



Second projet de renforcement institutionnel du secteur minier de la République Islamique de Mauritanie (PRISM-II), Phase V

Livrable 61 et 64

Télédétection spectrale, en complément du projet d'évaluation des ressources minérales PRISM-II, République Islamique de Mauritanie

Par Barnaby W. Rockwell, Daniel H. Knepper, Jr., et John D. Horton

Préparé pour le compte du gouvernement mauritanien par l'U.S. Geological Survey

2012

Ce rapport est un rapport administrative, dont la conformité avec les normes éditoriales de l'U.S. Geological Survey ou le code stratigraphique nord-américain n'a pas été examiné. Tout nom commercial, d'entreprise ou de produit est utilisé à des fins descriptives et n'implique pas l'approbation du gouvernement des Etats-Unis.

U.S. Department of the Interior
U.S. Geological Survey

Table des matières

Table des matières.....	3
Figures.....	4
1 Introduction.....	7
2 Images dérivées d'ASTER pour le projet PRISM II.....	7
2.1 Résumé.....	7
2.2 Métadonnées des vues ASTER.....	10
2.3 Ensembles des données VISNIR ASTER à trois bandes.....	11
2.4 Ensemble de données à six bandes dans un format à rayonnement renforcé sur les bords.....	13
2.5 Images composites en couleur 468/RVB à bande renforcée.....	15
2.6 Rapports de bandes.....	17
2.7 Image composite renforcée à rapports de bandes 1 - Fer ferrique, Al-OH, carbonate-chlorite-épidote-amphibole/RVB.....	19
2.8 Image composite renforcée à rapports de bandes 2 - alunite-kaolinite, Al-OH, carbonate-chlorite-épidote-amphibole/RVB.....	22
2.9 Zones d'étude.....	25
2.9.1 Région d'Inchiri-Adrar-Amsaga.....	25
2.9.2 Région de Chami-Tasiast.....	40
2.9.3 Région de Kedia D'Idjil.....	45
2.9.4 Mauritanides du Sud.....	48
2.9.5 Région de Gleibat Tenebdar-Tourassin.....	57
3 Images dérivées de Landsat pour le projet PRISM II.....	58
3.1 Résumé.....	58
3.2 Caractéristiques des données Landsat TM.....	59
3.3 Images composites en couleurs naturelles.....	61
3.4 Images composites par rapports de couleurs.....	63
3.4.1 Soustraction d'objet sombre.....	63
3.4.2 Rapports de bandes.....	63
3.4.3 Recalage du contraste.....	66
3.4.4 Analyse des images composites par rapports de couleurs.....	66
3.5 Évaluation de l'utilisation de l'image.....	69
4 Conclusions.....	72
5 Références.....	73
6 Annexe A : Validation d'images produites par ASTER pour l'identification de groupes minéraux, à travers l'utilisation d'exemples de cartographie minérale spectroscopique en provenance de Cuprite, Nevada, États-Unis. ...	75
7 Annexe B : Exemple d'images produites par l'analyse des données ASTER.....	87
8 Annexe C : Cartes des images composites en couleur 468/RVB ASTER.....	91
9 Annexe D : Cartes des images de MNT ASTER.....	91
10 Annexe E : Cartes des images composites en couleurs naturelles de Landsat.....	91
11 Annexe F : Cartes des images composites par rapports de couleurs de Landsat.....	91

Figures

Figure 1.	Carte de synthèse présentant la couverture des vues ASTER analysées dans le cadre de PRISM-II.	9
Figure 2.	L'image composite ASTER 321/RVB, montrant la végétation verte (rouge) et des surfaces avec du fer ferrique (jaune foncé), ainsi peut-être qu'une végétation sèche clairsemée.	12
Figure 3.	Image composite ASTER 321/RVB, montrant des dépôts sableux éoliens contenant du fer ferrique.....	13
Figure 4.	Image produite à partir de données ASTER à six bandes, à bords renforcés (aj12-18-06_7972_colorcomp_utm.img).	14
Figure 5.	Guide d'interprétation des couleurs correspondant aux images composites renforcées 468/RVB.	15
Figure 6.	Carte produite à partir d'une image composite couleur renforcée 468/RVB (aj12-1806_7972_minvue468_utm.img) de la région d'Akjoujt.	16
Figure 7.	Réponse spectrale des minéraux constitutifs des roches et de l'altération aux résolutions spectrales ASTER.	18
Figure 8.	Guide d'interprétation des couleurs concernant les images composites renforcées de rapports de couleurs 134/RVB (image composite renforcée de rapport de bande 1).....	20
Figure 9.	Carte produite à partir d'image composite à rapport de couleur renforcé (rapports 134/RVB) de la région d'Akjoujt (aj12-18-06_7972_rad_targrat2-fe_crispb2_lowp_utm_sat1.7.img).	21
Figure 10.	Guide d'interprétation des couleurs concernant les images composites renforcées en rapports de couleurs 234/RVB (image composite de rapport de bande 2).....	22
Figure 11.	Carte image produite à partir d'image composite renforcée à rapports de couleurs (rapports 234/RVB) de la région d'Akjoujt (arj12-18-06_7972_rad_targrat2_sharpb2_utm_sat1.7.img).	23
Figure 12.	Carte image produite à partir d'image composite à rapports de couleurs (rapports 234/RVB) de la région d'Akjoujt (aj12-18-06_7972_targrat2_rad_pc.img).	24
Figure 13.	Détail de la Figure 6, en survol de la hauteur de Legleitit el Khader.....	27
Figure 14.	Détail de la Figure 11, en survol de la hauteur de Legleitit el Khader.	28
Figure 15.	Carte des groupes minéraux, provenant de l'analyse automatique basée sur les rapports des données de Landsat pour l'évaluation des ressources minérales du projet PRISM-II, montrant la hauteur de Legleitit el Khader. ...	29
Figure 16.	Spectre de laboratoire des échantillons de terrain de la hauteur de Legleitit el Khader.....	30
Figure 17.	Photographie de terrain de l'altération sodique hébergée par les métasédiments à proximité d'une zone de forte altération de quartz-séricite, au niveau de la hauteur de Legleitit el Khader.	31
Figure 18.	Spectre de laboratoire de la surface du reg, prélevé à environ 5 km au Nord-Ouest de Legleitit el Khader.	32
Figure 19.	Image composite ASTER 468/RVB de la hauteur de Tabrinkout (Fig. 6), avec localisation des sites de prélèvement d'échantillon, des contacts lithologiques de PRISM-I (lignes jaunes), des points de présence minérale (indices), et des parcours GPS des véhicules provenant de la campagne de terrain de 2007 (lignes rouges).....	34
Figure 20.	Carte des groupes minéraux produite par l'analyse automatisée, fondée sur l'analyse des rapports des données Landsat montrant la hauteur de Tabrinkout (Fig. 6).	35
Figure 21.	Spectre de laboratoire des métasédiments kaolinisés de la Formation d'Atomai.	36
Figure 22.	Photographie de la hauteur de Tabrinkout, en direction du Sud-Ouest.....	37
Figure 23.	Spectres de réflectance SWIR dont le continuum a été retiré des échantillons, provenant du dépôt de Guelb Moghreïn, près d'Akjoujt.....	38
Figure 24.	Spectres de réflectance des échantillons provenant du dépôt de Guelb Moghreïn, près d'Akjoujt.	39

Figure 25.	Zone de cisaillement contenant de l'or, au niveau du puits de Nord Piment, gisement d'or orogénique de Tasiast.	40
Figure 26.	Spectre de réflectance des échantillons provenant du gisement de Tasiast.	41
Figure 27.	Image composite 468/RVB ASTER de la région entourant le gisement aurifère de Tasiast, produite à partir des données ASTER de 2000, acquises avant le développement de la mine.	42
Figure 28.	Image composite 468/RVB de la zone entourant le gisement aurifère de Tasiast, produite à partir des données ASTER de 2006, montrant le développement naissant de la mine.....	43
Figure 29.	Spectres de réflectance de la latérite et (ou) de la ferricrète, enregistrés à l'Ouest de la mine de Tasiast (échantillon MT07-30). La longueur d'onde en nanomètres (micromètre x 1 000) est indiquée sur l'axe des x.	45
Figure 30.	Image composite renforcée 468/RVB ASTER de la région de Kedia D'Idjil.	46
Figure 31.	Image composite 468/RVB ASTER de la région de Kedia D'Idjil, présentant en surimposition par transparence l'information géologique issue de PRISM-I.....	47
Figure 32.	Image composite renforcée 468/RVB ASTER de la zone entourant la présence de cuivre de Guelb El Kelb, dans les Mauritanides du Sud.	49
Figure 33.	Image composite renforcée de rapports 234/RVB ASTER de la zone entourant la présence de cuivre de Guelb El Kelb, dans les Mauritanides du Sud.	50
Figure 34.	Carte des groupes minéraux issue de l'analyse automatisée basée sur l'analyse des rapports des données Landsat, montrant la zone entourant la présence de cuivre de Guelb El Kelb, dans les Mauritanides du Sud. ...	51
Figure 35.	Spectres de réflectance de la quartzite de la Formation de Gàoua, à proximité de la présence de cuivre de Guelb El Kelb.	52
Figure 36.	Image composite renforcée 468/RVB ASTER de la zone entourant la localisation MT07-26, à l'Ouest des présences de cuivre de Kadiar, dans les Mauritanides du Sud.	53
Figure 37.	Image composite renforcée de rapports 134/RVB ASTER de la zone entourant la localisation MT07-26, à l'Ouest des présences de cuivre de Kadiar, dans les Mauritanides du Sud.	54
Figure 38.	Image composite renforcée 468/RVB de la zone entourant la localisation de l'échantillon MT07-26, avec surimposition en transparence de la carte géologique de PRISM-I.....	55
Figure 39.	Photographie de terrain de la serpentinite altérée (sous le marteau) à l'emplacement de l'échantillon MT07-26, avec des blocs de ferricrète riches en hématite, érodés sur place à partir d'anciennes roches de couverture. ...	56
Figure 40.	Spectre de réflectance des échantillons de la localisation MT07-26.	57
Figure 41.	Carte de synthèse de la Mauritanie, présentant les localisations du centre des vues du système de cartographie thématique de Landsat.	60
Figure 42.	Exemple de carte composite en couleurs naturelles du système de cartographie thématique de Landsat, produite à partir des bandes de 3, 2 et 1, respectivement de couleur rouge, verte et bleue, de la vue de la orbite 203 et de la rangée 43.	62
Figure 43.	Exemple de carte composite en rapports de couleurs du système de cartographie thématique de Landsat, produite à partir des rapports de bandes 5/7, 3/1 et 5/4, respectivement de couleur rouge, verte et bleue, de la vue de la orbite 203 et de la rangée 43.	65
Figure 44.	Les spectres de laboratoire types pour la végétation (herbe) et l'argile (kaolinite) montrent des différences spectrales qui permettent au rapport de bande 5/4 TM de distinguer ces matériaux, ayant tous les deux des rapports 5/7 TM élevés sur des images de composites en rapports de couleurs.	67

Figure 45. Interprétation des couleurs des images composites de rapports de couleurs formées par le processus d'addition de couleurs.....	68
Figure 46. Image composite en rapports de couleurs Landsat de la zone entourant la mine de Tasiast. La localisation des prélèvements d'échantillons sur le terrain est indiquée par des cercles jaunes.	70
Figure 47. Image composite en rapports de couleurs Landsat du district d'Inchiri, dans les environs de la ville d'Akjoujt.	71
Figure A1. Image composite en couleur de la région de Cuprite, Nevada, produite à partir de données AVIRIS à haute altitude de 1998, après convolution à la résolution spectrale du système de Cartographie Thématique de Landsat.	76
Figure A2. ... Cartes des minéraux de fer produites à partir des données AVIRIS de 1998, à Cuprite, Nevada,	78
Figure A3. Cartes des minéraux argileux, des sulfates, des carbonates, des sorosilicates, et du quartz hydraté, à Cuprite, Nevada, produites à partir des données AVIRIS de 1998	79
Figure A4. Carte des minéraux argileux, des sulfates, des carbonates, des sorosilicates, et du quartz hydraté, à Cuprite, Nevada, produite à partir des données ASTER de 2001.....	80
Figure A5. Image composite renforcée en couleur 468/RVB de la région de Cuprite, produite à partir des données ASTER acquises en 2001.....	81
Figure A6. Image composite renforcée en rapports de couleurs 134/RVB de la région de Cuprite, produite à partir des données ASTER acquises en 2001.	82
Figure A7. Image composite non renforcée en rapports de couleurs 134/RVB de la région de Cuprite, produite à partir des données ASTER acquises en 2001.	83
Figure A8. Image composite renforcée en rapports de couleurs 234/RVB de la région de Cuprite, produite à partir des données ASTER acquises en 2001.	84
Figure A9. Image composite en rapports de couleurs 234/RVB non renforcée de la région de Cuprite, produite à partir de données ASTER acquises en 2001.	85
Figure B1. Carte de groupe de minéraux du district d'Inchiri, aux environs la ville d'Akjoujt (Fig. 6).	88
Figure B2. Carte des groupes minéraux de la zone entourant la localisation MT07-26, à l'Ouest des présences de cuivre de Kadiar, dans les Mauritanides du Sud.....	89

1 Introduction

Les données satellitaires multispectrales recueillies par Landsat 5 Thematic Mapper (TM), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), et les capteurs de l'Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) ont été traitées et interprétées en complément du projet PRISM-II (Second Projet de Renforcement Institutionnel du Secteur Minier de la République Islamique de Mauritanie). Le présent rapport, ainsi que les cartes qui l'accompagnent, constituent les livrables 60 à 64 du projet. L'ensemble des données numériques destinées à être utilisées au sein du Système d'Information Géographique (SIG), ainsi que le logiciel de traitement des images, seront inclus dans le livrable SIG 92. Les cartes sous forme d'image, en format PDF, produites à partir de Landsat et d'ASTER, et ayant fait l'objet d'un traitement, sont citées dans les annexes.

Des échantillons de roches, d'alluvion, de colluvion, et/ou des sédiments éoliens ont été recueillis au niveau de 41 sites au cours de la campagne de terrain 2007. Un shapefile par point (« IRM07_sample_gps_points.shp ») contenant ces sites sera inclus dans le livrable SIG 92. La plupart des échantillons ont été caractérisés au laboratoire par l'utilisation d'un spectromètre FieldSpec II à large spectre ASD™ (dispositifs d'analyse spectrale).

Les images produites à partir des données Landsat TM et ASTER permettent la délimitation de groupes minéraux à travers de larges zones, en se basant sur la réponse couleur. Des guides sont fournis pour permettre aux utilisateurs d'interpréter ces couleurs par rapport à la présence de groupes minéraux, d'unités lithologiques, et de gisements connus. Ces informations peuvent être extrapolées à d'autres zones géologiques favorables aux différents types de gisements, à la recherche de réponses minéralogiques similaires, pouvant révéler des gisements jusqu'alors masqués.

2 Images dérivées d'ASTER pour le projet PRISM II

2.1 Résumé

Cinq (5) zones de la République Islamique de Mauritanie (RIM) ayant un fort potentiel de présence de gisements de minerais métalliques ont été conjointement sélectionnées par les représentants du projet PRISM II, le Ministère des Mines et de la Géologie mauritanien (MMG), et l'USGS, pour être étudiées par l'utilisation des données enregistrées par le capteur ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), porté par le satellite Terra du Système d'Observation de la Terre (EOS) (ERSDAC, 2005 ; Site Internet NASA, Jet Propulsion Laboratory, ASTER, 2007). Cent quatre-vingt-dix (190) vues couvrant les zones étudiées, et ayant une couverture nuageuse minimale, ont été enregistrées. Parmi celles-ci, trente et une (31) vues ont été sélectionnées pour un traitement, en se basant sur trois facteurs : 1) une poussière atmosphérique ou une brume minimales sur la vue, 2) les vues ont été enregistrées à la fin du printemps, durant l'été, ou au début de l'automne, assurant un angle d'élévation du soleil maximum, et 3) la vue couvre un nombre significatif de points d'indice de paramètres (indices) mis en valeur par PRISM-I. La Figure 1 est une carte de synthèse de la RIM, repérant la localisation des 31 vues analysées, et le choix des 5 régions étudiées. Une sixième zone d'étude, englobant une partie de la zone de prospection en uranium de Gleibat Tenebdar-Tourassin, au sein du Bouclier de Rgueïbat, à environ 280 km au Nord-Nord-Est de Zouérate a été ajoutée, en complément de la campagne de terrain de 2007.

Des méthodes de traitement d'image ont été choisies afin de produire des images numériques à valeur ajoutée, utiles pour l'identification visuelle de certains groupes minéraux, et pour la différenciation des unités lithologiques et des caractéristiques de surface liées à la géomorphologie, à l'occupation du sol, et à sa couverture. Ces images ont été intégrées aux autres données de PRISM au cours de la phase d'évaluation des ressources minérales du projet et, le cas échéant, les résultats ont été intégrés dans les rapports décrivant les zones favorables pour différents types de gisements miniers.

Afin de valider les stratégies d'identification des groupes minéraux employées pour les données de PRISM-II ASTER de la RIM, des images identiques à celles produites pour le projet PRISM-II ont été produites à partir des données ASTER de la zone de Cuprite, au Nevada (USA), datant de 2001. La minéralogie de surface de Cuprite est bien connue et bien documentée, et a été cartographiée à l'aide de données d'imagerie par spectrométrie à haute résolution, en y incluant les données acquises par le Spectromètre d'Imagerie Visible/Infrarouge Aéroporté (AVIRIS) de la NASA (Rowan et al., 2003 ; Rockwell, 2012). Les cartes minérales de Cuprite, produites à partir des données AVIRIS, sont présentées au niveau de l'Annexe A, en parallèle d'images produites en RIM de manière similaire à partir de données ASTER. Les lecteurs peuvent ainsi comparer les résultats de cartographie minérale de Cuprite produite à partir de données ASTER, en utilisant les stratégies d'analyse de PRISM-II, pour des cartes de la minéralisation produites à partir AVIRIS, afin de faciliter et de vérifier les interprétations des images produites par ASTER pour la RIM. L'insertion des données de Cuprite dans ce rapport, n'implique nullement l'existence de similitudes géologiques entre l'altération épithermale du Miocène et la minéralisation au niveau de Cuprite, et les zones d'études de la RIM, bien que quelques minéraux identifiés à Cuprite existent en RIM.

Les cartes des zones sélectionnées, produites en utilisant une nouvelle méthodologie pour l'identification automatisée de groupes minéraux à partir des données ASTER (Rockwell, 2012) sont présentées dans l'Annexe B, à des fins de comparaison.

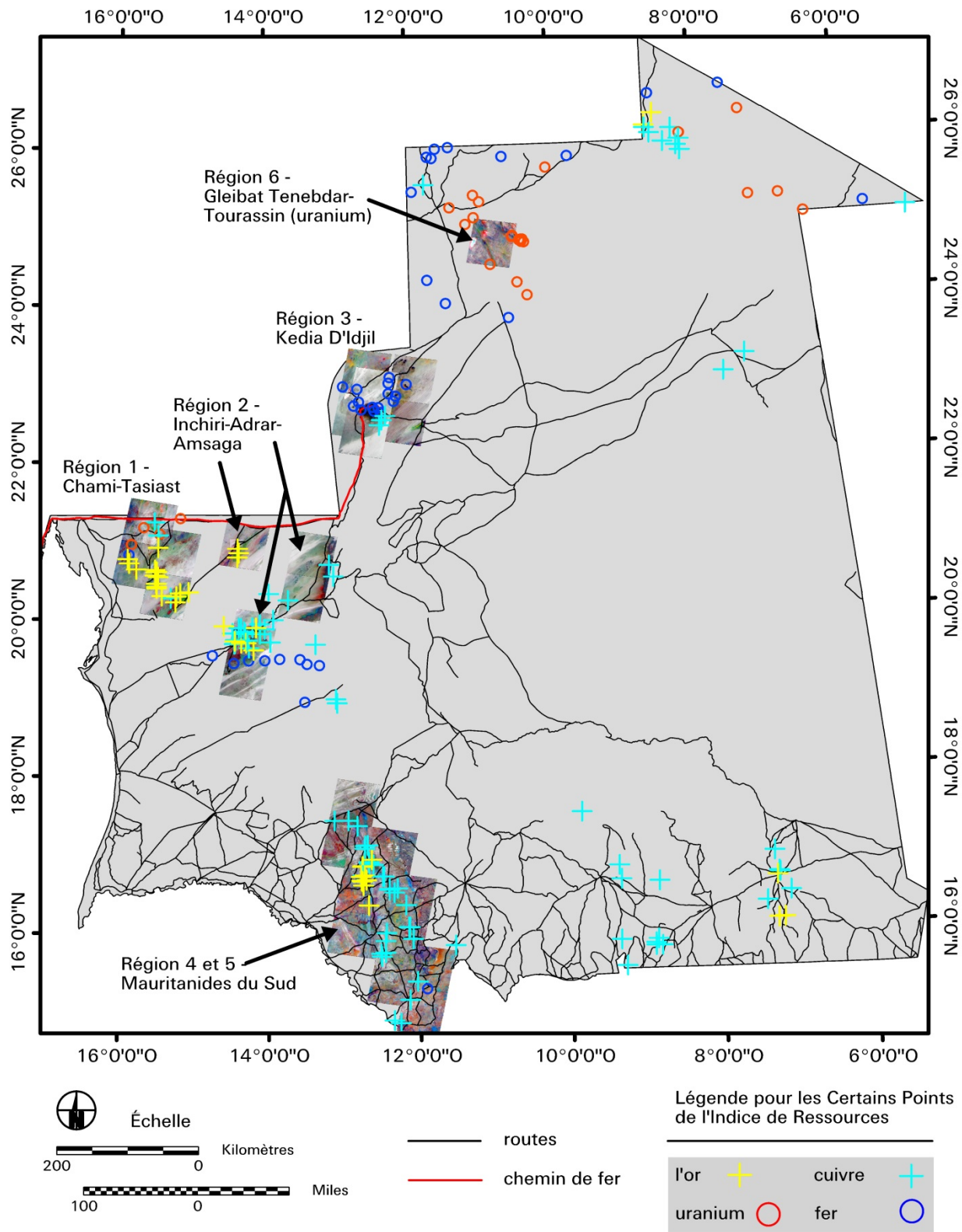


Figure 1. Carte de synthèse présentant la couverture des vues ASTER analysées dans le cadre de PRISM-II. Les points de référence de la ressource (ou matériau) ont été mis en place au cours de la première phase du projet PRISM (PRISM-I).

Les livrables produits à partir d'ASTER, y compris les Modèles Numériques de Terrain (MNT) à vue unique, sont tous des fichiers images au format raster géoréférencés dans le format Imagine (.img) ERDAS, produits par l'utilisation du logiciel Imagine, version 9.1. Les MNT sont aussi fournis au format GeoTIFF dans le SIG du livrable 92, et sous forme de carte au format PDF dans l'Annexe D. L'ensemble des fichiers images d'Imagine possèdent des recalages de contraste intégrés, qui sont appliqués dynamiquement lorsque les images sont affichées avec le logiciel. Lorsque les images sont affichées au sein d'ArcMap, elles sont recalées dynamiquement en utilisant des tableaux de contrastes spécifiés par l'utilisateur (recalage par défaut à partir de l'écart-type standard). Toutes les images ont un champ de visualisation instantané du sol (GIFOV, ou taille de pixel au sol) de 15 m x 15 m, ou l'équivalent en unités de degrés géographiques. À l'exception des fichiers correspondant aux domaines du visible et du proche infrarouge (VISNIR, bandes 1 à 3), utilisés pour la sélection des vues, et les fichiers de rapports de bandes (voir ci-dessous), l'ensemble des fichiers non-MNT ont été géoréférencés en lien avec la projection Universelle Transverse de Mercator (UTM), zone 28 Nord, ellipsoïde WGS 84 et référentiel horizontal utilisant seulement les métadonnées des éphémérides du satellite (aucun points de contrôle n'a été utilisé). Les fichiers images MNT se situent soit dans la zone UTM 28, soit dans la zone 29. Les images de rapports 468/RVB ASTER sont aussi fournies dans une projection transverse de Mercator sur mesure, conçue pour être compatible avec ArcView, et avec la normalisation adoptée pour la projection de l'ensemble des livrables du projet PRISM-II de l'USGS. Les fichiers VISNIR et les fichiers de rapports de bandes ont été référencés dans la projection géographique, l'ellipsoïde du Système Géodésique Mondial de 1984 (WGS 84), et le référentiel horizontal, utilisant seulement les métadonnées des éphémérides du satellite. La précision sur la position absolue du géoréférencement, produite à partir des éphémérides, est d'approximativement 60 - 200 m. Les vues avec une géométrie de visée à plus de 6° du nadir peuvent présenter une plus grande erreur de position (rechercher à « PointingAngle » au sein des fichiers de métadonnées). Les fichiers images peuvent être à nouveau projetés selon des projections cartographiques paramétrées par l'utilisateur, en utilisant les installations Imagine de Nouakchott. Les fichiers images ont été organisés en répertoire selon une structure à deux niveaux, suivant la zone étudiée et la date d'acquisition de la vue. Les deux zones étudiées (4 et 5, Fig. 1), comprenant les Mauritanides du Sud, ont été regroupées dans un seul répertoire. Pour la zone de Zouérate/Fderik, plusieurs vues ont été acquises, avec, et sans la correction d'erreur d'intermodulation (Iwasaki et Tonooka, 2005 ; ERSDAC, 2010). Cette erreur, dans les données ASTER infrarouge à ondes courtes (SWIR), est plus répandue dans les zones à une forte variation d'albédo sur de petites distances, telles que les interfaces entre la terre et l'eau, et les contacts entre les unités lithologiques à faible albédo et des alluvions dont l'albédo est élevé. Le massif de Khedia D'Idjil, entre les villes de Fderik et de Zouérate, possède un très faible albédo, et donc l'erreur d'intermodulation est très perceptible au sein de cette zone. Pour l'acquisition à différentes dates dans la région de Fderik, les images dérivées des données corrigées de l'intermodulation (produits ASTER de niveau 2 AST_09XT) sont classées au sein des répertoires intitulés « XTC ». L'ensemble des documents numériques ASTER produits dans le cadre de PRISM-II, y compris les 31 Modèles Numériques de Terrain (MNT), ont été remis auprès du siège du Ministère des Mines et Géologie (MMG) à Nouakchott, en octobre 2007.

2.2 Métadonnées des vues ASTER

Sauf pour ce qui concerne les vues corrigées de l'intermodulation mentionnées ci-dessus, toutes les images ont été produites à partir des données ASTER de niveau 1B (L1B, rayonnement enregistré au niveau du capteur). Les métadonnées ASTER de l'ensemble des vues traitées sont contenues dans des fichiers ASCII, avec une extension .met, au sein des répertoires correspondants. Les images produites contiennent généralement un numéro d'identification de la vue intégré au nom du fichier (par exemple « 26568 » au sein

du nom du fichier « fk00_26568_colorcomp_utm.img »). Ce numéro d'identification est également intégré au nom de fichier des métadonnées

(par exemple : « AST_L1B_00306242000115136_20070417125527_26568.hdf.met »).

2.3 Ensembles des données VISNIR ASTER à trois bandes

Un répertoire intitulé « ASTER VISNIR Bands 1-3 » a été créé pour chaque zone d'étude. Ces répertoires contiennent des fichiers ERDAS Imagine (.img) des bandes ASTER 1 (0,556 micromètre, vert visible), 2 (0,661 micromètre, rouge visible) et 3 (0,807 micromètre, proche infrarouge), ainsi que les fichiers à couches en pyramide à résolution réduite (.rrd) permettant un affichage rapide dans Imagine et ArcGIS. Le Tableau 1 présente les caractéristiques spatiales et spectrales des neuf bandes VISNIR et ASTER SWIR, traitées dans le cadre de l'étude PRISM-II. Les données de ces fichiers sont au format brut DN. Ces fichiers ont été utilisés pour identifier les vues les mieux adaptées au traitement spectral. Les données ASTER de ces fichiers peuvent servir à évaluer rapidement la couverture végétale et ses variations saisonnières, la couverture de sable, l'eau de surface, les infrastructures, et les structures géologiques.

Tableau 1. Performances spectrales mesurées des bandes ASTER VISNIR et SWIR. Données tirées du guide de l'utilisateur d'ASTER (ERSDAC, 2005).

Bande ASTER	longueur d'onde au centre (µm)	largeur de bande (µm)	GIFOV (taille de pixel au sol)
1	0,556	0,09	15 m
2	0,661	0,06	15 m
3 (N)	0,807	0,10	15 m
4	1,656	0,092	30 m
5	2,167	0,035	30 m
6	2,208	0,040	30 m
7	2,266	0,047	30 m
8	2,336	0,070	30 m
9	2,400	0,068	30 m

Ces images doivent être affichées à l'aide de la combinaison de couleurs 321/RVB pour faire apparaître les éléments couleur infrarouges en « fausses couleurs », et sur lesquelles la végétation verte est affichée en tonalités de rouge et le fer ferrique dans des tons allant du brun au jaune ou du vert-jaune pâle (Fig. 2). On notera que les dépôts de sable éoliens, y compris les dunes, contiennent souvent de fer ferrique (Fig. 3). Les Figures 2 et 3 illustrent aléatoirement des régions de la RIM présentant des contrastes spectraux révélant de la végétation verte et du fer ferrique.

Les données ASTER de ces fichiers ont été géoréférencées au sein de la projection géographique de l'ellipsoïde WGS 84, et par rapport à la référence horizontale, par l'utilisation des métadonnées correspondant aux éphémérides du satellite.

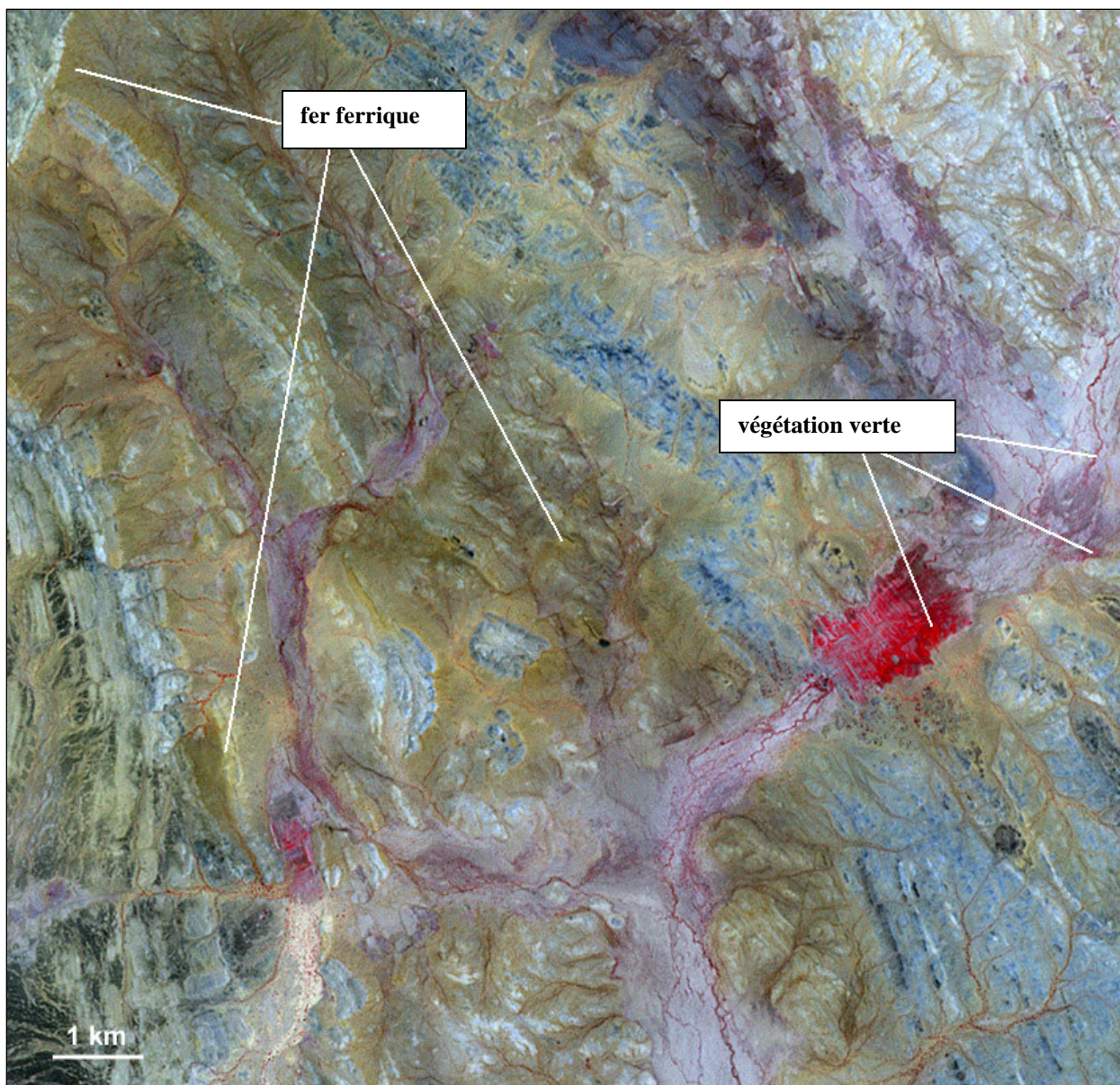


Figure 2. L'image composite ASTER 321/RVB, montrant la végétation verte (rouge) et des surfaces avec du fer ferrique (jaune foncé), ainsi peut-être qu'une végétation sèche clairsemée. Cette zone est localisée à environ 47 km au Sud-Est de Moktar Lahjar, dans le Sud des Mauritanides (point central de l'image : 17,19807°N, 12,78956°O).

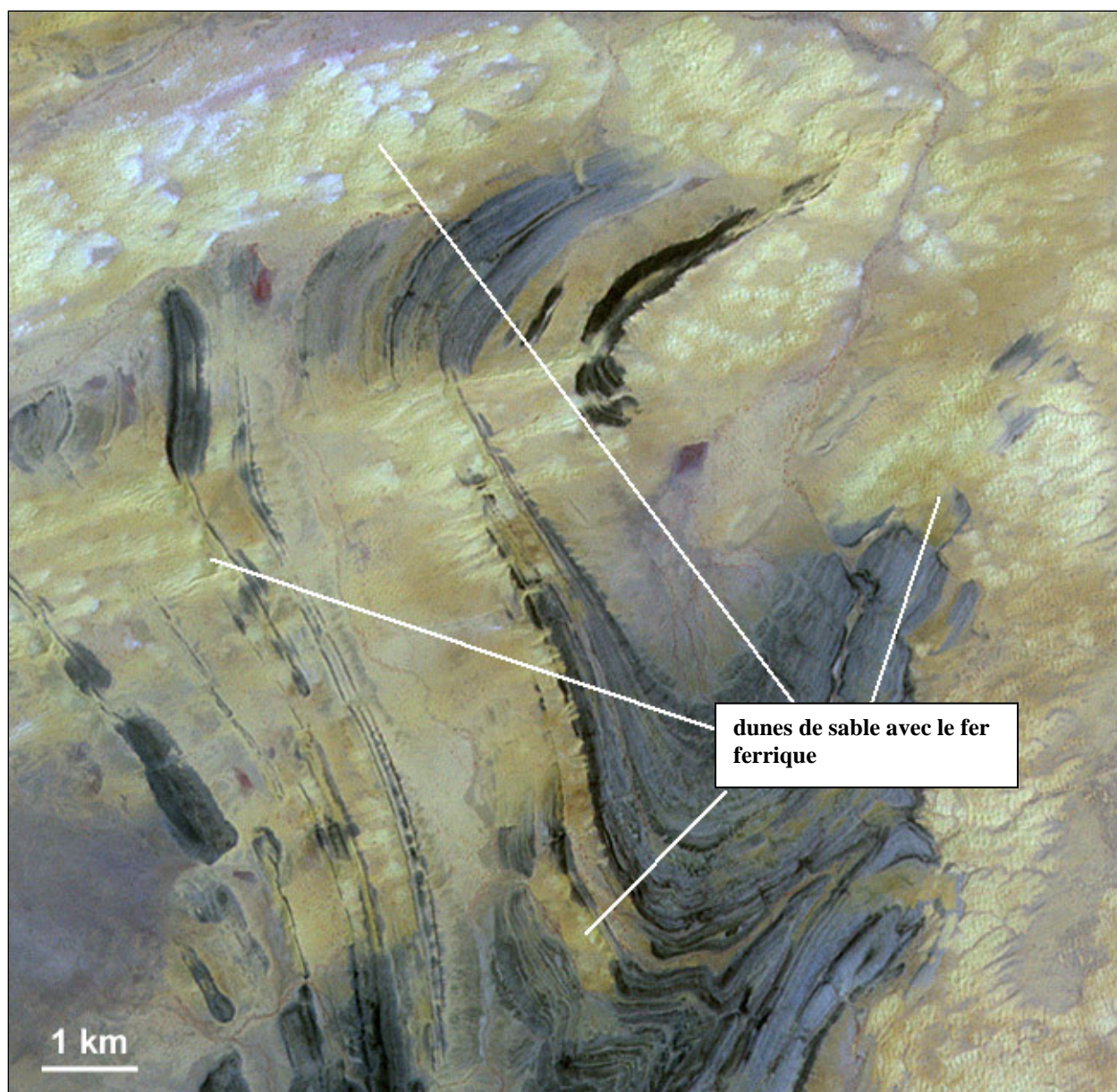


Figure 3. Image composite ASTER 321/RVB, montrant des dépôts sableux éoliens contenant du fer ferrique. Cette zone est localisée à environ 52 km au Nord-Est de Magta Lahja, dans le Sud des Mauritanides (point central de l'image : 17,83136°N, 12,73065°O).

2.4 Ensemble de données à six bandes dans un format à rayonnement renforcé sur les bords

Les bandes ASTER 1 à 4, 6 et 8 ont été converties dans un format de rayonnement, en utilisant les valeurs de gain contenues dans les fichiers de métadonnées, géoréférencées en projection UTM, rééchantillonnées pour une taille de pixel uniforme de 15 m, et renforcées aux limites. Les résultats sont contenus dans des fichiers présentant « colorcomp » dans le nom du fichier. Ces fichiers peuvent être

utilisés pour créer des images composites en couleur de haute qualité, pour une visualisation optimale des données, ainsi que l'interprétation spectrale et spatiale qualitative. La Figure 4 présente une carte produite à partir de l'un des ensembles de données à six bandes de la région d'Akjoujt.

