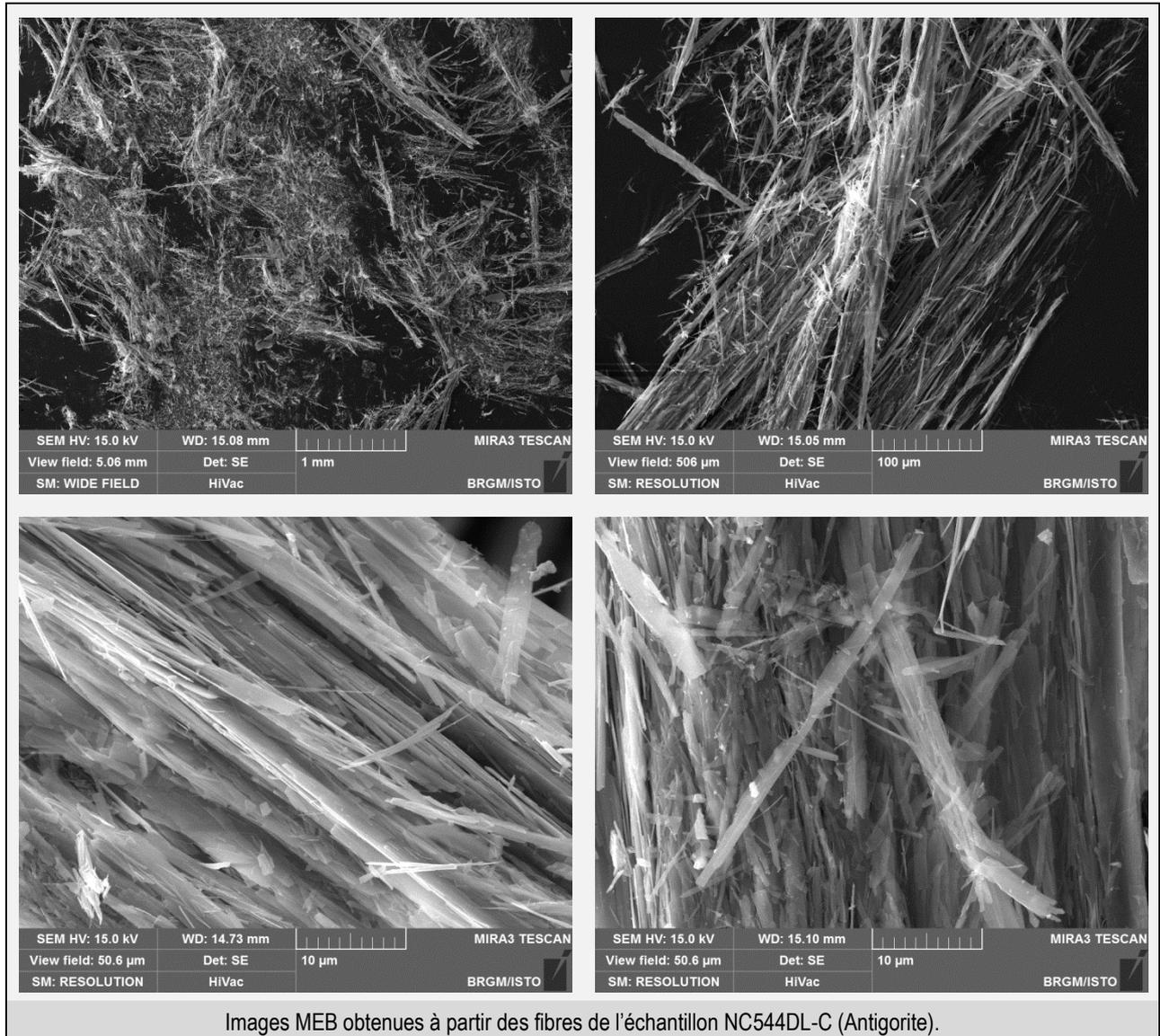
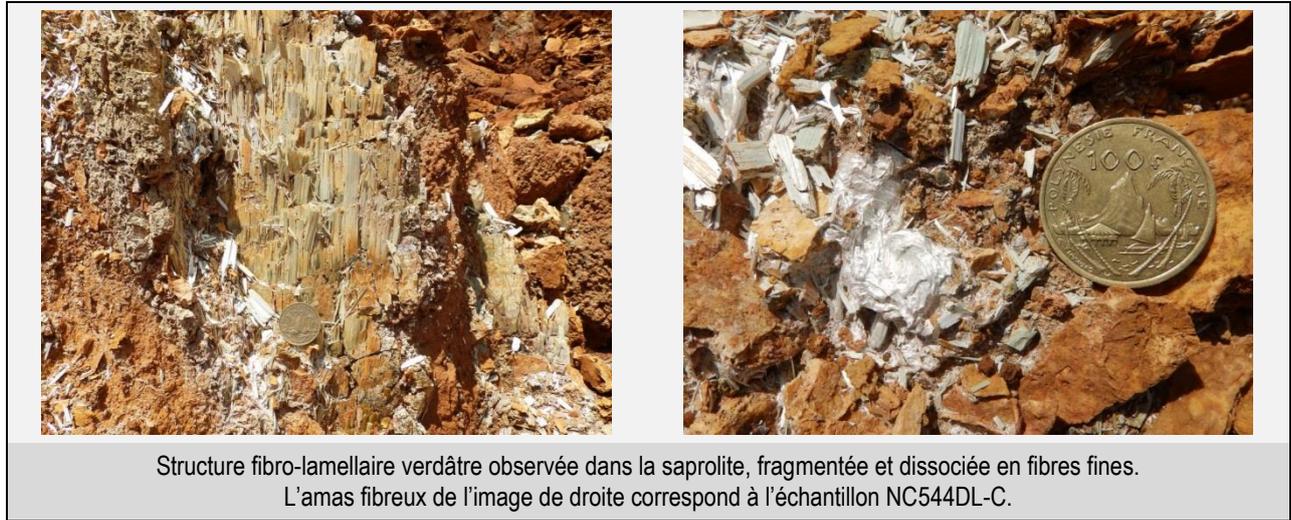
Mine : VULCAIN	Site : NC543DL	XWGS84 : 166,34691	YWGS84 : -21,90755
Date de la visite : 28/03/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		

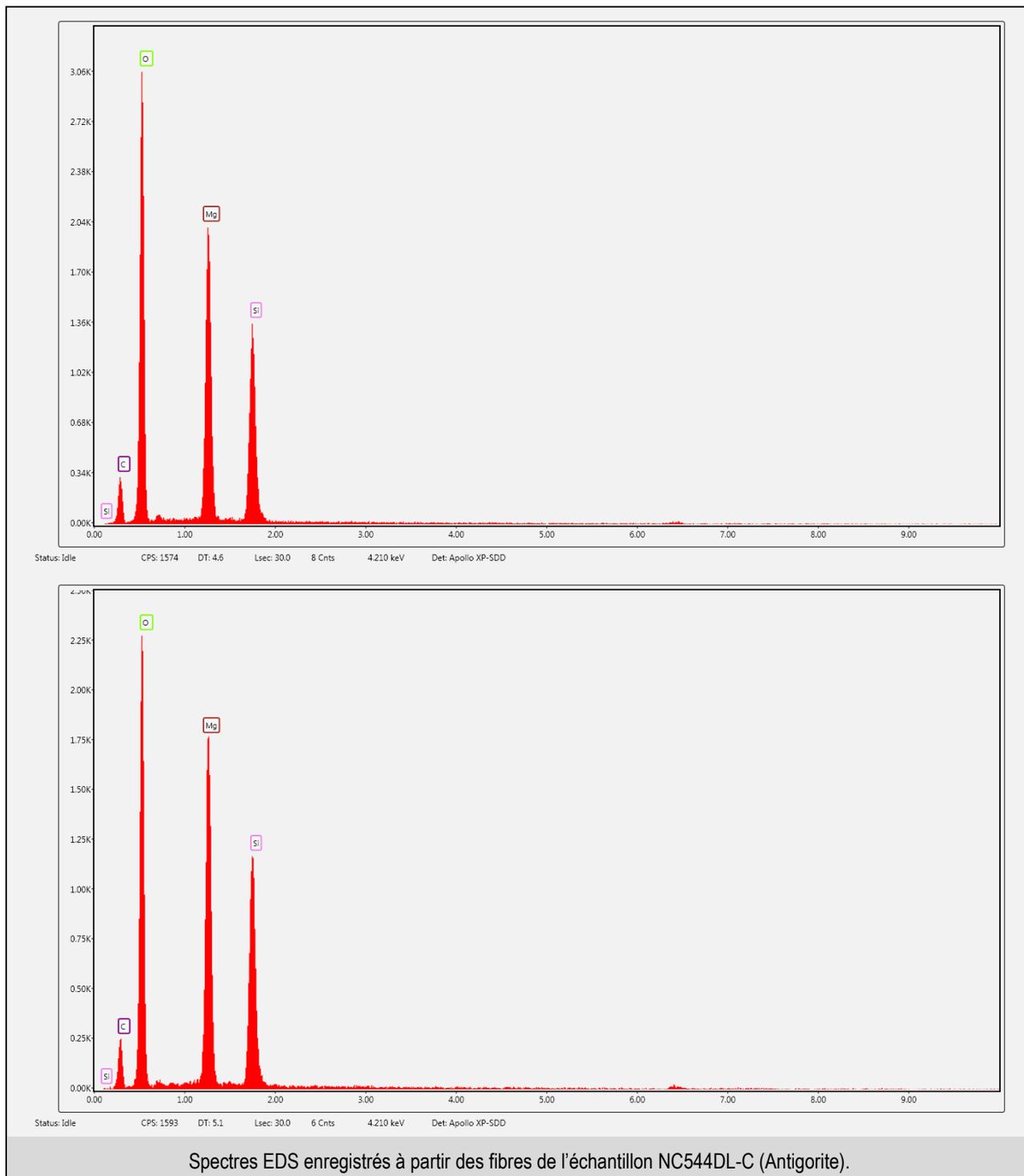




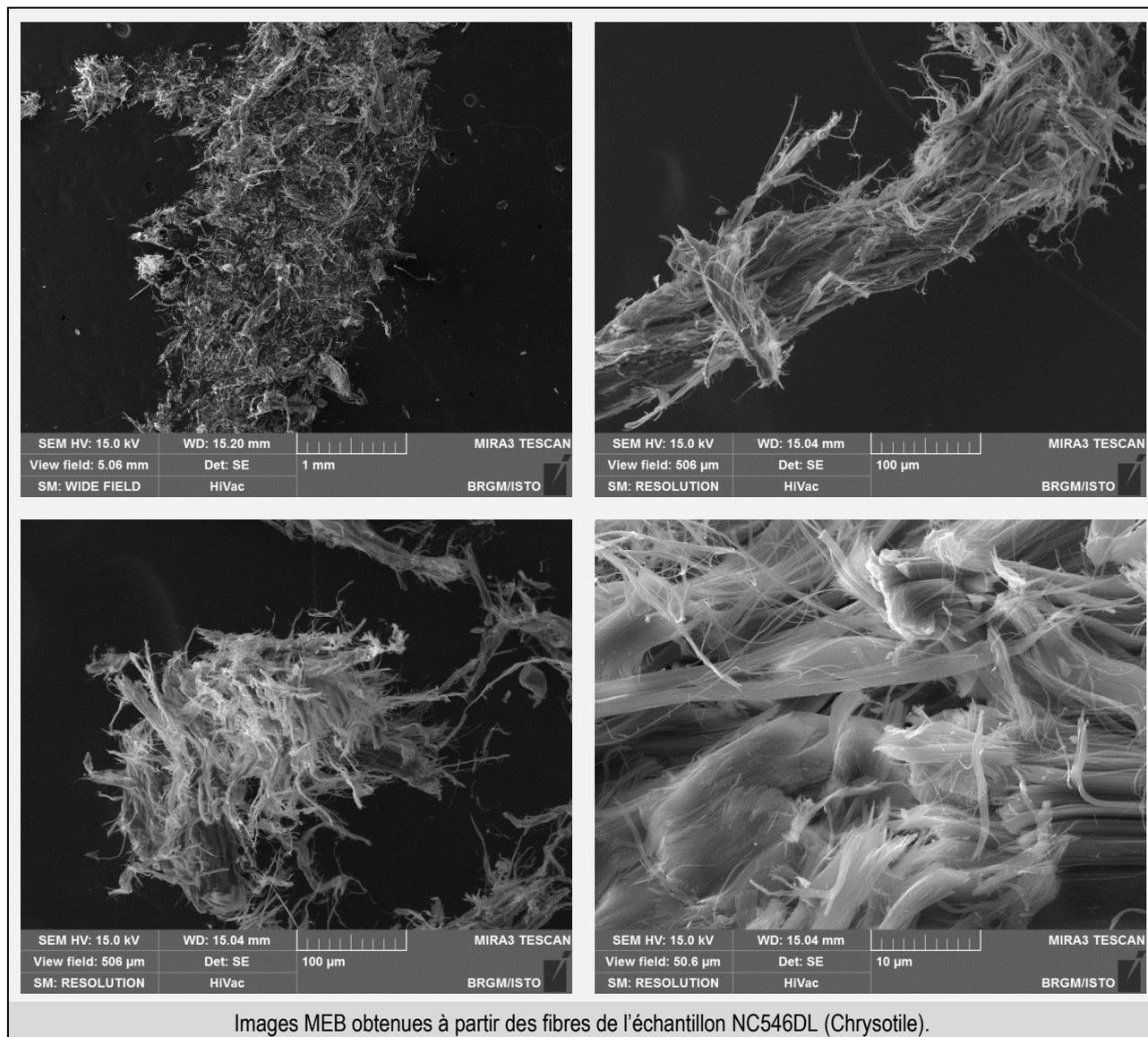
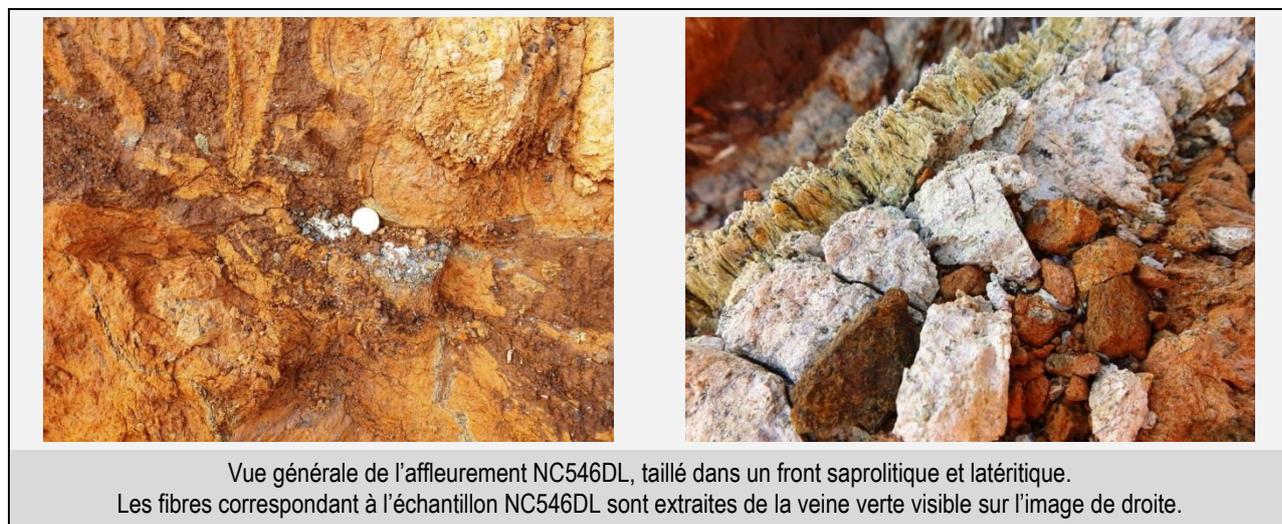
Spectres EDS enregistrés à partir des fibres de l'échantillon NC543DL-B2 (Chrysotile).

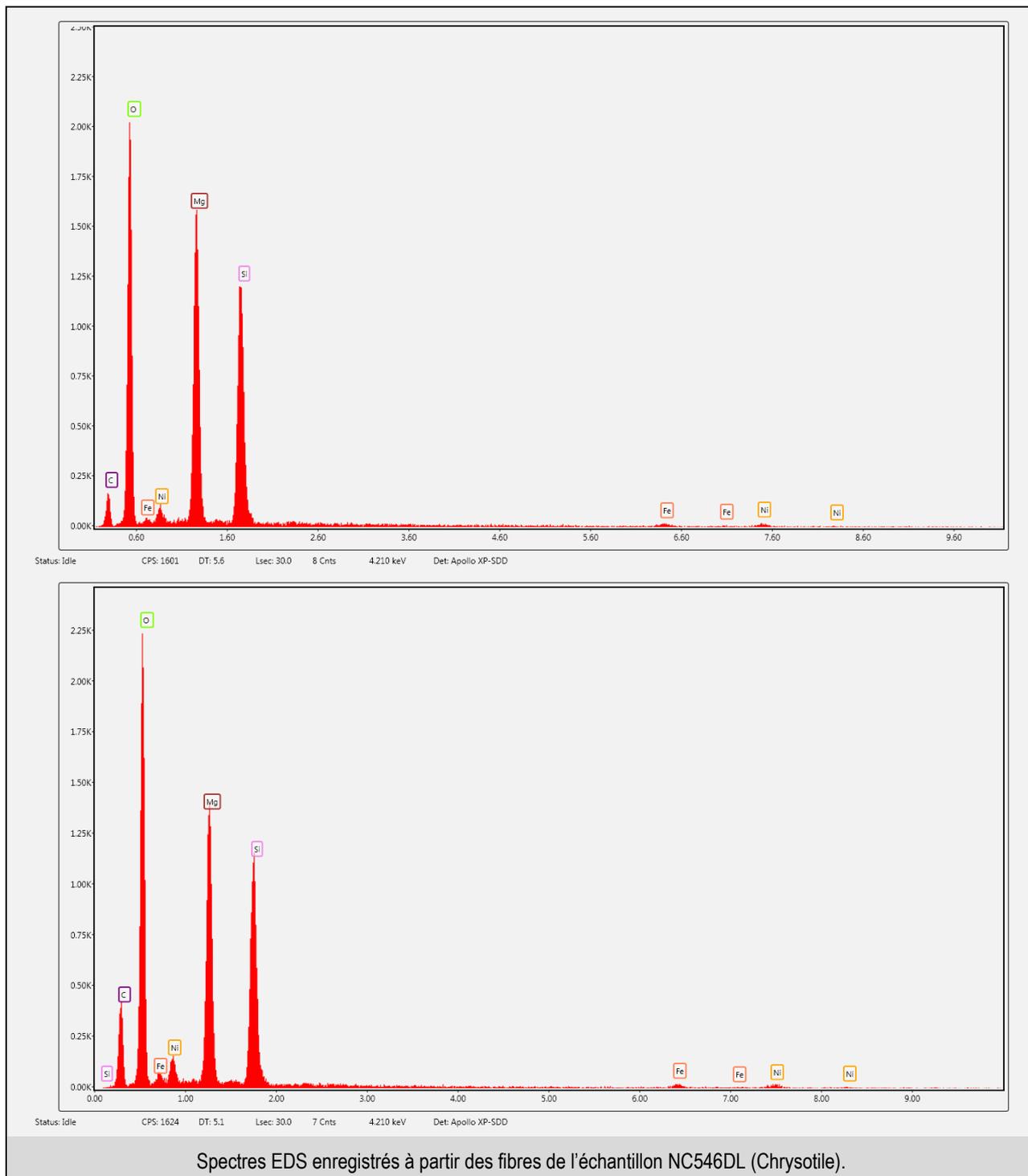
Mine : VULCAIN	Site : NC544DL	XWGS84 : 166,36028	YWGS84 : -21,90794
Date de la visite : 28/03/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		





