





Reconnaissance optique de sulfures et d'oxydes en grains à l'aide d'une caméra multispectrale

Par

Ludivine Mathieu

Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade  
de Maitre (M.Sc.) en géologie et génie géologique (1687)

Québec, Canada

© Ludivine Mathieu, 2018

## RÉSUMÉ

Ces dernières décennies, l'étude des tills et de leurs minéraux est devenue un outil clé pour l'exploration minérale dans les anciennes régions glaciaires. Le comptage de minéraux indicateurs est alors nécessaire, et requiert l'observation de millions de grains dont seulement 2% d'entre eux seront indicateurs de minéralisations. Les méthodes conventionnelles de reconnaissance des minéraux en grains sont effectuées par un géologue et consistent à étudier de façon séquentielle les grains sous un microscope binoculaire. En plus d'être fastidieuses, ces méthodes sont couteuses et sujettes à l'erreur humaine. La présente étude introduit l'imagerie multispectrale comme une nouvelle approche pour la reconnaissance optique des minéraux en grains. Cette technologie mesure les bandes spectrales contigües du domaine optique, pour ensuite analyser leur signature spectrale. Celle-ci permet de caractériser et de quantifier des composants au spectre similaire, mais différenciable. L'imagerie multispectrale apparaît comme un procédé viable pour l'identification de minéraux en grains et pourrait apporter une piste de solution à l'optimisation du comptage de grains, en traitant simultanément une grande quantité de matériel, tout en améliorant la qualité de l'information.

Les succès obtenus pour la reconnaissance automatique de grains d'or à partir de l'analyse d'images en Rouge-Vert-Bleu ont motivé la réalisation de ce projet. L'objectif principal de cette étude est d'étendre cette méthode à l'identification des sulfures et des oxydes en grains à l'aide de l'imagerie multispectrale. Comparés à l'or, ces minéraux présentent des caractéristiques optiques moins distinctives, c'est pourquoi l'analyse de plus de 3 bandes spectrales est requise. L'imagerie multispectrale est déjà utilisée pour la caractérisation de carottes de forage, et donc de surfaces minérales planes. La complexité de cette étude réside dans le fait que les échantillons choisis sont des grains et qu'ils présentent des surfaces irrégulières qui influencent directement leurs signatures spectrales.

Les grains sélectionnés pour cette étude proviennent de tills et d'échantillons minéralogiques concassés. L'acquisition des spectres de réflectance des différents minéraux est réalisée à partir d'un spectromètre optique et d'une caméra multispectrale sur des grains polis et de forme irrégulière. Le spectromètre optique permet d'obtenir un spectre quasi-continu sur le domaine du visible jusqu'au proche infrarouge, alors que la caméra multispectrale est capable d'étudier en simultané 11 bandes du domaine du visible. Les mesures obtenues avec le spectromètre servent de référence validant les spectres obtenus avec la caméra multispectrale. Les résultats indiquent que les spectres acquis avec la caméra multispectrale présentent de grandes variations de réflectance qui doivent être corrigées par une normalisation spatiale (une correction des valeurs des sous-pixels par rapport à leurs plus proches voisins) pour améliorer leur accord avec les spectres acquis avec le spectromètre optique. Ces variations de spectres sont d'autant plus marquées sur les minéraux en grains que sur les sections polies. Cependant, même après avoir appliqué cette correction, la distinction des spectres pour chaque minéralogie reste difficile.

# TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	III
TABLE DES MATIÈRES .....	IV
LISTE DES TABLEAUX .....	VII
LISTE DES FIGURES .....	VIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS .....	XIV
REMERCIEMENTS.....	XVI
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique générale.....	1
1.1.1 Importance des sédiments glaciaires pour l'exploration minérale.....	1
1.1.2 Caractérisation des minéraux indicateurs.....	2
1.1.3 Limites des méthodes conventionnelles.....	4
1.2 Approche par l'imagerie multispectrale .....	7
1.2.1 Définition .....	7
1.2.2 Application à la géologie .....	9
1.2.3 Facteurs de variabilité de l'imagerie multispectrale pour l'étude des minéraux .....	12
1.2.3.1 Contraintes techniques et technologiques .....	13
1.2.3.2 Contraintes liées aux minéraux .....	14
1.2.3.3 Contraintes liées à l'étude de minéraux en grains.....	15
1.3 Automatisation du comptage de grains d'or .....	18
1.3.1 Méthode.....	18
1.3.2 Limites de la méthode .....	20
1.4 Problématique spécifique et objectifs .....	22
CHAPITRE 2 : ACQUISITION DES DONNÉES ET RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES.....	23
2.1 Introduction.....	23

2.2	Sélection des grains .....	25
2.3	Préparation des grains .....	28
2.4	Acquisition des spectres avec le spectromètre optique .....	32
2.4.1	Appareillage .....	32
2.4.1.1	Spectromètre optique .....	32
2.4.1.2	Microscope pétrographique.....	33
2.4.2	Acquisition des spectres .....	35
2.4.3	Normalisation des spectres de réflectance .....	36
2.4.4	Résultats .....	39
2.4.4.1	Résultats des spectres mesurés sur les sections polies .....	39
2.4.4.2	Résultats des spectres mesurés sur les grains irréguliers .....	42
2.5	Acquisition des spectres avec la caméra multispectral .....	46
2.5.1	Appareillage .....	46
2.5.1.1	Caméra multispectrale.....	46
2.5.1.2	Microscope pétrographique et stéréoscopique .....	49
2.5.2	Acquisition d'images .....	50
2.5.3	Acquisition des spectres .....	51
2.5.4	Normalisation des images multispectrales .....	52
2.5.5	Alignement des spectres.....	53
2.5.6	Résultats bruts .....	55
2.5.6.1	Résultats des spectres mesurés sur les sections polies .....	55
2.5.6.2	Résultats des spectres mesurés sur les grains irréguliers .....	59
2.6	Conclusions préliminaires .....	62
<b>CHAPITRE 3 : TRAITEMENT DES IMAGES DE LA CAMÉRA MULTISPECTRALE .....</b>		<b>65</b>
3.1	Problème d'association spatiale des sous-pixels.....	65
3.2	Correction des valeurs des sous-pixels par interpolation des valeurs des plus proches voisins.....	68
4.1.1	.....	68
3.2.1	Matrice de correction .....	68
3.2.2	Résultats de la normalisation spatiale sur les spectres de réflectance...70	70

3.2.2.1 Spectres mesurés sur les sections polies .....	70
3.2.2.2 Spectres mesurés sur des grains irréguliers.....	74
CHAPITRE 4 : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS.....	78
LISTE DE RÉFÉRENCES .....	82
ANNEXES.....	88

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE 1

<b>Tableau 1-1 :</b> Exemple de minéraux indicateurs pour différents types de dépôts.....	3
<b>Tableau 1-2 :</b> Facteurs pouvant influencer les conclusions d’une étude sur les minéraux indicateurs (d’après Spirito <i>et al.</i> (2013). .....	5

## CHAPITRE 2

<b>Tableau 2-1 :</b> Liste des oxydes et sulfures sélectionnés pour l’étude. ....	26
<b>Tableau 2-2 :</b> Liste des minéraux sélectionnés avec leur provenance.....	29
<b>Tableau 2-3 :</b> Paramétrages utilisés pour l’acquisition de spectres au spectromètre (d’après Ocean Optics 2015). .....	36

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE 1

<b>Figure 1-1</b> : Modèle des trois principaux mécanismes de dispersion des sédiments glaciaires (Cummings <i>et al.</i> 2011). .....	2
<b>Figure 1-2</b> : Spectre électromagnétique (Guilhaumont 2015). .....	7
<b>Figure 1-3</b> : Schéma synthétique du concept d'imagerie multispectrale pour un imageur satellite qui peut être utilisé pour identifier les matériaux à la surface de la Terre (Smith 2012). .....	8
<b>Figure 1-4</b> : Carte géologique de la minéralogie hydratée de la région de Cuprite Hill (Nevada) compilée par Tetracorder à partir d'images du spectro-imageur AVIRIS (Clark <i>et al.</i> 2003). .....	10
<b>Figure 1-5</b> : Spectres de réflectance de quelques minéraux usuels (Smith 2012). .....	11
<b>Figure 1-6</b> : Mélange de spectres au contact avec un grain de pyrite et de sphalérite (zone encerclée dans l'image a.) responsable de la fausse identification de chalcopryrite et de pyrrotite après le traitement d'image (b.) (Pirard 2004). .....	14
<b>Figure 1-7</b> : Variation des faisceaux réfléchis selon l'inclinaison de la surface pour des sections polies (cas A) et pour des grains irréguliers (cas B et C), et effet d'ombrage (cas D). .....	16
<b>Figure 1-8</b> : Photographie prise au microscope d'un concentré de minéraux avec des grains d'or (en rouge) identifiés par le système de reconnaissance optique (Bédard <i>et al.</i> 2017). .	18

**Figure 1-9** : Spectres de réflectance de l'or. Les courbes bleues représentent la réflectance moyenne d'un grain tandis que la courbe noire indique la réflectance moyenne de l'ensemble des grains (Communication personnelle : P. Bédard 2016)..... 19

## CHAPITRE 2

**Figure 2-1** : Spectres de réflectance de quelques oxydes (a.) et sulfures (b.) (d'après Kokaly *et al.* 2017). ..... 27

**Figure 2-2** : Planche des grains « libres » étudiés pour chaque minéralogie..... 30

**Figure 2-3** : Pastilles présentant les grains polis étudiés pour chaque minéralogie..... 31

**Figure 2-4** : Schéma représentant le fonctionnement interne du spectromètre *Flame* d'Ocean Optics (d'après Ocean Optics 2015). ..... 33

**Figure 2-5** : Photographie du spectromètre installé sur le microscope pétrographique pour l'acquisition des spectres des sections polies. .... 34

**Figure 2-6** : Spectres d'émission pour des éclairages à incandescence halogène et à DEL (Steiner 2017). ..... 35

**Figure 2-7** : Spectre du blanc mesuré avec le spectromètre avec un éclairage à DEL. .... 37

**Figure 2-8** : Spectre de réflectance de la pyrite 1 normalisé (R) à partir du spectre de réflectance du blanc ( $S_{Max}$ ) et du spectre de réflectance d'un grain de Pyrite 1 mesurés au spectromètre (S). ..... 38

**Figure 2-9** : Spectres de réflectance sur les grains en sections polies mesurés à partir du spectromètre, avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs de spectres représentent les différents grains mesurés. .... 40

**Figure 2-10** : Spectres de réflectance sur les grains en sections polies mesurés à partir du spectromètre (suite), avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs de spectres représentent les différents grains mesurés.....41

**Figure 2-11** : Spectres de réflectance sur les grains irréguliers mesurés à partir du spectromètre, avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs de spectres représentent les différents grains mesurés. ....43

**Figure 2-12** : Spectres de réflectance sur les grains irréguliers mesurés à partir du spectromètre (suite), avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs de spectres représentent les différents grains mesurés.....44

**Figure 2-13** : Schéma du principe du montage optique d'une caméra multispectrale (dans ce cas à 4 bandes) permettant d'utiliser des filtres Fabry-Pérot pour obtenir des images spectrales sur le même capteur (Bertin 2013).....46

**Figure 2-14** : a. Schéma du principe de transmission du spectre par les filtres de Fabry-Pérot, avec  $\theta$  l'angle d'incidence,  $d$  la distance entre les deux miroirs ; R les miroirs réfléchissants ; et T le résultat d'interférence (Neumann *et al.* 2008); b. Détail de la matrice de filtres illustrant les différentes distances pour chaque paire de miroirs (Bertin 2013). ....47

**Figure 2-15** : Schéma représentant les bandes spectrales analysées par la caméra multispectrale d'IOS (largeur des bandes non représentatives).....49

**Figure 2-16** : Photographies de la caméra multispectrale installée sur (a.) le microscope stéréoscopique et sur (b.) le microscope pétrographique.....50

**Figure 2-17** : Schéma explicatif de la décomposition d'une image binaire en mosaïque. ...51

<b>Figure 2-18 :</b> Capture d'écran de l'interface du logiciel d'acquisition des spectres développé par IOS.....	52
<b>Figure 2-19 :</b> Spectres mesurés à partir de la caméra multispectrale sur des grains irréguliers de pyrrhotite (a.) après la normalisation et (b.) après avoir été alignés sur la première bande. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.....	54
<b>Figure 2-20:</b> Spectres de réflectance sur les grains polis mesurés à partir de la caméra multispectrale, avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains. ....	57
<b>Figure 2-21 :</b> Spectres de réflectance sur les grains polis mesurés à partir de la caméra multispectrale (suite), avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.....	58
<b>Figure 2-22 :</b> Spectres de réflectance sur les grains irréguliers mesurés à partir de la caméra multispectrale, avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains. ....	60
<b>Figure 2-23 :</b> Spectres de réflectance sur les grains irréguliers mesurés à partir de la caméra multispectrale (suite), avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.....	61
<b>Figure 2-24:</b> (a.) Spectres de réflectance de la pyrrhotite mesurés avec le spectromètre optique en comparaison avec (b.) les spectres de réflectance de la pyrrhotite mesurés avec la caméra multispectrale. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions.	63

### CHAPITRE 3

<b>Figure 3-1</b> : Schéma de l'organisation spatiale des pixels et de leurs sous-pixels au sein de la matrice de la caméra multispectrale.....	66
<b>Figure 3-2</b> : Schéma de l'organisation spatiale des sous-pixels et de l'influence de leur répartition sur l'analyse de l'objet étudié (échelle non conforme). .....	67
<b>Figure 3-3</b> : Schéma illustrant les 25 voisins les plus proches sélectionnés pour le calcul de la valeur interpolée d'un pixel donné sur une bande donnée. ....	69
<b>Figure 3-4</b> : Spectres de réflectance mesurés sur les sections polies après le traitement de la matrice de correction, à partir des images de la caméra multispectrale, avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains. ....	72
<b>Figure 3-5</b> : Spectres de réflectance mesurés sur les sections polies après le traitement de la matrice de correction, à partir des images de la caméra multispectrale (suite), avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.....	73
<b>Figure 3-6</b> : Spectres de réflectance mesurés sur les grains irréguliers après le traitement de la matrice de correction, à partir des images de la caméra multispectrale, avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.....	76
<b>Figure 3-7</b> : Spectres de réflectance mesurés sur les grains irréguliers après le traitement de la matrice de correction, à partir des images de la caméra multispectrale (suite), avec : (R)	

grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains. ....77

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

AVIRIS :	<i>Airborne visible infrared imaging spectrometer</i> (spectromètre imageur aéroporté dans le visible et l'infrarouge)
CCD :	<i>Charge-coupled device</i> (dispositif à transfert de charge)
DEL :	Diode électroluminescente
DRX :	Diffraction à rayons X
EMPA :	<i>Electron micro probe analyzer</i> (microsonde électronique)
LA-ICP-MS:	<i>Laser-ablation inductively-coupled-plasma mass-spectrometry</i> (spectrométrie de masse à plasma induit couplée à l'ablation laser)
MEB :	Microscope électronique à balayage
QUEMSCAN :	<i>Quantitative evaluation of minerals by scanning electron microscope</i> (évaluation quantitative de minéraux par microscope électronique à balayage)
RGB :	Rouge-vert-bleu
SMV :	Sulfures massifs volcanogènes
USGS :	<i>United States Geological Survey</i>
XRF:	X-ray fluorescence (spectrométrie de fluorescence des rayons X).



## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche L. Paul Bédard pour son implication et son suivi tout au long de ce projet de recherche. Paul, merci sincère pour ta disponibilité. Je me souviendrais de la convivialité de nos échanges.

Merci à Michael Higgins, qui en son statut de co-directeur a su plus d'une fois répondre à mes interrogations et m'a stimulé dans ma période de corrections.

Je remercie Réjean Girard (président et directeur général d'IOS Services Géoscientifiques Inc.) qui est à l'origine de ce projet, de m'avoir suggéré cette étude. Réjean, merci pour toutes les opportunités que tu m'offres, je suis reconnaissante de la confiance que tu m'accordes.

Je remercie Alexandre Néron, (ingénieur jr. en géologie chez IOS Services Géoscientifiques Inc.) sans qui de ce projet n'aurait pu voir le jour. J'ai beaucoup de respect pour son travail, ses idées et son génie. Je remercie aussi mes autres collègues d'IOS pour leur aide lors de la préparation de mes grains, et lors de mes analyses au MEB.

Un grand merci à l'ensemble du corps enseignant de l'UQAC. J'ai une pensée particulière pour mes mentors d'UniLasalle Beauvais, leurs valeurs et leur passion pour la science m'ont beaucoup inspirée dès le début de mes études supérieures. J'ai aussi une pensée pour tous les professeurs qui ont croisé ma route et m'ont donné de goût d'apprendre.

Merci aux fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FRQ-NT) (programme de recherche en partenariat sur le développement durable du secteur minier) pour le soutien financier alloué à ce projet. Je tiens aussi à exprimer ma gratitude pour les bourses d'études qui m'ont été attribuées par la fondation de l'UQAC et le réseau DIVEX.

J'ai une pensée spéciale pour mes compagnons universitaires qui ont ajouté de la couleur à ma vie étudiante saguenéenne : Quentin, Rémi, Sarah, Doudou, Charley, Alizée, Julien, ... et tant d'autres au Québec et ailleurs.

Merci, encore et toujours à ma famille. Ma plus sincère gratitude à mes parents, grâce à qui je n'ai jamais manqué de rien pour réussir. Je vous dois tous mes succès.

# CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

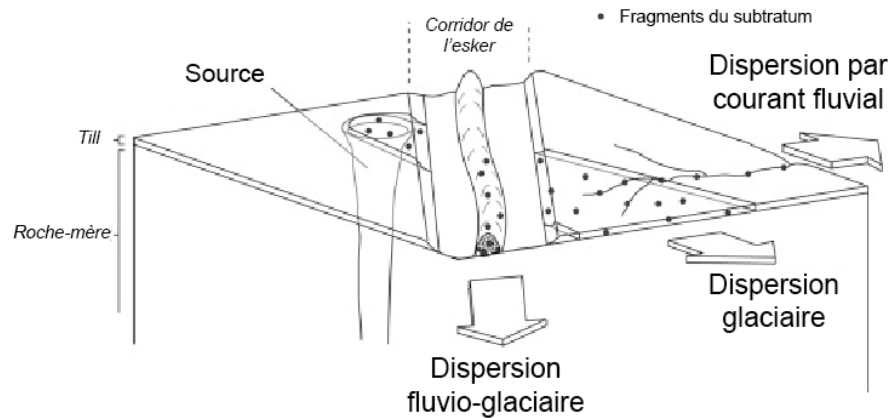
## 1.1 Problématique générale

### 1.1.1 Importance des sédiments glaciaires pour l'exploration minérale

Au cours des 50 dernières années, de nouvelles méthodes se sont ajoutées en complément à l'exploration minérale par prospection d'affleurements. Dans les régions glaciaires récentes du Canada, de la Fennoscandie, et de l'Amérique du Sud, une importante épaisseur de mort-terrain couvre le roc, limitant la découverte de nouveaux gisements. L'analyse d'échantillons de surface dans les sédiments glaciaires est alors souvent le seul outil géochimique pour l'exploration qui puisse être utilisé dans ces régions (McClenaghan *et al.* 2001). Ces sédiments issus de l'érosion glaciaire se comportent comme un témoin du substratum lorsque le sens de déplacement du glacier et les processus d'érosion associés sont connus sur la zone d'étude. Parmi les sédiments glaciaires, le till est le sédiment le plus représentatif de la composition de la roche sous-jacente (Klassen 2001). Il est mécaniquement issu du substratum et des sédiments périglaciaires orientés le long de l'écoulement glaciaire. Il est ensuite modifié par les processus d'érosion et de transport liés au déplacement du glacier (Klassen 2001).

La modélisation des trainées de dispersion glaciaires est réalisée à partir de la topographie, des stries observées sur le roc, ou encore de l'orientation des clastes dans le till. La dispersion peut être engendrée directement par le glacier, mais peut aussi être liée à un remaniement des sédiments glaciaires par les eaux de fonte (dispersion fluvio-glaciaire), ou

encore par un courant fluvial (Fig. 1-1). Lorsqu'elle est corrélée avec les résultats géochimiques, la compréhension des déplacements des glaciers permet d'identifier une source potentielle de minéralisation (McMartin et Paulen 2009).



**Figure 1-1** : Modèle des trois principaux mécanismes de dispersion des sédiments glaciaires (Cummings *et al.* 2011).

### 1.1.2 Caractérisation des minéraux indicateurs

L'analyse des sédiments de surface se concentre principalement sur les minéraux denses présents dans les tills résistants à l'altération chimique et mécanique. Lorsque ces minéraux sont reliés à un événement minéralisateur ou à un environnement favorable, ils facilitent la localisation d'une source potentielle, ce sont des minéraux indicateurs (Gent *et al.* 2011).

Les minéraux considérés comme indicateurs varient selon le contexte géologique et le type d'indice recherché (Tableau 1-1). Ils peuvent correspondre directement à la

minéralisation, être formés par l'événement minéralisateur, ou encore indiquer un environnement favorable. Les minéraux indicateurs sont généralement distribués en faible abondance de manière éparsée dans la roche mère, et sont encore moins présents dans les sédiments dérivés. Ils doivent aussi se distinguer de la minéralogie régionale.

**Tableau 1-1** : Exemple de minéraux indicateurs pour différents types de dépôts.

Type de dépôt ou de contextes ciblés	Minéraux indicateurs	Source
Dépôts aurifères	or	Averill 2001
Dépôts diamantifères	pyrope, Cr-rutile, Mg-ilménite, chromite, forsterite,...	Malkovets <i>et al.</i> 2016 Averill 2011
Dépôts SMV	sphalérite, chalcopryrite, galène	McClenaghan <i>et al.</i> 2015
Dépôts porphyriques	chalcopryrite, épidote	Plouffe <i>et al.</i> 2016
Dépôts Sn-W-M-Bi-In	cassitérite, wolframite, molybdénite, topaze, chalcopryrite, galène, sphalérite, ...	McClenaghan <i>et al.</i> 2017
Dépôts Ni-Cu	pyrrhotite, pentlandite, Cr-diopside, chromite, chalcopryrite, pyrite, arsénopyrite, millerite,...	Averill 2011 McClenaghan <i>et al.</i> 2009
Différents contextes magmatiques ou hydrothermaux	magnétite et hématite (étude des éléments traces pour la compréhension pétrogénétique d'une zone)	Dare <i>et al.</i> 2014 Dupuis et Beaudoin 2011 Nadoll <i>et al.</i> 2014

Pour récupérer ces infimes quantités de minéraux indicateurs (proche du ppb), les échantillons doivent être traités pour concentrer le matériel à analyser. La réduction de volume de l'échantillon implique la conservation et la concentration des minéraux

indicateurs, tout en évitant de contaminer l'échantillon. La plupart des minéraux indicateurs ont une densité relativement élevée, ainsi la plupart des procédés mis en place pour la concentration des minéraux utilisent différentes techniques de séparation gravimétriques, combinées avec des techniques de tamisage et de séparation magnétique (McClenaghan 2011).

À partir du concentré de minéraux denses obtenu, les minéraux indicateurs sont sélectionnés par un minéralogiste lors d'une étude visuelle sous un microscope binoculaire. Ils sont identifiés sur les propriétés telles que la couleur, l'habitus, le clivage et les textures de surface. En général, les particules les plus fines sont analysées à la microsonde électronique (*electron microprobe analyser* ; EMPA), au microscope électronique à balayage (MEB), ou par diffractométrie de rayons X (DRX) pour validation (Gent *et al.* 2011).

Les interprétations finales se basent à la fois sur l'identification visuelle de minéraux indicateurs, l'interprétation visuelle de la morphologie des grains, ou encore l'estimation visuelle de l'abondance des minéraux indicateurs dans le concentré (Gent *et al.* 2011).

### 1.1.3 Limites des méthodes conventionnelles

Dans l'idéal, pour être efficace les méthodes de traitement et d'identification des minéraux indicateurs doivent minimiser la perte de grains, limiter la contamination d'un échantillon à un autre, et enfin les minéraux indicateurs doivent être correctement identifiés (Plouffe *et al.* 2013). Spirito *et al.* (2013) ont définis cinq facteurs à considérer pour valider

la qualité de l'information liée à la méthode d'acquisition des données (Tableau 1-2).

**Tableau 1-2 :** Facteurs pouvant influencer les conclusions d'une étude sur les minéraux indicateurs (d'après Spirito *et al.* (2013).

<b>Échantillonnage</b>	1) Quel matériel a été prélevé sur le terrain? Comment a-t-il été prélevé et en quelle quantité?
<b>Traitement des échantillons</b>	2) Quelles méthodes de traitement ont été mises en place? Quelle taille de grain et quelle densité ont été traitées?
<b>Caractérisation des minéraux indicateurs</b>	3) Quels critères ont été utilisés par le minéralogiste pour identifier les minéraux indicateurs visuellement?
	4) Est-ce que la minéralogie des minéraux identifiés visuellement a été validée géochimiquement (EMPA, MEB, LA-ICP-MS, QUEMSCAN...) ou par DRX?
	5) Quelles définitions ont été utilisées pour attribuer les espèces minéralogiques? <i>Par exemple, combien de Cr doit être présent pour qu'un diopside soit classifié comme diopside chromifère, ou encore comment sont classifiées les différentes espèces de grenats?</i>

Les trois derniers critères évoqués font référence à l'identification des minéraux indicateurs, qui serait selon Gent *et al.* (2011) l'étape la plus ardue et coûteuse de tout le procédé de récupération des grains. En effet, la caractérisation du concentré est un travail fastidieux car des millions de grains doivent être traités alors que seulement 1 ou 2 grains d'un minéral indicateur particulier peuvent être significatifs dans un échantillon initial de 10 kg (Gent *et al.* 2011). Ainsi, plus le concentré de minéraux denses est gros, plus le processus d'analyse est coûteux et est sujet à des erreurs d'identification. Aussi, la qualité de l'analyse minéralogique est directement dépendante de la connaissance et de l'expérience de l'observateur (McClenaghan 2011).

En plus de son manque de fiabilité, l'identification visuelle est une analyse séquentielle, grain par grain. Lorsque l'opérateur est expérimenté sa productivité est d'environ 60 grains analysés par minute, ce qui justifie ainsi le coût élevé de l'opération (Maitre *et al.* 2018).

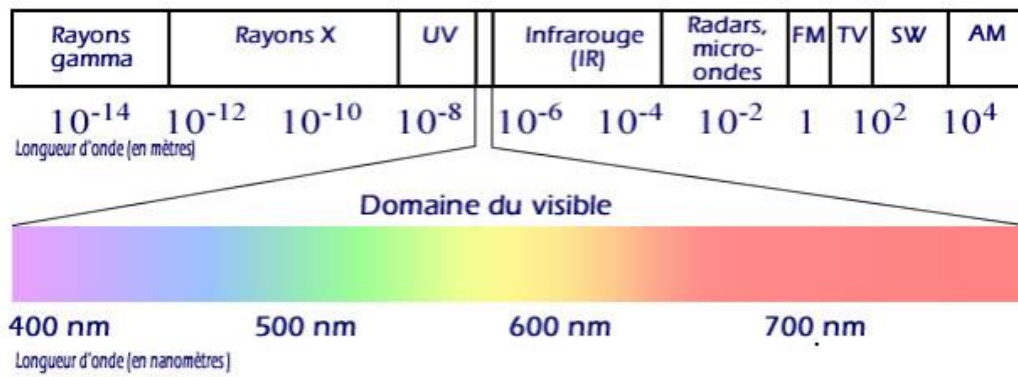
Actuellement, il n'existe pas de technologie efficiente et à faible coût permettant de remplacer l'analyse visuelle du minéralogiste (Gent *et al.* 2011). La spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF) est parfois utilisée pour la reconnaissance de grains  $\geq 1$  mm, mais cette méthode n'est pas efficiente pour l'identification de minéraux indicateurs à cause de son coût et de son incapacité à traiter les particules fines (Gent *et al.* 2011). L'analyse est séquentielle, donc lente dans la plupart des cas. L'utilisation du MEB se restreint à la validation minéralogique des grains déjà identifiés par l'opérateur car le temps d'analyse de la machine peut durer jusqu'à 5 heures par échantillon parce que la méthode est séquentielle (grain à grain). Le coût d'analyse devient alors très élevé (Maitre *et al.* 2018). Le MEB ne fournirait pas un rendement suffisamment important pour traiter l'analyse d'une campagne d'échantillonnage si l'ensemble des concentrés devait y être analysés.

Il serait donc intéressant de proposer une méthode capable de traiter rapidement une quantité importante de matériel, tout en améliorant la qualité de l'information et en réduisant les coûts d'analyse. Ce présent projet vise à développer une nouvelle méthode automatisée plus fiable et plus efficiente par l'analyse simultanée de plusieurs grains pour la reconnaissance des minéraux en grains.

## 1.2 Approche par l'imagerie multispectrale

### 1.2.1 Définition

L'imagerie multispectrale, qui connut son essor dans les années 1970, est une technique d'imagerie de précision. Initialement développée pour l'aérospatiale, cette technologie a rapidement suscité de l'intérêt dans de nombreux domaines tels que la gestion des ressources, l'environnement, et l'agriculture. Ce type d'imagerie fonctionne principalement dans le domaine optique, c'est à dire pour des longueurs d'ondes comprises entre 400 et 700 nm, mais elle peut aussi être appliquée dans le domaine infrarouge (Fig. 1-2). L'imagerie multispectrale a pour but de mesurer la réflectance de bandes spectrales contiguës sur un objet donné, pour ensuite analyser sa signature spectrale.

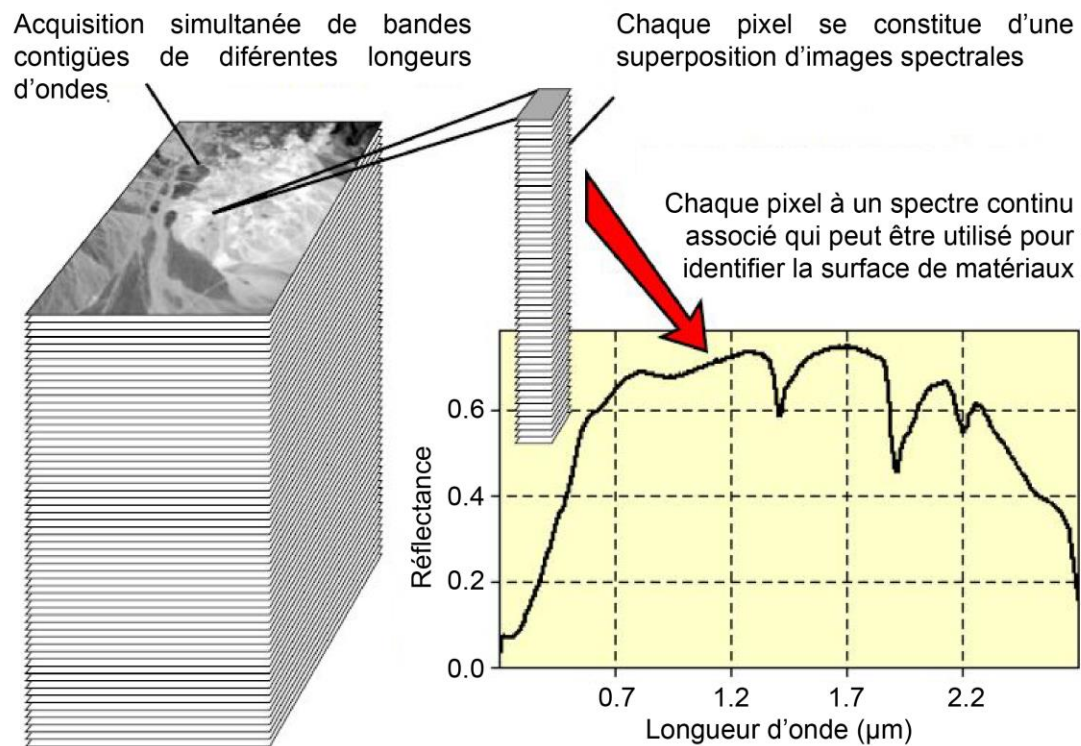


**Figure 1-2 :** Spectre électromagnétique (Guilhaumont 2015).

La réflectance est un facteur de réflexion généralement compris entre [0 - 1] ou [0% - 100%], qui désigne le rapport entre le flux lumineux réfléchi et le flux lumineux incident. Un spectre de réflectance montre la réflectance d'un matériau mesurée pour plusieurs longueurs

d'onde. L'étude de ce spectre permet de caractériser et de quantifier des objets au spectre similaire mais unique (Shippert 2004).

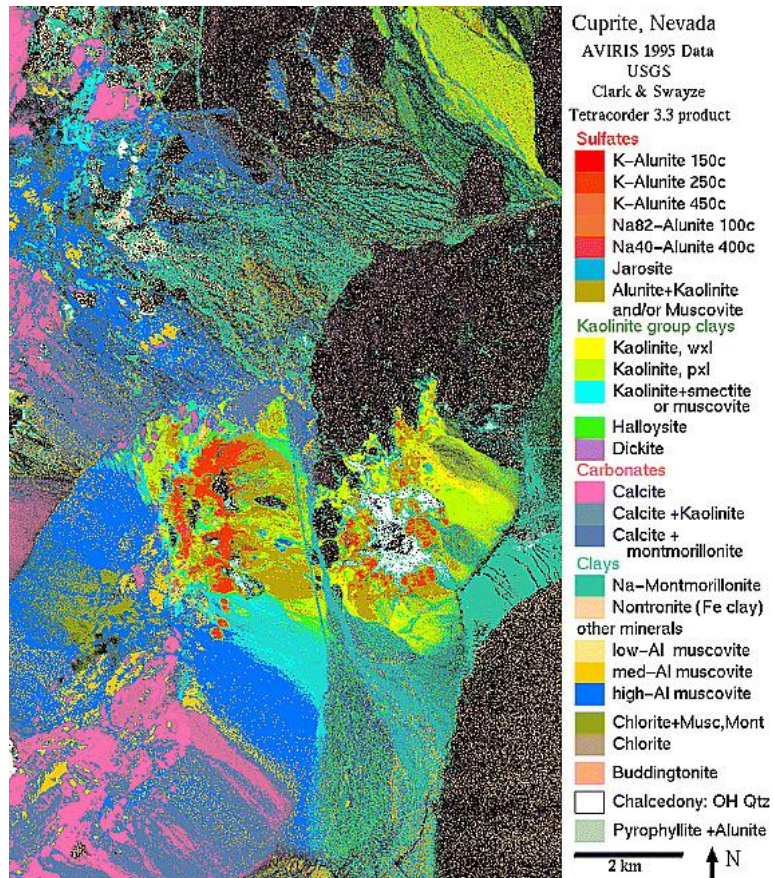
En imagerie multispectrale, chaque image constitue un assemblage de pixels. Chacun de ces pixels correspondent à un spectre complet établi d'après les mesures de la réflectance de plusieurs bandes spectrales contiguës (Fig. 1-3). La qualité et la précision de l'image sont donc dépendantes de la résolution et du nombre de bandes spectrales analysées par la caméra. Cette imagerie est qualifiée de spectrométrie hyperspectrale dans le cas où le nombre de bandes mesurées est supérieur à 20 bandes.



**Figure 1-3 :** Schéma synthétique du concept d'imagerie multispectrale pour un imageur satellite qui peut être utilisé pour identifier les matériaux à la surface de la Terre (Smith 2012).

### 1.2.2 Application à la géologie

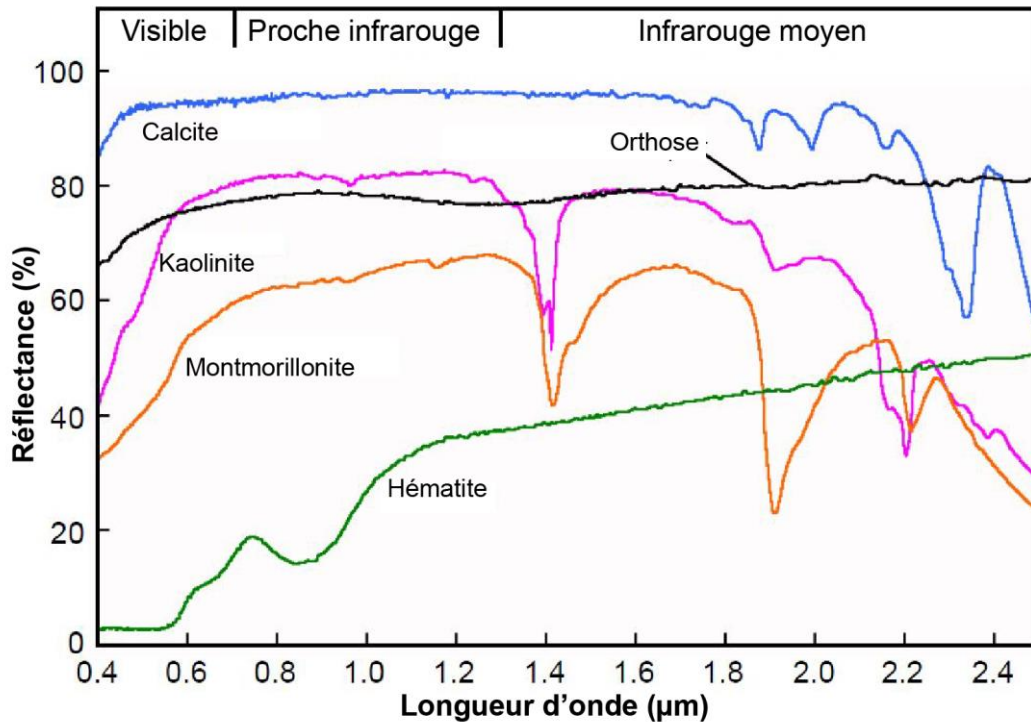
L'imagerie multispectrale possède un vaste champ d'applications et de nombreux avantages pour le domaine de la géologie. Historiquement, cette technique a été développée pour les spectro-imageurs satellitaires, tels que AVIRIS (*Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer*) qui mesurent en altitude plus de deux cents bandes spectrales du visible jusqu'à l'infrarouge de courte longueur d'ondes (400 à 2500 nm). Le spectre d'AVIRIS capture ainsi la majorité des radiations solaires réfléchies à la surface de la Terre dont une part négligeable issue de l'émission thermique (Vane *et al.* 1993). Suite à un traitement des images acquises, il est possible d'en déduire la nature des sols dans les zones dépourvues de végétation. Par exemple, Clark *et al.* (2003) ont pu cartographier avec précision la géologie de la région de Cuprite Hill dans le Nevada à partir d'images acquises par AVIRIS (Fig. 1-4). Si ce type de cartographie est un succès, c'est parce que le spectre optique d'un minéral est directement influencé par sa chimie et à sa cristallographie, ce qui rend possible la différenciation des minéraux par leur spectre de réflectance (Clark *et al.* 1990 ; Turner *et al.* 2014 ; van der Meer 2006).



**Figure 1-4 :** Carte géologique de la minéralogie hydratée de la région de Cuprite Hill (Nevada) compilée par Tetracorder à partir d'images du spectro-imageur AVIRIS (Clark et al. 2003).

En effet, la réflectance d'un minéral serait dépendante de la présence de certains éléments chimiques ou d'ions, de la charge ionique de certains éléments constituants, ou encore la géométrie des liaisons chimiques du minéral. Si bien qu'il a été démontré par certains auteurs qu'une estimation quantitative de la composition chimique de minéraux est réalisable à l'aide de l'imagerie multispectrale (Adams 1975 ; Swayze et Clark 1990). Par exemple, comme l'indique la figure 1-5, l'ion ferrique  $Fe^{3+}$  dans l'hématite serait responsable d'une forte absorption dans le domaine visible, alors que l'ion carbonate  $CO_3^{2-}$  dans la calcite aurait des bandes d'absorptions caractéristiques entre 1.8 et 2.4  $\mu m$  (Smith 2012). Aussi, la

présence de l'ion hydroxyde  $\text{OH}^-$  dans la kaolinite ou la montmorillonite se traduirait par une forte absorption aux alentours de  $1.4\mu\text{m}$  (Smith 2012).



**Figure 1-5** : Spectres de réflectance de quelques minéraux usuels (Smith 2012).

Plusieurs études ont tenté de déterminer le spectre optique des minéraux usuels à échelle réduite, la librairie spectrale de l'USGS (*United States Geological Survey*) est à ce jour celle qui compile le plus de spectres (Clark *et al.* 1990, 2007; Grove *et al.* 1992).

Ayant déjà fait ses preuves pour la télédétection, l'imagerie multispectrale se positionne comme une technologie à fort potentiel pour une reconnaissance automatisée viable de la minéralogie. Différentes compagnies telles que CoreScan (Ascot, Australie) et Specim (Oulu, Finlande) proposent des outils pour la description automatisée de carottes.

Les techniques employées fonctionnent principalement sur les mesures de spectres infrarouges sur des carottes sciées, et donc des sections planes. D'autre part, les travaux du LAMROC n'ont pas été considérés car après la lecture de leurs travaux pour ce qui concerne l'imagerie spectrale, leur méthode n'est fonctionnelle que pour l'identification de la séricite et des amphiboles.