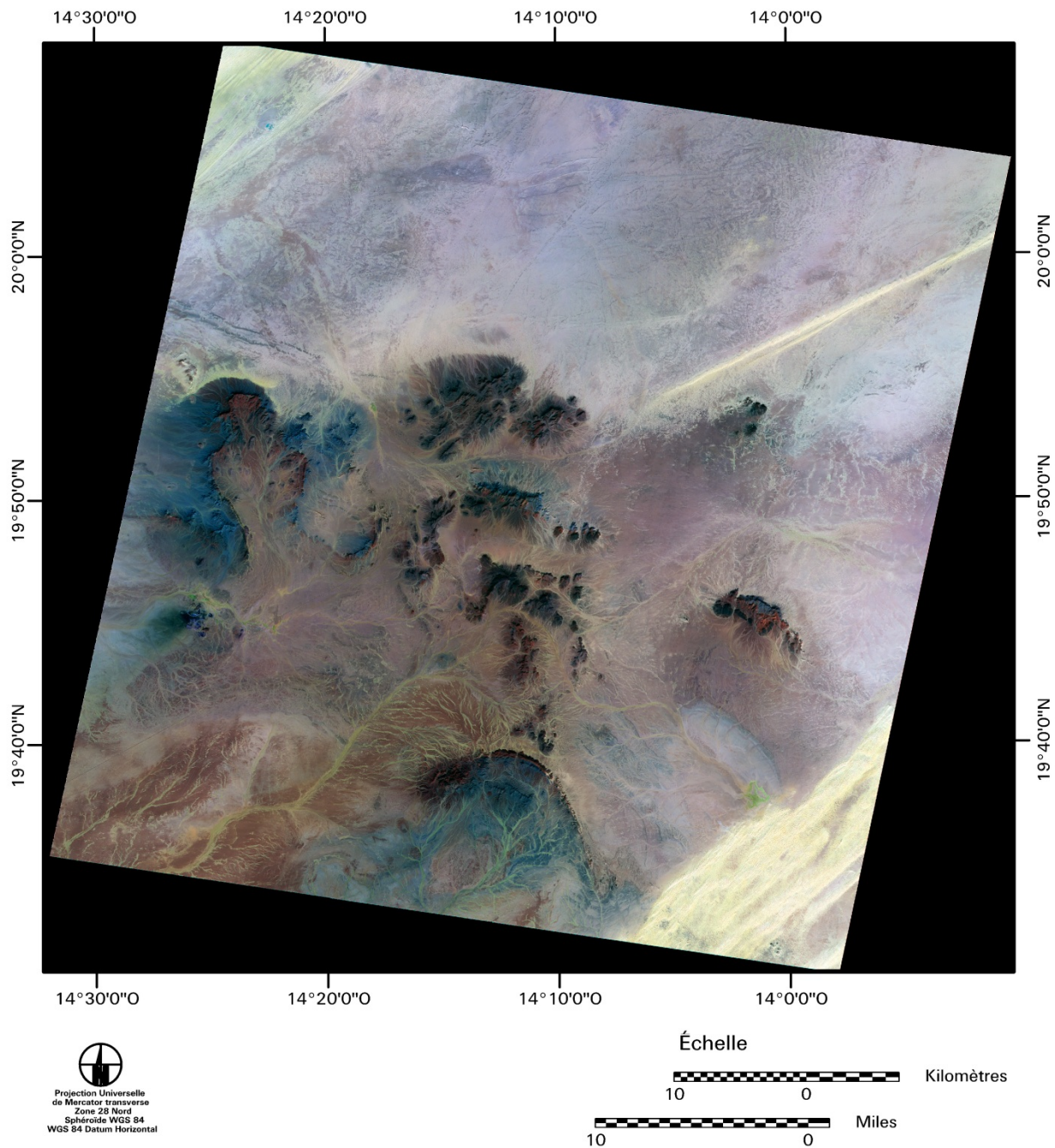


Figure 4. Image produite à partir de données ASTER à six bandes, à bords renforcés (aj12-18-06_7972_colorcomp_utm.img). L'image est une image composite couleur 431/RVB de la région d'Akjoujt (zone d'étude 2). La ville d'Akjoujt et la mine de Guelb Moghrein sont localisées au centre à gauche (voir la Figure 6). La végétation verte s'affiche en nuances de vert avec ce traitement, en raison d'un facteur de réflexion élevé du tissu des plantes mésophylles dans la bande 4 ASTER (proche infrarouge).

La végétation verte se rencontre communément le long des oueds et des autres cours d'eau, et se distingue mieux en examinant les images composites couleur 321/RVB, sur lesquelles la végétation apparaît en teintes rouge vif (Fig. 2), ou sur les images composites 431/RVB sur lesquelles la végétation apparaît en vert (Fig. 4).

2.5 Images composites en couleur 468/RVB à bande renforcée

Les bandes ASTER SWIR 4, 6 et 8 ont été converties en format de rayonnement par l'utilisation des valeurs de gain contenues dans les fichiers de métadonnées, géoréférencées en projection UTM, rééchantillonnées pour une taille de pixel de 15 m. Par l'utilisation de techniques de traitement d'images portant sur l'intensité, la teinte et la saturation, les trois bandes ont été fusionnées avec la bande 2 renforcée aux bords des données ASTER (Tableau 1), de façon à produire des images composites couleur intéressantes pour distinguer simplement les ensembles lithologiques et minéraux, ainsi que pour l'interprétation structurale (Rockwell, 2010 ; 2012). Les résultats sont contenus dans les fichiers présentant « minvue468 » dans le nom du fichier. Le guide d'interprétation des couleurs pour ces images est présenté au niveau de la Figure 5. Ces fichiers devraient être affichés en utilisant un calage de bande/couleur 123/RVB, afin de correspondre au guide d'interprétation. Comparer le guide d'interprétation avec l'image des données ASTER, produite pour la région de Cuprite en utilisant des techniques identiques (Fig. A5). La Figure 6 présente une carte produite à partir d'une image composite couleur renforcée 468/RVB de la région d'Akjoujt, où sont identifiés les secteurs clés examinés ci-après.

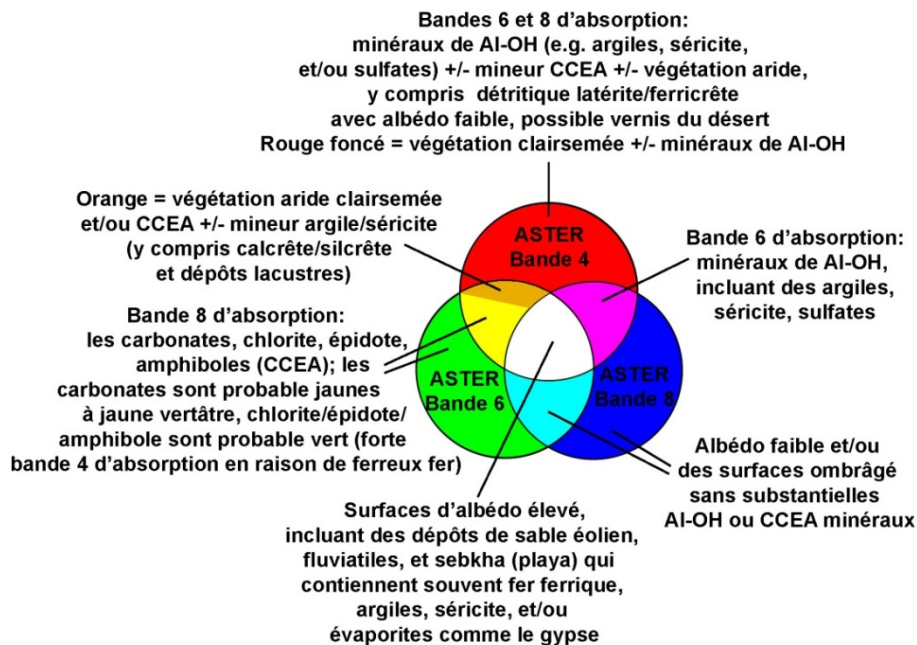


Figure 5. Guide d'interprétation des couleurs correspondant aux images composites renforcées 468/RVB. La bande ASTER affectée à une couleur donnée est indiquée dans les cercles soulignant le rouge, le vert et le bleu, et l'interprétation pour cette couleur au niveau de l'image est apportée à l'extérieur des cercles. On remarquera qu'en plus de la chlorite, d'autres phyllosilicates contenant le radical Mg-OH, tels que la serpentine et le talc, apparaissent généralement dans des tons

verdâtres, et sont indicateurs de serpentines altérées au sein de roches ultramafiques du Sud des Mauritanides, ce qui peut être une indication importante du potentiel de dépôts de latéritiques à nickel-cobalt.

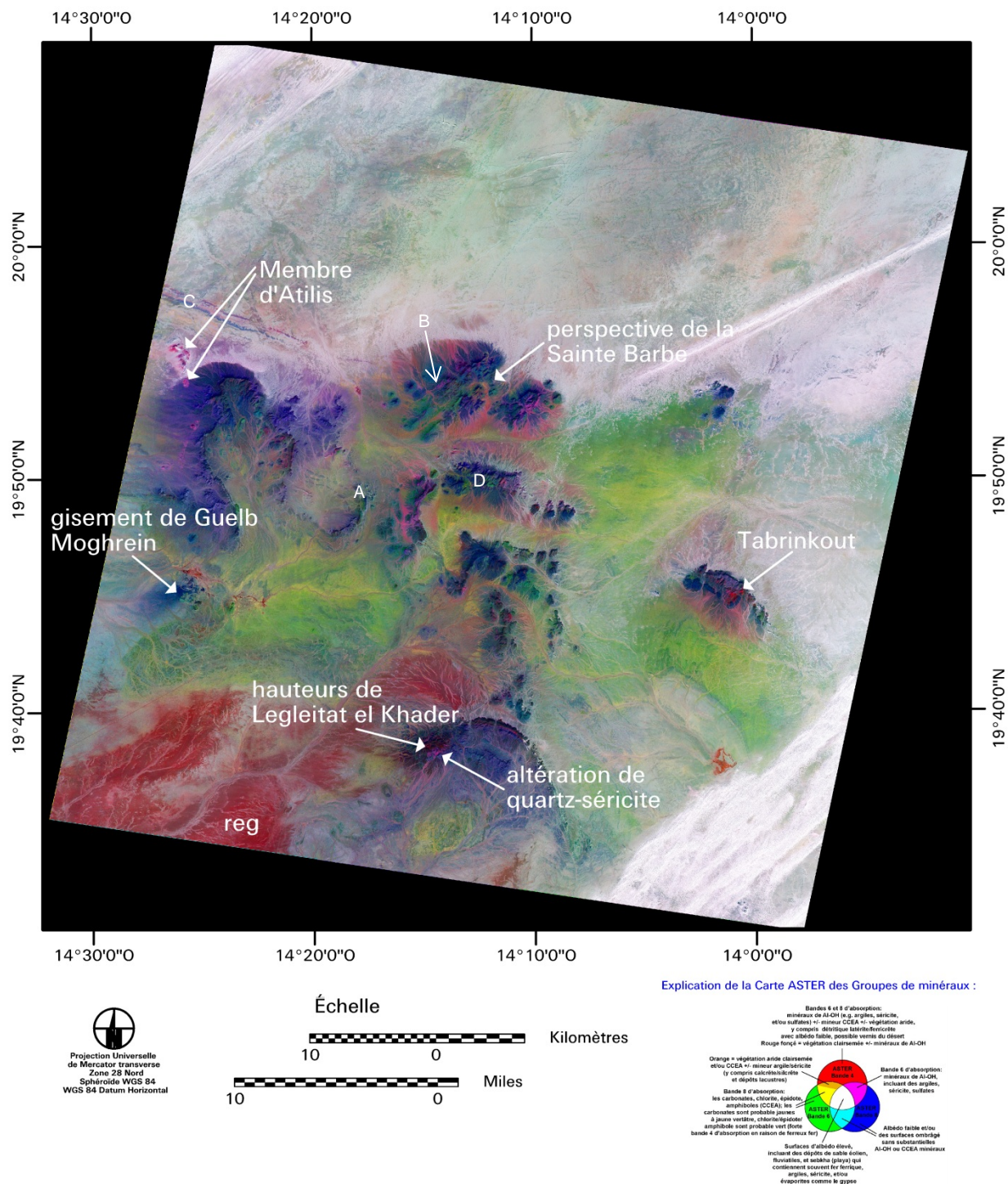


Figure 6. Carte produite à partir d'une image composite couleur renforcée 468/RVB (aj12-1806_7972_minvue468_utm.img) de la région d'Akjoujt. La Figure 5 présente le guide d'interprétation des couleurs de ce traitement d'image. A = potentiel de cuivre de Bou Serouai / Guelb Hammar. B = présence de mica et/ou de minéraux argileux dans la formation de fer rubané, de la Formation de Sainte Barbe, Groupe d'Oumachouema. C = Formations de Terjit Aguinjob et Amogjar, Groupe de Nouatil.

D = hauteur d'Irarchene el Hamra. Les surfaces de reg avec des minéraux argileux et de fer ferrique apparaissent dans des tons rouge vif dans la partie Sud-Ouest de la vue.

Les guides d'interprétation des couleurs présentés ici et aux chapitres 7 et 8 contiennent des références à de nombreux minerais cités en annexe (Fig. A2 à A4), et ont été élaborés en comparant les couleurs des présences minérales des documents ASTER produits dans la région de Cuprite, avec des cartographies de minerais détaillée et vérifiées issues des données AVIRIS, et en leur comparant les images produites avec les données SIG de la géologie à l'échelle 1/200 000^{ème} provenant de PRISM-I. En général, l'altération argileuse, de quartz—séricite, de quartz-séricite-pyrite (QSP, ou phyllique), ou de greisen, devraient apparaître en nuances magenta (par exemple, l'altération de quartz-séricite, à la bordure Sud-Est des hauteurs de Legleitit el Khader, Fig. 6). Une couleur rouge indique la présence de minéraux contenant des radicaux Al-OH (fréquemment de la séricite et/ou des argiles) avec du fer ferrique et/ou de la végétation sèche et clairsemée (par exemple, la couverture supergène formant le sommet des hauteurs de Legleitit el Khader, Fig. 6). À la fois la végétation sèche et les minerais de fer ferriques peuvent causer une réflectance accrue dans la bande 4, par comparaison aux bandes 6 et 8.

Cartes images présentant des images composites couleur renforcées 468/RVB ASTER fournies au niveau de l'Annexe C.

2.6 Rapports de bandes

Sur la base de la réponse spectrale des formations rocheuses les plus répandues, et des minéraux d'altération correspondants à la résolution spectrale d'ASTER (Fig. 7), quatre rapports de bandes composés ont été élaborés pour mettre en valeur des groupes minéraux spécifiques. Les rapports et la démarche scientifique derrière leur développement ont été présentés aux membres de PRISM-II pendant leur visite dans les locaux de l'USGS à Denver. L'ensemble des rapports ont été élaborés à partir des données en format de rayonnement, par l'application des valeurs de gain contenues dans les métadonnées images. Avant la conversion de rayonnement, les effets d'erreur d'intermodulation dans les 6 bandes SWIR ont été atténués par soustraction de cible sombre. Cette correction de bas niveau n'a pas été appliquée aux données corrigées de l'intermodulation AST_09XT mentionnées plus haut. Les rapports de bandes de sortie sont contenus dans les fichiers présentant « targrat2fe_pc » dans leur nom (par exemple « fk07_26423_rad_targrat2-fe_pc.img », ou « fk07_26423_rad-targrat2-fe_pc.img ». Ces fichiers images ont été géoréférencés pour l'ellipsoïde et la référence horizontale en projection géographique WGS 84. Le Tableau 2 présente ces rapports et les bandes contenant les rapports des rasters de sortie au sein des fichiers de livrables.

Certains minéraux lithogénétiques à ASTER résolution spectrale

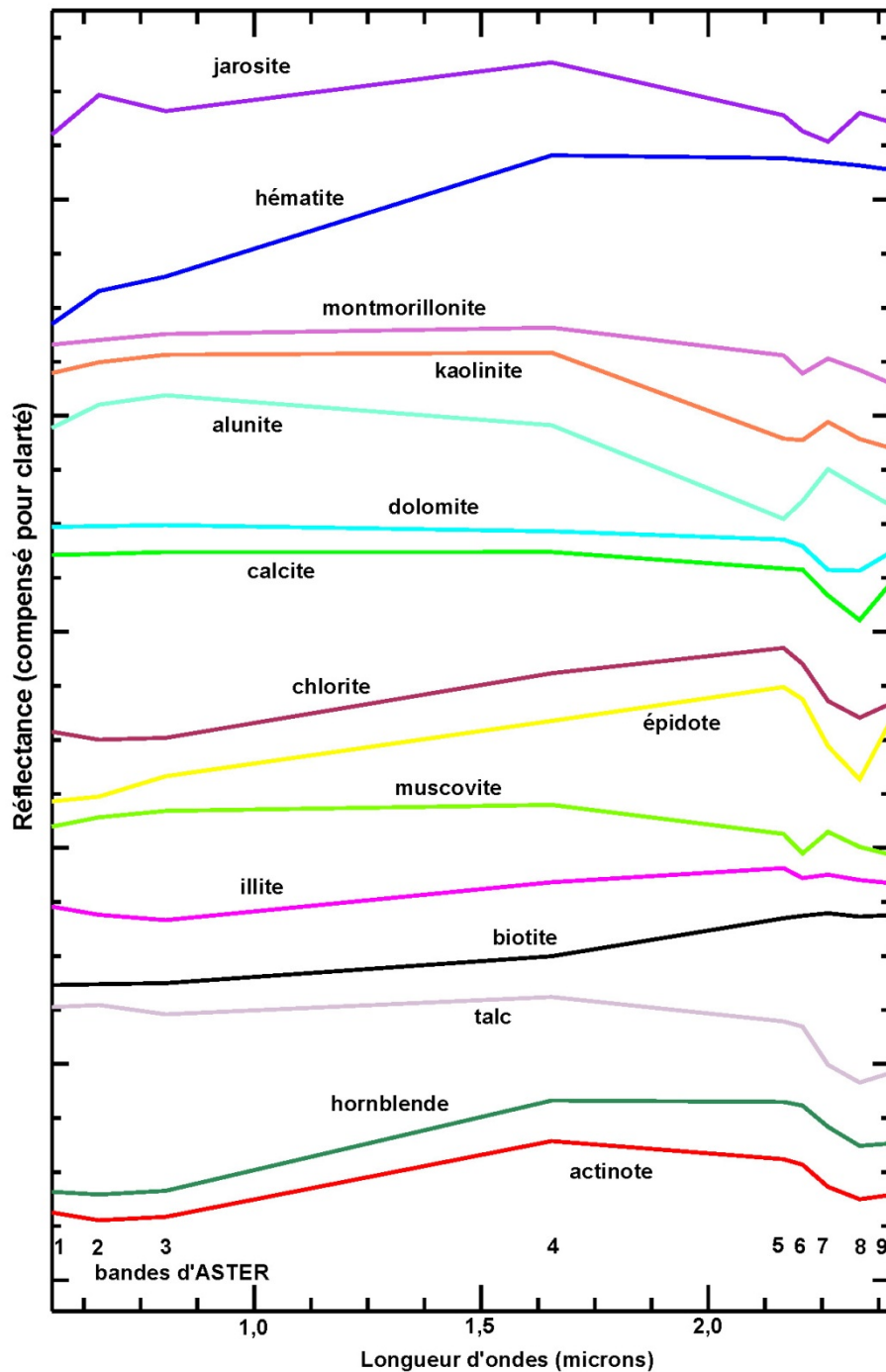


Figure 7. Réponse spectrale des minéraux constitutifs des roches et de l'altération aux résolutions spectrales ASTER. Les spectres de réflectance de laboratoire (Clark et al., 2003b) ont fait l'objet d'une convolution par l'utilisation de l'échantillonnage et de la bande passante ASTER, ainsi qu'en utilisant le modèle de Gauss basé sur les largeurs de bandes de la moitié du maximum des largeurs entières présentées au niveau du Tableau 1. Les caractéristiques d'absorption permettant d'identifier chaque minéral sont présentées avec des flèches magenta. Les minéraux de fer ferrique sont représentés ici par la jarosite et l'hématite, et le spectre de ces deux minéraux présente une forte décroissance de réflectance entre la bande 1 et la

bande 2 d'ASTER. Hornblende et actinolite contiennent du fer ferreux, qui provoque une large absorption caractéristique, centrée au niveau des bandes 2 et 3.

“fk07_26423_rad-targrat2-fe_pc.img”). Les fichiers de ces images ont été géoréférencés par projection géographique, sur le sphéroïde WGS 84 et la donnée. Le tableau 2 illustre ces rapports et les bandes qui contiennent les rapports raster de sortie des fichiers produits.

Tableau 2. Rapports de bandes appliqués aux données ASTER dans le cadre de l'étude PRISM-II

<u>Désignation du rapport de bande</u>	<u>Formule du rapport de bande</u>	<u>Bande au sein des fichiers livrables Imagine ERDAS (« targrat2 fe pc » dans le nom de fichier)</u>	<u>Principaux minéraux et caractéristiques de surface mis en valeur</u>
1	2/1	1	Minéraux de fer ferrique (exemples : hématite, goethite, jarosite)
2	(4 + 7)/5	2	Alunite, kaolinite, pyrophyllite, végétation sèche
3	(5 + 7)/6	3	Séricite, argile à smectite (montmorillonite), autres minéraux à Al-OH
4	(6 + 9)/(7 + 8)	4	Carbonate, chlorite, épidote, amphiboles, végétation sèche

2.7 Image composite renforcée à rapports de bandes 1 - Fer ferrique, Al-OH, carbonate-chlorite-épidote-amphibole/RVB

Par l'utilisation de techniques de traitement d'images Intensité/Teinte/Saturation (ITS), les rapports de bandes 1, 3 et 4 (voir les désignations dans le Tableau 2) ont été fusionnés avec la bande 2 à bord renforcé des données ASTER (Tableau 1) pour générer des images composites couleur utilisées pour la distinction des groupes lithologiques et des minéraux. Les résultats sont contenus dans les fichiers présentant « targrat2-fe_crispb2_lowp » dans le nom du fichier. Le guide d'interprétation des couleurs pour les images produites est présenté au niveau de la Figure 8. Ces fichiers doivent être affichés en utilisant un paramétrage de bande/couleur 123/RVB, afin de correspondre au guide d'interprétation. On peut comparer le guide d'interprétation avec l'image des données ASTER de la région de Cuprite utilisant des techniques identiques (Fig. A6). Dans la bande 2 ASTER (longueurs d'onde rouges), la végétation verte apparaît sombre, et les zones riches en fer ferrique, ainsi que les autres zones à fort albédo (y compris les zones lessivée et altérées par des processus hydrothermaux, de même que les sebkhas) apparaissent en brillant. Comme la bande 2 d'ASTER est utilisée pour moduler l'intensité du produit du rapport de bande renforcé, l'information sur la couleur (ou la nuance) des zones à fort albédo à partir des rapports de bandes, peut être dénaturée par la brillance des zones présentes au sein de la bande 2. Par conséquent, pour les zones de fort albédo, il convient de consulter les fichiers de rapports de bandes non-renforcés, décrits dans le chapitre 6 (« targrat2-fe_pc » dans le nom de fichier), afin de déterminer la minéralogie sur la base du guide d'interprétation des couleurs, bien que, dans le guide, la description concernant la couleur blanche (située au centre du guide) doive être ignorée. La Figure 9 montre une carte sous forme d'image de la région d'Akjoujt, produite en utilisant l'information sur les couleurs à partir des rapports 134/RVB, de même que les informations spatiales et de brillance de la bande 2 d'ASTER.

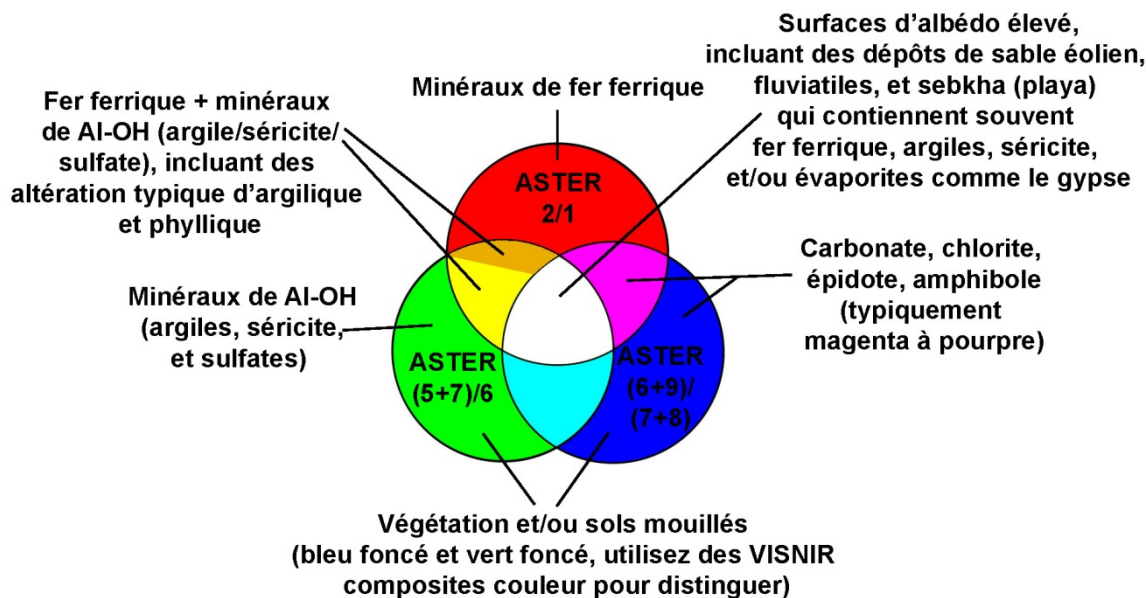


Figure 8. Guide d'interprétation des couleurs concernant les images composites renforcées de rapports de couleurs 134/RVB (image composite renforcée de rapport de bande 1). Le rapport de bande ASTER affecté à une couleur donnée est indiqué dans les cercles en rouge, vert et bleu, et l'interprétation de cette couleur des images est fournie en dehors des cercles. Une couleur magenta peut indiquer du fer ferrique + des carbonates, des phyllosilicates à Mg-OH, de l'épidote ou de l'amphibole. Les surfaces à faible albédo (par exemple les roches sombres) peuvent apparaître dans des tons bleus à cyan.

2.8 Image composite renforcée à rapports de bandes 2 - alunite-kaolinite, Al-OH, carbonate-chlorite-épidote-amphibole/RVB

Par l'utilisation des techniques de traitement d'images ITS, les rapports de bandes 2, 3 et 4 (voir les désignations dans le Tableau 2) ont été fusionnées avec la bande 2 à bordure renforcée des données ASTER (Tableau 1) pour produire des images composites couleur utiles pour distinguer les groupes lithologiques et les minéraux. Les résultats sont contenus dans les fichiers présentant « **targrat2_crispb2_lowp** » dans le nom de leur fichier. Le guide d'interprétation des couleurs pour ces images est présenté au niveau de la Figure 10. Ces fichiers devraient être affichés en utilisant un paramétrage de bande/couleur 123/RVB, afin de correspondre au guide d'interprétation. Il convient de comparer le guide d'interprétation avec l'image des données ASTER de la région de Cuprite utilisant des techniques identiques (Fig. A8). Dans la bande 2 ASTER (longueurs d'onde rouges), la végétation verte apparaît en foncé, et les zones avec beaucoup de fer ferrique et autres zones à fort albédo (y compris les zones lessivées et altérées par des processus hydrothermaux, ainsi que les sebkhas) apparaissent en couleurs vives. Comme la bande 2 ASTER est utilisée pour moduler l'intensité du produit du rapport de bande renforcé, l'information sur la couleur (ou la nuance) des zones à fort albédo à partir des rapports de bandes, peut être dénaturée par la brillance des zones de la bande 2. Par conséquent, pour les zones à fort albédo, il convient de consulter des fichiers à rapports de bandes non renforcés décrits ci-dessus (« targrat2-fe_pc » dans le nom de fichier), afin de déterminer la minéralogie sur la base du guide d'interprétation des couleurs, bien que la description du guide concernant la couleur blanche (située au centre du guide) doive être ignorée. La Figure 11 présente une carte de la région d'Akjoujt, produite en utilisant l'information sur les couleurs à partir des rapports 234/RVB, de même que les informations spatiales et sur la brillance de la bande 2 ASTER. La Figure 12 montre une image composite non-renforcée en rapports de couleurs de la même zone, produite à partir des fichiers de rapports décrits au niveau du chapitre 6 ci-dessus. Il convient de noter que l'information sur la couleur est identique à celle de l'image composite renforcée présentée au niveau de la Figure 11, mais que le rapport signal/bruit est plus bas, de même que l'image ne contient pas l'information spatiale 15 m/pixel à bords renforcés de la bande 2 ASTER.

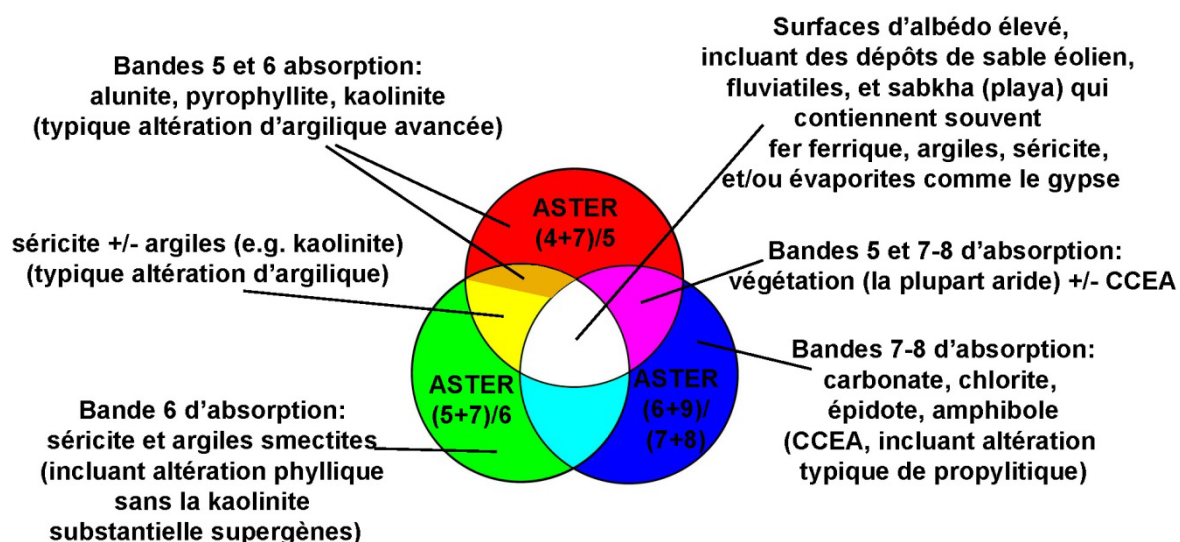


Figure 10. Guide d'interprétation des couleurs concernant les images composites renforcées en rapports de couleurs 234/RVB (image composite de rapport de bande 2). Le rapport de bande ASTER affecté à une couleur donnée est indiqué dans les cercles en rouge, vert et bleu, son interprétation dans l'image est fournie en dehors des cercles.

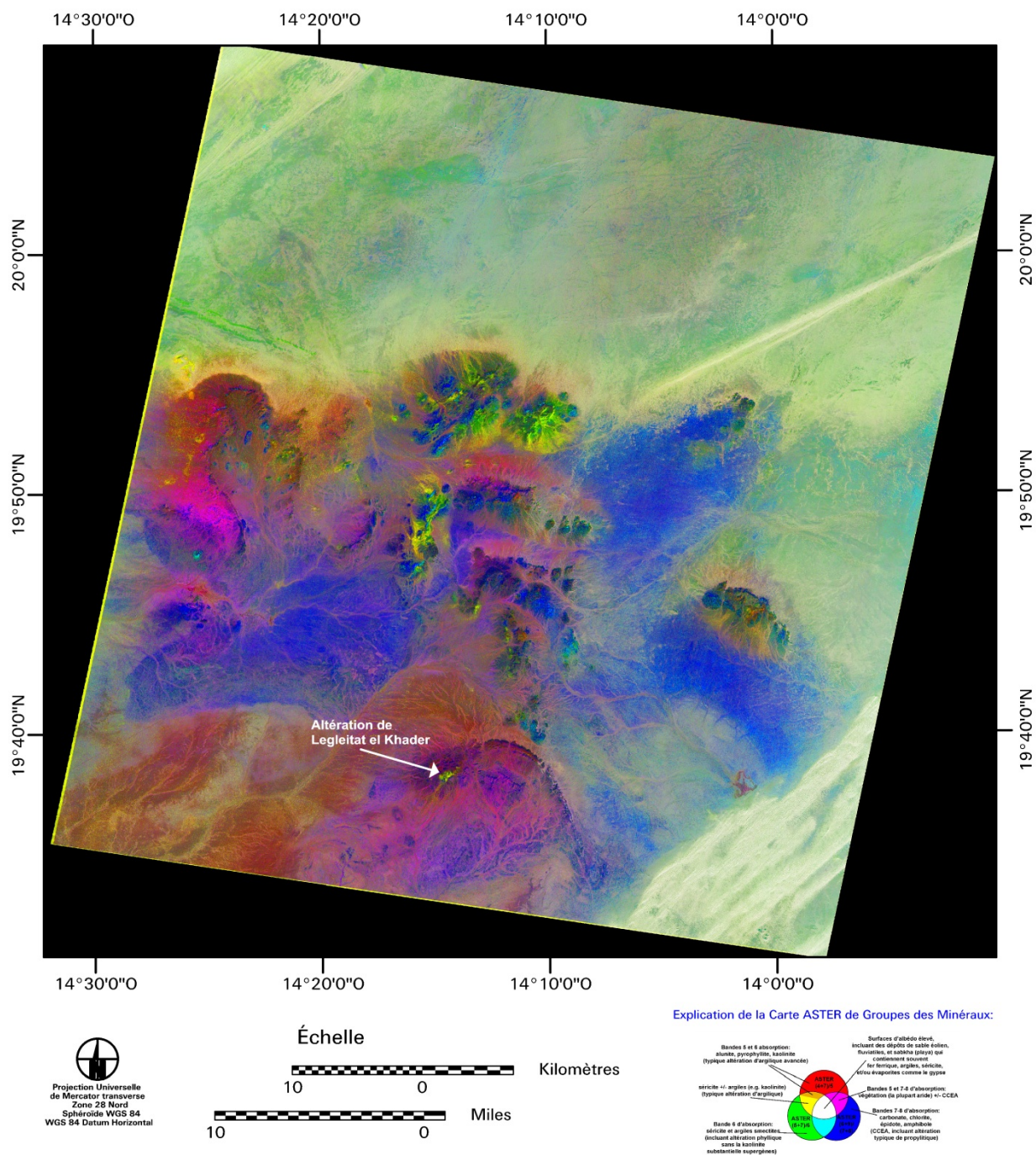


Figure 11. Carte image produite à partir d'image composite renforcée à rapports de couleurs (rapports 234/RVB) de la région d'Akjoujt (arj12-18-06_7972_rad_targrat2_sharpb2_utm_sat1.7.img). La Figure 10 présente le guide d'interprétation de cette image. L'altération quartz-séricite avec +/- d'argile au sein de Legleitat el Khader est indiquée.

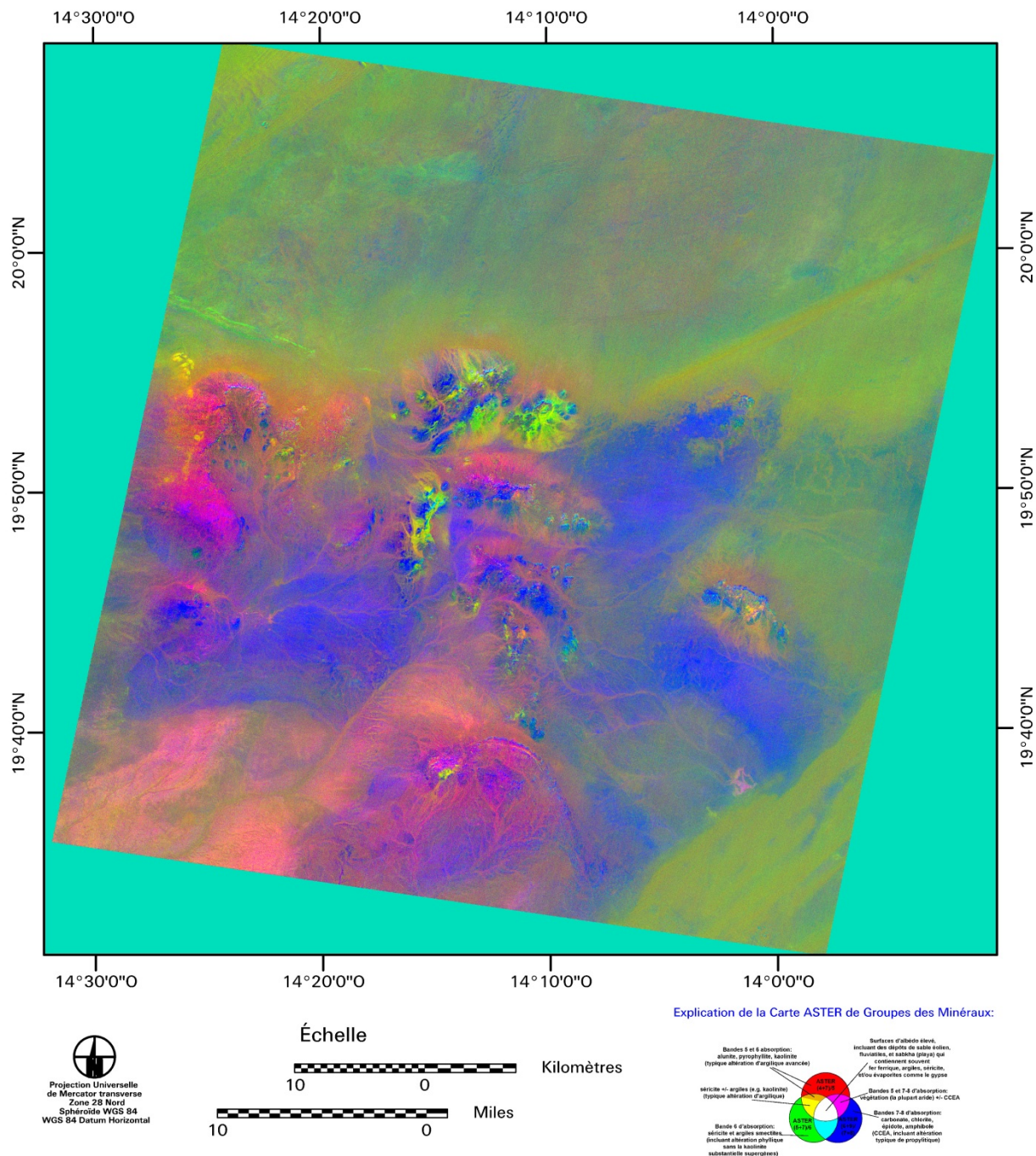


Figure 12. Carte image produite à partir d'image composite à rapports de couleurs (rapports 234/RVB) de la région d'Akjoujt (aj12-18-06_7972_targrat2_rad_pc.img). Cette image à une composante couleur est identique à celle de la Figure 11, mais n'a pas été renforcée spatialement en utilisant la bande 2 ASTER. La Figure 10 présente le guide d'interprétation de cette image. Pour des images composites non-renforcées à rapports de couleurs, produites à partir des fichiers de rapport décrits au chapitre 6, ne pas tenir compte de l'information des guides d'interprétation concernant le blanc. La Figure A9 présente une image de la région de Cuprite traitée de la même façon. Il convient de noter que la majorité des dépôts de sables éoliens (par exemple les dunes en haut et en bas à droite) sont caractérisés par une couleur verte indiquant la présence de séricite et de smectite, ainsi que des roches altérées présentant des phyllosilicates à Al-OH plus abondants, apparaissant en nuances vertes plus claires (séricite, smectite) et jaune (kaolinite).

La végétation sèche est caractérisée spectralement par des absorptions proches de 2,17 μm (bande 5 ASTER) et de 2,30 à 2,34 μm (bandes 7 et 8 ASTER), provenant des composés biochimiques des feuilles tels que la lignine et la cellulose. Ces absorptions sont mises en valeur par des rapports de 2 et 4 dans le Tableau 2. La végétation sèche présentera des valeurs élevées aussi bien pour l'un que pour l'autre de ces deux rapports. Par conséquent, la végétation sèche la plus classique apparaîtra dans des tons de magenta dans la combinaison de rapports de couleurs 234/RVB.

Le principal intérêt de produire une image composite renforcée de rapports de bandes 2 est d'aider à distinguer la séricite/smectite des altérations argileuses à alunite, pyrophyllite, et/ou kaolinite. L'altération argileuse et les autres présences d'alunite, pyrophyllite, et kaolinite apparaîtront en nuances de rouge, orange ou jaune, alors que la séricite et la smectite apparaîtront en tons et nuances de vert (Fig. 10, A8 et A9).

2.9 Zones d'étude

2.9.1 Région d'Inchiri-Adrar-Amsaga

La région entourant la ville d'Akjoujt, au Nord-Est de Nouakchott, est située dans la Zone Mobile des Mauritanides, dans le centre de la Mauritanie, et présente une suite de roches volcaniques supracrustales Protérozoïques, volcanoclastiques, métasédimentaires clastiques, avec plusieurs formations de fer rubanées (FFR), ayant été charriées vers le Nord et l'Est sur le socle Archéen d'Amsaga et sur les roches sédimentaires Paléozoïques et Protérozoïques du Bassin de Taoudéni (Strickland et Martyn, 2001). La région abrite le gisement de Guelb Moghrein d'oxyde de Fe-cuivre-or-cobalt et d'autres métaux potentiels.