Mine : VULCAIN	Site : NC546DL	XWGS84 : 166,36302	YWGS84 : -21,91400
Date de la visite : 28/03/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		

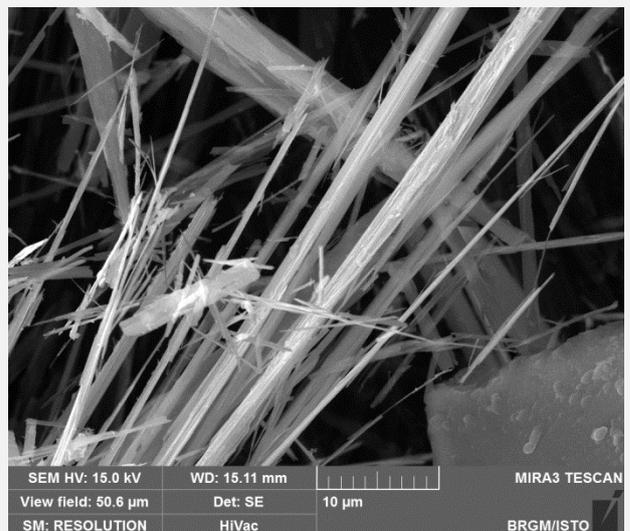
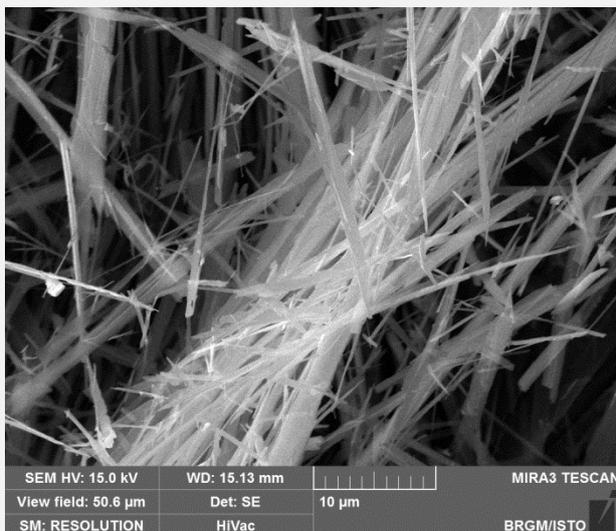
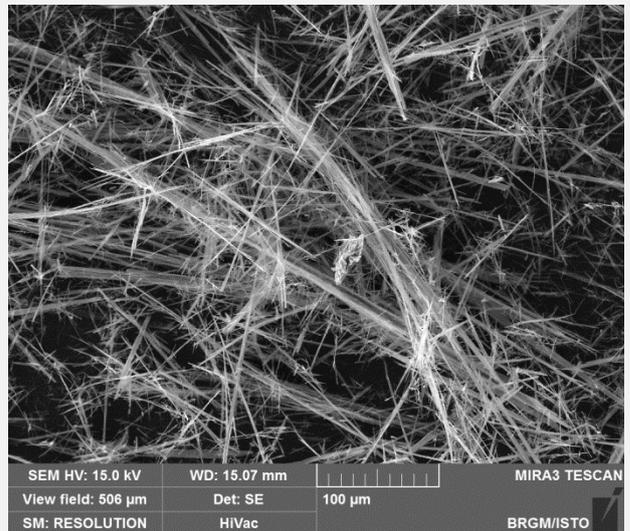
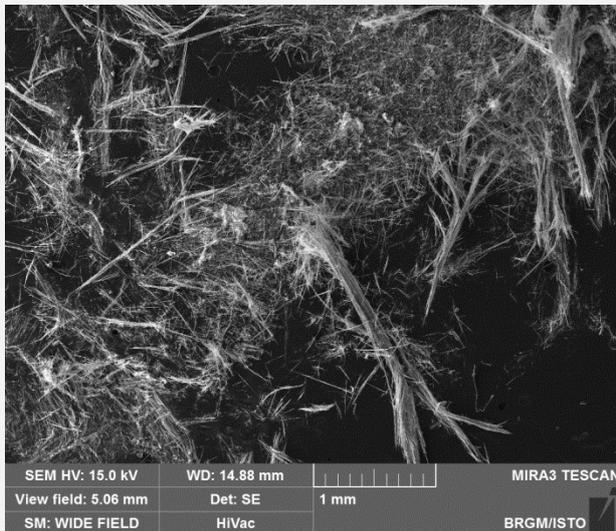




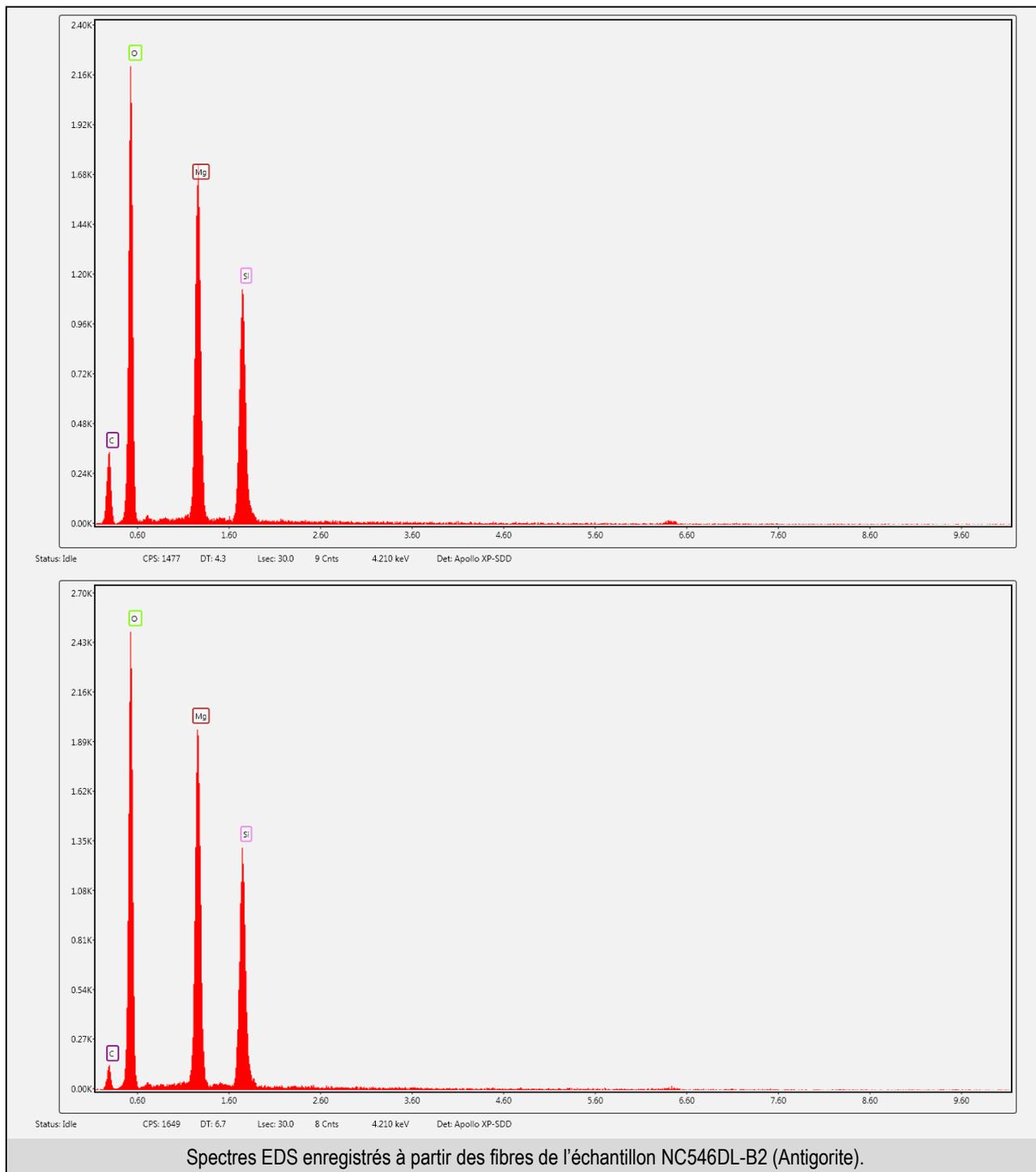
Mine : VULCAIN	Site : NC546DL	XWGS84 : 166,36302	YWGS84 : -21,91400
Date de la visite : 28/03/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		



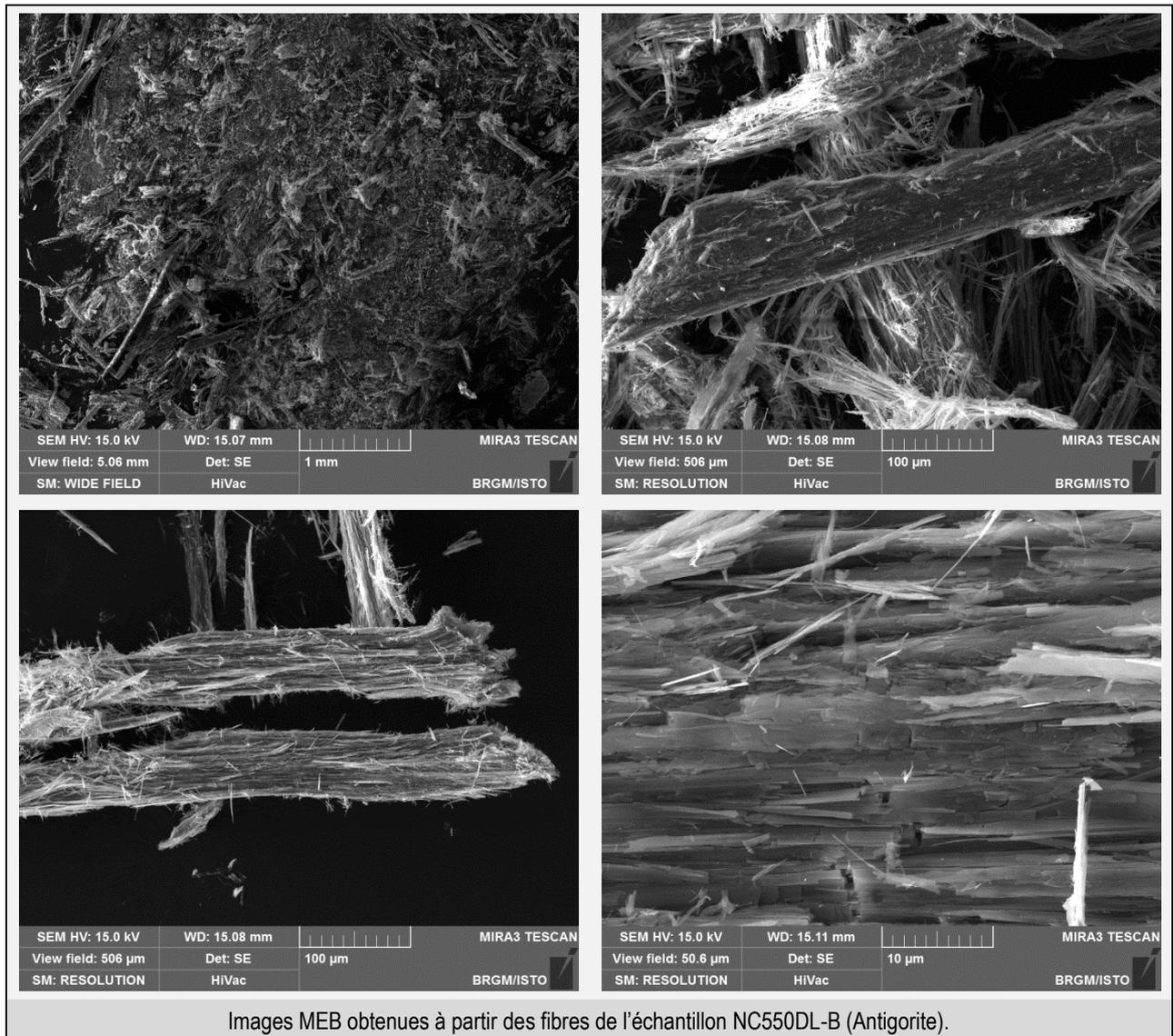
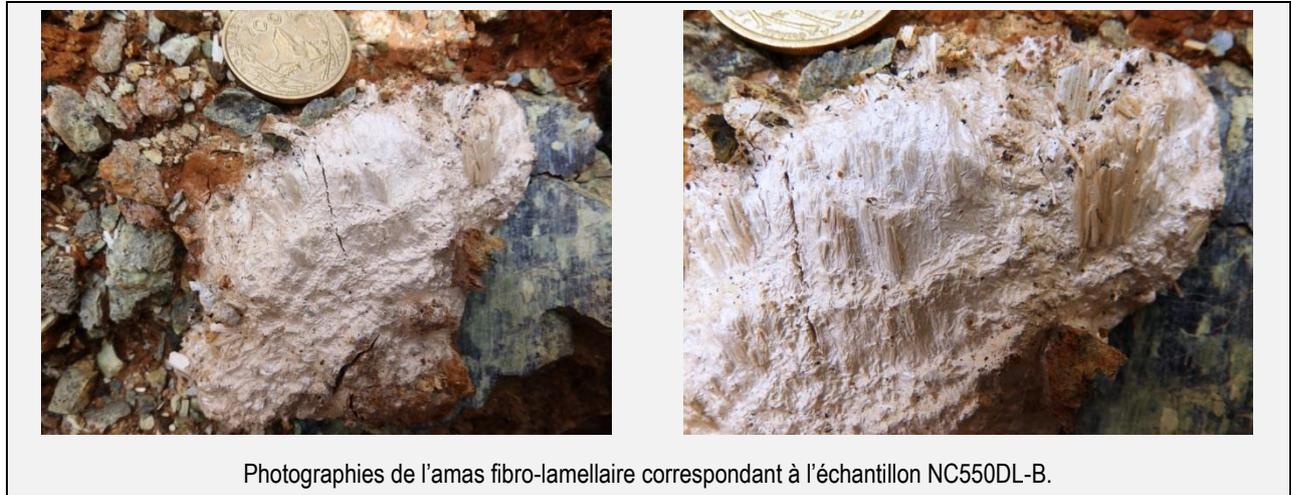
Vue générale de l'affleurement NC546DL, taillé dans un front saprolitique et latéritique.
Les fibres correspondant à l'échantillon NC546DL-B2 sont issues de la veine fibro-lamellaire visible sur l'image de droite.

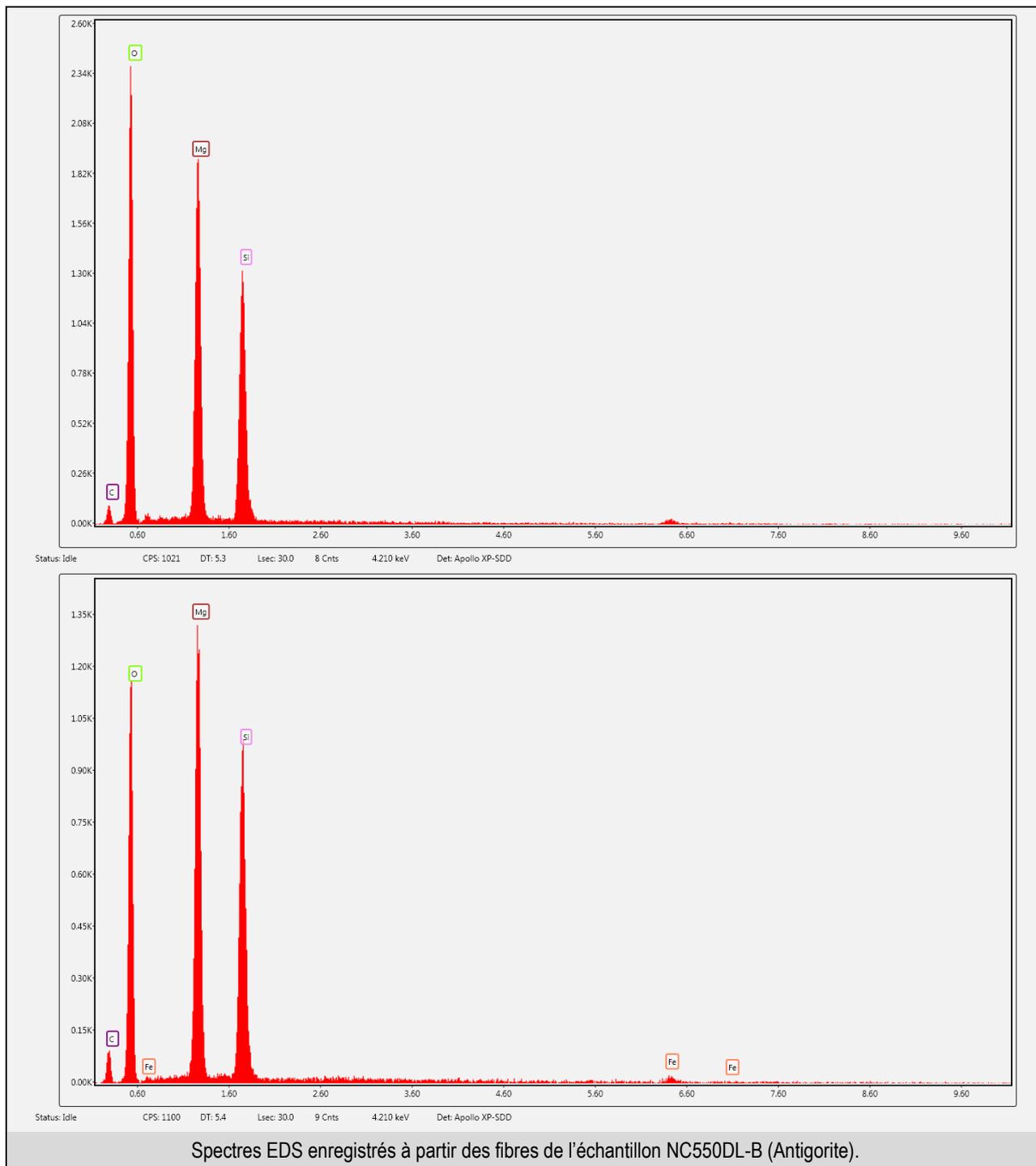


Images MEB obtenues à partir des fibres de l'échantillon NC546DL-B2 (Antigorite).