Cette technique non-destructive, est aussi peu onéreuse puisque l'ensemble de l'équipement optique coûte entre 5 à 10 fois moins cher qu'un MEB avec capacité analytique. Grâce à un temps d'acquisition d'image quasi-instantané, cette méthode permettrait aussi, si elle est appliquée à la recherche de minéraux indicateurs dans les concentrés de minéraux lourds, un traitement automatisé plus rapide de plus grosses quantités de grains. Les travaux sur la reconnaissance optique des grains d'or au sein d'un concentré de minéraux lourds effectués par IOS Services Géoscientifiques présentent un taux de succès satisfaisant. La présente étude se base la technique développée pour la reconnaissance de l'or, qui sera présentée par la suite.

### 1.2.3 Facteurs de variabilité de l'imagerie multispectrale pour l'étude des minéraux

Divers facteurs peuvent influencer les spectres de réflectance mesurés sur des minéraux. Ces variations peuvent être significatives et complexifier la reconnaissance des minéraux via leurs signatures spectrales. Ces contraintes peuvent être techniques, technologiques, liées à la minéralogie, ou encore liées à la texture du minéral étudié.

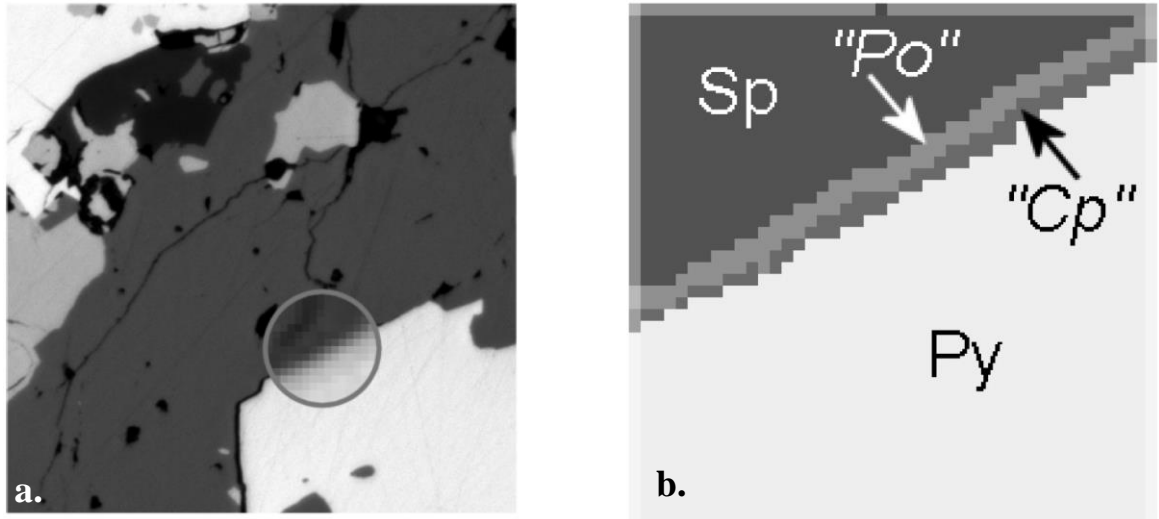
### 1.2.3.1 *Contraintes techniques et technologiques*

Dans le cas d'étude des spectres de réflectance des minéraux, la caméra multi-bandes (ou tout autre outil de mesure multispectrale) est généralement installée sur un microscope optique. Les nombreux filtres et lentilles présents dans le chemin optique, ainsi que les particules de poussière qui s'y trouvent contribuent à fausser le faisceau réfléchi mesuré par la caméra même si le minéral étudié est parfaitement homogène (Pirard 2004).

L'éclairage présent sur le microscope peut aussi être problématique puisqu'il n'est jamais parfaitement homogène. Généralement, une perte de foyer progressive et concentrique est observée du centre vers l'extérieur du champ de vue (Pirard 2004). Aussi, Pirard (2004) suggère que le design de la lumière réfléchie sur le microscope soit reconfiguré afin d'être plus adapté aux capteurs d'une caméra, puisqu'en général l'éclairage est prévu pour l'œil humain.

L'une des problématiques majeures en imagerie optique est aussi la résolution spatiale. Elle est directement liée à la capacité de grossissement du microscope et à la résolution de la caméra. La résolution devient un facteur limitant lorsque l'objet étudié est plus petit que le pixel mesuré. On assiste alors à un mélange des spectres optiques dans le cas où le pixel se situe en bordure d'un grain (sur un contact entre deux grains ; Fig. 1-6) ou bien sur une inclusion (Fig. 1-6) (Pirard 2004, 2017). D'après Pirard (2004), si les grossissements standards permettent d'obtenir une résolution de 0.5  $\mu\text{m}$  par pixel, la dégradation du spectre de réflectance due au traitement d'image et aux irrégularités dans le

minéral permettrait une quantification viable des minéraux avec une taille de grain uniquement supérieure à 10-50  $\mu\text{m}$ .



**Figure 1-6 :** Mélange de spectres au contact avec un grain de pyrite et de sphalérite (zone encadrée dans l'image a.) responsable de la fausse identification de chalcopysite et de pyrrhotite après le traitement d'image (b.) (Pirard 2004).

#### 1.2.3.2 Contraintes liées aux minéraux

Certains facteurs liés à la géochimie et à la cristallographie peuvent aussi influencer la signature spectrale d'un minéral. Tout comme pour les effets de bordures, la présence d'artéfacts tels que des clivages, des macles, des rayures ou des porosités, peuvent créer un mélange de spectres optique pour un pixel, ou même donner une réponse spectrale significativement différente de la signature originale du minéral (Pirard 2004).

L'étude de certains minéraux peut aussi être contraignante, car comme toute technologie analytique l'imagerie multispectrale est soumise à une limite de détection. Ainsi, Pirard (2004) déconseille l'étude des minéraux dont la capacité de réflectance est inférieure à 5%,

surtout lorsqu'ils sont associés à des minéraux à très forte réflectance tels que les sulfures ou les oxydes.

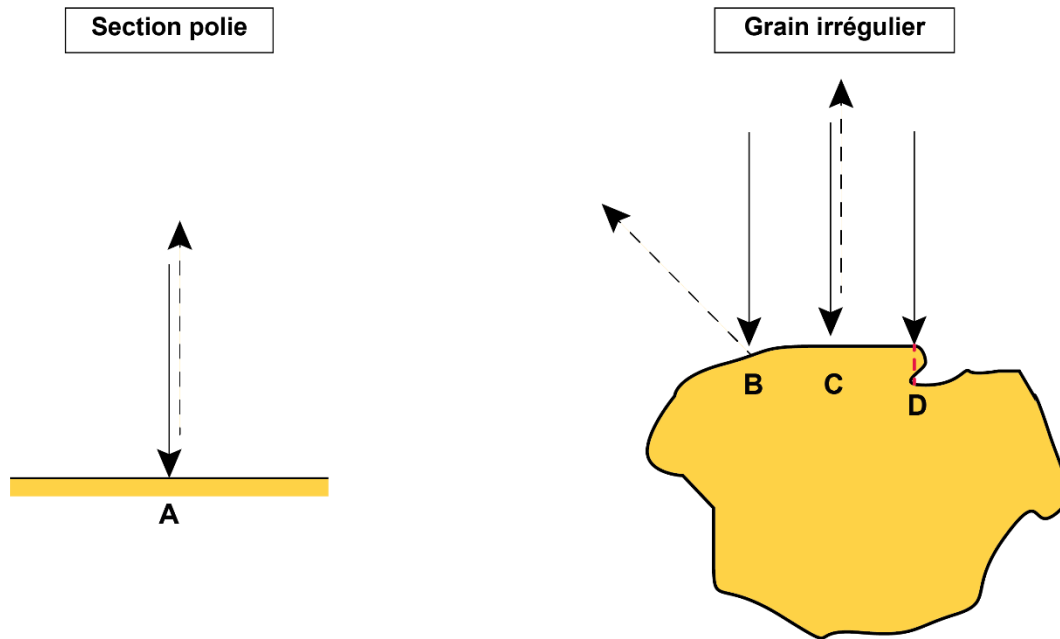
Dans le cas de minéraux à fort pléochroïsme (qui est dépendant de la géométrie du réseau cristallin) ou à forte biréflexion (qui est dépendante de l'orientation du réseau cristallin), comme pour la covellite, la stibine, la molybdénite ou le graphite, le spectre de réflectance et l'intensité de la réflectance seront variables selon l'orientation du minéral (Castroviejo *et al.* 2010).

De fortes variations géochimiques au sein d'un même minéral ou la présence de solutions solides peuvent aussi influencer directement le spectre de réflectance (Pirard 2017). Par exemple, pour la chromite des substitutions en Fe, Mg et Al sont courantes, des variations dans les spectres de réflectance de ce minéral peuvent donc être attendues (Castroviejo *et al.* 2010).

#### 1.2.3.3 *Contraintes liées à l'étude de minéraux en grains*

L'analyse multispectrale de minéraux en grains nécessite l'utilisation d'un microscope optique et présume des contraintes supplémentaires par rapport à l'analyse de sections polies. En effet, l'étude de minéraux en grains nécessite l'analyse de surfaces non planaires et non orthogonales. Dans le cas d'images hyperspectrales satellitaires, la topographie de la surface étudiée a un impact sur l'angle d'incidence, et influence donc l'angle de réflexion et l'intensité du faisceau réfléchi (Fig. 1-7). Les reliefs peuvent aussi créer des zones d'ombres, dont la réflectance est impossible à étudier à moins de changer

l'orientation de la source lumineuse (Fig. 1-7). L'impact de la texture des grains sur les spectres de réflectance sera donc similaire à celui causé par la topographie dans le cas d'images hyperspectrales satellitaires.



**Figure 1-7 :** Variation des faisceaux réfléchis selon l'inclinaison de la surface pour des sections polies (cas A) et pour des grains irréguliers (cas B et C), et effet d'ombrage (cas D).

L'observation de minéraux en grains sous un microscope optique implique aussi de nouvelles contraintes liées à la profondeur de champ. Plus le grossissement est élevé, plus la profondeur de champs est réduite, c'est-à-dire qu'il devient de plus difficile d'obtenir le focus sur l'ensemble du grain. Cela peut devenir encore plus complexe lorsque les grains étudiés n'ont pas la même granulométrie car le grossissement et le focus doivent dans ce cas être réajustés en fonction du grain à l'observation.

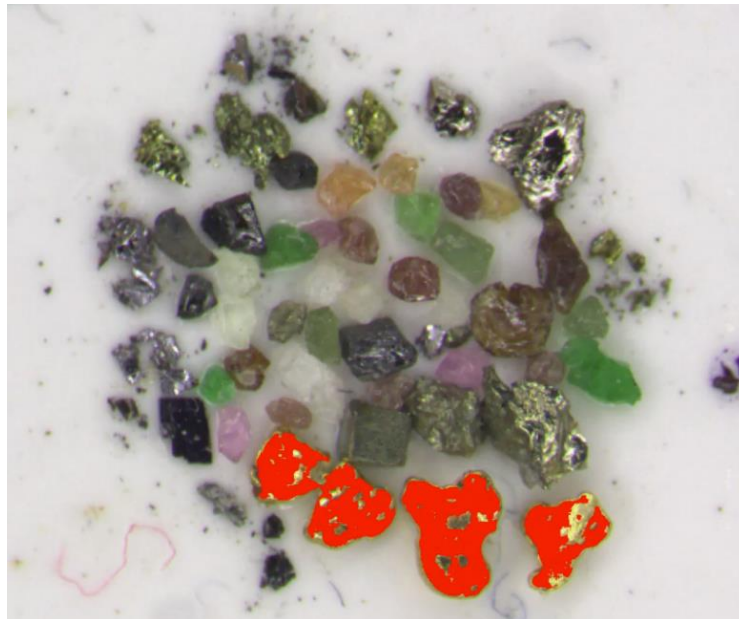
L'observation de surfaces non-planaires nécessite une intensité d'éclairage plus élevée que sur des surfaces planes. Pour les minéraux métalliques, le coefficient de réflectivité est très important, si bien que le minéral peut localement réfléchir la quasi-totalité du flux lumineux incident. Dans ces zones où l'éclat métallique est présent, il est donc impossible d'en mesurer la réflectance.

Des traces d'oxydation ou d'altérations diverses sont souvent très présentes à la surface des grains qui proviennent de sédiments détritiques. Dans le cas des sections polies, les traces d'altérations sont fortement atténuées grâce au polissage. L'observation de minéraux en grains ne nécessitant pas de préparation, il est à prévoir que les traces d'altération influencent la réflectance du minéral.

## 1.3 Automatisation du comptage de grains d'or

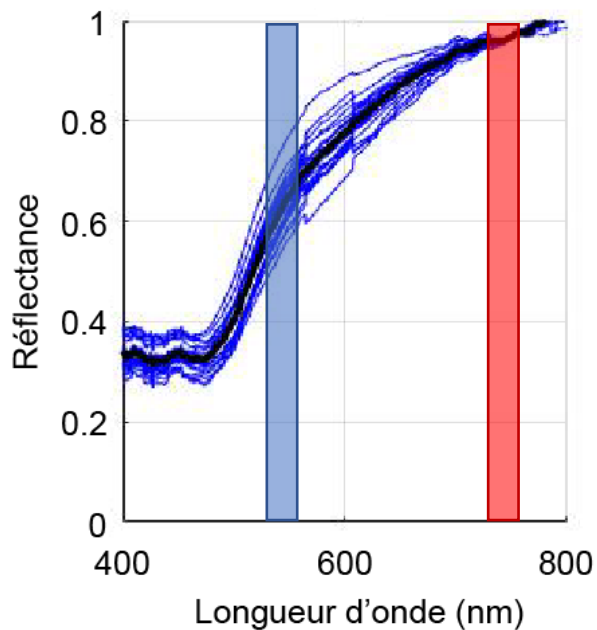
### 1.3.1 Méthode

Cette étude a été initiée en collaboration avec IOS Services Géoscientifiques Inc. et se base sur la technique développée en interne par la compagnie pour l'optimisation du comptage des grains d'or avec une caméra RGB (rouge vert et bleu). Leur technique consiste à identifier en simultanée les grains d'or parmi un concentré d'autres minéraux à l'aide d'une caméra RGB installée sur un microscope pétrographique (Bédard *et al.* 2017). Le logiciel développé par IOS fonctionne de sorte que pour chaque acquisition faite par la caméra, les spectres obtenus sont comparés avec le spectre de l'or. Une fois les grains d'or repérés, le logiciel est capable de les cartographier (Fig. 1-8).



**Figure 1-8 :** Photographie prise au microscope d'un concentré de minéraux avec des grains d'or (en rouge) identifiés par le système de reconnaissance optique (Bédard *et al.* 2017).

L'or est un minéral indicateur idéal pour la reconnaissance optique automatisée, grâce à sa couleur qui lui est propre. L'or a un spectre de réflectance unique et facilement différenciable puisqu'il présente une forte pente de 450 à 800 nm (Clark et al. 1990; 2007) (Fig. 1-9). Le logiciel identifie les grains d'or présents en soustrayant la réflectance pour les longueurs d'onde du rouge par la réflectance dans le domaine du bleu. Lorsque la soustraction rentre dans l'intervalle défini pour l'or, l'identification est validée (Bédard *et al.* 2017).



**Figure 1-9 :** Spectres de réflectance de l'or. Les courbes bleues représentent la réflectance moyenne d'un grain tandis que la courbe noire indique la réflectance moyenne de l'ensemble des grains (Communication personnelle : P. Bédard 2016).

Dans le cas d'électrums (alliage d'or et d'argent), les grains d'or contenant jusqu'à 20% d'Ag en substitution ne dérivent pas significativement du spectre de réflectance de l'or pur et peuvent être également identifiés (Bédard *et al.* 2017). De plus, même si les résultats présentent régulièrement des faux positifs, le taux de succès est satisfaisant. Cette méthode d'identification permet de rejeter jusqu'à 99% des grains présents dans le concentré initial.

Le 1% restant va ensuite être validé géochimiquement à l'aide du MEB. Contrairement aux autres techniques déjà existantes, celle-ci permet de traiter un grand nombre de grains et de donner une réponse de traitement en simultané.

### 1.3.2 Limites de la méthode

Bien que le taux de reconnaissance des grains d'or soit satisfaisant, la méthode de reconnaissance optique d'IOS présente quelques limites. La méthode d'identification du spectre de l'or a été conçue à partir des propriétés spectrales qui lui sont propres, et elle doit être adaptée pour l'identification d'autres minéraux indicateurs. Pour cela, les spectres de réflectance de ces minéraux doivent être caractérisés avec précision afin d'en déduire des critères discriminants pour chacun d'entre eux.

Aussi, le système optique fonctionne en RGB, ce qui correspond à trois bandes larges de réflexion qui sont analysées par le logiciel. Dans le cas de l'or, ces trois bandes sont suffisantes pour identifier son spectre, mais pour des minéraux dont le spectre peut être plus complexe, le système en RGB peut être limitant.

D'autre part, les mesures effectuées sur les grains d'or indiquent que pour un même grain il est possible d'obtenir une multitude de spectres. En effet, la texture de la surface du grain agit directement sur son spectre de réflectance. Si ces variations influencent peu la reconnaissance des grains d'or, il est envisageable qu'elles perturbent la reconnaissance de minéraux dont les spectres sont plus difficiles à différencier.

Enfin, le microscope pétrographique utilisé fonctionne avec un éclairage à incandescence halogène, ce qui génère une faible intensité pour les lumières bleues. Cela n'affecte pas la reconnaissance de l'or puisqu'il sa réflectance des lumières bleues est faible. Cependant, pour la reconnaissance d'autres minéraux dont la réflectance de la lumière bleue est importante cela peut devenir problématique.

## 1.4 Problématique spécifique et objectifs

Actuellement, le comptage automatisé des grains d'or par un système optique en RGB est fonctionnel et les résultats se montrent satisfaisants. Cependant, d'autres minéraux indicateurs peuvent servir de « proxy » pour exploration minérale. Il serait donc intéressant de pouvoir développer la reconnaissance optique pour d'autres minéraux indicateurs couramment utilisés comme par exemple, les oxydes et les sulfures (Tab. 1-1).

Le but de cette étude est donc de reconnaître avec un microscope optique des minéraux en grains à l'aide d'une caméra multispectrale. La présente étude s'inscrit dans la continuité de ce qui a été réalisé sur des grains d'or. Elle vise à élargir la reconnaissance optique des minéraux indicateurs en grains à l'aide de l'imagerie multispectrale. Comparés à l'or, certains minéraux peuvent présenter des caractéristiques optiques moins distinctives, c'est pourquoi l'analyse de plus de 3 bandes spectrales est requise.

Pour ce faire, les objectifs suivants devront être rencontrés :

- 1) Reconnaître différents minéraux indicateurs en sections polies à l'aide d'une caméra multispectrale
- 2) Reconnaître différents minéraux indicateurs en grains à l'aide d'une caméra multispectrale.

## **CHAPITRE 2 : ACQUISITION DES DONNÉES ET RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES**

### **2.1 Introduction**

La texture de surface du grain est considérée comme étant un facteur majeur responsable de la variation du spectre d'un minéral d'après la littérature et les observations faites sur les grains d'or. C'est pourquoi le protocole mis en place vise à réaliser des mesures de spectres de réflectance de sections polies et de grains irréguliers sur les minéraux sélectionnés, dans le but de déterminer des critères discriminants qui aideront à la reconnaissance des grains. Les mesures de spectres sur des sections polies vont permettre de définir un spectre type, qui va être comparé avec ceux obtenus sur des minéraux en grains, afin de pouvoir évaluer l'influence de la texture du grain sur sa réflectance.

Pour cela, deux types d'outils sont utilisés : un spectromètre optique et une caméra multispectrale. Le spectromètre fournit un spectre de réflectance continu moyen pour l'ensemble du grain sur un domaine de longueur d'onde beaucoup plus large que la caméra, alors que cette dernière mesure quelques bandes spectrales pixels par pixels. L'utilisation du spectromètre a pour but de confirmer les valeurs mesurées par la caméra et de donner un aperçu des spectres continus des minéraux étudiés.

Pour un même minéral, les variations sur les spectres sont supposément plus modérées sur des sections polies puisque l'influence de la texture sera limitée. Il est attendu que les spectres d'un même minéral en section polie soient très similaires puisque rien ne fait état de complexité pour la reconnaissance de minéraux polis dans la littérature.

## 2.2 Sélection des grains

Afin de minimiser les contraintes minéralogiques lors de cette étude, plusieurs critères de sélection pour les grains à l'étude ont été établis:

1. Ce sont des minéraux indicateurs reconnus dans la littérature (Tableau 1-1)
2. Les minéraux doivent appartenir à une même famille de minéraux car ils présentent une cristallographie similaire, et il est intéressant de pouvoir comparer leurs spectres de réflectance
3. Les minéraux doivent présenter une réflectivité significative (Tableau 2-1) même s'il est difficile de définir un seuil de réflectivité minimal étant donné qu'elle varie avec le type d'échantillon, l'appareil, l'éclairage, etc.
4. Les minéraux doivent être opaques car les minéraux vitreux ou translucides présentent des réflexions internes sous la surface de réflexion, qui complexifient leur signature spectrale
5. Les spectres de réflectance des minéraux, s'ils sont connus dans la littérature, doivent théoriquement permettre une différenciation dans le domaine du visible (Fig. 2-1)
6. De préférence, les minéraux doivent présenter une cristallographie relativement stable, ce qui devrait limiter les variations de la réflectance des grains de même minéralogie
7. Il est facile de se procurer ces minéraux à partir de sédiments glaciaires de différentes origines.

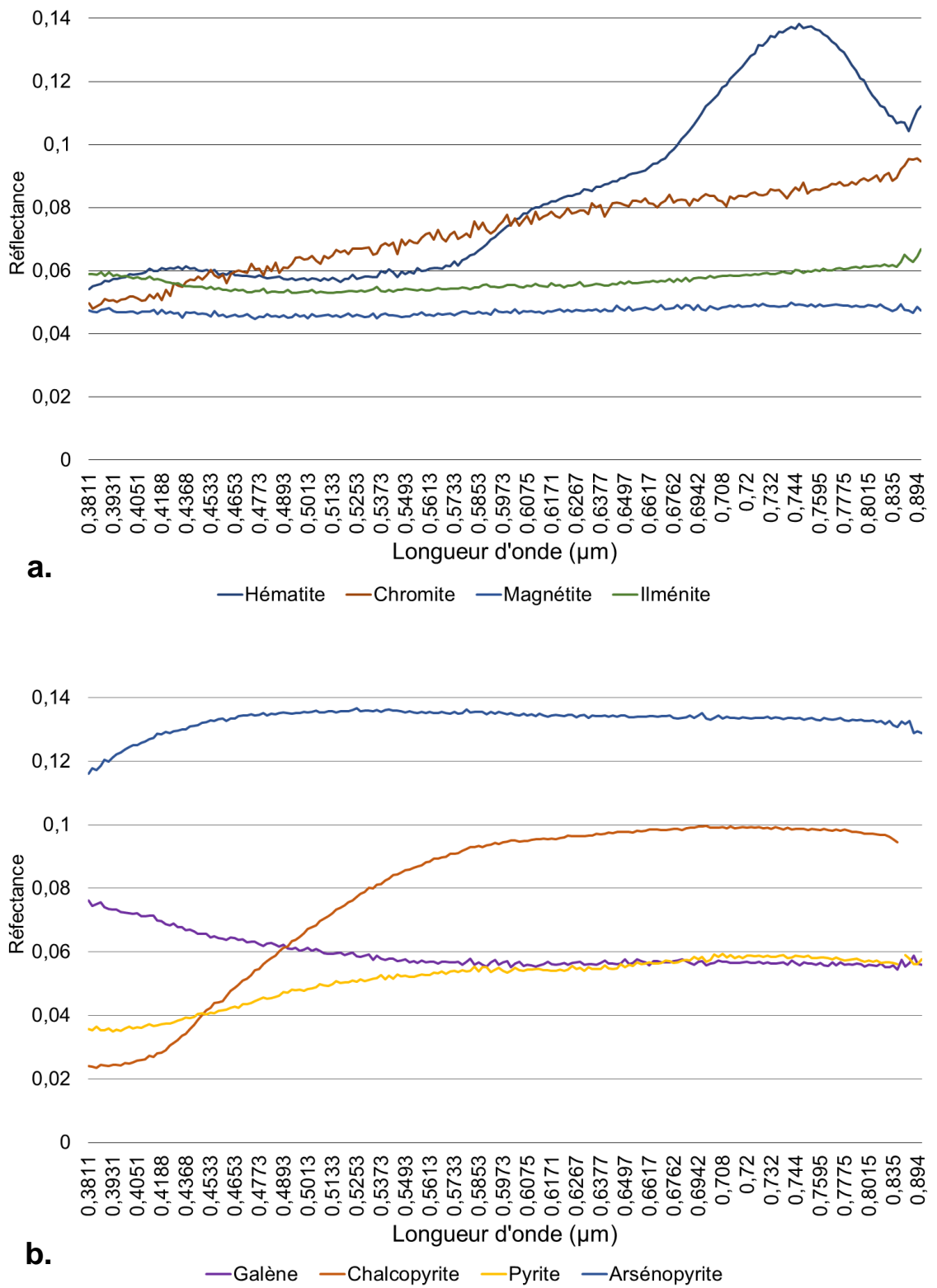
Selon les critères présentés ci-dessus, les sulfures et les oxydes apparaissent comme de bons candidats dans le cadre de cette étude. En plus d'être de bons minéraux indicateurs, ils se

présentent sous différentes couleurs, bien que dans certains cas l'œil humain ait parfois de la difficulté à les identifier. Le Tableau 2-1 présente les huit sulfures et les six oxydes qui ont été sélectionnés pour cette étude. Certains d'entre eux ne sont pas nécessairement des minéraux indicateurs cités dans la littérature (Tableau 1-1). Cependant, dans le cadre de cette étude il est important d'étudier les spectres de différents minéraux de l'ensemble de la famille minéralogique afin que les conclusions soient cohérentes, car il est possible que leurs spectres de réflectances soient similaires.

**Tableau 2-1** : Liste des oxydes et sulfures sélectionnés pour l'étude.

Minéral	Formule	Réflectance minimale dans l'air (R%) entre 546 et 589 nm (Craig <i>et al.</i> 1981)
chromite	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	13.5
hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.1 - 30
ilménite	FeTiO <sub>3</sub>	16.4 -19.6
magnétite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	20
rutile	TiO <sub>2</sub>	20-24
spécularite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
arsénopyrite	FeAsS	51.85 - 52.2
bornite	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	21.7 - 25.2
chalcopyrite	CuFeS <sub>2</sub>	44.6 - 47.2
cobaltite	CoAsS	50.6 - 52.3
covellite	CuS	4 - 23.7
marcassite	FeS <sub>2</sub>	49.1 - 56.2
pyrrhotite	Fe <sub>(1-x)</sub> S	36.3 - 40.1
pyrite	FeS <sub>2</sub>	51.7 - 53.5

Certains des minéraux choisis pour cette étude sont référencés dans la librairie spectrale de l'USGS générée par les résultats de l'étude de Kokaly *et al.* (2017). Comme l'indique la figure 2-1, des différences notables entre les spectres des sulfures et des oxydes peuvent être remarquées.



**Figure 2-1** : Spectres de réflectance de quelques oxydes (a.) et sulfures (b.) (d'après Kokaly *et al.* 2017).

## 2.3 Préparation des grains

Pour chaque minéralogie sélectionnée, 30 grains d'environ 500  $\mu\text{m}$  ont été sélectionnés. Les grains étudiés sont issus du broyage d'échantillons plus grossiers de la collection de l'UQAC, ou directement issus de tills ou de sables traités antérieurement par IOS (Tableau 2-2; Annexe 1). Deux types de grains de différentes origines ont été sélectionnés pour la magnétite, la chalcopyrite et l'hématite (Tableau 2-2). Cela permettra de comparer les spectres de mêmes minéraux mais issus de contextes différents. La sélection des grains n'a pas été strictement rigoureuse en ce qui concerne leur provenance puisque cette étude est préliminaire et vise à mieux connaître les spectres de réflectance et leurs variations pour différents oxydes et sulfures.

Pour chaque minéralogie, la moitié des grains a été fixée sur une plaque adhésive (Fig. 2-2). L'autre moitié a été coulée dans une pastille d'époxy, qui a été polie afin d'obtenir des grains en section polie (Fig. 2-3). Par la suite, une validation géochimique de l'ensemble des grains a été effectuée au MEB (Annexes 1, 2 et 3).

**Tableau 2-2 :** Liste des minéraux sélectionnés avec leur provenance.

Nom du minéral	Rang sur la plaque adhésive	Rang sur la pastille	N° de pastille	Provenance
Magnétite (1)	I	I	1	Échantillon concassé, collection UQAC
Magnétite (2)	II	II	1	Till projet 1170 IOS
Ilménite	III	III	1	Till projet 1044 IOS
Hématite (1)	IV	IV	1	Till projet 1170 IOS
Rutile	V	V	1	Till projet 1044 IOS
Chromite	VI	VI	1	Échantillon concassé, collection UQAC
Pyrite	VII	VII	1	Till projet 1044 IOS
Chalcopyrite (1)	VIII	VIII	1	Sable de formation
Pyrrhotite	IX	IX	1	Échantillon concassé, collection UQAC
Bornite	X	X	1	Échantillon concassé, collection UQAC
Covellite	XI	I	2	Échantillon concassé, IOS
Marcassite	XII	II	2	Échantillon concassé, collection UQAC
Chalcopyrite (2)	XIII	III	2	Échantillon concassé, collection UQAC
Cobaltite	XIV	IV	2	Échantillon concassé, collection UQAC
Hématite (2)	XV	V	2	Till projet 1044 IOS
Arsénopyrite	XVI	VI	2	Échantillon concassé, collection UQAC

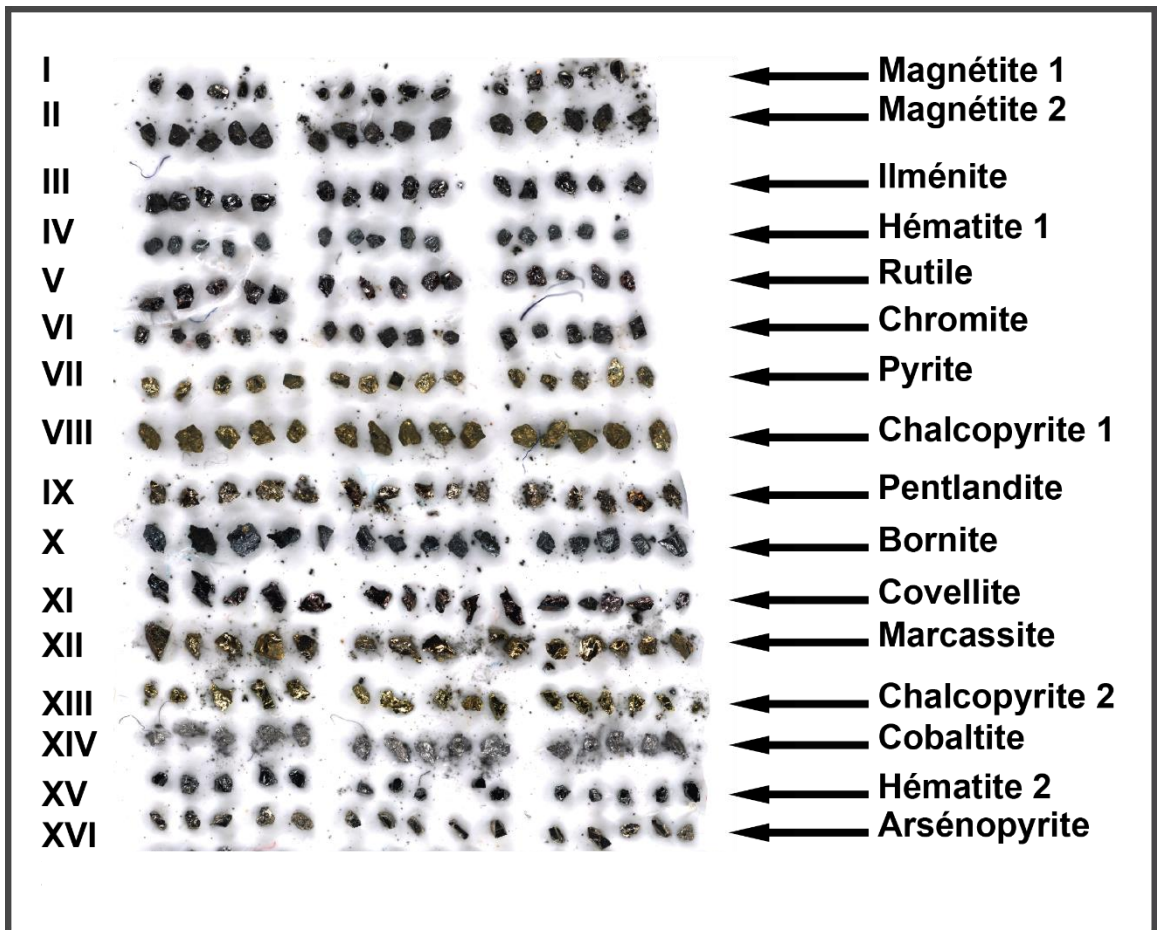
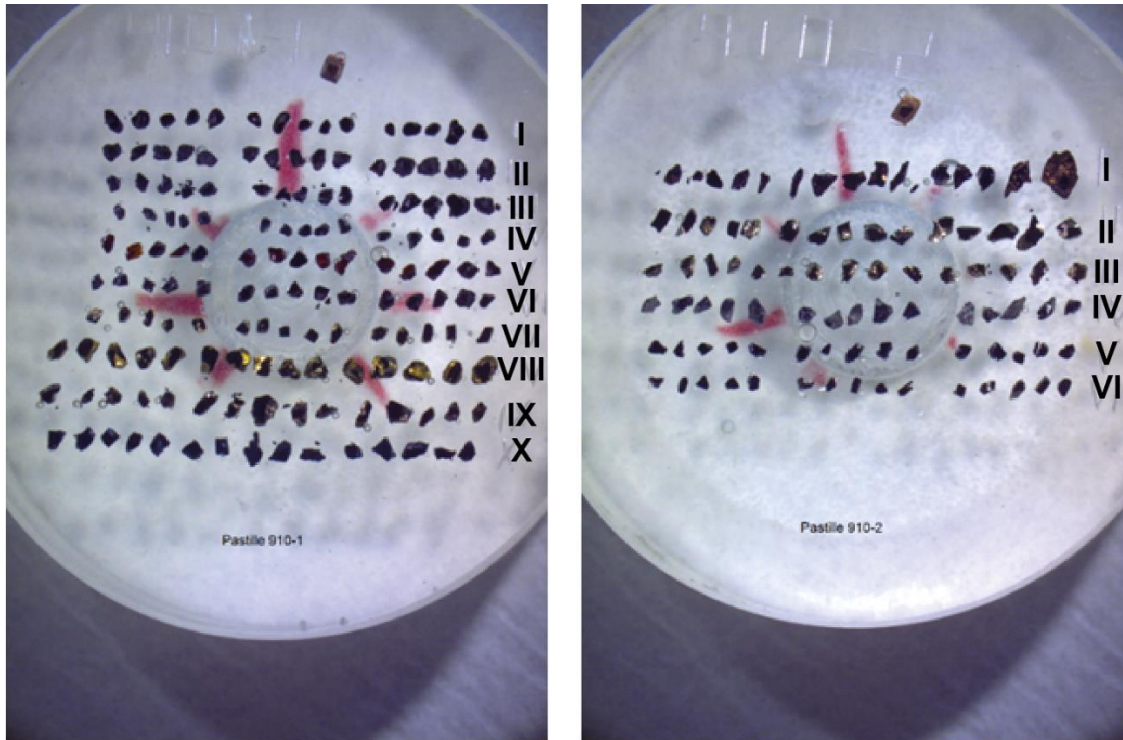


Figure 2-2 : Planche des grains « libres » étudiés pour chaque minéralogie.



**Figure 2-3 :** Pastilles présentant les grains polis étudiés pour chaque minéralogie.

## 2.4 Acquisition des spectres avec le spectromètre optique

### 2.4.1 Appareillage

#### 2.4.1.1 Spectromètre optique

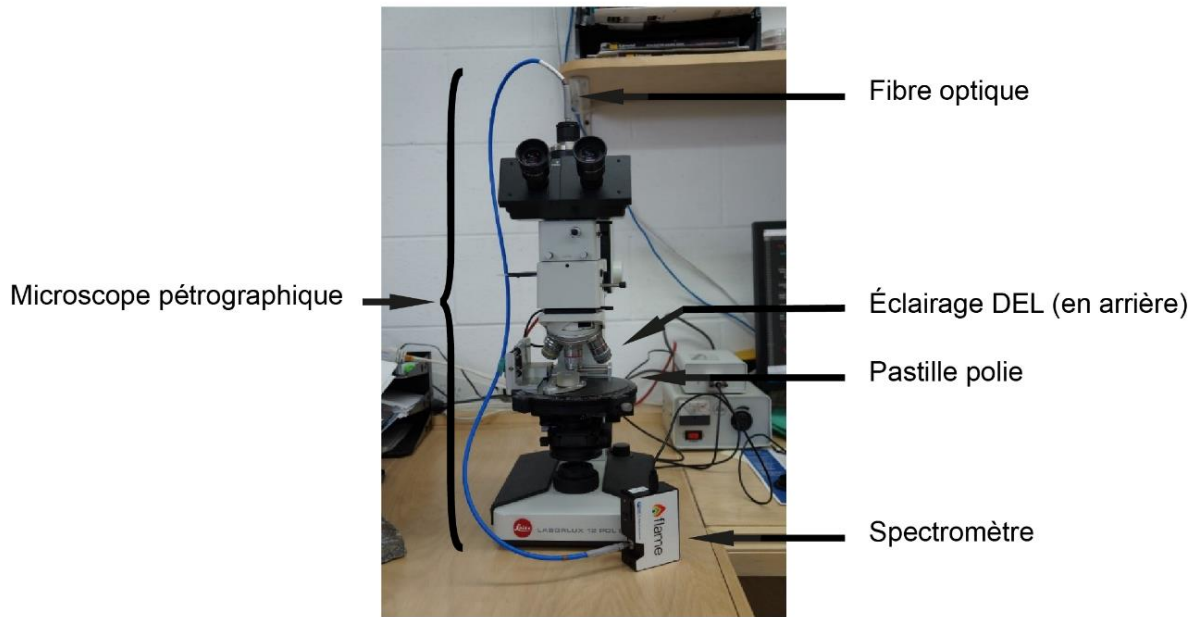
Le spectromètre optique permet d'étudier le spectre quasi-continu des faisceaux incidents réfléchis pour les longueurs d'onde comprises entre 186 nm et 1033 nm. La lumière entrant dans le spectromètre passe dans un système optique où elle est réfléchi par le collimateur avant d'être diffractée par le réseau (Fig. 2-4). Elle est ensuite réfléchi et focalisée avant d'être analysée par un détecteur. Le détecteur se compose d'autant de capteurs qu'il y a de bandes analysées. Les capteurs utilisés sont de type CCD (*charge-coupled device*), ils produisent une image en niveaux de gris dont les valeurs sont proportionnelles au nombre de photons qui frappent chaque cellule (Lane *et al.* 2008). Puis, un signal électrique transmet l'information via USB au logiciel associé au spectromètre afin d'être analysé. Le temps d'acquisition peut varier de quelques millisecondes à plusieurs secondes en fonction du paramétrage du temps d'intégration. Le spectromètre utilisé dans le cadre de cette étude est le modèle miniature Flame-SXR1 produit par Ocean Optics (Largo, États-Unis) (Fig. 2-4; Annexe 4).



**Figure 2-4 :** Schéma représentant le fonctionnement interne du spectromètre *Flame* d'Ocean Optics (d'après Ocean Optics 2015).

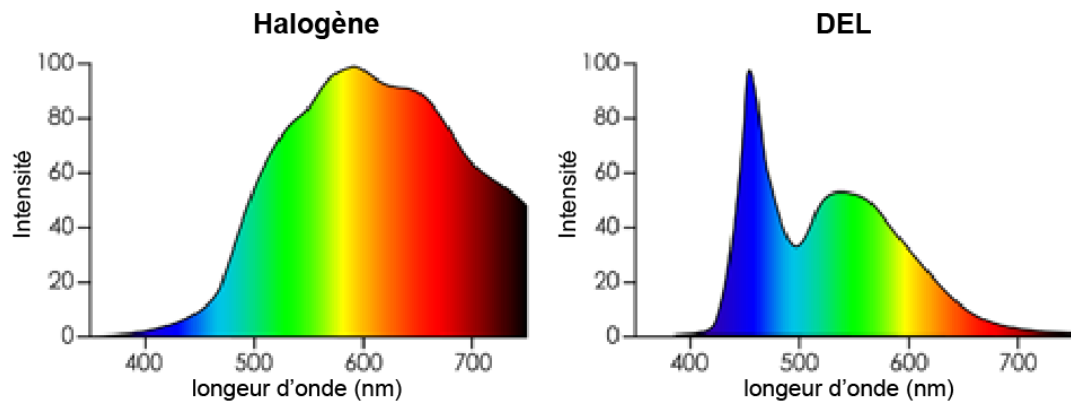
#### 2.4.1.2 *Microscope pétrographique*

Le spectromètre permet l'acquisition d'un seul spectre à la fois et la prise de mesure requiert que le grain étudié sature le champ focal du capteur. Le microscope pétrographique est alors le seul outil à notre disposition offrant un grossissement suffisant pour cela, aussi bien sur les grains en sections polies que sur les grains irréguliers. Ainsi, le spectromètre est relié au microscope à l'aide d'une fibre optique, elle-même directement installée dans l'axe du chemin optique (Fig. 2-5).