Une abondante séricite (probablement de la muscovite) avec plus ou moins de minéraux argileux est très visibles au sein de l'unité lithostratigraphique quartzreuse d'Atilis, du Groupe Protérozoïque d'Oumachoueima, affleurant entre 10 et 20 km au Nord du dépôt de Guelb Moghrein (Fig. 6). Les données géologiques de PRISM-I, à l'échelle 1/200 000^{ème}, montrent que l'unité lithostratigraphique d'Atilis contient du grès, de la quartzite et du schiste psammitique métamorphisé et/ou altéré en muscovite/quartz, avec de rares formations de fer rubané (FFR). Les quartzites et les autres unités rocheuses siliclastiques contiennent souvent des micas détritiques primaires ou authigènes dans leur matrice, qui, bien que seulement présents en faible abondance, sont facilement identifiables en raison du fort contraste spectral avec le quartz opaque constituant la majeure partie de la roche. Ces roches cassantes ont généralement une perméabilité secondaire bien développée le long des fractures et des plans de stratification, et ont une faible capacité à jouer le rôle de roche tampon pour les solutions acides. Ainsi, les arénites de quartzites et de quartz sont d'excellents hôtes pour des altérations argileuses bien développées et des altérations argileuses contrôlées par la fracturation, ce qui peut être facilement cartographié par l'utilisation de la télédétection spectrale (Rockwell et Hofstra, 2012). La présence et le type des minéraux de la famille des phyllosilicates et des sulfates, à l'intérieur de telles roches siliclastiques, peut fournir des indices concernant l'histoire hydrothermale et métamorphique de l'unité de quartzite, et peut aussi représenter des indicateurs superficiels de systèmes hydrothermaux en liaison avec des gisements de minerai dissimulés. La couleur jaune des quartzites d'Atilis (Fig. 6) dans l'image composite renforcée de rapports 234/RVB (Fig. 12) indique la présence de minéraux argileux (probablement de la kaolinite) en plus des micas de la matrice. Une carte des groupes minéraux de la même vue ASTER, traitée en utilisant de nouvelles méthodes automatisées (Fig. B1) montre aussi que les quartzites d'Atilis ont une composante argileuse (apparaissant en jaune et en rouge).

Les argiles et les micas identifiés par l'utilisation de l'imagerie ASTER peuvent aussi être utiles pour distinguer les unités siliclastiques à l'intérieur des unités cartographiques et des formations complexes et non-différenciées. Par exemple, les unités quartzitiques au sein des formations non-différenciées de Terjit Aguinjob et d'Amogjar, du Groupe de Nouatil, à 25 km au Nord du gisement de Guelb Moghreïn peuvent être distinguées des unités à carbonates par l'observation des grandes quantités de séricite (muscovite) au sein des unités de quartzite (C, Fig. 6).

Au sein des roches non-différenciées métasédimentaires et métavolcaniques du Groupe d'Oumachoueïma, des concentrations anormales de séricite avec plus ou moins d'argile sont observées à 4 km à l'Est-Nord-Est, et au Sud-Est, de la zone potentielle de cuivre de Bou Serouai / Guelb Hammar (A, Fig. 6). Les micas et/ou les argiles sont aussi présents dans une unité de formation de fer rubané au sein de la formation de Sainte Barbe, à 4 km à l'Ouest de la zone potentielle de Sainte Barbe (B, Fig. 6).

L'altération de quartz-séricite au sein des dolérites, sur le côté Sud de la structure en dôme hébergeant les zones potentielles en cuivre d'El Khader et de Breche, à 20 km au Sud-Est d'Akjoujt, sur la hauteur déchiquetée de Legleit el Khader (Strickland et Martyn, 2001), est bien mise en valeur par les images renforcées 468/RVB (Fig. 6 et 13) ainsi que par les images au rapport renforcé (Fig. 9, 11, 12 et 14). Au sein des données géologiques à l'échelle 1/200 000^{ème} de PRISM-I, cette altération est présente dans les micrograbos de la séquence Protérozoïque de Kelbé. Toutefois, une importante altération sodique et à quartz-séricite a aussi été identifiée dans la même région, au sein des métasédiments du groupe d'Oumachoueïma. La Figure 15 présente une carte des groupes minéraux de la région, produite à partir d'une imagerie Landsat utilisant de nouvelles méthodes (production complémentaire non fournie dans le présent rapport) qui indiquent les localisations des échantillons de terrain pour lesquelles le spectre de réflectance en laboratoire est présenté au niveau de la Figure 16. Une altération sodique (Fig. 17), associée avec une sidérite à gros grains, a été trouvée immédiatement au Sud des échantillons MT07-8 et MT07-9, contenant de la séricite en abondance (Fig. 16).

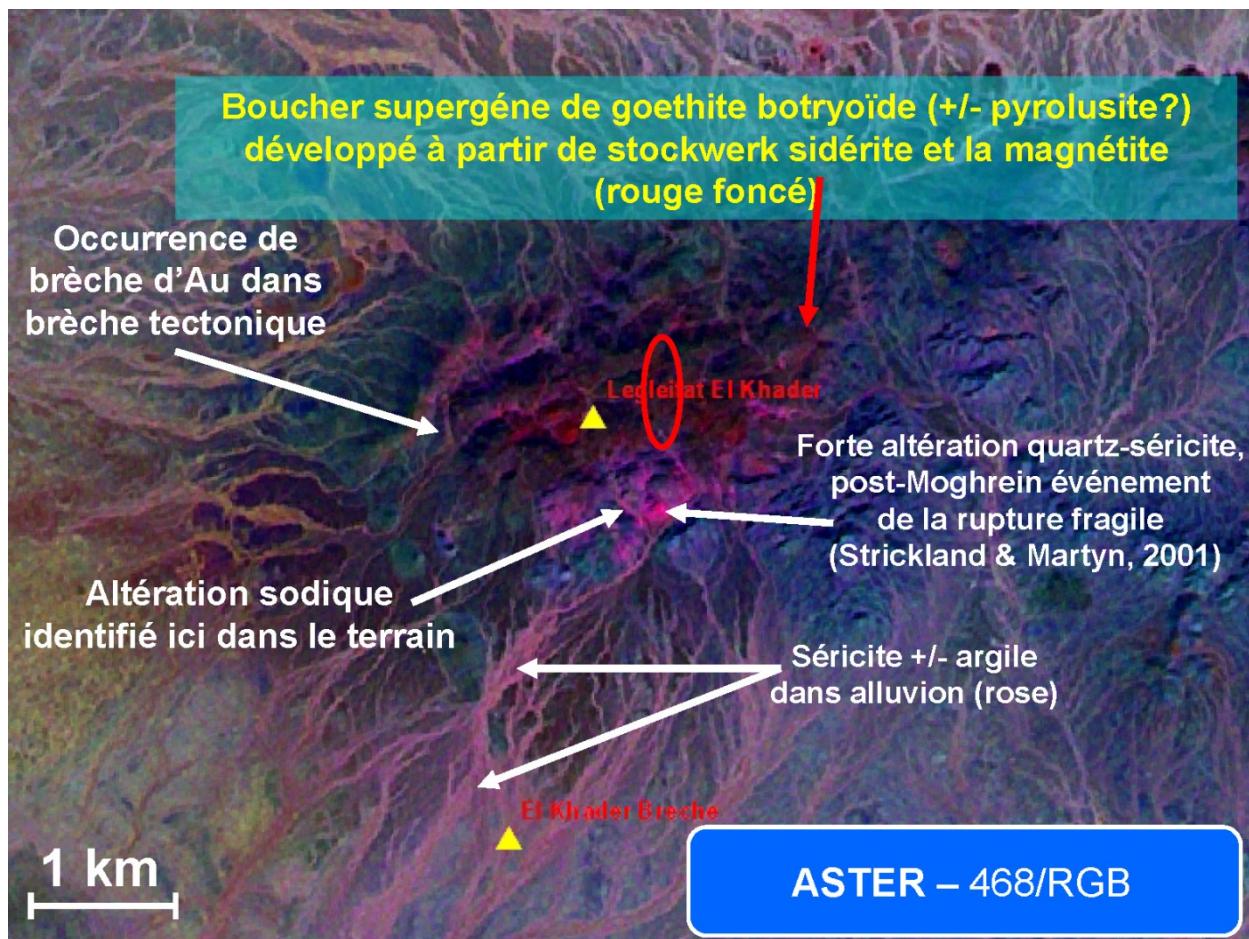


Figure 13. Détail de la Figure 6, en survol de la hauteur de Legleit el Khader. Il convient de noter que la position de la présence de cuivre de « El Khader Breche », provenant de PRISM-I, dans le bas, est très probablement mal placée, sa véritable position se situant plutôt à l'endroit où de nombreuses tranchées et prises d'échantillons ont été effectuées, au sein d'une brèche de zone de cisaillement, à environ 1,5 km à l'Ouest de la présence indiquée comme « Legleit El Khader ».

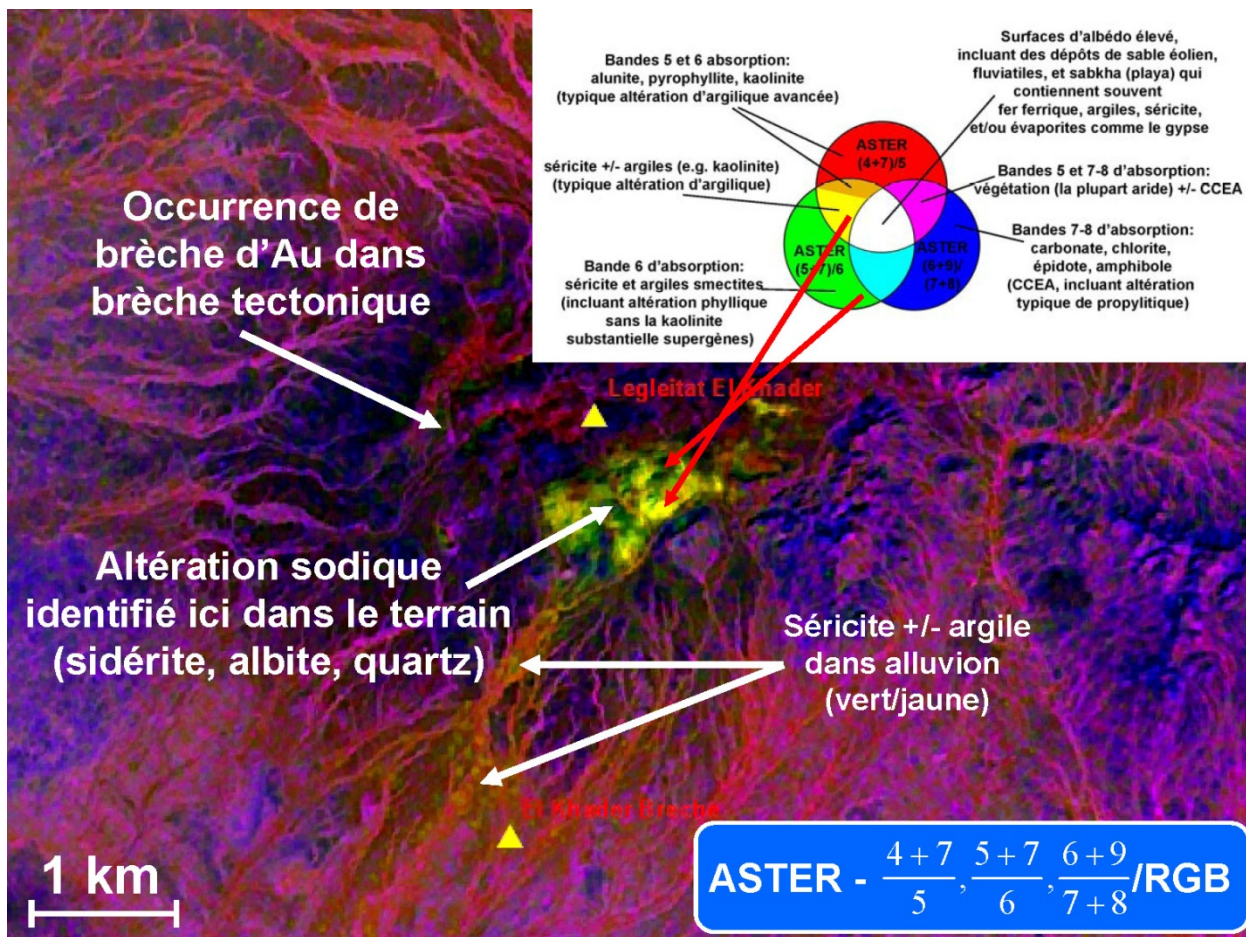


Figure 14. Détail de la Figure 11, en survol de la hauteur de Legleitit el Khader. Les zones à séricite (ou smectite) apparaissent en vert, et les régions plus riches en argiles apparaissent en jaune. Les nuances de jaune suggèrent une absorption plus importante de la bande 5 ASTER (centre à 2,167 micromètres) indiquant de la kaolinite, en plus de minéraux d'une altération argileuse développée, tels que l'alunite et la pyrophyllite. L'altération argileuse bien développée n'est pas détectée dans la région d'El Khader. Les métasédiments chloritisés de la Formation d'Atomai apparaissent dans des tons bleuâtres.

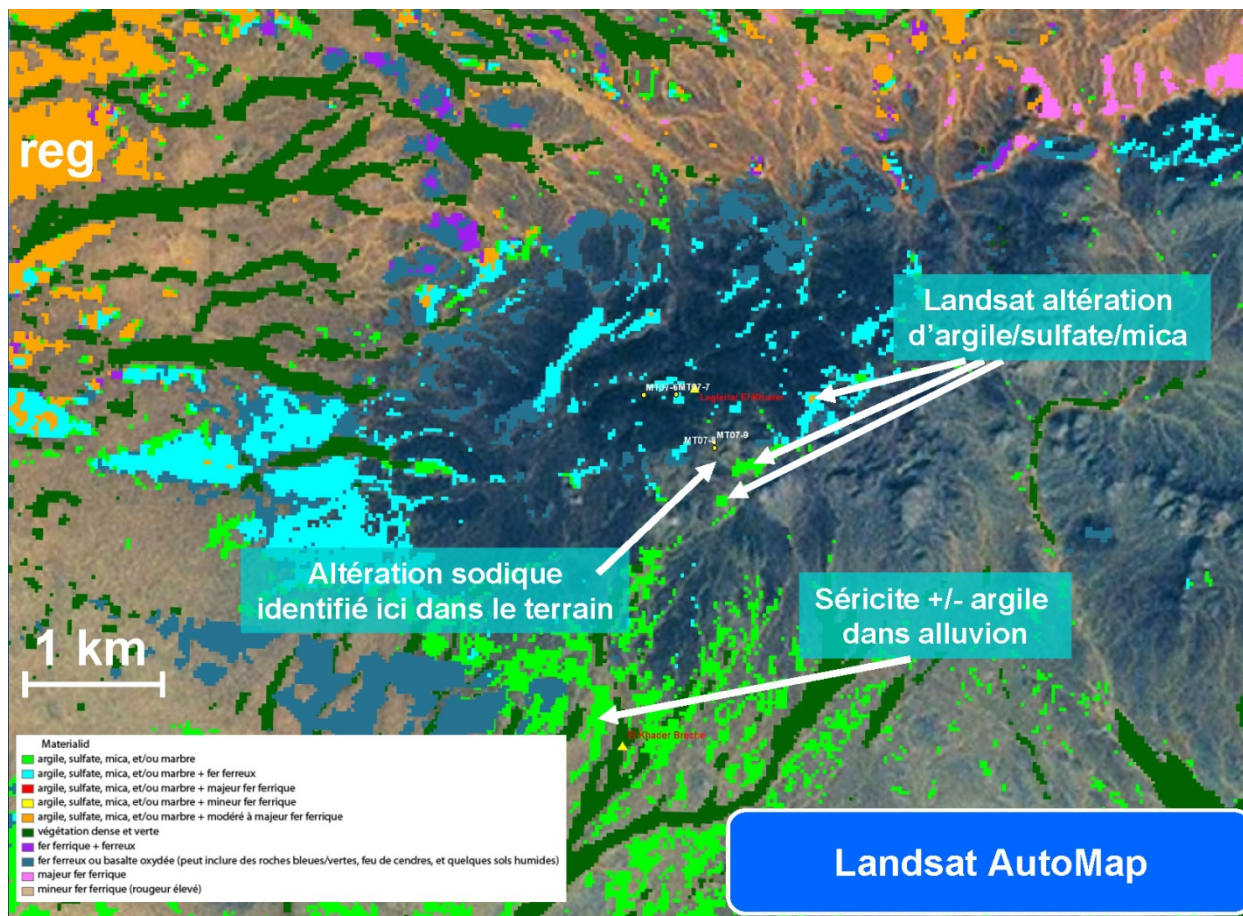


Figure 15. Carte des groupes minéraux, provenant de l'analyse automatique basée sur les rapports des données de Landsat pour l'évaluation des ressources minérales du projet PRISM-II, montrant la hauteur de Legleitit el Khader. Les localisations des prélèvements d'échantillons sur le terrain sont indiquées par des cercles jaunes. Il convient de noter que le matériau de recouvrement supergène de goéthite + kaolinite a localement été identifié comme « argile, sulfate, mica et/ou marbre + fer ferreux », apparaissant en cyan. La nature à très gros grains de la goéthite botryoïdale produit une absorption large et profonde proche de 1,00 micromètre (Fig. 16), qui apparaîtra similaire au fer ferreux à la résolution spectrale de Landsat. De nombreuses présences ont été cartographiées le long des écoulements hydrographiques, là où l'érosion a enlevé l'essentiel de la couverture noire lessivée et altérée, et rendue visible la kaolinite. Les zones où demeure une épaisse couverture ont été identifiées comme « fer ferreux », car la kaolinite n'est pas visible. Le fer ferreux a aussi été identifié le long des flancs Sud et Ouest de la hauteur, dans des métasédiments chloritisés de la Formation d'Atomai, apparaissant dans des tons verdâtres foncés sur l'image composite renforcée 468/RVB (Fig. 13). Les absorptions dans le visible et le proche infrarouge du fer ferreux et ferrique au sein de la chlorite (et dans certaines amphiboles) apparaissent sur la carte comme « fer ferreux » dans ce type de traitement des données de Landsat TM et ASTER (Fig. 7; Rockwell, 2012). Il convient aussi de noter que la surface du reg, dans le Nord-Ouest, a été cartographiée comme contenant du fer ferrique en abondance en plus de l'argile et du mica (apparaissant en orange sur la carte). Le spectre de réflectance de cette surface est présenté au niveau de la Figure 18.

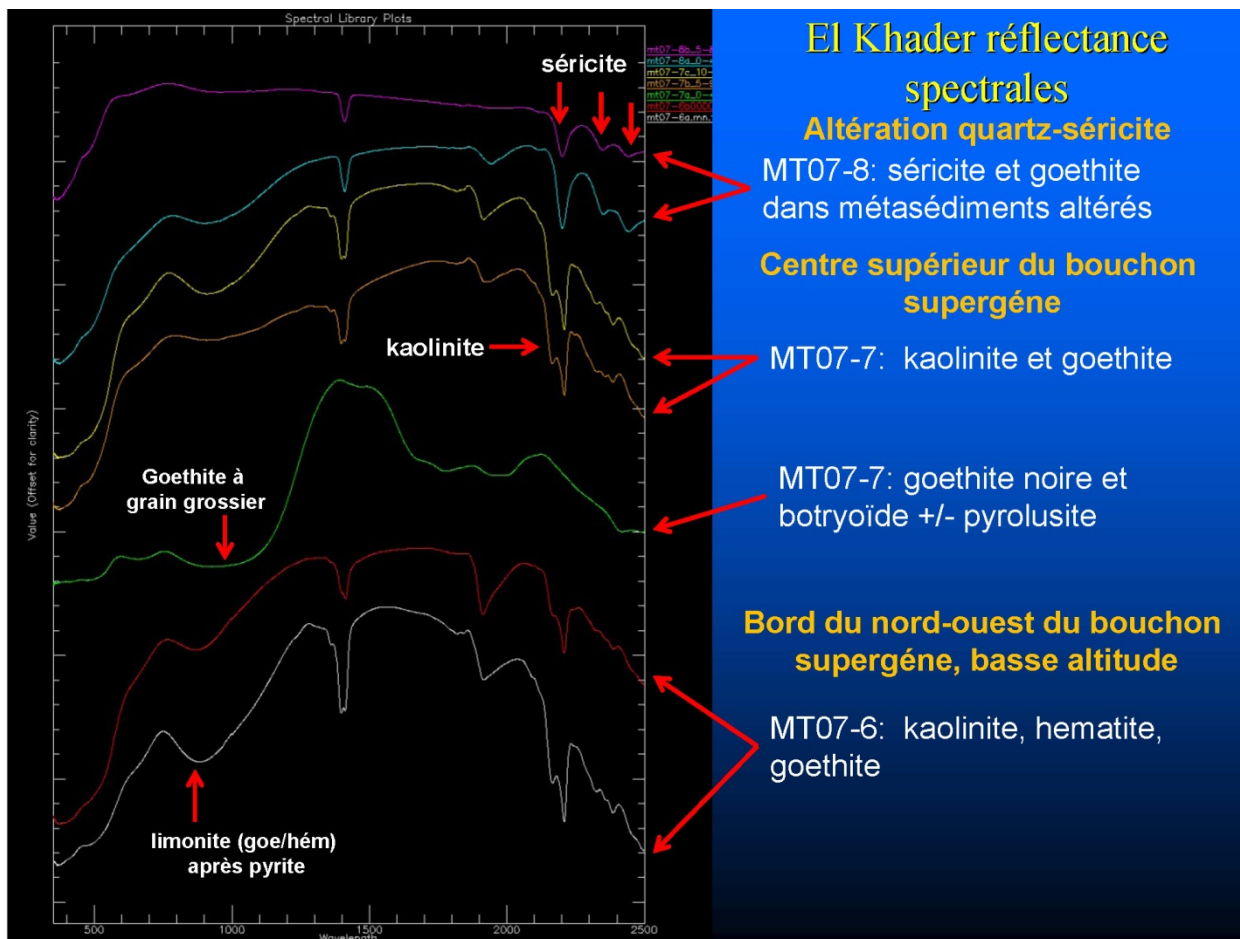


Figure 16. Spectre de laboratoire des échantillons de terrain de la hauteur de Legleit el Khader. Se référer à la Figure 15 pour la localisation des échantillons. Le nom des échantillons est indiqué en haut à droite de la courbe spectrale par un texte de couleur correspondant à la couleur du spectre auquel il se rapporte. Il convient de consulter les images fournies en haute résolution pour plus de détails. La longueur d'onde en nanomètres (micromètre x 1 000) est indiquée sur l'axe des x.

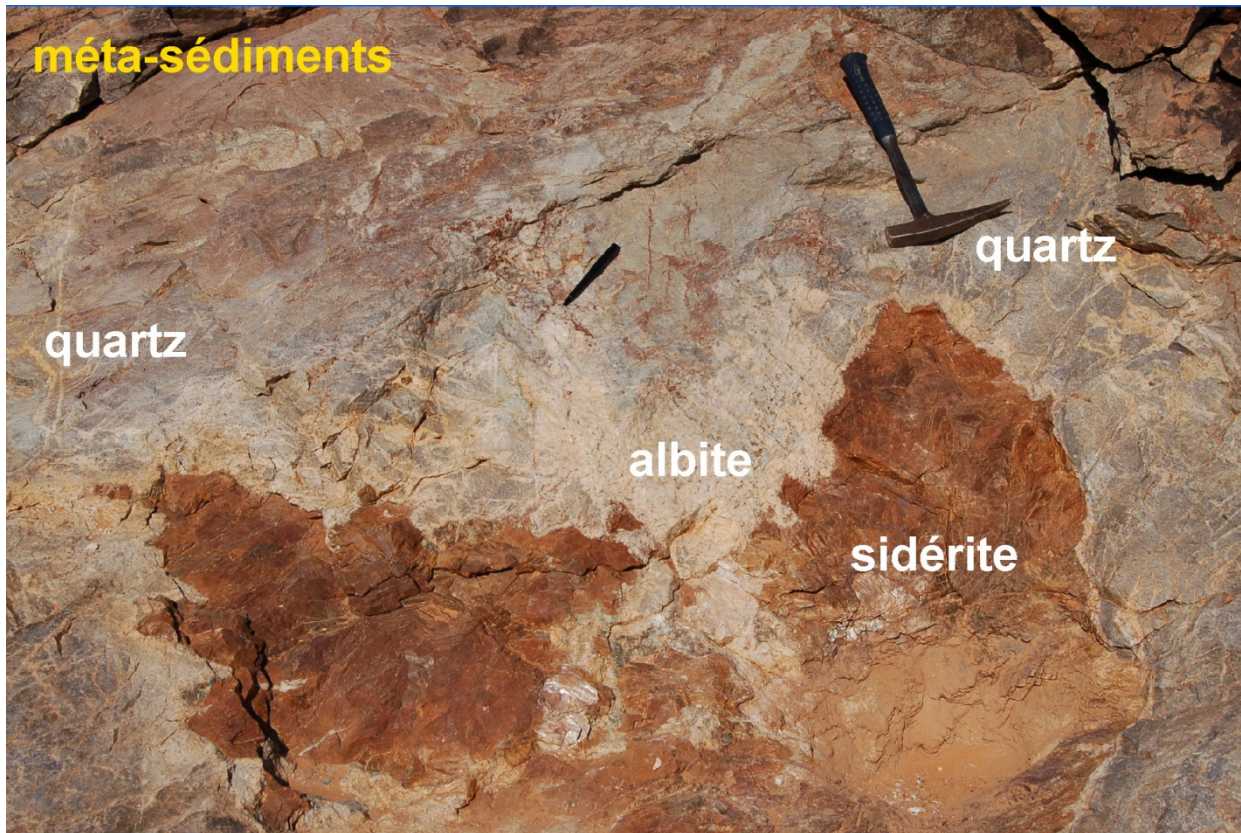


Figure 17. Photographie de terrain de l'altération sodique hébergée par les métasédiments à proximité d'une zone de forte altération de quartz-séricite, au niveau de la hauteur de Legleitit el Khader. L'abondance relative en quartz par rapport à l'albite augmente proportionnellement avec l'augmentation de la distance à la sidérite. Les localisations sont indiquées au niveau des Figures 13 à 15. Ces veines de sidérite épaississent et s'agrègent vers le sommet de la hauteur (Strickland et Martyn, 2001), là où l'altération a produit des dépôts potentiels de fer.

La séricite, avec plus ou moins d'argile, est également observée dans les roches métavolcaniques felsiques et les schistes métamorphisés de la Formation de Sainte Barbe, 2 à 4 km à l'Ouest, au Nord-Ouest, au Sud-Ouest et au Sud-Est de la zone potentielle de cuivre de Sainte Barbe. Ces derniers affleurements de séricite/argile sont plus probablement liés à des unités schisteuses. Les présences de mica/argile les plus à l'Ouest sont associées à une unité de formation de fer rubané au sein de la Formation de Sainte Barbe (B, Fig. 6).

Le sommet oxydé supergène de goethite noire, avec plus ou moins de pyrolusite, au sein des agrégats dendritiques et botryoïdaux associés à l'altération de la magnétite et/ou des carbonates de Fe-Mg-Ca, au niveau des zones potentielles d'El Khader et Breche au niveau du dôme de Legleitit el Khader (Fig. 6), apparaît en nuances de rouge foncé (Fig. 13), ce qui indique une réflectance relative élevée dans la bande 4, due à la goethite et à l'absorption dans les bandes 6 et 8 produites par une kaolinite peu visible (Fig. 16) et à de possibles restes de carbonates. Le faible albédo du dôme, dû à la goethite noire, est exprimé par le caractère foncé des nuances rougeâtres. La couverture de goethite noire (actuellement prospectée pour son potentiel comme gisement de fer) est à grains grossiers, comme le montre la saturation (grande largeur et fond plat) de l'absorption de fer centrée à proximité de 1,00 micromètre (Fig. 16).

Les graviers du reg Quaternaire, situés au Nord et à l'Ouest de Legleitat el Khader apparaissent sous la forme de teintes rougeâtres, en raison de la présence de minéraux Al-OH secondaires (kaolinite, smectite et mica possible) en plus d'un composant de fer ferrique associé à un vernis du désert, à des roches altérées contenant du fer, et/ou à un développement naissant de ferricrète. La Figure 18 présente le spectre de réflectance de la surface d'un reg, au Nord-Ouest de Legleitat el Khader.

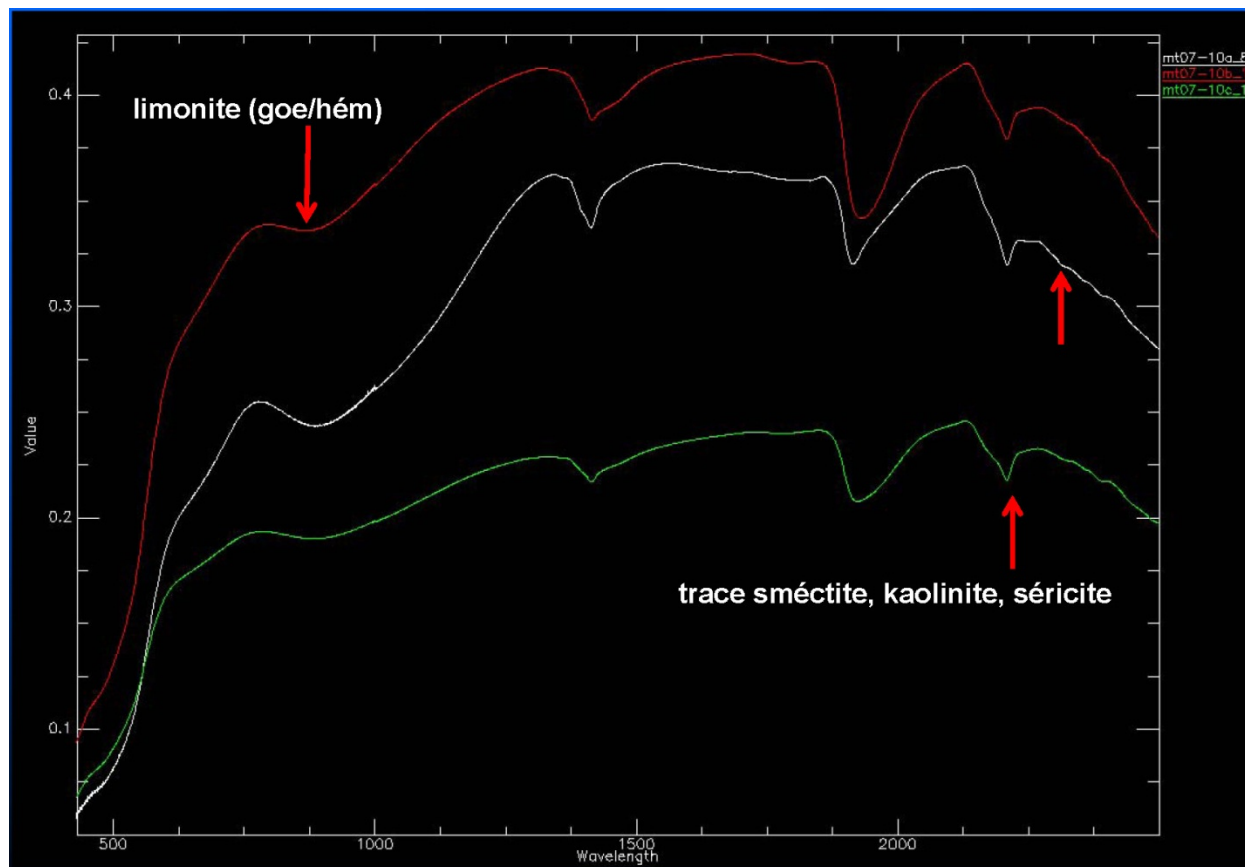


Figure 18. Spectre de laboratoire de la surface du reg, prélevé à environ 5 km au Nord-Ouest de Legleitat el Khader. Les trois spectres présentés ont été obtenus à partir de parties issues d'un même échantillon. Les images produites par ASTER et de Landsat (voir les larges zones rougeâtres de la Fig. 6), font clairement apparaître le fer ferrique et les plus faibles quantités de kaolinite +/- smectite +/- séricite à la surface du reg. La localisation des échantillons est présentée au niveau de la Figure 47. La longueur d'onde en nanomètres (micromètre x 1 000) est indiquée sur l'axe des x.

Au sein des données ASTER (nuances verdâtres sur la Fig. A6), la Formation d'Akjoujt, du Groupe d'Oumachoueima, est caractérisée par une réponse spectrale forte pour les carbonates/amphiboles. Cette unité est constituée de basaltes métamorphisés et de micrograbbs localement carbonatés, avec une présence locale possible de chlorite. Les basaltes métamorphisés de la Formation de Sainte Barbe, qui n'ont pas été carbonatés, présentent une beaucoup plus faible réponse pour les carbonates (typiquement de bleu foncé à bleu-vert au niveau de la Fig. 6). Les unités qui contiennent des FFR de faciès carbonaté, tels que la Formation de Lembeitih, présentent une réponse en carbonate plus faible que les metabasalts de la Formation d'Akjoujt.

La Formation d'Irarchene El Hamra, du Groupe d'Oumachoueima, n'est généralement pas caractérisée par une forte réponse minérale pour les données ASTER, réponse qui apparaît en bleu foncé sur les images composites 468/RVB (Figure 6). Cette unité a été décrite dans le cadre de PRISM-I comme étant composée d'argilite indifférenciée, de métasiltite, d'ardoise, de schiste pélitique, de méta-grauwacke et de grès/quartzite. Les unités porteuses d'argile et de micas au sein de cette unité (probablement des argilites, des métasiltites et des quartzites) peuvent être identifiées par de petites zones magenta et les alluvions aussi par une teinte magenta. Ces unités peuvent également être facilement identifiées au niveau des images composites de rapports de couleurs. Une réponse de chlorite/carbonate est également localement présente au sein de cette formation.

Les métasiltites chloritisées et les méta-grauwackes de la Formation d'Atomai, du Groupe d'Oumachoueima, peuvent présenter une réponse pour la chlorite pour les images ASTER (verdâtre au niveau des Fig. 6 et 13, bleuâtre au niveau de la Fig. 14), y compris sur la hauteur d'Irarchene el Hamra, à 8 km au Sud de la zone potentielle de cuivre de Sainte Barbe (Fig. 6), et le long des rebords Nord et Ouest du dôme d'El Khader de Legleitat (Fig. 13 à 15). Une réponse de minéraux à Al-OH peut être visible au niveau de la Formation d'Atomai, dans les zones plus limoneuses et peut-être altérées en argiles, comme le long de l'extension Est de la hauteur de Legleitat el Khader, sur la hauteur, à 7 km au Nord-Est de la zone potentielle de tungstène de Tabrinkout, et sur la hauteur d'Irarchene el Hamra. La Figure 19 présente une image composite 468/RVB de la hauteur de Tabrinkout, sur laquelle ont été indiqués des emplacements de prélèvement d'échantillon, des contacts lithologiques de PRISM-I, et des présences minérales. Les échantillons MT07-11 et 12-MT07 ont été prélevés au niveau des zones rougeâtres, indicatrices de la présence de minéraux Al-OH + de fer ferrique. La Figure 20 montre que ces endroits ont été identifiés comme contenant de l'argile et (ou) du mica + du fer ferrique (apparaissant en orange), à l'aide de la méthodologie d'analyse automatisée de Landsat TM, mentionnée ci-dessus (Fig. 15). Les deux échantillons contiennent de l'hématite et de la kaolinite, avec MT07-12 situé plus près du centre de la hauteur, et contenant une kaolinite plus abondante et bien cristallisée (Fig. 21). Les deux sites sont caractérisés par des métasédiments rougeâtres friables, avec de l'hématite remobilisée le long des fractures, au sein de couches plus compétentes. MT07-11 a été prélevé dans des roches cartographiées dans le cadre de PRISM-I comme une formation de fer rubané au sein de la Formation d'Atomai (Fig. 19). Une couverture de goethite noire botryoïdale, semblable à celle trouvée dans la zone d'El Khader, a été trouvée au voisinage de l'échantillon MT07-12, bien qu'ayant une épaisseur et une abondance beaucoup plus faibles (Fig. 22). Une réponse chloritique, avec des zones localisées de minéraux à Al-OH, est localement visible au sein des unités de roches métavolcaniques de la Formation d'Atomai, surtout aux extrémités Nord-Ouest et Sud-Est de la hauteur (couleur verte sur la Fig. 19).

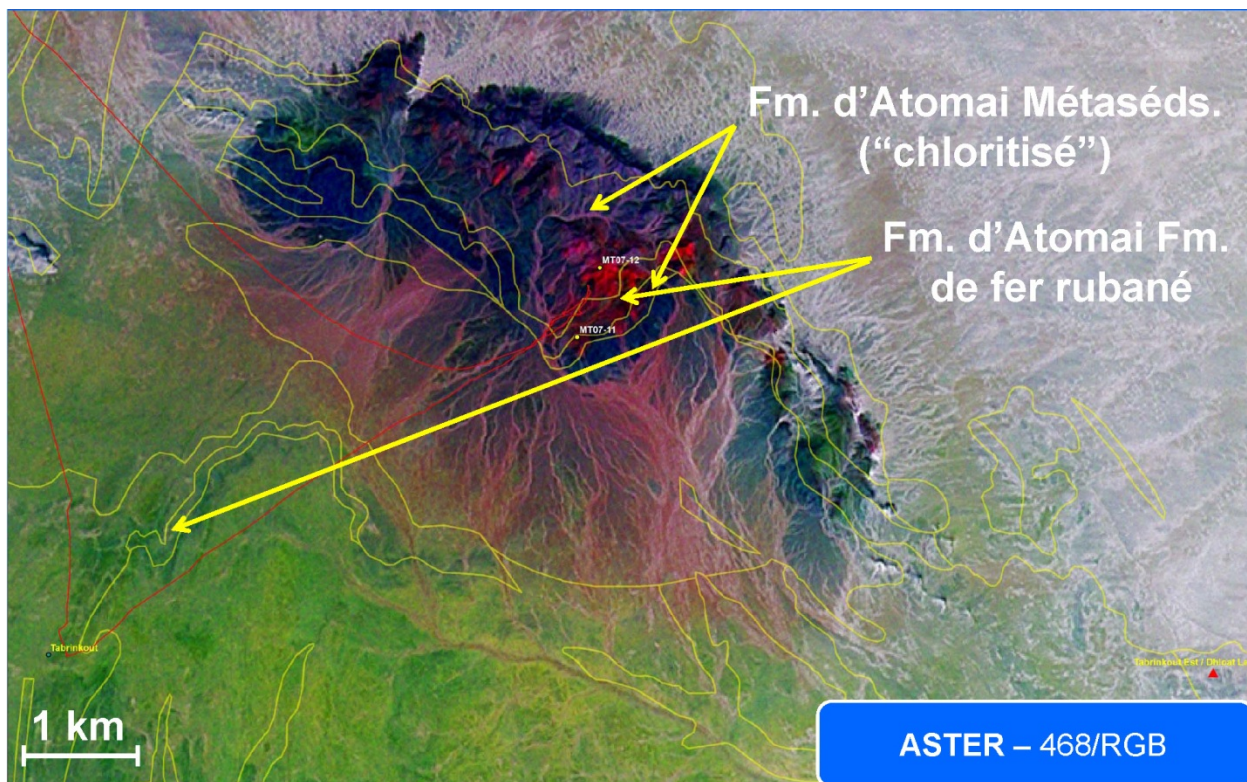


Figure 19. Image composite ASTER 468/RVB de la hauteur de Tabrinkout (Fig. 6), avec localisation des sites de prélèvement d'échantillon, des contacts lithologiques de PRISM-I (lignes jaunes), des points de présence minérale (indices), et des parcours GPS des véhicules provenant de la campagne de terrain de 2007 (lignes rouges). FFR (BIF) = Formation de Fer Rubané.