Mine : VULCAIN	Site : NC550DL	XWGS84 : 166,35979	YWGS84 : - 21,91570
Date de la visite : 31/03/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		

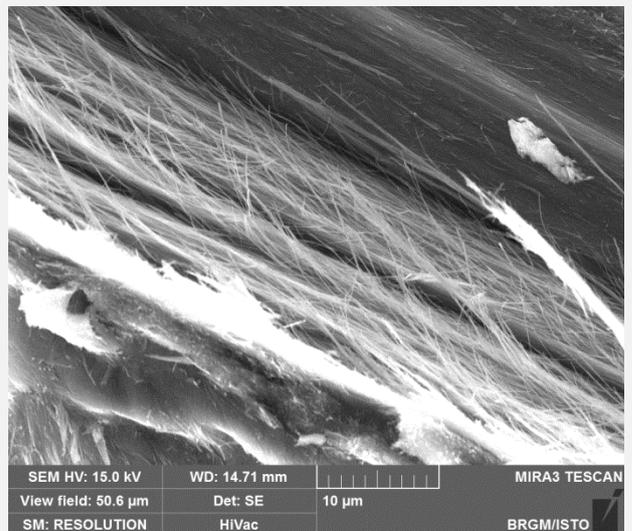
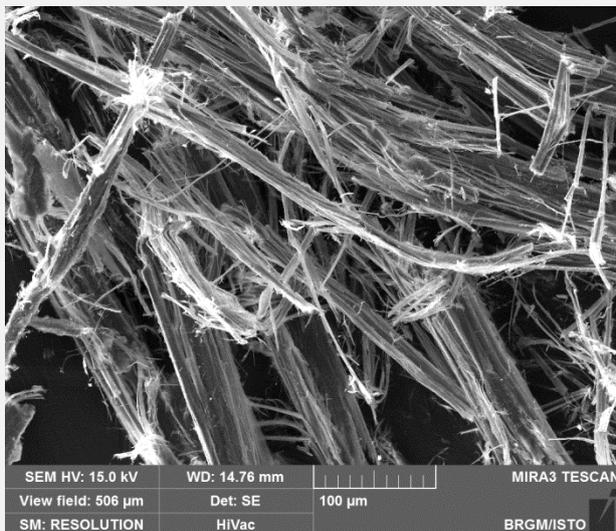
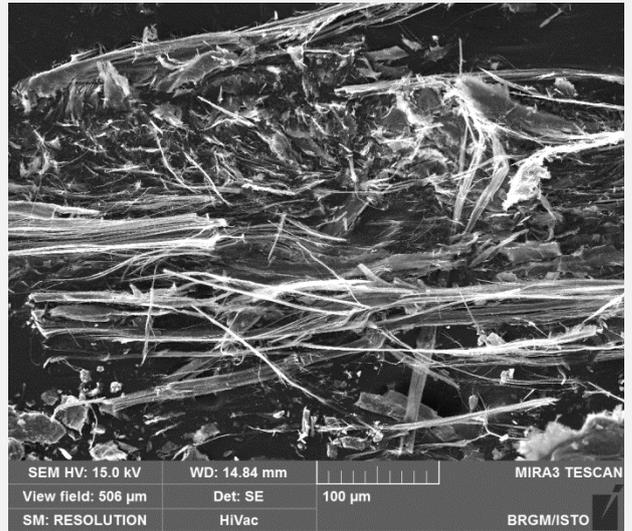
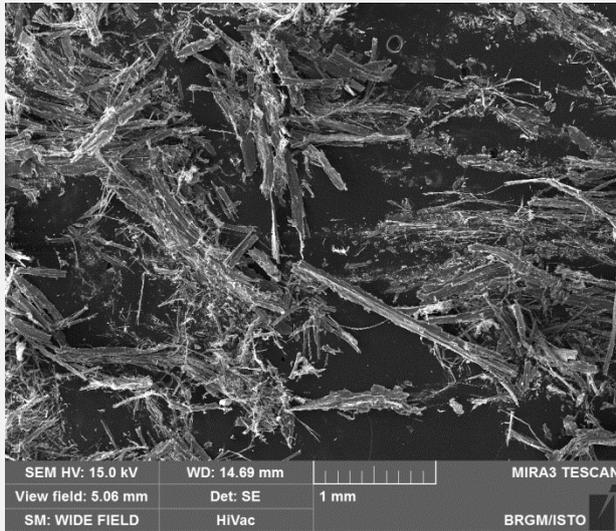




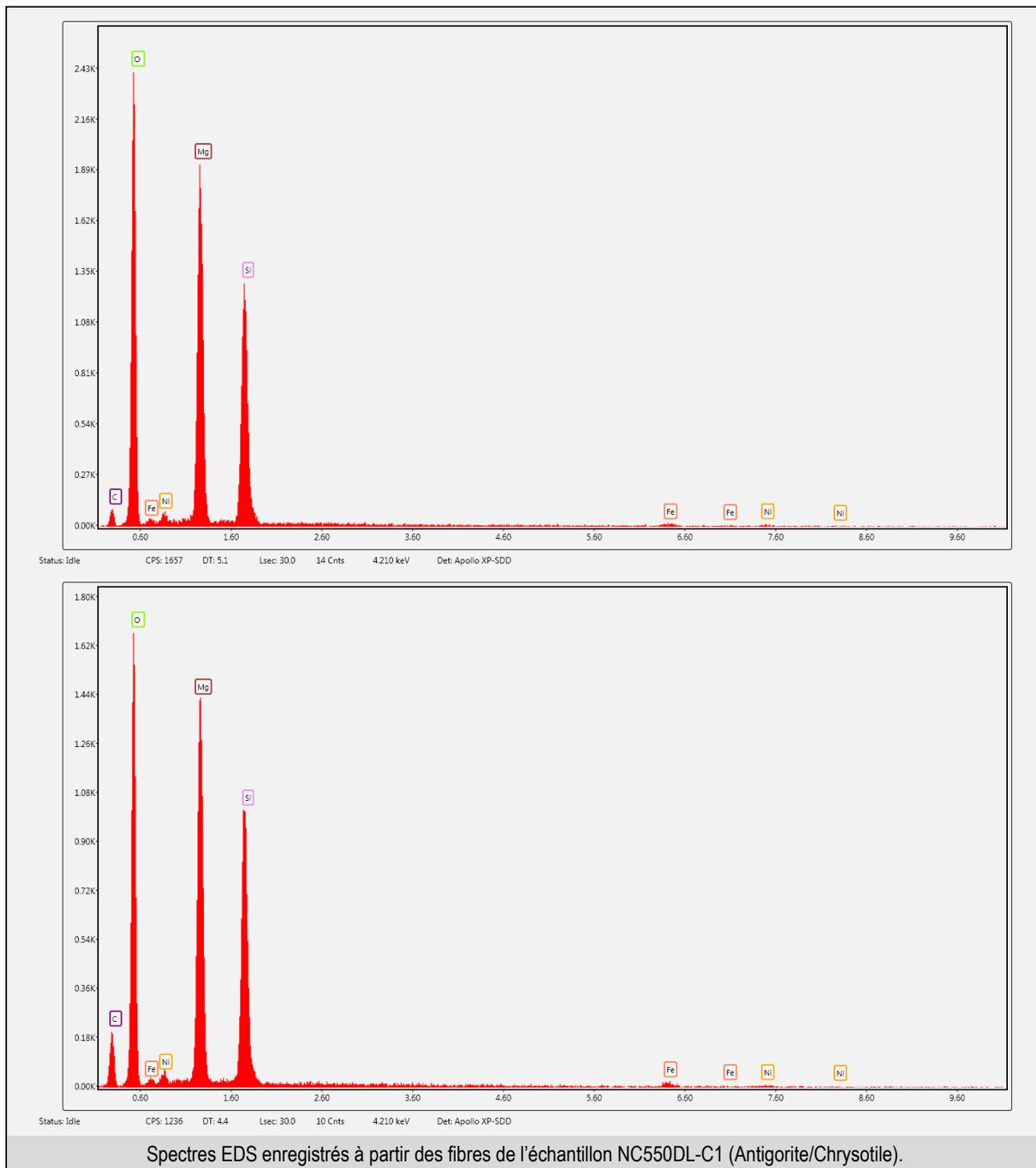
Mine : VULCAIN	Site : NC550DL	XWGS84 : 166,35979	YWGS84 : -21,91570
Date de la visite : 31/03/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		



Vues rapprochées du plan fibro-lamellaire correspondant à l'échantillon NC550DL-C1.



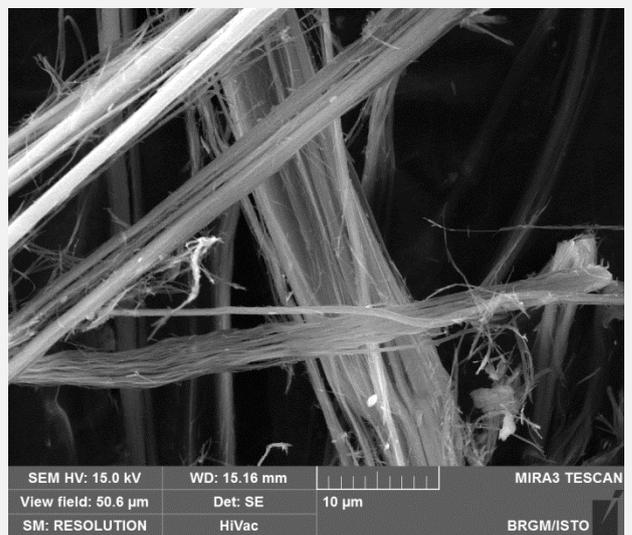
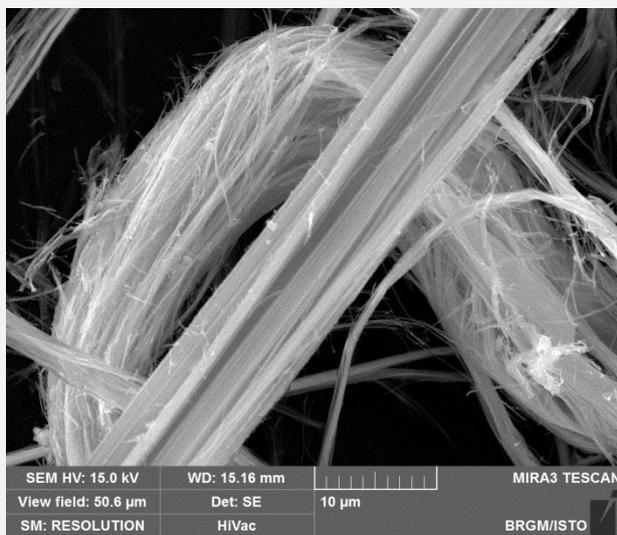
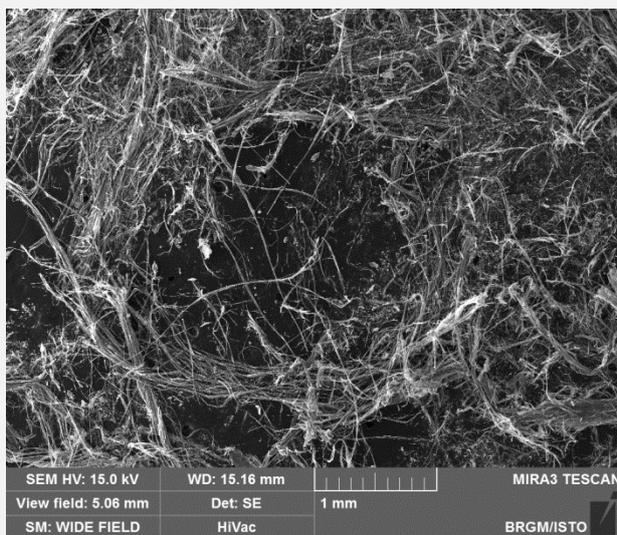
Images MEB obtenues à partir des fibres de l'échantillon NC550DL-C1 (Antigorite/Chrysotile).



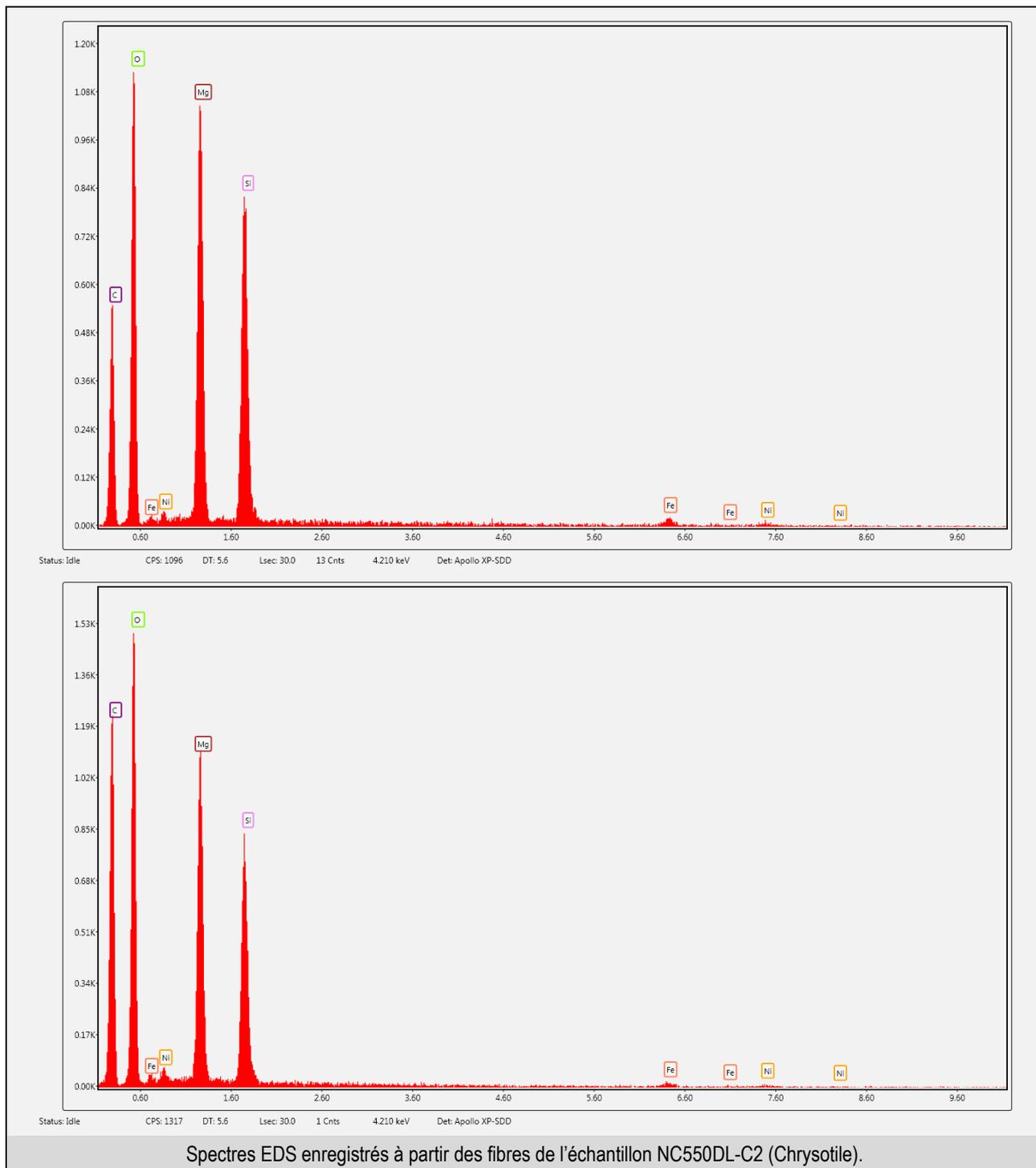
Mine : VULCAIN	Site : NC550DL	XWGS84 : 166,35979	YWGS84 : -21,91570
Date de la visite : 31/03/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		



Vues rapprochées du plan fibro-lamellaire observée au niveau du site NC550DL.
Les fibres les plus souples correspondent à l'échantillon NC550DL-C2.



Images MEB obtenues à partir des fibres de l'échantillon NC550DL-C2 (Chrysotile).