**Figure 2-5 :** Photographie du spectromètre installé sur le microscope pétrographique pour l'acquisition des spectres des sections polies.

Normalement, l'éclairage installé sur les microscopes pétrographiques est à incandescence halogène. Ici, le choix d'installer un éclairage à diodes électroluminescentes (DEL) sur le microscope pétrographique se justifie par rapport au spectre d'émission de ce dernier. Comme l'indique la figure 2-1 (paragraphe 2.2), la discrimination des spectres de réflectance des sulfures et des oxydes semble plus prononcée pour les longueurs d'ondes comprises entre 400 et 600 nm. Or, l'éclairage à DEL présente une plus forte émission pour ces longueurs d'onde que l'éclairage halogène (Fig. 2-6). Il est donc nécessaire qu'un éclairage à DEL soit installé sur le microscope pétrographique. Ce type d'éclairage n'étant pas conventionnel chez les fabricants, le système d'éclairage a dû être ébauché par nos soins à l'aide d'une ampoule DEL disponible dans le commerce.



**Figure 2-6 :** Spectres d'émission pour des éclairages à incandescence halogène et à DEL (Steiner 2017).

## 2.4.2 Acquisition des spectres

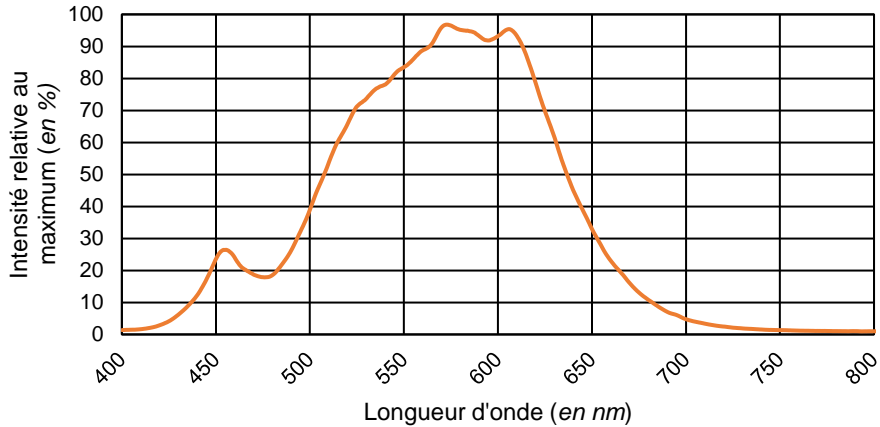
L'acquisition des spectres de réflectance est réalisée directement avec le logiciel associé au spectromètre. Le logiciel propose divers paramètres pouvant être configurés à partir de l'interface du logiciel. Le tableau 2-3 résume les configurations qui ont été paramétrées pour l'ensemble des mesures au spectromètre au cours de cette étude. Puis, le spectre de réflectance est mesuré plus ou moins simultanément selon le temps d'intégration sélectionné.

**Tableau 2-3 :** Paramétrages utilisés pour l’acquisition de spectres au spectromètre (d’après Ocean Optics 2015).

<b>Paramètre</b>	<b>Fonction</b>	<b>Configuration</b>
<i><b>Integration time</b></i>	Paramètre la durée sur laquelle le détecteur capture la lumière incidente. À la fin du temps d’intégration, le signal accumulé est lu.	1000 ms
<i><b>Averaging</b></i>	Permet d’atténuer l’impact du bruit sur les signaux. Faire la moyenne de plusieurs spectres permet d’obtenir un résultat plus lisse.	10
<i><b>Boxcar width</b></i>	Permet de faire une moyenne sur les pixels adjacents : une moyenne mobile est appliquée aux pixels voisins pour lisser la réponse spectrale et réduire l’impact du bruit.	2
<i><b>Electric dark correction</b></i>	Certains pixels sur le détecteur sont délibérément laissés noirs. La correction au noir soustrait le signal des pixels noirs afin de réduire l’impact du bruit thermique.	ON
<i><b>Non linearity correction</b></i>	Permet de considérer ou non les détecteurs qui n’ont pas un signal complètement linéaire. En général, plus ils approchent la saturation, moins ils sont efficaces.	OFF

### 2.4.3 Normalisation des spectres de réflectance

La calibration du spectromètre est prise en charge par le fabricant. Cependant comme l’indique la figure 2-7, le spectre de réflectance du blanc est biaisé par l’éclairage lorsque qu’il est acquis : on distingue principalement le spectre des DEL.



**Figure 2-7 :** Spectre du blanc mesuré avec le spectromètre avec un éclairage à DEL.

Chaque spectre acquis avec le spectromètre doit donc être corrigé à partir du spectre mesuré sur le blanc, tel que pour chaque longueur d'onde mesurée :

$$R = \frac{S}{S_{Max}} \times 100$$

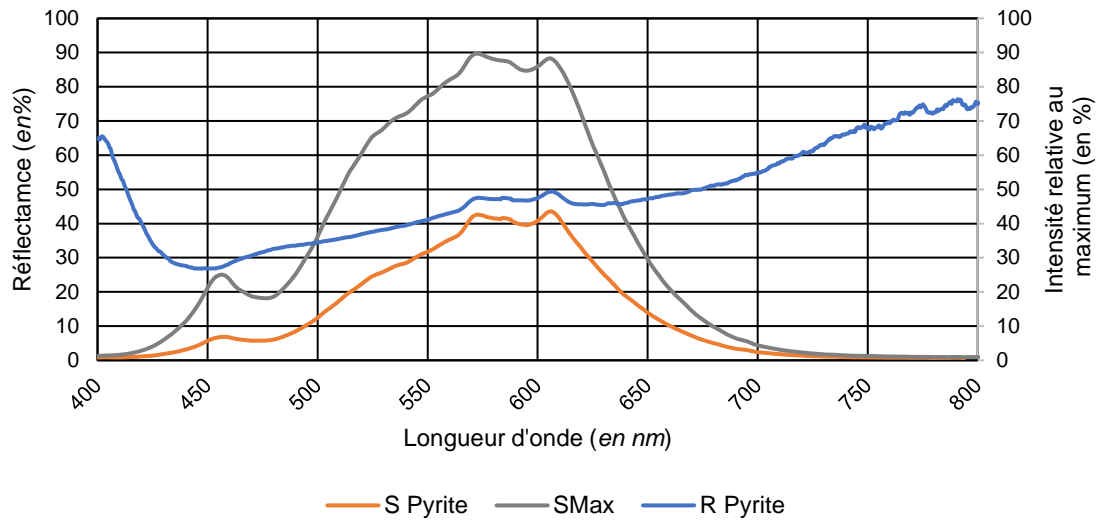
Avec :

$R$ : Valeur de la réflectance normalisée pour une longueur d'onde donnée (en %)

$S$ : Valeur de l'intensité mesurée pour la même longueur d'onde (en %)

$S_{Max}$ : Valeur de l'intensité mesurée sur le blanc pour la même longueur d'onde (en %).

Par exemple, la figure 2-8 présente un spectre de réflectance normalisé de la pyrite 1 ( $R_{Pyrite}$ ) en section polie, qui a été obtenu à partir du spectre de réflectance du blanc ( $S_{Max}$ ) et du spectre de réflectance de la pyrite 1 mesurés au spectromètre ( $S_{Pyrite}$ ).



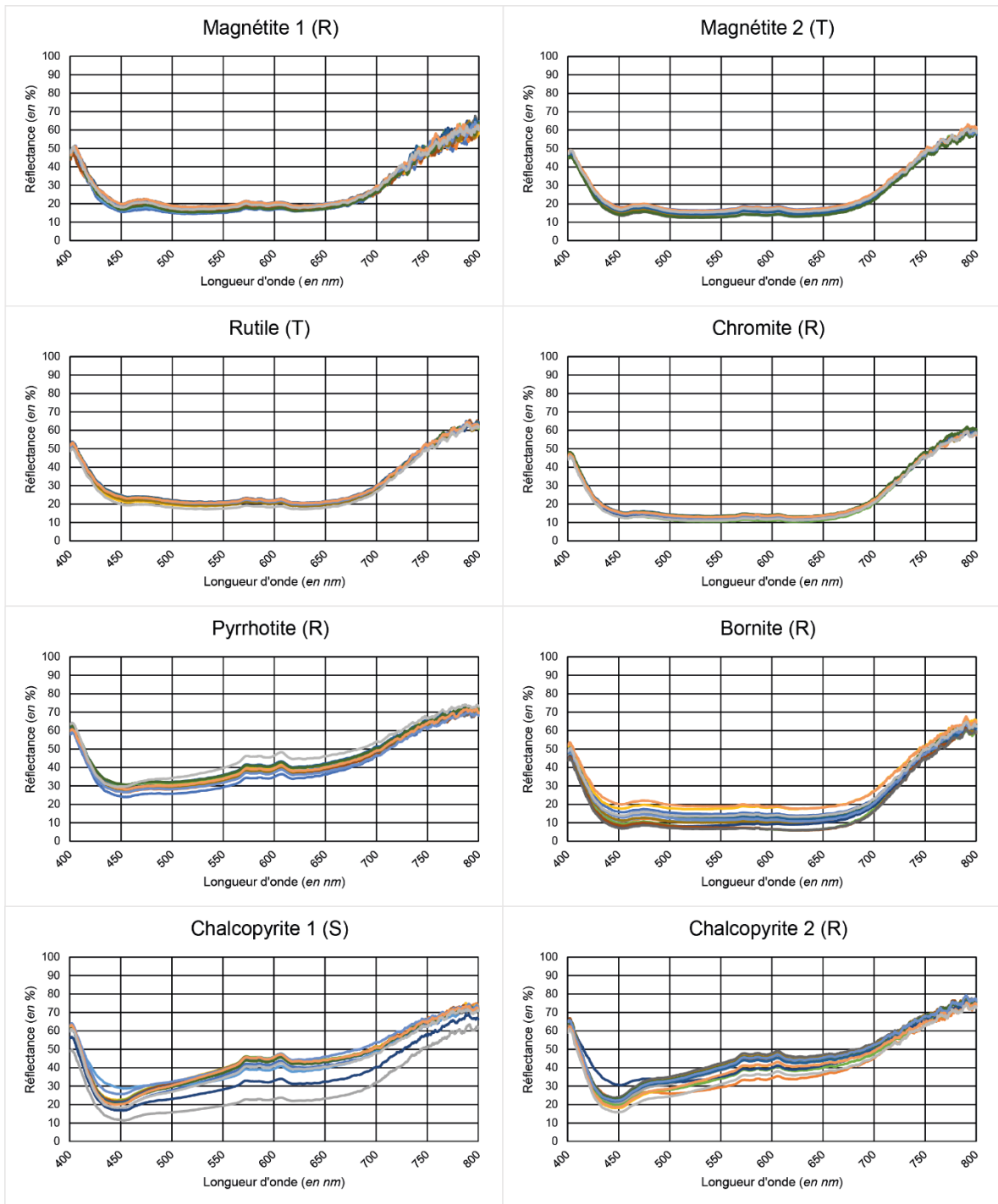
**Figure 2-8 :** Spectre de réflectance de la pyrite 1 normalisé (R) à partir du spectre de réflectance du blanc ( $S_{Max}$ ) et du spectre de réflectance d'un grain de Pyrite 1 mesurés au spectromètre (S).

## 2.4.4 Résultats

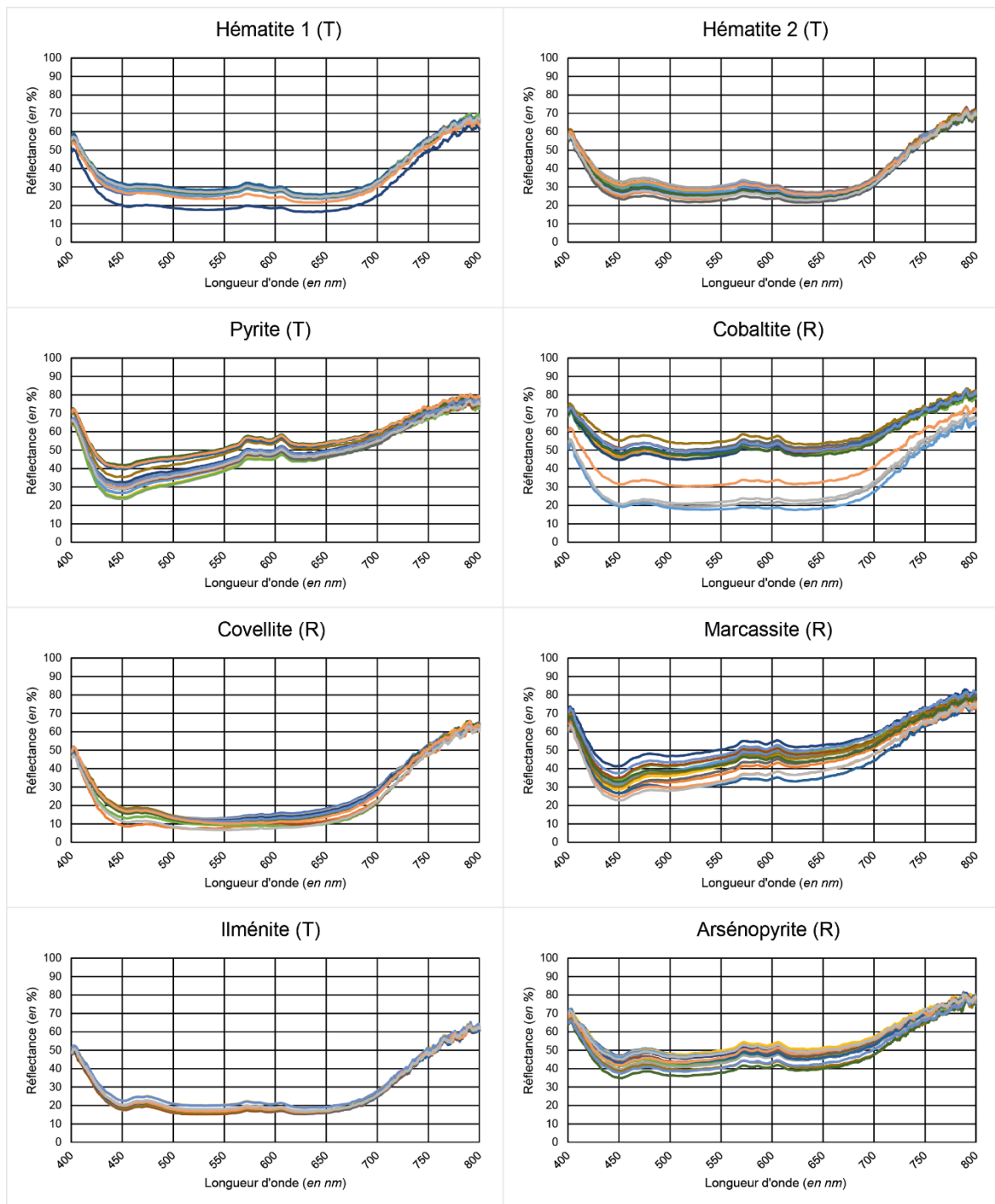
### 2.4.4.1 Résultats des spectres mesurés sur les sections polies

Les spectres de réflectance acquis par le spectromètre sur des sections polies de grains sont illustrés sur les figures 2-9 et 2-10. Pour chaque minéralogie, 15 spectres de réflectance moyens des 15 grains considérés y sont représentés. Les spectres n'ont pas été alignés, si bien qu'il est possible de comparer l'intensité relative de chacun des grains et de chaque minéralogie. Trop peu de mesures ont été réalisées pour en calculer des statistiques comme la médiane des spectres et le pourcentage de variation.

Les résultats montrent des spectres très similaires d'un grain à l'autre pour chaque minéralogie (Fig. 2-9 et 2-10). Les intensités sont aussi très similaires pour les grains d'une même famille avec de légères variations de 5 % à 15%, hormis pour la pyrite, la chalcopyrite 1, la marcassite et la cobaltite où des variations allant jusqu'à 40 % peuvent être observées. L'origine des grains, qu'ils soient issus de tills ou de roche concassée, ne semble pas influencer particulièrement l'allure de leurs spectres de réflectance. Aussi, on constate que certains minéraux possèdent une courbe qui leur est propre – tels que pour la pyrite, la cobaltite, et la chalcopyrite – alors que pour d'autres on pourrait facilement les confondre.



**Figure 2-9 :** Spectres de réflectance sur les grains en sections polies mesurés à partir du spectromètre, avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs de spectres représentent les différents grains mesurés.

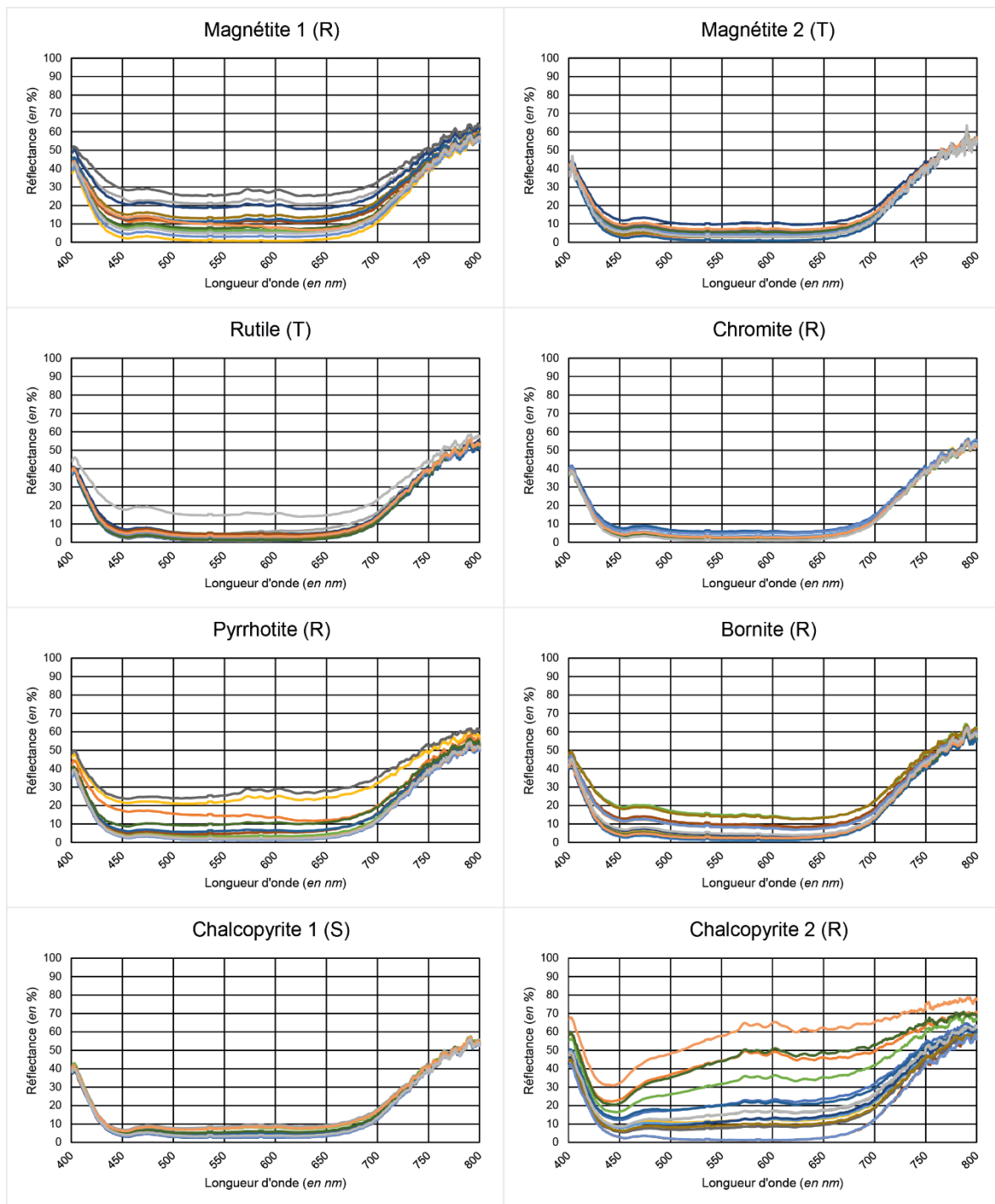


**Figure 2-10 :** Spectres de réflectance sur les grains en sections polies mesurés à partir du spectromètre (suite), avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs de spectres représentent les différents grains mesurés.

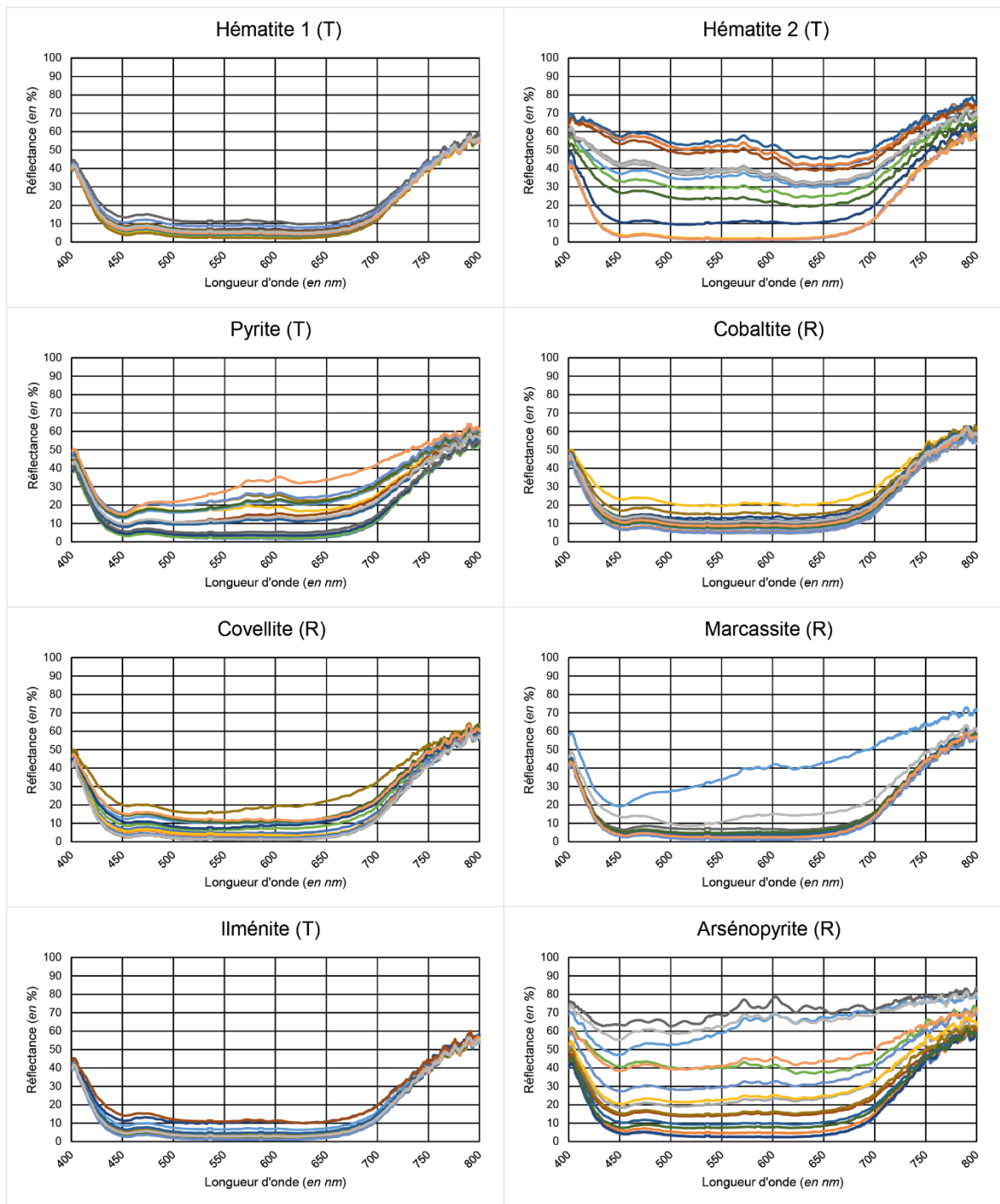
#### 2.4.4.2 *Résultats des spectres mesurés sur les grains irréguliers*

Les spectres de réflectance enregistrés par le spectromètre sur les grains « libres » sont présentés dans les figures 2-11 et 2-12. Comme pour les sections polies, 15 spectres de réflectance sont mesurés pour chaque minéralogie.

Les spectres de réflectance indiquent des variations assez faibles pour certains minéraux, tels que l'ilménite, le rutile, et la chromite. Les minéraux tels que la pyrite, la pyrrhotite, la bornite, la covellite, la marcassite, la cobaltite, et l'arsénopyrite présentent des variations plus marquées sur l'allure de la courbe et l'intensité de réflectance. Hormis pour l'arsénopyrite, ces variations observés sont relativement uniformes. Lorsque l'on compare les deux types de magnétite, d'hématite et de chalcopyrite, on remarque que les allures de courbes diffèrent là encore. En effet, on constate de fortes variations des spectres de réflectance sur les grains la magnétite 1 et de la chalcopyrite 2, qui sont issus du concassage d'un échantillon de la collection de l'UQAC, alors que les spectres mesurés sur la magnétite 2 et la chalcopyrite 1 provenant de concentrés de tills sont uniformes. Il est possible que les grains issus de tills ayant été exposé à diverses altérations aient une patine plus homogène que les grains dont la cassure est fraîche et dont l'éclat métallique est plus intense. Pour ce qui est de l'hématite 1 et 2, on observe des courbes très différentes pour le type 2, alors que le type 1 présente des spectres relativement similaires. Les deux types d'hématites proviennent de deux concentrés de tills de deux zones différentes et l'hématite 1 a été identifiée comme étant de type spéculaire. Ce type d'hématite est connu pour son fort éclat métallique, on peut ainsi suspecter qu'il soit à l'origine de ces variations.



**Figure 2-11 :** Spectres de réflectance sur les grains irréguliers mesurés à partir du spectromètre, avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs de spectres représentent les différents grains mesurés.



**Figure 2-12 :** Spectres de réflectance sur les grains irréguliers mesurés à partir du spectromètre (suite), avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs de spectres représentent les différents grains mesurés.

Dans l'ensemble on constate que les sulfures présentent plus de variations de spectres que les oxydes. Il est possible que les réflexions non-orthogonales dues à l'irrégularité de la surface, ou encore que des traces d'altérations à la surface des grains en soient la cause. Dans ce cas, les échantillons provenant de concentrés de tills devraient potentiellement être plus marqués par l'altération, entraînant donc plus de variations dans leurs spectres de réflectance. Cependant, on remarque que les minéraux dont les spectres varient le plus appartiennent à ces deux catégories : ils proviennent à la fois de concentrés de tills, et d'échantillons concassés.

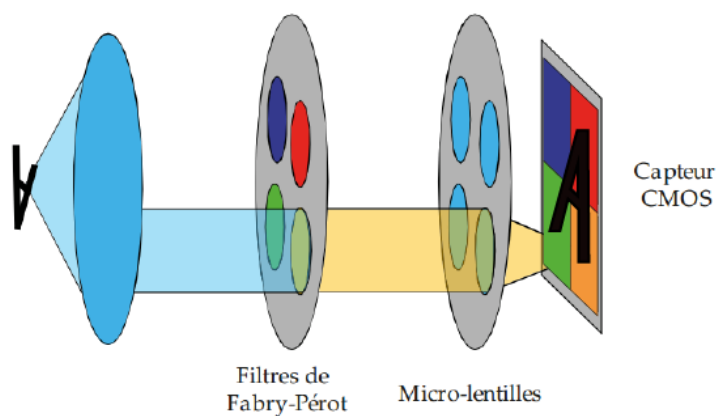
Pour l'ensemble des minéraux en section polie, les valeurs des réflectances mesurées sont cohérentes avec les valeurs de réflectance minimale dans l'air présentées dans le tableau 2-1. Pour les grains dont la surface irrégulière les valeurs de réflectance diminuent. Là encore les réflexions non-orthogonales peuvent être mises en cause puisqu'elles génèrent une perte d'intensité du faisceau réfléchi.

## 2.5 Acquisition des spectres avec la caméra multispectral

### 2.5.1 Appareillage

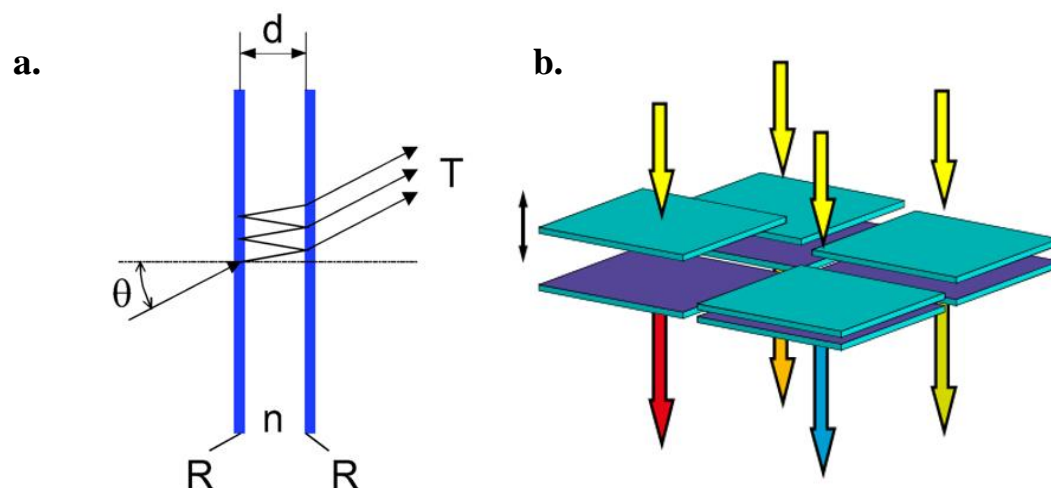
#### 2.5.1.1 Caméra multispectrale

La caméra multispectrale utilisée dans le cadre de cette étude est le modèle MVI vendu par Photon Focus (Lachen, Suisse) (Annexe 5). La caméra multispectrale fonctionne sur l'analyse des faisceaux incidents réfléchis sur le matériau étudié. Après avoir traversés un collimateur, les faisceaux incidents traversent plusieurs filtres de Fabry-Pérot puis un réseau de micro-lentilles (Fig. 2-13). Un nombre d'images égal au nombre de filtres de la même scène est ensuite généré sur un capteur d'image. Les images sont enfin combinées pour former une image multispectrale (Bertin 2013).



**Figure 2-13 :** Schéma du principe du montage optique d'une caméra multispectrale (dans ce cas à 4 bandes) permettant d'utiliser des filtres Fabry-Pérot pour obtenir des images spectrales sur le même capteur (Bertin 2013).

Chacun des filtres Fabry-Pérot se compose de deux miroirs semi-réfléchissants. Les faisceaux incidents se réfléchissent au sein de la matrice de Fabry-Pérot jusqu'à ce qu'un résultat d'interférence se forme en sortie de cavité par superposition des faisceaux réfléchis (Fig. 2-14 a.). C'est l'espace entre ces deux miroirs qui permet de sélectionner la longueur d'onde filtrée (Fig. 2-14 b.). Le nombre de matrices de Fabry-Pérot définit le nombre de bandes spectrales qu'analyse la caméra.



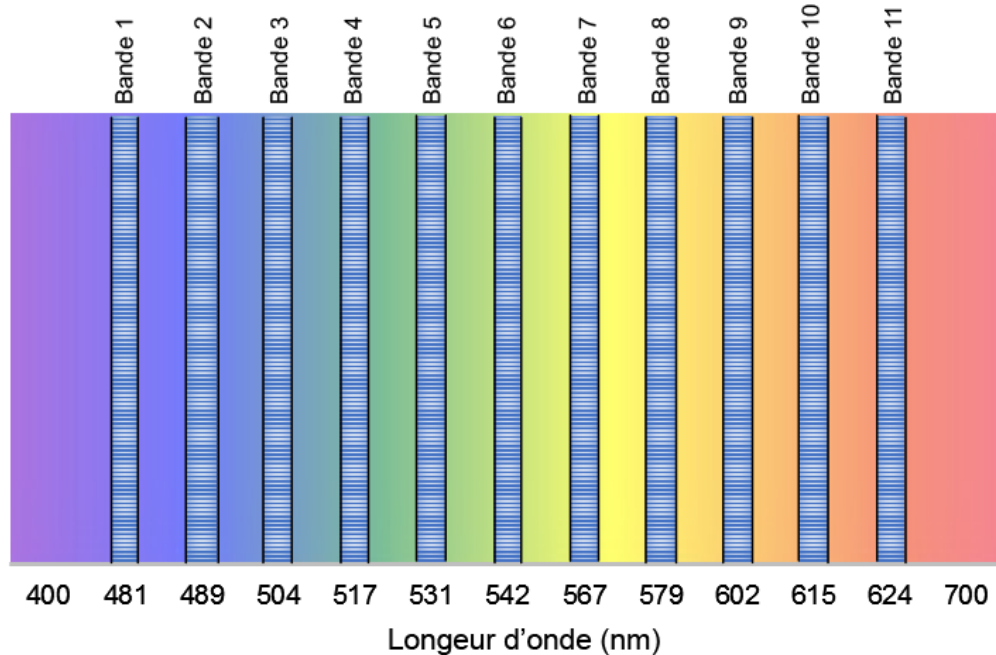
**Figure 2-14 :** a. Schéma du principe de transmission du spectre par les filtres de Fabry-Pérot, avec  $\theta$  l'angle d'incidence,  $d$  la distance entre les deux miroirs ; R les miroirs réfléchissants ; et T le résultat d'interférence (Neumann *et al.* 2008); b. Détail de la matrice de filtres illustrant les différentes distances pour chaque paire de miroirs (Bertin 2013).

Avec les caméras de Photon Focus, les caractéristiques des filtres vont varier d'un capteur à un autre, et donc d'une caméra à une autre. La calibration du capteur est effectuée juste après sa manufacture. La réponse spectrale de chaque filtre du capteur est ainsi mesurée sous un éclairage ortho-collimaté pour chaque longueur d'onde, nanomètre par nanomètre,

de 470 à 630 nm (IMEC 2016 b.). Le résultat de la calibration se présente sous la forme d'une matrice de réponse qui contient toutes les caractéristiques spectrales de chaque filtre.

Lors de l'utilisation de la caméra, la réponse du capteur correspond à l'intensité de la lumière réfléchie mesurée pour chacune des bandes physiques. L'information spectrale fournie en sortie par la caméra est calculée par la suite à partir d'une matrice de correction, selon les caractéristiques de la matrice de réponse. Des bandes virtuelles sont alors calculées à partir du nombre de bandes physiques présentes sur les filtres. Si en théorie le nombre de bandes virtuelles est illimité, en pratique ce nombre est toujours plus petit ou égal au nombre de bandes physiques. Dans certains cas, le nombre de bandes virtuelles est nettement inférieur au nombre de bandes physiques à cause de fortes corrélations entre les réponses de certaines bandes physiques, ou encore à cause d'un enregistrement défaillant pour le signal d'une ou plusieurs bandes physiques (IMEC 2016 a.).

Ici, la caméra multispectrale utilisée présente 16 filtres différents par pixels, ce qui lui permet de mesurer 16 bandes physiques différentes dans une mosaïque de 4 sous-pixels par 4 sous-pixels, dont le domaine spectral est compris entre 470 et 630 nm. Chacune des bandes physiques possède une largeur à mi-hauteur de 15 nm et une résolution spatiale de 512 x 256 pixels (IMEC 2016 b.). La matrice de correction se présente sous la forme d'un code à l'intérieur de la caméra et nous indique que le modèle utilisé est pourvu de 11 bandes virtuelles comprises entre 481 nm et 624 nm (Fig. 2-15). De plus, il est à noter que l'acquisition des images est quasi-simultanée et que le temps d'exposition caméra ne peut pas être paramétré.

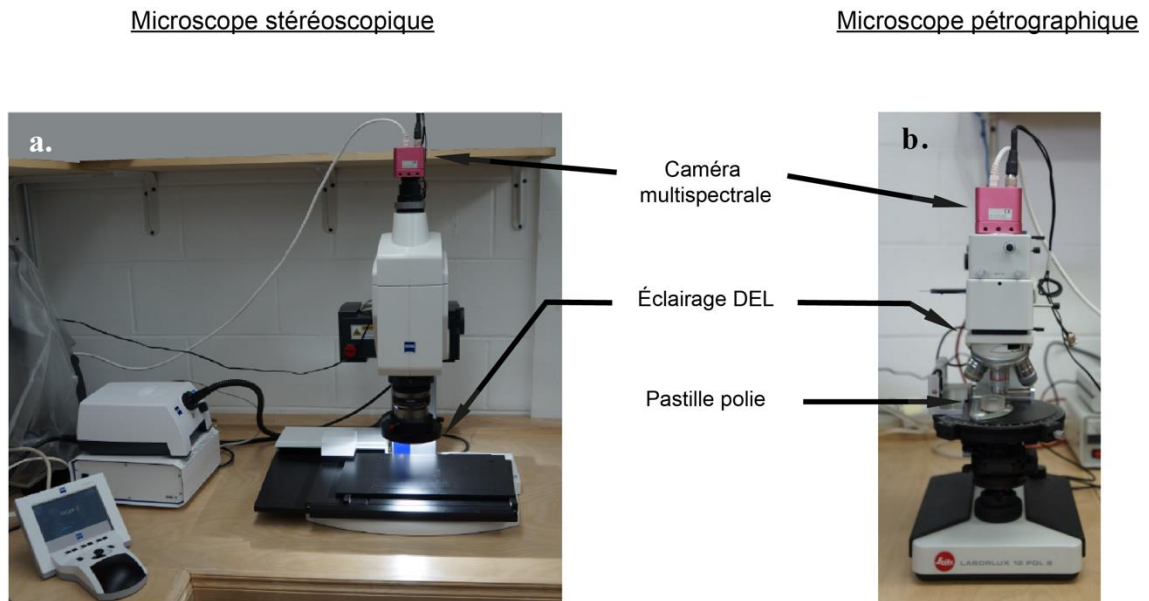


**Figure 2-15 :** Schéma représentant les bandes spectrales analysées par la caméra multispectrale d'IOS (largeur des bandes non représentatives).

### 2.5.1.2 *Microscope pétrographique et stéréoscopique*

La caméra multispectrale doit être installée sur deux types de microscopes selon que les grains à l'étude soient irréguliers ou polis. Alors que le microscope pétrographique permet une visualisation à fort grossissement associée à un éclairage orthogonal, le microscope stéréoscopique propose une plus grande profondeur de champ pour l'observation d'échantillons en relief. Ce dernier possède aussi un éclairage épiscopique à DEL, ce qui est idéal pour l'observation d'échantillons à la texture variable, tels que des grains irréguliers. Comme pour les mesures effectuées au spectromètre le microscope pétrographique a été agrémenté d'un éclairage DEL.

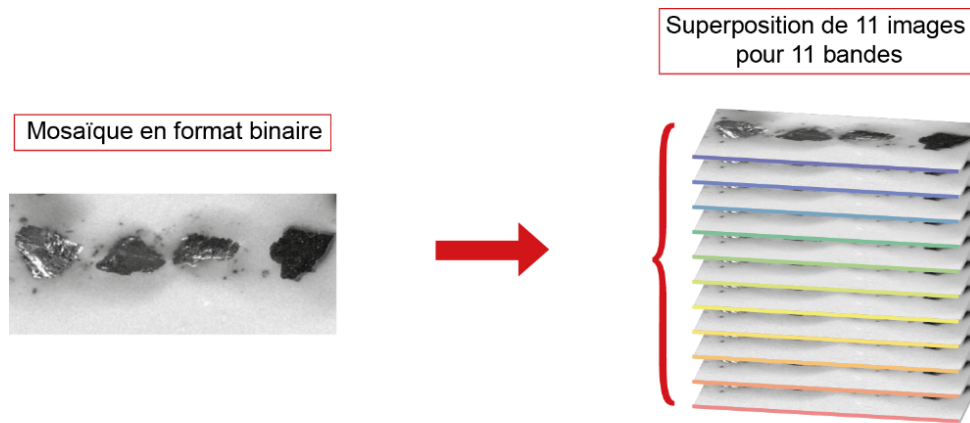
Ainsi, l'observation de grains irréguliers est réalisée sous le microscope stéréoscopique (Fig. 2-16 a.), alors que l'étude des grains en sections polies requiert l'utilisation du microscope pétrographique (Fig. 2-16 b.).



**Figure 2-16 :** Photographies de la caméra multispectrale installée sur (a.) le microscope stéréoscopique et sur (b.) le microscope pétrographique.

### 2.5.2 Acquisition d'images

La caméra multispectrale permet l'acquisition d'images en format binaire. Les images « brutes » se présentent sous forme de mosaïque à partir de laquelle il est possible d'extraire 11 images. Ces 11 images correspondant alors aux 11 bandes virtuelles mesurées par la caméra (Fig. 2-17). Il est possible d'acquérir les images à partir du logiciel de la caméra et du logiciel d'acquisition de spectres d'IOS.



**Figure 2-17 :** Schéma explicatif de la décomposition d’une image binaire en mosaïque.

### 2.5.3 Acquisition des spectres

La méthode d’acquisition des spectres est la même pour les grains irréguliers sur le microscope stéréoscopique que pour les grains polis sur le microscope pétrographique, elle s’effectue à l’aide d’un logiciel créé en interne d’IOS (Fig. 2-18).