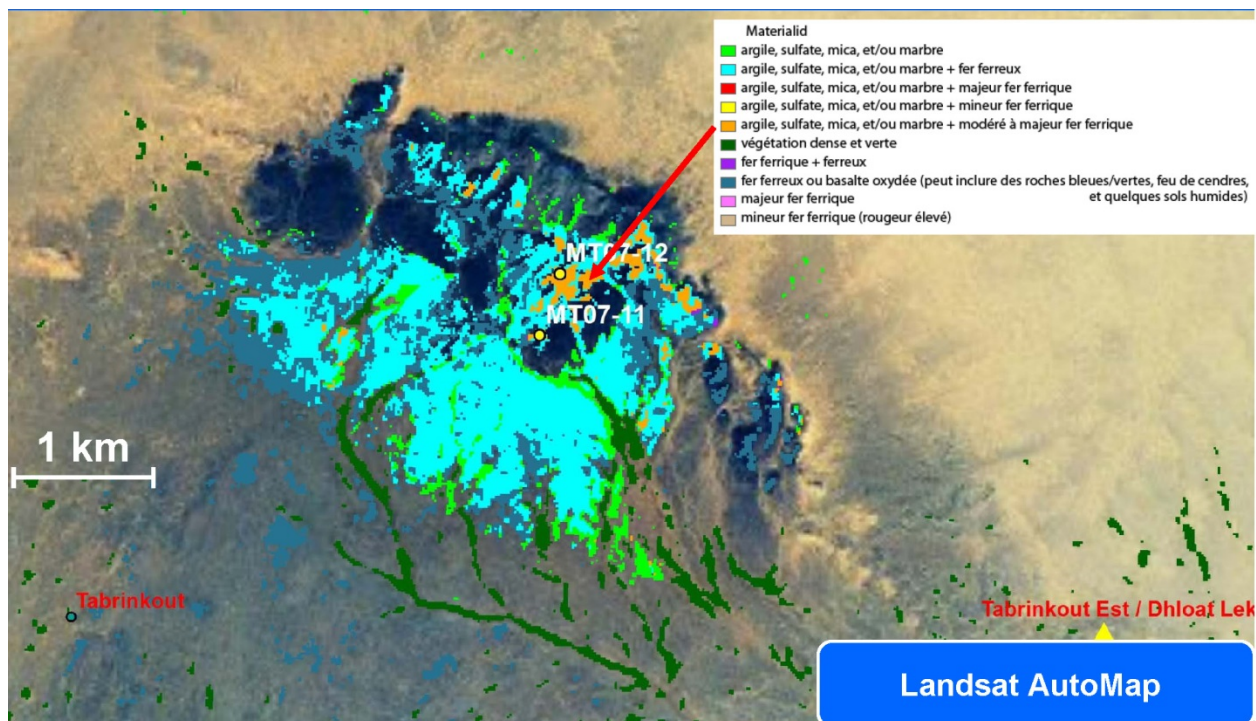


Figure 20. Carte des groupes minéraux produite par l'analyse automatisée, fondée sur l'analyse des rapports des données Landsat montrant la hauteur de Tabrinkout (Fig. 6). Les sites de prélèvement d'échantillons sur le terrain sont indiqués par des cercles jaunes. Les roches contenant la kaolinite et la goethite au sein des unités chloritisées de la Formation d'Atomai ont été identifiées comme contenant de l'argile et (ou) du mica + du fer ferrique (apparaissant en orange). La chlorite des alluvions provenant des métasédiments de la Formation d'Atomai et les possibles FFR de faciès carbonaté ont été identifiés comme « fer ferreux » +/-argile et (ou) de mica (cyan).

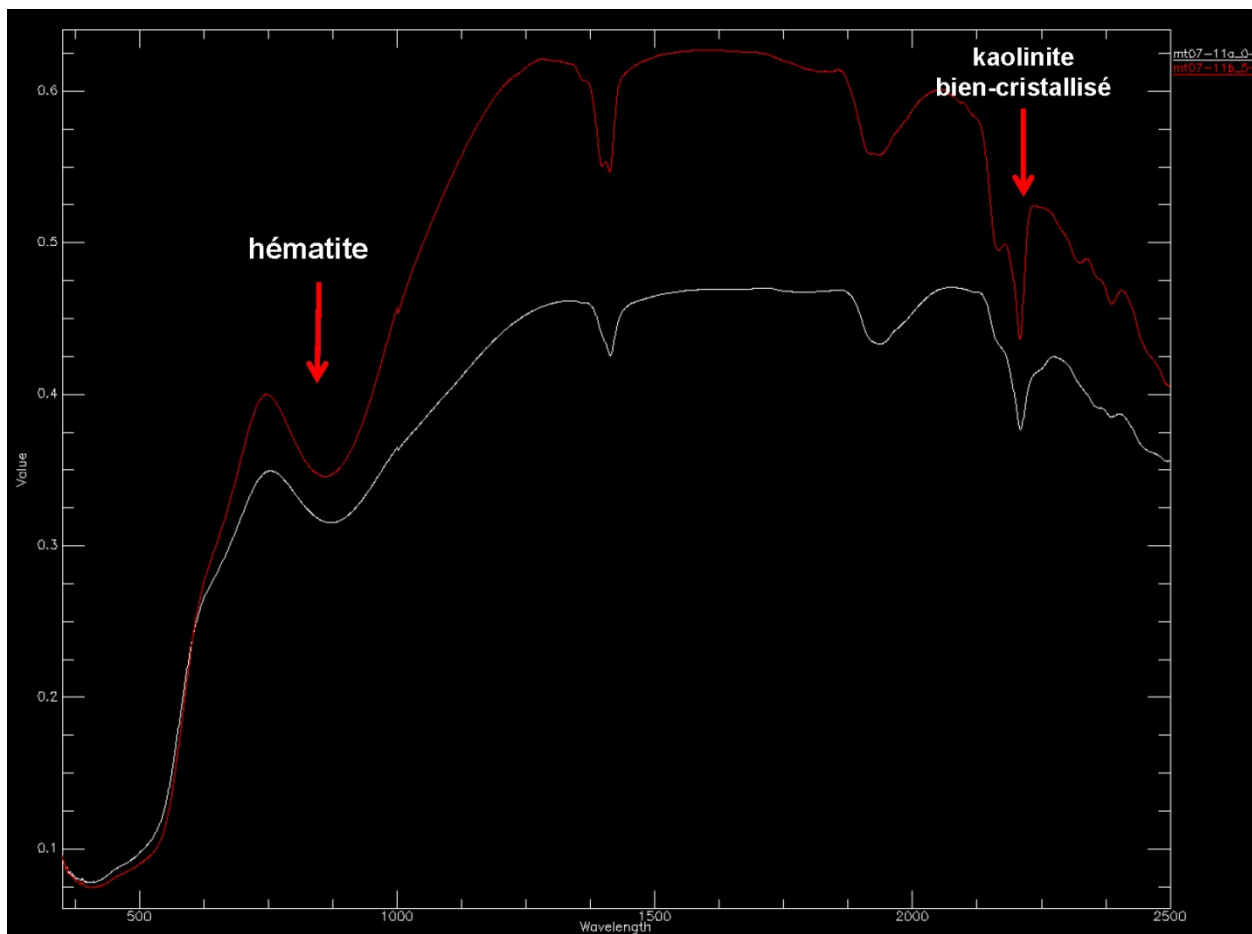


Figure 21. Spectre de laboratoire des métasédiments kaolinisés de la Formation d'Atomai. Le spectre en rouge, correspondant au site de prélèvement d'échantillon MT07-12, indiqué sur les Figures 19 et 20, montre un doublet d'absorption profond proche de 2,2 micromètres, indiquant de la kaolinite bien cristallisée. La longueur d'onde en nanomètres (micromètre x 1 000) est indiquée sur l'axe des x.

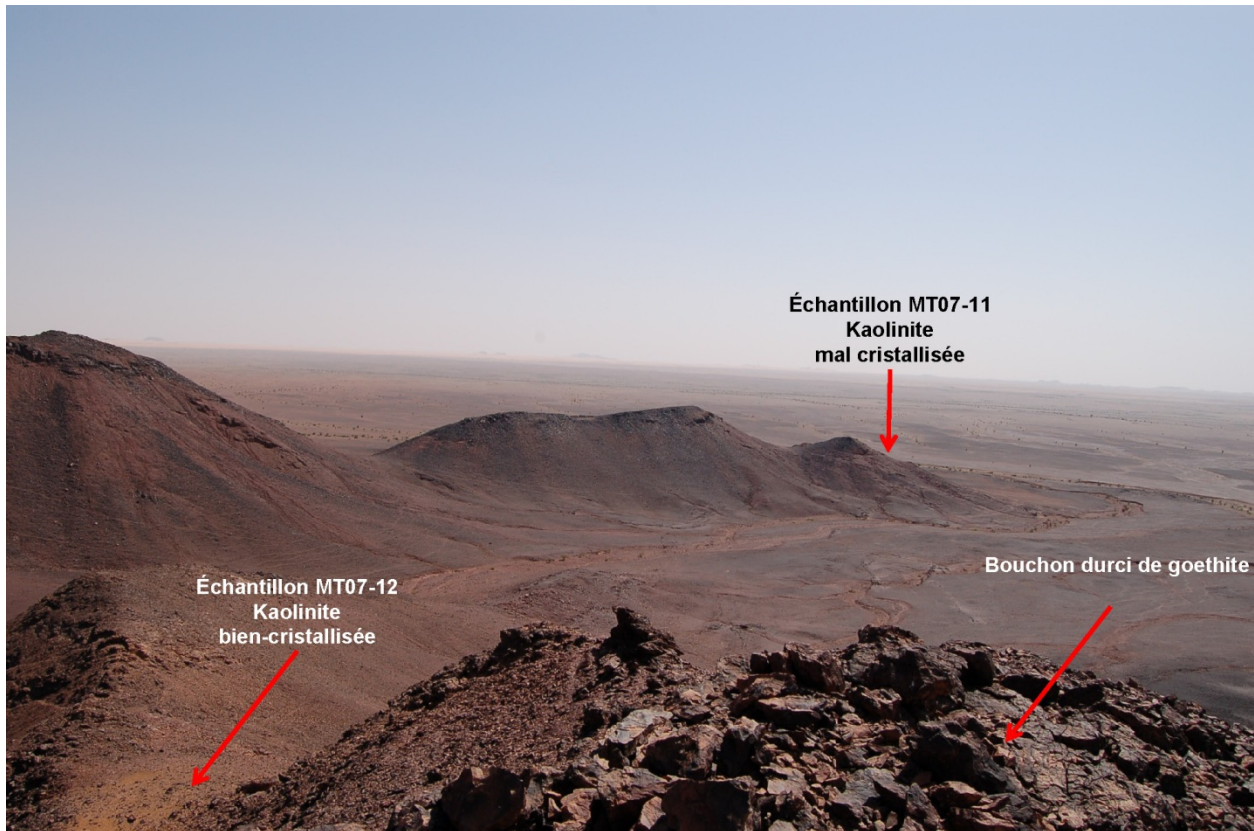


Figure 22. Photographie de la hauteur de Tabrinkout, en direction du Sud-Ouest. Il est possible de noter les petits affleurements de couverture de goethite, semblables à ceux de la hauteur de Legleitit el Khader.

L'analyse par l'USGS, par diffraction aux rayons X, du minerai d'oxyde de fer-cuivre-or-cobalt du gisement de Guelb Moghrein, a identifié le principal minerai de carbonate comme étant de la magnésite, avec une présence de dolomite dans quelques échantillons. Dans la littérature (par exemple, Strickland et Martyn, 2001), le minéral a été décrit comme étant de la magnésite, de la sidérite ou une sidérite magnésienne (pistomésite). Le spectre de réflectance SWIR, dont le continuum a été soustrait, des échantillons de prélevés à la main et des échantillons de forage provenant du dépôt, est présenté au niveau de la Figure 23. La Figure 24 présente la gamme complète de spectres, sans soustraction de continuum. Les échantillons bien caractérisés sont décrits en détail dans d'autres rapports du projet PRISM-II. Les échantillons présentent généralement un carbonate mixte Fe et Mg, bien que la sidérite puisse être considérée comme dominante par rapport à la magnésite dans la plupart des échantillons. Les échantillons CT07RIM-09-01 (magenta), CT07RIM-02-01 (jaune), CT07RIM-14-1 (marron), et 07RIM-17 (vert) montrent les plus fortes indications directes SWIR de présence de sidérite (Fig. 23), et le premiers des échantillons présente des absorptions de fer ferrique importantes dans le visible et le proche infrarouge (Fig. 24), pouvant également correspondre à de la sidérite altérée. On peut estimer que les échantillons CT07RIM-14-1 et CT07RIM-09-01 contiennent un composé magnésien, en raison de la faible absorption secondaire à proximité de 2,292 micromètres. La Figure 24 montre que les absorptions SWIR pour les carbonates, pour 07RIM-01, 07RIM-07-17 07RIM et CT07RIM-02-02 sont très peu profondes, en raison du faible albédo des échantillons (carbonate noir à gris sombre) et du contenu en magnétite, et ne sont donc pas très bien adaptés à une identification précise des minéraux. L'échantillon CT07RIM-02-02 présente un fer ferrique abondant, ce qui est la preuve de la plus forte de la présence de magnésite, avec une faible

absorption à proximité de 2,292 micromètres. Le spectre des échantillons 07RIM-01 et 07RIM-07 présente un meilleur potentiel pour la magnésite que pour la sidérite.

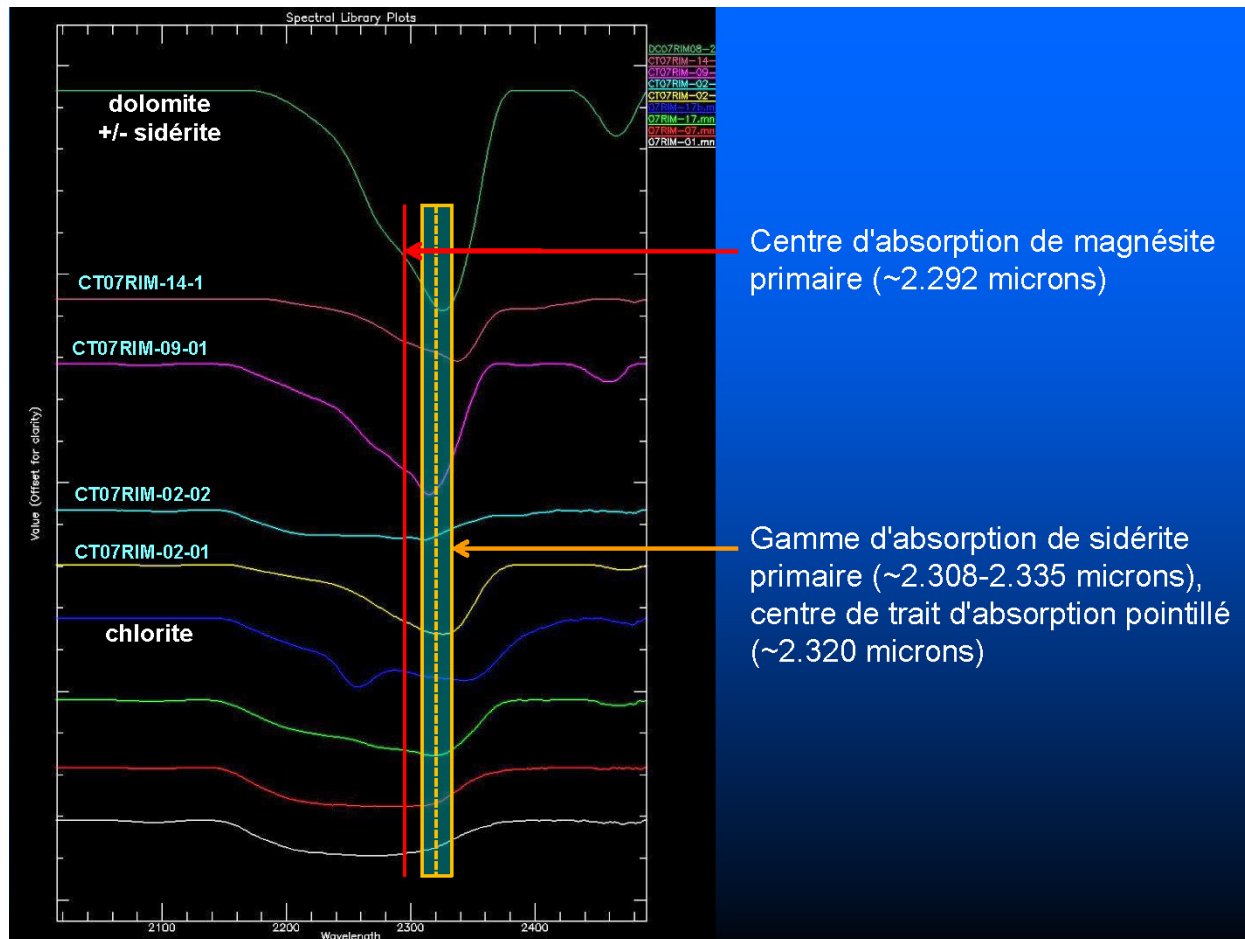


Figure 23. Spectres de réflectance SWIR dont le continuum a été retiré des échantillons, provenant du dépôt de Guelb Moghreïn, près d'Akjoujt. Les positions des caractéristiques d'absorption d'identification primaire de la sidérite et de la magnésite sont indiquées (Clark et al., 2003b ; Grove et al., 1992). La longueur d'onde en nanomètres (micromètre*1000) est indiquée sur l'axe des x.

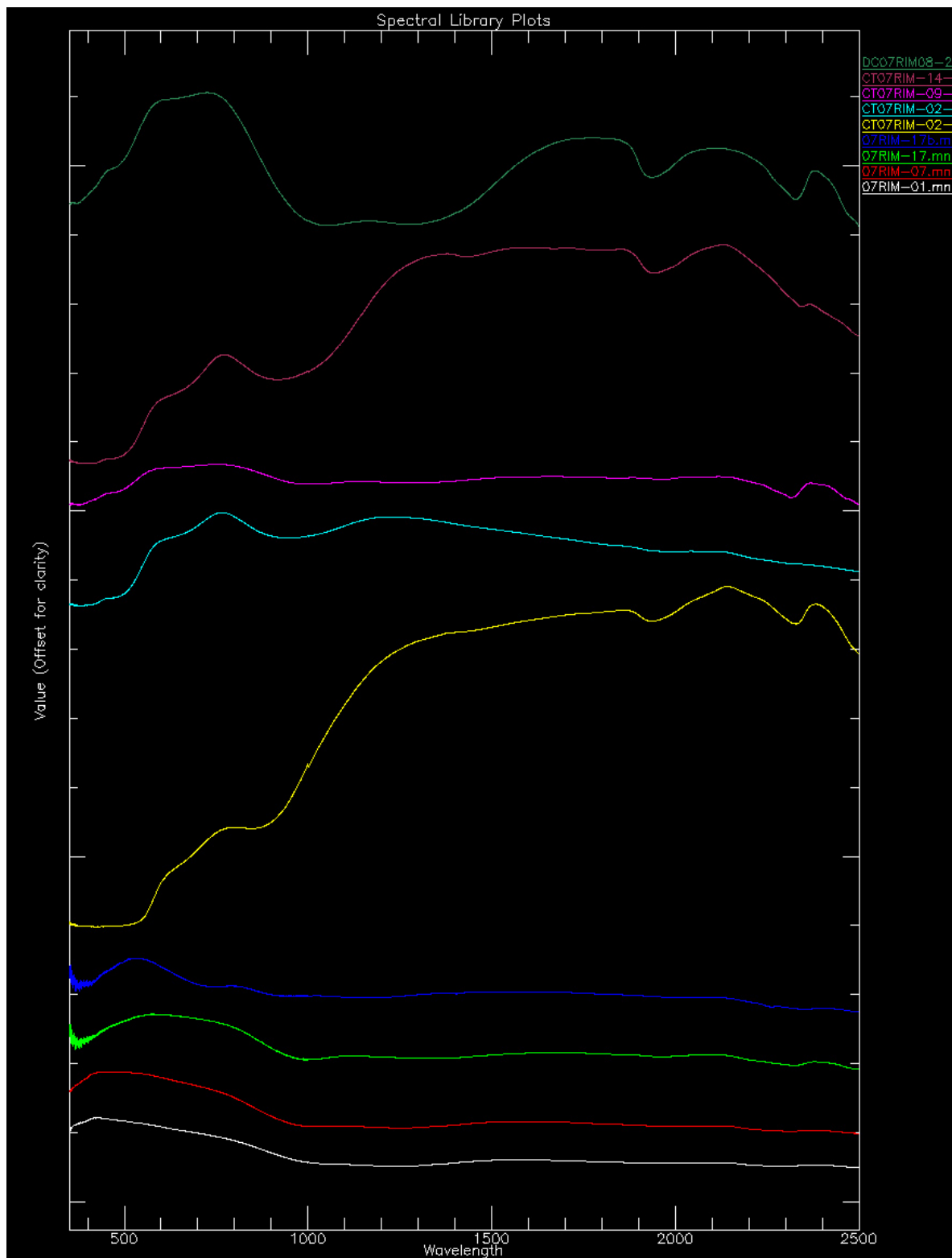


Figure 24. Spectres de réflectance des échantillons provenant du dépôt de Guelb Moghreïn, près d'Akjoujt. Les spectres sont identiques à ceux de la Figure 23, mais sont présentés dans leur totalité (environ 0,35 - 2,50 micromètres). Il convient de noter que les caractéristiques d'absorption SWIR à proximité de 2,30 micromètres des quatre spectres, en bas, sont très faibles. La longueur d'onde en nanomètres (micromètre x 1 000) est indiquée sur l'axe des x.

2.9.2 Région de Chami-Tasiast

Les ceintures Archéennes de greenstones de la région de Chami, à environ 200 kilomètres au Nord-Ouest d'Akjoujt, ont un fort potentiel pour ce qui concerne les dépôts d'or orogéniques, et hébergent le gisement d'or de Tasiast, qui est en cours d'exploitation le long d'une structure orientée Nord-Sud. Le gisement de Tasiast a été visité au cours de la campagne de terrain de 2007, et des visites de l'exploitation minière, ainsi que de nombreuses informations géologiques, ont été fournies par Norman Bailie.

Au niveau du gisement de Tasiast, on suppose que l'or a été déposé après que les roches encaissantes aient été déformées. Des arsénopyrites, pyrrhotites et pyrites épigéniques précoces, ont été introduites le long des zones structurales (Fig. 25). De l'or tardif a été déposé le long de failles inverses distinctes et de veines transversales, au sein de schistes verts déformés à haute teneur, contenant des grenats, de type Algoma, et une formation de fer rubané à faciès de magnétite de la Formation Mésoarchéenne d'Aouéoua. D'autres minerais de gangue incluent le quartz, la biotite, l'actinolite, la tourmaline, et la magnétite. Les minéraux soufrés comprennent la chalcopryrite, la pentlandite et le tellure.

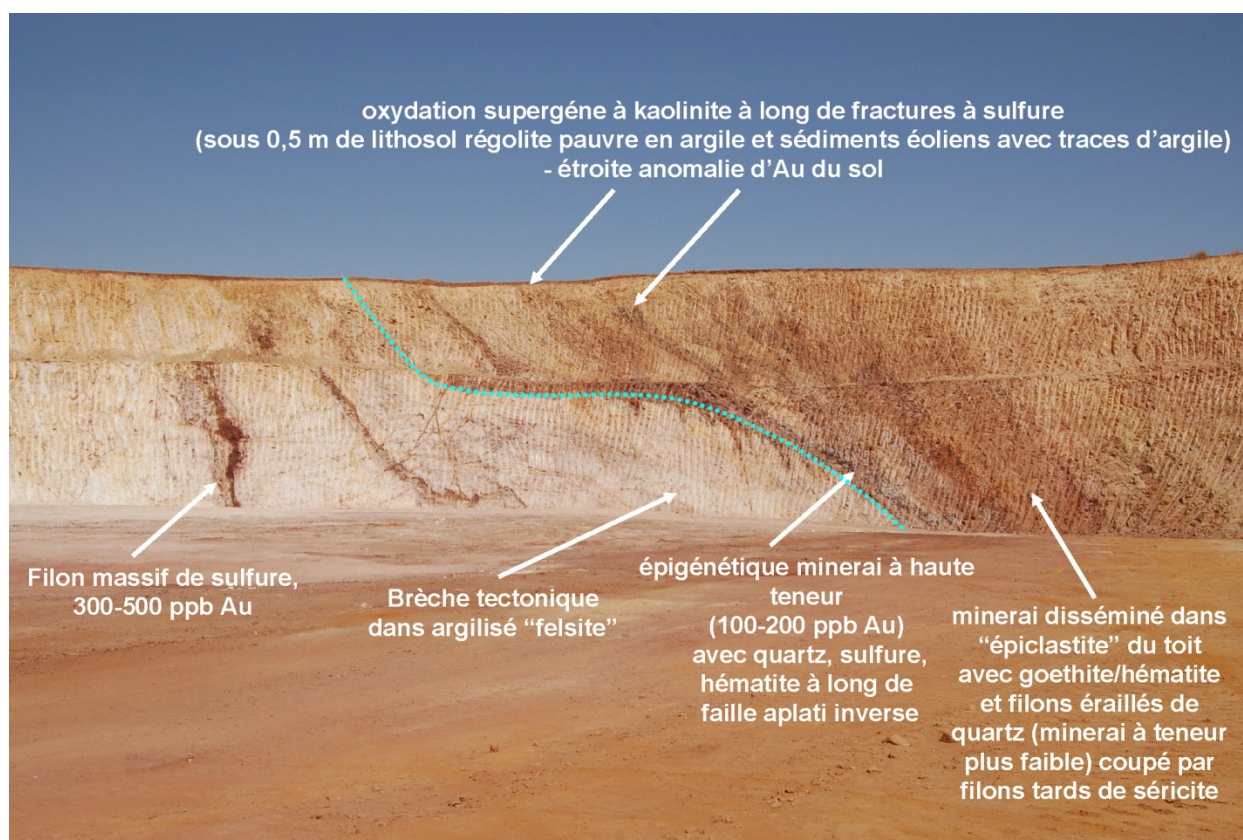


Figure 25. Zone de cisaillement contenant de l'or, au niveau du puits de Nord Piment, gisement d'or orogénique de Tasiast. L'information sur la teneur en minéral a été fournie par Norman Bailie. La largeur de la photo, au niveau de la paroi de la mine, est d'environ 80 m.

La figure 26 présente le spectre de réflectance des échantillons prélevés à la main au niveau du gisement de Tasiast. Des traces de kaolinite +/-smectite sont présentes dans les sédiments éoliens à grains fins, intervenant dans les interstices du régolithe de lithosol, directement au-dessus des zones minéralisées.

La kaolinite, principalement d'origine supergène, provenant de l'altération de la pyrite et des autres sulfures, est très présente au sein de l'altération disséminée et de la minéralisation du compartiment supérieur. Ce dernier contient également de la séricite dans les veines tardives fines et transversales, au sein d'un minerai à forte teneur en or. De la goéthite avec +/- d'hématite est présente dans tous les échantillons, avec une plus grande abondance dans les roches de la mine fraîchement exposées.

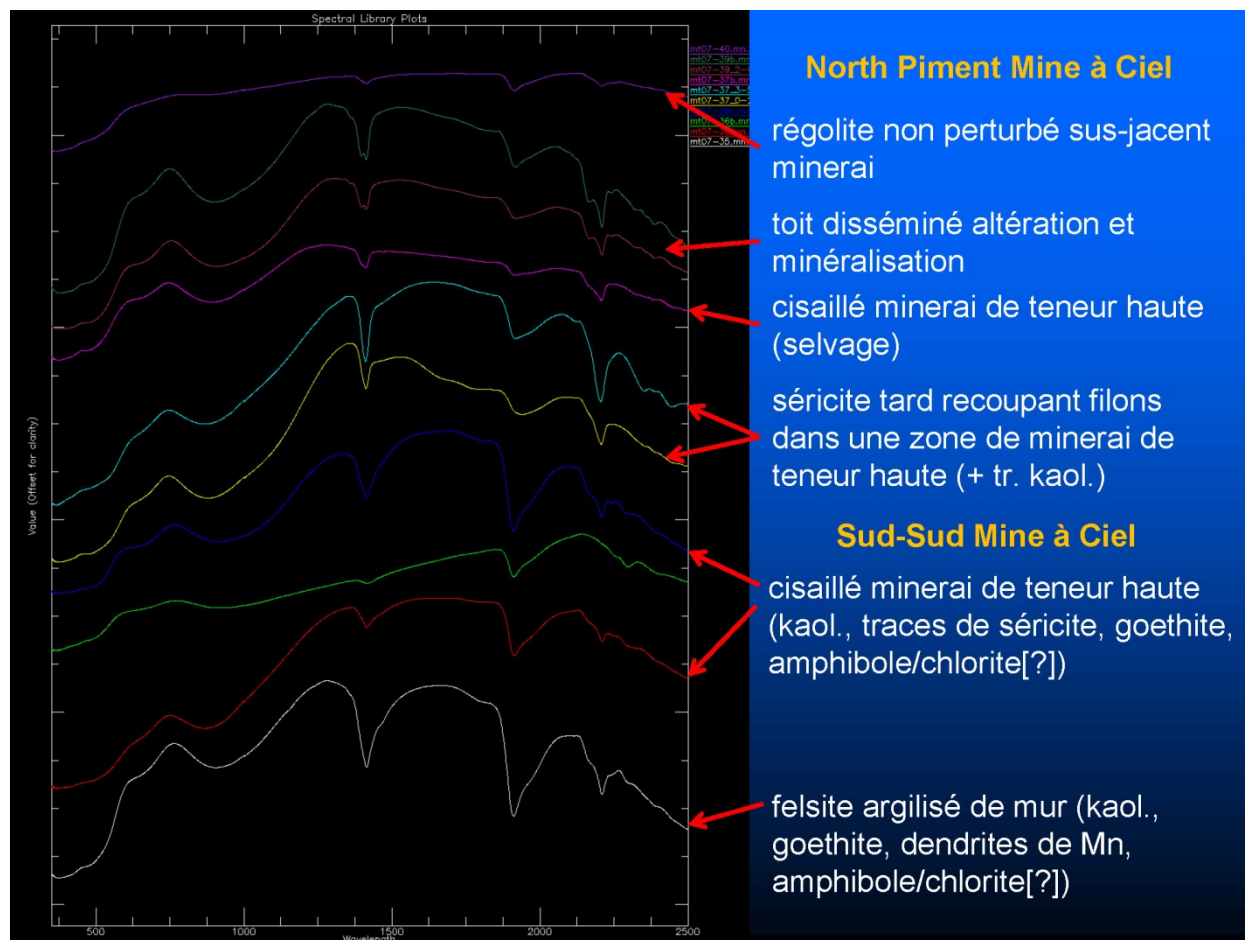


Figure 26. Spectre de réflectance des échantillons provenant du gisement de Tasiast. La longueur d'onde en nanomètres (micromètre x 1 000) est indiquée sur l'axe des x.

Les données ASTER acquises en 2000 et 2006 de la région de Chami/Tasiast ont été regroupées et traitées. Les données de 2000 (Fig. 27) montrent la région avant la mise en place de la mine de Tasiast, tandis que les données de 2006 (Fig. 28) montrent le début du développement de la mine, avec des zones rougeâtres brillantes (indicatrices de minéraux à Al-OH, probablement des argiles) sur le site du broyeur, des logements, et dans la zone du puits de Nord Piment. Ces zones perturbées apparaissent dans des couleurs jaunes sur les images composites de rapports 134/RVB ASTER, indiquant la présence de minéraux à Al-OH et de fer ferrique. Les FFR apparaissent en bleu, ce qui montre un faible albédo et une faible présence visible de phyllosilicates à Al-OH, ainsi que de Mg-OH et de minéraux carbonatés. Des metabasites amphibolitiques de la Formation de Sebkhet Nichare (Groupe de Lebzenia) apparaissent dans des teintes vertes.

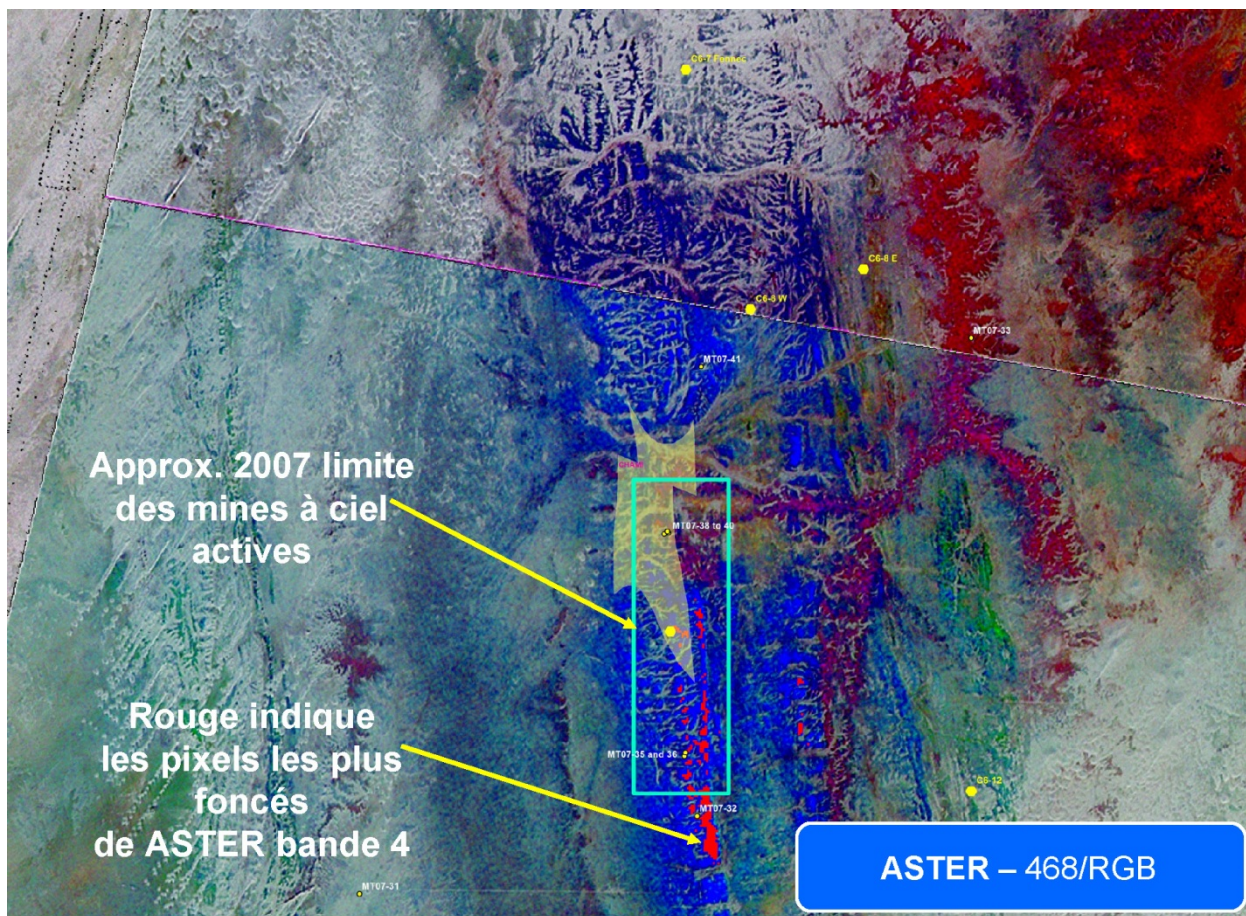


Figure 27. Image composite 468/RVB ASTER de la région entourant le gisement aurifère de Tasiast, produite à partir des données ASTER de 2000, acquises avant le développement de la mine. Les pixels rouges en surimposition sur l'image représentent les pixels les plus sombres de bande 4 ASTER. Les points de prélèvement des échantillons sont indiqués par les cercles jaunes. Les points de présence des ressources de PRISM-I sont indiqués par de plus grands polygones. L'étendue approximative de l'exploitation minière en cours en 2007 (puits de Nord Piment et de Sud Sud) est indiquée par l'encadré cyan. Une unité démagnétisée de FFR provenant de la carte géologique de PRISM-I (polygone jaune translucide) recouvre partiellement la partie Nord du gisement. Point central de l'image : 15,508°O, 20,588°N.

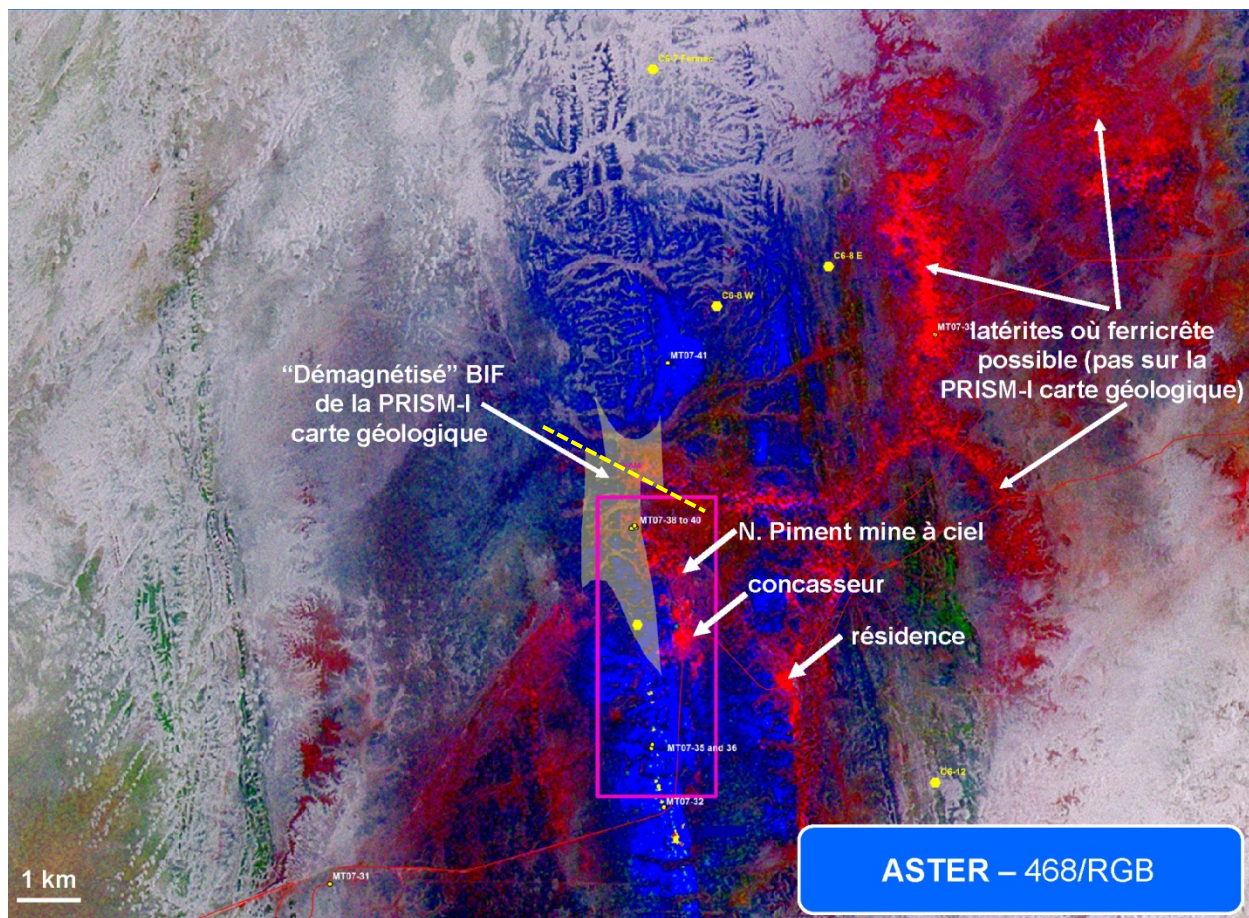


Figure 28. Image composite 468/RVB de la zone entourant le gisement aurifère de Tasiast, produite à partir des données ASTER de 2006, montrant le développement naissant de la mine. Les points de collecte des échantillons sont indiqués par les cercles jaunes. Les points de présence des ressources de PRISM-I sont indiqués par de plus grands polygones. L'ampleur approximative de l'exploitation active en 2007 (puits de Piment Nord et de Sud Sud) est indiquée par l'encadré cyan. Les parcours GPS des véhicules de la campagne de terrain de 2007 sont indiqués par des lignes rouges. Une unité démagnétisée de FFR de la carte géologique de PRISM-I (polygone jaune translucide) recouvre partiellement la partie Nord du gisement. Les couleurs rouges et roses (phyllosilicates Al-OH + fer ferrique), coïncidant avec les parties de FFR démagnétisées, pourraient être de l'altération argileuse (peut-être responsable de la démagnétisation) le long d'une importante faille régionale cartographiée dans le cadre de PRISM-I (ligne en pointillés jaune), qui décale les unités, mais qui sont probablement des unités vestiges de latérites ou de ferricrète, aucune d'entre-elles n'ayant été cartographiée dans cette zone dans le cadre de PRISM-I. Il convient aussi de noter que les latérites sont partiellement recouvertes de sable éolien blanchâtre dans l'angle Sud-Est de l'image. Point central de l'image : 15,508°O, 20,588°N.