13 Cnts

1 Cnts

4.210 keV

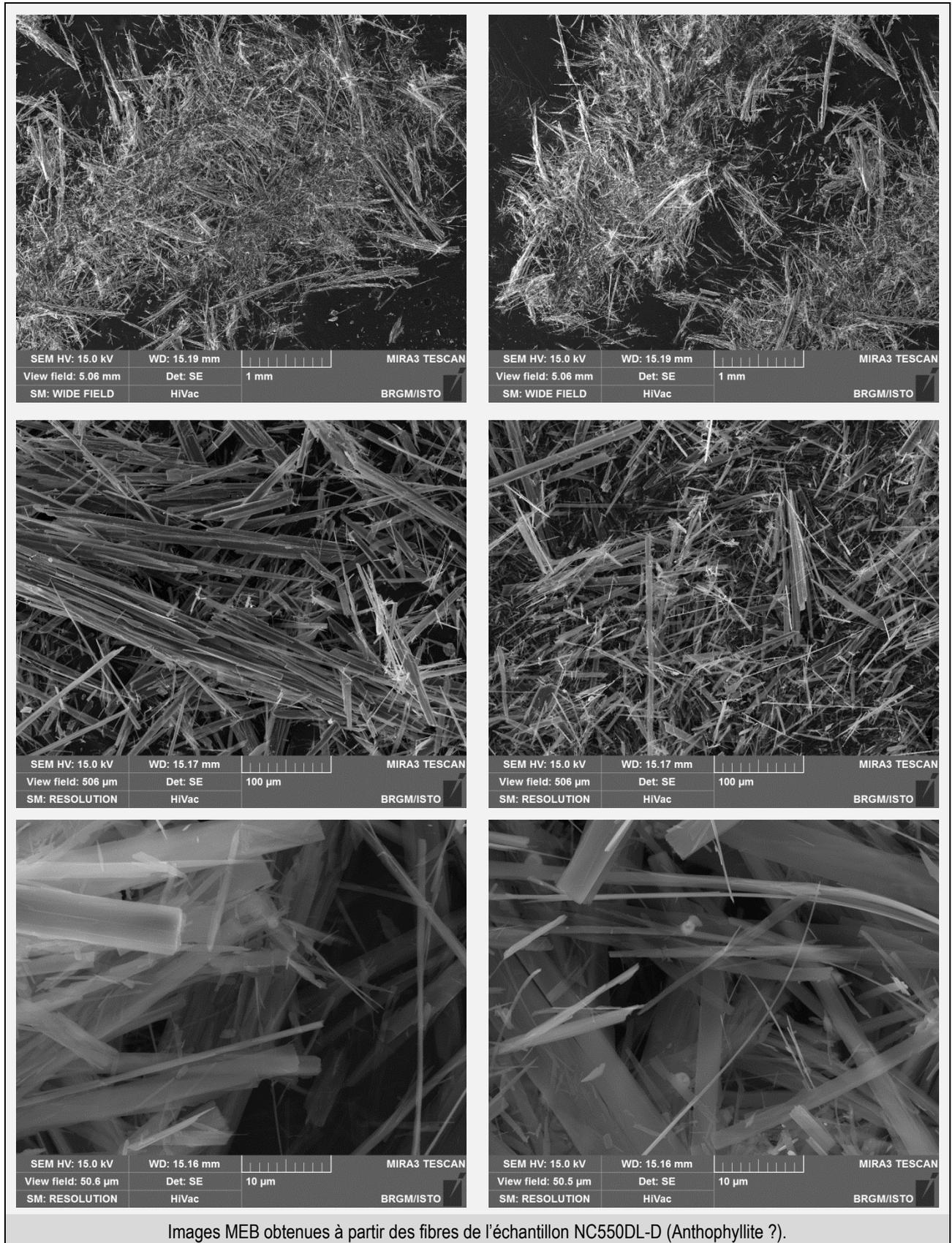
4.210 keV

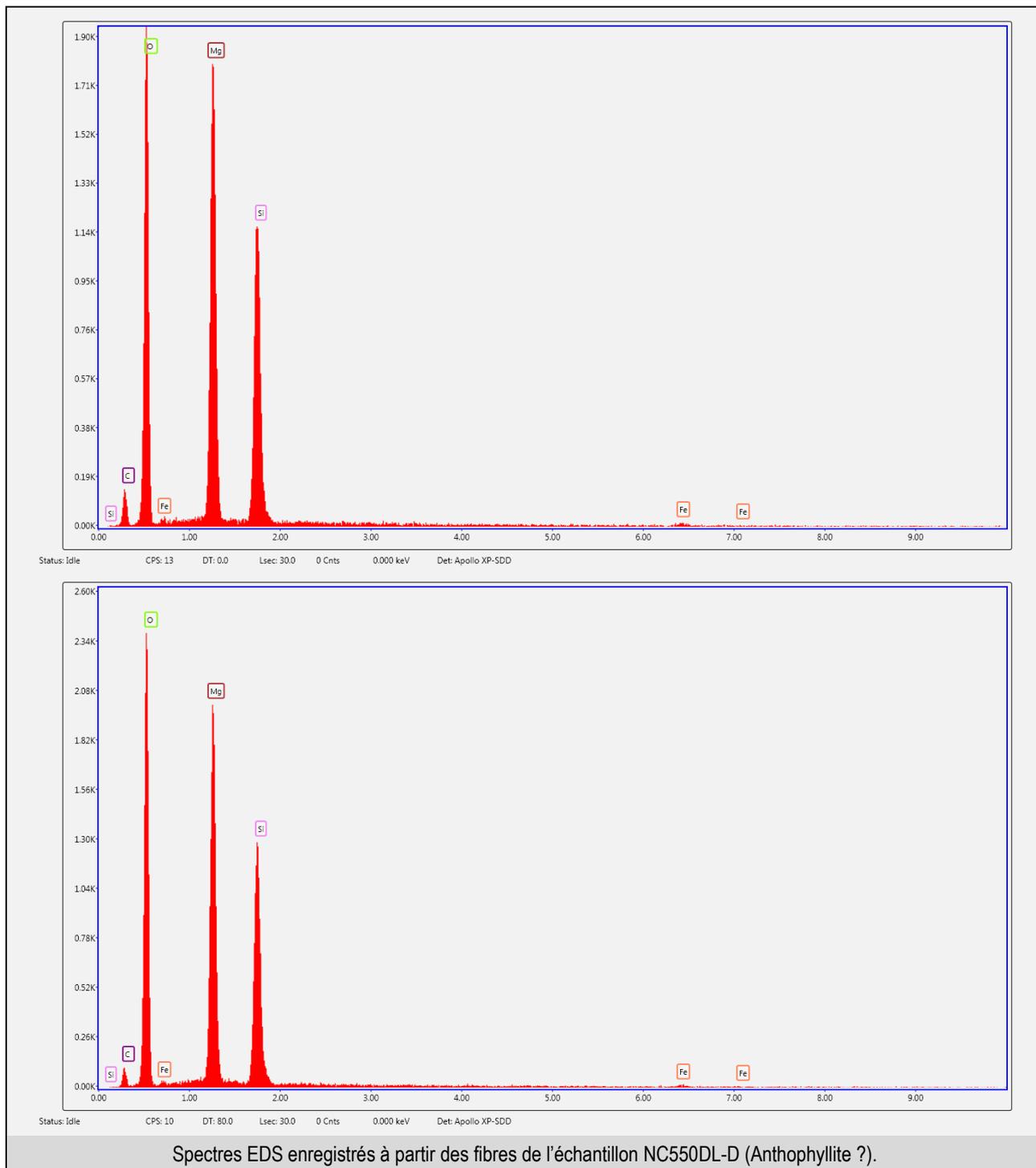
Det: Apollo XP-SDD

Det: Apollo XP-SDD

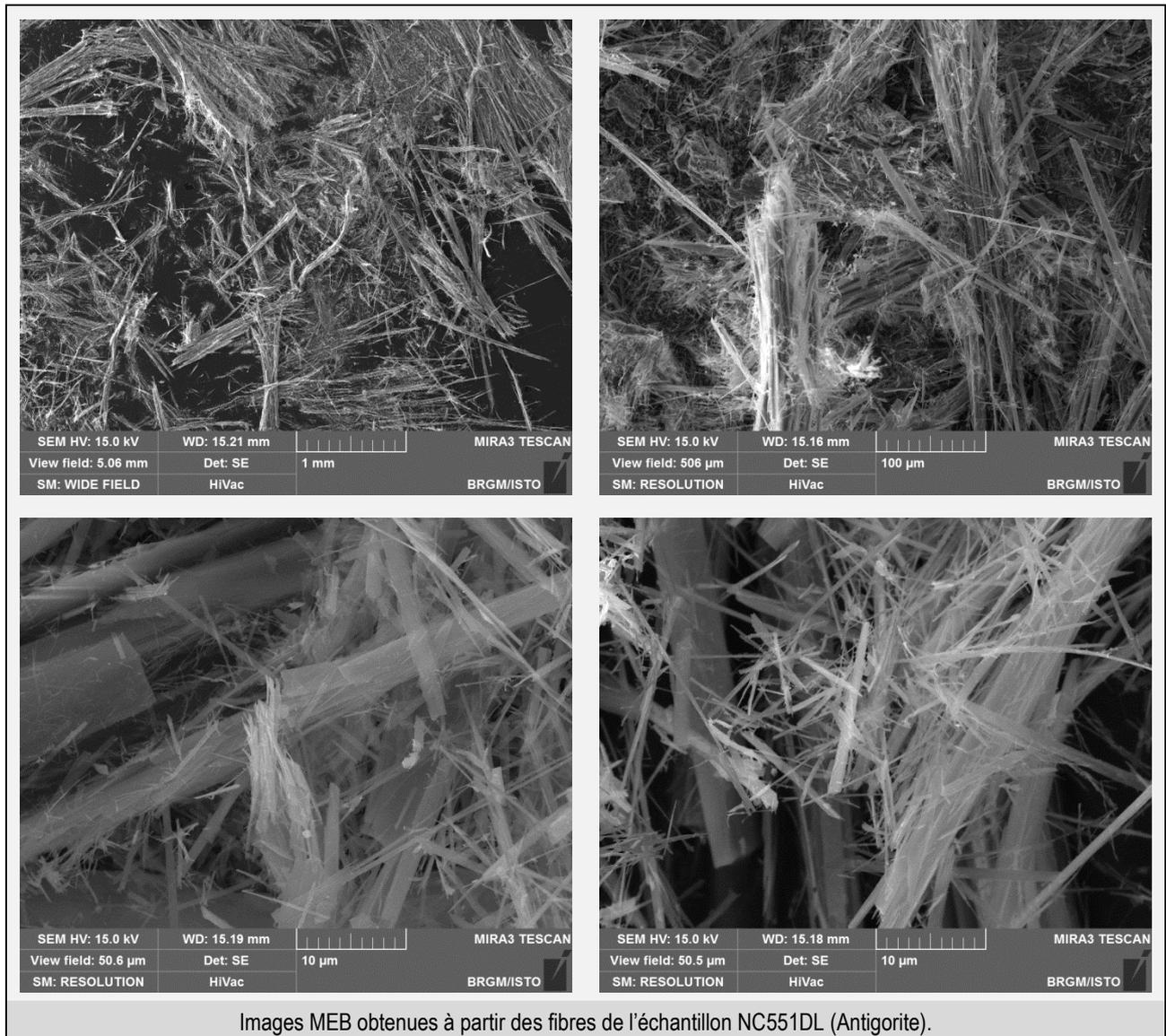
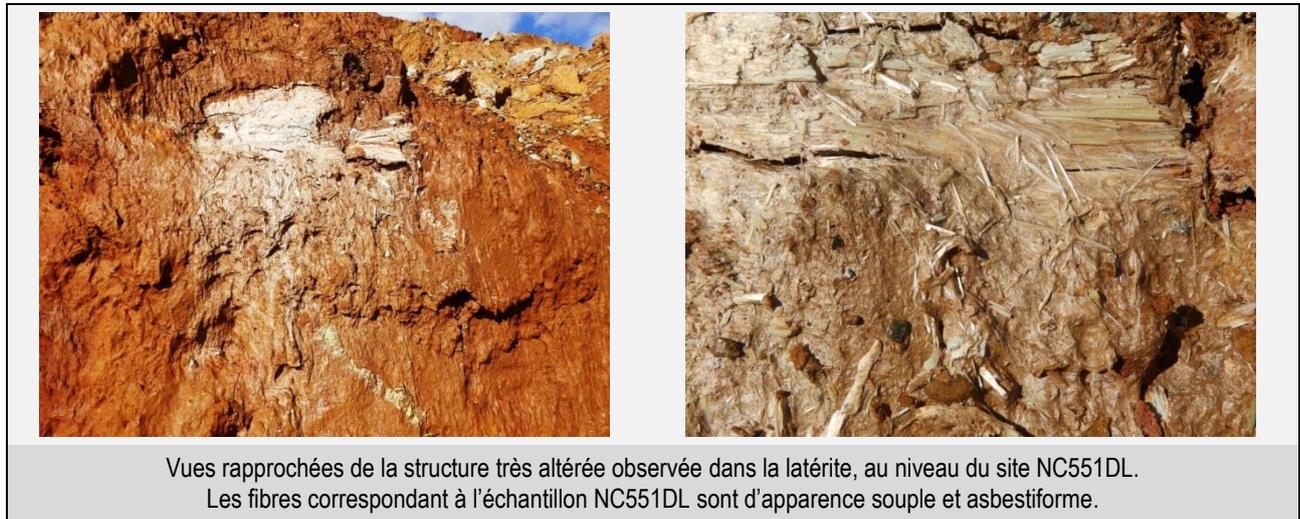
Spectres EDS enregistrés à partir des fibres de l'échantillon NC550DL-C2 (Chrysotile).

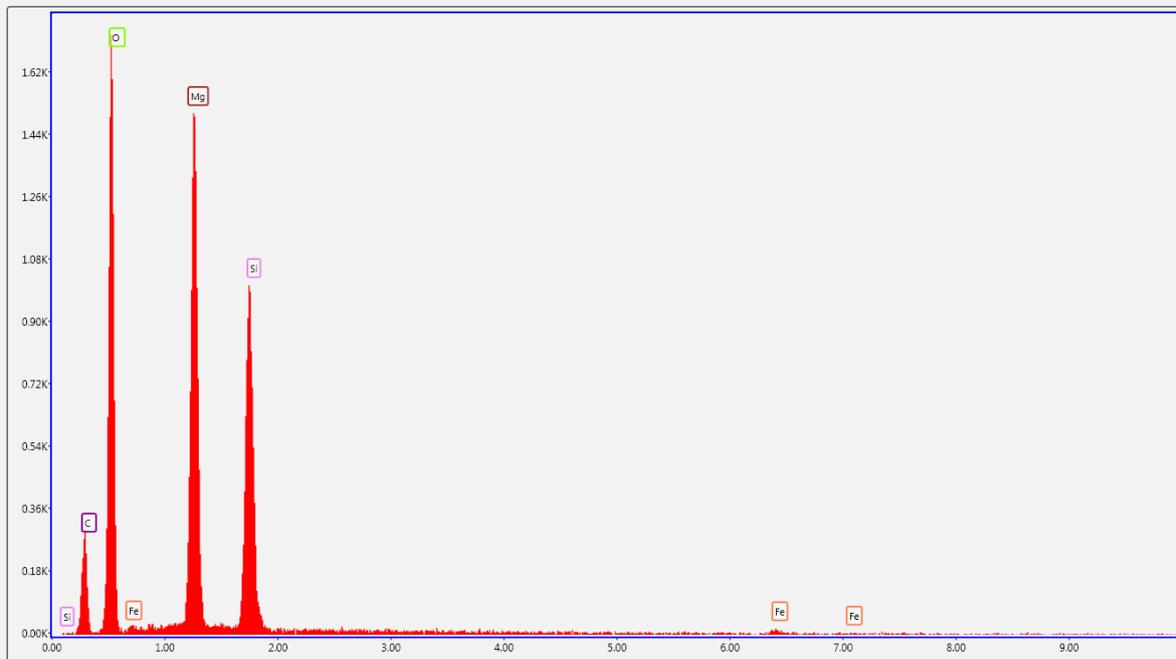
Mine : VULCAIN	Site : NC550DL	XWGS84 : 166,35979	YWGS84 : -21,91570
Date de la visite : 28/03/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		





Mine : VULCAIN	Site : NC551DL	XWGS84 : 166,36245	YWGS84 : -21,92001
Date de la visite : 31/11/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		





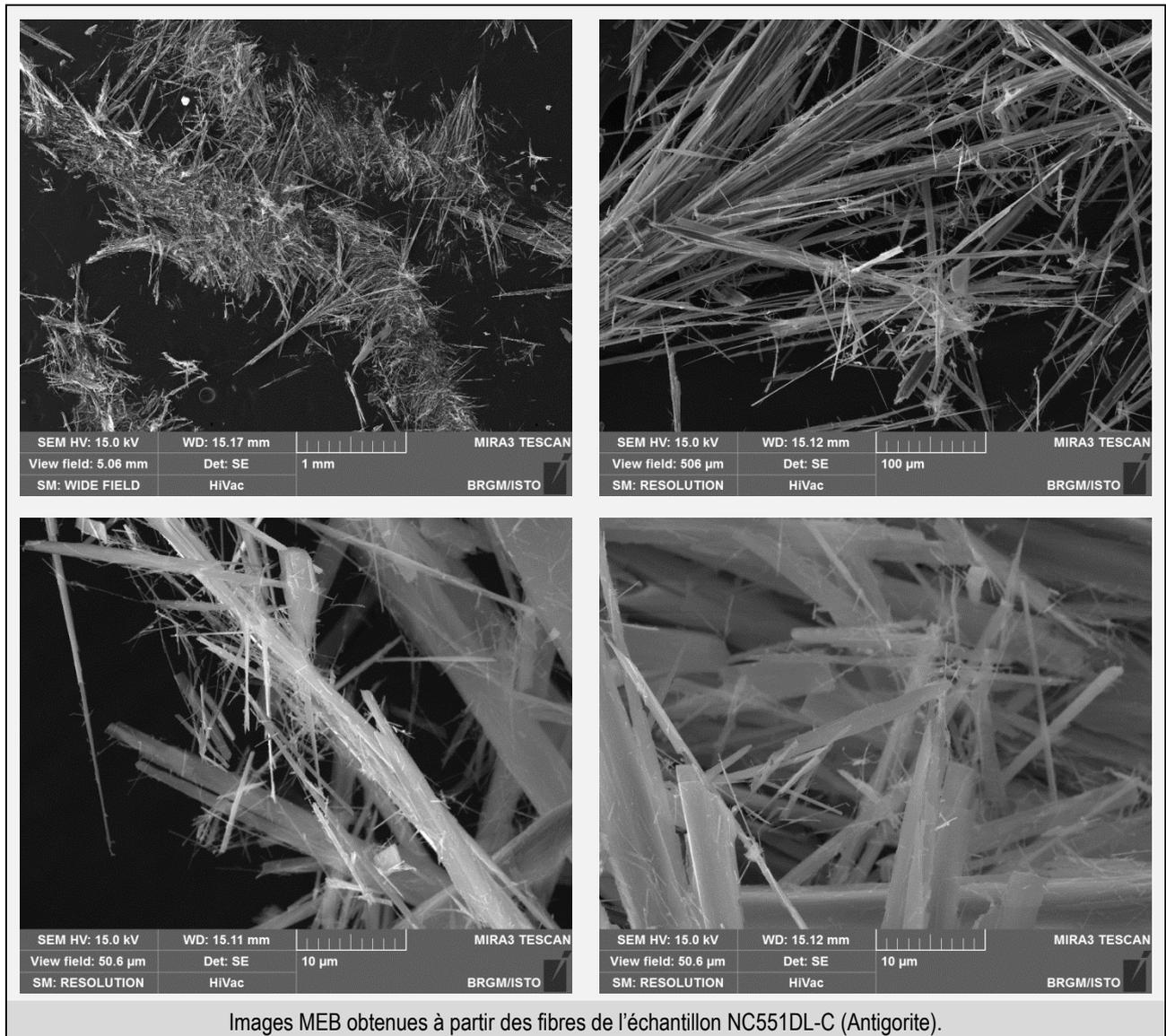
Status: Idle CPS: 8 DT: 62.5 Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Apollo XP-SDD

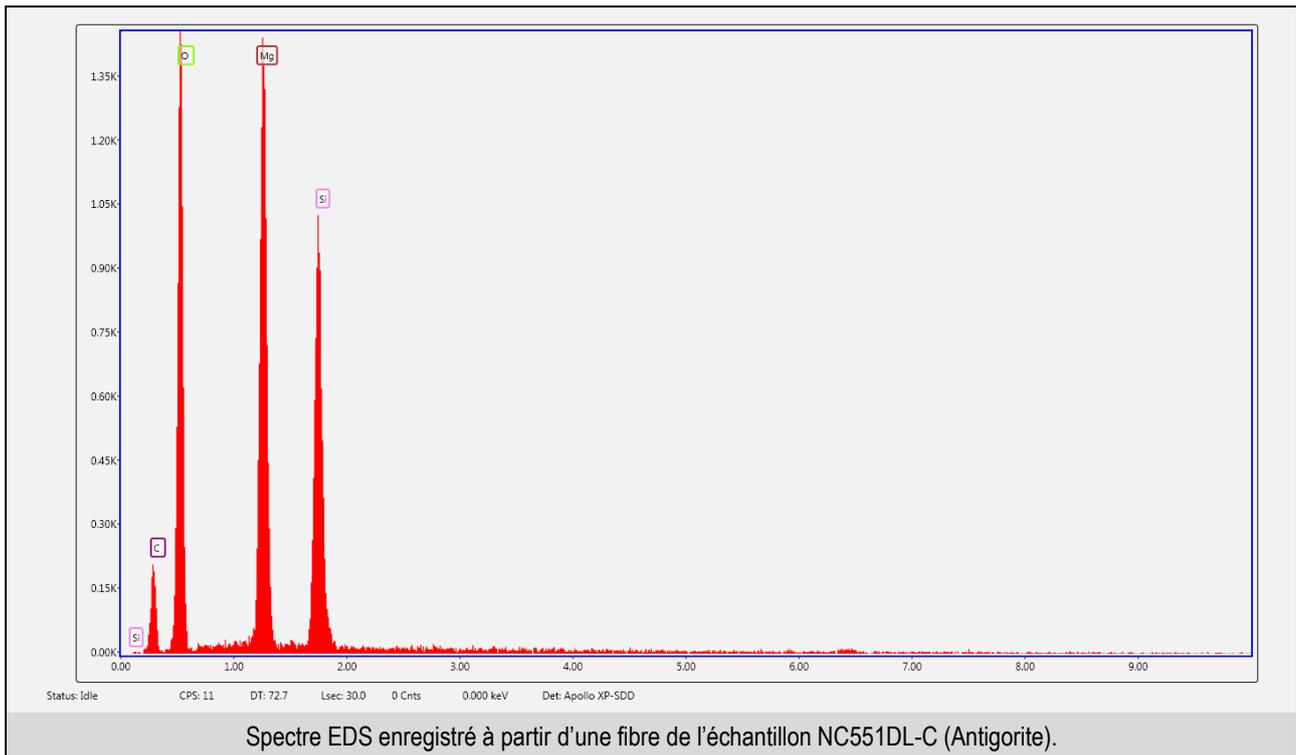


Status: Idle CPS: 8 DT: 75.0 Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Apollo XP-SDD