Le logiciel fonctionne de sorte qu’il calibre les 16 bandes physiques avant de recalculer une image à 11 bandes à l’aide de la matrice de correction du fabricant. Le logiciel permet aussi de visualiser en temps réel une fausse image RGB des grains à l’étude afin de permettre à l’utilisateur d’extraire pixels par pixels les spectres de réflectance mesurés (Fig. 2-18).

Pour chaque nouvelle utilisation du logiciel, une image du blanc et une image du noir sont demandées en entrée afin de calibrer les images à l’étude (voir le paragraphe 2.5.4 *Normalisation des images multispectrales*). Après cela, il suffit de sélectionner le pixel sur

le minéral d'intérêt, dont on veut connaître le spectre de réflectance sur l'image reconstituée en RGB.

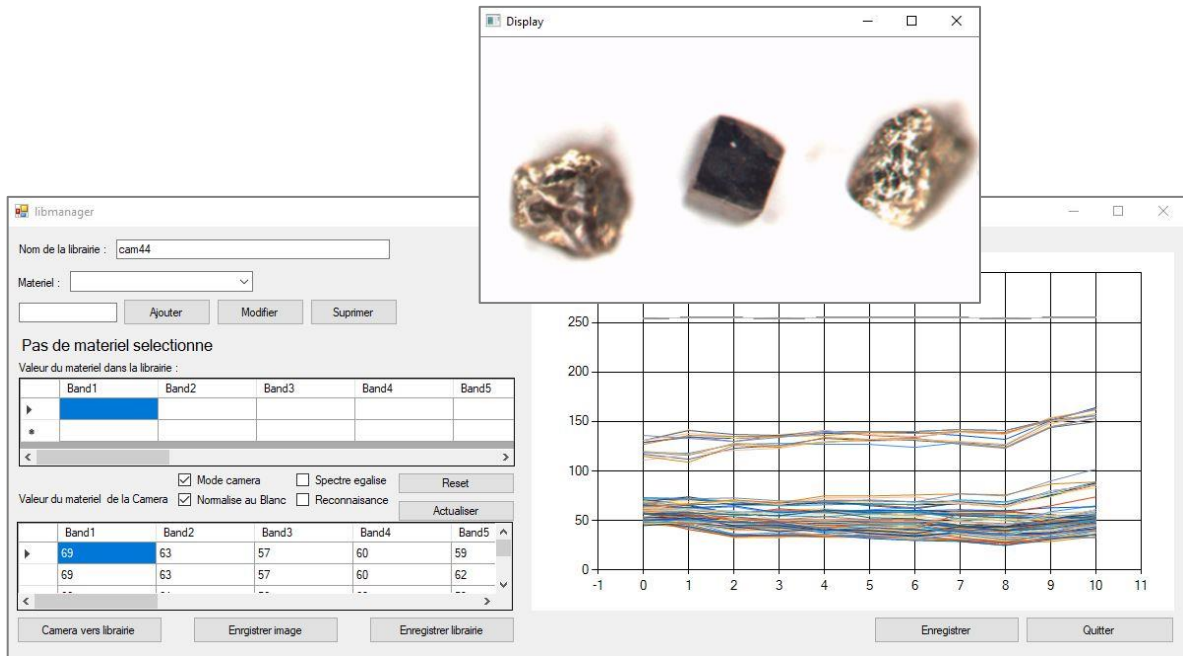


Figure 2-18 : Capture d'écran de l'interface du logiciel d'acquisition des spectres développé par IOS.

## 2.5.4 Normalisation des images multispectrales

Avant toute interprétation, les images et *a fortiori* les spectres de réflectance doivent être normalisés. La normalisation est un procédé qui consiste à ajuster les valeurs d'intensité de chaque pixel de façon à ce que ces valeurs soient bien réparties entre le minimum et le maximum permis. Par exemple, pour les images en niveaux de gris l'intervalle permis est [0, 255]. La normalisation agit donc comme une correction qui a pour but d'augmenter le contraste d'une image, simplifiant ainsi la comparaison des spectres entre eux.

Dans le cas de la caméra multispectrale, une normalisation au spectre du « blanc » et au spectre du « noir » est nécessaire. Pour chaque pixel et pour chacune des bandes physiques le calcul suivant est réalisé :

$$I_N = 100 \times \frac{I - Min}{Max - Min}$$

Avec :

$I_N$  : Valeur normalisée du pixel pour une bande donnée

$I$  : Valeur mesurée du pixel pour cette même bande

$Max$  : Valeur mesurée du blanc pour cette même bande

$Min$  : Valeur mesurée du noir pour cette même bande.

Lors de l'acquisition de spectres ou d'images, le spectre obtenu est déjà normalisé puisque la normalisation est réalisée sur les 16 bandes physiques avant le calcul de la matrice de correction. L'acquisition d'un blanc et d'un noir est demandée en entrée dès l'ouverture du logiciel.

### 2.5.5 Alignement des spectres

Une fois la normalisation effectuée, les spectres ont été alignés sur la première bande afin de simplifier leur lecture. La figure 2-19 a. indique les spectres normalisés obtenus sur des grains irréguliers de pyrrhotite, et montre que ces spectres possèdent différentes intensités de réflectance. La réflectance mesurée est inclinée, c'est pourquoi les variations d'intensités peuvent être très importantes, contrairement au cas d'une réflexion orthogonale. Il est alors difficile de visualiser l'allure générale des spectres et d'estimer leurs variations. C'est

pourquoi tous les spectres sont alignés sur la valeur moyenne de réflectance de la première bande. Pour chaque spectre la même valeur pour la bande 1 est attribuée, puis les valeurs de ses 10 autres bandes sont calculées, telles que :

$$B_{x'} = (A_1 - B_1) + B_x$$

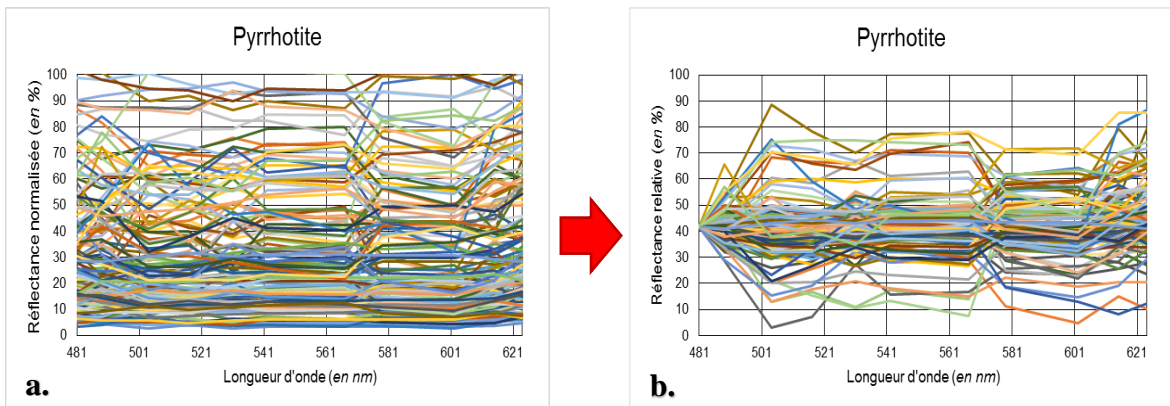
Avec :

$B_{x'}$  : Valeur de réflectance recalculée pour l'alignement sur la valeur moyenne de réflectance de la bande 1, pour une bande du même spectre (bande 2 à 11)

$A_1$  : Valeur de réflectance moyenne de la première bande, calculée sur tous les spectres mesurés sur le grain

$B_1$  : Valeur de réflectance pour la bande 1 d'un spectre donné

$B_x$  : Valeur de réflectance pour une bande donnée du même spectre (bande 2 à 11).



**Figure 2-19** : Spectres mesurés à partir de la caméra multispectrale sur des grains irréguliers de pyrrhotite (a.) après la normalisation et (b.) après avoir été alignés sur la première bande. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.

Après l'alignement, l'allure des spectres se distingue mieux et il est possible de les comparer entre eux (Fig. 2-19 b.). Dans cette étude on s'intéresse principalement à l'allure des spectres de réflectance. C'est pourquoi, les spectres recalculés s'expriment en réflectance relative, puisque l'intensité de leur réflectance n'est pas celle mesurée. Les intensités de réflectance d'un minéral à un autre ne sont pas étudiées.

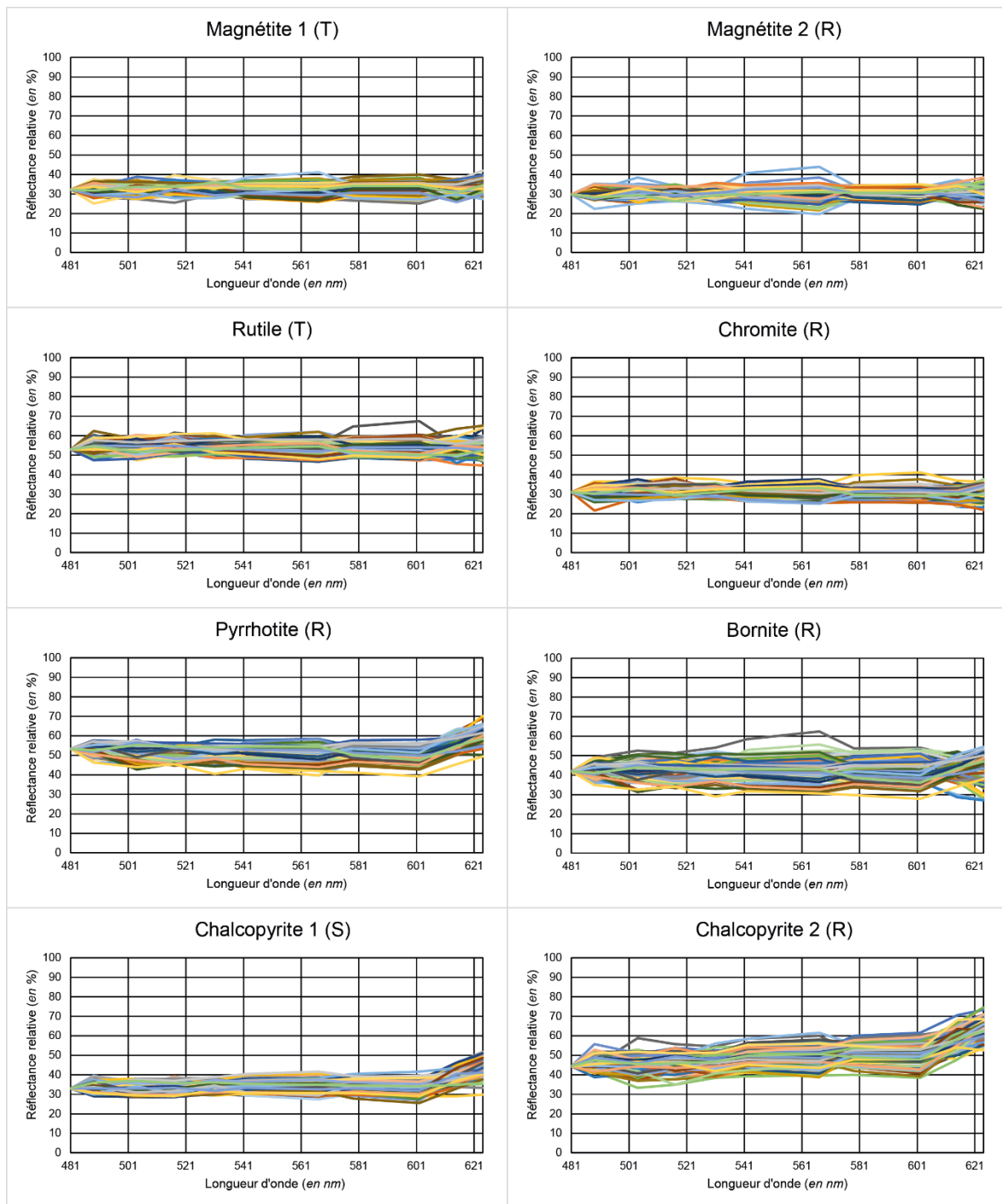
## 2.5.6 Résultats bruts

### 2.5.6.1 *Résultats des spectres mesurés sur les sections polies*

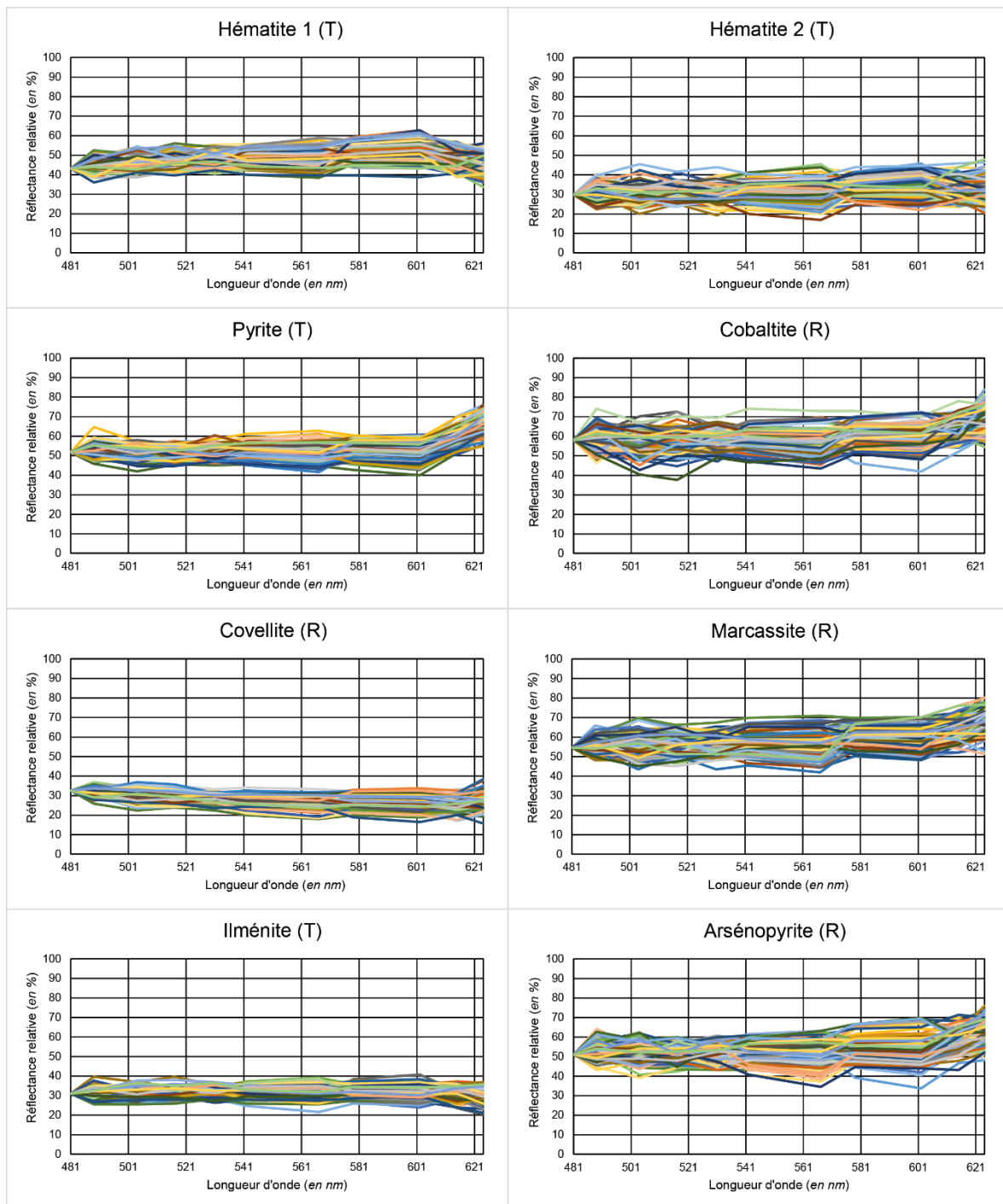
Les résultats des spectres acquis sur les grains en sections polies via la caméra multispectrale sont présentés sur les figures 2-20 et 2-21. Pour chaque grain étudié, 10 mesures de spectres de réflectance ont été effectuées, comptabilisant ainsi 150 mesures pour chaque type de minéraux. Puisque les spectres de réflectance présentent différentes intensités, ils sont alignés sur la première bande, c'est-à-dire que les spectres sont recalculés de sorte qu'ils aient la même valeur pour la première bande.

Comme l'indiquent les différents spectres des figures 2-20 et 2-21, on observe sur chaque longueur d'onde mesurée des variations de la réflectance relative de 10 à 15 % pour l'ilménite, le rutile, la chromite et la covellite. Des variations plus fortes allant jusqu'à 25% sont aussi constatées sur les grains d'hématite (1 et 2), de pyrite, de pyrrhotite, de bornite, de marcassite, de cobaltite et d'arsénoxyrite. Pour la magnétite et la chalcopyrite, les types 1 présentent des variations de 10 à 15 % tandis que les types 2 montrent des variations de spectres allant de 20 à 25 %.

En comparaison avec les résultats obtenus avec le spectromètre, les spectres mesurés avec la caméra multispectrale sont plus linéaires. Les spectres obtenus avec le spectromètre présentent une décroissance et une croissance de la réflectance avant 450 nm et après 650 nm qui n'apparaissent pas sur les spectres de la caméra puisque la première bande et la dernière bande mesurées sont respectivement 481 nm et 624 nm. Des variations plus modérées entre 481 nm et 624 nm sont cependant observées sur les spectres du spectromètre et ne ressortent pas sur les résultats de la caméra.



**Figure 2-20:** Spectres de réflectance sur les grains polis mesurés à partir de la caméra multispectrale, avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.

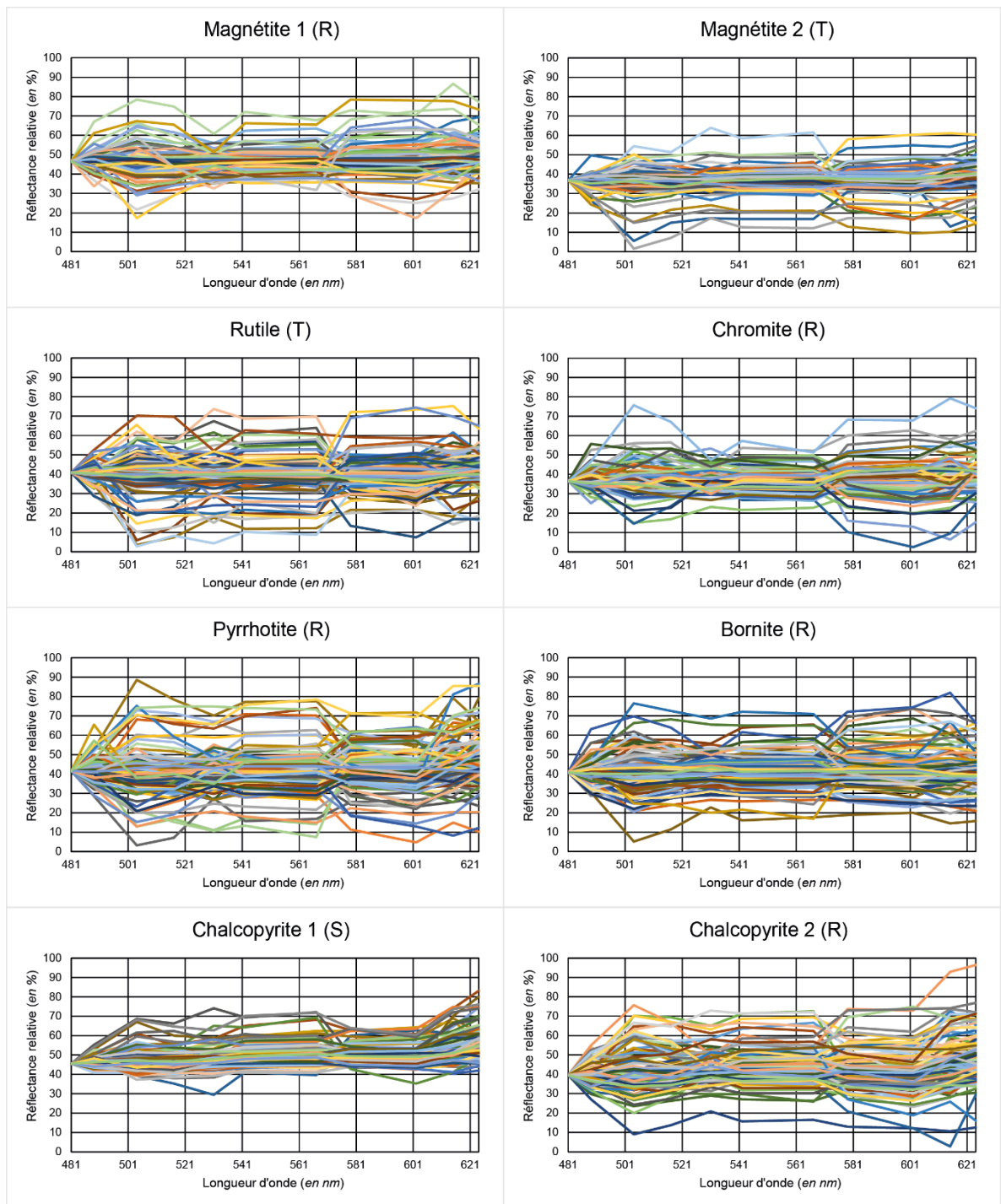


**Figure 2-21 :** Spectres de réflectance sur les grains polis mesurés à partir de la caméra multispectrale (suite), avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.

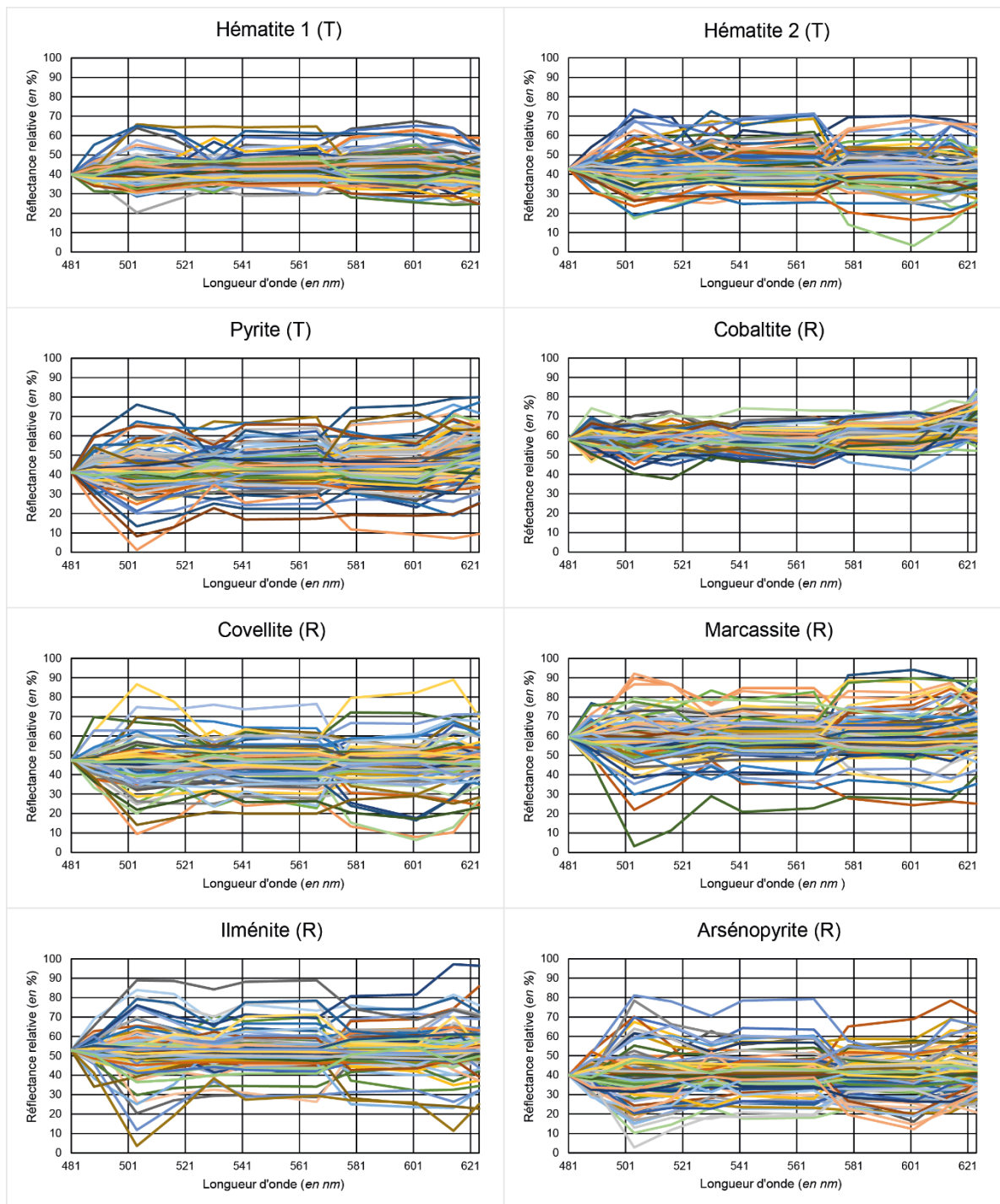
### 2.5.6.2 *Résultats des spectres mesurés sur les grains irréguliers*

Les figures 2-22 et 2-23 présentent les résultats de l'acquisition de spectres de réflectance de grains « libres » non polis à l'aide de la caméra multispectrale. Tout comme pour les sections polies, 10 mesures de spectres ont été effectuées sur chaque grain. Chacun des spectres a ensuite été aligné en fonction de la première bande.

Une forte variation est observée pour l'ensemble des grains, allant de 35 à 40 % en moyenne pour la magnétite (1 et 2) et la cobaltite ; et de 40 à 50 % pour l'ilménite, le rutile, la chromite, la pyrite, la pyrrhotite, la bornite, la covellite, la marcassite et l'arsénopyrite. En ce qui concerne la chalcopryrite et l'hématite, les types 1 des deux minéraux présentent des variations de spectres allant de 20 à 40 %, alors que les types 2 subissent de fortes variations allant jusqu'à 50 % pour la chalcopryrite 2, et 40% pour l'hématite 2. Dans ce cas, les variations entre les spectres d'une même minéralogie sont telles qu'il est impossible de différencier les minéraux entre eux. Les résultats obtenus à l'aide du spectromètre indiquent des variations homogènes des spectres de réflectance, alors que les mesures effectuées avec la caméra proposent des spectres dont les allures de courbes sont irrégulières et erratiques.



**Figure 2-22 :** Spectres de réflectance sur les grains irréguliers mesurés à partir de la caméra multispectrale, avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.



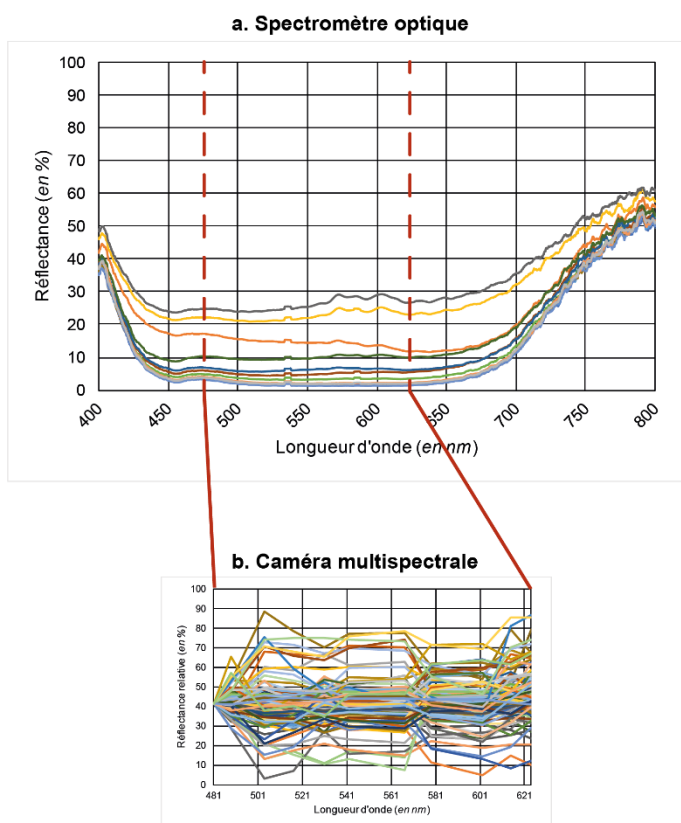
**Figure 2-23 :** Spectres de réflectance sur les grains irréguliers mesurés à partir de la caméra multispectrale (suite), avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.

## 2.6 Conclusions préliminaires

Pour un même minéral, les résultats obtenus par le biais de la caméra multispectrale et du spectromètre optique ne correspondent pas lorsqu'on les met en comparaison. Même si le spectromètre mesure un spectre de réflectance moyen à l'ensemble du grain, les spectres varient peu d'un grain à un autre. À l'inverse, une très forte variation des spectres de réflectance est constatée sur les mesures acquises par la caméra. Ces variations s'observent d'un grain à l'autre, mais aussi à l'échelle d'un même grain. La différence significative du nombre de bandes étudiées par la caméra par rapport au spectromètre pourrait expliquer ces variations dans les allures des spectres. Le temps d'intégration ainsi que le lissage effectué pour les mesures du spectromètre justifient aussi que les spectres de réflectance obtenus avec cet outil soient plus homogènes. Dans le cas de la caméra, ce type de paramètre ne peut pas être contrôlé. Aussi, le champ de vision est saturé par un seul grain, et donc une seule minéralogie, lorsque les mesures avec le spectromètre sont effectuées. Inversement, la caméra multispectrale observe différents grains simultanément. Il est donc possible que les réflectances mesurées soient influencées par les réflexions sur les pixels voisins. À titre d'exemple, la figure 2-24 met en comparaison les spectres acquis avec le spectromètre optique et la caméra multispectrale sur des grains irréguliers de pyrrhotite, et illustre les conclusions énoncées précédemment pour le cas de la pyrrhotite.

Les spectres enregistrés par le spectromètre sur les grains polis et sur les grains irréguliers restent très similaires pour certaines minéralogies comme la magnétite (1 et 2), l'ilménite, l'hématite 1, le rutile, la chromite, la bornite et la covellite. Pour les minéraux tels

que la pyrite, la chalcoppyrite (1 et 2), la pyrrhotite, la marcassite, la cobaltite, l'hématite 2 et l'arsénopyrite, les spectres sont plus variables. Toutefois, les spectres acquis via le spectromètre sur des sections polies laissent suggérer que certaines minéralogies pourraient se distinguer par leurs spectres de réflectance comme la pyrite, la chalcoppyrite, la pyrrhotite ou encore la cobaltite.



**Figure 2-24:** (a.) Spectres de réflectance de la pyrrhotite mesurés avec le spectromètre optique en comparaison avec (b.) les spectres de réflectance de la pyrrhotite mesurés avec la caméra multispectrale. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions.

Lorsque l'on s'intéresse aux mesures prises par la caméra multispectrale sur les grains polis et sur les grains libres, on constate que les spectres varient beaucoup plus sur les grains irréguliers que sur les grains dont la surface est polie. Si bien qu'il est difficile de définir l'allure du spectre de réflectance de certaines minéralogies sur les minéraux en grains.

De manière plus générale, les spectres de réflectance acquis sur les sections polies sont plus réguliers que ceux acquis sur des grains irréguliers, aussi bien sur les mesures effectuées au spectromètre qu'avec la caméra. Aussi, la différenciation de chaque minéralogie en fonction de son spectre de réflectance semble impossible à partir de la caméra multispectrale. Cependant, les variations observées sur les spectres obtenus via la caméra multispectrale sont très marquées et méritent d'être investiguées.

# **CHAPITRE 3 :**

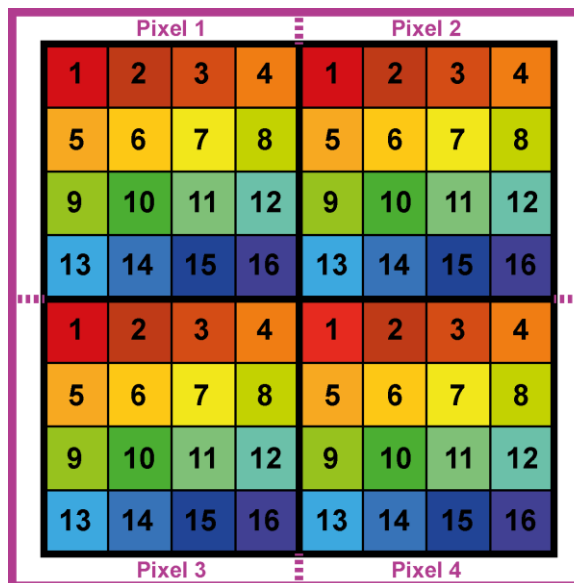
## **TRAITEMENT DES IMAGES DE LA CAMÉRA MULTISPECTRALE**

### **3.1 Problème d'association spatiale des sous-pixels**

Les résultats préliminaires indiquent qu'il est difficile d'interpréter les courbes obtenues d'après les spectres de réflectance mesurés sur l'image directe émise par la caméra. Pour un même grain, de très grandes variations de spectres ont pu être observées. Pour comprendre l'origine de ces variations, il s'agit d'étudier les images enregistrées sous forme de mosaïque à partir de la caméra multispectrale.

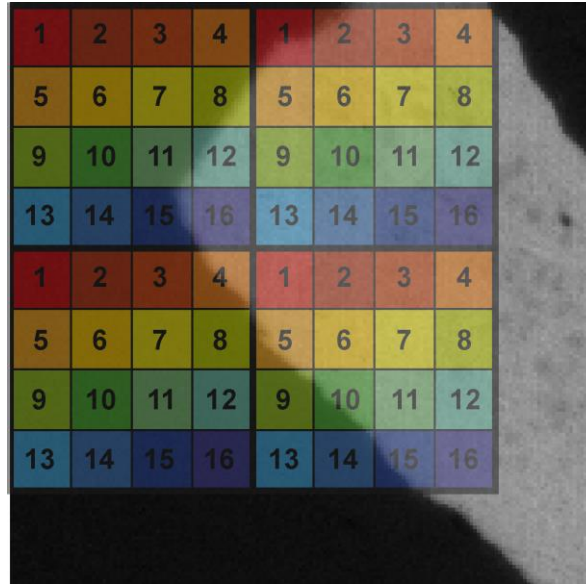
Après avoir décomposé les 11 images associées aux 11 bandes spectrales de la caméra, à partir de l'image originale sous forme de mosaïque (Fig. 2-17), on remarque rapidement que les objets observés sur ces 11 images ne se superposent pas parfaitement. L'annexe 6 est une image animée faisant défiler 11 images décomposées à partir d'une image mosaïque. Elle permet d'illustrer le décalage des objets observés lorsque ces images sont superposées. Ce décalage dans la superposition des images s'explique lorsque l'on s'intéresse à la répartition spatiale des sous-pixels par rapport au pixel qui leur est attribué. Comme l'indique la figure 2-13, la matrice de Fabry-Pérot de la caméra multispectrale fonctionne de sorte qu'un pixel se compose de 4 rangées de 4 sous-pixels avec la caméra multispectrale utilisée. Les valeurs de ces 16 sous-pixels sont donc utilisées par la matrice de correction pour définir le spectre de réflectance de ce pixel donné. Cependant, les sous-pixels

s'organisent tels que le sous-pixel n°16 du pixel 1 est plus éloigné dans l'espace du sous-pixel n°1 du pixel 1 que du sous-pixel n°1 du pixel 4 (Fig. 3-1). De ce fait, il semblerait plus logique que la valeur du sous-pixel n°16 soit associée à celle du sous-pixel n°1 du pixel 4 au vu de sa proximité avec ce dernier.



**Figure 3-1** : Schéma de l'organisation spatiale des pixels et de leurs sous-pixels au sein de la matrice de la caméra multispectrale.

Aussi, il est possible que chacun des sous-pixels d'un même pixel n'étudient pas le même objet, créant ainsi un effet de bordure (Fig. 3-2). Cela peut donc expliquer partiellement les variations de spectres observées sur les mesures acquises avec la caméra.



**Figure 3-2 :** Schéma de l'organisation spatiale des sous-pixels et de l'influence de leur répartition sur l'analyse de l'objet étudié (échelle non conforme).

## **3.2 Correction des valeurs des sous-pixels par interpolation des valeurs des plus proches voisins**

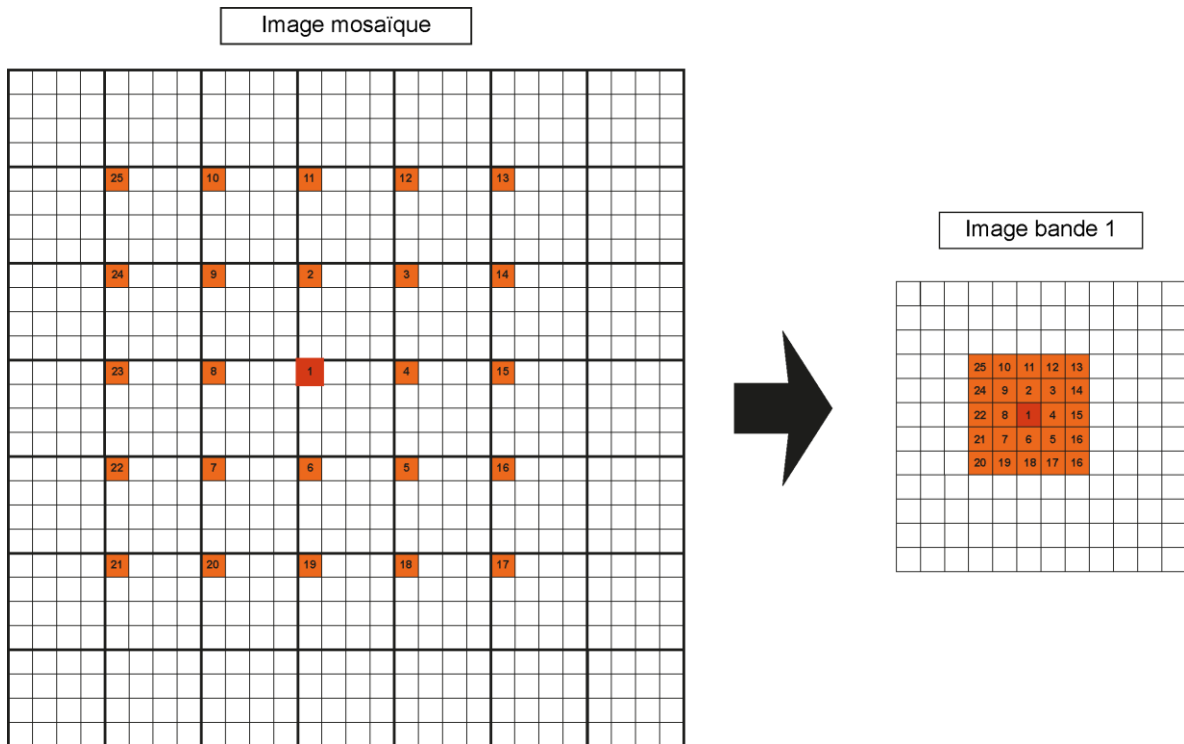
### **3.2.1 Matrice de correction**

Afin d'obtenir une image multi-bandes plus juste sur les valeurs de ses pixels, une normalisation spatiale des sous-pixels est réalisée. L'idée est de recalculer les valeurs des sous-pixels en fonction de leurs 25 voisins les plus proches, en valorisant les valeurs des voisins les plus proches par une moyenne pondérée.

À partir de l'image acquise par le logiciel de la caméra (image non normalisée au blanc et au noir) un traitement d'image est effectué sur le logiciel ImageJ (Rasband 1997). À cette fin, une macro a été imaginée et conçue par Émilie Guay et Normand Desbiens du Cégep de Jonquière (Annexe 7). Lorsque la macro est lancée, les étapes suivantes s'effectuent :

- 1) L'image à traiter (format mosaïque), le blanc et le noir sont demandés en entrée.
- 2) La normalisation au blanc et au noir est réalisée selon la méthode développée au paragraphe 2.5.4 .
- 3) La fonction "makeColorChannel" est appliquée. Elle permet de dissocier les 16 images correspondant aux 16 bandes mesurées par la caméra à partir de l'image en mosaïque. Chaque image est 0.25 fois moins large et 0.25 fois haute moins haute que la mosaïque de départ.
- 4) Les 16 images sont superposées en une seule image à 16 bandes.

- 5) Pour chaque image successive et pour chaque pixel, les 25 pixels voisins les plus proches sont sélectionnés. Puis, l'inverse de la distance au carré de chacun des pixels sélectionnés est calculé. Enfin, la valeur corrigée du pixel est interpolée (Fig. 3-3).



**Figure 3-3 :** Schéma illustrant les 25 voisins les plus proches sélectionnés pour le calcul de la valeur interpolée d'un pixel donné sur une bande donnée.

- 6) Pour chaque image interpolée, la moyenne sur deux pixels de rayon est calculée pour chaque pixel.
- 7) La matrice de correction permettant de calculer les 11 bandes virtuelles à partir des 16 bandes physiques est définie puis appliquée.

8) Finalement, l'image finale à 11 bandes dont les valeurs des pixels sont corrigées est affichée après une durée de traitement de 10 à 15 min.

L'annexe 8 est une image animée illustrant les 11 images décomposées à partir de la même image mosaïque que celle de l'annexe 6. Les images ont été corrigées selon la matrice de correction avec ImageJ, et contrairement à ce qui a pu être observé sur les images non corrigées (Annexe 6), les objets se superposent parfaitement. La matrice de correction a donc rectifié le problème de répartition spatiale des sous-pixels.