La Figure 27 montre que les pixels les plus sombres de la bande 4 ASTER (apparaissant en rouge) correspondent étroitement avec la FFR recouvrant le dépôt de Tasiast. Une explication possible de ce phénomène est l'abondance plus importante des minéraux à phase opaque, tels que la magnétite et la pyrite, au sein de la FFR recouvrant le gisement, couplée avec une très faible teneur en silice. Il est recommandé que les données ASTER fournies (particulièrement les ensembles de données à six bandes) soient utilisées pour extrapoler ces résultats à travers toutes les ceintures de greenstones des régions de Chami et d'Ahmeyim, pour la recherche d'autres unités de FFR avec des albédos exceptionnellement bas.

Dans les parties Ouest et Nord-Ouest de la carte géologique de Chami, y compris dans la zone des présences de fer et d'or de Lebzenia, les latérites détritiques et les ferricrètes cartographiées dans le cadre PRISM-I, apparaissent dans des tons rougeâtres, dus à la présence de minéraux de fer ferrique et d'argiles et/ou de micas mineurs. De telles unités n'ont pas été cartographiées par PRISM-I à proximité du gisement d'or de Tasiast, bien que des roches présentant des signatures spectrales et des caractéristiques de présence similaires apparaissent clairement sur l'imagerie ASTER (Fig. 27 et 28). La Figure 29 montre le spectre de réflectance de la latérite détritique ou de la ferricrète exposées à 9 km à l'Ouest-Sud-Ouest de la mine de Tasiast. La nature profonde et large des indices de transition électronique du champ de cristal, centrée à proximité de 1,00 micromètre, produite par le fer ferrique, est indicatrice de goethite à grains grossiers. Des traces de kaolinite sont indiquées par le doublet d'absorption vibratoire d'Al-OH, à proximité de 2,20 micromètres. Cette minéralogie est conforme à l'interprétation des surfaces de couleur rouge sur les images composites de couleur 468/RVB (Fig. 5). La goethite, avec une taille de grains plus grossière, montrera une augmentation importante de réflectance entre 1,00 et 1,34 micromètre et une faible réflectance globale dans les longueurs d'onde visibles (0,3 à 0,67 micromètre ; Rockwell, 2004). De telles roches montreront de valeurs faibles de rapports Landsat 3/1 et ASTER 2/1 (employés pour détecter le fer ferrique avec l'absorption profonde du transfert de charge dans des longueurs d'onde bleues et ultra-violettes, par rapport aux longueurs d'onde dans les rouges ; Tableau 2) et des valeurs élevées de rapports Landsat 5/4 et ASTER 4/3. Par conséquent, les latérites et (ou) les ferricrètes ne présentent pas de réponse importante pour le fer ferrique, sur les images composites à rapports de couleurs Landsat et ASTER, mais montreront une réponse modérée à forte pour les minéraux à Al-OH (en magenta sur les images composites de rapports Landsat, en vert sur les images composites de rapports 134/RVB ASTER, et en jaune sur les images composites de rapports 234/RVB ASTER).

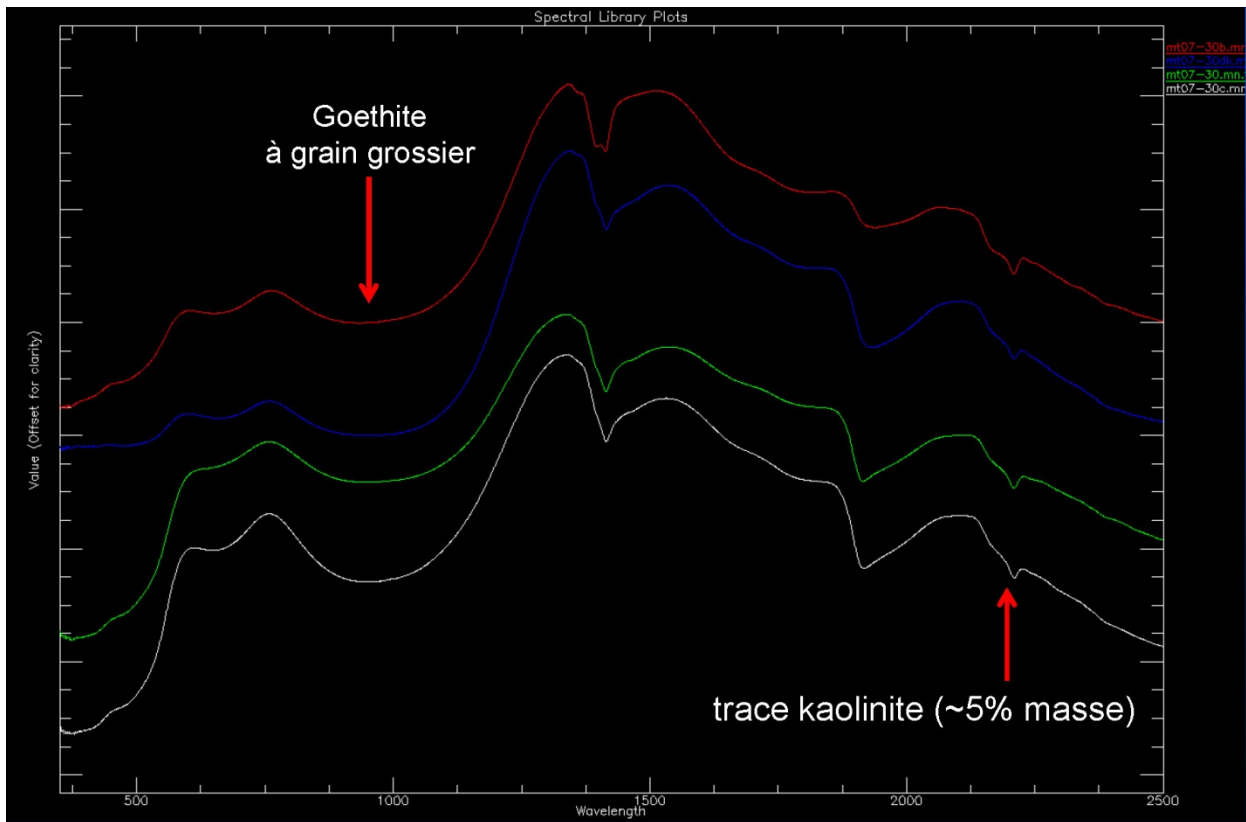


Figure 29. Spectres de réflectance de la latérite et (ou) de la ferricrète, enregistrés à l'Ouest de la mine de Tasiast (échantillon MT07-30). La longueur d'onde en nanomètres (micromètre x 1 000) est indiquée sur l'axe des x.

2.9.3 Région de Kedia D'Idjil

La hauteur de Kedia D'Idjil (zone 3, Fig. 1) héberge plusieurs gisements importants, de type supérieur, de formation de fer à hématite au sein des roches Paléoproterozoïques. Le cœur de la hauteur est formé d'un klippe allochtone charrié de la Formation de Seyala, composé de conglomérats à galets arrondis de quartzite, et de quartzite ferrugineuse. Le klippe plonge généralement vers Sud-Est, sous les sédiments du Bassin de Taoudéni. L'escarpement le long de la bordure Nord de la hauteur est sous-tendu de quartzite, de quartzites ferrugineuses, de grès micacés, et de schistes de la Formation de Tazadit, du Complexe d'Idjil, hébergeant les gisements de fer. La stratification est de direction Est-Ouest au niveau du bord Nord de la hauteur, et vers le sud le long des flancs Est. La nature sombre et vernissée des roches de la hauteur s'exprime par leur apparence noire à rouge foncé sur les images composites 468/RVB ASTER (Fig. 30). Les micas provenant des quartzites sont présents dans les alluvions et colluvions entourant les hauteurs et présentent une réponse rougeâtre (phyllosilicates d'Al-OH + fer ferrique). Des unités de quartzites micacées supplémentaires, au sein de la Formation d'Agueni (Groupe de Char), sont visibles dans des tons rougeâtres, sur les flancs Est de la hauteur, au Sud de la ville de Zouérate, et immédiatement à l'Ouest de l'emplacement de l'échantillon MT07-18 (A, Fig. 30). Ces quartzites présentent une couleur jaunâtre sur les images composites de rapports 234/RVB ASTER, ce qui suggère une composante argileuse. Les schistes micacés de la Formation d'Achouli, au sein du Complexe d'Idjil, sont visibles dans les tons rougeâtres, à 1,5 km au Sud-Ouest de l'emplacement de l'échantillon MT07-19. Les images composites de rapports 134/RVB

ASTER montrent que les sable éoliens contenant du fer ferrique (tons rougeâtres) sont rassemblés contre les flancs Nord et Est de la hauteur, en raison de vents dominants Nord-Est.

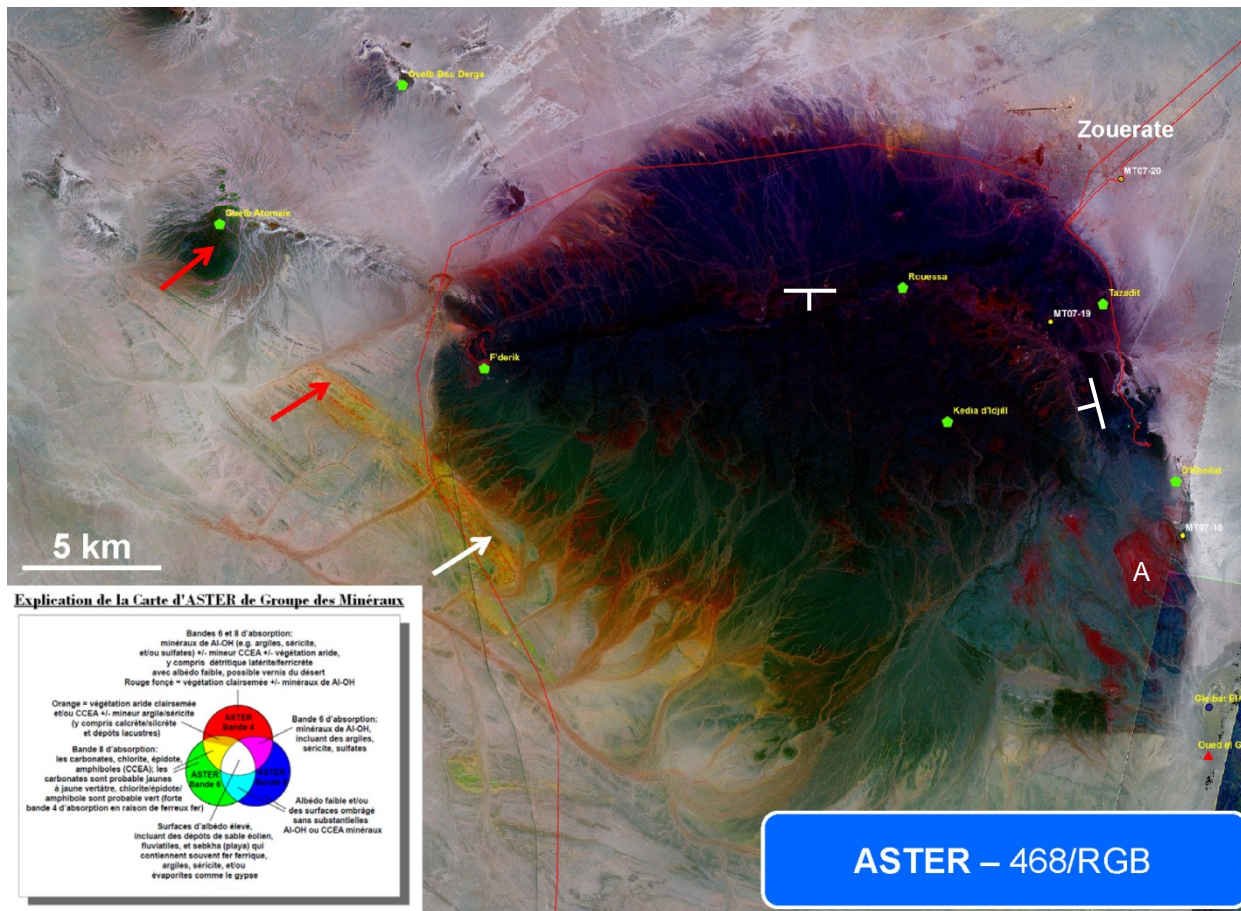


Figure 30. Image composite renforcée 468/RVB ASTER de la région de Kedia D'Idjil. Les FFR et les quartzites ferrugineuses de la Formation de Mirikli (TRmf), du Complexe de Tiris, sont indiquées par les flèches rouges. La flèche blanche indique des roches ayant une stratification et une signature spectrale semblable à l'unité de TRmf, et qui sont très probablement des FFR, mais qui ont été cartographiées au sein d'une unité non-différenciée de la Formation de Mirikli, (TRmi), pouvant contenir du granite, du gneiss migmatitique, de l'amphibolite, de la quartzite, et des FFR. Les symboles de direction et de pendage présentent l'orientation de la stratification des roches métasédimentaires Paléoproterozoïques. Les points de collecte des échantillons sont indiqués par les cercles jaunes. Les points de présence de ressources de PRISM-I sont indiqués par de plus grands polygones. Les parcours GPS des véhicules de la campagne de terrain de 2007 sont indiqués par des lignes rouges. A = quartzites de la Formation d'Agueni avec du mica et (ou) de l'argile (couleur rouge).

Des FFR bien litées et plissées, ainsi que des unités de quartzite ferrugineuse de la Formation Mésoarchéenne de Mirikli, au sein du Complexe de Tiris, affleurent au Sud-Ouest de la hauteur (Fig. 30 et 31), et sont incluses dans une unité différenciée TRmf et une unité non-différenciée TRmi, cette dernière comprenant un large éventail de lithologies plutoniques et métamorphiques. Au sein de la Formation de Mirikli, les couches comprenant des phyllosilicates d'Al-OH (probablement du mica blanc avec du fer ferrique) apparaissent dans des tonalités rougeâtres, les probables FFR à faciès carbonaté apparaissent dans des tonalités jaunâtres, et les couches avec du carbonate et (ou) de la chlorite apparaissent dans des tonalités verdâtres (flèches, Fig. 30). Les flèches blanches sur les Figures 30 et 31 indiquent la formation de Mirikli. Les FFR et (ou) quartzites sont similaires dans leur stratification et leur réponse spectrale à l'unité TRmf,

mais cartographiées comme TRmi par PRISM-I. Les images produites par ASTER peuvent aider à affiner la carte géologique, en distinguant les FFR et les quartzites provenant de l'unité non-différenciée, et en distinguant les couches de micas (rouges) des couches riches en carbonate et (ou) chlorite.

La Formation de Mirikli héberge le gisement de magnétite de type Algoma d'El Rhein de Guelb, à 22 kilomètres au Nord-Est de Zouérate, et peut généralement être considérée comme contenant davantage de minéraux de mica et (ou) argileux, par rapport à la Formation Archéenne d'El Khadra, hébergeant la présence de FFR de type Algoma de Tizerrhaf, à 41 kilomètres au Nord-Nord-Est de Zouérate. Bien que la Formation d'El Khadra contienne également des FFR et de la quartzite ferrugineuse, ses roches constitutives apparaissent verdâtres sur les images composites 468/RVB ASTER, indiquant la dominance spectrale de la chlorite et (ou) du carbonate.

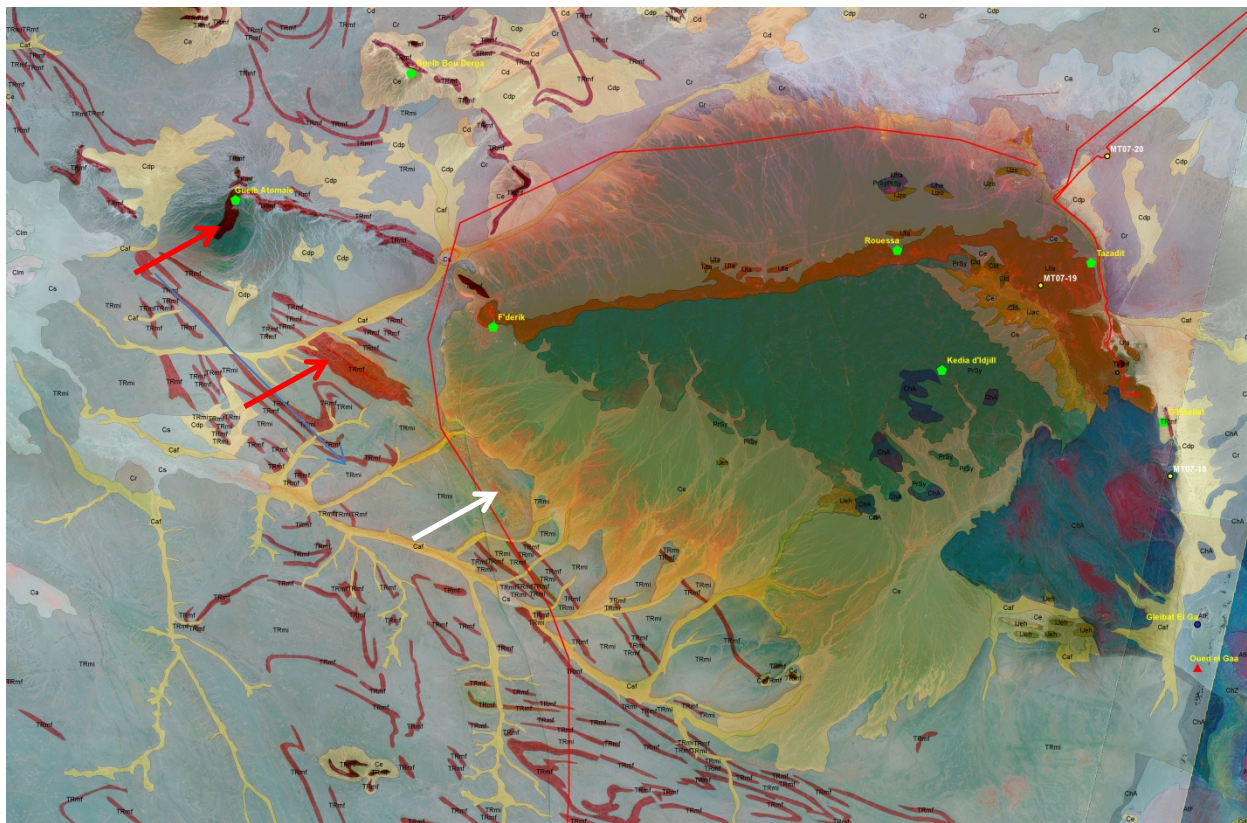


Figure 31. Image composite 468/RVB ASTER de la région de Kedia D'Idjil, présentant en surimposition par transparence l'information géologique issue de PRISM-I. Les FFR et les quartzites ferrugineuses de la Formation de Mirikli (TRmf), du Complexe de Tiris, sont indiquées par les flèches rouges. La flèche blanche indique des roches présentant une stratification et une signature spectrale semblables à l'unité TRmf, mais qui ont été cartographiées au sein d'une unité non-différenciée de la Formation de Mirikli (TRmi). Les points de prélèvement des échantillons sont indiqués par les cercles jaunes. Les points de présence des ressources de PRISM-I sont indiqués par de plus grands polygones. Les parcours GPS des véhicules de la campagne de terrain de 2007 sont indiqués par des lignes rouges.

Au Nord et au Nord-Est de Kedia D'Idjil, les calcrètes sur les surfaces de hamada apparaissent dans des tonalités vert jaunâtre ou jaunâtres sur les images composites 468/RVB ASTER (bleuâtres sur les images composites de rapports). Les couleurs rougeâtres et magenta au sein de ces unités (Ca, PRISM-I) sont indicatrices de surfaces porteuses d'argiles sans minéraux carbonatés. Les couleurs oranges indiquent la

présence à la fois de minéraux à Al-OH et à carbonates. Les sebkhas et les vestiges de dépôts lacustres (CIm, PRISM-I) contiennent généralement des minéraux phyllosilicatés à Al-OH (par exemple, de la smectite et des micas détritiques), qui apparaissent dans les tons magenta sur les images composites 468/RVB ASTER (vert en composites de rapports 134/RVB, et rouge, jaune ou orange sur les images composites de rapports 234/RVB). Les argillites et les siltites dolomitiques bien litées de la Formation Protérozoïque d'Azougui (Groupe de Char) montrent des réponses marquées pour les carbonates sur les images provenant d'ASTER (jaune et vert sur les images composites 468/RVB, et bleu sur les images composites de rapports). Les sables éoliens contenant du fer ferrique et des poussières de la mine de fer de M'Haoudat, à 50 km au Nord-Est de Zouérate, apparaissent dans des tons de magenta sur les images composites de rapports 134/RVB, là où ils sont présents au-dessus de roches dolomitiques de la Formation d'Azougui. Dans les lieux où ces dépôts superficiels recouvrent le substrat pauvre en carbonates, elles apparaissent rougeâtres sur les images composites de rapports (Fig. 8).

2.9.4 Mauritanides du Sud

S'étendant de Moktar Lahjar vers le Sud, en traversant Mbout et Selibabi, jusqu'à la frontière du Sénégal, les Mauritanides du Sud forment la partie Sud de la Ceinture Mobile des Mauritanides (zones 4 et 5, Fig. 1). Les roches déformées, principalement allochtones, ont des âges allant du Protérozoïque dans l'Ouest, à l'Ordovicien dans l'Est, et ont été charriées vers l'Est sur la couverture de la plateforme du Bassin de Taoudéni pendant l'orogénèse hercynienne (Schlüter et Trauth, 2008). Les Mauritanides possèdent une géologie favorable et des indices de présence des métaux laissant entrevoir la possibilité d'une présence d'or orogénique de veines mésothermales de quartz, de sulfure massif volcanogénique, de skarns de Pb-Zn-Cu-Sn-W, et de gisements de Cr-Ni au sein de roches ultramafiques.

Les quartzites Cambriennes, déformées de manière complexe, de la Formation de Gàoua entourent la présence de cuivre d'El Kelb de Guelb, à 113 kilomètres à l'Est-Nord-Est de la ville d'Aleg, à proximité de Moktar Lahjar. Comme mentionné ci-dessus, la présence de minéraux d'altération argileuse développée et (ou) de minéraux argileux (alunite, pyrophyllite, kandite, argiles, etc...) au sein des quartzites, qui sont en général dépourvues de tels minéraux, peut être indicateur de systèmes d'altération épithermaux masqués et des gisements métalliques associés. Les quartzites de la Formation de Gàoua présentent de vives couleurs magenta sur les images composites 468/RVB ASTER (Fig. 32), indiquant une présence importante de minerais à radicaux Al-OH comprenant des phyllosilicates (Fig. 5). Les quartzites présentent une couleur jaune sur les images composites de rapports 234/RVB ASTER, indiquant la présence de minéraux présentant une absorption de la bande 5 ASTER indicatrice de la présence d'alunite, de pyrophyllite, et de kaolinite (Fig. 33). Une composante verdâtre de la couleur indique des secteurs riches en séricite au sein de la quartzite. La Figure 34 présente une image de ce secteur, produite par la méthodologie automatisée d'analyse de Landsat TM mentionnée ci-dessus (Fig. 15 et 20). Des secteurs apparaissant en vert ont été identifiés comme contenant de l'argile et (ou) du mica, et sont indicateurs de grands affleurements de quartzite particulièrement riches en séricite et (ou) en kaolinite.

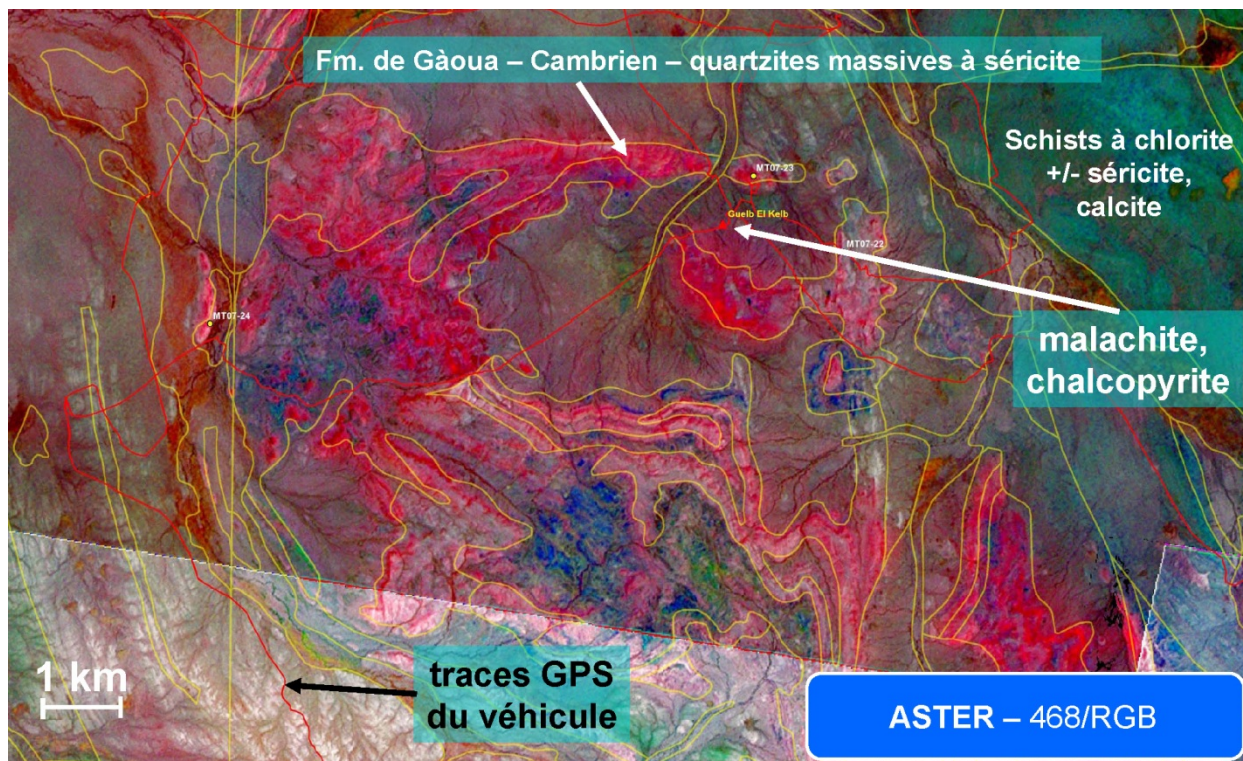


Figure 32. Image composite renforcée 468/RVB ASTER de la zone entourant la présence de cuivre de Guelb El Kelb, dans les Mauritanides du Sud. La couleur rose indique la présence des minéraux à radicaux Al-OH comprenant de l'argile et des micas. Les contacts lithologiques de PRISM-I sont indiqués par des lignes jaunes. Les points de prélèvement des échantillons sont indiqués par des cercles jaunes. Les parcours GPS des véhicules de la campagne de terrain de 2007 sont indiqués par des lignes rouges. Point central de l'image : 17,409°N, 12,943°O.

Des échantillons prélevés sur le site MT07-23 (17,43790°N, 12,92923°O, Fig. 32 et 33) de quartzite mylonitisée, avec des interstratifications d'ardoise à quartz recristallisé, et une matrice de chapeau de fer local dans une brèche de fragments de quartz, contiennent de la goethite (probablement issue de pyrite) et de la kaolinite, en quantité allant de traces à de petites quantités (Fig. 35). La zone entourant le site MT07-23 possède un environnement structural orienté 30°N - 45°O, ainsi qu'une veine mésothermale à gros quartz affleurant à 1 km vers le Nord. Un autre échantillon provenant de ce site révèle une dominante de mica de type phengite, avec un spectre primaire d'absorption d'Al-OH centré sur 2,222 micromètres avec du fer, et (ou) une substitution de l'aluminium par du magnésium, suggérée par une asymétrie du spectre du côté des grandes longueurs d'onde. La phengite qui est formée à hautes

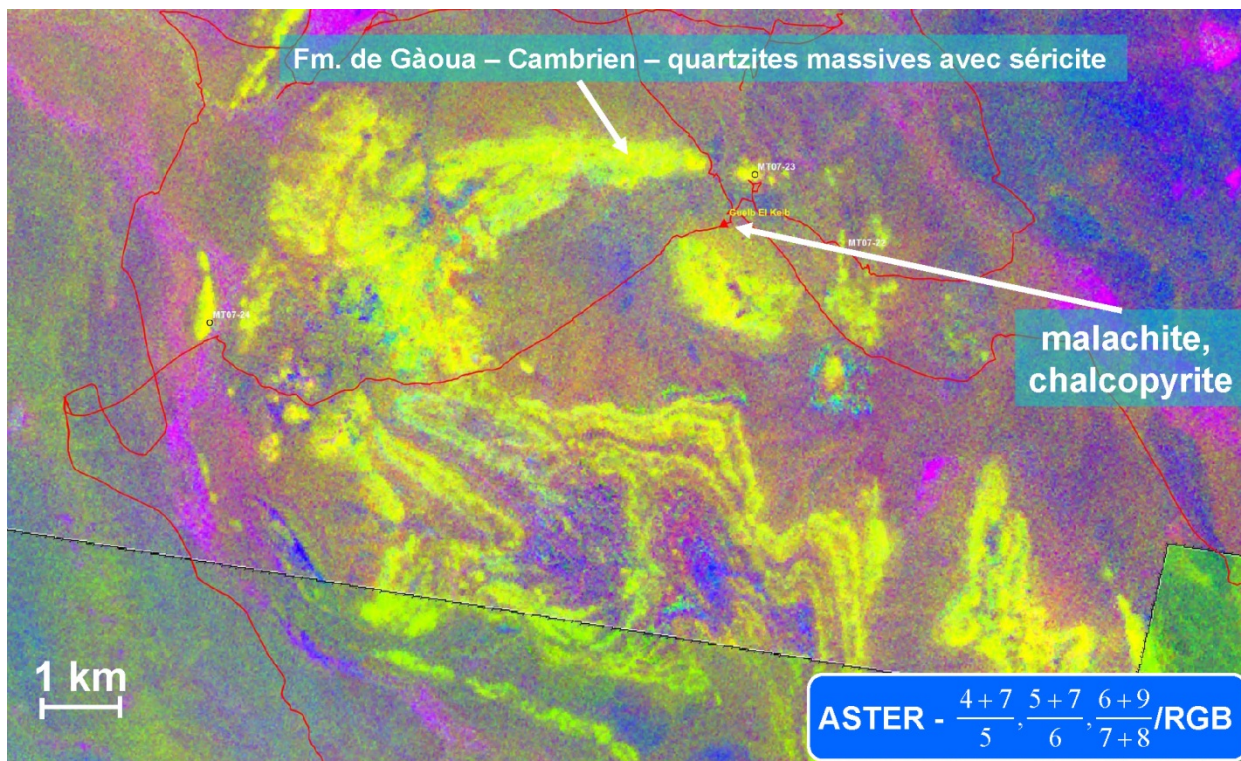


Figure 33. Image composite renforcée de rapports 234/RVB ASTER de la zone entourant la présence de cuivre de Guelb El Kelb, dans les Mauritanides du Sud. Voir la Figure 10 pour le guide d'interprétation des couleurs. La couleur jaune indique la présence de minéraux présentant une absorption au niveau de la bande 5 ASTER, dont le plus courante est la kandite, un minéral argileux de la kaolinite. Les points de prélèvement des échantillons sont indiqués par les cercles jaunes. Les parcours GPS des véhicules de la campagne de terrain de 2007 sont indiqués par des lignes rouges. Point central de l'image : 17,409°N, 12,943°O.

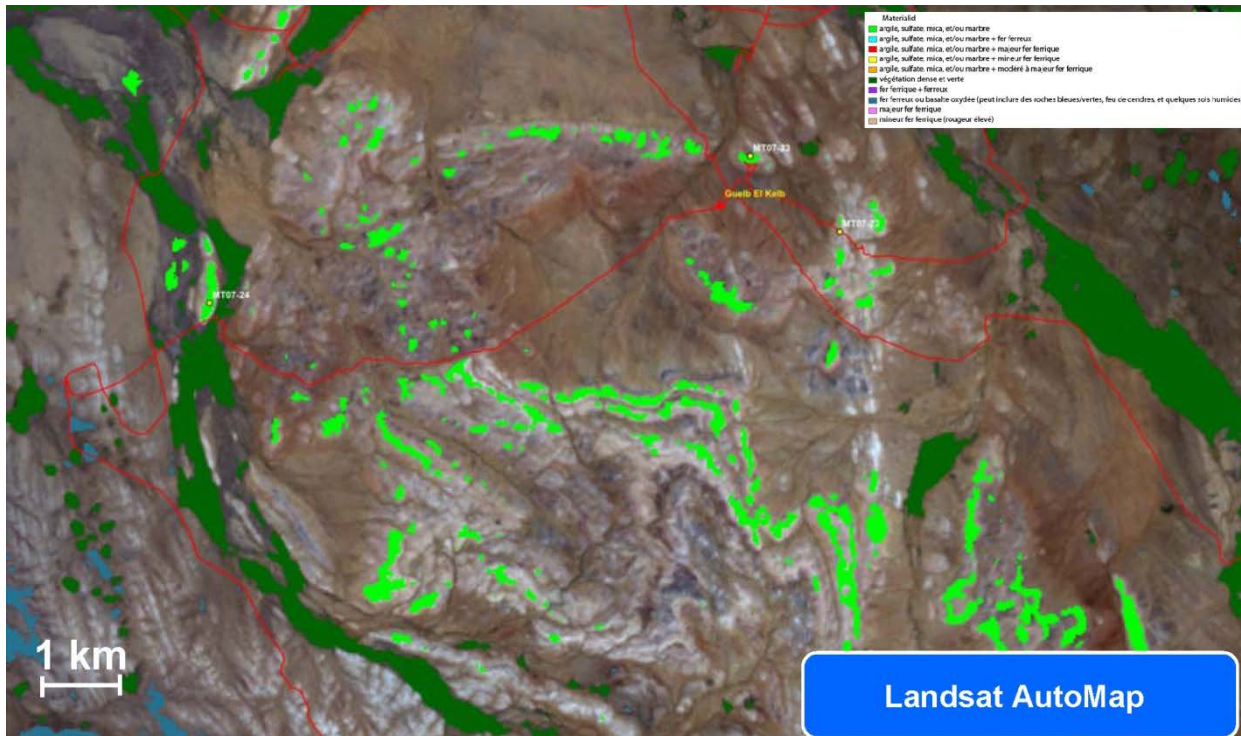


Figure 34. Carte des groupes minéraux issue de l'analyse automatisée basée sur l'analyse des rapports des données Landsat, montrant la zone entourant la présence de cuivre de Guelb El Kelb, dans les Mauritanides du Sud. Les localisations des prélèvements d'échantillons sur le terrain sont indiquées par des cercles jaunes. Les parcours GPS des véhicules de la campagne de terrain de 2007 sont indiqués par des lignes rouges. Point central de l'image : 17,409°N, 12,943°O.

pressions, et est très présente au sein des éclogites et des terrains géologiques d'accrétion tectonique (Ganne et al., 2012). Le spectre des échantillons prélevés sur le site MT07-24 (17,41780°N, 13,00326°O, Fig. 32 et 33) laisse apparaître une absorption primaire normale pour l'illite et la muscovite, allant de 2,205 à 2,208 micromètres, avec des traces possibles de kaolinite. Les spectres montrent que les brèches, la kaolinite, la pyrite et la phengite sont présentes dans les quartzites de la Formation de Gàoua, où les roches ont été broyées et mylonitisées au sein d'un environnement ductile. On ne connaît aucun lien entre ces caractéristiques locales de la Formation de Gàoua et la minéralisation de cuivre.



Figure 35. Spectres de réflectance de la quartzite de la Formation de Gàoua, à proximité de la présence de cuivre de Guelb El Kelb. Le spectre de la localisation MT07-23, en blanc vers le bas, est révélateur d'un mica abondant de type phengite, et les spectres de l'emplacement MT07-24, en bleu et vert en haut de l'image, sont, pour leur part, indicateurs d'illite ou de muscovite. La longueur d'onde en nanomètres (micromètre x 1 000) est indiquée sur l'axe des x.

Les graviers du reg (Fig. 18) et les latérites détritiques (ou ferricrètes, Fig. 29) montrant une réponse spectrale indiquant une abondance d'Al-OH (argile et mica) +/- fer ferrique, sont courants à 90 kilomètres à l'Est de la ville d'Aleg. Les latérites prélevées à l'emplacement MT07-25 (17,11958°N, 12,94683°O) apparaissent rouge foncé, avec quelques zones verdâtres sur les images composites 468/RVB ASTER et bleu-vert-magenta sur les images composites de rapports 134/RVB ASTER, ce qui indique la présence d'argiles et (ou) de micas, de carbonates ou de phyllosilicates à Mg-OH (par exemple, de la serpentine, du talc ou de la chlorite) et un fer ferrique secondaire. Les surfaces de reg apparaissent habituellement rougeâtres sur les images composites 468/RVB, vert à magenta sur les images composites de rapports 134/RVB ASTER et vert-jaune-magenta sur les images composites de rapports 234/RVB, ce qui indique la présence de kaolinite avec +/- de mica et de fer ferrique, de manière comparable aux échantillons prélevés près de Legleit el Khader, dans le district d'Inchiri.

Un affleurement de serpentinite altérée, à 4,5 km à l'Ouest des présences de cuivre de Kadiar a été prélevé à l'emplacement MT07-26 (16,89006°N, 12,712°O). Ces roches apparaissent jaune à jaune-vert sur les images composites 468/RVB ASTER (Fig. 36) et bleu sur les images composites de rapports 134/RVB ASTER (Fig. 37), indiquant la présence de carbonates ou de phyllosilicates à Mg-OH (par exemple, de la serpentine, de la chlorite, ou du talc). Les roches altérées se trouvent au sein d'une unité lithologique de PRISM-I, de serpentinite Protérozoïque et de roches ultramafiques massives (GaSp), entourées par un mélange ultramafique de schistes chloritiques, pélitiques, à talc (Ga, groupe de Gadel, Fig. 38). Les schistes à talc (Fig. 37) apparaissent en tons verdâtres à vert jaunâtre sur la Fig. 36, ce qui les différencie légèrement

de la serpentine altérée. Les zones riches en muscovite des schistes pélitiques apparaissent dans des tons de rose sur la Fig. 36, et dans des tons verts vifs sur la Fig. 37.

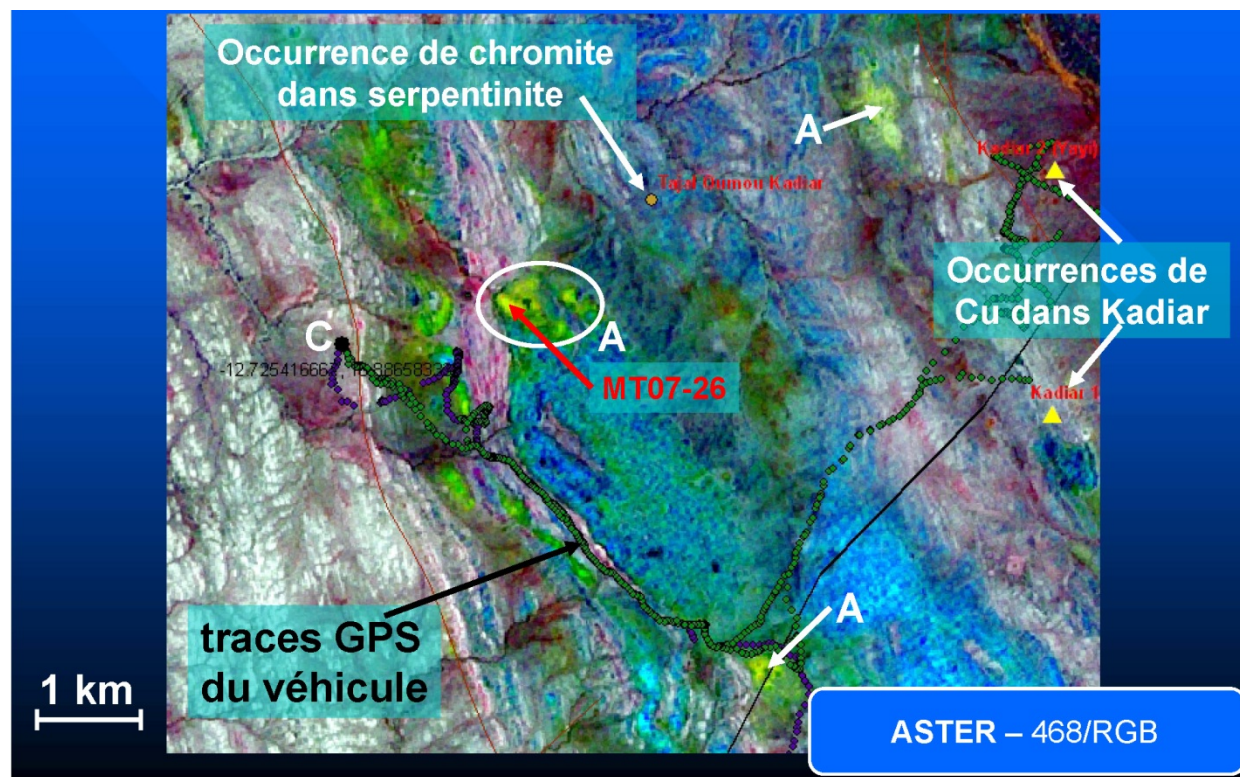


Figure 36. Image composite renforcée 468/RVB ASTER de la zone entourant la localisation MT07-26, à l'Ouest des présences de cuivre de Kadiar, dans les Mauritanides du Sud. Voir la Figure 5 pour le guide d'interprétation des couleurs. La couleur jaune-vert indique la présence de minéraux phyllosilicatés de Mg-OH (serpentine). A = anomalies minérales de Mg-OH, qui toutes ont été repérées comme « argile, sulfate, mica et (ou) marbre », à l'aide de la méthodologie d'analyse automatisée de Landsat TM, présentée sur les Figures 15 et 20. C = localisation du camp de base. Les parcours GPS des véhicules de la campagne de terrain de 2007 sont indiqués par des petits cercles verts et bleus.