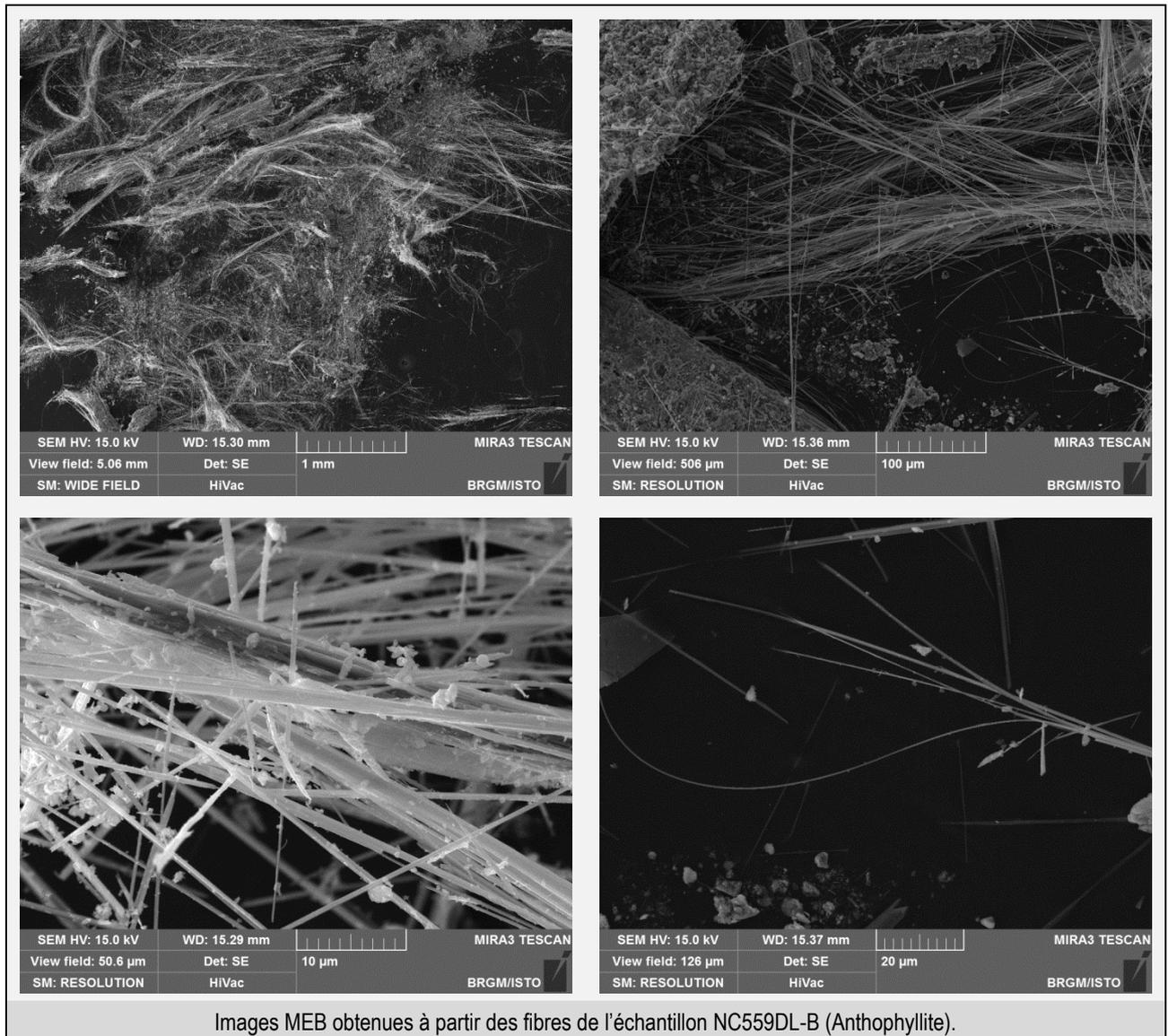
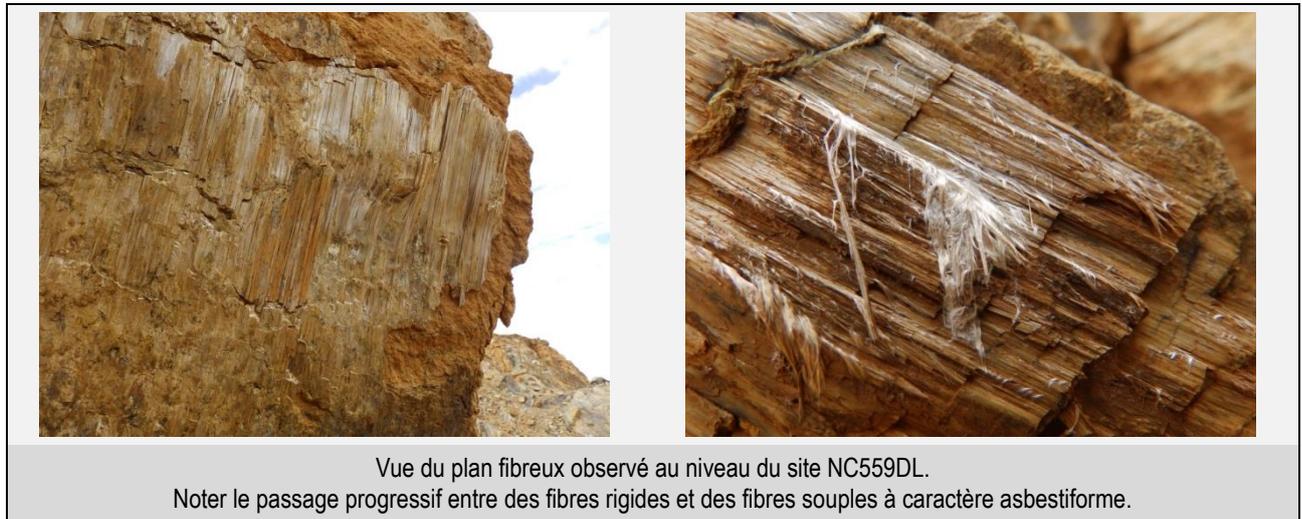
Spectre EDS enregistré à partir des fibres de l'échantillon NC551DL (Antigorite).

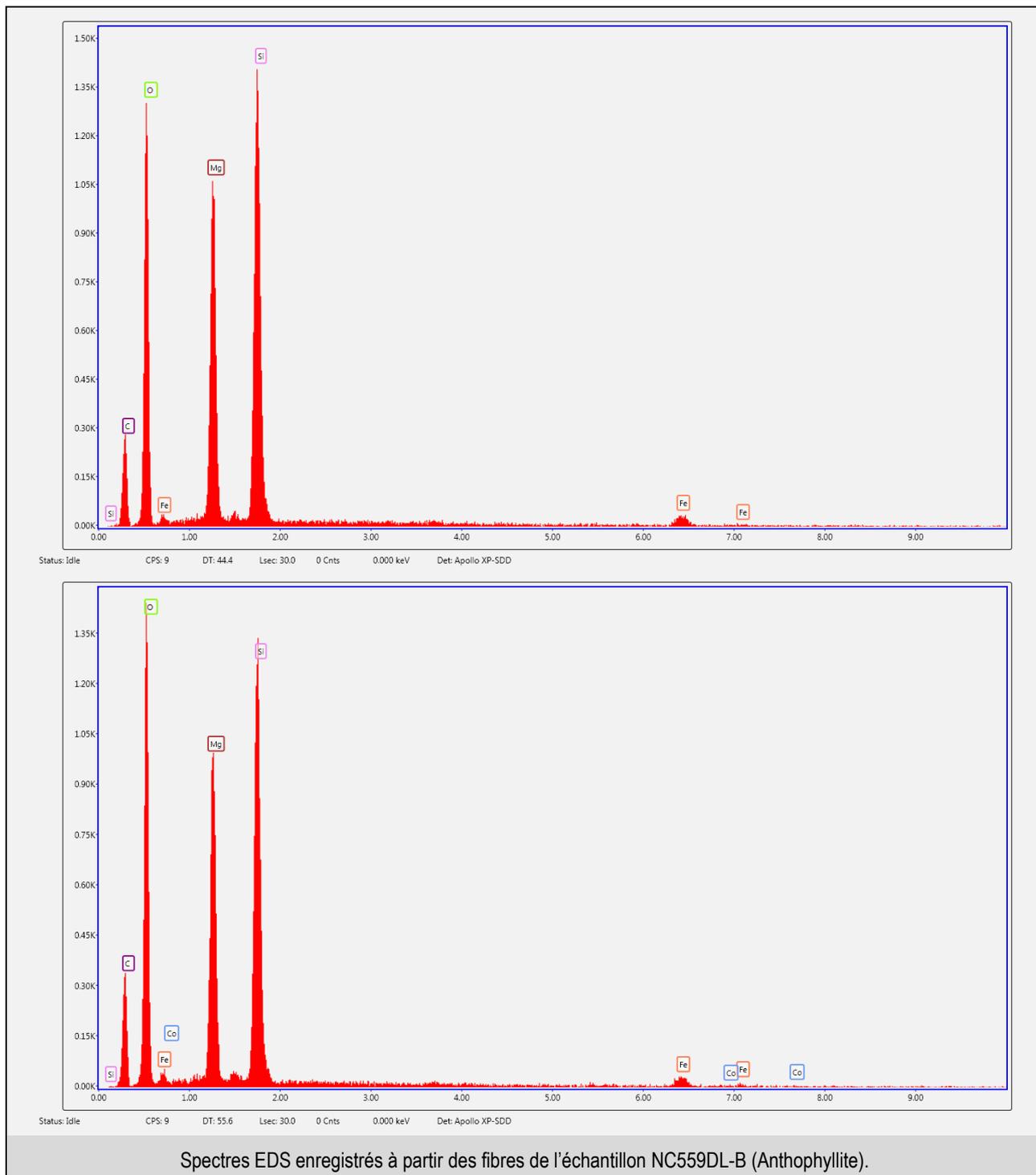
Mine : VULCAIN	Site : NC551DL	XWGS84 : 166,36245	YWGS84 : -21,92001
Date de la visite : 31/03/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		





Mine : SIREIS	Site : NC559DL	XWGS84 : 165,08598	YWGS84 : -21,19941
Date de la visite : 02/04/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		

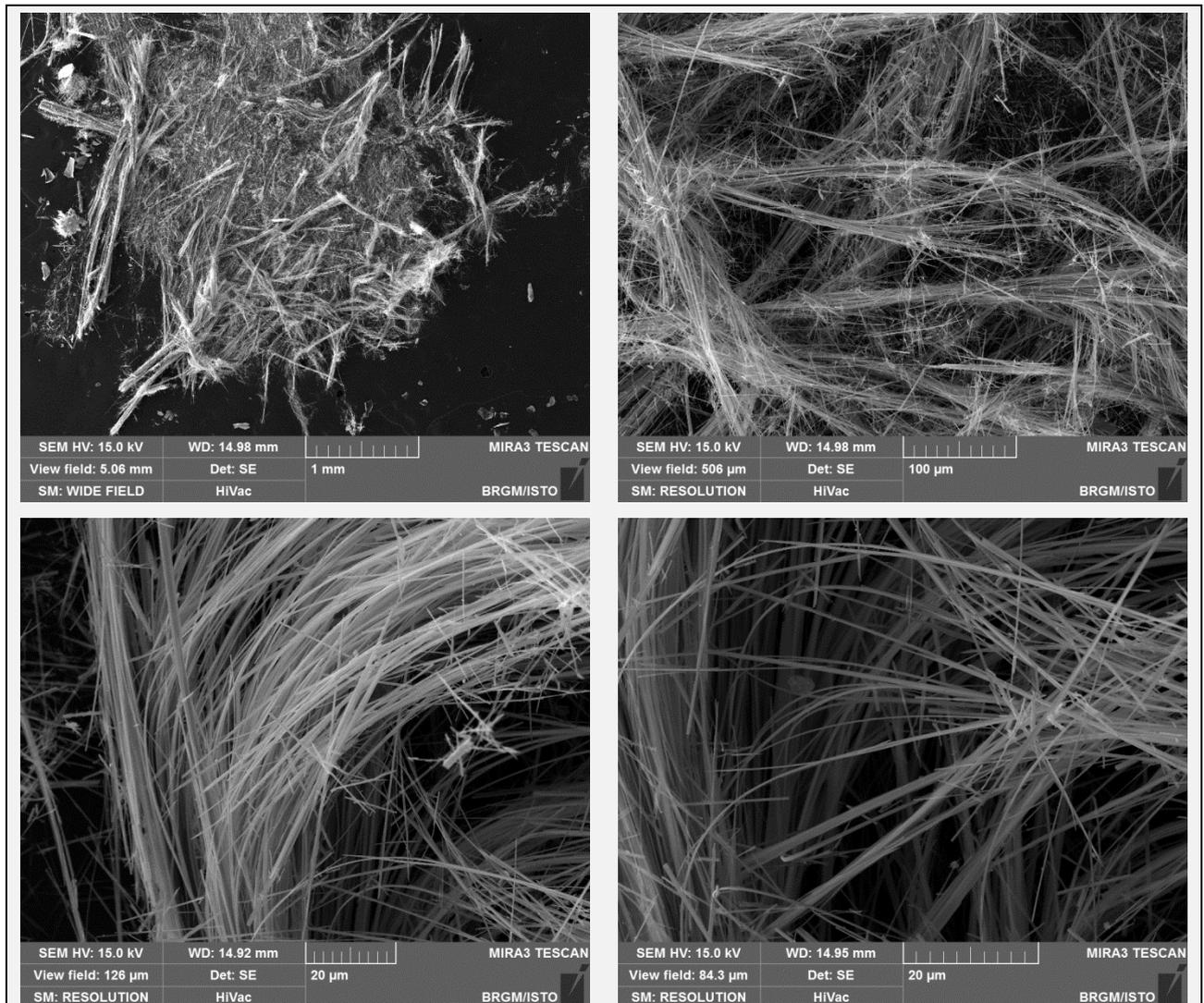




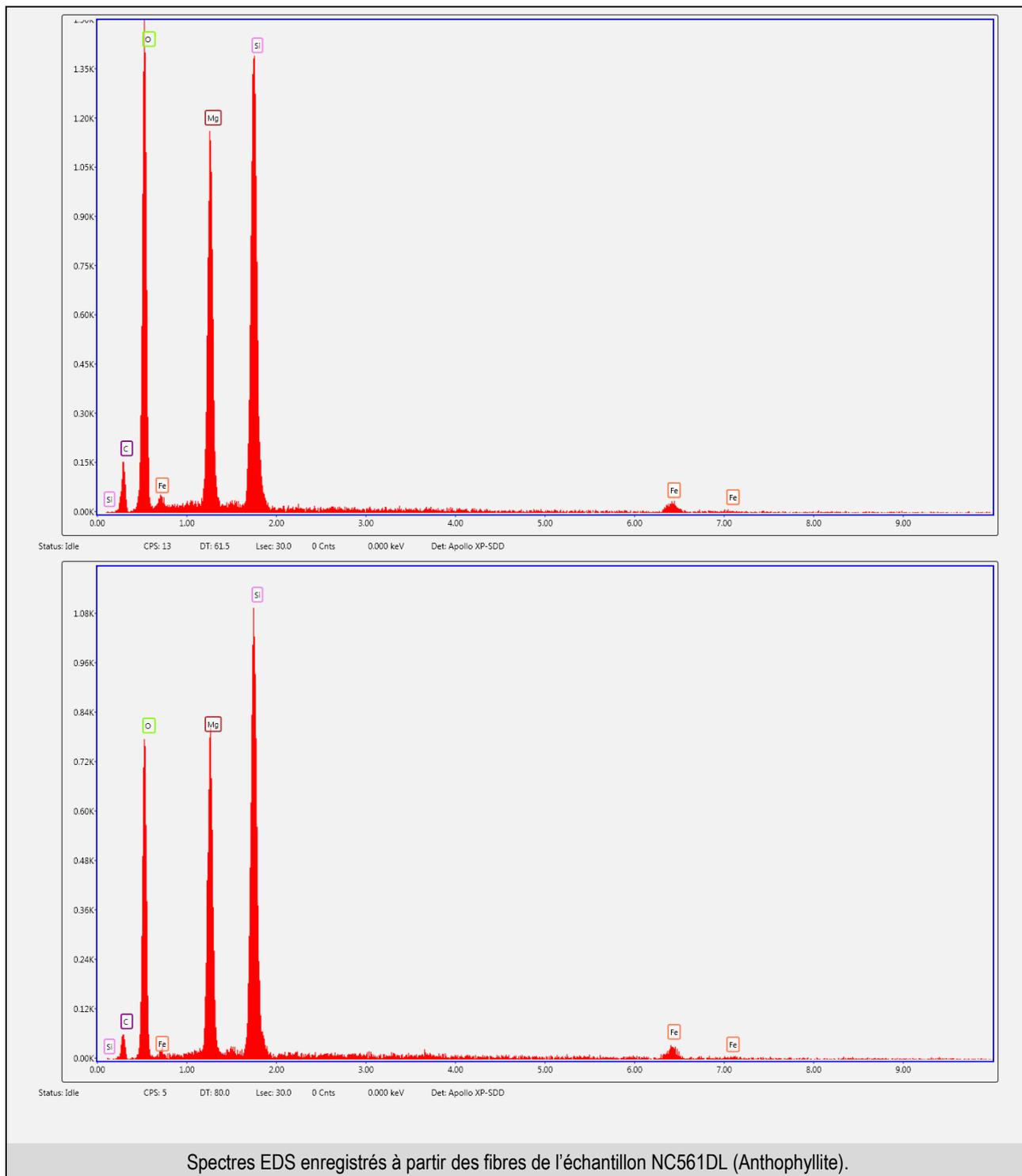
Mine : SIREIS	Site : NC561DL	XWGS84 : 165,08600	YWGS84 : -21,19846
Date de la visite : 02/04/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		



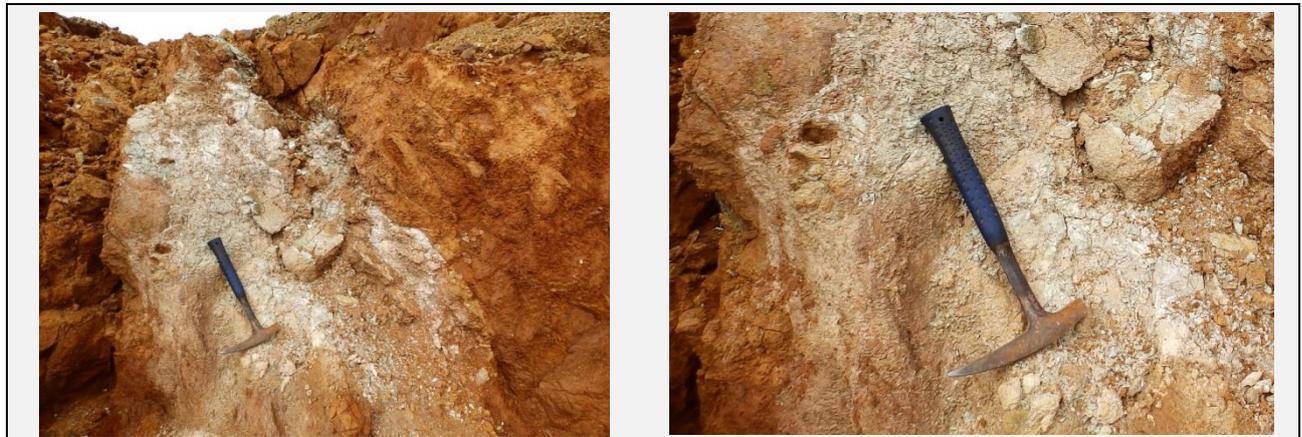
Plan fibreux plissé observé au niveau du site NC561DL.