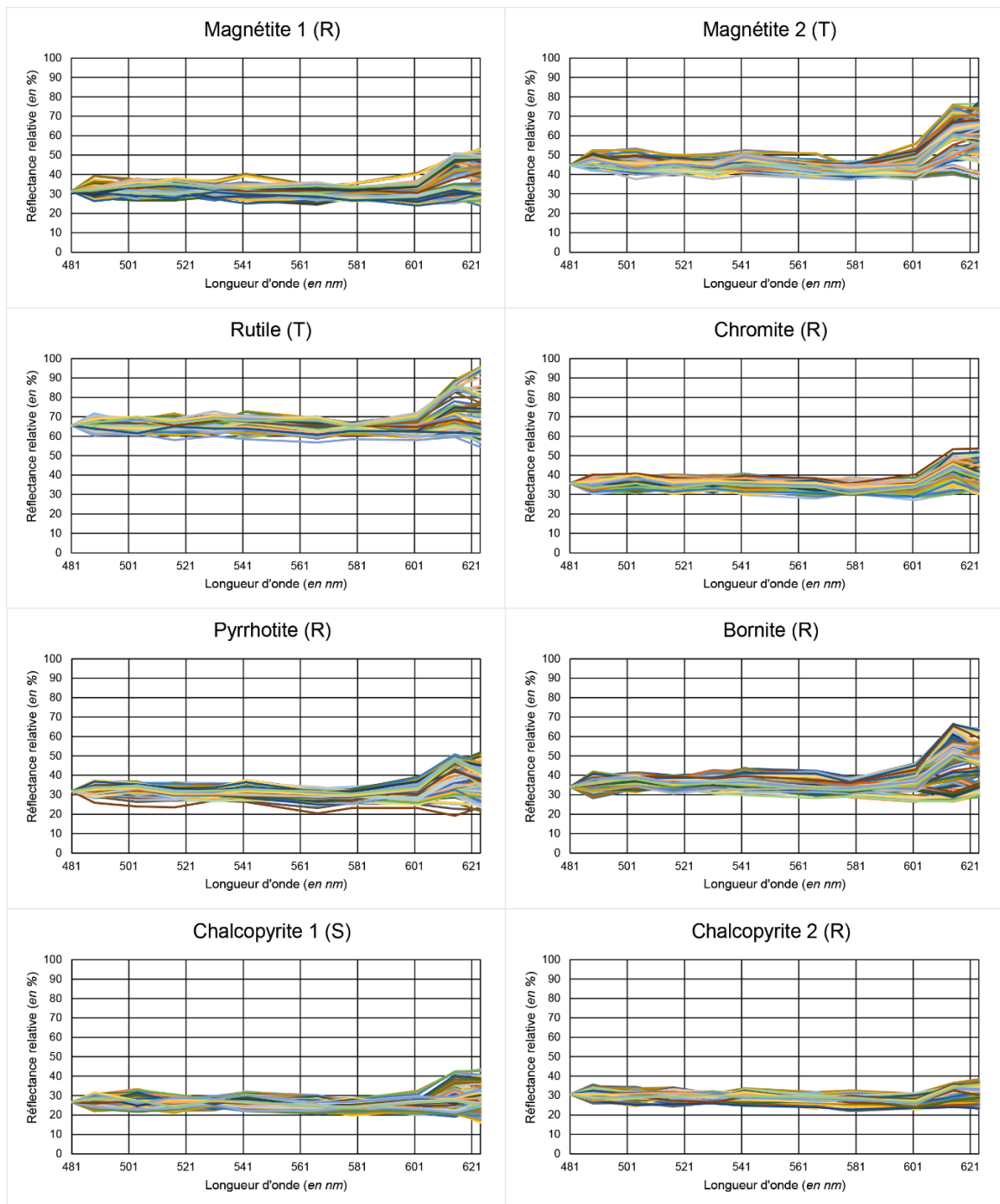
### 3.2.2 Résultats de la normalisation spatiale sur les spectres de réflectance

#### 3.2.2.1 *Spectres mesurés sur les sections polies*

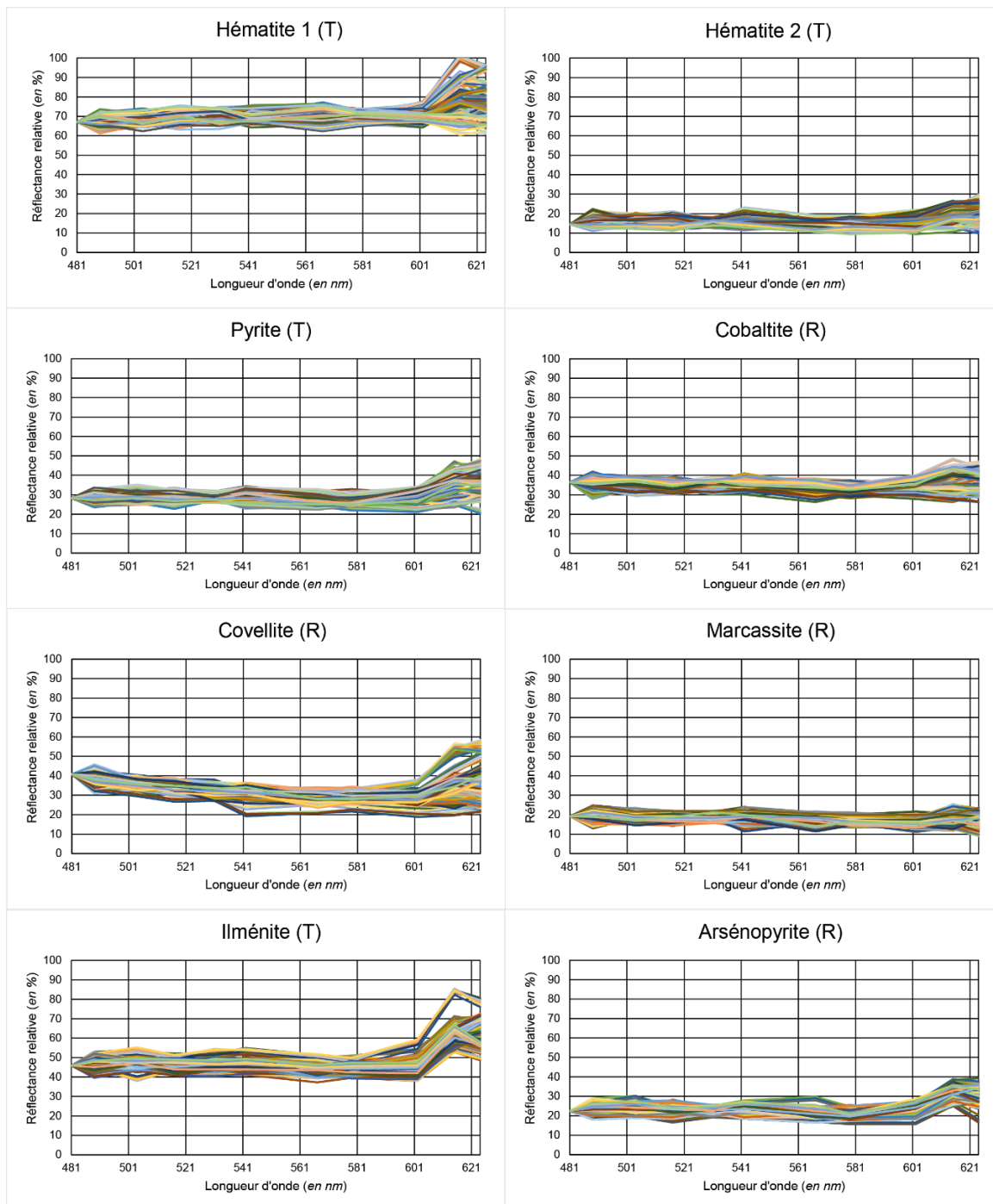
Chacun des grains présents sur les pastilles polies ont été photographiés avec la caméra multispectrale. Par la suite, ces images ont été corrigées sous ImageJ avec la macro présentée précédemment, et les spectres de réflectance ont pu être mesurés à partir de ce même logiciel. Pour chacun des grains étudiés, 10 mesures de spectres ont été sélectionnées aléatoirement. Cela équivaut à 150 mesures de spectres de réflectance par minéralogie. Les spectres sont ensuite alignés sur la première bande, car ils présentaient différentes intensités.

Les figures 3-4 et 3-5 illustrent les résultats des spectres de réflectance pour chaque type de minéraux étudiés en sections polies après la correction des valeurs des sous-pixels par interpolation à leurs 25 plus proches voisins. En comparant les spectres obtenus avec

ceux présentés dans les résultats préliminaires on constate que les variations indiquées dans les premiers résultats (paragraphe 2.5.6.1) ont pu être diminuées. Les spectres obtenus après la correction présentent des variations comprises entre 10 % et 15 %. On observe aussi des changements dans l'allure des spectres pour les longueurs d'onde de 615 et 624 nm. En effet, contrairement aux premiers spectres mesurés (Fig. 2-20 et 2-21), les spectres de réflectance corrigés de la magnétite (1 et 2), de l'ilménite, de l'hématite du rutile, de la chromite et de la covellite semblent s'accroître pour les bandes 615 nm et 624 nm. De plus, de plus fortes variations sur les valeurs de réflectances sont observées pour les bandes à 615 et 624 nm. Dans l'ensemble, les spectres de réflectances sont tous relativement plats et similaires.



**Figure 3-4 :** Spectres de réflectance mesurés sur les sections polies après le traitement de la matrice de correction, à partir des images de la caméra multispectrale, avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.



**Figure 3-5 :** Spectres de réflectance mesurés sur les sections polies après le traitement de la matrice de correction, à partir des images de la caméra multispectrale (suite), avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.

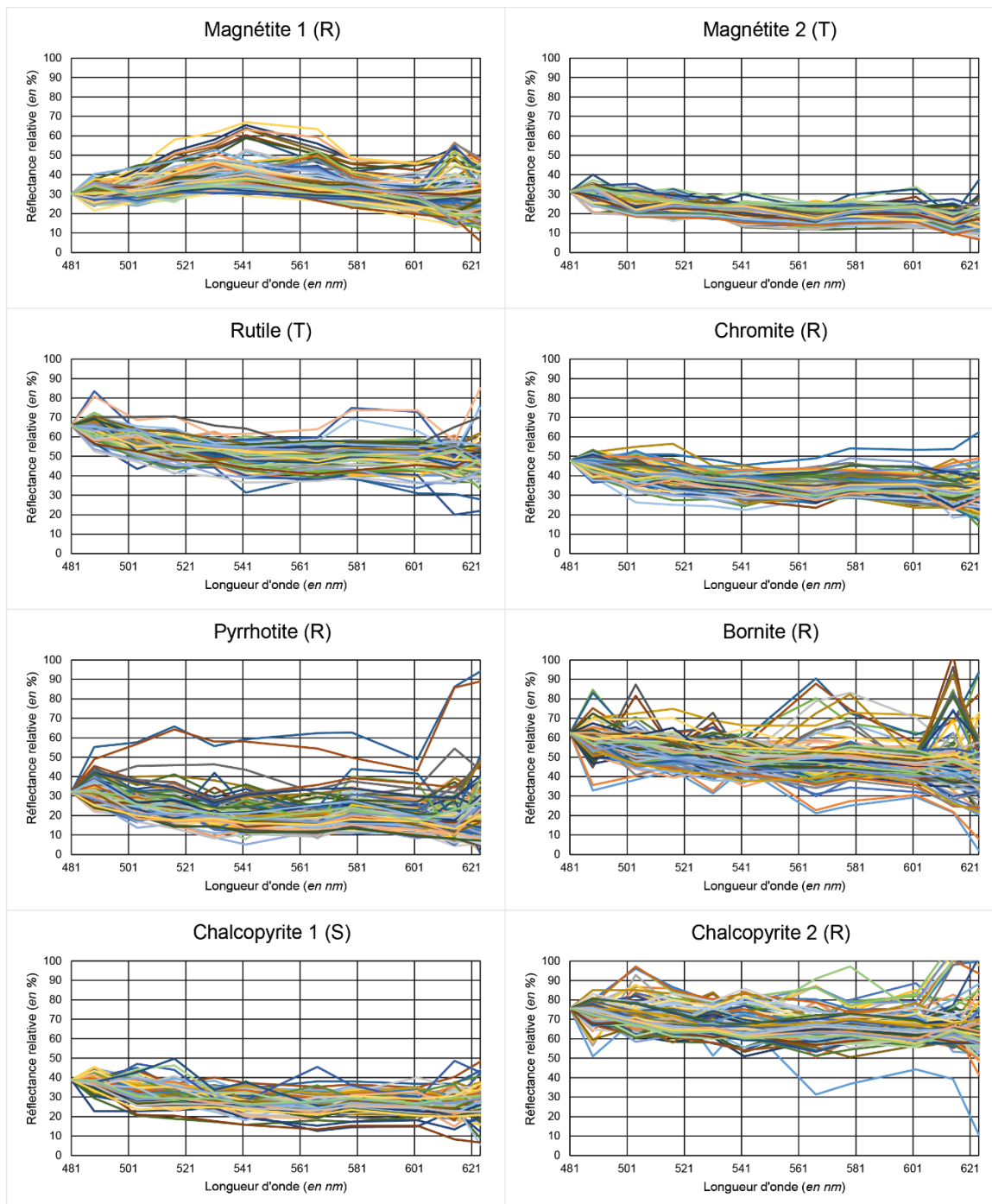
### 3.2.2.2 *Spectres mesurés sur des grains irréguliers*

Les résultats de l'acquisition de spectres de réflectance des grains irréguliers sur l'image corrigée sont présentés sur les figures 3-6 et 3-7. Tout comme pour les sections polies, 10 mesures de spectres ont été effectuées sur chacun des grains. Tous les spectres ont ensuite été alignés en fonction de la première bande.

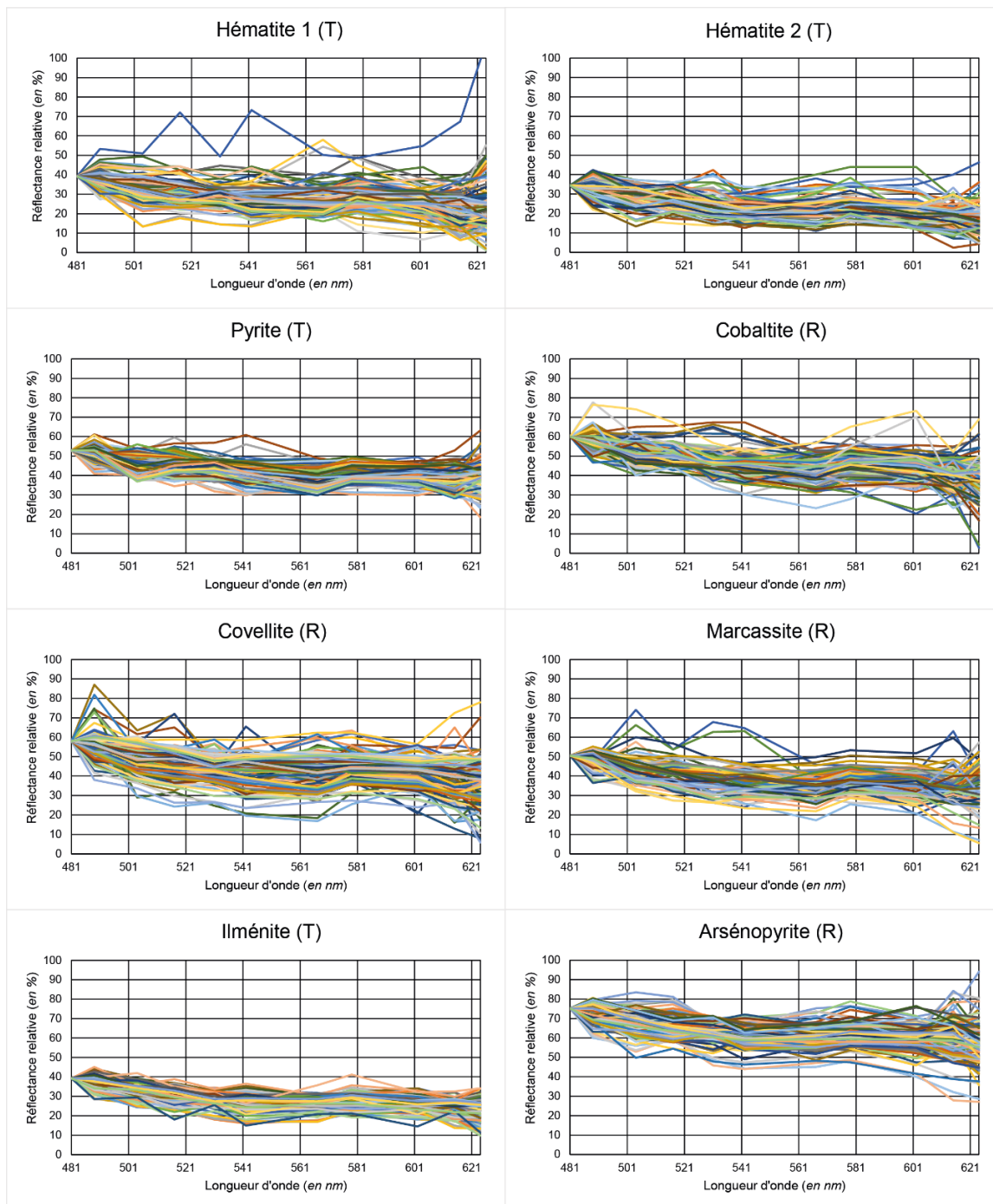
Pour certains minéraux tels que l'ilménite, le rutile, la chromite, et la pyrite, les variations dans l'allure des spectres sont moins marquées en les comparant avec les spectres obtenus lors des résultats préliminaires (paragraphe 2.5.6.2). La magnétite 1 et la magnétite 2 présentent des allures de courbes relativement différentes. En effet, le type 1 présente une courbe croissante jusqu'à 542 nm avec de très fortes variations pour cette longueur d'onde, tandis que le type 2 possède une allure globalement décroissante sur l'ensemble avec des variations modérées à 15-20%. Pour les autres minéralogies, il semble que les variations des spectres soient plus modérées par rapport aux résultats préliminaires, même si de nombreux spectres erratiques sont encore présents. Dans l'ensemble, sans tenir compte de quelques spectres erratiques, les spectres de réflectances présentent des variations de 20 % à 25%. Lorsque l'on compare les spectres corrigés des minéraux en grains avec ceux des sections polies, on constate une fois de plus que les variations sont plus marquées sur les grains irréguliers.

L'application de la matrice de correction a donc permis de restreindre les variations liées à l'agencement spatial des sous-pixels. Les spectres obtenus sont plus lisses, cependant

la distinction des minéraux en fonction de leurs spectres reste complexe puisque l'allure des courbes de l'ensemble des minéraux est relativement plate. L'annexe 9 présente des travaux qui ont été réalisés en parallèle avec un logiciel de télédétection à partir des images corrigées. Là encore, les résultats du logiciel confirment qu'une identification des minéraux à partir des images de la caméra n'est pas réalisable.



**Figure 3-6 :** Spectres de réflectance mesurés sur les grains irréguliers après le traitement de la matrice de correction, à partir des images de la caméra multispectrale, avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.



**Figure 3-7 :** Spectres de réflectance mesurés sur les grains irréguliers après le traitement de la matrice de correction, à partir des images de la caméra multispectrale (suite), avec : (R) grains issus d'un échantillon de roche concassé, (S) grains d'une formation de sable et (T) grains issus d'un till. Les couleurs des spectres représentent les différentes acquisitions sur les grains.

## **CHAPITRE 4 :**

# **CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS**

L'identification de minéraux indicateurs en grains est un nouveau champ d'application pour l'imagerie multispectrale. C'est pourquoi, les objectifs initialement prévus ont dû être réajustés en fonction des résultats obtenus au cours de l'étude. Si l'identification des minéraux via l'imagerie multi-bandes n'a pas pu être réalisée, les nombreuses interrogations soulevées ont permis de souligner divers problèmes et permettent de suggérer des recommandations pour la réalisation de projets similaires à l'avenir.

Les mesures effectuées par le spectromètre ont permis de caractériser les spectres de réflectance des minéraux étudiés sur un large intervalle spectral (de 186 nm à 1033 nm). Cependant, l'allure de ces spectres est globalement similaire d'une minéralogie à une autre. Aussi, tel qu'attendu, les mesures de spectres avec le spectromètre et la caméra multispectrale ont montré l'influence de la texture des grains sur l'allure des spectres de réflectance. Si bien, que les spectres mesurés sur les sections polies présentent en moyenne 20% moins de variations que les spectres obtenus sur des minéraux en grains. Les résultats préliminaires obtenus par le biais de la caméra multispectrale indiquent des spectres de réflectance très variables sur les grains irréguliers (sans polissage) à la fois pour une seule minéralogie, mais aussi à l'échelle d'un seul grain. Les résultats ont aussi montré que les variations observées sur les spectres obtenus via la caméra multispectrale sur les minéraux en grains sont très marquées, de sorte qu'il est difficile d'en déduire l'allure des spectres et donc de définir un

spectre de référence. Les résultats préliminaires n'ont donc pas permis de différencier les minéralogies par leurs spectres de réflectance.

La décomposition d'une image en format mosaïque, puis la superposition des 11 images issues des 11 bandes virtuelles a révélé un décalage dans la superposition des pixels. Ce décalage a pu être corrélé avec la répartition spatiale des sous-pixels et leur attribution à un pixel donné. L'application d'une matrice de correction a permis de corriger les valeurs erratiques et apporte une première piste de solution puisque les variations de spectres sont fortement réduites. Cependant, les résultats bruts doivent dans ce cas être traités après l'acquisition, et ne peuvent être interprétés directement. Le traitement pour chaque image s'exécute sur une durée de 10 à 15 min, ainsi l'intérêt suscité par la caméra pour sa rapidité d'acquisition n'est plus.

Les performances de la caméra multi-bandes sont notamment mises en cause pour le non-aboutissement de l'identification des oxydes et sulfures en grains. Tout d'abord, il est clair que la plage de longueurs d'ondes considérée par la caméra est trop restreinte (de 481 à 624 nm) pour montrer des distinctions entre les spectres. En considérant le proche infrarouge, par exemple, il serait possible de différencier certains minéraux dont les ions se distinguent pour les longueurs d'onde supérieures à 1000 nm, comme l'ion hydroxyde ou l'ion ferrique. Sojasi (2016) suggère même d'étudier l'infrarouge lointain plutôt que le visible-proche infrarouge pour obtenir des résultats plus concluants permettant l'identification de minéraux. Aussi, les 11 bandes de la caméra ne semblent pas suffisantes pour caractériser avec précision un spectre de réflectance. Le modèle utilisé fut le premier du genre lorsqu'IOS en a fait

l'acquisition en 2016. Le temps d'acquisition quasi-simultané constituait alors un atout majeur pour cet outil. Il reste à espérer que dans les années à venir l'avancée de la technologie permettra à des caméras du même type, mais plus performantes (avec un coût abordable) de voir le jour.

L'étude a aussi permis de mettre en évidence les variations dans les spectres de réflectances qui peuvent s'opérer pour une même minéralogie, et souvent même à l'échelle d'un seul grain. D'autre part, l'éclat métallique des minéraux reflète directement le spectre d'émission de l'éclairage, tel un miroir, ce qui fausse alors les valeurs des spectres de réflectance ou crée des spectres erratiques. De plus, notons qu'on ne s'intéressait ici qu'à une petite famille de minéraux, et que le nombre d'échantillons considéré n'est pas significatif. Les deux types de chalcopyrites sélectionnées (d'origines différentes) ont montré de grandes disparités dans l'allure de leurs spectres. Cela indique que quelques soient les conclusions apportées, elles doivent être vérifiées sur un panel d'échantillons plus grand et plus diversifié. Il aurait été intéressant de calculer et de compiler la réflectance des spectres plats, mais étant donné que cette réflectance est fortement influencée par les conditions de mesures et le type de grain, ces données seraient peu significatives. Ce projet avait été envisagé suite au développement de l'identification automatisé des grains d'or par imagerie multispectrale, et avait été encouragé par les spectres présentés dans la librairie spectrale de l'USGS (Clark *et al.* 2007, Kokaly *et al.* 2017). Les spectres des minéraux présentés dans cette librairie indiquaient alors des particularités dans les spectres de réflectance pour la plupart des minéraux. Finalement, les résultats obtenus ne sont pas cohérents avec les spectres documentés. La méthode d'acquisition des spectres dans la librairie n'est pas indiquée, mis

à part le fait que les échantillons sont de très haute pureté. Il est donc légitime de s'interroger sur la précision et la justesse de ces données.

Pirard (2017) suggère que des corrélations géochimiques soient systématiquement réalisées, soit par spectrométrie de masse (LA-ICP-MS) ou par diffractométrie de rayons X (DRX), afin de valider l'identification des minéraux. Enfin, au-delà de la couleur, d'autres informations telles que la forme, la texture ou l'éclat du grain sont à considérer. L'œil et le cerveau humain étant capables d'identifier la plupart des minéraux avec comme indices trois bandes (rouge, vert et bleu), il est clair que d'autres informations que la couleur doivent être prises en considération pour une identification viable des minéraux. Les travaux en cours de Julien Maître, associé à l'équipe de L. Paul Bédard, visent à utiliser l'intelligence artificielle pour l'identification de minéraux à partir de photographies en RGB. La méthode doit encore être ajustée, mais les résultats sont encourageants puisqu'elle affiche un taux de succès de 90% pour certains minéraux. L'intelligence artificielle pourrait donc être la solution pour la reconnaissance automatisée de minéraux en grains via le traitement d'images.

## LISTE DE RÉFÉRENCES

- Adams, J.B. 1975. Interpretation of visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of pyroxenes and other rock-forming minerals. *Dans Infrared and Raman spectroscopy of lunar and terrestrial minerals. Sous la direction de C. Karr Jr., Academic Press, New York.* p. 91-116.
- Averill, S.A. 2001. The application of heavy indicator mineralogy in mineral exploration with emphasis on base metal indicators in glaciated metamorphic and plutonic terrains. Geological Society, London, Special Publications, **185**: 69-81.
- Averill, S. A. 2011. Viable indicator minerals in surficial sediments for two major base metal deposit types: Ni-Cu-PGE and porphyry Cu. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **11**: 279-291.
- Bédard, L.P., Boivin, J.-F., Girard, R. 2017. Quantifying and improving the quality of gold grain counts in heavy mineral concentrates. 14<sup>e</sup> réunion biennale de la SGA, Vol. 3, Canada, Québec, 20 au 23 août 2017: pp. 1119-1122.
- Bertin, H. 2013. Etude de matrices de filtres Fabry-Pérot accordables en technologie MOEMS intégré 3D: Application à l'imagerie multispectrale. Thèse de doctorat, Université Paris Sud, Paris XI.
- Castroviejo R, C.J.C., Bernhardt H.J., Pirard E., Brea C., Pérez-Barnuevo L., Segundo F., Espí J.A. 2010. Multispectral (visible and near infra-red, 400-1000 nm range) reflectance data file from common ore minerals. [Base de donnée]. Disponible à [http://www.minasyenergia.upm.es/laboratorio/microscopia\\_aplicada](http://www.minasyenergia.upm.es/laboratorio/microscopia_aplicada) [cité le 3 février 2018].

- Clark, R.N., King, T.V., Klejwa, M., Swayze, G.A., et Vergo, N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **95**(B8): 12653-12680.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Kokaly, R.F., Sutley, S.J., Dalton, J.B., McDougal, R.R., et Gent, C.A. 2003. Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems. *Journal of Geophysical Research: Planets* **108**(E12). doi:10.1029/2002JE001847.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, K.E., Hoefen, T., Kokaly, R.F., et Sutley, S.J. 2007. USGS digital spectral library splib06a. US Geological Survey, Digital Data Series **231**.
- Craig, J.R., David J.V., et Richard D.H. 1981. Table of diagnostic properties of the common ore minerals. *Dans Ore microscopy and ore petrography*. Second edition. *Édité par John Wiley & Sons, Inc., New York* pp. 351-404.
- Cummings, D.I., Kjarsgaard, B.A., Russell, H.A., et Sharpe, D.R. 2011. Eskers as mineral exploration tools. *Earth-Science Reviews* **109**: 32-43.
- Dare, S.A., Barnes, S.J., Beaudoin, G., Méric, J., Boutroy, E., et Potvin-Doucet, C. 2014. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators. *Mineralium Deposita*, **49**: 785-796.
- Dupuis, C., et Beaudoin, G. 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Mineralium Deposita*, **46**: 319-335.
- Gent, M., Menendez, M., Toraño, J. et Torno, S. 2011. A review of indicator minerals and sample processing methods for geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, **110**: 47-60.

- Grove, C., Hook, S.J., et Paylor III, E. 1992. Laboratory reflectance spectra of 160 minerals, 0.4 to 2.5 micrometers, Pasadena.
- Guilhaumont, M. 2015. Un peu de physique et de chimie. Disponible à <http://guilhaumont.fr/opale/1s-couleurs/co/raynt-em.html> [cité le 18 mars 2017].
- IMEC. 2016. a. Technical report - Hyperspectral sensors. IMEC. p. 36.
- IMEC. 2016. b. Technical report - Sensors calibration files. IMEC. p. 9.
- Klassen, R.A. 2001. A Quaternary geological perspective on geochemical exploration in glaciated terrain. *Dans* Drift exploration in glaciated terrain. *Sous la direction de* M.B. McClenaghan, P.T. Bobrowsky, G.E.M. Hall, et S.J. Cook. Geological Society of London, Special volume 185, London. pp. 1-17.
- Kokaly, R.F., Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Pearson, N.C., Wise, R.A., Benzel, W.M., Lowers, H.A., et Driscoll, R.L. 2017. USGS Spectral Library Version 7 Data: US Geological Survey data release. p. 61.
- Lane, G.R., Martin, C., et Pirard, E. 2008. Techniques and applications for predictive metallurgy and ore characterization using optical image analysis. *Minerals Engineering* **21**: 568-577.
- Maitre, J., Bouchard, K. Bédard, L.P. (soumis). 2018. Mineral Grains Recognition: an Application in Mining Exploration based on Image Processing and Machine Learning. *International Journal of Computer Vision*.
- Malkovets, V.G., Rezvukhin, D.I., Belousova, E.A., Griffin, W.L., Sharygin, I.S., Tretiakova, I. G., Gibsher, A.A., O'Reilly, S.Y. Kuzmin, D.V., Litasov, K.D., Logvinova, A.M., Pokhilenko, N.P., et Sobolev, N.V. 2016. Cr-rich rutile: A powerful tool for diamond exploration. *Lithos* 265: 304-311.

- McClenaghan, M.B., Bobrowsky, P.T., Hall, G.E.M., et Cook, S.J. (éds). 2001. Drift exploration in glaciated terrain. Geological Society of London, Special publication 185, Londres.
- McClenaghan, M.B., Averill, S.A., Kjarsgaard, I.M., Layton-Matthews, D., et Matile, G. 2009. Till indicator mineral and geochemical signatures of magmatic Ni-Cu deposits, Thompson Nickel Belt, central Canada. 24<sup>th</sup> International Applied Geochemistry Symposium, Vol. 1, Canada, Fredericton, 1<sup>er</sup> au 4 juin 2009 : pp. 75-78.
- McClenaghan, M.B. 2011. Overview of common processing methods for recovery of indicator minerals from sediment and bedrock in mineral exploration [en ligne]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **11**: 265-278. doi:10.1144/1467-7873/10IM-025.
- McClenaghan, M.B., Paulen, R.C., Layton-Matthews, D., Hicken, A.K. et Averill, S.A. 2015. Glacial dispersal of gahnite from the Izok Lake Zn-Cu-Pb-Ag VMS deposit, northern Canada [en ligne]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **15**: 333-349. doi:10.1144/geochem2014-317.
- McClenaghan, M., Parkhill, M., Pronk, A., et Sinclair, W. 2017. Indicator mineral and till geochemical signatures of the Mount Pleasant W-Mo-Bi and Sn-Zn-In deposits, New Brunswick, Canada. *Journal of Geochemical Exploration* **172**: 151-166.
- McMartin, I., et Paulen, R. 2009. Ice-flow indicators and the importance of ice-flow mapping for drift prospecting. *Dans* Application of Till and Stream Sediment Heavy Mineral and Geochemical Methods to Mineral Exploration in Western and Northern Canada. *Sous la direction de I. McMartin*. Geological Association of Canada, Notes de cours intensif 18. pp. 15-34.

- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J. L., French, D., et Walshe, J. 2014. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. *Ore Geology Reviews*, **61**: 1-32.
- Neumann, N., Ebermann, M., Kurth, S., et Hiller, K. 2008. Tunable infrared detector with integrated micromachined Fabry-Perot filter. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* **7**: 021004.
- Ocean Optics, Inc. 2015. Flame Miniature spectrometer - User manual. Disponible à <http://oceanoptics.com/wp-content/uploads/FlameIO.pdf>.
- Pirard, E. 2004. Multispectral imaging of ore minerals in optical microscopy. *Mineralogical Magazine* **68**: 323-333.
- Pirard, E. 2017. Towards a more automated mineralogy. 14<sup>e</sup> réunion biennale de la SGA, Vol. 3, Canada, Québec, 20 au 23 août 2017 : pp. 1185-1188.
- Plouffe, A., McClenaghan, M.B., Paulen, R.C., McMartin, I., Campbell, J.E. et Spirito, W.A. 2013. Quality assurance and quality control measures applied to indicator mineral studies at the Geological Survey of Canada. New frontiers for exploration in glaciated terrain. *Sous la direction de R.C. Paulen and M.B. McClenaghan*. GSC Open File, 7374, pp.13-20.
- Plouffe, A., Ferbey, T., Hashmi, S. et Ward, B.C. 2016. Till geochemistry and mineralogy: vectoring towards Cu porphyry deposits in British Columbia, Canada [en ligne]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **16**: 213-232. doi:10.1144/geochem2015-398.
- Rasband, W. S. 1997. ImageJ software. National Institutes of Health: Bethesda, [en ligne]. Disponible à <https://imagej.nih.gov/ij/> [consulté le 3 novembre 2018].
- Shippert, P. 2004. Why use hyperspectral imagery? *Photogrammetric Engineering and*

Remote Sensing **70**: 377-396.

- Smith, R.B. 2012. Introduction to hyperspectral imaging. Disponible à <http://www.microimages.com/documentation/Tutorials/hyprspec.pdf> [consulté le 1 avril 2017].
- Sojasi, S. 2016. Caractérisation de minéraux indicateurs par imagerie hyperspectrales et traitement de l'image dans l'infrarouge proche et l'infrarouge lointain. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada.
- Spirito, W.A., Adcock, S.W., et Paulen, R.C. 2013. Managing geochemical data: challenges and best practices. New Frontiers for Exploration in Glaciated Terrain. Geological survey of Canada. Open file 2013: 21-26.
- Steiner, J. 2017. Endmyopia. Disponible à <https://endmyopia.org/how-fluorescent-lights-kills-your-vision/> [consulté le 19 mars 2017].
- Swayze, G.A., et Clark, R.N. 1990. Infrared spectra and crystal chemistry of scapolites: Implications for Martian mineralogy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **95**(B9): 14481-14495.
- Turner, D.J., Rivard, B., et Groat, L.A. 2014. Visible and short-wave infrared reflectance spectroscopy of REE phosphate minerals. *American Mineralogist* **99**: 1335-1346.
- van der Meer, F. 2006. The effectiveness of spectral similarity measures for the analysis of hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **8**: 3-17.
- Vane, G., Green, R.O., Chrien, T.G., Enmark, H.T., Hansen, E.G., et Porter, W.M. 1993. The airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment* **44**(2-3): 127-143.