Une carte de groupe de minéraux d'une zone plus vaste entourant l'emplacement de l'échantillon est présentée sur la Figure B2. La plupart des affleurements de roches avec des caractéristiques spectrales semblables à celles de la serpentine altérée, à l'emplacement de l'échantillon MT07-26, correspondent à l'unité de serpentine GaSp de la carte géologique de PRISM-I.

Les serpentinites altérées (Fig. 39) contiennent d'abondantes veinules de magnétite dans une matrice à grain fin de serpentine, avec de la serpentine fibreuse présente localement sous la forme de veines et sous forme massive. Le spectre de réflectance des échantillons du site MT07-26 montre de la serpentine en abondance avec de la goethite, avec un échantillon contenant de la serpentine et de la chlorite (Fig. 40). Le spectre apparaissant en vert contient de la smectite (caractéristique de 2,20 micromètres) et des traces de serpentine.

Cette zone correspond à une forte anomalie magnétique des données géophysiques. Au Sud-Est du site de l'échantillon, une vaste zone de minéraux à Mg-OH et à fer ferrique abondant est mise en évidence dans les images composites de rapports ASTER (Fig. 37), et représente une ferricrète ou crôte ferreuse

bien développée, ayant été érodée et transportée au loin par l'érosion au niveau de la localisation MT07-26, exposant la serpentinite riche en magnétite sous-jacente, à partir de laquelle la croûte ferrugineuse s'est développée. Des blocs de ferricrête érodés sur place peuvent être observés sur la Figure 39, et contiennent une hématite abondante avec des veines de calcédoine (Fig. 40).

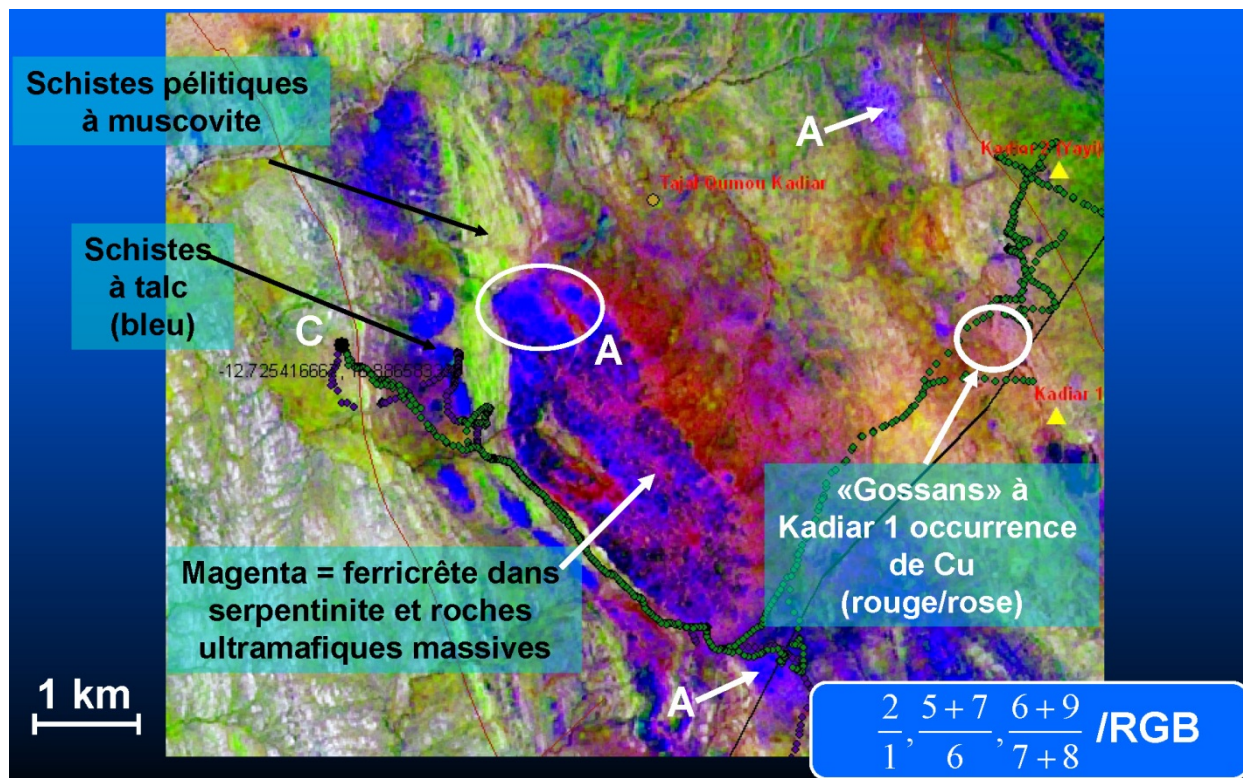


Figure 37. Image composite renforcée de rapports 134/RVB ASTER de la zone entourant la localisation MT07-26, à l'Ouest des présences de cuivre de Kadiar, dans les Mauritanides du Sud. Voir la Figure 8 pour le guide d'interprétation des couleurs. La couleur bleue indique la présence des minéraux phyllosilicatés Mg-OH, le vert indique des phyllosilicates Al-OH (muscovite), et le magenta indique le Mg-OH + le fer ferrique (latérite/ferricrête). Les roches de chapeau de fer associées à la présence de cuivre du Sud de Kadiar sont marquées par une teinte rougeâtre, indicatrice d'une présence de fer ferrique. A = anomalies minérales de Mg-OH. C = localisation du camp de base. Les parcours GPS des véhicules de la campagne de terrain de 2007 sont indiqués par des petits cercles verts et bleus.

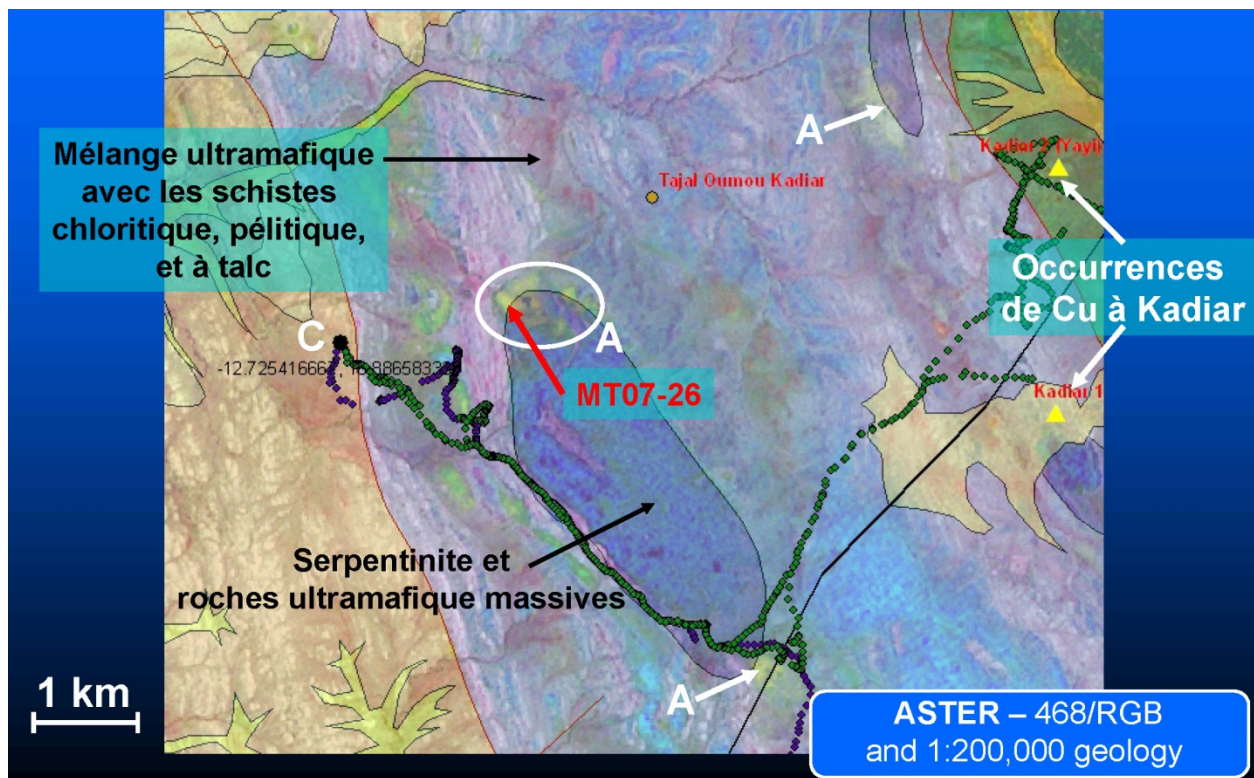


Figure 38. Image composite renforcée 468/RVB de la zone entourant la localisation de l'échantillon MT07-26, avec surimposition en transparence de la carte géologique de PRISM-I. A = anomalies minérales de Mg-OH. C = localisation du camp de base. Les parcours GPS des véhicules de la campagne de terrain de 2007 sont indiqués par des petits cercles verts et bleus.



Figure 39. Photographie de terrain de la serpentinite altérée (sous le marteau) à l'emplacement de l'échantillon MT07-26, avec des blocs de ferricrète riches en hématite, érodés sur place à partir d'anciennes roches de couverture.

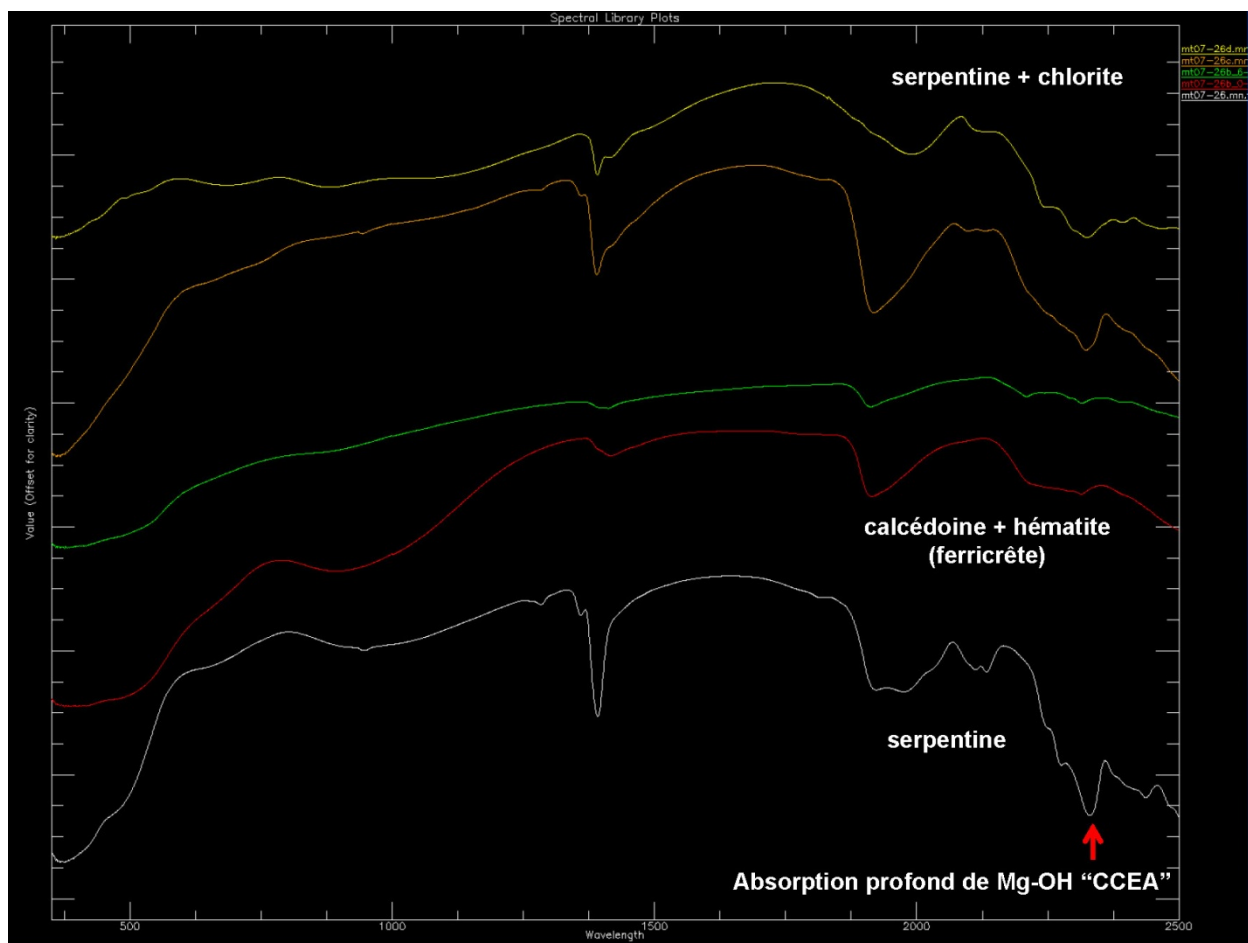


Figure 40. Spectre de réflectance des échantillons de la localisation MT07-26. La smectite et des traces serpentine sont évidentes dans le spectre en vert. CCEA = « carbonate, chlorite, épidote, amphibole » (Fig. 5). La longueur d'onde en nanomètres (micromètre x 1 000) est indiquée sur l'axe des x.

Comme les minéraux de silicate de magnésium hydratés sont communs au sein de l'horizon de saprolite des profils altérés de latérites nickel-cobalt (Marsh et Anderson, 2011), les serpentinites altérées examinées ici peuvent être favorables à ce type de dépôt. L'argile smectite (Fig. 40) est un élément caractéristique de la limonite et des horizons argileux de transition de tels profils d'altération. Les images produites par ASTER peuvent être utilisées pour subdiviser le mélange ultramafique du Groupe de Gadel, en permettant de distinguer les schistes pélitiques et les schistes à talc.

2.9.5 Région de Gleibat Tenebdar-Tourassin

Une vue ASTER couvrant une zone du Bouclier de Rgueïbat, au sein de laquelle des présences d'uranium ont été trouvées (Fig. 1), a été traitée, en complément de la campagne de terrain de 2007. La zone se situe dans la partie Nord des cartes géologiques à l'échelle 1/200 000^{ème} de Gleibat Tenebdar et Tourassin, issues de PRISM-I, et est également présentée au niveau de la Figure 43. Des dépôts de sebkha contenant des minéraux argileux et (ou) des micas apparaissent sous forme de teintes rougeâtres sur les images composites renforcées couleur 468/RVB, et sous la forme de teintes jaunes à oranges sur les images

composites de rapports 234/RVB, indiquant la présence de minéraux argileux de type kandite, comme la kaolinite. Plusieurs dépôts de sebkha, y compris un situé à 7 km à l'Ouest des présences d'uranium de Tenebdar, contiennent probablement une calcrète, car ils apparaissent dans des tons jaunâtres sur les images composites 468/RVB, et dans des tons de bleu sur les images composites de rapports (Fig. 8 et 10). Une sebkha près de l'angle Nord-Ouest de la vue ASTER contient probablement de l'argile et (ou) du mica, une calcrète et du fer ferrique (couleurs jaune à magenta sur l'image composite de rapports 134/RVB), entourée par une bordure de matériau plus kaolinitique, à albédo élevé, qui apparaît en rouge à jaune sur l'image composite de rapports 234/RVB.

La présence de Tenebdar 1 se trouve dans une zone particulièrement riche en micas de roches volcaniques acides du groupe Protérozoïque de Legleya (couleur magenta sur l'image composite renforcée en couleur 468/RVB). La plupart de ces roches volcaniques présentent une couleur verdâtre, qui indique probablement de la chlorite ou d'autres minéraux à Mg-OH au sein de roches basaltiques métamorphosées. Des dykes à la minéralogie similaire apparaissent également en vert au sein de monzogranites et de granodiorites du Complexe d'Esseder Adam, au Sud et à l'Ouest des présences de Tenebdar. La plupart de ces dykes suivent des structures qui ont été cartographiées dans le cadre de PRISM-I. Des zones contenant anormalement de l'argile et (ou) des micas au sein de ces microgranites se rencontrent à 7-8 km au Sud-Ouest des présences de Tenebdar, et peuvent représenter, pour partie, des minéraux argileux éoliens dérivés de l'érosion des sebkhas vers le Nord-Ouest. Les données ASTER et Landsat peuvent toutes deux être utilisées pour subdiviser la plupart des unités lithologiques de PRISM-I et apporter d'importants détails supplémentaires aux cartes géologiques.

3 Images dérivées de Landsat pour le projet PRISM II

3.1 Résumé

Le dispositif Landsat Thematic Mapper (TM) est un système d'imagerie satellite à large bande qui mesure le rayonnement solaire réfléchi à partir d'un ensemble de pixels de 30 m² situés sur la surface terrestre, à travers six bandes de spectres allant du visible au proche infrarouge. De nombreux matériaux peuvent être identifiés et cartographiés à une échelle régionale à l'aide des informations apportées par ces six bandes spectrales TM, y compris la végétation, l'eau, la couverture neigeuse, les éléments culturels (villes, routes, chemins de fer), les roches et les sols, ainsi que les structures géologiques.

Soixante-trois (63) vues distinctes, tirées des données du système de cartographie thématique de Landsat (TM), couvrant l'ensemble de la Mauritanie (Fig. 41), ont été traitées pour produire des images composites couleur, montrant des affleurements de structures et d'unités géologiques, et fournissant un moyen d'identifier certaines roches pouvant avoir été altérées hydrothermalement au cours de processus de minéralisation. Deux types d'images composites couleur ont été produites : 1) des images composites en pseudo-couleurs naturelles, conçues pour afficher les matériaux de surface et les structures géologiques dans leur couleur naturelle, et 2) des images composites en rapports de couleurs préparés à partir des rapports de couleurs de la bande 5/bande 7, bande 3/bande 1, et de la bande 5/bande 4, codées respectivement en rouge, vert et bleu. Les images composites en rapports de couleurs montrent la présence d'un ou de plusieurs minéraux regroupés en deux grands groupes : le groupe argile-carbonate-sulfate-mica et le groupe oxyde de fer et hydroxyde. De nombreux minéraux au sein de ces deux groupes sont souvent, mais pas uniquement, associés à des roches altérées hydrothermalement.

Il existe deux ensembles d'images produites pour chaque type d'image composite. Le premier est un ensemble d'images en format GeoTIFF, avec une image distincte pour chacune des vues Landsat TM, devant être incluses au sein du livrable SIG 92. La deuxième série se compose de cartes images au format PDF (Annexes E et F) annotées avec les emplacements de présences minérales sélectionnées, des indications de latitude et de longitude, ainsi qu'une carte repérant l'emplacement de la vue. Ces cartes images sont adaptées à l'impression ou à un examen sur un écran d'ordinateur. Les images GeoTIFF peuvent être utilisées dans un SIG, avec d'autres données géoréférencées, de façon à analyser et à évaluer un certain nombre de relations géologiques, ainsi que pour la mise à jour de la cartographie géologique régionale.

3.2 Caractéristiques des données Landsat TM

Les données d'origine de Landsat TM fournies par PRISM-I incluent certaines vues acquises par le satellite Landsat 5, et quelques-unes acquises par le système Landsat 7. Les principales différences entre ces ensembles de données sont l'inclusion d'une bande panchromatique à haute résolution spatiale (pixels de 15 m) au sein des données de Landsat 7. Les données Landsat 7 comprennent également deux bandes infrarouges thermiques au lieu d'une seule, comme sur Landsat 5. Cependant, les données infrarouges thermiques n'ont pas été utilisées dans le cadre de la présente étude.

La plupart des données Landsat TM sont au format GeoTIFF (39 vues), avec chacune des 6 bandes spectrales de données situées dans le visible et le proche infrarouge regroupées dans un fichier distinct. Ces données comprennent également un fichier texte ASCII, contenant les métadonnées des données d'image. Les données TM restantes (24 vues) ont été fournies dans le format original NLAPS (National Landsat Archive Processing System), également en fichiers distincts pour chaque groupe, et accompagnées de fichiers de métadonnées. Les programmes permettant de lire les données au format NLAPS de Landsat sont inclus dans la plupart des systèmes modernes de logiciels de traitement des images, comme ERDAS Imagine, ERMapper et ENVI. Chacun de ces systèmes de logiciels a été utilisé pour lire les données Landsat de la Mauritanie, mais dans chaque cas, l'image résultante a été mal géoréférencée. En conséquence, chacune des 24 vues NLAPS (Tableau 3) a dû être manuellement géoréférencée, ce qui a constitué une opération coûteuse en temps. Ces vues présentent « gcor » dans leurs noms de fichier. On ne sait pas pourquoi les données ont été mal géoréférencées, bien qu'une étude de la géométrie des distorsions, représentant parfois des dizaines de kilomètres, ait pu fournir quelques explications. Les données au format NLAPS doivent à l'avenir être manipulées avec précaution.

Depuis la remise des livrables de la phase II, trente-sept (37) vues Landsat TM au format L1T ortho-corrigé ont été téléchargées et traitées pour remplacer les vues NLAPS présentant une erreur de géolocalisation. Le nouvel ensemble de vues Landsat, y compris ces images de remplacement, a été converti au format ERDAS Imagine (.img). Cinquante-neuf vues au format Imagine, chacune contenant les six bandes à réflexion de Landsat, seront intégrées au sein des livrables finaux, numériques, du projet. Ces vues sont parfaitement adaptées à une utilisation au sein d'un SIG, en raison du fait qu'une combinaison optimale des bandes peuvent être paramétrée, avant l'affichage et l'interprétation.

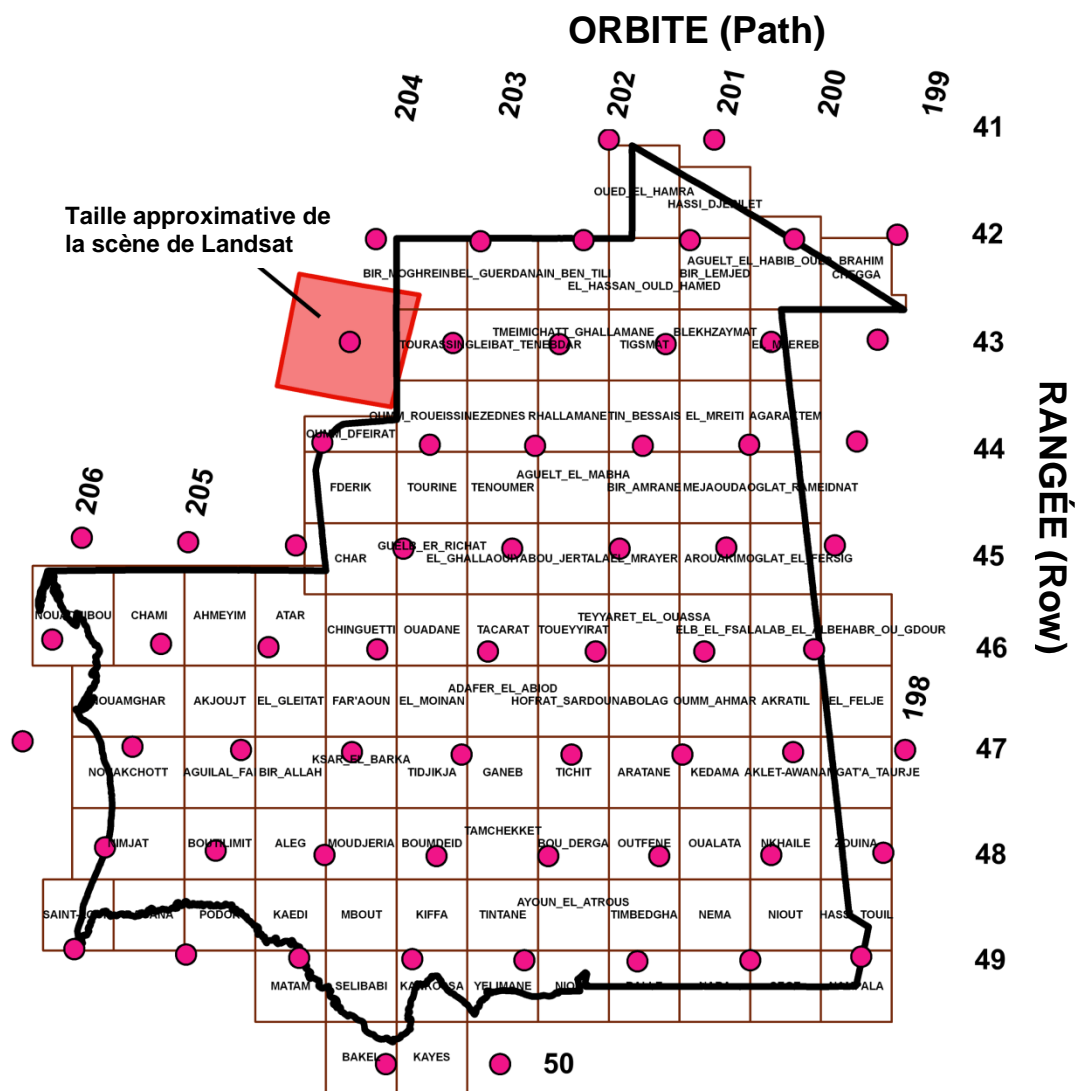


Figure 41. Carte de synthèse de la Mauritanie, présentant les localisations du centre des vues du système de cartographie thématique de Landsat. Les orbites sont orientés Nord-Est / Sud-Ouest, les rangées sont orientés Est-Ouest.

Tableau 3. Vues Landsat TM au Format NLAPS

Rangée (« Row »)	Orbite (Traces au sol, ou « Path »)						
		204	203	202	201	200	199
41				X			
42	X	X			X	X	
43	X	X	X	X	X	X	X
44	X	X	X	X	X	X	
45		X	X	X	X	X	X
46		X	X	X	X		

Bien que la qualité des données Landsat TM de la Mauritanie soit techniquement considérée comme de haute qualité, de petites à de grandes zones de certaines vues comportent des données qui ne reflètent pas clairement les capacités de résolution spatiale ou spectrale des données Landsat. Ces zones sont caractérisées par des images d'apparence « floue », en raison de mouvements de sable ou de poussière à proximité de la surface de la terre. Alors que les effets de la brume atmosphérique peuvent dans une certaine mesure être généralement corrigés au sein des ensembles de données Landsat, il n'y a rien à faire pour éliminer ou réduire les effets de matières particulières comme le sable ou la poussière dans la basse atmosphère. Du point de vue interprétatif, la poussière dans l'air provoque essentiellement une simple diminution de la résolution spatiale des images composites en couleur naturelle. En raison du fait que les rapports de données images retire efficacement une grande partie de l'information texturale de l'image révélée par l'ombre topographique, la diminution de la résolution spatiale n'est pas apparente. Mais dans le rapport des données images, ce type de contamination atmosphérique provoque une forte diminution de la distinction spectrale des différents matériaux de la surface, donnant une image « sans relief », beaucoup plus pauvre en information.

3.3 Images composites en couleurs naturelles

Les images composites en couleurs naturelles ont été préparées à partir des bandes TM 3, 2 et 1, respectivement de couleur rouge, verte et bleue, par l'utilisation du système de traitement d'image ERMapper (Fig. 42). Pour obtenir une image plus agréable à regarder, chaque bande a été généralement recalée en contraste, en plaçant les deux pour cent inférieurs sur 0 et les deux pour cent supérieurs sur 255, et en recalant linéairement les données intermédiaires. Au niveau de certaines vues, surtout les vues contenant des vastes étendues de sable ou d'eau, les extrémités supérieures et inférieures de chacune des bandes ont été ajustées manuellement à partir des points à deux pourcent, afin d'obtenir une apparence agréable pour l'ensemble restant de la vue ne contenant pas de sable ou d'eau.

Bien que les images composites en couleurs naturelles ne permettent pas de distinguer entre des matériaux à forts contrastes spectraux de façon aussi radicale que ne le permettent des images composite en couleurs de synthèse, elles permettent, comme certaines images composites en couleurs de synthèse, d'afficher une grande partie de l'information texturale et géomorphologique des applications de cartographie géologique. De plus, les images composites en couleurs naturelles ont l'avantage d'afficher les matériaux de surface sous la forme de couleurs familières, permettant souvent une première interprétation de leur composition et de leur identité.

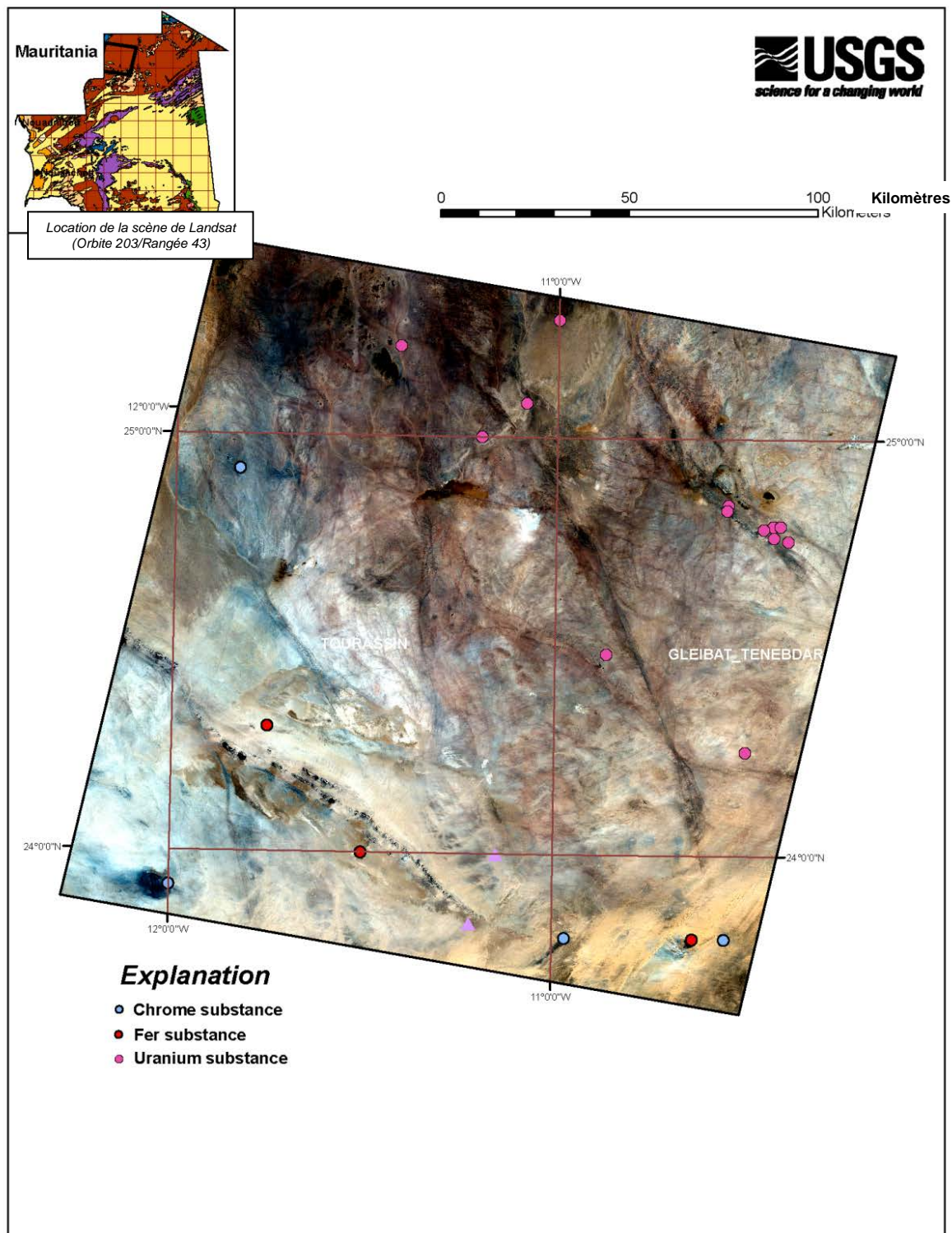


Figure 42. Exemple de carte composite en couleurs naturelles du système de cartographie thématique de Landsat, produite à partir des bandes de 3, 2 et 1, respectivement de couleur rouge, verte et bleue, de la vue de la orbite 203 et de la rangée 43. L'image composite en couleurs naturelles de base est disponible séparément sous forme d'image GeoTIFF, adaptée à l'analyse SIG et aux systèmes de traitement d'image. Une carte et une image GeoTIFF sont disponibles pour chacune des 63 vues.

3.4 Images composites par rapports de couleurs

Des images composites par rapports de couleurs (Fig. 43) ont été préparées afin d'aider à évaluer un possible biais de préférence au sein de zones favorables des types de dépôts minéraux, tels que définis par les géologues en charge des projets de ressource. Une zone favorable pour un type de dépôt donné est la région où les gisements sont le plus susceptibles de se produire, sur la base de divers facteurs déterminants, y compris les roches hôtes, d'âge et (ou) de lithologie, d'environnement tectonique favorable, de gisements existants et de présence d'intrusions. Les rapports entre des bandes TM sélectionnées peuvent servir à détecter et cartographier deux grands groupes de minéraux au niveau des sols et les roches visibles. Un groupe (argile-carbonate-sulfate-mica) est caractérisé par une forte absorption à proximité de 2,2-2,3 μm , intervenant dans la bande 7 TM, et comprend les minéraux porteurs du radical hydroxyl (c'est-à-dire des minéraux argileux, ou des micas), des sulfates hydratés (par exemple du gypse, ou de l'alunite) et des carbonates (calcite, ou dolomite). Le second groupe (oxyde de fer) se caractérise par de l'oxyde de fer et des minéraux porteur du groupe hydroxyde (hématite, goethite, ou jarosite) qui apparaissent dans des nuances de rouge (bande 3 TM) et qui ont de fortes absorptions dans la partie ultraviolette du spectre, affectant fortement les bandes TM 1 (bleue) et 2 (verte). Les minéraux de ces deux groupes se trouvent couramment dans les roches présentant une altération hydrothermale, mais la plupart ne se limitent pas à ce type de roche.

3.4.1 Soustraction d'objet sombre

Avant de calculer les rapports, un redimensionnement simple a été fait sur chaque groupe de données pour prendre en compte partiellement la brume atmosphérique (diffusion). La correction, appelée « soustraction d'objet sombre », soustrait la valeur du nombre non-nul le plus petit de la valeur (DN) de chaque bande, de chaque valeur DN de la bande, en affectant la valeur 0 au DN des zones les plus sombres de la vue. Les zones les plus sombres de chaque vue sont habituellement des zones d'ombre profonde. Le fait que les DN de ces régions ne soient pas égales à zéro, dans le groupe des données non corrigées, est censé signifier qu'elles sont éclairées par la diffusion atmosphérique. La diffusion atmosphérique est une propriété spectrale qui est maximale aux courtes longueurs d'onde (bande bleue 1 TM) et minimale dans le proche infrarouge (bande 7 TM).

La procédure de soustraction d'objet sombre fait l'hypothèse : 1) d'une uniformité de la dispersion de la brume dans une vue donnée ; 2) que toutes les bandes spectrales (régions de longueur d'onde) sont affectées par la brume de manière uniforme ; et 3) que toute la gamme de l'albédo de la surface (caractéristiques claires et sombres de la surface) au sein d'une vue est affectée de manière uniforme par les constituants de l'atmosphère. Sur les vues Landsat, ces hypothèses ne sont pas toujours vraies, et donc la procédure de soustraction sombre de la cible ne corrige pas toujours avec précision l'influence de la brume atmosphérique.

3.4.2 Rapports de bandes

Le rapport de bandes 5 TM / bande 7 TM (5/7) est utilisé pour détecter la forte absorption des minéraux du groupe argiles-carbonate-sulfate-mica dans la bande 7 TM (Fig. 44). En raison de la forte absorption, les DN de bande 7 TM sont faibles, produisant des valeurs de rapport élevé. Des valeurs de rapport 5/7 élevées sont également produites par la végétation verte en bonne santé (Fig. 44). Cependant, celles-ci peuvent être distinguées des pixels du groupe argile-carbonate-sulfate-mica, en utilisant un rapport

5/4 au niveau l'image composite de rapports de couleurs, comme examiné ci-dessous. Les valeurs du rapport entre 5/7 sont présentées en rouge sur les images composites de rapports de couleurs. Plus le rouge est lumineux, plus la valeur du rapport est élevée, et plus forte est l'absorption de la bande 7 TM.

Le rapport bande 3 TM / bande 1 TM (3/1) est utilisé pour détecter les couleurs rouges, oranges et jaunes que les minerais de fer ferrique donnent aux roches et aux sols. Les couleurs rouges expriment des valeurs DN élevées de la bande 3 TM (bande rouge) et des valeurs DM très faibles pour la bande 1 TM (bande bleue), en raison de la forte absorption dans la partie ultraviolette et bleue du spectre. Par conséquent, des valeurs élevées du rapport 3/1 témoignent de la présence de minéraux du groupe de minéraux du fer ferrique, qui comprend des sulfates, des hydroxydes et des oxydes de fer. Les valeurs de rapport 3/1 de l'image composite des rapports de couleurs présentent des tons de vert, de telle façon que les verts les plus lumineux reflètent les valeurs de rapports les plus élevées.