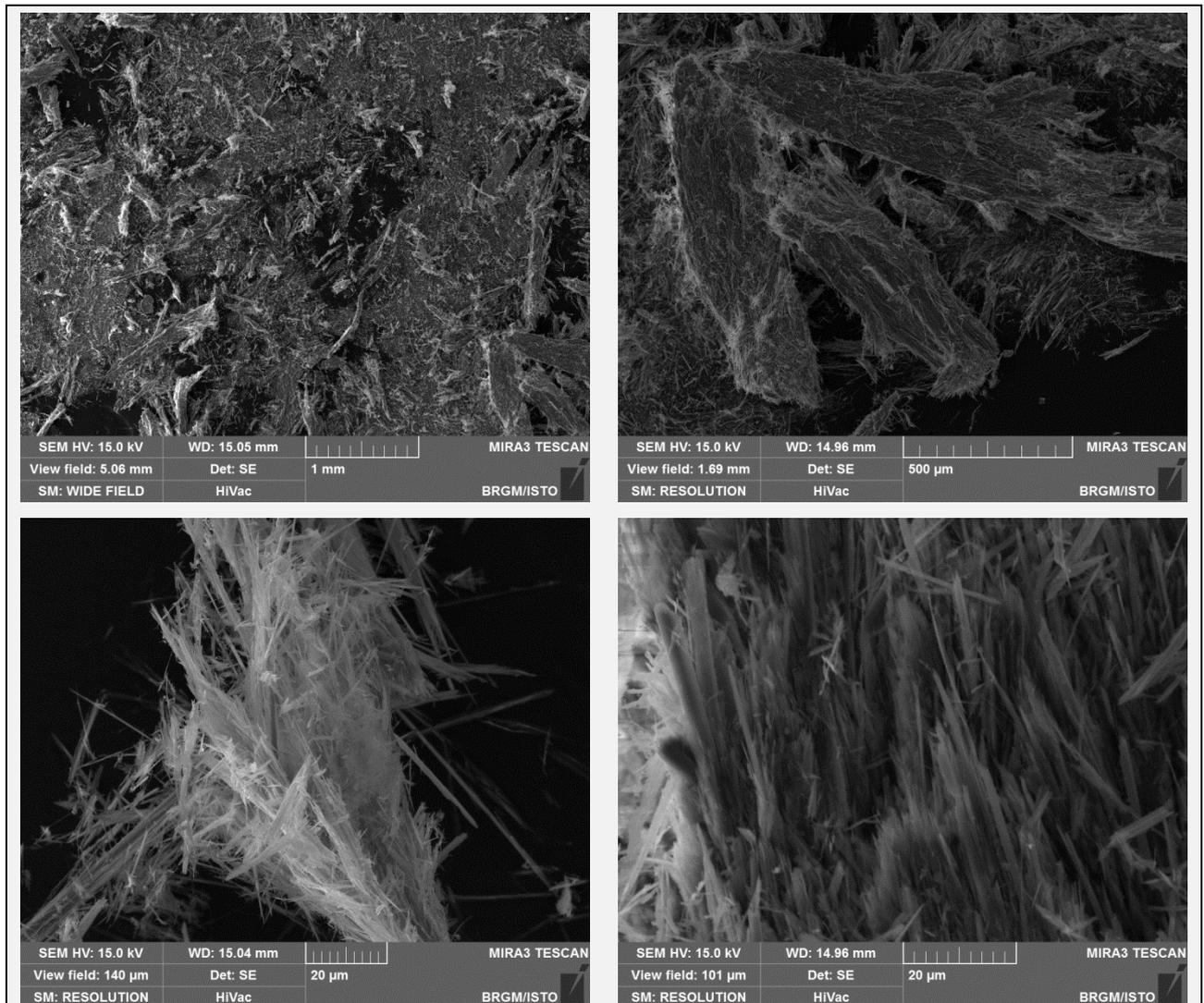
Images MEB obtenues à partir des fibres de l'échantillon NC561DL (Anthophyllite).



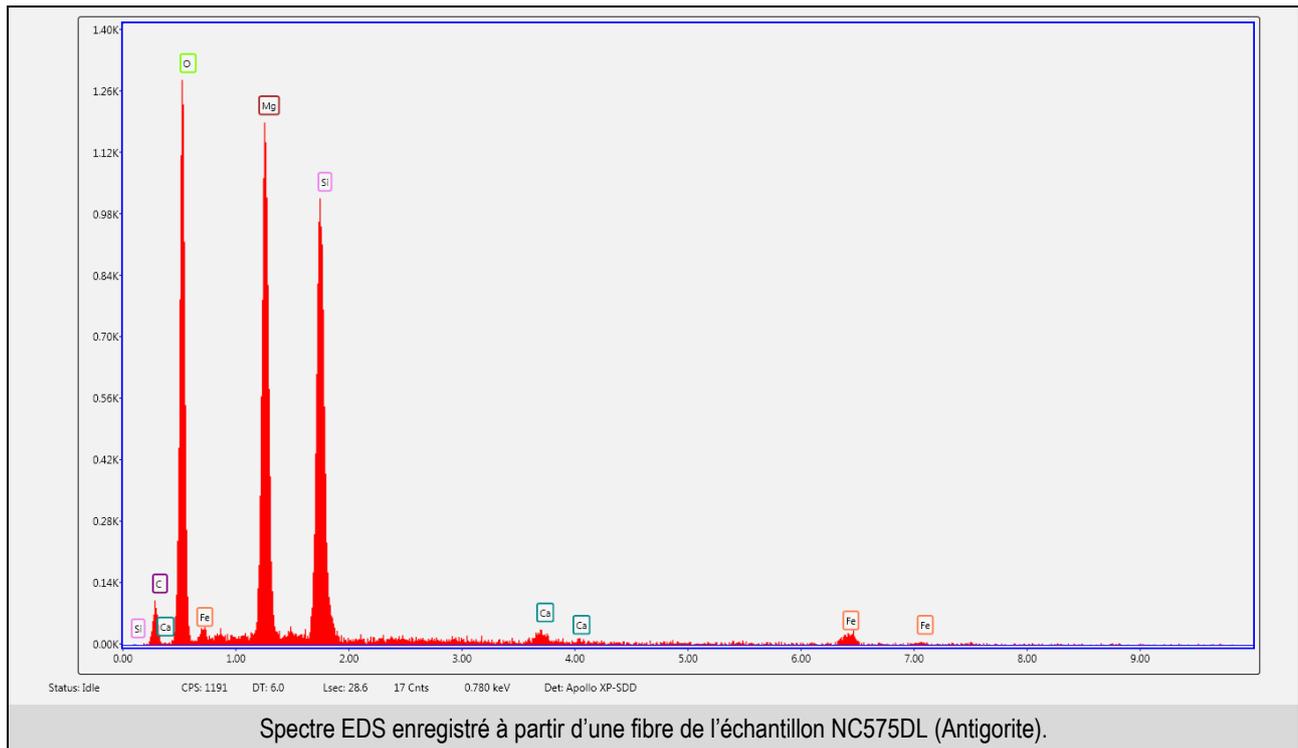
Mine : PORO	Site : NC575DL	XWGS84 : 165,74129	YWGS84 : -21,30743
Date de la visite : 07/04/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		



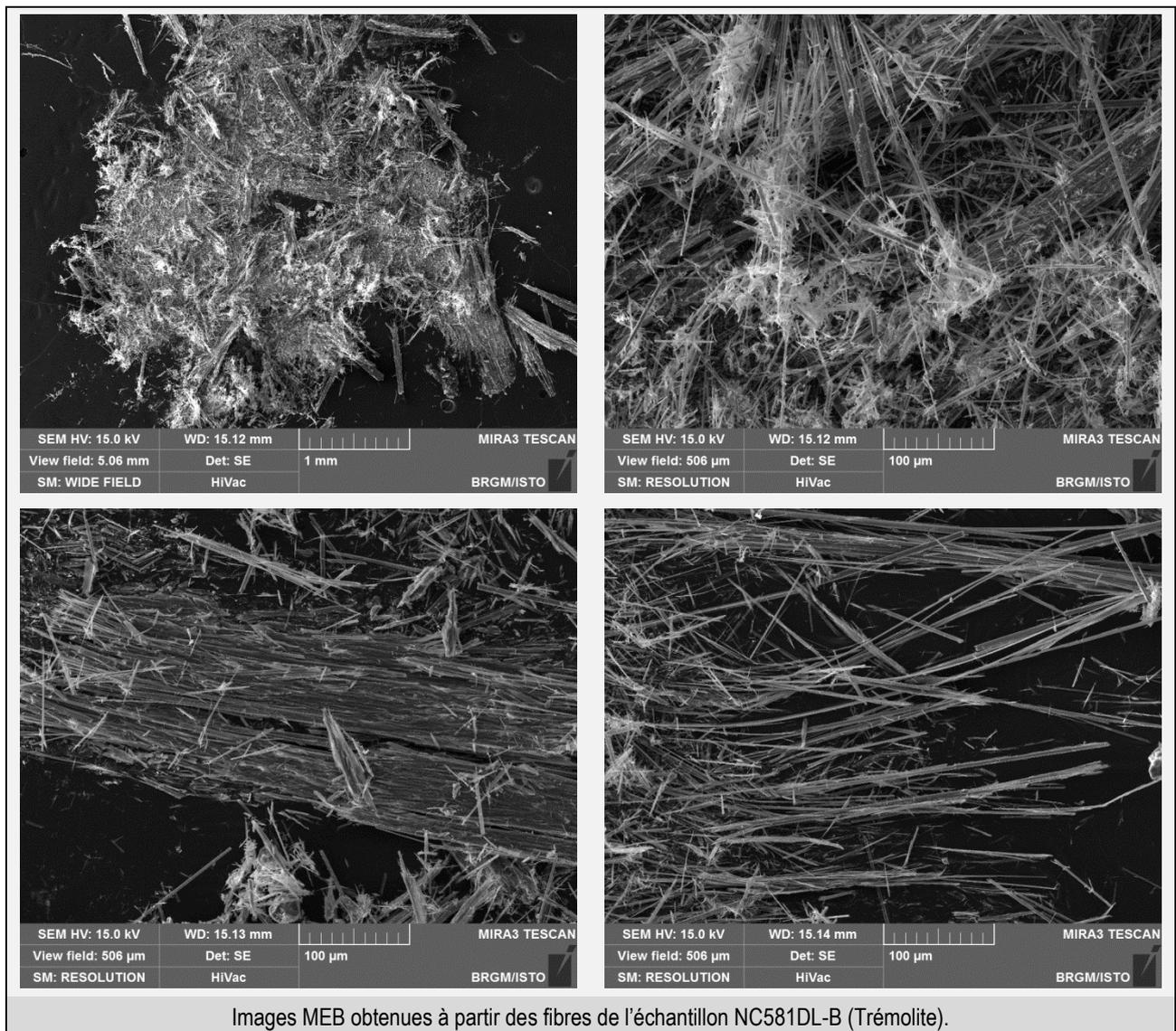
Plan fibro-lamellaire très altéré, observé au niveau du site NC575DL.

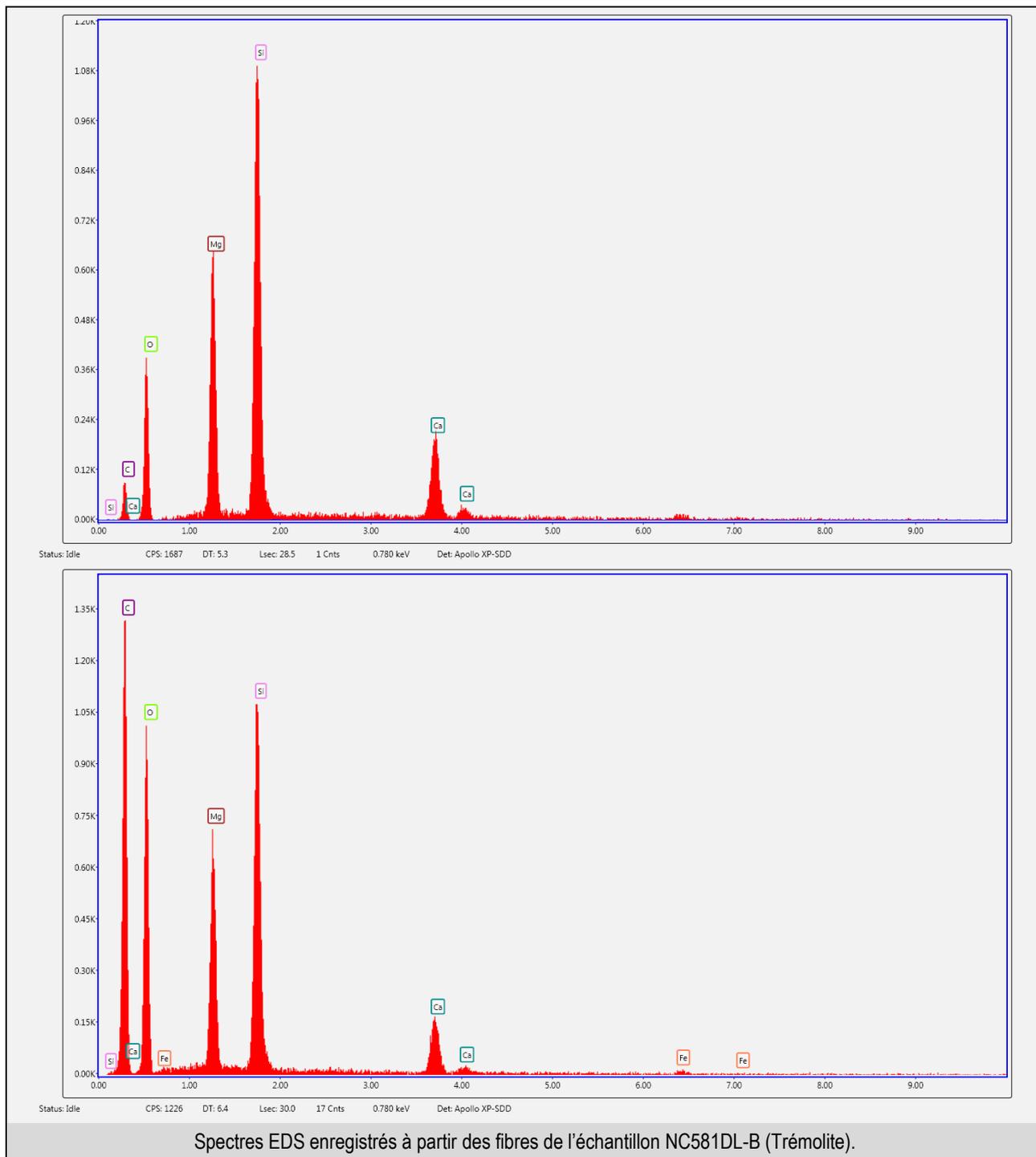


Images MEB obtenues à partir des fibres de l'échantillon NC575DL (Antigorite).



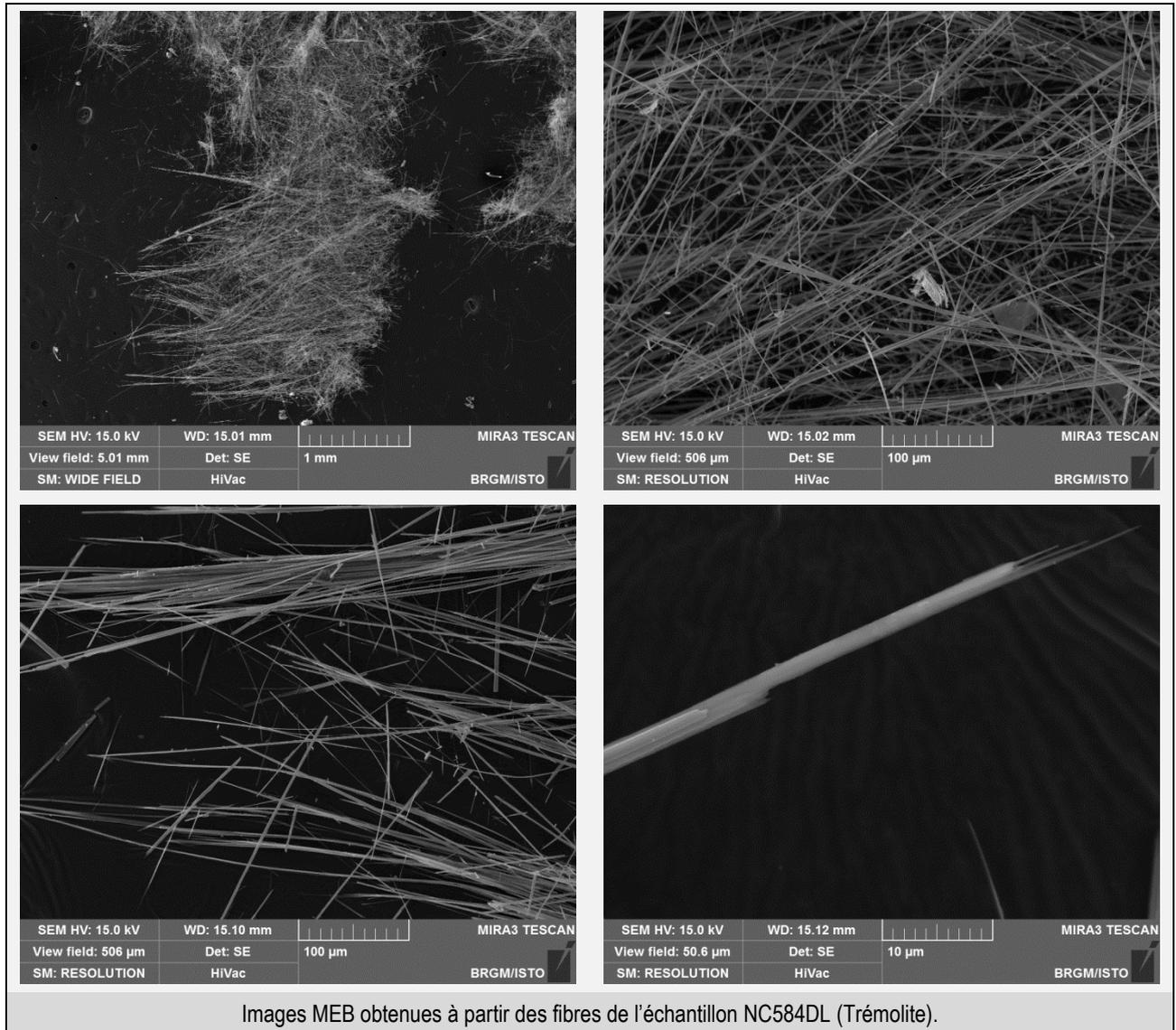
Mine : PORO-CFTMC	Site : NC581DL	XWGS84 : 165,69707	YWGS84 : -21,30336
Date de la visite : 08/04/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		