# **ANNEXES**

### ANNEXE 1 - Détail des oxydes et sulfures en grains étudiés

Nom du minéral	N° de pastille	Rang sur la pastille	Rang sur la planche adhésive	Formule	Confirmation MEB	Commentaire
Magnétite (1)	1	1	1	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$	Oui	Roche écrasée, collection UQAC
Magnétite (2)	1	2	2	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$	Oui	Till projet 1170 IOS, Xénomorphe
Ilménite	1	3	3	$\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$	Oui	Till projet 1044 IOS
Hématite	1	4	4	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Oui	Till projet 1170 IOS
Rutile	1	5	5	$\text{TiO}_2$	Oui	Till projet 1044 IOS, rouge
Chromite	1	6	6	$\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2\text{O}_4$	Oui	Roche écrasée, collection UQAC
Pyrite	1	7	7	$\text{FeS}_2$	Oui	Till projet 1044 IOS
Chalcopyrite (1)	1	8	8	$\text{CuFeS}_2$	Oui	Sable de formation
Pyrrhotite	1	9	9	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	Oui	Roche écrasée, collection UQAC, traces de Ni (proche pentlandite)
Bornite	1	10	10	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	Ratio Cu et S ok mais seulement 1% de Fe	Roche écrasée, collection UQAC
Covellite	2	1	11	$\text{CuS}$	Ratio Cu et S ok mais présence de 10% de Fe	Roche grattée, IOS
Marcassite	2	2	12	$\text{FeS}_2$	Oui	Roche écrasée, collection UQAC
Chalcopyrite (2)	2	3	13	$\text{CuFeS}_2$	Oui	Roche écrasée, collection UQAC
Cobaltite	2	4	14	$\text{CoAsS}$	Oui	Roche écrasée, collection UQAC, minéral non libéré
Spécularite	2	5	15	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Forme d'hématite	Till projet 1044 IOS
Arsénopyrite	2	6	16	$\text{FeAsS}$	Oui	Roche écrasée, collection UQAC

**ANNEXE 2 - Résultats des analyses effectuées au microscope électronique à balayage sur chacun des grains irréguliers.**

Descriptif de spectre	Minéral	Grain n°	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Br	Rb	Sr	Zr	Ag	La	Er	Yb	Ta	W	Pb	Total	
Spectre 69	Magnétite 1	1	34,99						0,36							64,64											0							100	
Spectre 70	Magnétite 1	2	34,74				1,05		0,62								63,59											0							100
Spectre 71	Magnétite 1	2	31,42				0,35		0,31								67,92											0							100
Spectre 72	Magnétite 1	3	43,66				5,92		2,83	0,33		0,31					42,87		4,08									0							100
Spectre 73	Magnétite 1	4	26,48						0,25							0,42	72,86											0							100
Spectre 74	Magnétite 1	4	31,12					0,29				0,38					68,21											0							100
Spectre 75	Magnétite 1	5	52,33					13,74	0,44			23,68					9,82											0							100
Spectre 76	Magnétite 1	5	28,34				0,26		0,31								71,09											0							100
Spectre 77	Magnétite 1	6	43,4				5,77		2,1	0,27							46,53		1,92									0							100
Spectre 78	Magnétite 1	7	36,62						0,35								63,04											0							100
Spectre 79	Magnétite 1	8	25,71				0,17										74,12											0							100
Spectre 80	Magnétite 1	9	38,62				0,19		0,51								60,68						0					0							100
Spectre 81	Magnétite 1	10	34,5				0,98		0,2								64,31											0							100
Spectre 82	Magnétite 1	11	25,72				0,44		0,45			0,14					73,25											0							100
Spectre 83	Magnétite 1	12	34,95						0,24								64,82											0							100
Spectre 84	Magnétite 1	13	28,68						0,35								70,97											0							100
Spectre 85	Magnétite 1	14	21,1				0,32		0,36								78,23											0							100
Spectre 86	Magnétite 1	15	33,61														66,39											0							100
Spectre 87	Magnétite 2	1	25,7			0,22	0,25						0,71	0,24			72,88											0							100
Spectre 88	Magnétite 2	2	24,61				0,16						0,37	0,23			73,89						0,74					0							100
Spectre 89	Magnétite 2	3	37,74			0,29	0,2						0,24	0,19			60,63	0,72										0							100
Spectre 90	Magnétite 2	4	32,18			0,98	0,37						0,33	0,24			65,9											0							100
Spectre 91	Magnétite 2	5				0,29	0,62			0,23		0,18	41,94	0,72		2,43	52,11											0					1,48		100
Spectre 92	Magnétite 2	5					0,33			0,16			2,62				96,89											0							100
Spectre 93	Magnétite 2	6	42,01			0,49	0,37						0,35				54,32											0						2,46	100
Spectre 94	Magnétite 2	7	33,73			0,37	0,23						0,4	0,18	0,66	0,62	63,81											0							100
Spectre 95	Magnétite 2	8	35,42										0,48	0,17			62,95											0						0,99	100
Spectre 96	Magnétite 2	9	35,7			0,32	0,23						0,24	0,23			63,27											0							100
Spectre 97	Magnétite 2	10	29,83			0,34	0,2						1,12	0,24			68,27											0							100
Spectre 98	Magnétite 2	11	26,63			0,92	0,52						1,29	0,19			70,45											0							100
Spectre 99	Magnétite 2	12	38,81			1,07	15,64				0,55		0,29				27,56																	16,08	100
Spectre 100	Magnétite 2	12	56,26				0,32						0,18				43,24											0							100
Spectre 101	Magnétite 2	13				0,42	0,65						0,6	0,34			97,99											0							100
Spectre 102	Magnétite 2	14	39,02			0,37	0,19						0,46	0,19			59,77											0							100
Spectre 103	Magnétite 2	15	33,97			0,35	0,25						0,4	0,29			64,74											0							100
Spectre 104	Ilménite	1	44,61		0,49	0,72	0,18						23,91			0,74	26,31											0						3,05	100
Spectre 105	Ilménite	2	43,01		0,82								24,38			0,37	29,6											0						1,81	100
Spectre 106	Ilménite	3											48,97			1,73	49,3											0							100
Spectre 107	Ilménite	4	47,44										28,62			0,5	23,45											0							100
Spectre 108	Ilménite	5	41,47										26,22			0,66	31,65											0							100
Spectre 109	Ilménite	6					0,63						41,68			0,81	52,44											0						4,45	100
Spectre 110	Ilménite	6	23,32			1,3							6,05				7,47											0				4,33	57,53		100
Spectre 111	Ilménite	7	30,34				1,07						24,13	0,54			43,93											0							100
Spectre 112	Ilménite	8	31,43										30,88			0,39	37,3											0							100
Spectre 113	Ilménite	9	31,13										29,88			0,86	38,13											0							100
Spectre 114	Ilménite	10	31,86				0,35						31,54			0,72	35,53											0							100
Spectre 115	Ilménite	11	33,6			0,21	0,52						36,72			0,62	28,32											0							100
Spectre 116	Ilménite	12	34,4			0,34	0,74	0,3					38,7			1,01	17,07											0							100
Spectre 117	Ilménite	12	28,05			0,79	5,34	0,45			0,29	0,19	10,21				12,25									1,46	0						5,99		100
Spectre 118	Ilménite	13	45,74										24,86			0,57	28,83									3,15	1,24	0						38,03	100
Spectre 119	Ilménite	14				0,88	0,76						43,79			0,82	53,76											0							100

Descriptif de spectre	Minéral	Grain n°	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Br	Rb	Sr	Zr	Ag	La	Er	Yb	Ta	W	Pb	Total						
Spectre 120	Ilménite	15				1,54	2,13						41,55	0,77		1,33	52,68																	100						
Spectre 121	Hématite	1	23,46			0,82	1,95						0,51				73,27																		100					
Spectre 122	Hématite	2	28,09										0,46				71,45																		100					
Spectre 123	Hématite	3	39,07			0,31							0,36				60,26															0			100					
Spectre 124	Hématite	4	34,18										0,47	0,21			65,13																		100					
Spectre 125	Hématite	5	29,32				0,39						0,38				69,91																			100				
Spectre 126	Hématite	6	35,8				0,57						0,25	0,16			63,22																			100				
Spectre 127	Hématite	6	33,67				0,2						0,34				65,8																			100				
Spectre 128	Hématite	7	27,01				0,3						0,36		0,42		71,9																			100				
Spectre 129	Hématite	8	35,78				0,36						0,58	0,17			60,73																2,38			100				
Spectre 130	Hématite	9	41,22										0,39				58,38																			100				
Spectre 131	Hématite	10	38,08										0,29				61,17								0,47								0			100				
Spectre 132	Hématite	11	33,89			0,21	0,24						0,4				65,27																	0			100			
Spectre 133	Hématite	12	30,72				0,33						0,4				68,55																				100			
Spectre 134	Hématite	13	30,23				0,3						0,37				69,1																		0			100		
Spectre 135	Hématite	14	42,09				0,43						0,3				57,18																		0			100		
Spectre 136	Hématite	15					12,07	12,12		19,76		4,77	19,38				31,9																					100		
Spectre 137	Rutile	1				0,29							99,71																									100		
Spectre 138	Rutile	2					0,38						98,74				0,88																						100	
Spectre 139	Rutile	3											99,1				0,9																						100	
Spectre 140	Rutile	4				0,36	0,77						97,93				0,94																						100	
Spectre 141	Rutile	5											99,17				0,83																						100	
Spectre 142	Rutile	6											99,33				0,67																						100	
Spectre 143	Rutile	7					0,4						98,48				1,12																						100	
Spectre 144	Rutile	8											99,47				0,53																						100	
Spectre 145	Rutile	9											99,03				0,97																						100	
Spectre 146	Rutile	10	50,97										47,86				1,18																						100	
Spectre 147	Rutile	11							0,19				98,77				1,05																						100	
Spectre 148	Rutile	12											99,17				0,83																						100	
Spectre 149	Rutile	13	59,89	1,14			0,21	1,66	0,13	0,27	0,38	2,21	33,75				0,34																					100		
Spectre 150	Rutile	14	55,28				0,12						43,79				0,81																						100	
Spectre 151	Rutile	15	55,3				0,32		0,21	0,36	0,33		43,17				0,31																						100	
Spectre 152	Chromite	1	33,23										0,36		45,01		12,81						8,6															100		
Spectre 153	Chromite	2	44,77										0,41		41,48		13,34																						100	
Spectre 154	Chromite	2	46,7										0,39		38,13		14,78																						100	
Spectre 155	Chromite	3	36,13		8,79	5,42	0,21		0						37,97		11,48																						100	
Spectre 156	Chromite	4	24,23		5,31	5,42	0,44		0,64				0,29		49,81		13,85						5,43																100	
Spectre 157	Chromite	5	35,3		7,76	4,79	0,18						0,2		40,07		11,69																						100	
Spectre 158	Chromite	6	41,06		9,47	5,23	0,78		0,32				0,18		32,67		10,29																						100	
Spectre 159	Chromite	7	51,93		21,44	4,51	12,67		0,25				0,15		5,1		3,95																						100	
Spectre 160	Chromite	7	49,65		10,88		1,66			0,11			0,2		22,19		11,29						4,02																100	
Spectre 161	Chromite	7	44,64		11,21		4,39						0,22		19,7	0,57	16,24						3,03																100	
Spectre 162	Chromite	8	43,71		10,45	5,26	1,06						0,13		29,43		9,95																						100	
Spectre 163	Chromite	9	40,94		8,67	2,94	1,78		0,14	0,16			0,18		31,65		13,55																						100	
Spectre 164	Chromite	9	54,41		21,16	5,87	13,25		0,18						3,69		1,42																						100	
Spectre 165	Chromite	10			10,66	2,13	4,15		5,77	0,6			0,71		56,6	2,2	16,32			0,85																			100	
Spectre 166	Chromite	11	28,78		7,36	4,21	0,32		0,28						45,63		13,42																							100
Spectre 167	Chromite	12	43,23		9,71	5,56	0,52						0,18		31,15		9,66																							100
Spectre 168	Chromite	13	38,73		9,83	5,43	0,52		0,16						34,79		10,53																							100
Spectre 169	Chromite	14			11,55	2,53	4,45		2,67	0,23			0,33		61,49		16,74																						100	
Spectre 170	Chromite	14	53,11		22,1	6	14,27		0,19						2,36		1,97																						100	
Spectre 171	Chromite	15	42,95		7,83	1,62	0,69			0,18			0,14		32,13		14,46																						100	
Spectre 172	Pyrite	1				0,74	1,14		52,75								45,38																						100	

Descriptif de spectre	Minéral	Grain n°	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Br	Rb	Sr	Zr	Ag	La	Er	Yb	Ta	W	Pb	Total			
Spectre 173	Pyrite	2							54,53								45,47										0							100			
Spectre 174	Pyrite	3							53,95								46,05											0							100		
Spectre 175	Pyrite	4							52,02								47,98											0							100		
Spectre 176	Pyrite	5							53,61								45,71											0	0,68						100		
Spectre 177	Pyrite	6							52,05								44,23											0				3,72			100		
Spectre 178	Pyrite	7				0,65	0,76		52,94								45,66											0							100		
Spectre 179	Pyrite	7	48,07		0,88	15,85	18,42		2,92		8,65		0,64				4,57											0							100		
Spectre 180	Pyrite	8							54,23								45,77											0							100		
Spectre 181	Pyrite	9							51,65								48,35											0							100		
Spectre 182	Pyrite	10							54,28								45,72											0								100	
Spectre 183	Pyrite	11							51,96								48,04											0								100	
Spectre 184	Pyrite	12							47,95								47,5											0				4,54				100	
Spectre 185	Pyrite	13					2,35		47,16								50,5											0								100	
Spectre 186	Pyrite	13	46,77				44,26		4,05						0,52		4			0,41								0								100	
Spectre 187	Pyrite	14							54,09								45,91											0								100	
Spectre 188	Pyrite	15							54,01								45,99											0								100	
Spectre 189	Chalcopyrite 1	1	18,55						27,71								26,26			27,48								0								100	
Spectre 190	Chalcopyrite 1	2							31,67								32,81			35,52								0								100	
Spectre 191	Chalcopyrite 1	3	9,69						29,38								29,15			31,78								0								100	
Spectre 192	Chalcopyrite 1	4	11,83						26,15								30,38			31,64								0								100	
Spectre 193	Chalcopyrite 1	5	16,98						29,15								26,22			27,65								0								100	
Spectre 194	Chalcopyrite 1	6							35,99								30,88			33,13								0								100	
Spectre 195	Chalcopyrite 1	7							31,13								32,74			36,14								0								100	
Spectre 196	Chalcopyrite 1	8							36,49								30,96			32,55								0								100	
Spectre 197	Chalcopyrite 1	9							38								29,61			32,39								0								100	
Spectre 198	Chalcopyrite 1	10							36,39								30,44			33,18								0								100	
Spectre 199	Chalcopyrite 1	11	12,67						27,96								28,89			30,47								0								100	
Spectre 200	Chalcopyrite 1	12	12,34						29,94								28,1			29,62								0								100	
Spectre 201	Chalcopyrite 1	13	11,33						28,81								28,97			30,89								0								100	
Spectre 202	Chalcopyrite 1	14	12,82						22,69								31,02			33,47								0								100	
Spectre 203	Chalcopyrite 1	15	25,45						36,39								38,15											0								100	
Spectre 204	Pyrrhotite	1							41,1								58,9											0								100	
Spectre 205	Pyrrhotite	2							38,43								60,87			0,7								0								100	
Spectre 206	Pyrrhotite	3							41,18								58,82											0									100
Spectre 207	Pyrrhotite	3	33,71				0,4		4,04								61,85											0								100	
Spectre 208	Pyrrhotite	4							41,11								56,13		2,76									0								100	
Spectre 209	Pyrrhotite	5							34,05								63,47		1,22	1,25								0								100	
Spectre 210	Pyrrhotite	6							38,29								61		0,71									0								100	
Spectre 211	Pyrrhotite	7							40,31								59,21		0,49									0								100	
Spectre 212	Pyrrhotite	8							38,56								61,44											0								100	
Spectre 213	Pyrrhotite	9							40,98								59,02											0								100	
Spectre 214	Pyrrhotite	10							32,67								32,09		35,23									0								100	
Spectre 215	Pyrrhotite	11							41,02								58,98											0								100	
Spectre 216	Pyrrhotite	12							38,52								61,48											0								100	
Spectre 217	Pyrrhotite	13							36,36								31,28		28,03	1,47							0		2,87						100		
Spectre 218	Pyrrhotite	13					0,79		15,93								68,45		9,5	5,33								0								100	
Spectre 219	Pyrrhotite	14							38,65								60,11		1,23									0								100	
Spectre 220	Pyrrhotite	15							39,75								59,06		1,19									0								100	
Spectre 221	Bornite	1							23,53								0,39			76,08								0								100	
Spectre 222	Bornite	2	8,64						11,32								0,76			48,57								30,71								100	
Spectre 223	Bornite	3							21,22								0,76			78,01								0								100	
Spectre 224	Bornite	4							20,5								0,41			79,09								0								100	
Spectre 225	Bornite	5							22,66								0,46			76,88								0								100	

Descriptif de spectre	Minéral	Grain n°	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Br	Rb	Sr	Zr	Ag	La	Er	Yb	Ta	W	Pb	Total			
Spectre 226	Bornite	6							20,6								0,68			78,73														100			
Spectre 227	Bornite	7							23,65								0,64			75,07								0,64							100		
Spectre 228	Bornite	8							17,51								0,35			82,14															100		
Spectre 229	Bornite	9							22,85								2,61			74,53															100		
Spectre 230	Bornite	10							20,06											79,94															100		
Spectre 231	Bornite	11							14,43								0,6			84,97															100		
Spectre 232	Bornite	12							22,15								0,75			77,1															100		
Spectre 233	Bornite	13							12,99								0,83			86,18																100	
Spectre 234	Bornite	14							17,24											82,76																100	
Spectre 235	Bornite	15							21,59											78,41																100	
Spectre 236	Covellite	1							28,09								11,1			60,81																100	
Spectre 237	Covellite	1	39,21						2,55								50,81			7,43																100	
Spectre 238	Covellite	2							26,6								11,37			62,04																100	
Spectre 239	Covellite	3							24,43								11,94			63,63																100	
Spectre 240	Covellite	4							23,93								11,63			64,44																100	
Spectre 241	Covellite	5							27								11,38			61,62																100	
Spectre 242	Covellite	6							26,67								11,82			61,5																100	
Spectre 243	Covellite	7							27,97								11,5			60,52																100	
Spectre 244	Covellite	8							27,11								11,54			61,35																100	
Spectre 245	Covellite	9							24,76								11,79			63,44																100	
Spectre 246	Covellite	10							24,63								12,21			63,16																100	
Spectre 247	Covellite	11							27,85								11,44			60,71																100	
Spectre 248	Covellite	12							25,48								10,93			63,59																100	
Spectre 249	Covellite	13							28,44								11,18			60,38																100	
Spectre 250	Covellite	14							27,27								11,58			61,14																100	
Spectre 251	Covellite	15							26,28								11,47			62,25																100	
Spectre 252	Marcassite	1							51,43								48,57																			100	
Spectre 253	Marcassite	2							52,47								47,53																			100	
Spectre 254	Marcassite	3							45,11								54,89																				100
Spectre 255	Marcassite	4							52,06			0,29					47,65																			100	
Spectre 256	Marcassite	5							54,43								45,57																				100
Spectre 257	Marcassite	6							50,93								49,07																				100
Spectre 258	Marcassite	7							54,97								45,03																				100
Spectre 259	Marcassite	8							54,72								45,28																				100
Spectre 260	Marcassite	9							54,65								45,35																				100
Spectre 261	Marcassite	10							51,41								48,59																				100
Spectre 262	Marcassite	11							53,13								46,18					0,69														100	
Spectre 263	Marcassite	12							54,54								45,46																				100
Spectre 264	Marcassite	13							54,44								45,56																				100
Spectre 265	Marcassite	14							50,51								49,49																				100
Spectre 266	Marcassite	15							52,86								46,43	0,71																			100
Spectre 267	Chalcopyrite 2	1							37,71								30,14			32,15																100	
Spectre 268	Chalcopyrite 2	2							36,13								30,27			33,61																	100
Spectre 269	Chalcopyrite 2	3							31,38								33,01			35,61																	100
Spectre 270	Chalcopyrite 2	4							32,93								32,62			34,44																	100
Spectre 271	Chalcopyrite 2	5							34,08								32,54			33,38																	100
Spectre 272	Chalcopyrite 2	6							36,54								30,6			32,85																	100
Spectre 273	Chalcopyrite 2	7							38,17								34,28			27,55																	100
Spectre 274	Chalcopyrite 2	8							29,49								34,27			36,24																	100
Spectre 275	Chalcopyrite 2	9							37,52								29,76			32,72																	100
Spectre 276	Chalcopyrite 2	10							36,26								30,68			33,06																	100
Spectre 277	Chalcopyrite 2	11							35,55								31,07			33,38																	100
Spectre 278	Chalcopyrite 2	12							34,76								31,35			33,89																	100

Descriptif de spectre	Minéral	Grain n°	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Br	Rb	Sr	Zr	Ag	La	Er	Yb	Ta	W	Pb	Total		
Spectre 279	Chalcopyrite 2	13							34,15								31,75			34,1														100		
Spectre 280	Chalcopyrite 2	14							34,61								31,32			34,07															100	
Spectre 281	Chalcopyrite 2	15							35,63								31,05			33,32															100	
Spectre 282	Cobaltite	1							13,96			0,68					7,51	8,42	16,24			53,19													100	
Spectre 283	Cobaltite	2							1,77			1,24					3,06	11,23	4,25			78,46													100	
Spectre 284	Cobaltite	3							1,12			1,08					3,22	12,16	3,79			78,63													100	
Spectre 285	Cobaltite	3							15,48			1					7,25	9,76	12,75			53,76													100	
Spectre 286	Cobaltite	4							1,11			1,49					3,63	12,55	5,04			76,18													100	
Spectre 287	Cobaltite	5							13,77			0,94					8,67	10,52	16,68			49,43													100	
Spectre 288	Cobaltite	6							1,72			1,67					3,29	13,21	3,8			76,3								0					100	
Spectre 289	Cobaltite	7							12,91			0,97					7,48	6,56	18,91			53,16													100	
Spectre 290	Cobaltite	8							0,35			1,31					3,04	14,2	4,3			76,8													100	
Spectre 291	Cobaltite	9							0,64			3,44					2,73	16,61	2,75			73,83													100	
Spectre 292	Cobaltite	9	60,02						0,22			30,42					0,71	1,3	0,51			6,82													100	
Spectre 293	Cobaltite	10							0,45			1,24					3,25	15,13	3,61			76,33													100	
Spectre 294	Cobaltite	11							1,19			3,29					4,01	13,01	4,49			74,01													100	
Spectre 295	Cobaltite	11							15,4			2,35					6,27	15,46	11,08			49,45													100	
Spectre 296	Cobaltite	11	62,25						0,58			29,17					0,69	1,07	0,94			5,29													100	
Spectre 297	Cobaltite	12							0,99			0,69					2,15	15,04	1,25			79,87													100	
Spectre 298	Cobaltite	13							0,51			1,5					3,47	16,36	4,04			74,12								0					100	
Spectre 299	Cobaltite	13	47,2						0,37			37					1,44	2,26	0,88			10,84													100	
Spectre 300	Cobaltite	14							1,16			1,68					3,44	15,67	4,38			73,68													100	
Spectre 301	Cobaltite	15							18,71			2,02					31,62					47,65													100	
Spectre 302	Hématite 2	1	30,12														69,88																		100	
Spectre 303	Hématite 2	2					0,36		1,08	0,22		0,15					93,04					5,15											0		100	
Spectre 304	Hématite 2	2	28,17														71,83																		100	
Spectre 305	Hématite 2	3	18,31				0,55		0,17								79,96					1,02													100	
Spectre 306	Hématite 2	4	33,46														66,54																		100	
Spectre 307	Hématite 2	5	32,82														67,18																		100	
Spectre 308	Hématite 2	6	28,8						0,24								69,58					1,38													100	
Spectre 309	Hématite 2	7	35,52														64,48																		100	
Spectre 310	Hématite 2	8	30,66														68,57					0,77													100	
Spectre 311	Hématite 2	9	28,81									0,25					69,78					1,16													100	
Spectre 312	Hématite 2	9					1,33	1,78	1,88	28,65		2,21	1,2				56,52					6,44											0		100	
Spectre 313	Hématite 2	10	28,5						0,2								70,68					0,61													100	
Spectre 314	Hématite 2	10							11,85								7,37																	80,78		100
Spectre 315	Hématite 2	11	31,47														68,53																			100
Spectre 316	Hématite 2	12	40,29														59,71																			100
Spectre 317	Hématite 2	13	33,28														66,72																			100
Spectre 318	Hématite 2	14	32,83														67,17																			100
Spectre 319	Hématite 2	15	31,08														68,92																			100
Spectre 320	Arsénopyrite	1					0,39		19,65								32,76					47,19														100
Spectre 321	Arsénopyrite	2							19,54								32,19					48,27														100
Spectre 322	Arsénopyrite	3					0,59		20,16								30,78					48,47														100
Spectre 323	Arsénopyrite	4					0,53		19,64								29,69					50,14														100
Spectre 324	Arsénopyrite	5	8,47			1,2	1,46		17,95		0,36						29,21					41,35														100
Spectre 325	Arsénopyrite	5	52,36			12,29	14,84		2,44		4,73		0,4				6,24					6,7													100	
Spectre 326	Arsénopyrite	6							17,28								41,29					41,43														100
Spectre 327	Arsénopyrite	7					1,09		19,84								30,72					48,35														100
Spectre 328	Arsénopyrite	7	45,26		0,96	15,68	17,74		2,18		7,15		0,53				6,14					4,36														100
Spectre 329	Arsénopyrite	8							22,55								33,62					43,83														100
Spectre 330	Arsénopyrite	9							19,41								33,58					47,01														100
Spectre 331	Arsénopyrite	10	111						20,09								32,27					47,63														100

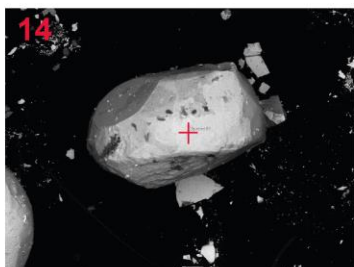
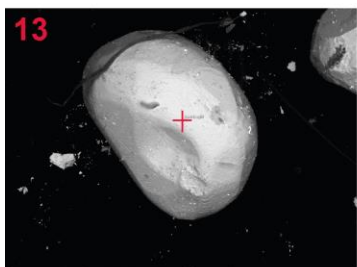
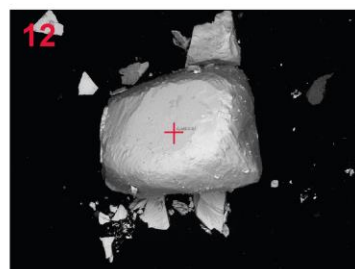
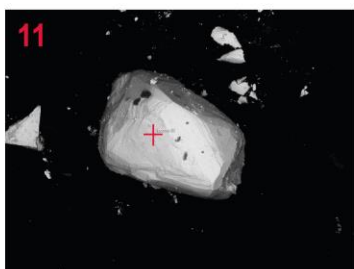
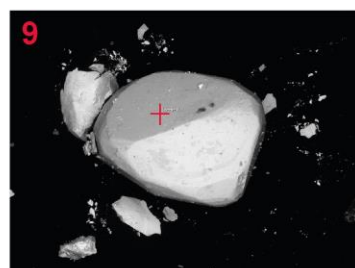
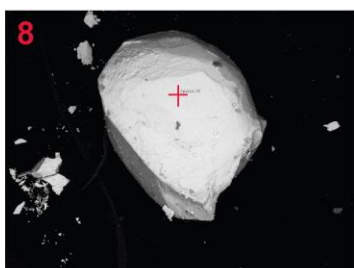
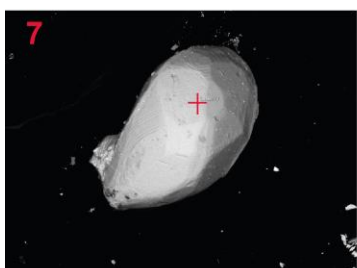
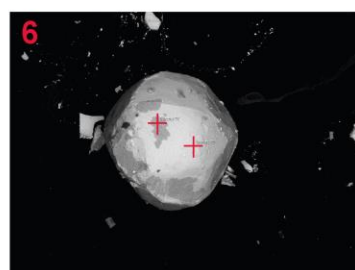
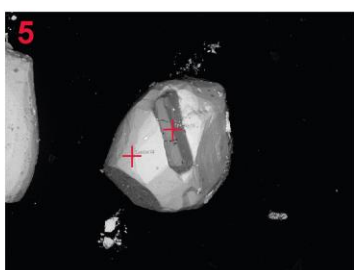
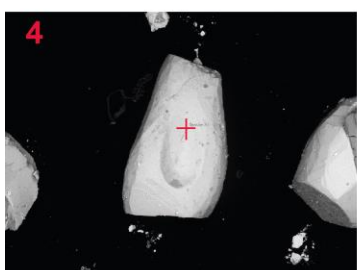
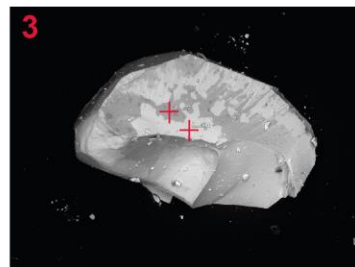
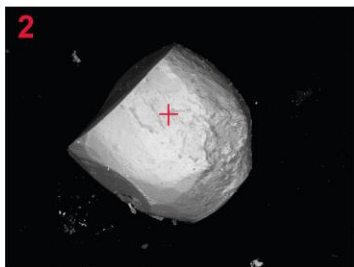
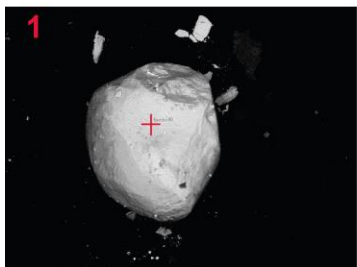
Descriptif de spectre	Minéral	Grain n°	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Br	Rb	Sr	Zr	Ag	La	Er	Yb	Ta	W	Pb	Total
Spectre 332	Arsénopyrite	11							21,25								32,99					45,76					0							100
Spectre 333	Arsénopyrite	12					0,48		19,26								32,51					47,76					0					0		100
Spectre 334	Arsénopyrite	13							19,19								33,17					47,64					0							100
Spectre 335	Arsénopyrite	14							20,89								33,35					45,77					0							100
Spectre 336	Arsénopyrite	15				0,57	2,81		19,36								32,17					43,67					0				1,42			100

Certaines incohérences pour les résultats d'analyses ont été remarquées ; en exemple:

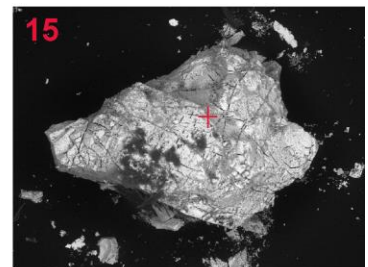
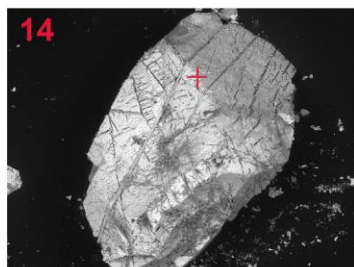
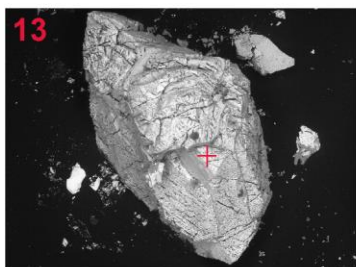
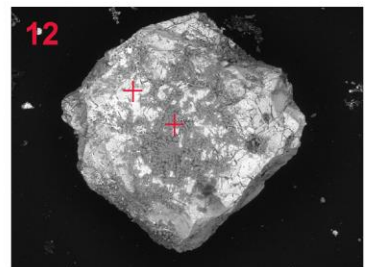
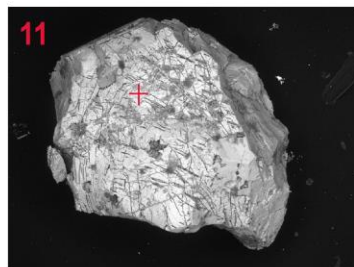
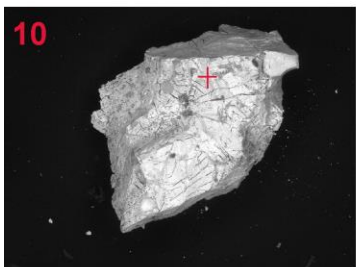
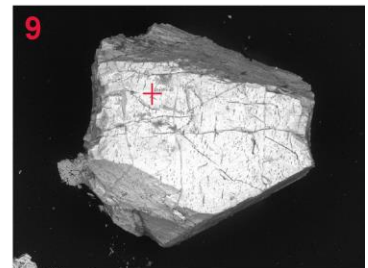
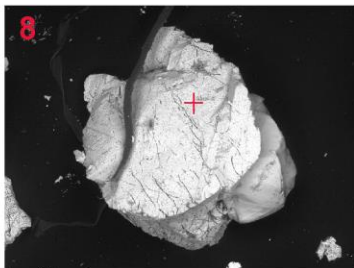
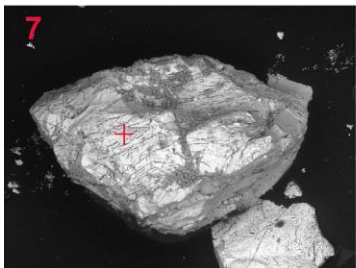
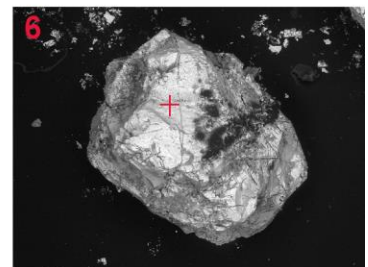
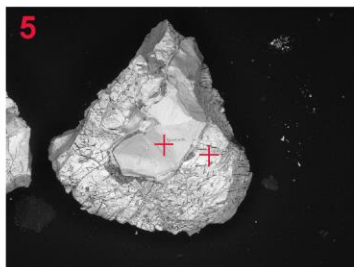
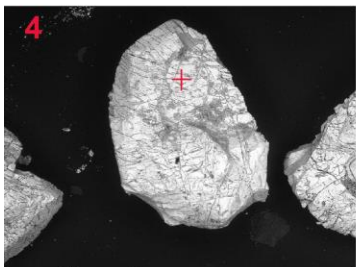
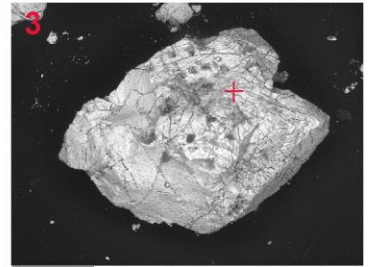
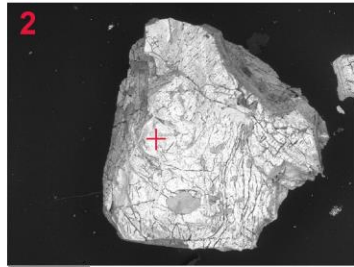
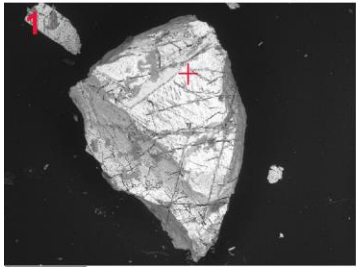
- Pour la chalcopirite 1 : spectres 189/191/192/193/199/200/201/202/203, surement lié au fait que la chalcopirite provienne d'un sable ;
- Pour la bornite : spectre 222 ;
- Pour l'arsénopyrite : spectres 324/325, les deux spectres viennent du même minéral, mais ce dernier a une forme assez particulière.

### ANNEXE 3 - Photographies des grains irréguliers et des spectres analysés au microscope électronique à balayage.

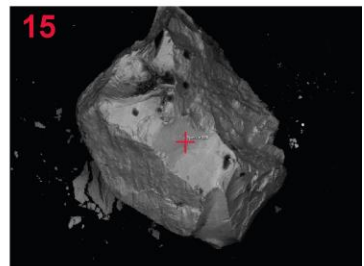
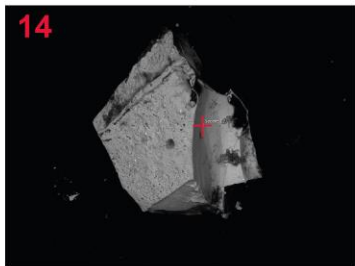
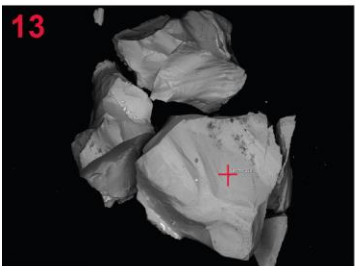
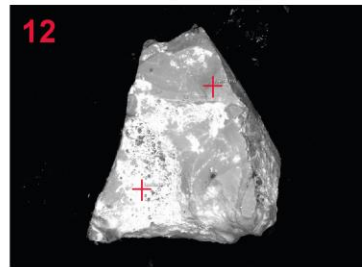
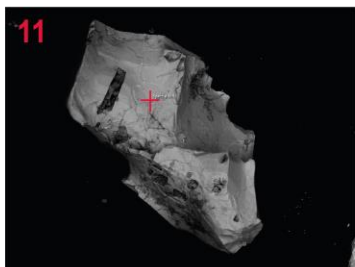
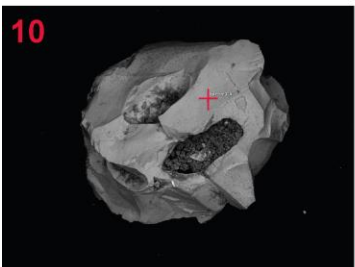
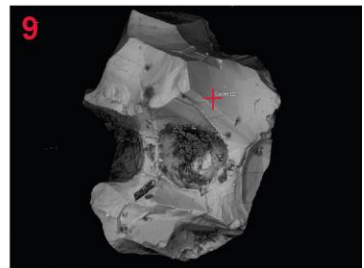
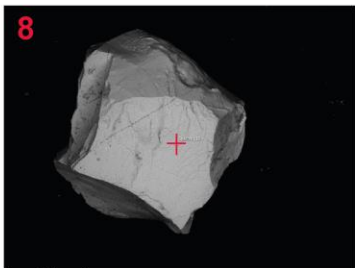
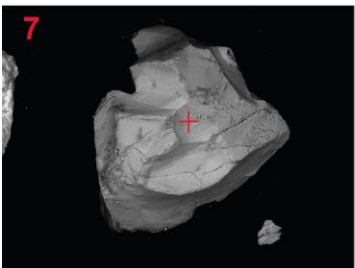
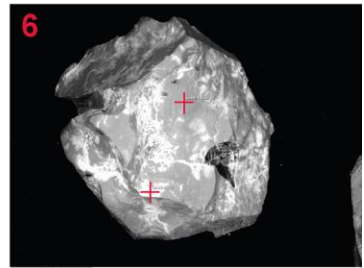
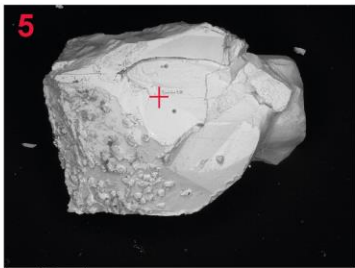
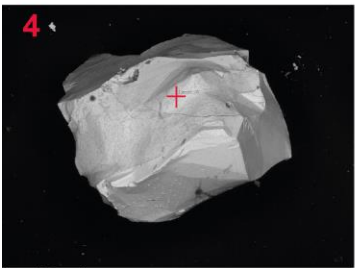
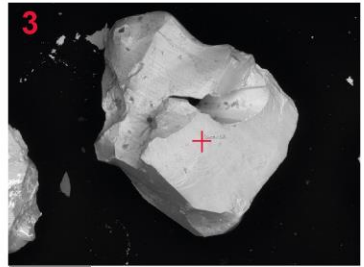
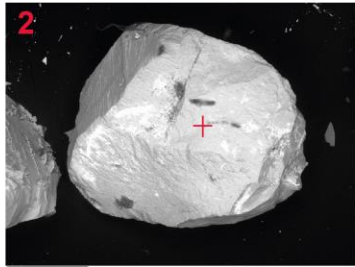
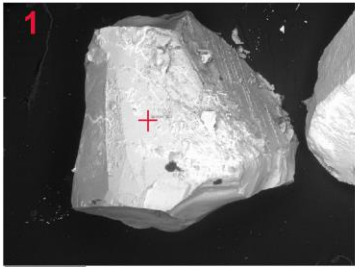
Photographies des grains 1 à 15 de magnétite (1) avec localisation des spectres mesurés au MEB



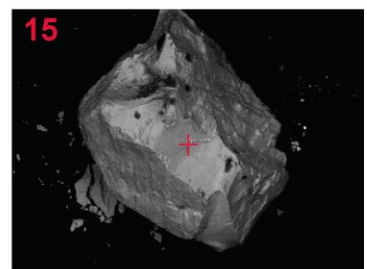
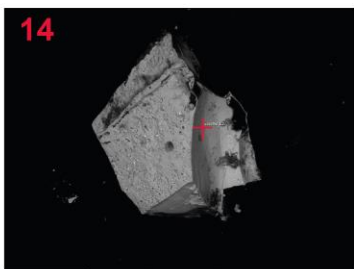
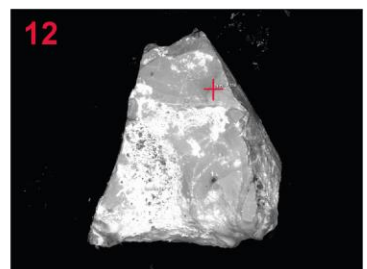
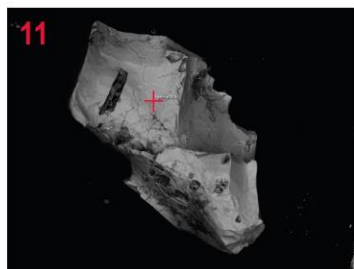
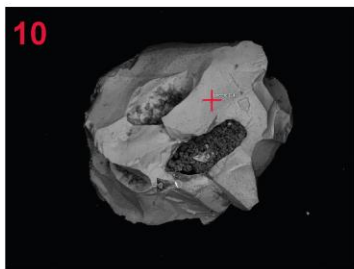
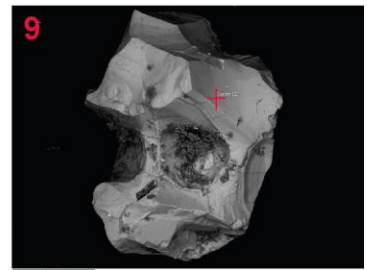
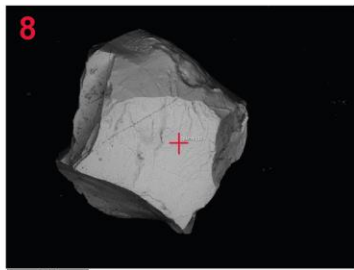
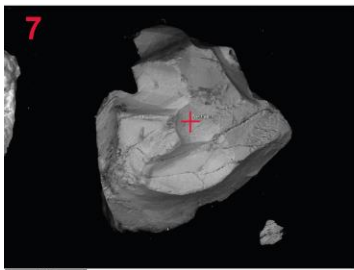
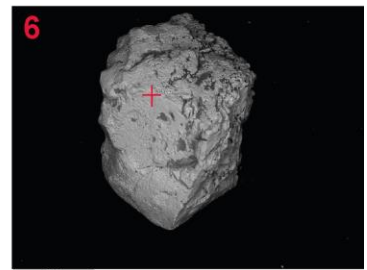
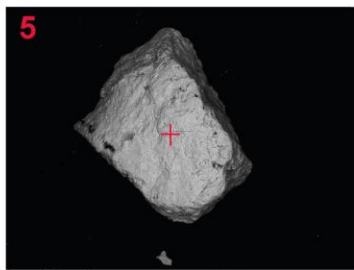
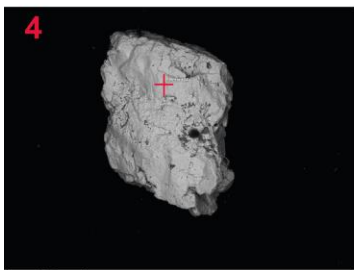
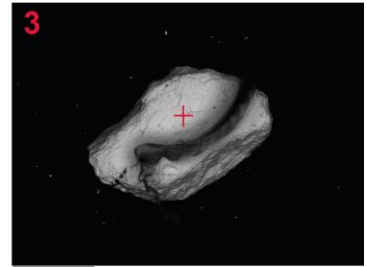
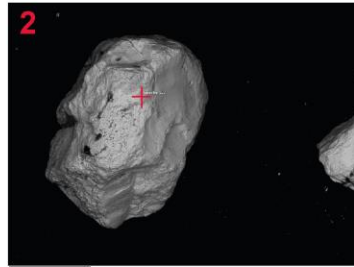
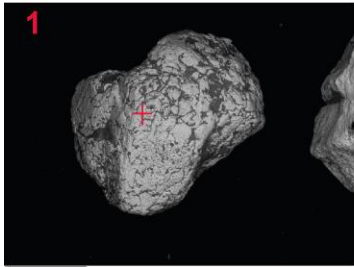
Photographies des grains 1 à 15 de magnétite (2) avec localisation des spectres mesurés au MEB