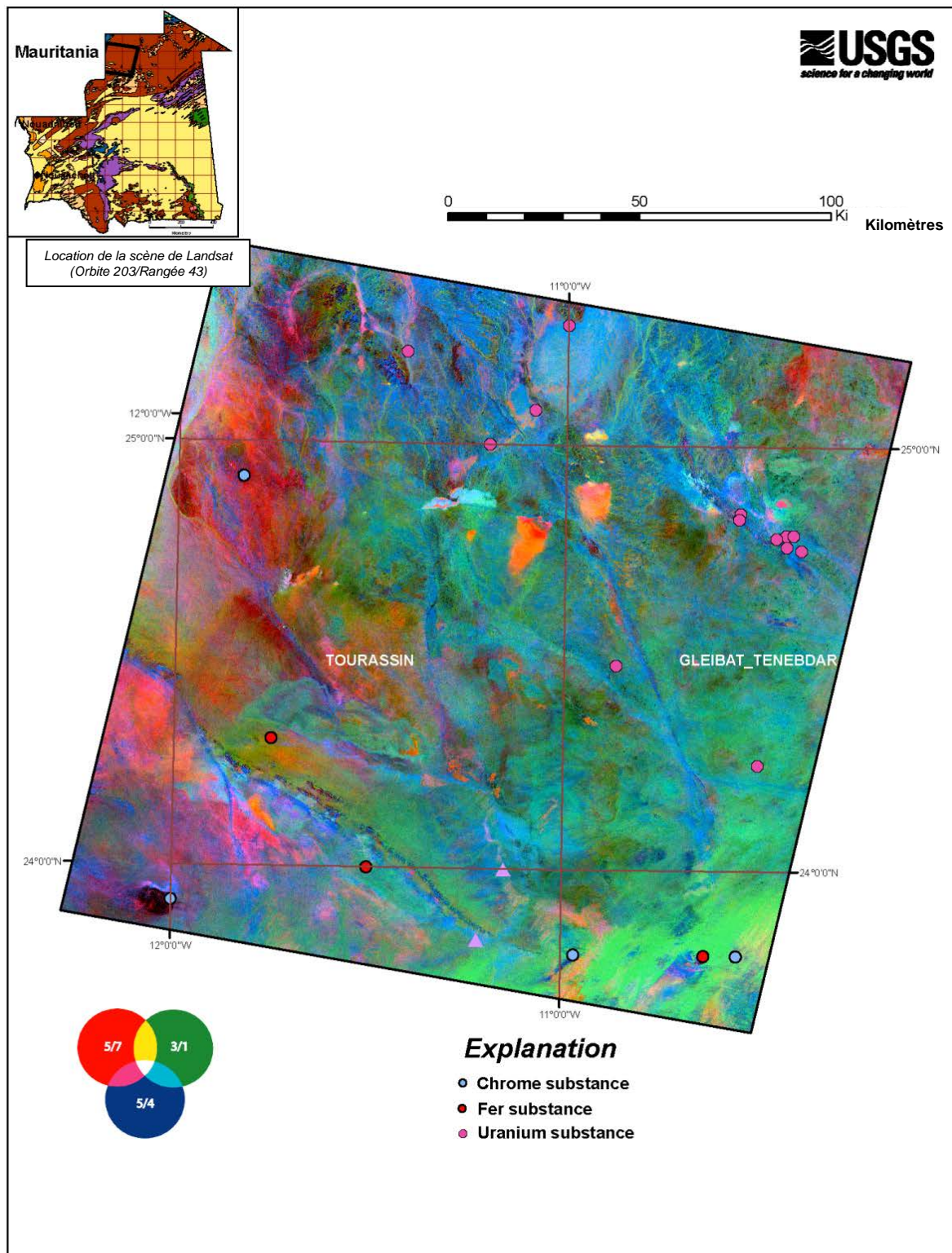


Figure 43. Exemple de carte composite en rapports de couleurs du système de cartographie thématique de Landsat, produite à partir des rapports de bandes 5/7, 3/1 et 5/4, respectivement de couleur rouge, verte et bleue, de la vue de la orbite 203 et de la rangée 43. L'image composite en rapport de couleur de base est disponible séparément sous forme d'image GeoTIFF adaptée à l'analyse SIG et aux systèmes de traitement d'image. Une carte image et une image GeoTIFF sont disponibles pour

chacune des 63 vues. Une partie de la zone présentée sur cette vue est également couverte par une vue ASTER, illustrée dans la figure 1. Les sables éoliens présentant une coloration de fer ferrique apparaissent en vert, indiquant des valeurs élevées de rapport 3/1, surtout en bas à droite. Des surfaces de sebkha contenant des argiles à Al-OH et (ou) des minéraux de mica (valeurs de rapport 5/7 élevé, en rouge) sont indiquées près du centre de l'image en rouge et orange. Des sebkhas contenant de l'argile et (ou) mica + fer ferrique sont indiquées en jaune (une combinaison de valeurs de rapport 5/7 élevé, en rouge et le rapport 3/1 élevé en vert). Les zones bleuâtres peuvent indiquer du fer ferreux et (ou) de la chlorite. Il convient de se reporter au chapitre 3.4.4 pour plus d'information sur l'interprétation de la couleur.

Un troisième rapport de bande TM, bande 5 TM / bande 4 TM, est utilisé dans des images composites de rapports de couleurs TM, spécifiquement pour séparer visuellement les valeurs de rapport 5/7 élevés produits par la végétation, de celles produites par les minéraux du groupe argile-carbonate-sulfate-mica. En raison du fait que la végétation est habituellement très réfléchissante en bande 4 TM, les rapports 5/4 des zones végétalisées sont faibles par rapport aux zones sans végétation (roche nue et sol) (Fig. 44). Les valeurs du rapport 5/4 sont de couleur bleue sur l'image composite de rapports de couleurs, de telle manière que les zones de roche nue et de sol (valeurs 5/4 élevées) ont une composante distincte bleue, contrairement à la végétation. Dans les zones avec peu, ou pas, de végétation verte, des valeurs élevées de rapport 5/4 peuvent également indiquer la présence de fer ferreux et ferrique à grain grossier (Fig. 7 et 29).

3.4.3 Recalage du contraste

Le calcul des rapports de bandes, à partir des données de réflectance 8 bits, produit des nombres réels supérieurs à zéro. Habituellement, les valeurs de rapports de bandes sont situés environ entre 0,0 et 3,0, bien que des valeurs de 10,0 ou plus ne soient pas rares. Pour afficher les données de rapports de bandes en image composite en couleur, les valeurs de rapports de bandes doivent être recalées en 8 bits. Les valeurs des rapports 5/7 et 3/1 sont généralement inférieures à 3,0. Par conséquent, ces rapports de bandes ont été recalés linéairement entre 0,0 et 2,0. En d'autres termes, les valeurs de rapports supérieures à 2,0 sont entièrement saturées (définies à 255) et les valeurs entre 0,0 et 2,0 sont recalées linéairement entre 0 et 255. Les rapports de bandes 5/4 ont généralement des valeurs légèrement plus grandes, habituellement moins de 3,0-4,0. Pour les besoins de l'affichage, les rapports de bandes 5/4 sont linéairement recalés entre 0,0 (0) et 3,0 (255). Les valeurs de rapports de bandes égales ou supérieures à 3,0 sont totalement saturées (égales à 255) sur les images recalées de rapports 5/4.

3.4.4 Analyse des images composites par rapports de couleurs

Chaque pixel d'une image composite de rapports de couleurs a une valeur de rapports 5/7, 3/1 et 5/4, et ces valeurs sont affichées respectivement dans les teintes rouges, vertes et bleues, proportionnellement à leurs valeurs de contraste recalées (Fig. 43). Plus la valeur de rapport est élevée, plus sa couleur est représentée dans le pixel. Les couleurs respectives pour les valeurs de trois rapports sont combinées dans les images composites par un processus additif de couleur illustré à la Figure 45. Les valeurs élevées d'une valeur de rapport sont affichées dans les teintes des couleurs primaires respectives : rouge, vert ou bleu. Deux rapports avec des valeurs élevées seront affichés comme la combinaison de leurs deux couleurs primaires. Par exemple, un pixel avec un rapport 5/7 élevé (argile-carbonate-sulfate-mica) et un rapport 3/1 élevé (oxyde de fer) s'affichera en jaune (rouge + vert sur la Fig. 45) si les deux rapports ont des valeurs similaires. Si le rapport 5/7 est plus élevé que le rapport 3/1, le pixel sera orange. Si le rapport 3/1 est plus élevé que le rapport 5/7, le pixel sera vert jaunâtre.

Le rapport 5/4 TM, qui apparaît en bleu sur les images composites de rapports de couleurs, sert à séparer visuellement l'aspect du groupe argile-carbonate-sulfate-mica de la végétation. Les minéraux du groupe argile-carbonate-sulfate-mica et la végétation verte en bonne santé, produisent tous deux des valeurs élevées de rapport 5/7. Par conséquent, les deux matériaux contribuent à une forte composante rouge de l'image composite. Cependant, le rapport TM 5/4 a des valeurs très faibles pour la végétation, et des valeurs intermédiaires à élevées pour le groupe argile-carbonate-sulfate-mica de minéraux. Les faibles valeurs du rapport 5/4 pour la végétation sont produites par la réflectance extrêmement élevée de la végétation dans le proche infrarouge (bande 4 TM) (Fig. 44) par rapport à la bande 5 TM.

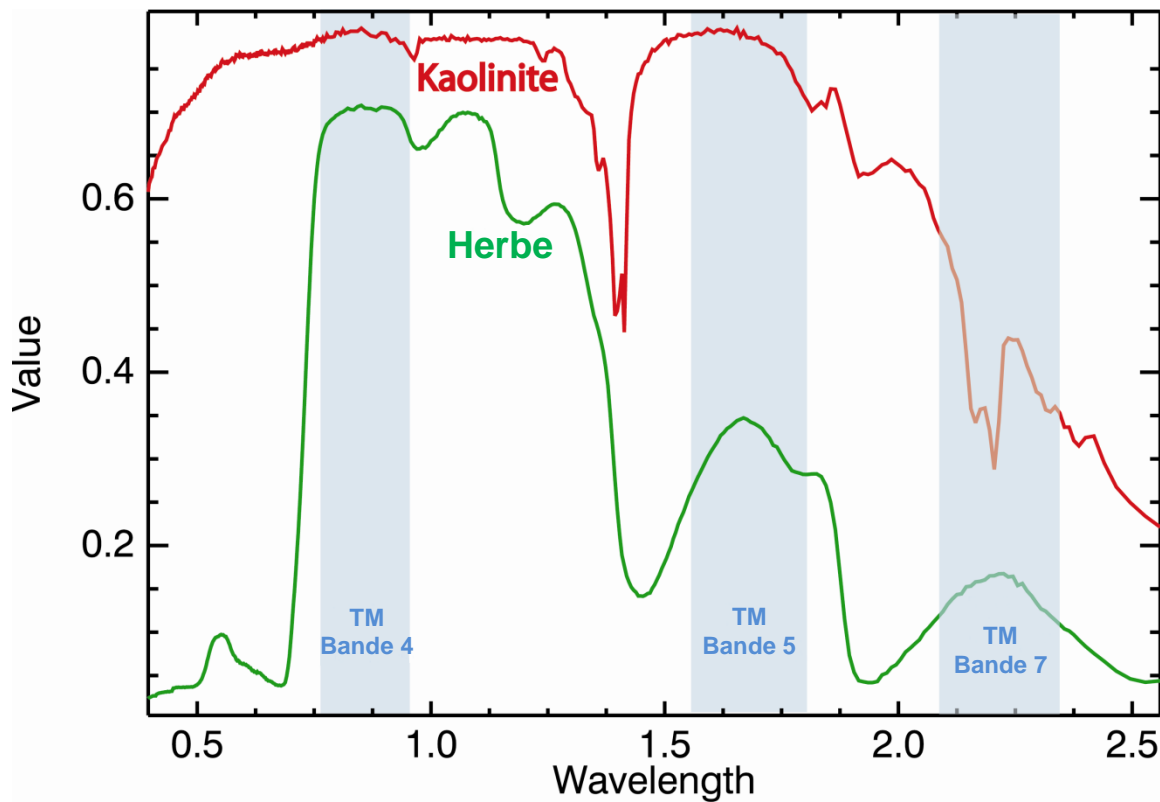


Figure 44. Les spectres de laboratoire types pour la végétation (herbe) et l'argile (kaolinite) montrent des différences spectrales qui permettent au rapport de bande 5/4 TM de distinguer ces matériaux, ayant tous les deux des rapports 5/7 TM élevés sur des images de composites en rapports de couleurs. Le rapport de bande 5/4 TM est généralement beaucoup plus faible pour la végétation que pour l'argile, en raison de la réflectance exceptionnellement élevée de la végétation dans la bande 4 TM (dénominateur). La longueur d'onde en micromètres est indiquée sur l'axe des x, et la valeur de réflectance sur l'axe des y.

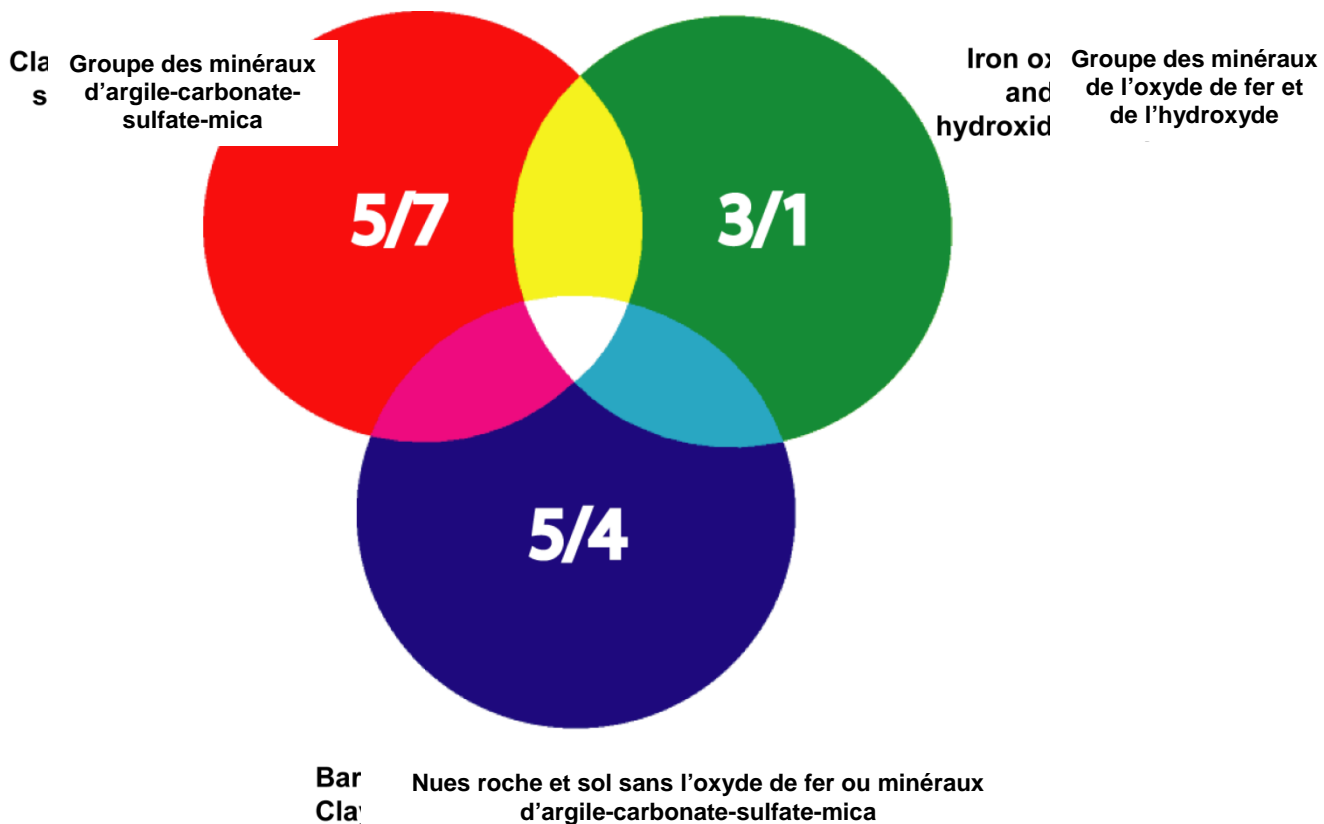


Figure 45. Interprétation des couleurs des images composites de rapports de couleurs formées par le processus d'addition de couleurs. Les images sont produites en combinant les images de rapports TM 5/7, 3/1, et 5/4, respectivement en rouge, vert, et bleu. La combinaison des couleurs primaires produit des teintes jaune, magenta et cyan sur l'image composite. Le blanc apparaît lorsque l'ensemble des trois rapports a des valeurs élevées.

Ces valeurs élevées au dénominateur des rapports 5/4 rendent les rapports 5/4 de la végétation très petits. En conséquence, la végétation n'a pas une composante importante de bleu sur l'image composite de rapports de couleurs, et apparaît en rouge. Cependant, les minéraux du groupe de l'argile-carbonate-sulfate-mica ont des valeurs de rapport 5/4 plus élevées qui contribuent à une importante composante bleue de l'image composite en rapports de couleurs, conduisant ces matériaux à produire des nuances de magenta (rouge + bleu, sur la Figure 45).

La manière la plus directe d'interpréter les images composites de rapports de couleurs est la suivante :

Rouge = végétation ou surfaces de faible albédo (sombres), y compris l'eau

Rouge-orangé = végétation dense et verte

Magenta = minéraux argile-carbonate-sulfate-mica +/- fer ferrique à grain grossier

Vert = minéraux de fer ferrique (oxydes et hydroxydes de fer, sulfates)

Jaune à blanc = à la fois minéraux fer ferrique et argile-carbonate-sulfate-mica.

Bleu à cyan = roche nue et sol avec fer ferreux, chlorite ou fer ferrique à grain grossier possible

Les variations dans les tons de couleurs ne sont pas quantitatives, mais en général, les couleurs les plus claires indiquent des valeurs élevées de rapports et, par conséquent, une forte indication de la présence des groupes de minéraux correspondants. Ces variations peuvent être provoquées par la présence d'espèces minérales spécifiques, l'abondance de minerais, et d'autres matériaux pouvant être inclus au sein du pixel visualisé (pixel composite).

Bien que de nombreux minéraux des deux groupes soient fréquents dans les roches présentant une altération hydrothermale, la plupart ne sont pas exclusifs de ce type de roche. Par exemple, les couches sédimentaires rouges, les schistes argileux, les strates de calcaire et de dolomite, ainsi que les roches plutoniques, volcaniques et métamorphiques altérées, contiennent souvent des minéraux des groupes argile-carbonate-sulfate-mica et oxyde de fer. Par conséquent, interpréter des zones de roches potentiellement altérées par hydrothermalisme dépend de l'identification de variations des caractéristiques des groupes minéraux cartographiés, particulièrement les changements brusques de couleur et de concentration locales, ou de combinaisons de couleurs. La connaissance de la nature et la répartition des divers types de roches dans la région est également utile pour distinguer les anomalies de couleur produites par la lithologie, de celles produites par l'altération hydrothermale. On trouvera un examen plus complet de l'utilisation des données Landsat TM pour la cartographie des roches potentiellement altérées par hydrothermalisme dans Knepper (1989).

3.5 Évaluation de l'utilisation de l'image

La superposition de la carte géologique de la Mauritanie à l'échelle 1/200 000^{ème} sur les images numériques composites en couleurs naturelles de Landsat TM, indique clairement que les données du satellite Landsat ont été utilisées pour la préparation de la carte géologique. Les détails de la cartographie géologique correspondent étroitement à la texture et à la composition des détails visibles sur les images Landsat. Dans la partie Nord du pays, quelques éléments linéaires apparents sur les images sont attribués à des structures géologiques exposées ou à des dykes n'étant pas décrits sur les cartes géologiques existantes, et pouvant être inclus dans les données recompilées. Toutefois, un travail de terrain serait nécessaire pour confirmer la nature de ces éléments.

Les images composites numériques en rapports de couleurs sont des couches de données SIG pouvant être utilisées pour évaluer les variations du caractère favorable, sur la base de la présence de roches potentiellement altérées par hydrothermalisme, pour différents types de gisements épithermaux. Cependant, l'examen préliminaire des images traitées indique que les indices de la présence des roches altérées par hydrothermalisme sont extrêmement limités dans la majeure partie du pays, malgré la présence de nombreux dépôts connus de minerai. Cette absence de manifestation sur les images composites en rapports de couleurs de Landsat TM est probablement due à l'effet combiné de plusieurs facteurs, comme l'âge et la profondeur de la formation des gisements existants (pas de gisements épithermaux récents), l'absence du résultat d'une altération importante associée à des roches altérées (altération chimique retardée), ou un flou spectral des données TM en raison de la présence de couches de sable, de fines à épaisses.

Plusieurs exemples connus de présences d'altération hydrothermale et (ou) des minéraux associés à l'altération (par exemple kaolinite, séricite, fer ferrique) détectables à l'aide de données Landsat TM, sont présentées au niveau des Figures 46 et 47. La Figure 46 présente une image composite en rapports de couleurs Landsat de la zone entourant la mine de Tasiast (Fig. 27 et 28). Le faible albédo de la FFR hébergeant le gisement est marqué par des tons rouge foncé, des latérites identifiées et (ou) des ferricrètes,

connues pour contenir de la kaolinite et de la goethite à grains grossiers (Fig. 29), apparaissent en magenta, ce qui indique la présence des minerais à Al-OH (Fig. 45). Comme mentionné ci-dessus, la goethite à grains grossiers ne produit pas de réponse marquée pour les rapports 3/1 TM de Landsat, utilisés pour détecter le fer ferrique. Les sables éoliens présentant beaucoup fer ferrique, provenant de l'altération de roches contenant du fer, apparaissent en vert. Il convient de noter la manière dont les latérites peuvent être observées, se prolongeant vers le sud sous une mince couche de sable.



Figure 46. Image composite en rapports de couleurs Landsat de la zone entourant la mine de Tasiast. La localisation des prélèvements d'échantillons sur le terrain est indiquée par des cercles jaunes. Une barre donnant l'échelle est insérée en bas à droite. Point central de l'image : 15,508°O, 20,588°N.

Une image composite en rapports de couleurs de Landsat TM, du district d'Inchiri, dans les environs de la ville d'Akjoujt (Fig. 6) est présentée sur la Figure 47. Les présences de kaolinite et de séricite apparaissent en magenta (par exemple à Tabrinkout, à Legleitat el Khader, et sur les surfaces de reg), la végétation verte apparait en orange, et les sables contenant du fer ferrique en vert. Les zones magenta correspondent bien aux zones magenta et rouge des images composites 468/RVB ASTER indiquant la présence d'argiles à Al-OH, de sulfates ou de micas.

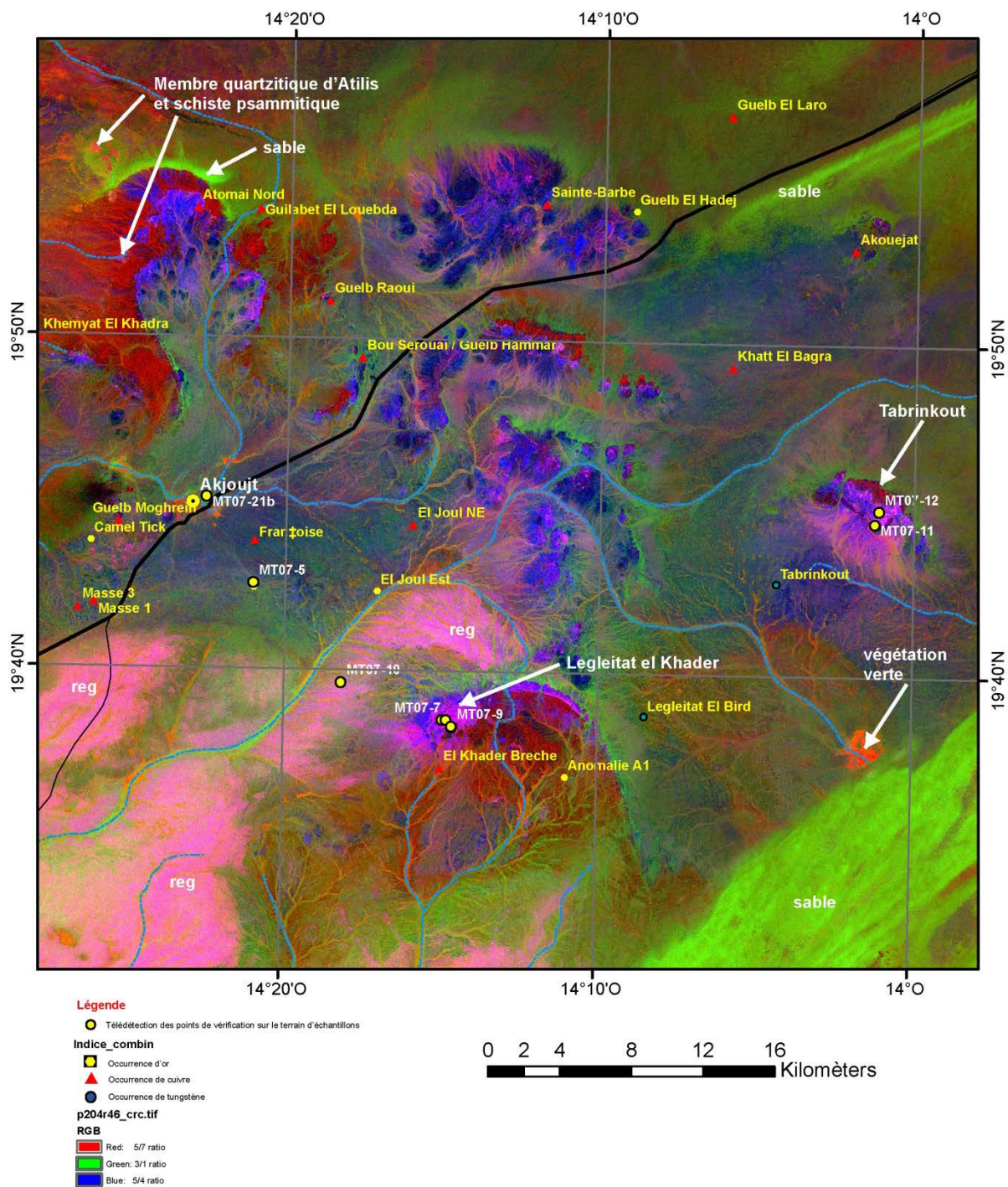


Figure 47. Image composite en rapports de couleurs Landsat du district d'Inchari, dans les environs de la ville d'Akjoujt. À comparer avec les Figures 6, 9, 11, et 12.

4 Conclusions

Dans les terrains Précambriens présentant des roches métamorphiques déformées, l'altération hydrothermale préservée et les dépôts épithermaux/porphyriques sont très rares, avec l'essentiel des variations minéralogiques liées à la lithologie, au degré de métamorphisme, à la pédogenèse et à l'altération. Malgré cela, les données ASTER se sont révélées utiles pour détecter une faible altération des unités sédimentaires et volcaniques métamorphisées, y compris l'altération argileuse et à quartz-séricite associée à une altération sodique, et à des veines de sidérite au niveau de Legleitat el Khader, l'argilisation au sein de quartzites mylonitisées, les brèches de quartz-pyrite mésothermales, et l'altération profonde des serpentinites.

Les techniques de cartographie minérale nouvellement développées à partir de Landsat et d'ASTER quantifient les informations à partir d'images de visualisation à tons continus tels que ceux décrits ici. Elles sont parfaitement adaptées pour évaluer les ressources à partir d'un SIG à l'échelle du pays. Les données thermiques d'ASTER peuvent servir à identifier et cartographier l'importance des minéraux de quartz et les carbonates, ainsi que les roches ultramafiques. Ces méthodes, très intéressantes en termes de coût, peuvent compléter le travail effectué dans le cadre de PRISM-II, avec davantage d'information minéralogique, intégrée dans un format SIG conçu pour permettre une combinaison avec les autres données géospatiales. Ces méthodes seraient donc parfaitement adaptées aux futurs travaux géologiques de télédétection en République Islamique de Mauritanie.

5 Références

- Abrams, M.J., Ashley, R.P., Rowan, L.C., Goetz, A.F.H., et Kahle, A.B., 1978, *Mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite mining district, Nevada, using aircraft scanner images for the spectral region 0.46 - 2.36 μ m*: Geology, vol. 5, p. 713 - 718.
- 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, 2003a, *Imaging Spectroscopy: Earth and Planetary Remote Sensing with the USGS Tetracorder and Expert Systems*: Journal of Geophysical Research, v. 108, no. E12, 5131, doi: 10.1029/2002JE001847, p. 5-1 - 5-44.
- Clark, R. N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Kokaly, R.F., et Sutley, S.J., 2003b, *USGS Digital Spectral Library splib05a*: U.S. Geological Survey Open-File Report 03-395, 19 p., <http://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-395/ofr-03-395.html>.
- Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC), 2005, *ASTER User's Guide, Part 1, General, Version 4.0*: http://www.science.aster.ersdac.jspacesystems.or.jp/en/documnts/users_guide/part1/pdf/Part1_4E.pdf, Tokyo, Japon.
- Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC), 2010, *What is crosstalk?*: http://gds.aster.ersdac.jspacesystems.or.jp/gds_www2002/service_e/release_e/set_release_ecrs.html, Tokyo, Japon.
- Ganne, J., De Andrade, V., Weinberg, R. F., Vidal, O., Dubacq, B., Kagambega, N., Naba, S., Baratoux, L., Jessell, M. et Allibon, J., 2012, *Modern-style plate subduction preserved in the Palaeoproterozoic West African craton*: Nature Geoscience, vol. 5, pp. 60-65.
- Grove, C. I., Hook, S. J., et Paylor, E. D., 1992, *Laboratory reflectance spectra for 160 minerals 0.4 - 2.5 micrometers*: JPL Publication 92-2, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA.
- Iwasaki, A. et Tonooka, H., 2005, *Validation of a crosstalk correction algorithm for ASTER/SWIR*: IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing, v. 43, no. 12, p. 2747-2751.
- Knepper, D.H., Jr., 1989, *Mapping hydrothermal alteration with Landsat Thematic Mapper data*, dans Lee, Keenan, éd., *Remote sensing in exploration geology - A combined short course and field trip*: 28th International Geological Congress Guidebook T182, p. 13 21.
- Marsh, E.E. et Anderson, E.D., 2011, *Ni-Co laterite deposits*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1259, 9 p, <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1259/>.
- Site Internet NASA, Jet Propulsion Laboratory, ASTER, 2007, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>.
- Rockwell, B.W., 2002, *Descriptions, spectral plots, and digital spectra of samples applied to spectral analysis of imaging spectroscopy data: Utah (East Tintic Mountains, Oquirrh Mountains, Wasatch Mountains, and Tushar Mountains), Nevada (Goldfield Hills), and New Mexico (Jemez Mountains), USA, 1999-2002*: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-407, 3 p., <http://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-407/>.
- Rockwell, B.W., 2004, *Spectral variations in rocks and soils containing ferric iron hydroxide and (or) sulfate minerals as seen by AVIRIS and laboratory spectroscopy*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1431, 24 p., <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1431/>.
- Rockwell, B.W., 2009, *Comparison of ASTER- and AVIRIS-derived mineral and vegetation maps of the White Horse replacement alunite deposit and surrounding area, Marysvale volcanic field, Utah*: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2009-5117, 31 p., <http://pubs.usgs.gov/sir/2009/5117/>.
- Rockwell, B.W., 2010, *Mineral and vegetation maps of the Bodie Hills, Sweetwater Mountains, and Wassuk Range, California/Nevada, generated from ASTER satellite data*: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3104, scale 1:62,000, 4 plates, pamphlet, 5 p, <http://pubs.usgs.gov/sim/3104/>.

- Rockwell, B.W., 2012, *Description and validation of an automated methodology for mapping mineralogy, vegetation, and hydrothermal alteration type from ASTER satellite imagery with examples from the San Juan Mountains, Colorado*: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3190, 35 p. pamphlet, 5 map sheets, scale 100,000, <http://pubs.usgs.gov/sim/3190/>.
- Rockwell, B.W., et Hofstra, A.H., 2012, *Mapping argillic and advanced argillic alteration in volcanic rocks, quartzites, and quartz arenites in the western Richfield 1° x 2° quadrangle, southwestern Utah, using ASTER Satellite Data*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2012-1105, 5 p., 1 plate, <http://pubs.usgs.gov/of/2012/1105/>.
- Rockwell, B.W., Clark, R.N., Livo, K.E., McDougal, R.R., et Kokaly, R.F., 2002, *AVIRIS Data Calibration Information: Oquirrh and East Tintic Mountains, Utah*: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-0200, 10 p., <http://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-0200/>.
- Rockwell, B.W., Cunningham, C.G., Breit, G.N., et Rye, R.O., 2006, *Spectroscopic mapping of the White Horse alunite deposit, Marysvale volcanic field, Utah: evidence of a magmatic component*: Economic Geology, v. 101, no. 7, p. 1377-1395.
- Rockwell, B.W., McDougal, R.R., et Gent, C.A., 2005, *Remote Sensing for Environmental Site Screening and Watershed Evaluation in Utah Mine Lands: East Tintic Mountains, Oquirrh Mountains, and Tushar Mountains*: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5241, 84 p., <http://pubs.usgs.gov/sir/2004/5241/> and http://speclab.cr.usgs.gov/earth.studies/Utah-1/sir5241txto_bredit.html.
- Rowan, L.C., Hook, S.J., Abrams, M.J., et Mars, J.C., 2003, *Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system*: Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, v. 98, no. 5, p. 1019–1027.
- Schlüter, T. et Trauth, M.H., 2008, *Geological atlas of Africa: with notes on stratigraphy, tectonics, economic geology, geohazards and geosites of each country*: Springer, Berlin, 307 p.
- Strickland, C.D., et Martyn, J.E., 2001, *The Guelb Moghreïn Fe-oxide copper-gold-cobalt deposit and associated mineral occurrences, Mauritania; a geological introduction*, dans Porter, T.M., éd., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold And Related Deposits: A Global Perspective*, Vol. 2: PGC Publishing, Adelaide, Australia, p. 275-291.
- Swayze, G.A., 1997, *The hydrothermal and structural history of the Cuprite mining district, Southwestern Nevada: An integrated geological and geophysical approach*, Ph. D Dissertation, University of Colorado, Boulder, Colorado, 399 p.

6 Annexe A : Validation d'images produites par ASTER pour l'identification de groupes minéraux, à travers l'utilisation d'exemples de cartographie minérale spectroscopique en provenance de Cuprite, Nevada, États-Unis.

Afin de valider les guides d'interprétation de couleurs des images produites à partir d'ASTER, élaborées dans le cadre de PRISM-II, des exemples de cartographie minérale spectroscopique d'une zone d'altération hydrothermale au sein du district minier de Cuprite, Nevada, USA, sont présentés ici à titre de comparaison. La zone connue sous le nom de Cuprite fait partie d'un district minier plus important de même nom, situé dans le Centre-Ouest du Nevada, USA, entre Las Vegas et Reno, à environ 25 kilomètres au Sud de la ville minière de Goldfield. Bien que seules des zones mineures de minéralisation économique aient été signalées à Cuprite, la région a été largement utilisée comme un site test pour la cartographie minérale par méthodes distantes utilisant les spectromètres de visualisation, en raison de la série complète et bien visible de ses minéraux d'altération, de sa géologie bien caractérisée, et de son caractère compact. Les roches sédimentaires et métasédimentaires Cambriennes, ainsi que roches volcaniques datant du milieu jusqu'à la fin du Miocène, forment le sous-sol de la majeure partie de la région. À la fin du Miocène, des systèmes hydrothermaux convectifs à fumerolles, déterminés par de l' H_2S , se sont développés à faible profondeur au sein des roches volcaniques, créant une altération argileuse développée et pénétrante de vapeur chaude, et de petits gisements de cuivre et d'autres métaux à niveau de sulfures élevé. L'altération se compose de trois assemblages minéraux distincts et zonés, dont la teneur évolue vers l'extérieur, à savoir : 1) des roches silicifiées contenant du quartz, avec une alunite et une kaolinite secondaires ; 2) des roches transformées en opale, contenant de l'opale, de l'alunite, de la kaolinite et de la buddingtonite locale (un feldspath d'ammonium formé par le remplacement de plagioclase à basse température) ; et enfin 3) des roches transformées en argile contenant de la kaolinite, de l'hématite et un peu d'illite (Abrams et al., 1978).

Le système d'altération est constitué de deux centres distincts situés sur les côtés opposés de la route fédérale 95, de direction Nord (Fig. A1), chacun possédant ses propres assemblages minéraux. L'hypothèse la plus récente de genèse des deux centres est qu'ils se sont formés indépendamment l'un de l'autre, et représentent deux systèmes hydrothermaux distincts (Swayze, 1997). Des données non-publiées des isotopes stables δS de la pyrite et de l'alunite provenant de la région soutiennent l'hypothèse d'une origine de systèmes chauffés à la vapeur (Robert Rye, USGS, communication personnelle). Le centre de l'Est est plus récent et beaucoup mieux préservé que le centre de l'Ouest, qui a été érodé de façon plus importante, rendant visible un système de tuyauterie contrôlé par la fracturation du gisement. Le centre de l'Est semble être un exemple classique d'altération argileuse avancée, dominée par le remplacement, et chauffé par de la vapeur. Une couverture de terrasses de tuf d'opaline est présent au-dessus des zones à hématites hypogènes, formées au sein de la zone de paléo-vadose et d'un large remplacement d'alunite formée par oxydation du H_2S en conjonction avec une ébullition au niveau, ou juste au-dessous du paléo-aquifère. Les dépôts d'alunite évoluent latéralement en allant vers l'extérieur en des dépôts de kaolinite et localement en des mélanges de kaolinite + séricite. Il est possible que la calcédoine, visible au cœur du centre de l'Est, se soit déshydratée à partir de l'opale avec le temps.

Dans le centre Ouest, en profondeur au sein des drainages coulant vers l'Est, le long de l'alignement de collines formant la limite Ouest de l'altération, l'érosion a rendu visible des roches pyriteuses de la (des) zone(s) d'alimentation altérées de manière propylitique du système (Rockwell, 2012). Bien que la jarosite supergène soit produite à partir de cette pyrite, elle n'a pas été identifiée à partir des données AVIRIS de haute altitude présentées ci-dessous, en raison de d'affleurements très limités au niveau des falaises quasi-

verticales le long des drainages. Les importants affleurements de jarosite à grains grossiers (intimement mêlée avec de l'alunite), à une altitude légèrement plus élevée dans le centre de l'Ouest, ont été probablement formés par des processus hypogènes au sein de la zone de paléo-vadose, où le fer a remplacé l'aluminium au sein de la structure minérale du sulfate, en présence d'un oxygène atmosphérique plus important, dans un environnement à pH très bas. De la jarosite hypogène identique est associée à de l'alunite de remplacement au niveau du terrain volcanique de Marysville (Rockwell et al., 2005, 2006). Au niveau du centre de l'Est, la jarosite a seulement été cartographiée, grâce aux données AVIRIS de haute altitude (Fig. A2), au niveau d'une zone limitée, à proximité des présences de buddingtonite. La dickite, minéral argileux, polymorphe de la kaolinite, pouvant se former à des températures plus élevées, intervenant généralement au sein de roches hautement silicifiées, est seulement présent à la pointe Sud-Ouest du centre Ouest, et reflète un niveau d'érosion plus profond, par rapport au centre Est (Fig. A3).

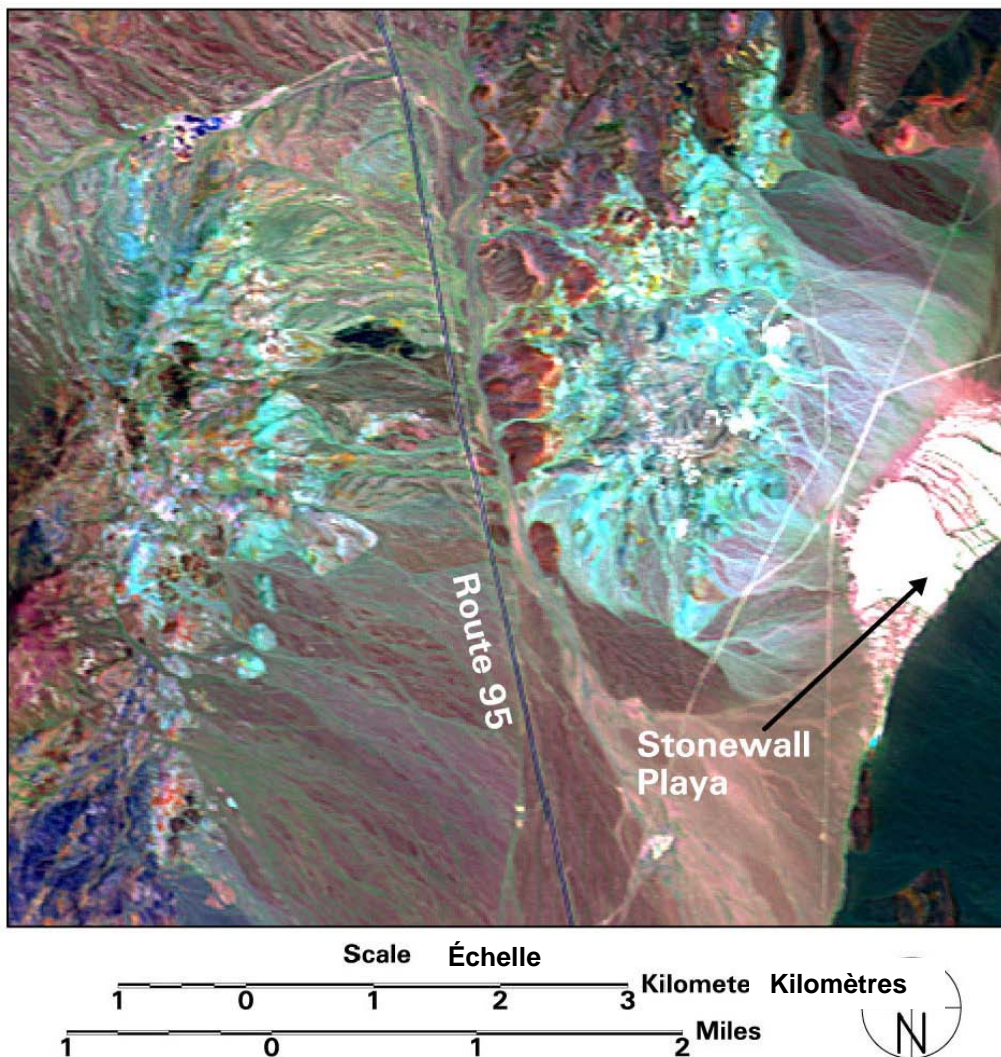


Figure A1. Image composite en couleur de la région de Cuprite, Nevada, produite à partir de données AVIRIS à haute altitude de 1998, après convolution à la résolution spectrale du système de Cartographie Thématique de Landsat. Bande/Attribution de couleurs 741/RVB. Point du centre de l'image : 37,53802N, 117,19427O.