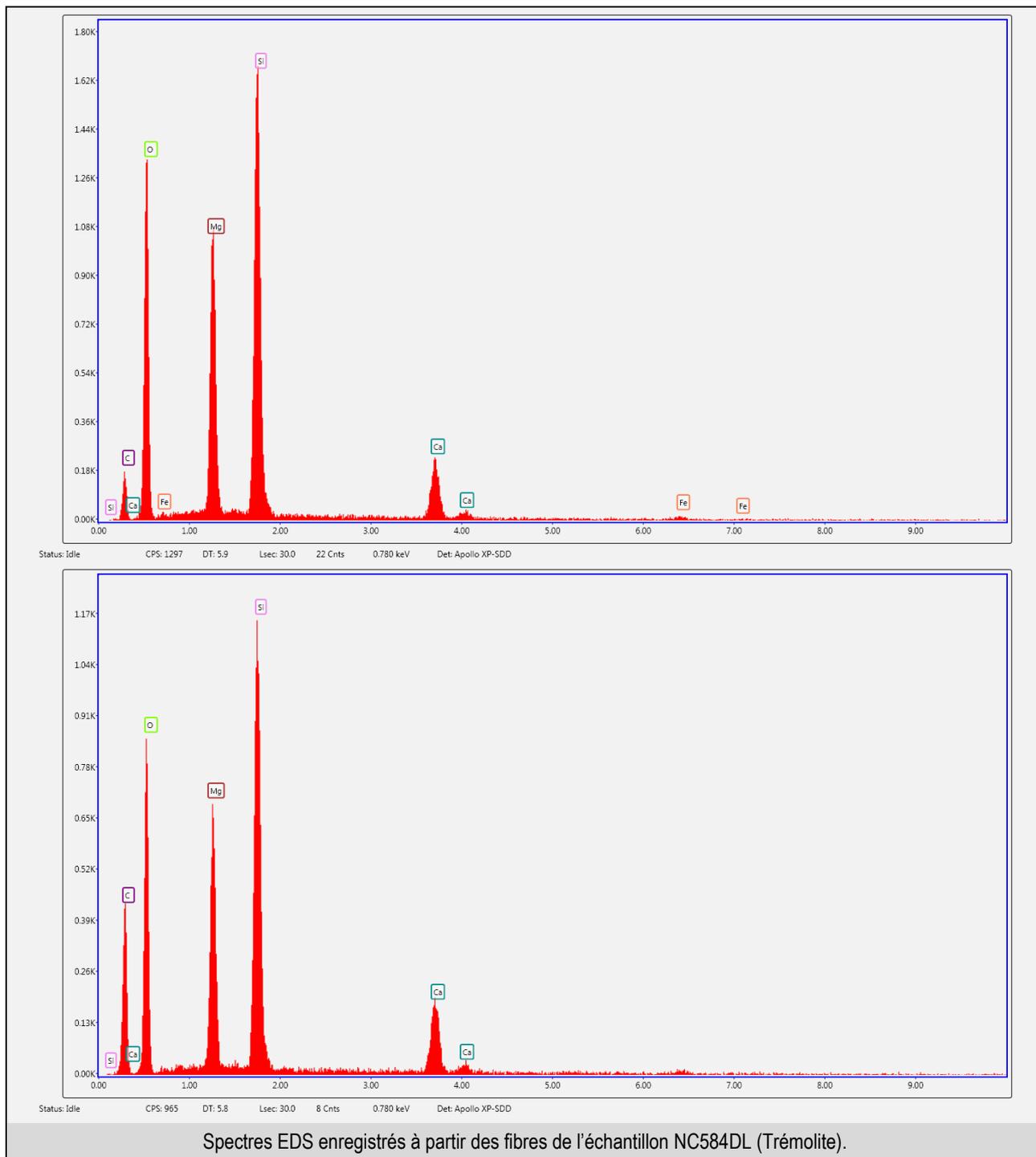




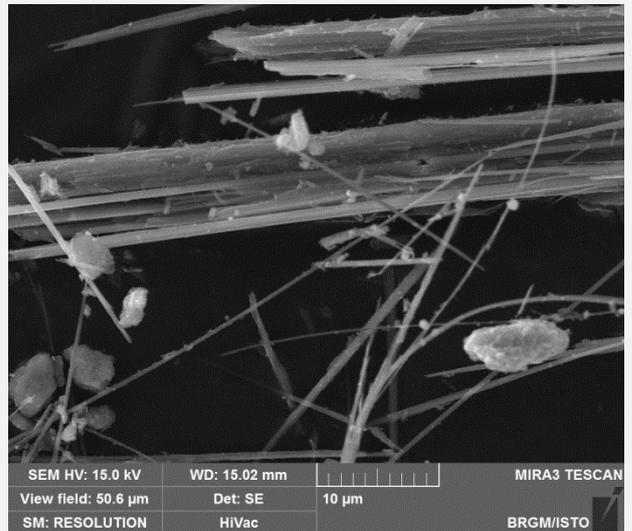
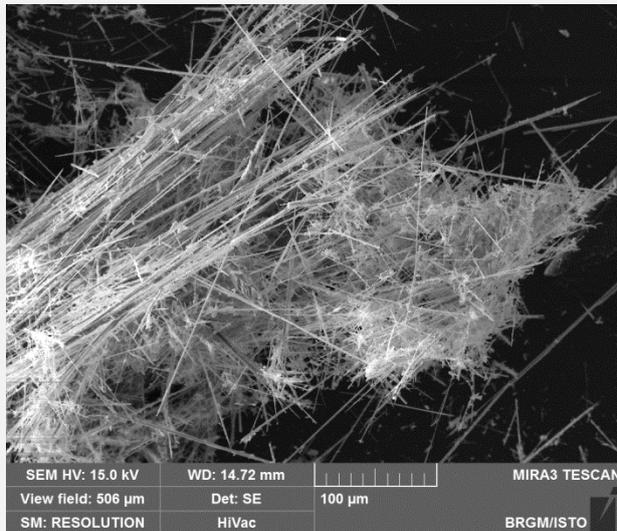
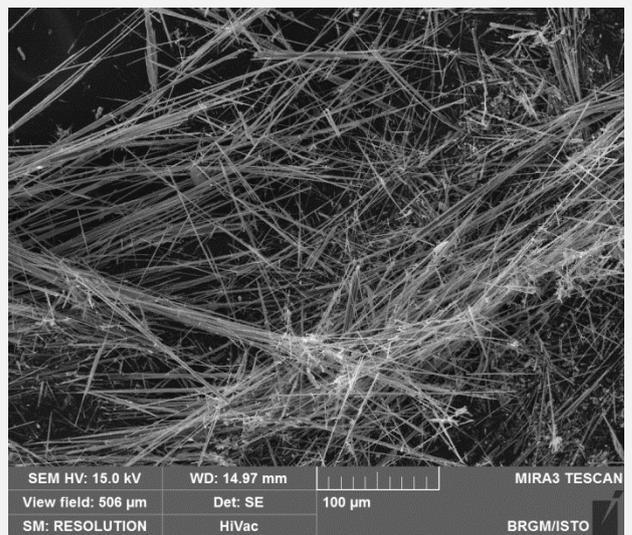
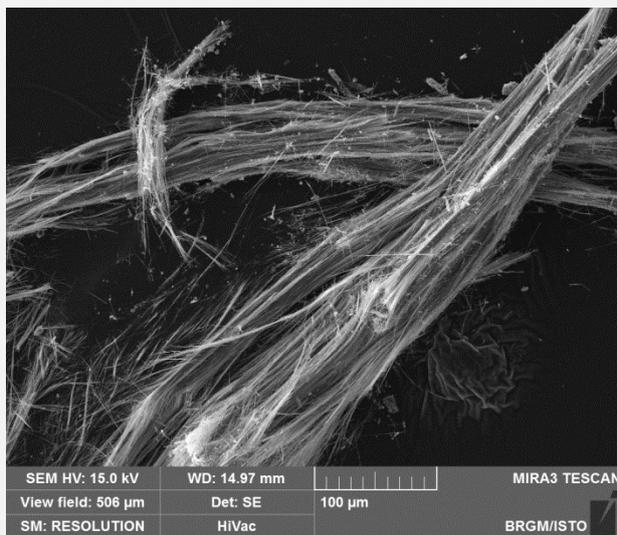
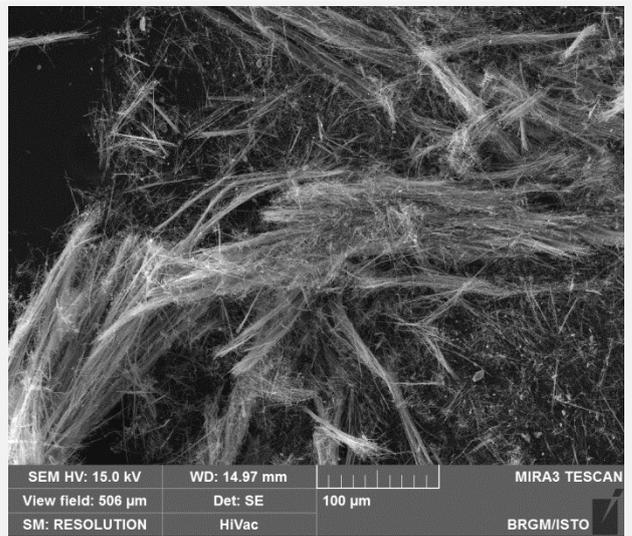
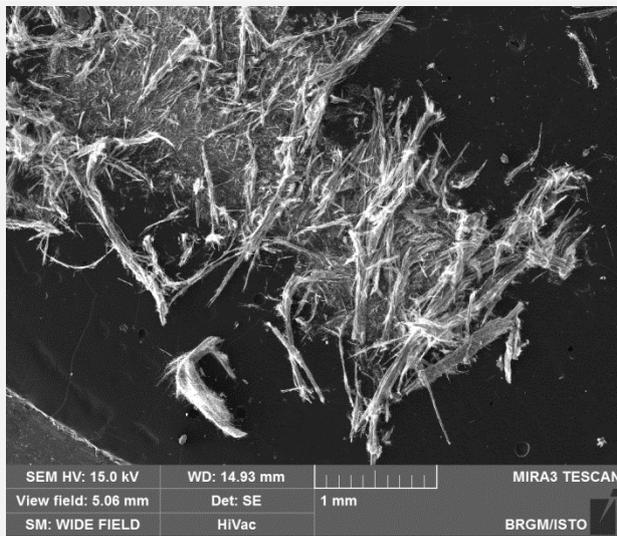
Spectres EDS enregistrés à partir des fibres de l'échantillon NC581DL-B (Trémolite).

Mine : PORO	Site : NC584DL	XWGS84 : 165,73819	YWGS84 : -21,31346
Date de la visite : 08/04/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		

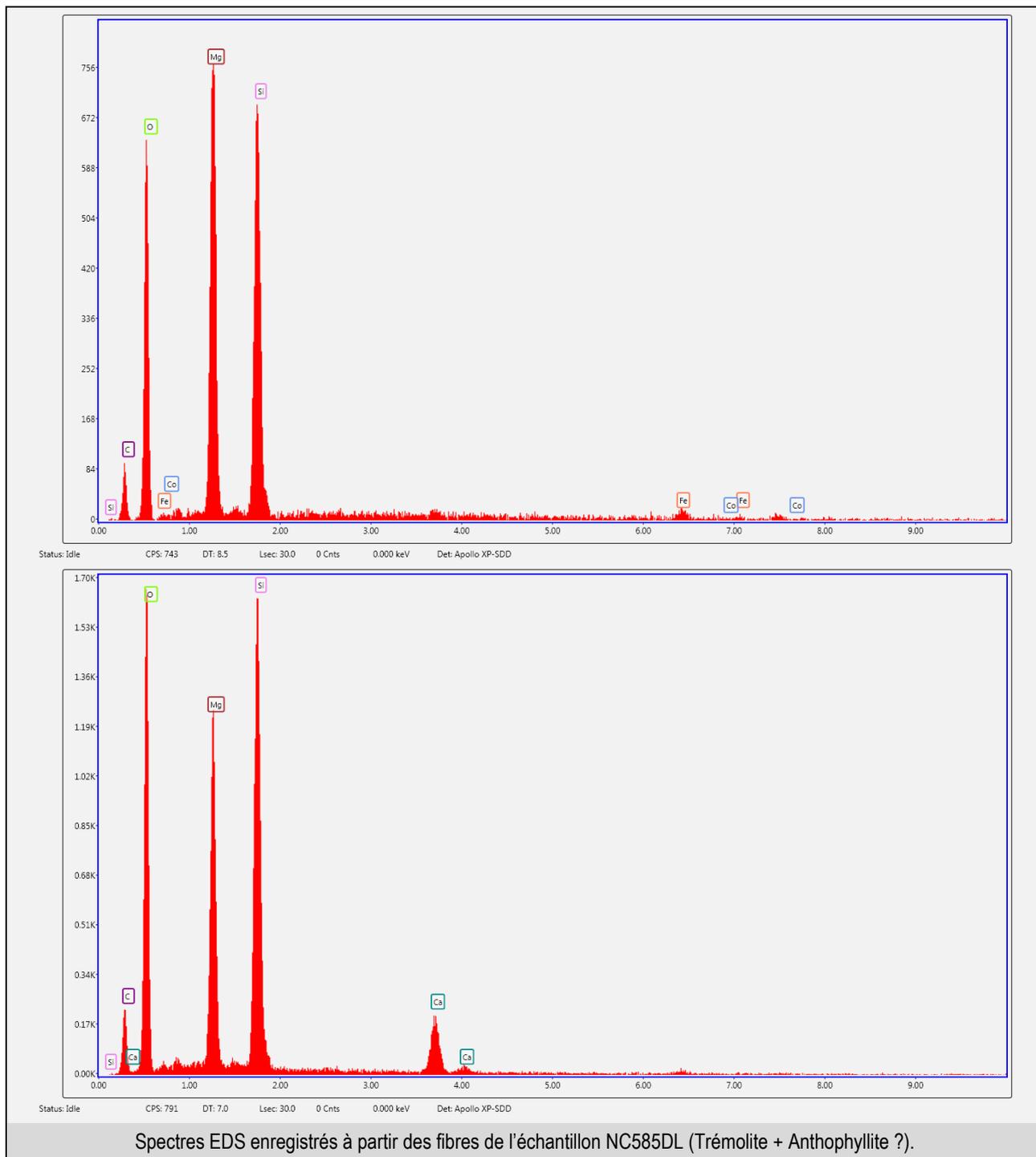




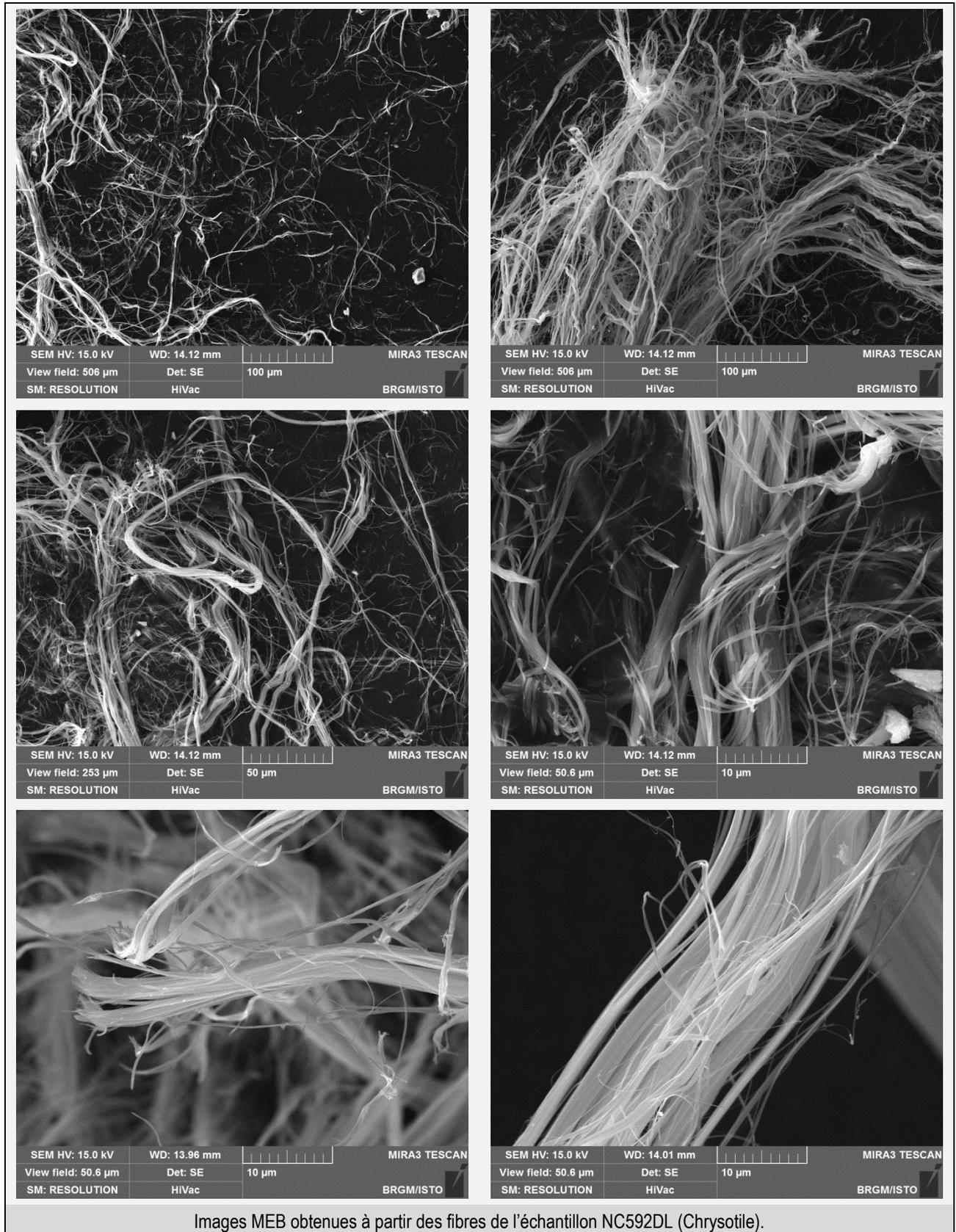
Secteur : PORO	Site : NC585DL	XWGS84 : 165,72874	YWGS84 : -21,30839
Date de la visite : 08/04/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		

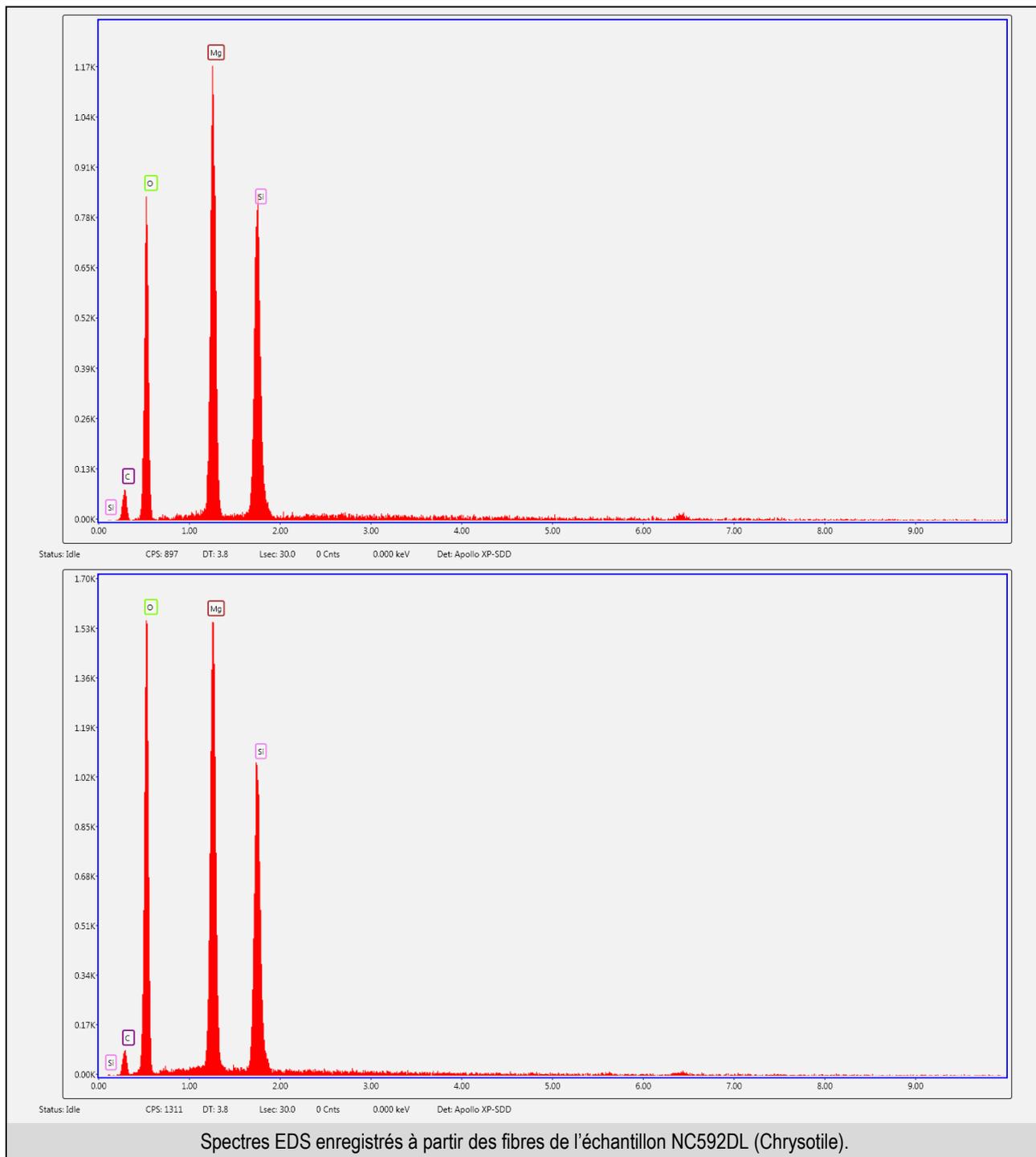


Images MEB obtenues à partir des fibres de l'échantillon NC585DL (Trémolite).