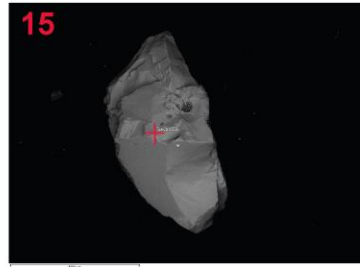
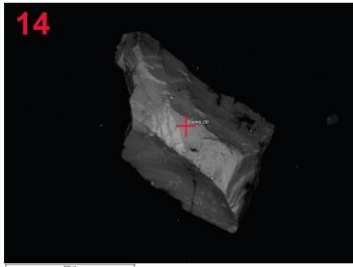
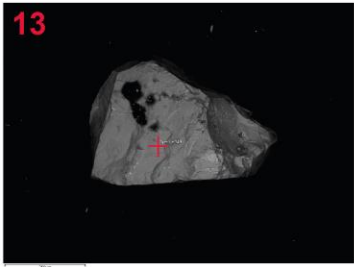
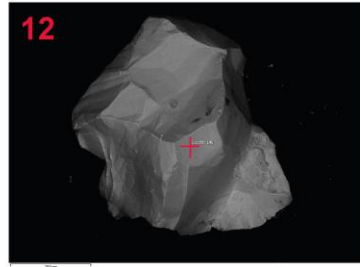
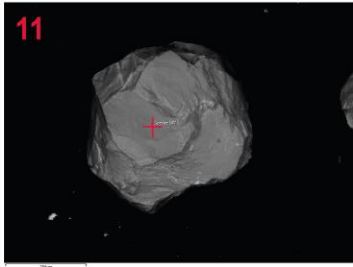
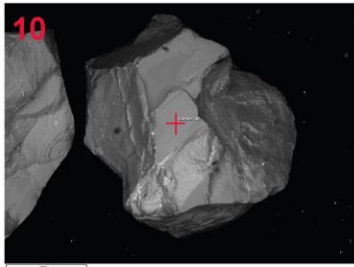
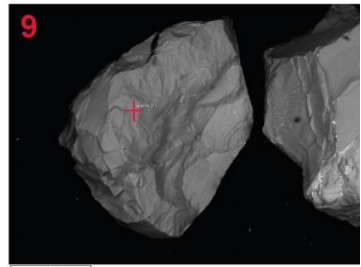
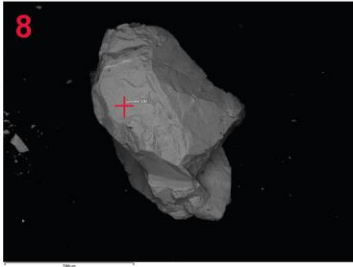
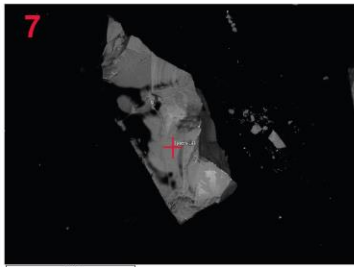
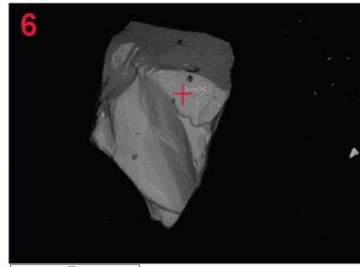
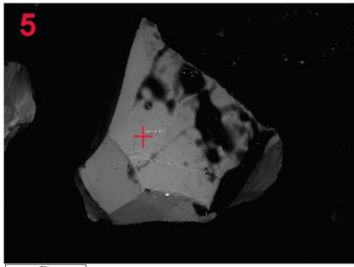
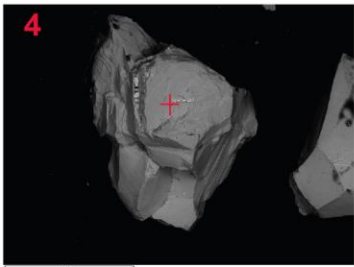
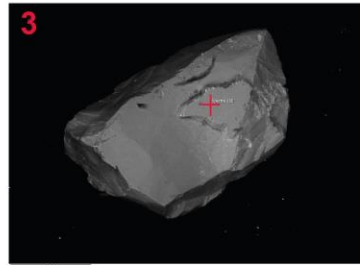
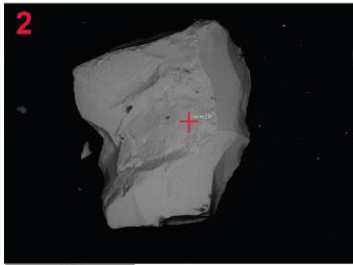
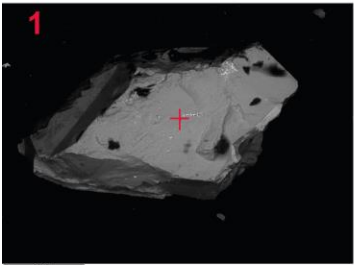
Photographies des grains 1 à 15 d'ilménite avec localisation des spectres mesurés au MEB



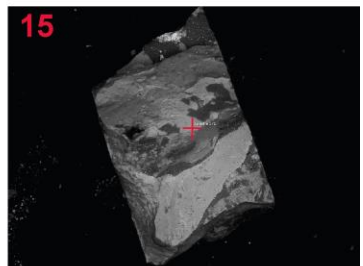
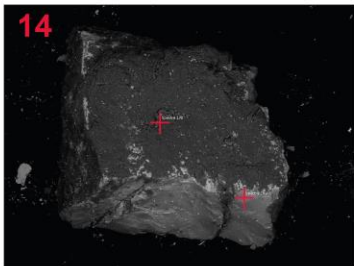
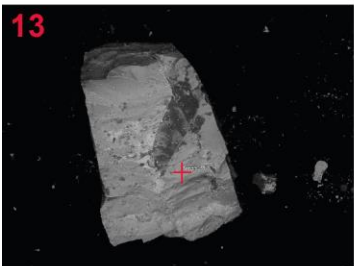
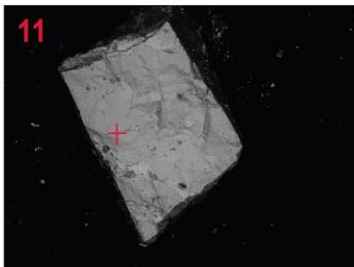
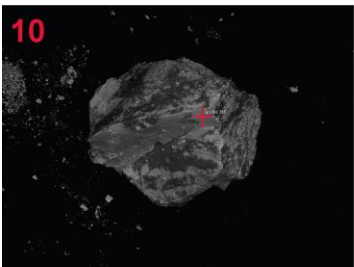
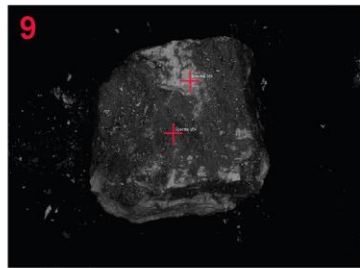
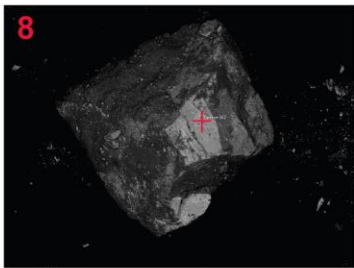
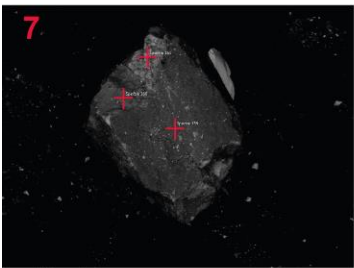
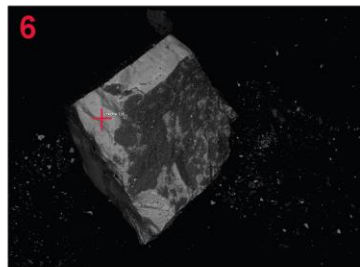
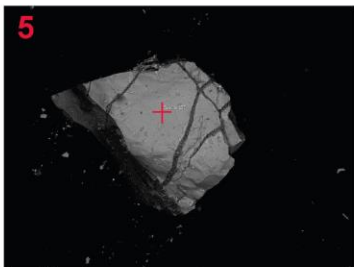
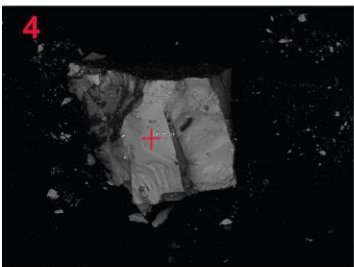
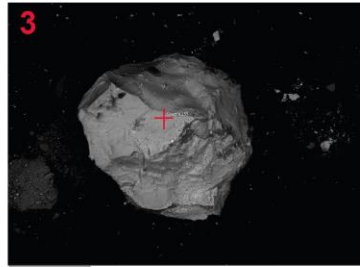
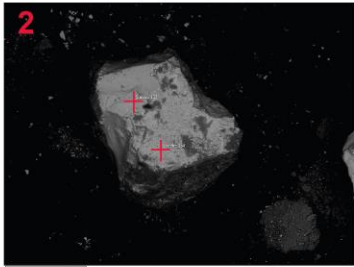
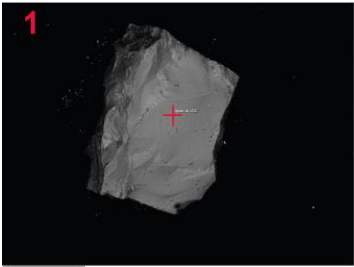
Photographies des grains 1 à 15 d'hématite (1) avec localisation des spectres mesurés au MEB



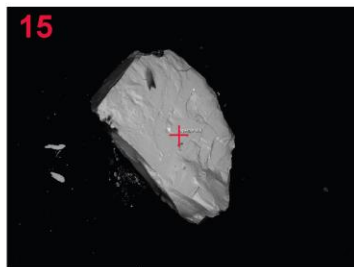
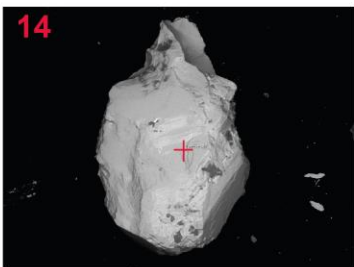
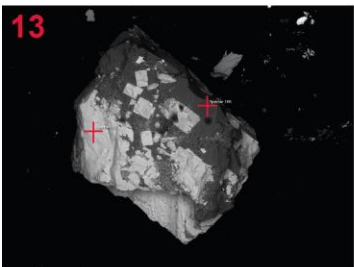
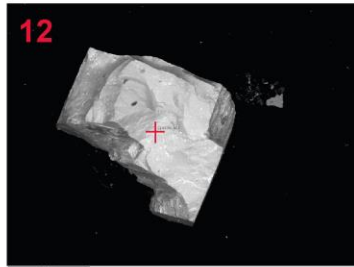
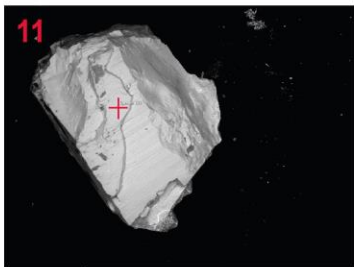
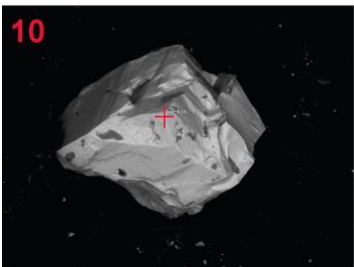
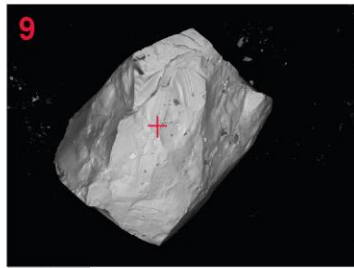
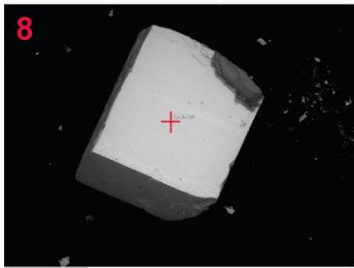
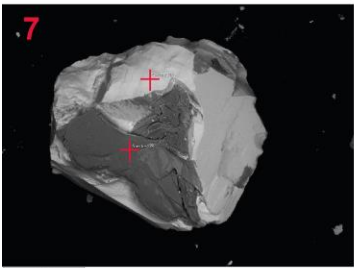
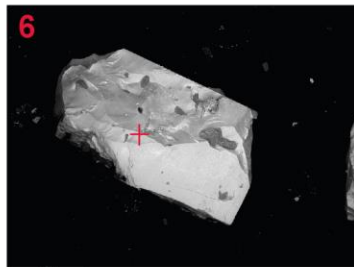
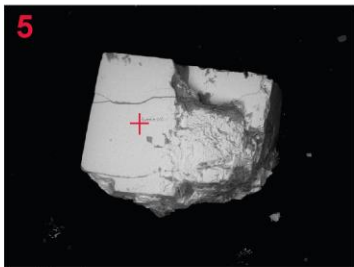
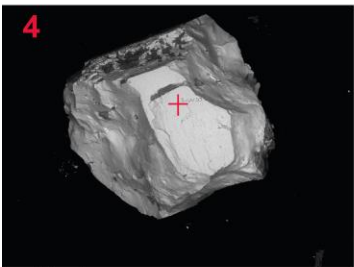
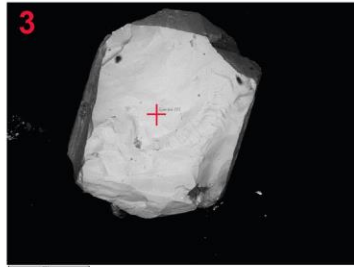
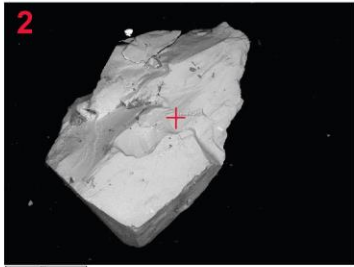
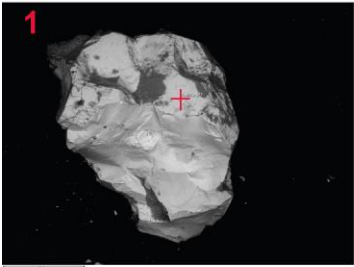
Photographies des grains 1 à 15 de rutile avec localisation des spectres mesurés au MEB



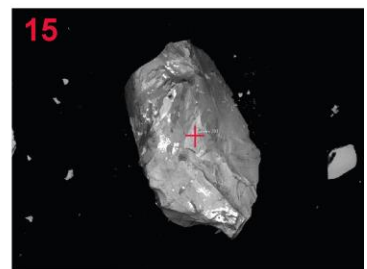
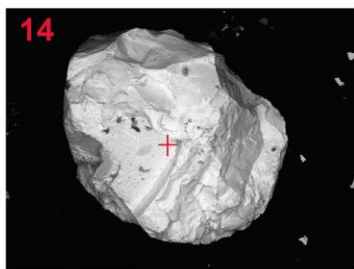
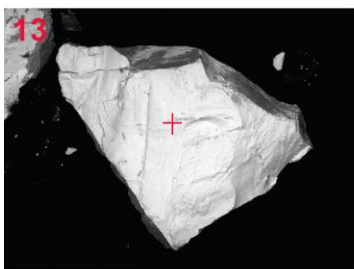
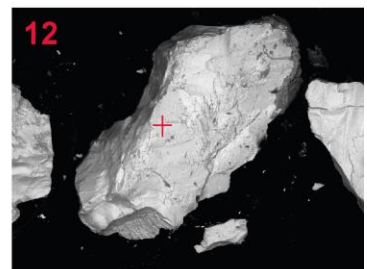
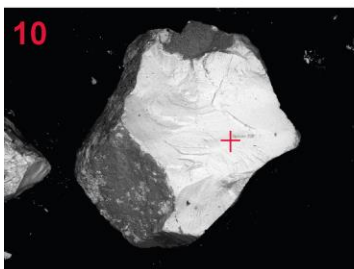
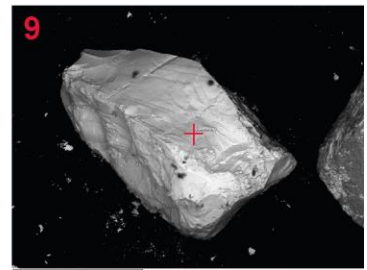
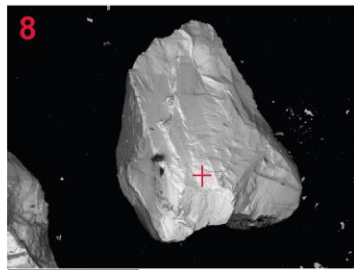
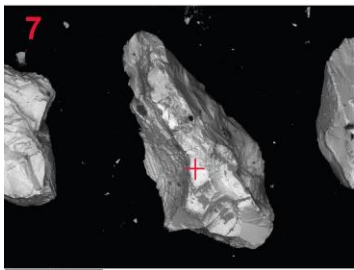
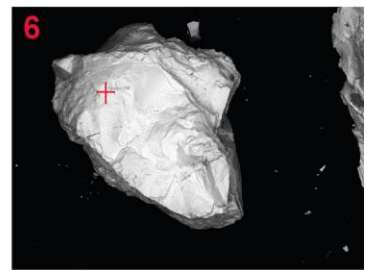
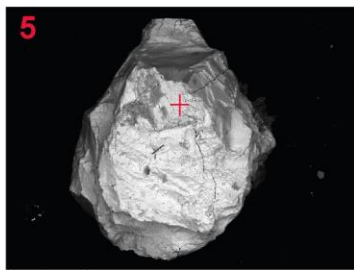
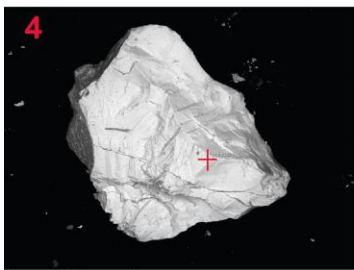
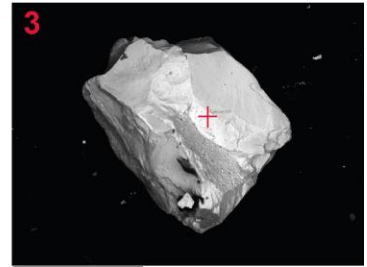
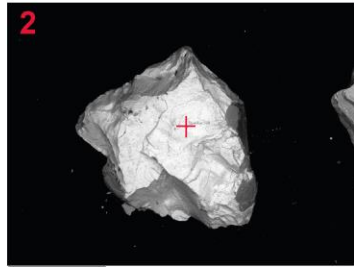
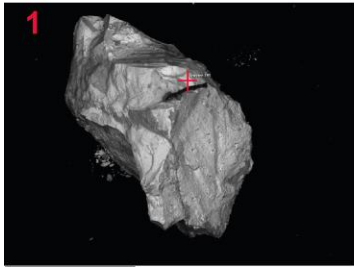
Photographies des grains 1 à 15 de chromite avec localisation des spectres mesurés au MEB



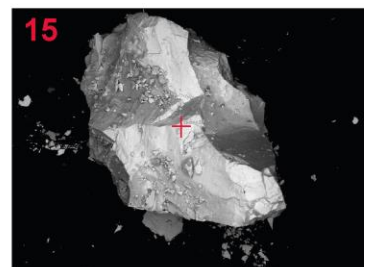
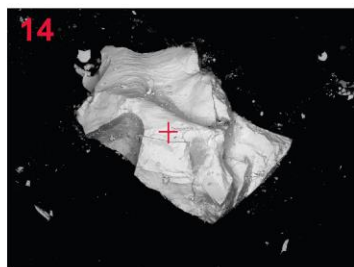
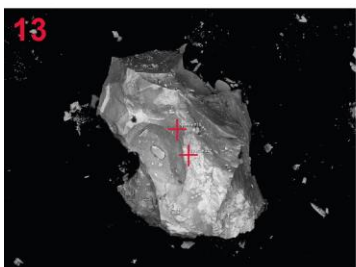
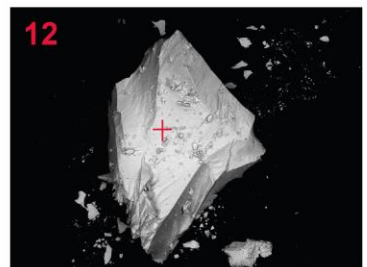
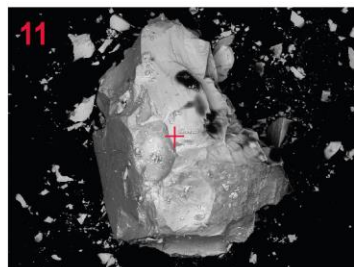
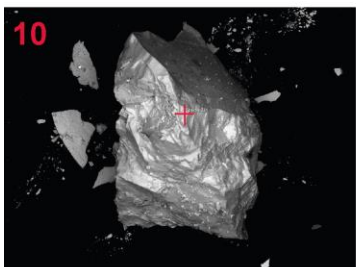
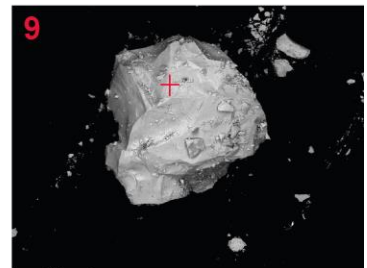
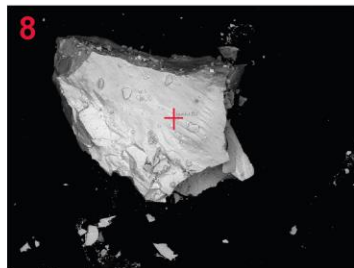
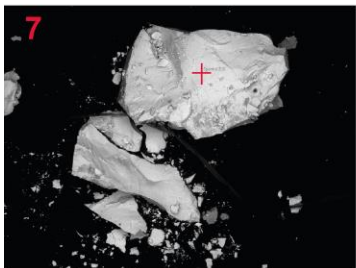
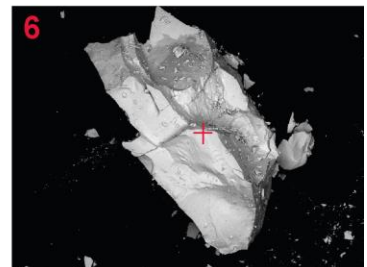
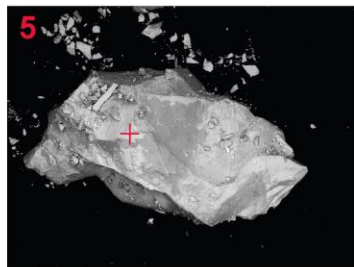
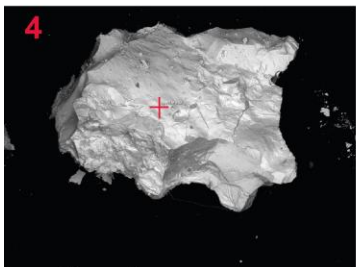
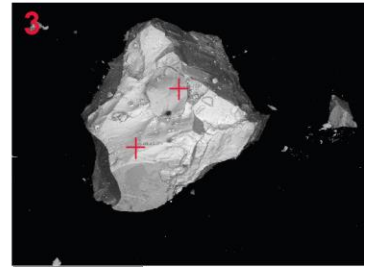
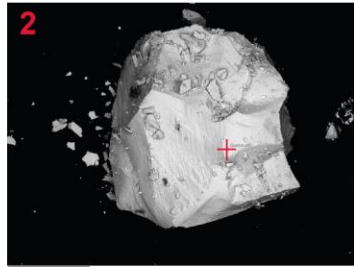
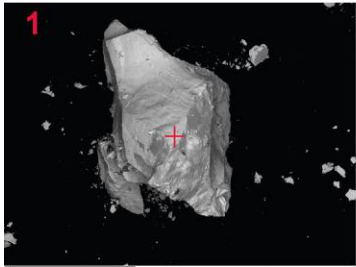
Photographies des grains 1 à 15 de pyrite avec localisation des spectres mesurés au MEB



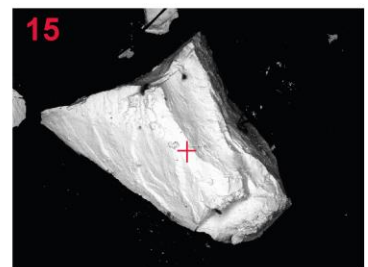
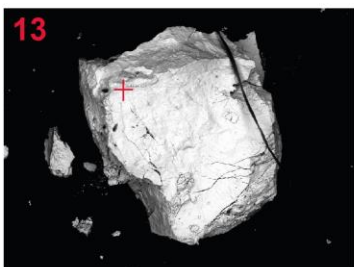
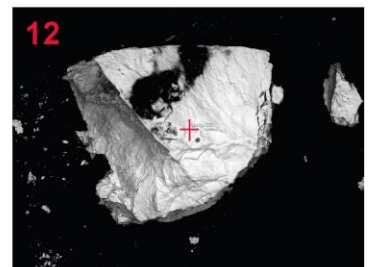
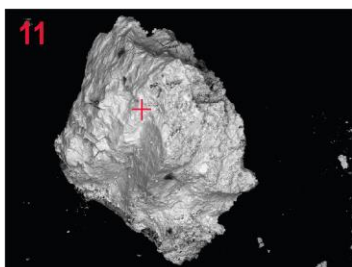
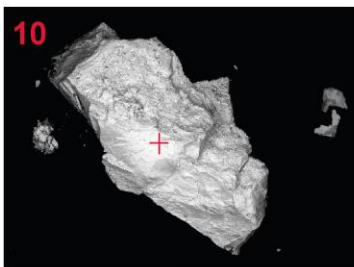
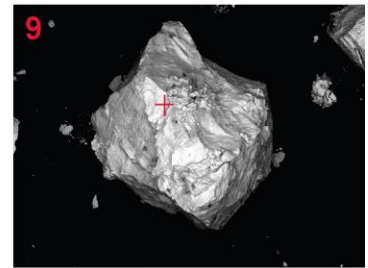
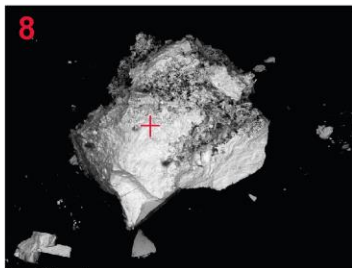
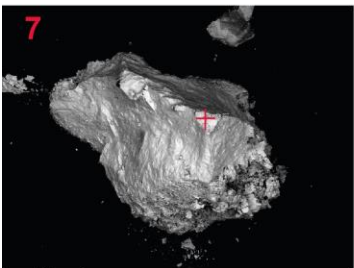
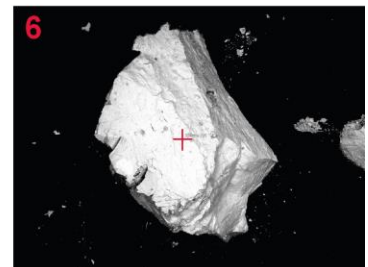
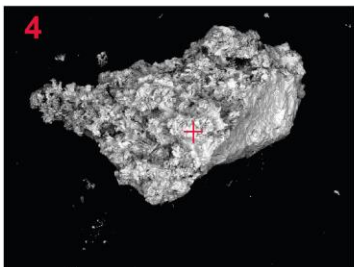
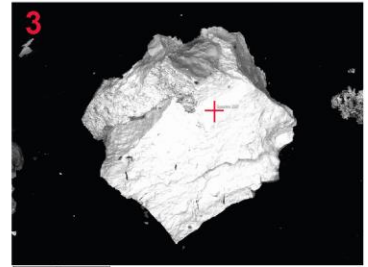
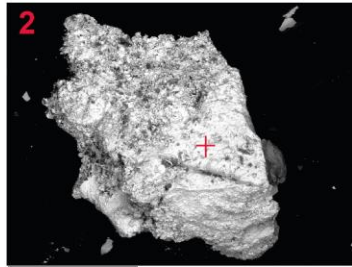
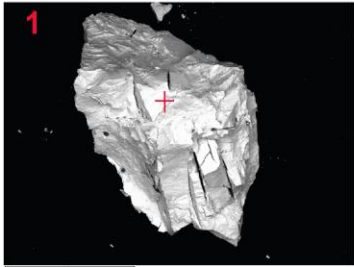
Photographies des grains 1 à 15 de chalcopryrite (1) avec localisation des spectres mesurés au MEB



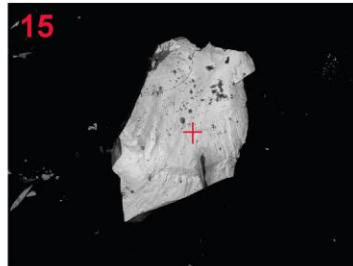
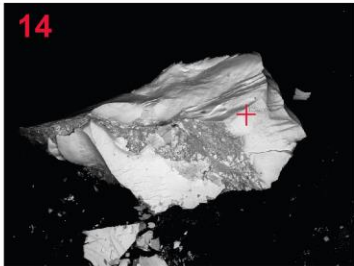
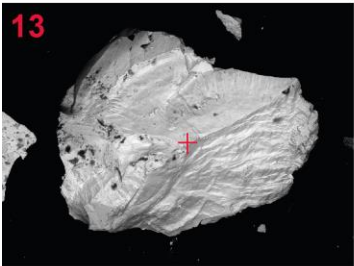
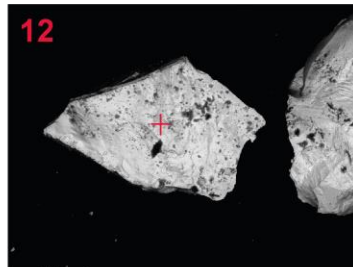
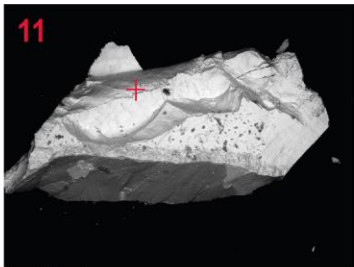
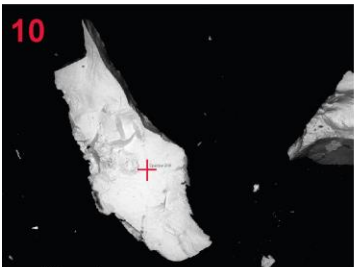
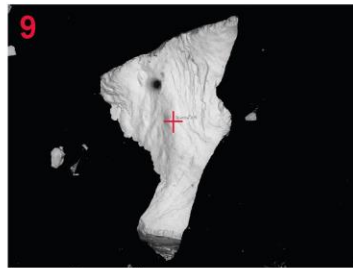
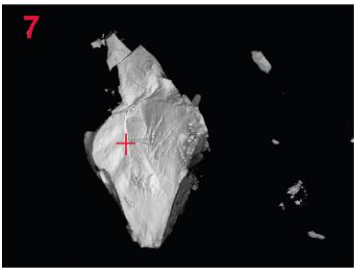
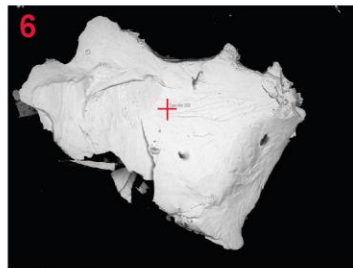
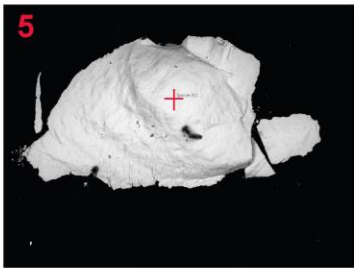
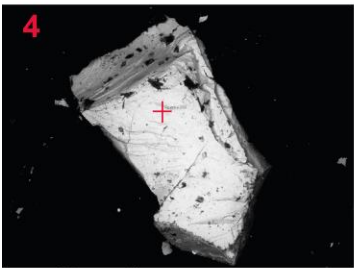
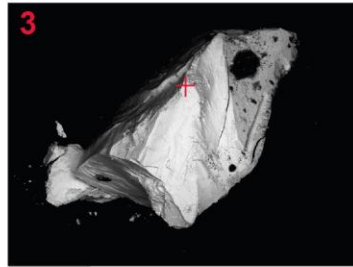
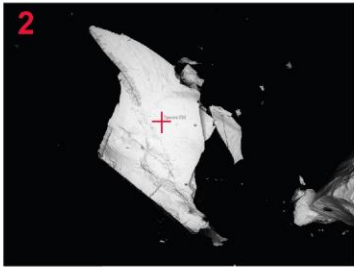
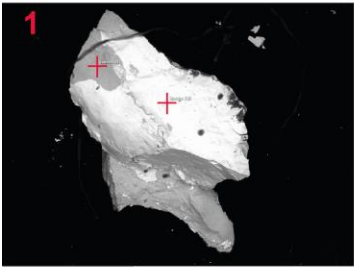
Photographies des grains 1 à 15 de pyrrhotite avec localisation des spectres mesurés au MEB



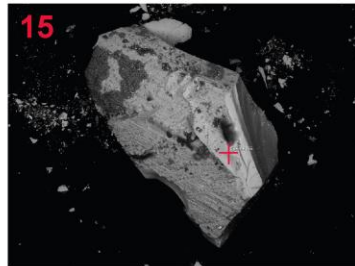
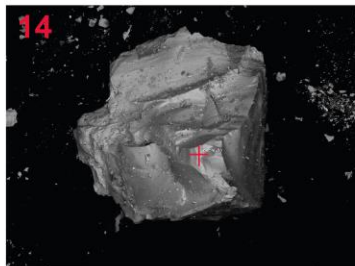
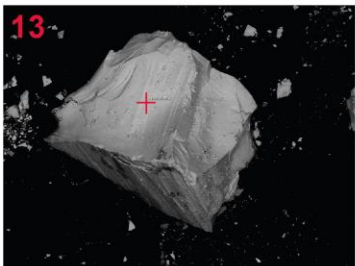
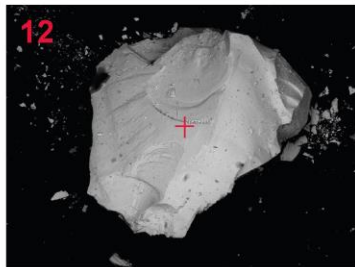
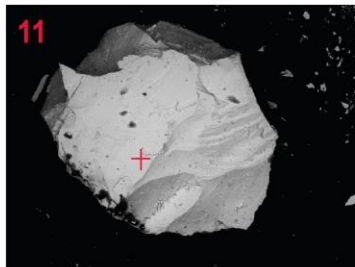
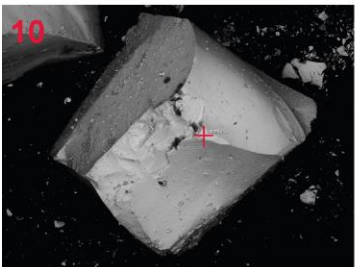
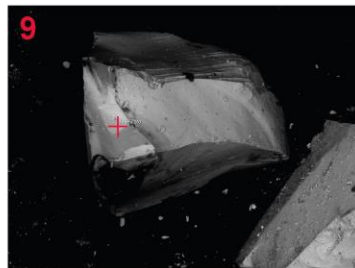
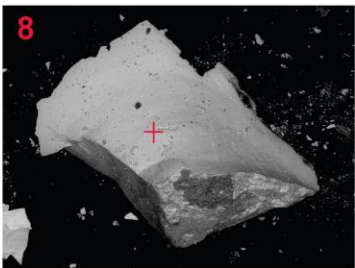
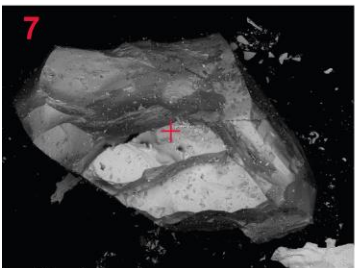
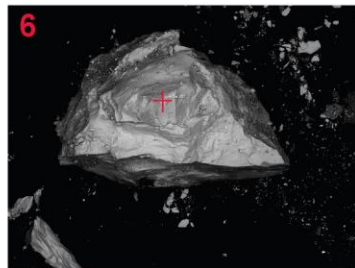
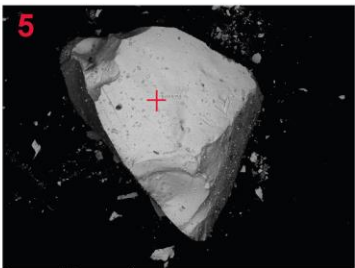
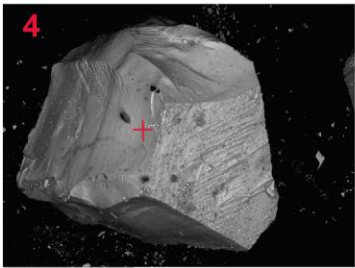
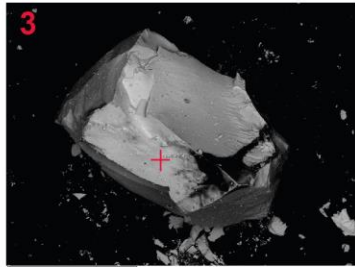
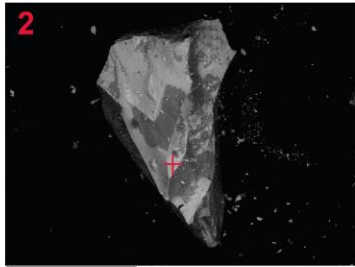
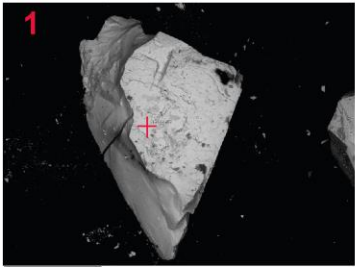
Photographies des grains 1 à 15 de bornite avec localisation des spectres mesurés au MEB



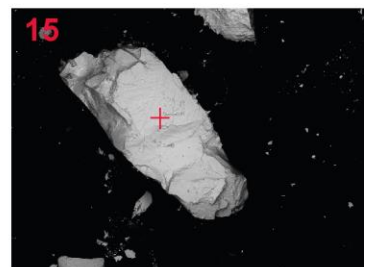
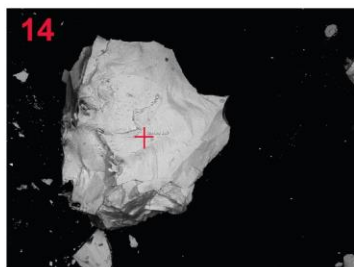
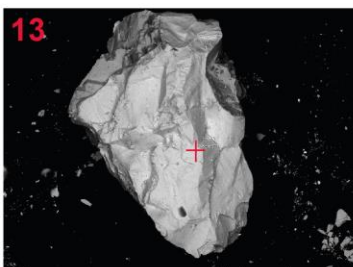
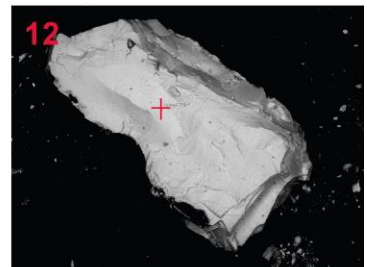
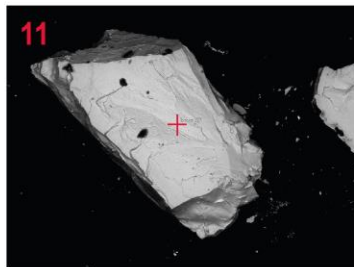
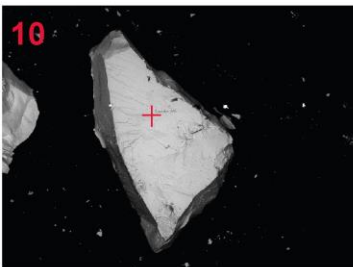
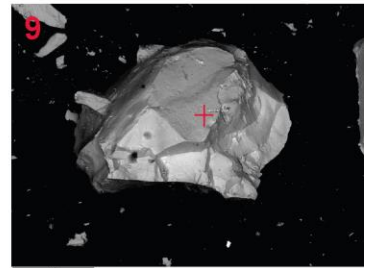
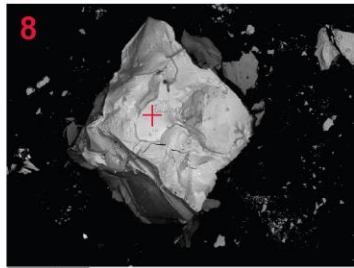
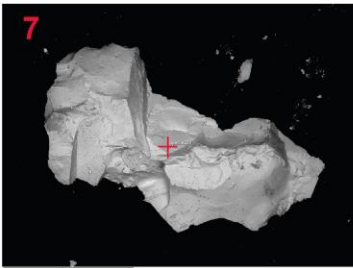
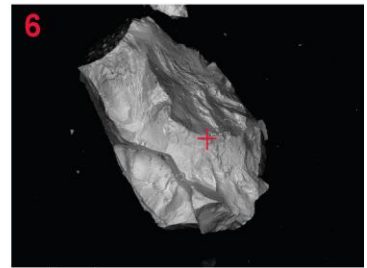
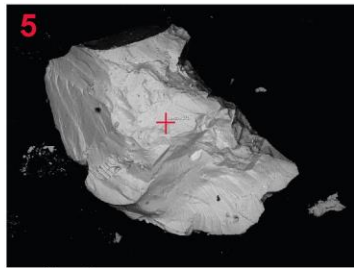
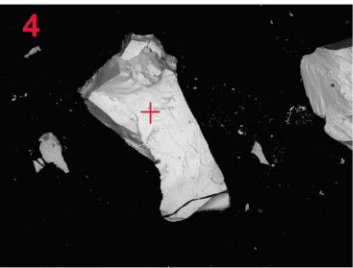
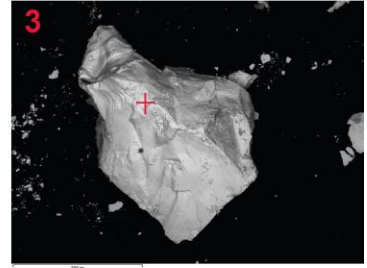
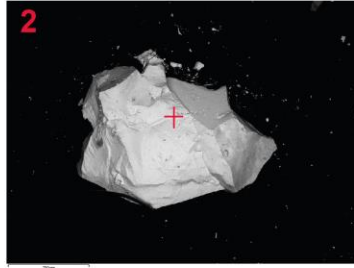
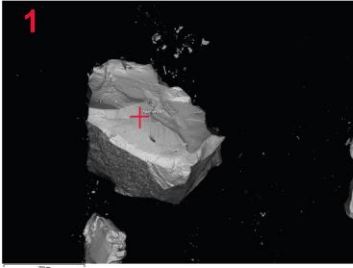
Photographies des grains 1 à 15 de covellite avec localisation des spectres mesurés au MEB



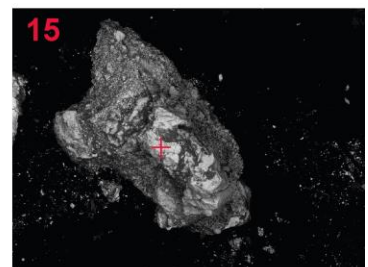
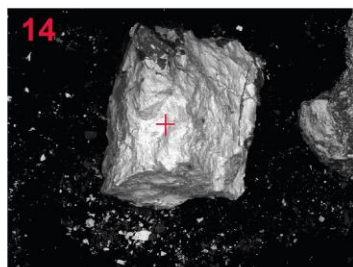
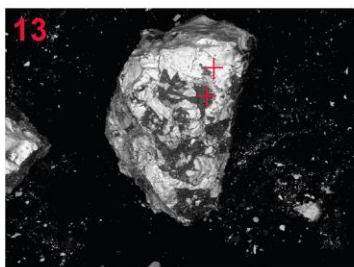
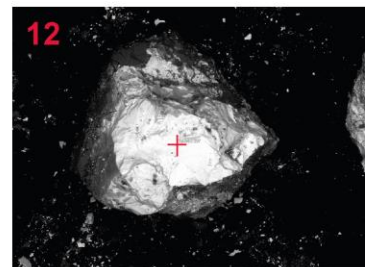
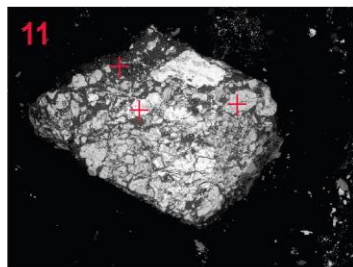
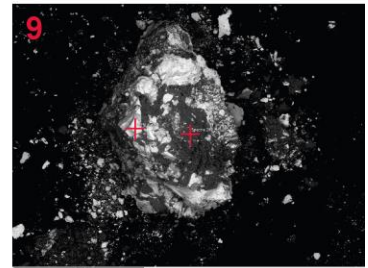
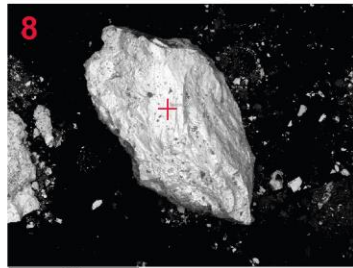
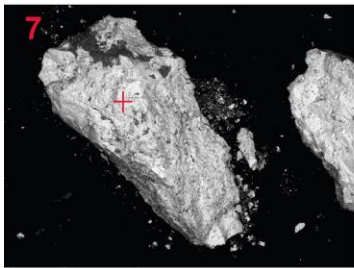
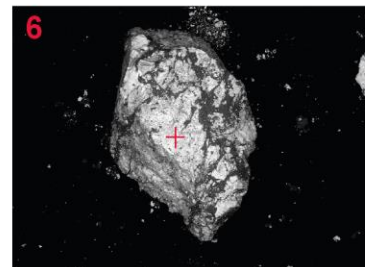
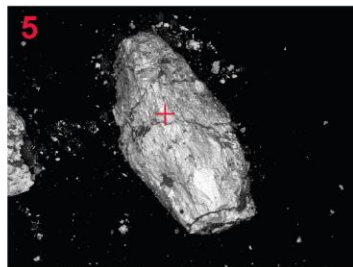
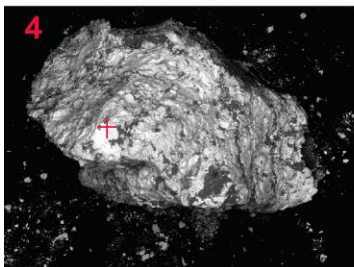
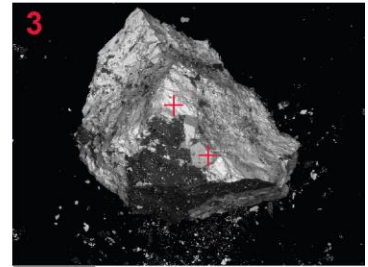
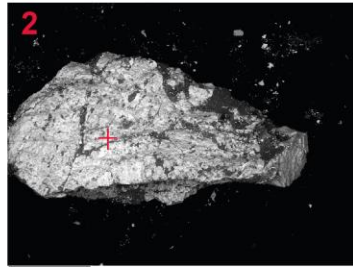
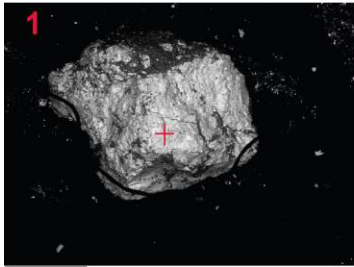
Photographies des grains 1 à 15 de marcassite avec localisation des spectres mesurés au MEB



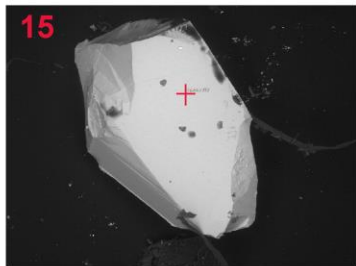
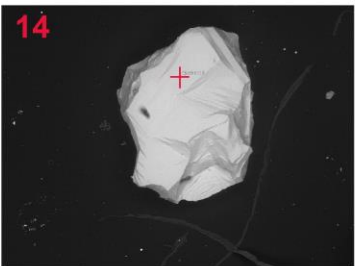
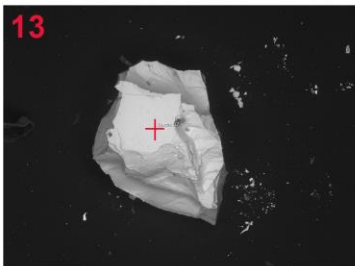
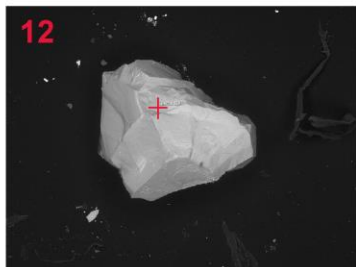
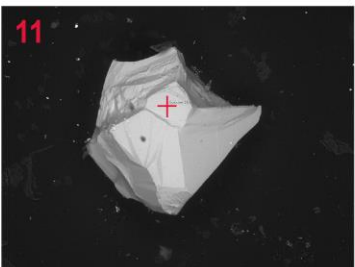
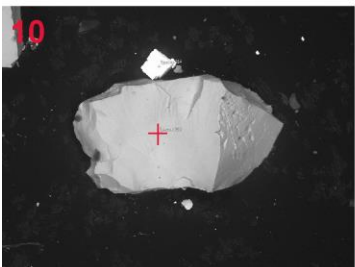
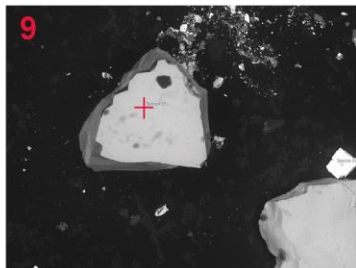
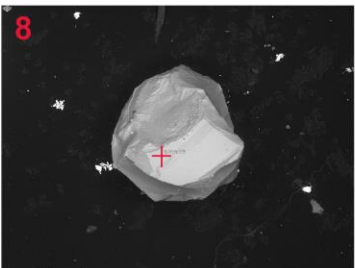
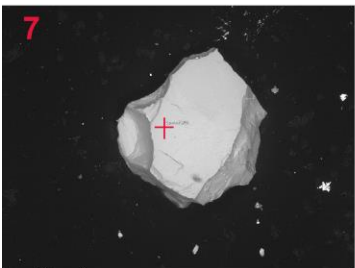
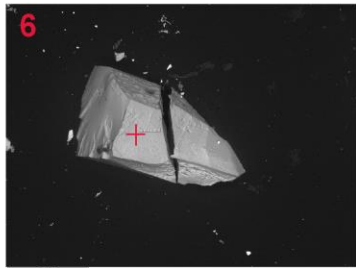
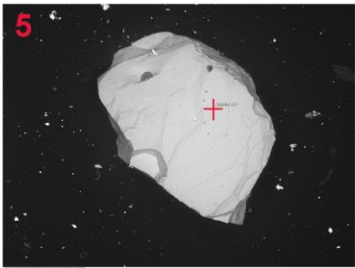
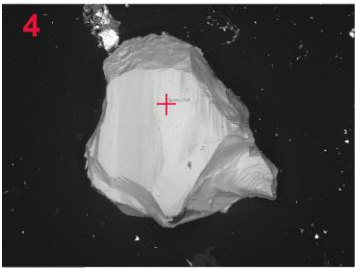
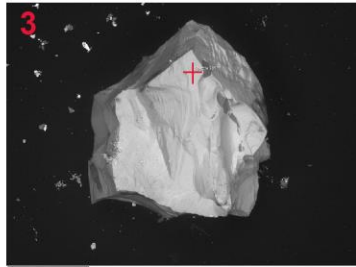
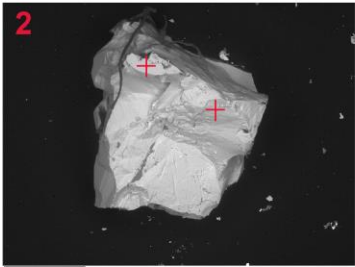
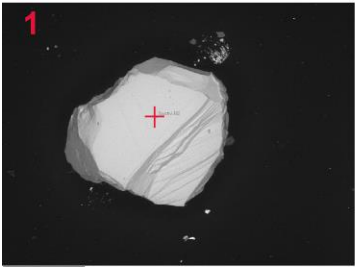
Photographies des grains 1 à 15 de chalcopryrite (2) avec localisation des spectres mesurés au MEB



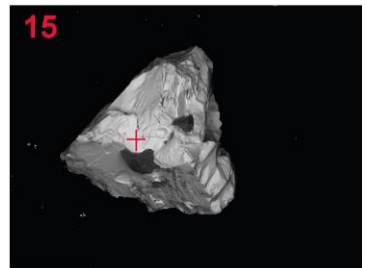
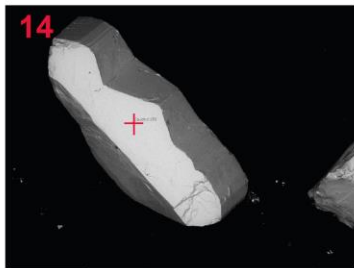
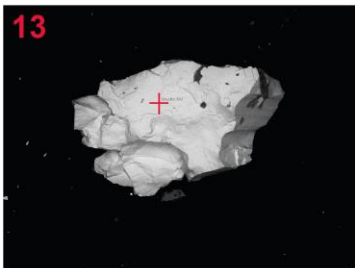
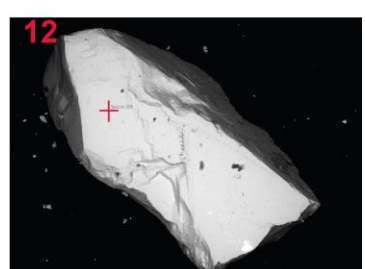
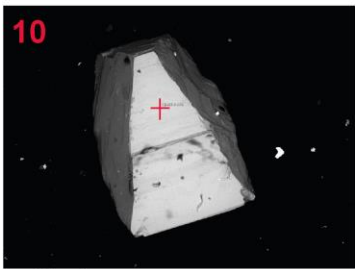
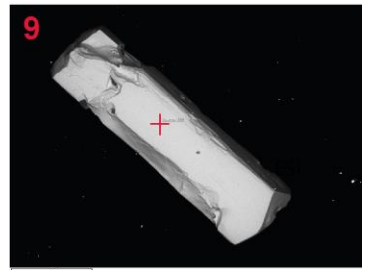
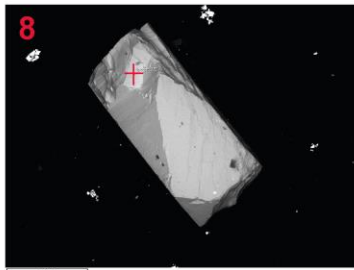
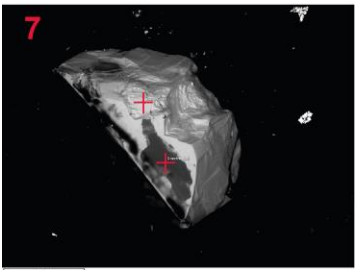
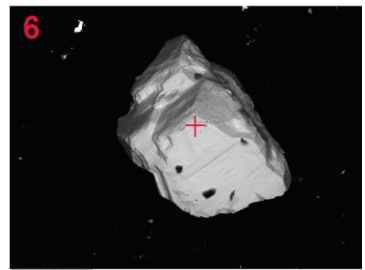
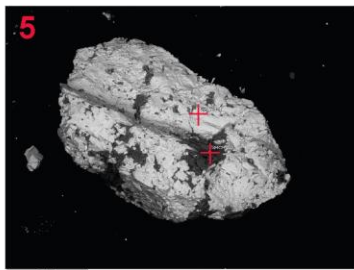
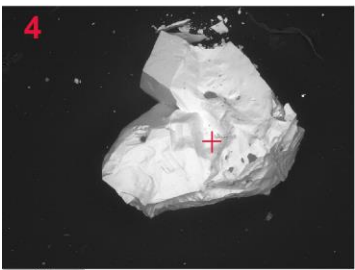
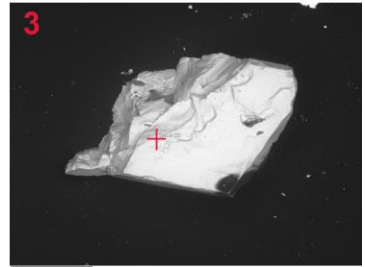
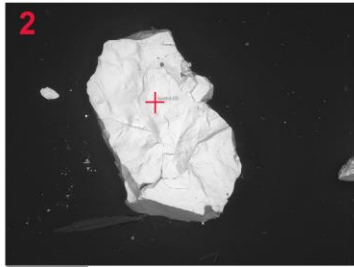
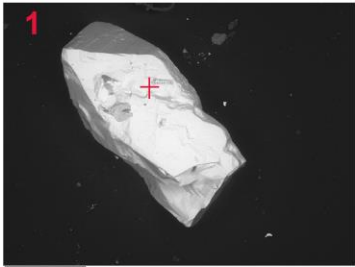
Photographies des grains 1 à 15 de cobaltite avec localisation des spectres mesurés au MEB



Photographies des grains 1 à 15 d'hématite (2) avec localisation des spectres mesurés au MEB



Photographies des grains 1 à 15 d'arsénopyrite avec localisation des spectres mesurés au MEB



**ANNEXE 4 - Notice des caractéristiques du spectromètre Flame Miniature  
d' Ocean Optics.**



**Flame Miniature Spectrometer**  
Technical Specifications



For Products: FLAME-S, FLAME-T  
Document: 225-00000-000-13-201508

A HALMA COMPANY

# Flame Technical Specifications

This document contains the technical specifications for the FLAME-S and FLAME-T. For more information on the Flame spectrometers, including installation, configurations, operation with OceanView, troubleshooting tips, and firmware protocol commands, please see the [Flame User Manual](#). For more information on Ocean Optics products, please visit our website at [www.oceanoptics.com](http://www.oceanoptics.com).

## Specifications Table

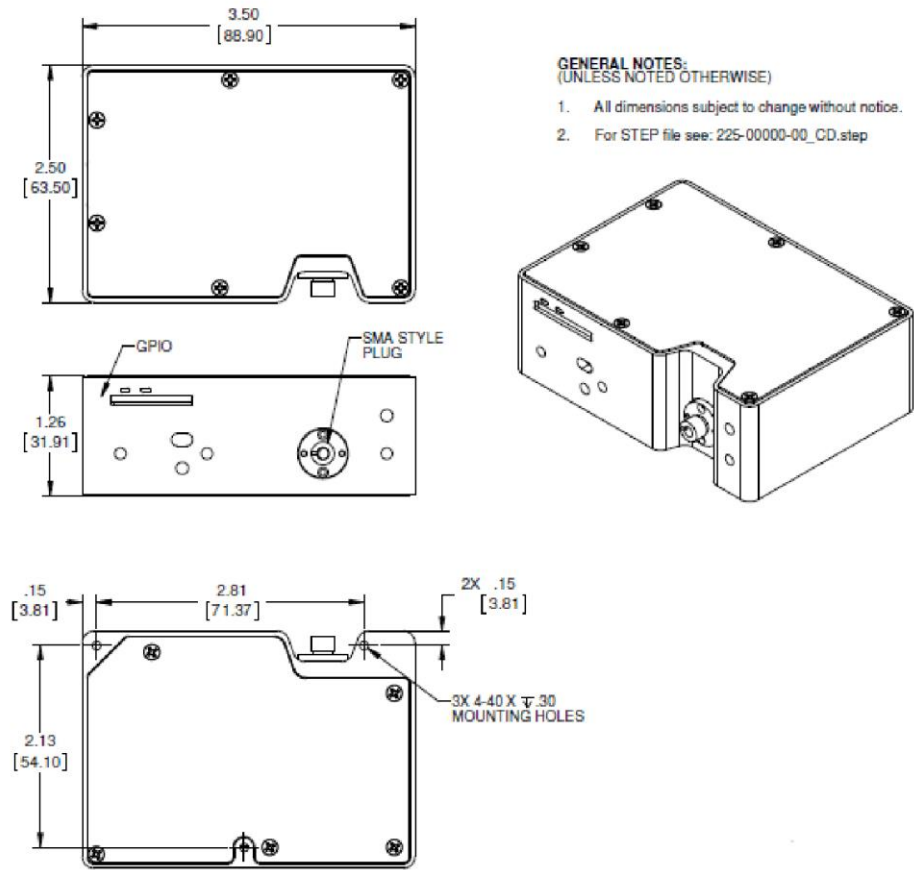
Specification	FLAME-S	FLAME-T
<b>Optical and Spectroscopic</b>		
Integration Time	1 ms – 65 seconds	3.8 ms to 10 seconds
Dynamic Range for single acquisition <sup>1</sup>	1300:1	
Dynamic Range of system <sup>2</sup>	$2 \times 10^8$	$3.4 \times 10^6$
Signal-to-Noise (single acquisition)	250:1	300:1
Resolution (FWHM)	0.1 – 10.0 nm (configuration dependent)	
Stray Light	<0.05% at 600 nm <0.10% at 435 nm	
Scan rate (max) <sup>3</sup>	400 Hz	260 Hz
Spectrometer Channels	One	
Thermal Stability	0.02 nm/°C for 650 nm range, 0.06 pixels/°C	
Triggering	4 modes	
Triggering Jitter	21 nanoseconds	
<b>Detector</b>		
Type	Sony ILX511B CCD	Toshiba TCD1304AP CCD
Detector range	190-1100 nm	
Pixels	2048 pixels	3648 pixels

**Flame Specifications**

Specification	FLAME-S	FLAME-T
Pixel size	14 $\mu\text{m}$ x 200 $\mu\text{m}$	8 $\mu\text{m}$ x 200 $\mu\text{m}$
Electronic shutter	No	Yes
Pixel well depth	~62,500 electrons	~100,000 electrons
Readout noise (single dark spectrum)	50 counts RMS, 300 counts peak-to-peak	
Corrected linearity	>99.8%	
Filters (optional)	2 <sup>nd</sup> and 3 <sup>rd</sup> order rejection, long pass	
<b>Electrical</b>		
Power requirement (spectrometer functions)	250 mA at +5 VDC	
Supply voltage	4.75 – 5.25 V	
Power-up time	~2s	
Connectors	Micro-USB and JAE DD4 (DD4RA40JA1) 40-pin connector	
Micro-USB Absolute Maximum Ratings: V <sub>CC</sub>	+ 5.5 VDC	
DD4 Absolute Maximum Ratings: V <sub>CC</sub> (Pin 40) Voltage on any pin (other than input power)	+ 5.5 VDC +4VDC	
Interface: USB RS-232	USB 2.0, 480 Mbps 2-wire RS-232	
<b>Mechanical</b>		
Spectrometer Design	Asymmetric crossed Czerny-Turner	
Input Fiber Connector	SMA 905 or FC	
Gratings	15 different gratings	
Entrance Slit	5, 10, 25, 50, 100, or 200 $\mu\text{m}$ slits. (Slits are optional. In the absence of a slit, the fiber acts as the entrance slit.)	
Physical Dimensions	88.9 mm x 63.5 mm x 31.9 mm	
Weight	265 g	

Specification	FLAME-S	FLAME-T
<b>Environmental</b>		
Temperature: Storage Operation	-30° to +70° C 0 to 50° C	
Humidity	0% - 90% noncondensing	
<b>Compliance<sup>4</sup></b>		
Electrical	CE, FCC, CISPR 11:2010, EMC 2004/108/EC and EN 61326-1:2013	
Material	RoHS	
Shock	IEC 60068-2-64	
Vibration	IEC 60068-2-31	
Manufacturing	ISO:9001	
<sup>1</sup> Dynamic range for a single acquisition is a measure of the ratio of full signal to noise.		
<sup>2</sup> Dynamic range of the system is the range of the detectable light level and can be thought of as the maximum detectable light level at the minimum integration time divided by the minimum detectable light level at the maximum integration time.		
<sup>3</sup> Scan rate is dependent on the operating computer and not the spectrometer. These figures assume a non real-time operating system.		
<sup>4</sup> Contact <a href="mailto:info@oceanoptics.com">info@oceanoptics.com</a> to obtain copies of certifications		

## Mechanical Diagram



**GENERAL NOTES:**  
(UNLESS NOTED OTHERWISE)

1. All dimensions subject to change without notice.
2. For STEP file see: 225-00000-00\_CD.step

Flame Outer Dimensions

## ANNEXE 5 - Notice des caractéristiques de la caméra multispectrale MV1 de Photon Focus.



### MV1-D2048x1088-96-G2

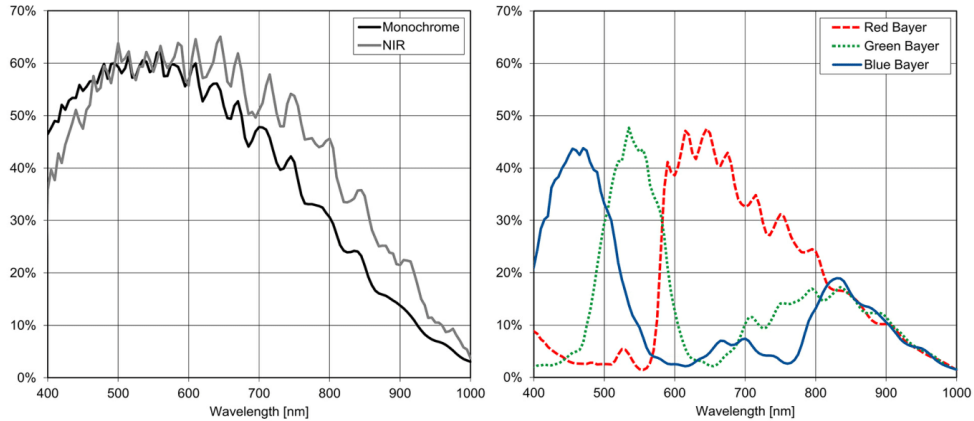
The camera series MV1-D2048x1088(I/C)-G2 is based on the CMOSIS CMV2000 CMOS image sensor

#### Features

- CMOSIS CMV2000 CMOS image sensor
- 2048 x 1088 pixel resolution
- Good NIR spectral response
- Suitable for standard and low light applications
- Up to 42fps @ full resolution
- Global shutter
- Available in monochrome, NIR and color
- Extended sensor and camera features
- Up to 10bit greyscale resolution
- Boardlevel and OEM solution available
- GigEVision interface



### Quantum Efficiency Image Sensor



### Image Sensor Specifications

Manufacturer / Type	CMOSIS / CMV2000	
Technology	CMOS	
Optical format	2/3"	
Optical diagonal	12.76mm	
Resolution	2048 x 1088	
Pixel size	5.5µm x 5.5µm	
Active optical area	11.26mm x 5.98mm	
Dark current	125e <sup>-</sup> /s	
Read out noise	13e <sup>-</sup>	
Full well capacity / SNR	11ke <sup>-</sup> / 105: 1	
Spectral range	Monochrome:	< 350 to 950nm (to 10% of peak responsivity)
	NIR:	< 350 to 1000nm (to 10% of peak responsivity)
	Color:	< 380 to 670nm (to 10% of peak responsivity)
Responsivity	Monochrome:	1100 x 10 <sup>3</sup> DN / (J/m <sup>2</sup> ) @ 520nm / 8bit
	NIR:	900 x 10 <sup>3</sup> DN / (J/m <sup>2</sup> ) @ 850nm / 8bit
	Color:	857 x 10 <sup>3</sup> DN / (J/m <sup>2</sup> ) @ 540nm / 8bit
Quantum Efficiency	Monochrome:	> 60%
	NIR:	> 60%
	Color:	> 45%
Optical fill factor	42% without micro lenses	
Dynamic range	60dB	
Characteristic curve	Linear, Piecewise linear	
Shutter mode	Global shutter	

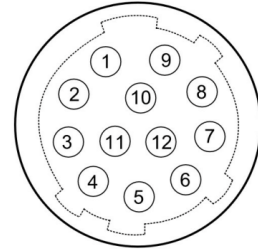
## Camera Specifications

Interface	GigE
Frame rate	42fps
Pixel clock	48MHz
Camera taps	2
Greyscale resolution	8Bit / 10Bit
Fixed pattern noise (FPN)	< 1DN RMS @ 8Bit
Exposure time range	13µs - 349ms
Analog gain	yes
Digital gain	0.1 to 15.99 (FineGain)
Trigger Modes	Free running (non triggered), external Trigger, SWTrigger
Features	Configurable region of interest (ROI), Up to 8 regions of interest (MROI), Decimation in y-direction, 2 look-up tables (12-to-8Bit) on user-defined image region (Region-LUT), Constant frame rate independent of exposure time, Crosshairs overlay on the image, Temperature monitoring of camera, Camera informations readable over SDK, Ultra low trigger delay and low trigger jitter, Extended trigger input and strobe output functionality, Status line in picture
Operation temperature / moisture	0°C ... + 50°C / 20% ... 80%
Storage temperature / moisture	-25°C ... 60°C / 20% ... 95%
Power supply	+12VDC (-10%) ... +24VDC (+10%)
Power consumption	< 5.1W
Lens mount	C-Mount (CS-Mount optional)
I/O Inputs	2x Opto-isolated 2x RS-422 Opto-isolated
I/O Outputs	2x Opto-isolated
Dimensions	55 x 55 x 52mm <sup>3</sup>
Mass	265g
Connector I/O (Power)	Hirose 12-pole (mating plug HR10A-10P-12S)
Connector Interface	RJ-45
Conformity	CE / RoHS / WEEE
IP Code	IP40

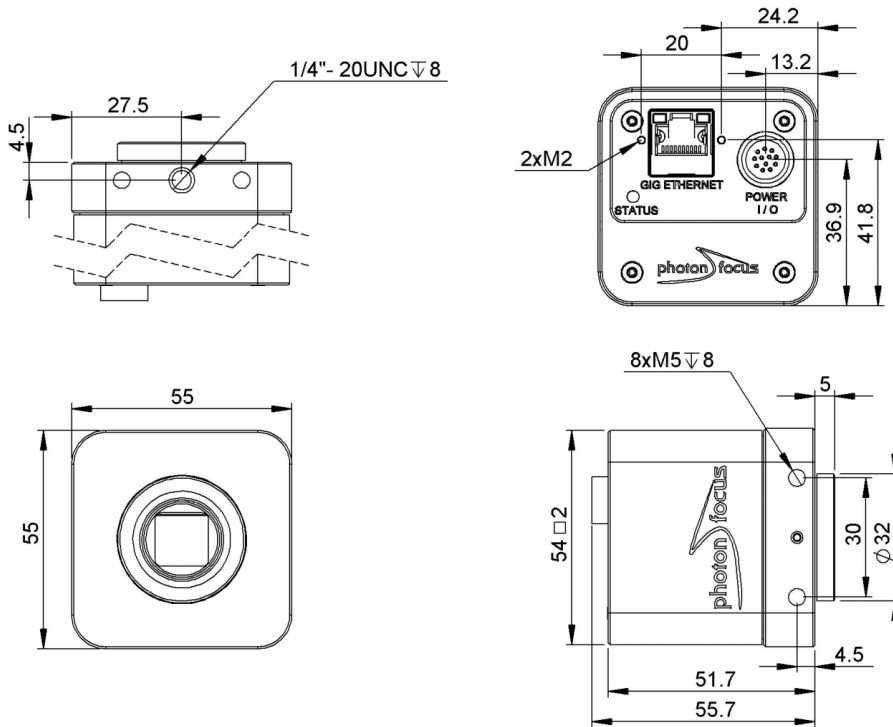
# MV1-D2048x1088-96-G2

## Connectors

Pin	I/O Type	Name	Description
1	PWR	CAMERA_GND	Camera GND 0V
2	PWR	CAMERA_PWR	Camera Power 12V... 24V
3	O	ISO_OUT0	Default Strobe out, internally Pulled up to ISO_PWR with 4k7 Resistor
4	I	ISO_INC0_N	INC0 differential input (G2: RS-422, H2: HTL), negative polarity
5	I	ISO_INC0_P	INC0 differential input (G2: RS-422, H2: HTL), positive polarity
6	PWR	ISO_PWR	Power supply 5V... 24V for output signals
7	I	ISO_IN0	IN0 input signal
8	O	ISO_OUT1 (MISC)	Q1 output from PLC, no Pull up to ISO_PWR; can be used as additional output (by adding Pull up) or as controllable switch (max. 100mA, no capacitive or inductive load)
9	I	ISO_IN1(Trigger IN)	Default Trigger IN
10	I	ISO_INC1_N	INC1 differential input (G2: RS-422, H2: HTL), negative polarity
11	I	ISO_INC1_P	INC1 differential input (G2: RS-422, H2: HTL), positive polarity
12	PWR	ISO_GND	I/O GND 0V



## Dimensions



**ANNEXE 6 - Image animée (GIF) présentant les 11 images tirées de l'image mosaïque acquise par la caméra (voir CD).**

**ANNEXE 7 - Macro utilisée sous ImageJ pour la correction des valeurs des pixels en considérant leur 25 plus proches voisins (voir CD).**

**ANNEXE 8 - Image animée (GIF) présentant les 11 images tirées de l'image mosaïque corrigée par le traitement avec la macro sous ImageJ (voir CD).**

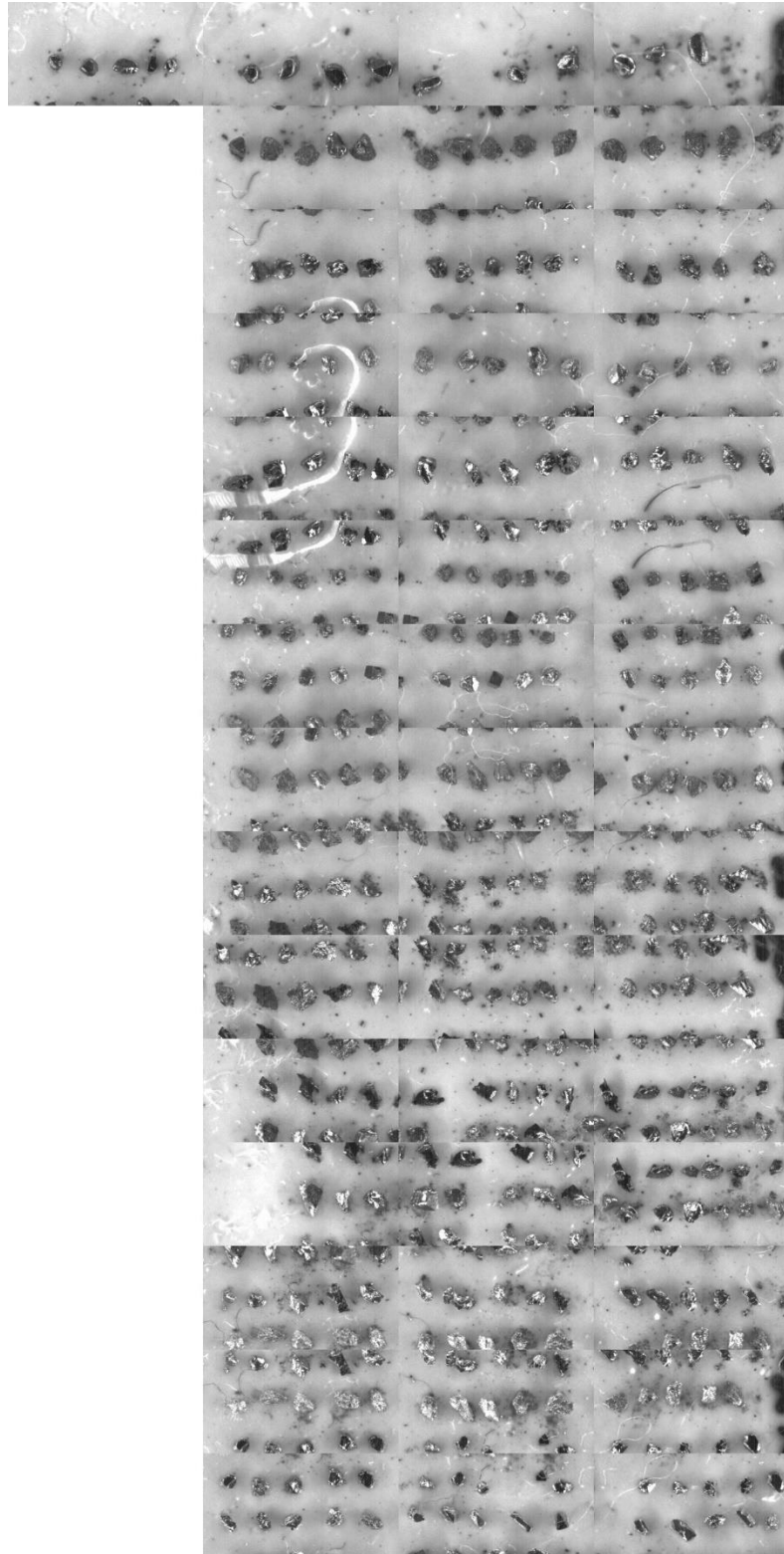
## **ANNEXE 9 - Essai des techniques de télédétection**

La télédétection appliquée aux sciences de la Terre a permis le développement de nombreux outils pour l'analyse d'images hyperspectrales satellitaires. ENVI (ENvironment for Visualizing Images) est un logiciel de traitement d'images performant et puissant couramment employé pour l'analyse de ce type d'images. Il facilite notamment la reconnaissance de zones d'intérêt sur des images satellitaires par classification des spectres de réflectance aux caractéristiques similaires, ou encore par comparaison avec les spectres de la librairie spectrale AVIRIS. Il est donc possible d'appliquer ces différentes techniques de traitement d'image aux images acquises avec la caméra multispectrale sur les minéraux en grains. Pour cela, les images corrigées avec la macro sont utilisées. Le traitement des images de la caméra avec un logiciel entraîné tel qu'ENVI, va permettre de vérifier que les images acquises avec la caméra, même corrigées, ne permettent pas l'identification des minéraux.

Afin d'étudier les images de grains de la caméra avec ENVI, il a fallu reconstituer une seule image multispectrale à 11 bandes géoréférencée à partir de toutes les images multispectrales acquises selon les étapes suivantes :

- 1) Tous les grains de la planche de grains irréguliers (Fig. 2-2) sont capturés sous forme d'images multispectrales, puis corrigés à l'aide de la macro (paragraphe 3.2.1). Il est à noter que chacune des images multispectrales ne contient que 3 à 5 grains maximum. Le grossissement a dû être ajusté afin que la résolution de l'image soit suffisante pour étudier la réflectance des grains.

- 2) Pour chacune des images traitées avec la matrice de correction, les 11 images (correspondant aux 11 bandes) ont été extraites des images mosaïques sous ImageJ comme l'indique la figure 2-17.
- 3) Puisque seulement quelques grains sont capturés sur chaque image, un assemblage de photographies a dû être effectué bandes par bandes afin de reconstituer la planche de minéraux en grains (Fig. 2-2). L'assemblage de photographies consiste à combiner plusieurs images qui se recouvrent, pour produire une seule grande image. Cette étape a permis d'obtenir 11 grandes images reconstituées de la planche initiale. À titre d'exemple, la figure 0-1 illustre la grande image de la bande 7 créée par assemblage d'images de la bande 7.
- 4) Puis, afin d'ouvrir ces 11 planches d'images sous ENVI sous forme de raster, chacune d'entre-elles doit être géoréférencée. Un géoréférencement fictif a donc été réalisé avec l'aide du logiciel QGIS.
- 5) Une fois les images ouvertes dans l'interface d'ENVI, elles sont restructurées en une seule image multispectrale grâce à la fonction *layer stacking*.
- 6) Enfin, un masque est appliqué afin de supprimer le fond et de faciliter le traitement de l'image (Fig. 0-2).



**Figure 0-1 :** Planche reconstituée de la bande 7 pour tous les grains irréguliers.

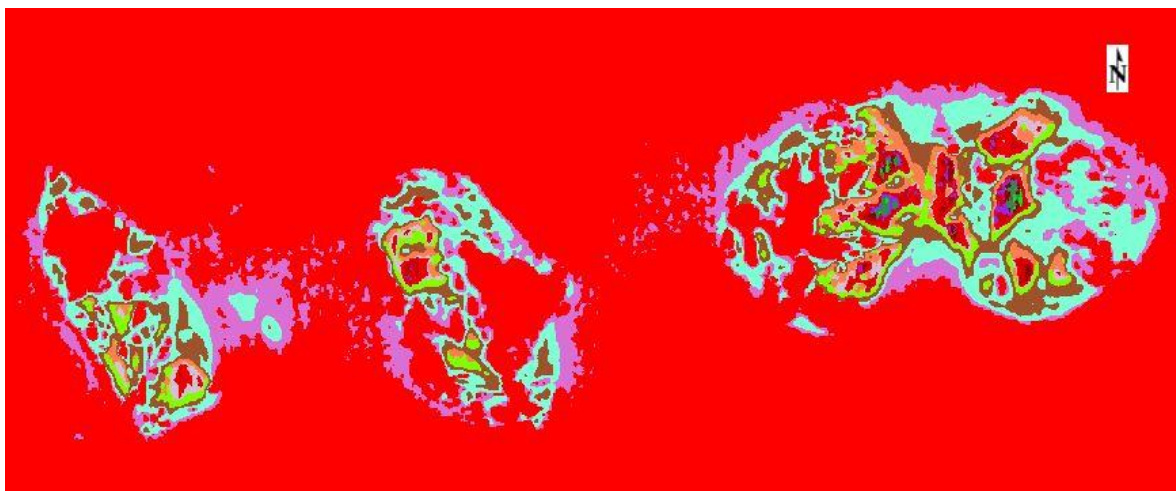


**Figure 0-2** : Masque appliqué sur la planche reconstituée de la bande 7 pour tous les grains irréguliers.

Suite à l'application du masque, plusieurs types de classifications peuvent être testés. Les classifications consistent à faire tester par l'ordinateur un ensemble de méthodes ayant pour objectif de définir ou de trouver une typologie existante caractérisant un ensemble de pixels à partir des caractéristiques de ces derniers. L'utilisateur peut décider en entrée le nombre de classes qu'il désire, le nombre d'itérations effectuées (c'est-à-dire le nombre de phases de calcul) ou encore laisser l'ordinateur décider du nombre de classes. Il existe deux types de classifications : non-supervisées et supervisées. L'utilisation d'une classification non-supervisée suggère que l'opérateur n'a aucune connaissance du résultat attendu, puisque l'ordinateur opère sans aucune indications. Alors qu'à l'inverse, dans le cadre d'une classification supervisée, l'utilisateur va indiquer au logiciel un spectre type à retrouver, au moyen de la bibliothèque spectrale ou par une région d'intérêt (RoI) désignée par l'opérateur.

La classification de type ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*) avec 3 itérations a été effectuée sur l'image représentant la planche des grains irréguliers. La classification ISODATA correspond à une classification non-supervisée qui analyse les nuages de points formés par les pixels de l'image à chaque itération. Dans cette étude, un nombre de 20 classes minimum a été commandé en entrée, en considérant les différentes minéralogies, ainsi que le fond. La figure 0-3 présente le résultat de la classification pour quelques grains seulement, mais illustre bien à ce à quoi ressemble le reste de l'image. L'ordinateur nous informe que 21 classes ont été créées. Cependant, on observe que ces 21 classes se répartissent sur l'ensemble des grains, et les zones qui apparaissent se constituent seulement de quelques pixels (Fig. 0-3). Aussi, certaines parties du grain

ressortent comme le fond. Les résultats de cette classification non-supervisée ne sont donc pas concluants.



**Figure 0-3:** Résultat de la classification ISODATA sous ENVI, zoom sur les grains de rutile n°6, 7 et 8.

Une classification supervisée par ROI a aussi été testée. Il n'était pas envisageable d'utiliser les spectres présents dans la librairie spectrale puisque comme cela a été démontré dans cette étude, ils ne correspondent pas aux spectres acquis sur les minéraux considérés. Cependant, ce type de classification a rapidement été mis en échec, puisque la ROI sélectionnée, par exemple un grain de chromite, présentait de trop grandes variations de spectres. Il était donc impossible pour le logiciel de réaliser une classification viable.

L'utilisation de logiciels de télédétection tels qu'ENVI peut être dérivée et appliquée pour le traitement d'images non satellitaires. ENVI apparaît comme un outil fiable car il dispose de toutes les techniques couramment employées pour l'analyse de ce type d'image. Nous n'avons abordé ici que les classifications standards, afin de confirmer que les images

multispectrales de la caméra ne sont pas viables pour une reconnaissance optique des minéraux.