La figure A2 présente une carte de minéraux contenant du fer, produite à partir de données d'image spectroscopique à haute altitude acquises à 20 000 m d'altitude, en 1998, par l'« Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer » (AVIRIS, voir <http://aviris.jpl.nasa.gov/>). Ces données AVIRIS ont un GIFOV de 17 m. La figure A3 présente une carte dérivée d'AVIRIS pour des minéraux argileux, du mica, du sulfate, du carbonate, des sorosilicates et des minéraux de quartz hydratés. Ces cartes ont été produites par comparaison quantitative d'images de spectres de réflectance avec des spectres de référence de laboratoire, pour divers minéraux et mélanges de minéraux (Clark et al., 2003b ; Rockwell, 2002) par l'utilisation d'une version mise à jour (Rockwell, 2002) d'un système expert d'analyse spectrale (Clark et al., 2003a ; Rockwell et al., 2005). Les données AVIRIS ont été étalonnées pour la réflectance par l'utilisation de spectres de terrain de la Stonewall Playa (Fig. A1 ; Swayze, 1997) par l'utilisation de techniques décrites par Rockwell et al. (2002). Ces cartes ont été largement vérifiées sur le terrain et au laboratoire, et elles servent ici de référence précise pour l'identification et la cartographie à distance des minéraux.

La Figure A4 présente une carte minérale produite à partir des données ASTER de 2001, par l'utilisation de techniques de spectroscopie (« correspondance de spectre ») similaires aux techniques utilisées pour analyser les données AVIRIS (Rockwell, 2009).

Les Figures A5 à A9 ont été produites par l'utilisation de techniques de traitement d'image semblables aux images correspondantes produites dans le cadre de PRISM-II ASTER en RIM.

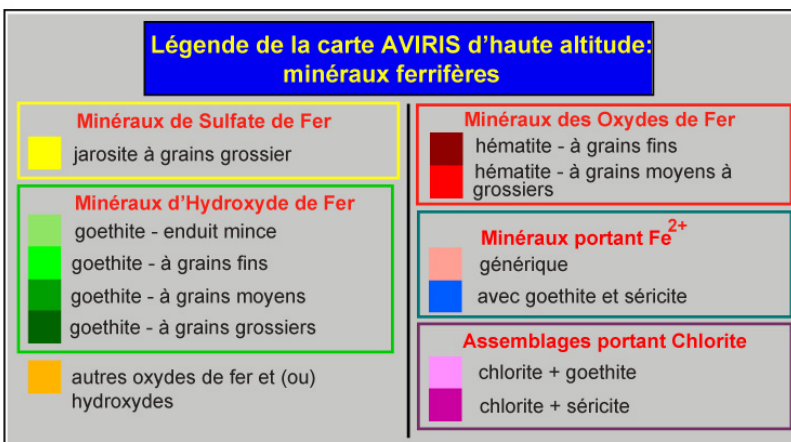
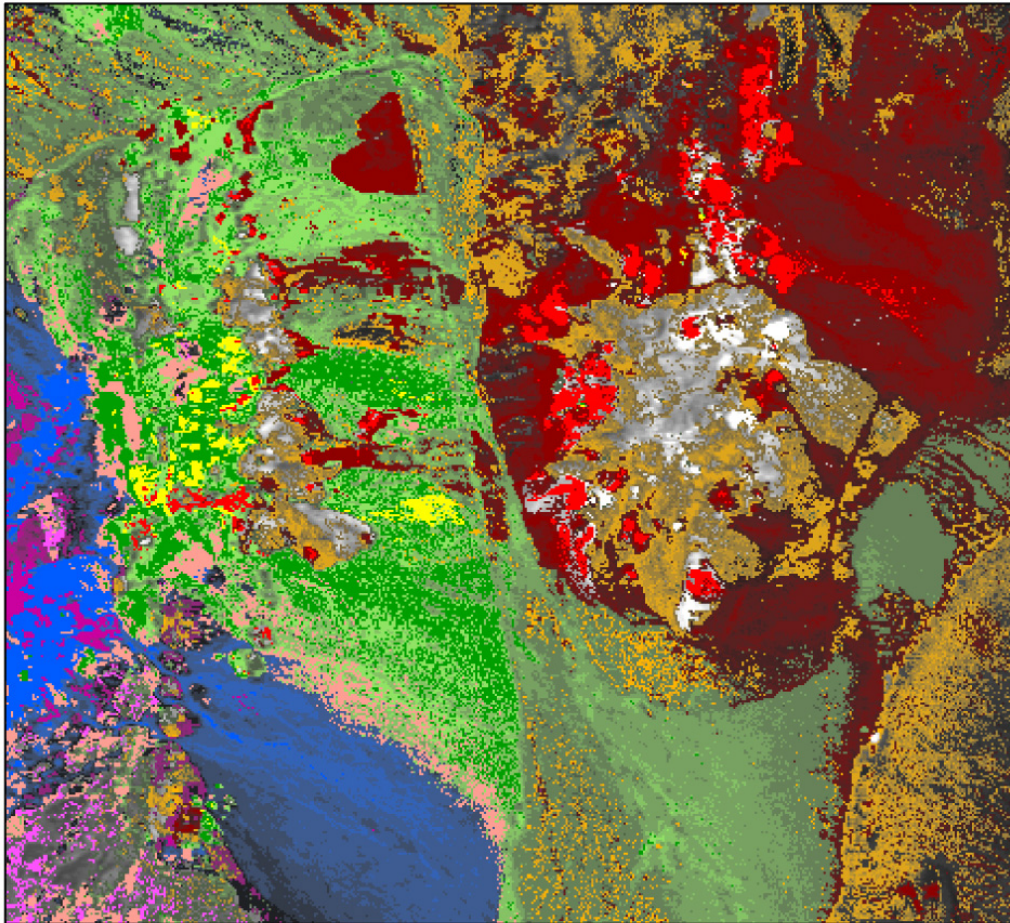


Figure A2. Cartes des minéraux de fer produites à partir des données AVIRIS de 1998, à Cuprite, Nevada, (Rockwell, 2012).

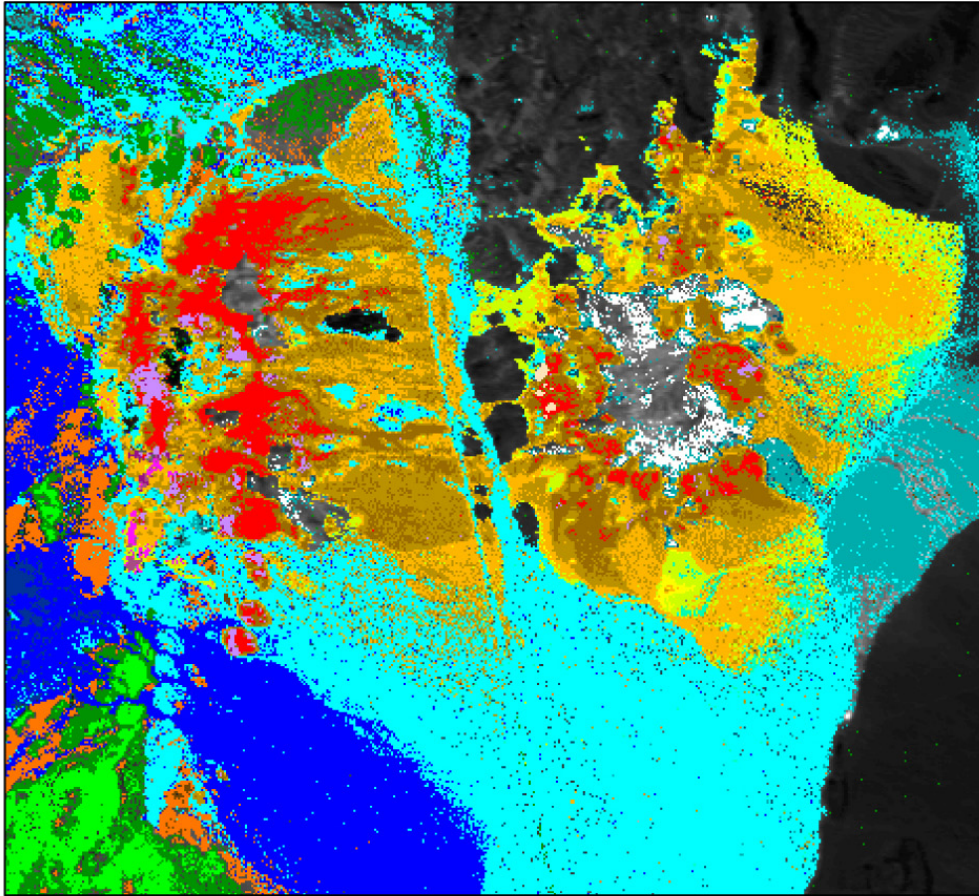


Figure A3. Cartes des minéraux argileux, des sulfates, des carbonates, des sorosilicates, et du quartz hydraté, à Cuprite, Nevada, produites à partir des données AVIRIS de 1998 (Rockwell, 2012).

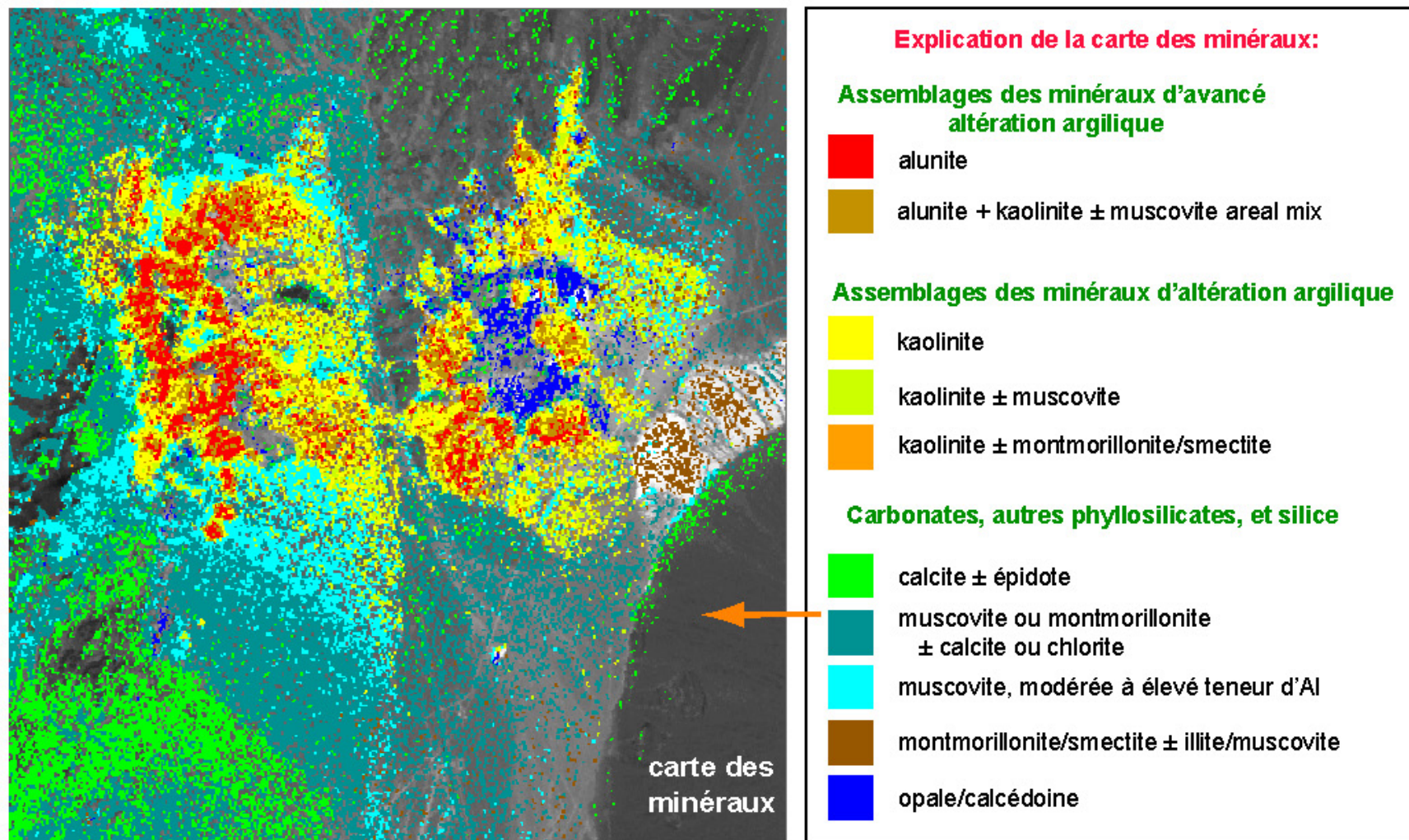


Figure A4. Carte des minéraux argileux, des sulfates, des carbonates, des sorosilicates, et du quartz hydraté, à Cuprite, Nevada, produite à partir des données ASTER de 2001 (Rockwell, 2012). À comparer avec la Figure A3, pour distinguer les différentes possibilités de cartographie minéralogique d'AVIRIS et d'ASTER dans la région spectrale SWIR.



Figure A5. Image composite renforcée en couleur 468/RVB de la région de Cuprite, produite à partir des données ASTER acquises en 2001. Cette image a été produite en utilisant des techniques de traitement d'image identiques à celles utilisées pour produire les images de PRISM-II, contenant « **minvue468** » dans le nom de leur fichier. Les interprétations minéralogiques basées sur la couleur montrées au niveau de la Figure 5 ont été développées en comparant cette image avec la carte minérale détaillée issue d'AVIRIS présentée au niveau de la Figure 3, et en comparant les images produites à partir d'ASTER avec la couverture SIG à l'échelle 1/200 000^{ème} de la géologie de la RIM.

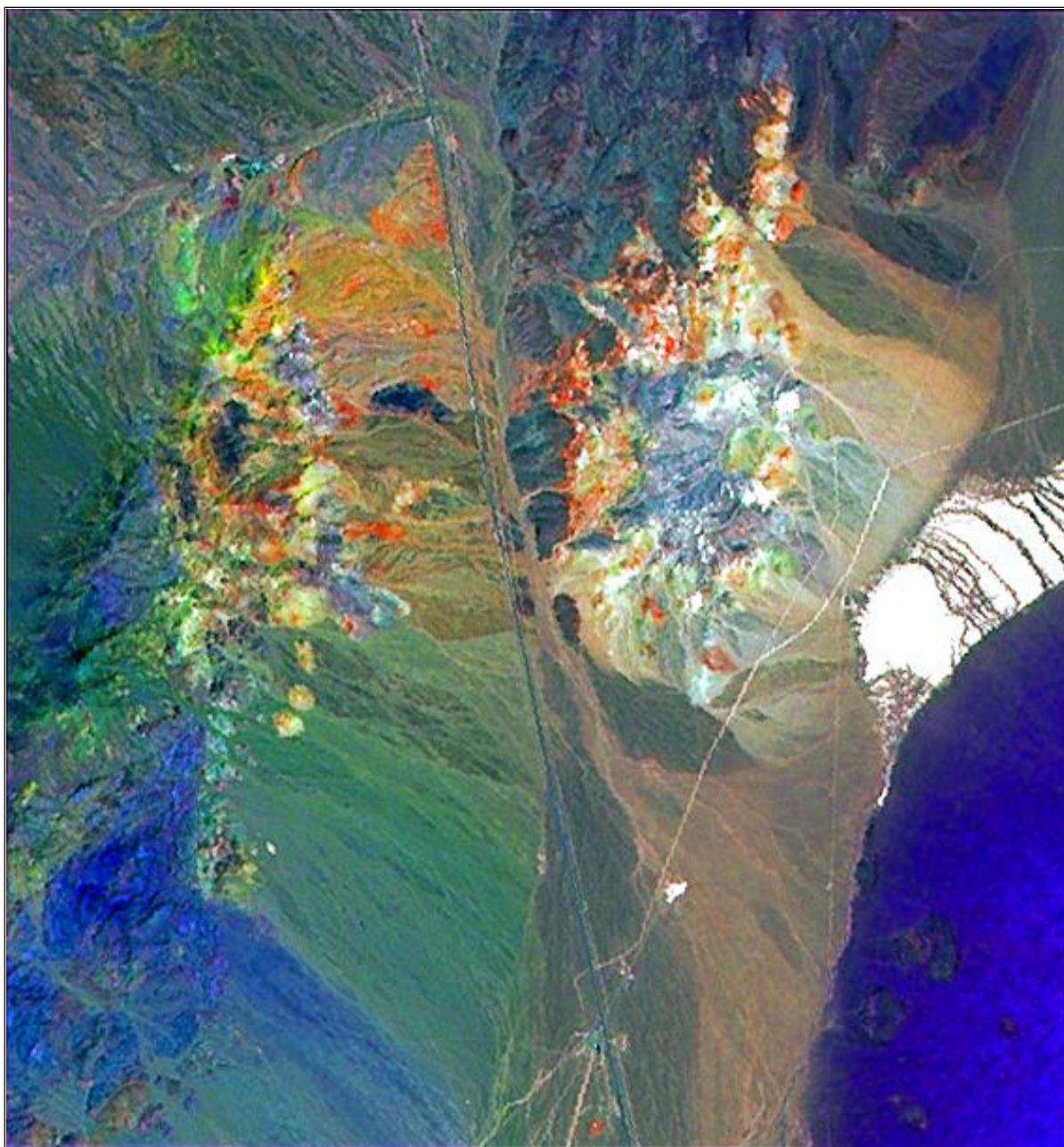


Figure A6. Image composite renforcée en rapports de couleurs 134/RVB de la région de Cuprite, produite à partir des données ASTER acquises en 2001. Cette image a été produite par l'utilisation de techniques de traitement d'image identiques à celles utilisées pour produire les images dans le cadre de PRISM-II, contenant « **argrat2-fe_crispb2_lowp** » dans le nom de leur fichier. Les interprétations minéralogiques basées sur la couleur présentées au niveau de la Figure 8 ont été développées en comparant cette image avec les cartes minérales dérivées d'AVIRIS présentées au niveau des Figures 2 et 3, et en comparant les images produites par ASTER avec la couverture SIG à l'échelle 1/200 000^{ème} de la géologie de la RIM. On peut noter la manière dont les régions rouge/orange correspondent à des concentrations en minéraux de fer ferrique (principalement de l'hématite avec un peu de jarosite et de goethite) au niveau de la figure A2.

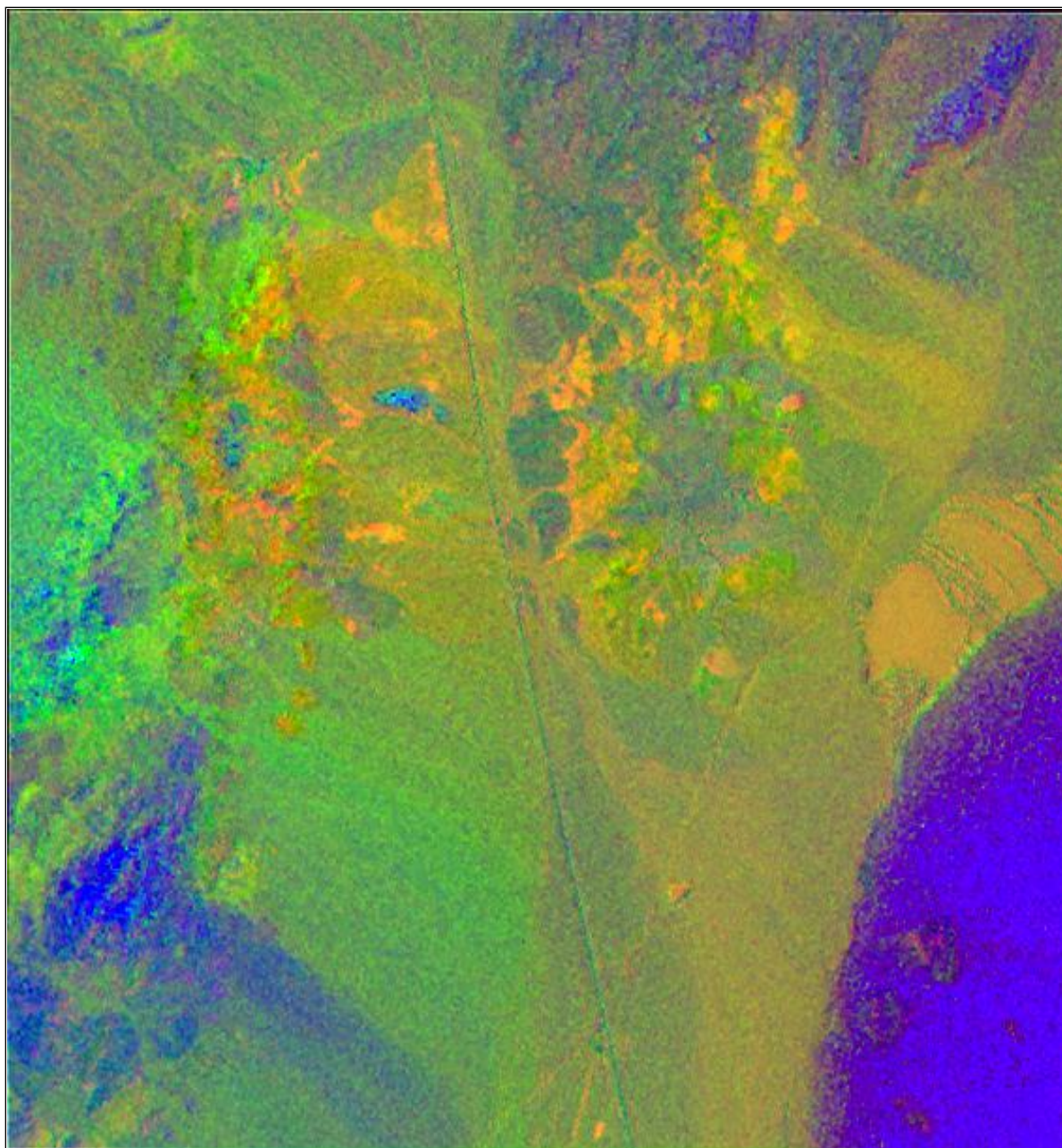


Figure A7. Image composite non renforcée en rapports de couleurs 134/RVB de la région de Cuprite, produite à partir des données ASTER acquises en 2001. À comparer avec la figure A6. Cette image a directement été produite à partir de rapports de bandes, sans amplification spatiale. On notera que cette image possède des informations couleur identiques à celles de la Figure A6, mais ne dispose pas des informations spatiales de 15 m de la bande 2 ASTER. On remarquera également que Stonewall Playa, au centre à droite (Fig. A1), présente une couleur orange, ce qui indique la présence de fer ferrique (en rouge, Fig. 8) et de minéraux à Al-OH (en vert, Fig. 8). Les Figures A2 à A4 indiquent que la goethite (hydroxyde de fer ferrique) et la montmorillonite, du groupe spectral de la smectite, sont également présentes à la surface de la playa. Au niveau de la Figure 6, la playa présente une couleur blanche, ce qui indique un fort albédo de surface. On utilisera des images composites à rapports de couleurs non renforcées pour interpréter la minéralogie des régions à fort albédo.

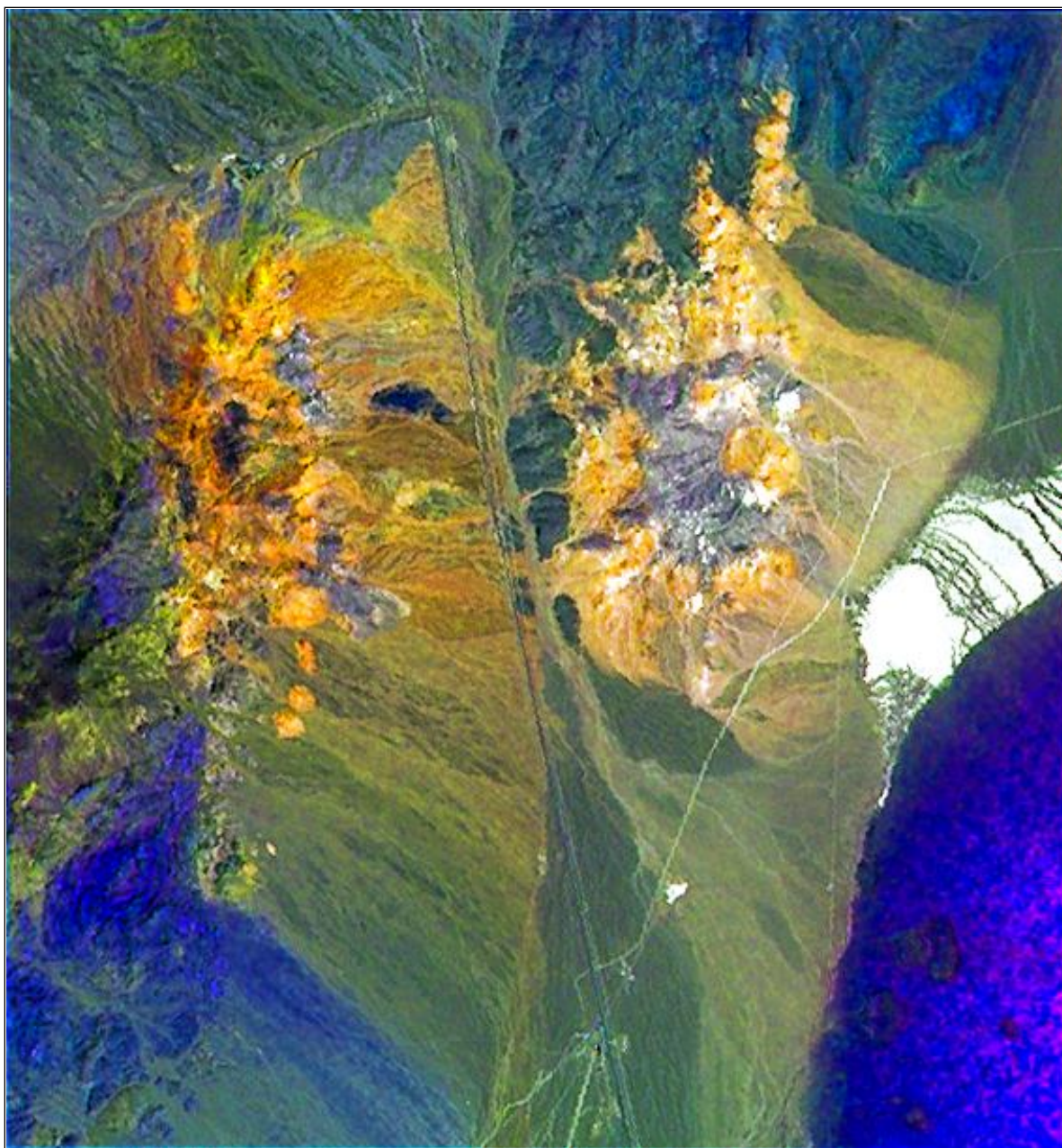


Figure A8. Image composite renforcée en rapports de couleurs 234/RVB de la région de Cuprite, produite à partir des données ASTER acquises en 2001. Cette image a été produite par l'utilisation de techniques de traitement d'image identiques à celles utilisées pour produire des images dans le cadre de PRISM-II, contenant « **argrat2_crispb2_lowp** » dans le nom de leur fichier. Les interprétations minéralogiques basées sur la couleur présentées au niveau de la Figure 10 ont été développées en comparant cette image avec les cartes minérales dérivées d'AVIRIS présentées au niveau de la Figure 3, et en comparant les images produites par ASTER avec la couverture SIG à l'échelle 1/200 000^{ème} de la géologie de la RIM. On notera la végétation sèche (en magenta), en bas à droite. Dans ce traitement d'image, l'altération argileuse développée (rouge à orange) peut être différenciée en deux zones distinctes à séricite et à smectite (jaune à vert).

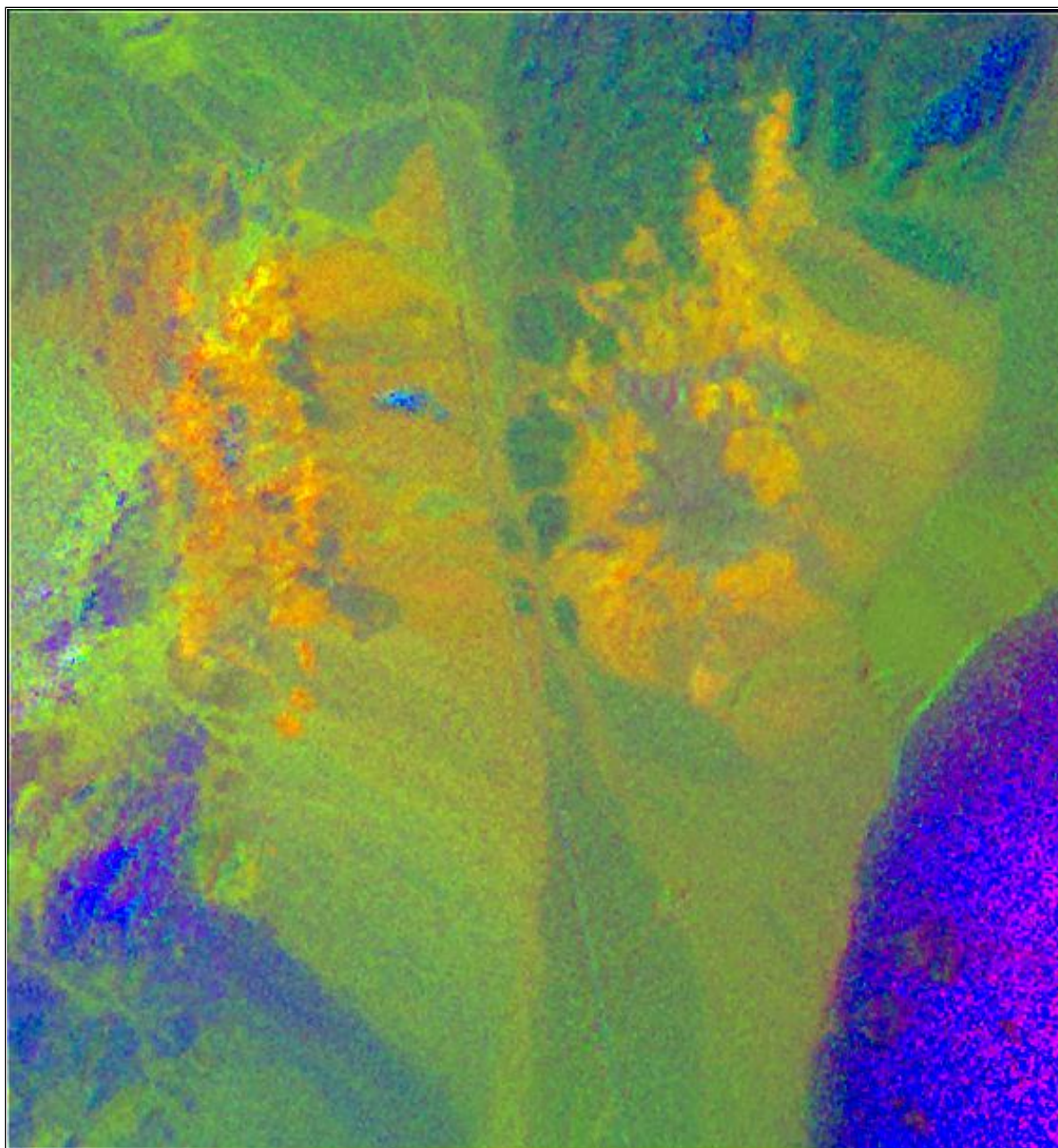


Figure A9. Image composite en rapports de couleurs 234/RVB non renforcée de la région de Cuprite, produite à partir de données ASTER acquises en 2001. À comparer avec la Figure A8. Cette image a directement été produite à partir des rapports de bandes, sans amplification spatiale. On notera que cette image possède des informations couleur identiques à celles de la Figure A8, mais ne dispose pas des informations spatiales de 15 m de la bande 2 ASTER. On remarquera également noter que Stonewall Playa, au centre à droite (Fig. A1), possède une couleur verte qui indique la présence d'argiles à séricite ou à smectite (fig. 10). Les figures A3 et A4 indiquent que la montmorillonite, du groupe spectral de la smectite, est présente à la surface de la playa. Au niveau de la Figure 8, la playa montre une couleur blanche, ce qui indique un fort albédo de surface. On utilisera des images composites à rapports de couleurs non renforcées pour interpréter la minéralogie des régions à fort albédo.

7 Annexe B : Exemple d'images produites par l'analyse des données ASTER

Les cartes des groupes minéraux produites à partir des données ASTER en utilisant une méthode automatisée basée sur des rapports (Rockwell, 2012), développées d'après les images produites de visualisation en tons continus de PRISM-II, ont été réalisées et sont fournies ici à titre de comparaison. Cette méthodologie a été conçue pour la production à moindre coût de cartes groupe de minéraux sur de grandes superficies. Les surfaces sombres sont masquées et ne sont pas analysées, afin de réduire les erreurs d'identification des groupes de minéraux produites par la dégradation spectrale des données ASTER pour de faibles albédos. Seuls les affleurements avec une présence abondante de minéraux sont inclus sur cette carte, se concentrant sur les affleurements plutôt que sur les dérivés d'alluvions. Si l'analyse est adaptée aux caractéristiques d'une vue ou d'une région particulière (non réalisé ici), la faible importance des présences minérales peut être prise en compte.

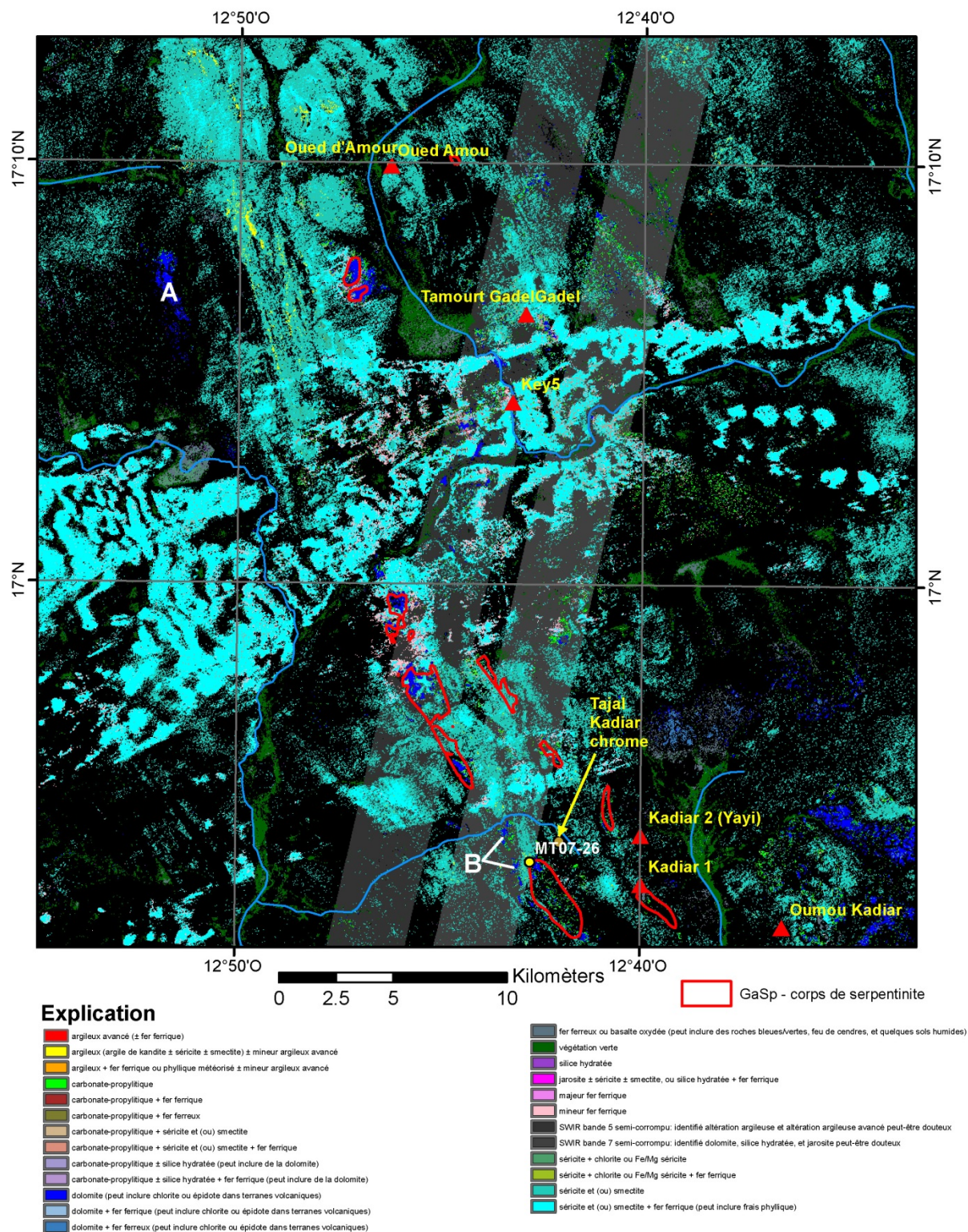


Figure B2. Carte des groupes minéraux de la zone entourant la localisation MT07-26, à l'Ouest des présences de cuivre de Kadiar, dans les Mauritanides du Sud. Les roches ayant une grande absorption au niveau des bandes 7 et 8 ASTER, dont les

serpentinites altérées, contenant de la magnétite, comme celles de l'emplacement de l'échantillon (Fig. 39 et 40), apparaissent en bleu. De telles roches contiennent de la dolomite (voir l'explication de carte ci-dessus), de la chlorite et d'autres phyllosilicates de Mg-OH (serpentine, talc), et de l'épidote (Fig. 7). Plusieurs roches avec de telles caractéristiques spectrales correspondent à des serpentinites au sein de roches ultramafiques massives, qui ont été cartographiées par le projet PRISM-I comme l'unité GaSp (apparaissant en rouge). Les présences de cuivre de PRISM-I sont indiquées par des triangles rouges. Les quartzites et les schistes pélitiques à muscovites ont été cartographiés comme « séricite et (ou) smectite », en cyan foncé. Les ceintures de sable éolien, traversant la zone d'Ouest en Est ont été cartographiées comme « séricite et (ou) smectite + fer ferrique », en cyan. A = schistes à épidote variable et à chlorite du Groupe Protérozoïque d'El Mseigguem, unité MsOs. B = talcschistes du Groupe non-différencié Protérozoïque de Gadel, unité Ga. On notera les zones potentiellement argileuses (en jaune à l'Est et au Nord-Est de A), au sein des quartzites Cambriennes de la Formation de Gàoua, qui sont généralement séricitiques dans cette zone. Voir la version PDF à haute résolution de la figure pour plus de détails.

8 Annexe C : Cartes des images composites en couleur 468/RVB ASTER

Six planches présentant les images composites renforcées 468/RVB ASTER des zones étudiées sont présentées au niveau de la Figure 1.

9 Annexe D : Cartes des images de MNT ASTER

Six planches présentant les images de MNT ASTER des zones étudiées sont présentées au niveau de la Figure 1.

10 Annexe E : Cartes des images composites en couleurs naturelles de Landsat

Soixante-trois planches à l'échelle 1/277 000^{ème} présentent les images composites TM de Landsat en couleurs naturelles (321/RVB), pour la République Islamique de Mauritanie. Voir la Figure 41 pour la carte de synthèse de la localisation des vues.

11 Annexe F : Cartes des images composites par rapports de couleurs de Landsat

Soixante-trois planches à l'échelle 1/277 000^{ème} présentent les images composites TM de Landsat en rapports de couleurs, pour la République Islamique de Mauritanie. Voir la Figure 41 pour la carte synthétisant la localisation des vues.