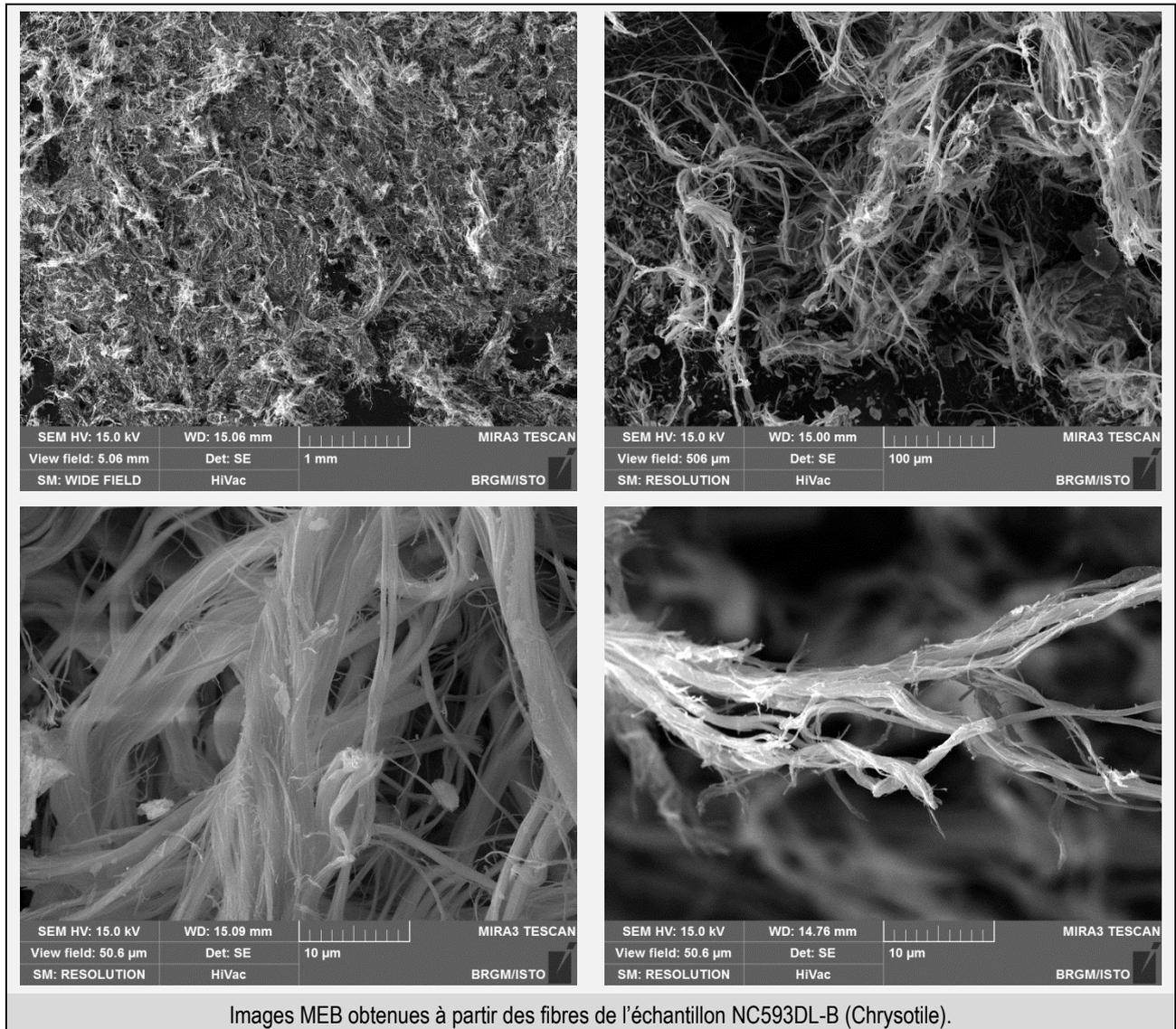


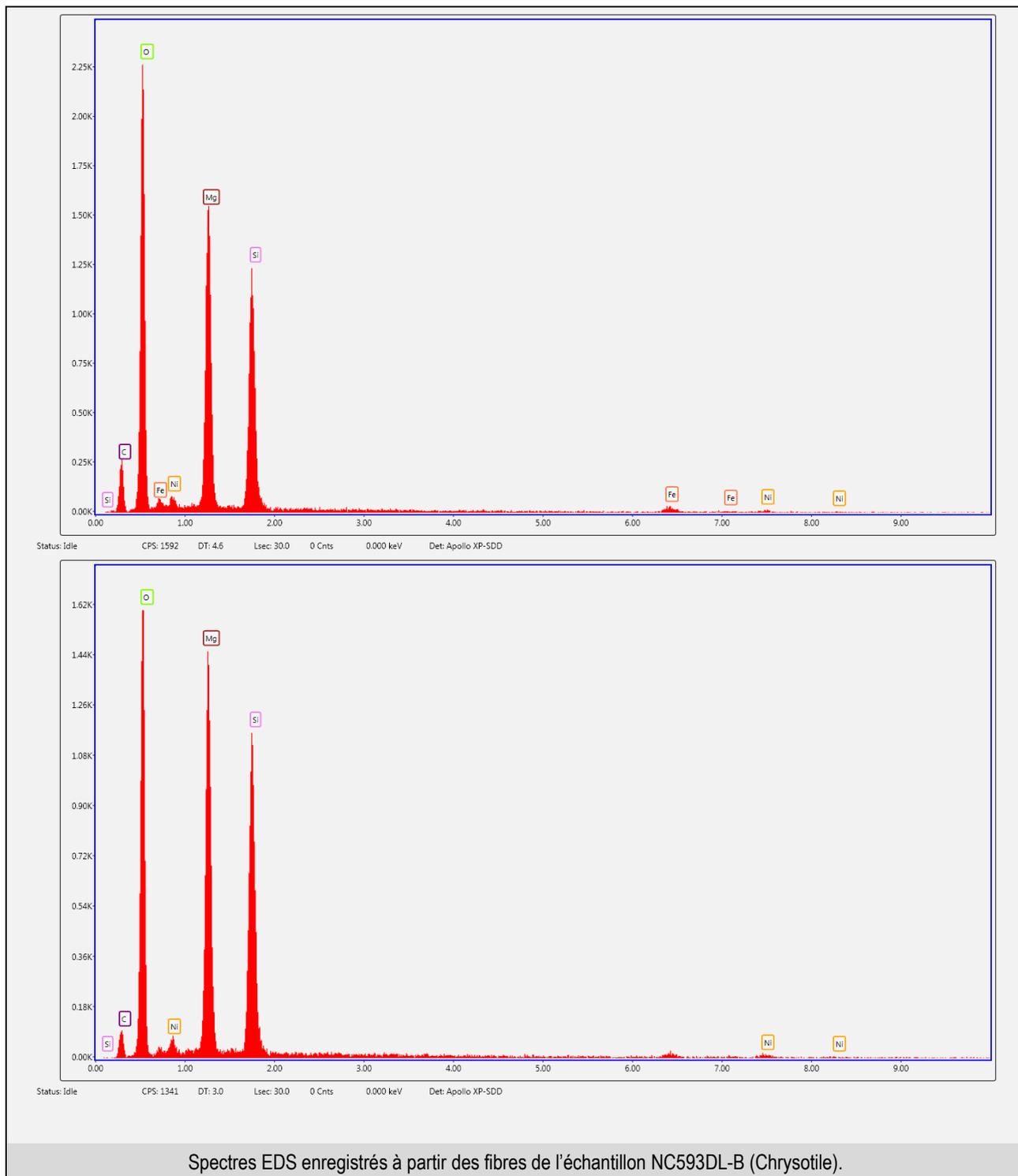
Mine : PORO-BONINI	Site : NC592DL	XWGS84 : 165,73965	YWGS84 : -21,29866
Date de la visite : 09/04/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		





Mine : PORO-BONINI	Site : NC593DL	XWGS84 : 165,73614	YWGS84 : -21,30247
Date de la visite : 09/04/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		

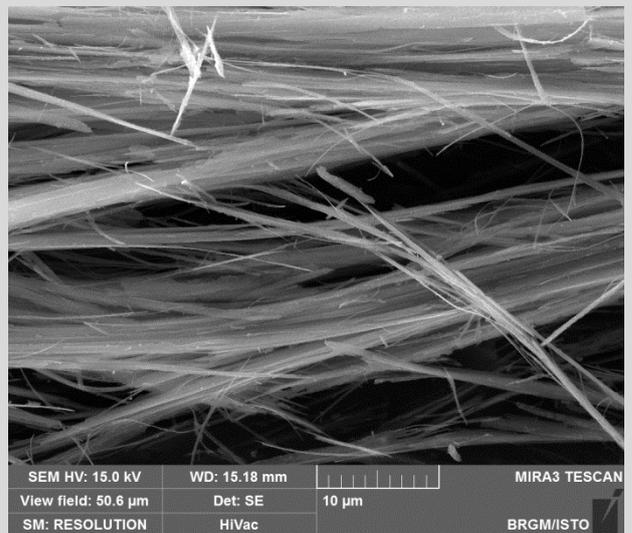
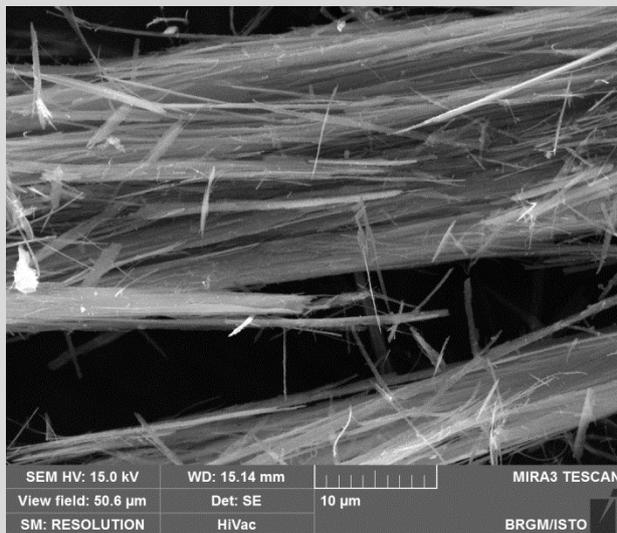
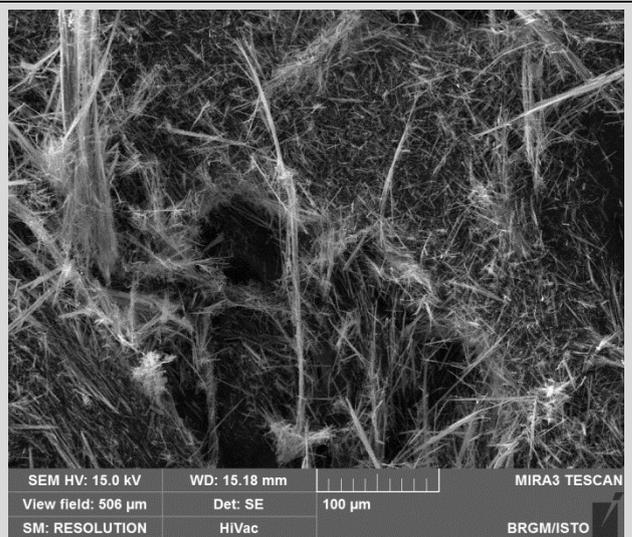
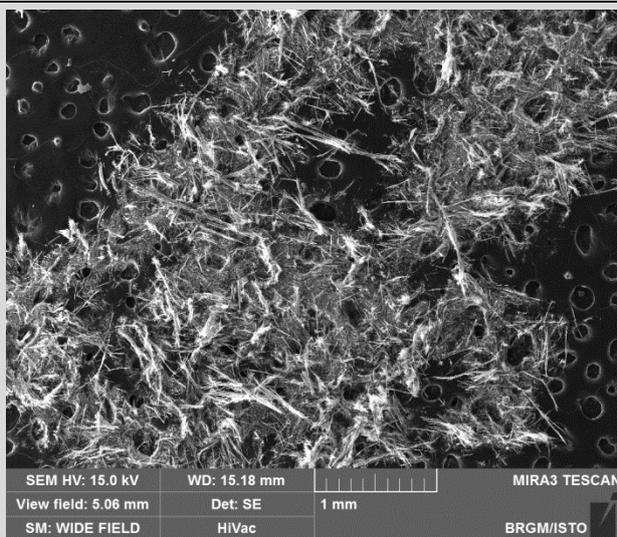




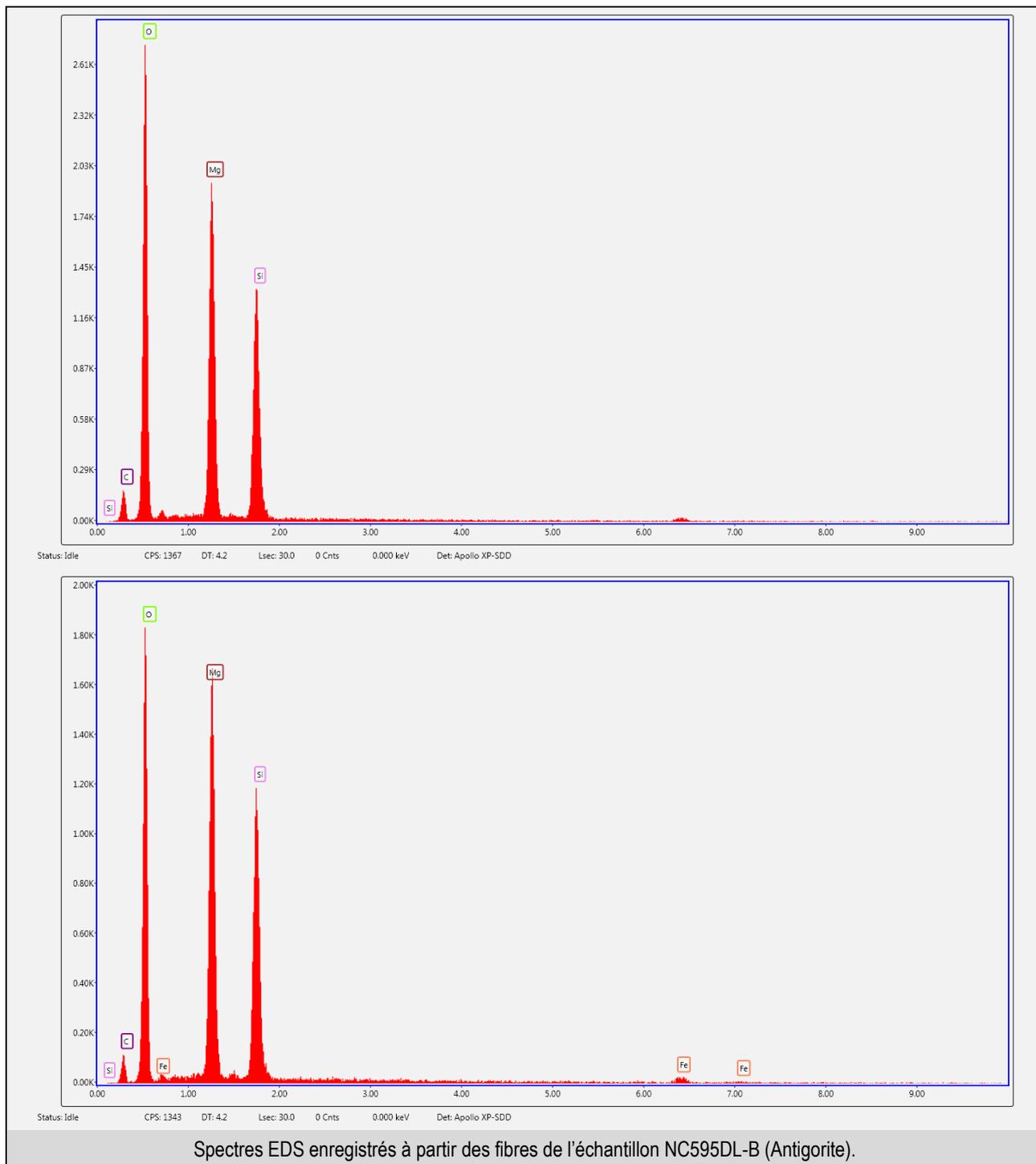
Mine : PORO-BONINI	Site : NC595DL	XWGS84 : 165,73787	YWGS84 : -21,30373
Date de la visite : 09/04/2015	Participants : LAHONDERE D. (BRGM-Orléans), LESIMPLE S. (DIMENC/SGNC-Nouméa)		



Structure planaire orientée N085, à pendage sud (35°), porteuse de cristallisations fibreuses orientées N175 S35.
Cette structure correspond également à un plan à doewellite.



Images MEB obtenues à partir des fibres de l'échantillon NC595DL-B (Antigorite).





Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr