CARACTERISATION DES REJETS MINIERS DANS LE BASSIN VERSANT DE LA MEJERDA EN UTILISANT LES DONNEES ASTER

Nouha MEZNED[1], Sâadi ABDELJAOUAD[1] et Mohamed Rached BOUSSEMA[2]

[1] Laboratoire des Ressources Minérales et Environnement, Département de Géologie, Faculté des Sciences, Mathématiques et Physiques de Tunis, Campus Universitaire du Belvédère, 2092 Tunis, TUNISIE
Tél : +216 71 874 700, Fax : +216 71 872 729
Courriel : mezned_nouha@yahoo.fr
[2] Laboratoire de Télédétection et Système d'Information à Références Spatiales École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 le Belvédère Tunis, TUNISIE
Tél/Fax : +216 70 860 325
Courriel : Rached.Boussema@enit.rnu.tn

Soumis le 1er novembre 2007 ; révisé le 15 avril 2008 ; accepté le 7 mai 2008, © *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 2, p. 83-92

Résumé

*La présente étude contribue à analyser les rejets miniers et à déterminer leur composition dans le site minier de Jebel Hallouf-Bouaouane, situé dans le bassin versant de la Mejerda au nord de la Tunisie, en utilisant les données multispectrales du domaine VNIR (*Visible Near Infrared*), SWIR (*Shortwave Infrared*) et TIR (*Thermal Infrared*) de l'image ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). Nous avons montré qu'en utilisant une librairie spectrale de référence (tel que USGS ou JPL), nous pouvons détecter certains minéraux de rejets miniers sans la connaissance préalable de leur composition minéralogique. Les minéraux détectés par l'analyse spectrale des données SWIR au niveau des digues sont : la calcite, la smithsonite, la kaolinite et l'illite, le quartz est détecté par les données TIR. La comparaison de ces résultats avec ceux de l'analyse des sections polies et de la DRX (Diffraction aux Rayons X) des échantillons de surface de chaque digue, a confirmé la présence de cette composition minéralogique avec la présence d'autres minéraux ; la galène, la cérusite, la pyrite, la sphalérite, l'hématite, la goethite, le gypse, la barytine et la fluorine. La limite de détection des données images par rapport aux résultats de la DRX et des sections polies, se justifie par sa moyenne résolution spectrale.*

Mots clés : *rejets miniers, librairie spectrale, ASTER, DRX.*

MINE TAILING CHARACTERIZATION IN THE MEJERDA WATERSHED USING ASTER DATA

Abstract

This study contributes to analyse the mineral composition of the mine tailing in the Jebel Hallouf-Bouaouane mine, located in the Mejerda watershed in Northern Tunisia. We use the ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) VNIR (Visible Near Infrared), SWIR (Shortwave Infrared) and TIR (Thermal Infrared) data in order to cartography the mineral map of the studied site. We show that spectral library can be used to identify certain mineral (like quartz, calcite, kaolinite, etc.) existing within tailings without their mineral composition knowlegment. The different minerals detected with SWIR analyse within deposits are: calcite, kaolinite and illite, Quartz was detected by TIR Data. This composition was confirmed by XRD and polished section analyses of deposit surface samples. Moreover, these analyses reveal the presence of Galena, cerussite, pyrite, sphalerite, hematite, goethite, gypsum, barite and fluorite. The relative important spectral resolution of the image justifies the limitation of this detection comparated to the DRX and polished section results.

***Key Words*:** mine tailing, spectral library, ASTER, XRD.

I. INTRODUCTION

Le contexte géologique de la Tunisie est favorable à une activité minière très variée (Sainfeld, 1952 ; Bouhlel, 1993). Cette activité est à l'origine d'impressionnantes quantités de stériles (gros cailloux concassés) et de résidus miniers, particulièrement le long du bassin versant de la Mejerda. Ces quantités rejetées, représentent la masse de matière brute non valorisée et stockés généralement à proximité de l'usine de traitement (Mansouri, 1980). Ces rejets montrent une large répartition spatiale subissant une évolution multitemporelle en fonction des conditions climatiques et de la topographie du milieu (Mezned, 2006 *et al*.).

Il est donc nécessaire de cartographier de manière précise les rejets miniers et leur composition et de suivre leur évolution dans le temps. L'utilisation d'images de télédétection constitue un outil puissant pour l'aide à la cartographie, en particulier le capteur ASTER qui couvre la gamme de longueur d'ondes du VNIR (Visible Near InfraRed), SWIR (Short Wave Infrared) et TIR (Thermal InfraRed) où la plupart des minéraux présentent des absorptions spécifiques permettant leur identification et donc leur cartographie.

Le nord de la Tunisie renferme plusieurs types de mines (Pb, Zn, Fl, etc.) (Sainfeld, 1952 ; Slim, 1992 ; Bouhlel, 1993), particulièrement le bassin versant de l'oued Mejerda, le plus important en Tunisie, source d'eau précieuse exploitée aussi bien pour l'irrigation des terres agricoles que pour l'eau potable. La mine de Jbal Hallouf-Bouaouane y est connue parmi les plus importantes mines dont l'activité fût bénéfique pour l'économie du pays (Mansouri, 1980). Cette activité a été aussi décrite comme source de nuisance et de souffrance pour la région avec l'affaissement de terrain lié aux effondrements des galeries (Ourfelli *et al.*, 2005), et l'éparpillement de grandes quantités de rejets stériles et de laverie qu'elle a engendré (Mansouri, 1980 ; Slim, 1992). Ainsi, la cartographie des rejets devient nécessaire et utile pour leur délimitation.

Notre contribution dans cette étude, est d'analyser les rejets miniers dans le site du Jebel Hallouf-Bouaoune en utilisant les données spectrales du domaine VNIR, SWIR et TIR de l'image multispectrale ASTER. L'analyse établie dans cette étude montre qu'en utilisant une librairie spectrale (Clark *et al.*, 1993 ; Clark *et al.*, 2003), il est possible de détecter certains minéraux de rejets miniers sans connaissance préalable de leur composition minéralogique. La librairie spectrale peut également remplacer dans une certaine mesure l'absence des données spectrales mesurées sur le terrain avec un spectroradiomètre (Mezned *et al*., 2006). Les résultats de l'analyse spectrale sont comparés aux données minéralogiques par DRX et aux observations des sections polies afin d'établir des procédés adéquats de revalorisation.

II. SITE D'ETUDE

La mine de Jebel Hallouf-Bouaouane, abandonnée depuis 1986, est située au nord de la Tunisie (36°42'N 9°0'5"E) dans la partie amont du bassin versant de la Mejerda (figure 1). Cette mine, qui fût exploitée essentiellement pour le Pb et le Zn, représente un complexe de minéralisation formé par deux gîtes distants de 1km l'un de l'autre. Elle est localisée (figure 2) dans la partie méridionale de la zone des nappes, (Rouvier, 1973 ; Ould Bagga *et al.*, 2006), occupant une position intermédiaire entre la zone des écailles de Aîn El Bey et l'aire d'affleurement des terrains de l'unité de Kassab (Mansouri, 1980).

Dans cette région le relief est très peu accentué avec une altitude moyenne de l'ordre de 300 m. Le réseau hydrographique est très dense, représenté par de nombreux petits oueds se trouvant à sec en dehors des saisons pluvieuses et dont un grand nombre se déversent dans l'oued Kassab. Cet oued représente le principal oued pérenne de la région de Mejerda (Mansouri, 1980).

III. MATERIELS ET METHODES

Nous avons utilisé les données VNIR, SWIR et TIR de l'image ASTER corrigée, acquises le 26 juin 2000. Ces données sont représentées par 6 bandes spectrales entre 1,6µm-2,43µm avec une résolution spatiale de 30m. Elles sont très utiles, particulièrement le domaine du SWIR, entre 2,0 et 2,5 µm, présente un grand intérêt pour la cartographie minéralogique car il est d'une part peu affecté par les effets de l'atmosphère et d'autre part correspond au domaine de longueur d'ondes où s'expriment les absorptions spécifiques de la majorité des minéraux. Ce domaine est particulièrement sensible aux minéraux contenant des molécules et des radicaux comme H2O, OH, NH3, CO3, SO4, Fe-OH, AL-OH, Mg-OH, responsables des absorptions dans certaines longueurs d'ondes (Hunt and Salisbury, 1976 ; Hunt, 1977 ; Hunt, 1979 ; Blom et *al.*, 1980 ; Kergomard, 1990 ; Gallie et *al.*, 2002). L'absorption, sa position, son intensité, sa largeur et sa forme sont spécifique et fonction de la composition, de la granulométrie, de système cristallin et de l'abondance de minéral dans un site analysé (Kergomard, 1990). Nous nous basons sur ces principes de l'absorption pour identifier certains minéraux des rejets miniers. Nous avons utilisé la librairie spectrale de l'USGS (*U. S. Geological Survey*) (Clark *et al.*, 1993), avec 500 profiles spectraux et celle du JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) (Grove *et al.*, 1992), avec 160 profils spectraux, pour l'analyse des données images des digues. Ces signatures spectrales ont été dégradées à la résolution du capteur (ré-échantillonnées) avant d'être utilisées pour l'identification des minéraux des rejets. Le ré-échantillonnage a été assuré par un modèle Gaussian qui utilise un facteur d'absorption

référence FWHM (The full-width half-maximum) équivalent à la largeur des bandes en se basant sur les longueurs d'onde de l'image (centre des bandes). Les résultats ont été comparés par la suite à la composition minéralogique déterminée par la DRX, sur des poudres et des agrégats orientés des échantillons de surface des digues, et par la description des sections polies des mêmes échantillons. 18 échantillons ont été prélevés selon des radiales pour chaque échantillon représentatif d'une digue.

IV. RESULTATS

IV.1. Etude des rejets par les données ASTER

Pour identifier les principaux composants minéralogiques des rejets miniers à partir des réflectances tirées de l'image, nous les avons comparé aux signatures spectrales des minéraux de la librairie USGS, ré-échantillonnées dans les bandes spectrales des domaines VNIR, SWIR et TIR. En effet, cette comparaison permet l'identification des absorptions au niveau de la réflectance tirée de l'image qui représente une mixture de réflectance des différents minéraux existants au niveau du pixel. Malgré la différence entre les valeurs de réflectance de l'image et de la librairie, due à la différence de pureté des minéraux en relation essentiellement avec les conditions d'altération, la nature de la lumière lors de la mesure de la réflectance, les absorptions des minéraux sont préservées.

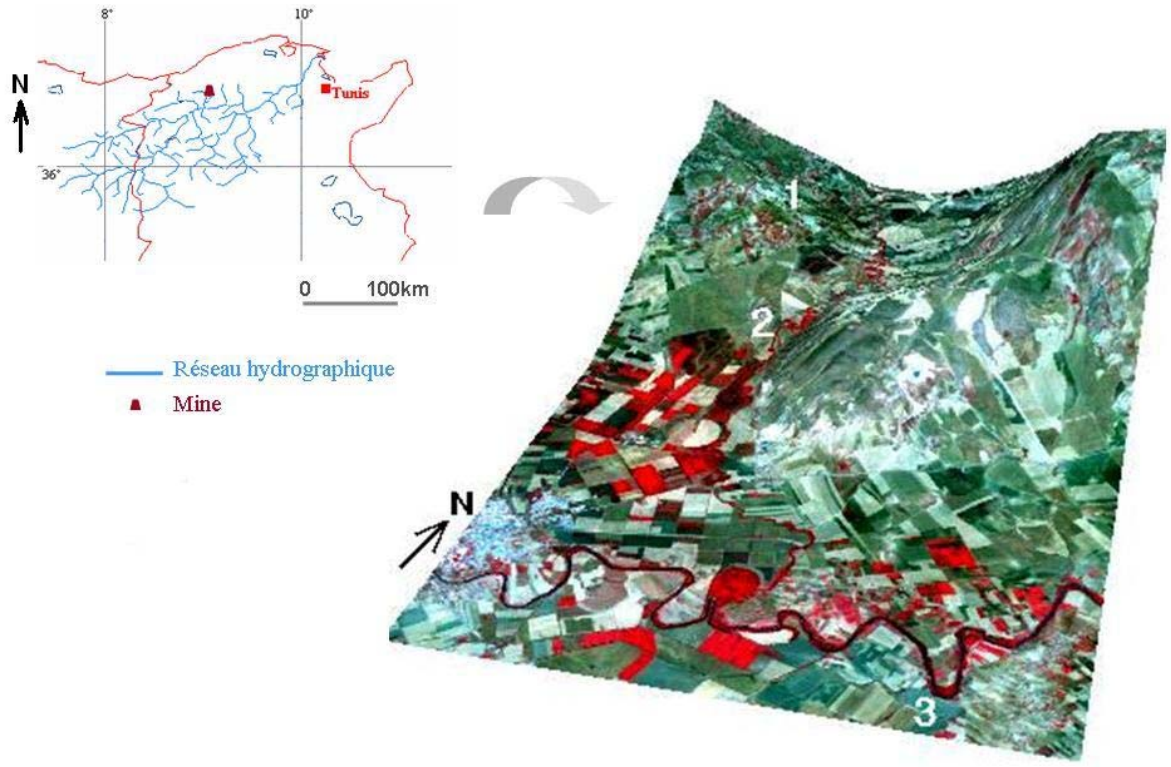


Figure 1 : Localisation du site Jebel Hallouf-Bouaouane dans le bassin versant de la Mejerda (a) et sur l'image ASTER VNIR (600*1000 pixels) drapé sur le MNT en 3D (b). Les chiffres en blanc indiquent la localisation des rejets miniers (1), l'oued Kassab (2) et l'oued Mejerda (3). La couleur rouge au niveau de la figure (b) représente la végétation.

Figure 1*: Map showing the location of the Jebel Hallouf-Bouaouane mine in the Mejerda river watershed (a) and the corresponding 3D till representation mapped with VNIR ASTER (600*1000 pixels) imagery to the study site (b). The white numerous indicate location of the mine tailing (1), Kassab wad (2) and Mejerda river (3). Reddish colour in the figure (b) represents vegetation.*

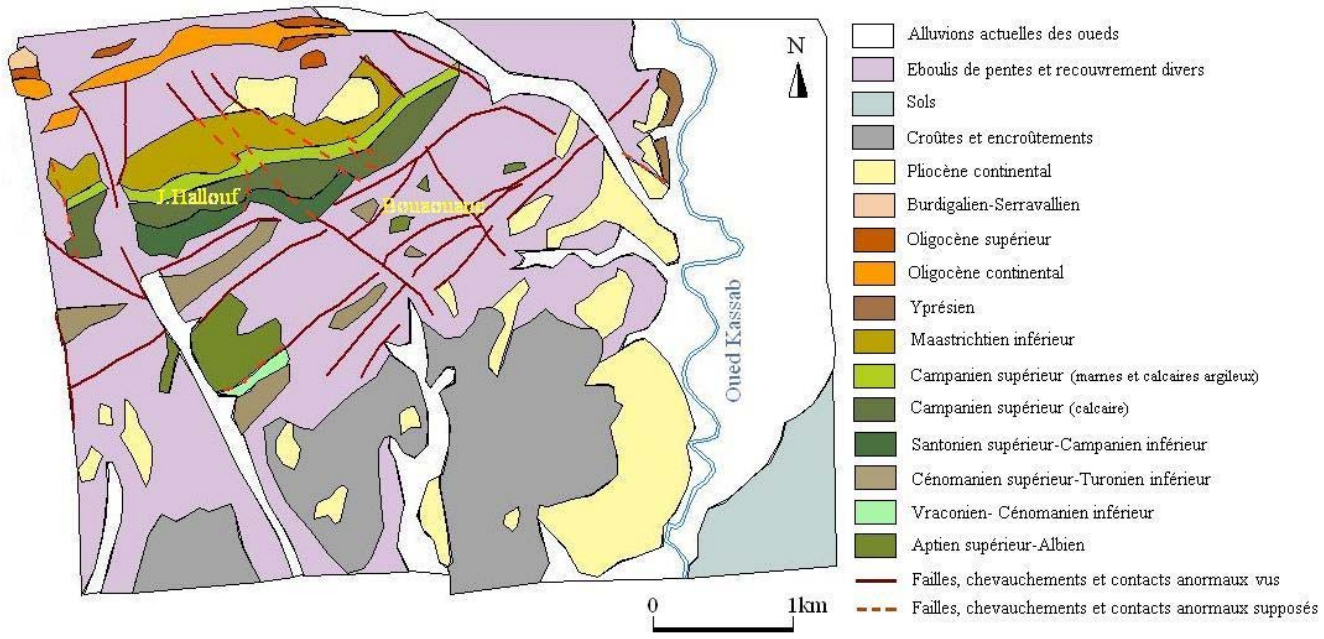


Figure 2 : Carte géologique du secteur d'étude.
Figure 2 : *Geological map of the study site.*

IV.1.1. Les données VNIR

Certains minéraux comme les oxydes, les hydroxydes et les sulfates de fer sont détectés dans le proche infrarouge. C'est la raison pour laquelle, nous avons utilisé l'image VNIR, qui présente une résolution spatiale de 15m. Dans cette étude, l'inconvénient d'avoir une résolution spatiale différente pour les trois domaines, ne se présente pas et n'aurait en rien affecté le raisonnement suivi puisque aucune carte ne serai produite à partir des images.

La signature spectrale des rejets miniers (figure 3) ne montre aucune absorption dans ce domaine. La résolution spectrale du domaine VNIR est faible pour détecter ces minéraux

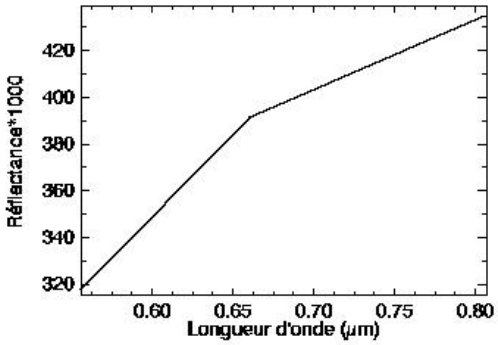


Figure 3 : La signature spectrale des rejets miniers dans le domaine VNIR d'ASTER.
Figure 3: *ASTER VNIR mine tailing spectral reflectance.*

IV.1.2. Les données SWIR

Les signatures spectrales des rejets miniers dans le domaine du proche et moyen infrarouge montrent deux types de réflectance (figure 4). Pour plus de rigueur nous avons limité l'analyse des réflectances aux canaux 5 à 9 qui sont contigus. Le canal 4 est isolé et par conséquent il n'y a pas d'information enregistrée par le capteur entre les canaux 4 et 5. On passe de [1,6-1,7 µm] à [2,145-2,185 µm] pour éviter la bande d'absorption de la vapeur d'eau atmosphérique à 1,9 µm qui est saturée, rendant l'atmosphère opaque. Le lien entre canal 4 et canal 5 est donc artificiel et ne reflète pas correctement la réponse spectrale. La première réflectance (a) montre une bande d'absorption faible à 2,205µm due normalement aux vibrations de l'ion hydroxyle (OH^-). Un autre niveau d'absorption est détecté vers 2,32µm indiquant la présence de carbonate. La deuxième réflectance (b), montre la même absorption vers 2,32µm. Ces absorptions,

détectées au niveau de ces deux réponses, peuvent caractériser un seul minéral ou encore un groupe de minéraux. Leur comparaison avec ceux des différents minéraux de la librairie a révélé la présence de la calcite, la kaolinite et l'illite.

- le spectre de la calcite montre plusieurs pics d'absorption (figure 5. a) dont le plus important est dans le moyen infrarouge vers 2,32µm dû au CO_3 (Madeira, 1993 *in* Houssa, 1997). Ce pic est préservé après le ré-échantillonnage du spectre dans les bandes spectrales de SWIR. Ainsi, l'image est capable de détecter Ce minéral détectée existe au niveaux des rejets avec une concentration importante d'après la profondeur du pic d'absorption enregistré par l'image,

- la kaolinite montre des pics d'absorption (figure 5. b) liés aux vibrations de l'ion hydroxyle (OH^-). La bande d'absorption très forte, qui apparaît vers 2,205µm, est due à la liaison Al-OH (Madeira, 1993 *in* Houssa, 1997). Cette bande d'absorption est détectée par l'image. Comme pour la kaolinite, l'illite est caractérisée, par cette même absorption vers 2,205µm (figure 5. c), et donc elle est détectée par le SWIR. Ces deux minéraux kaolinite et illite sont détectés en un seul groupe d'argile dont la concentration est faible aux niveaux des rejets miniers d'après la faible absorption détectée au niveau de l'image.

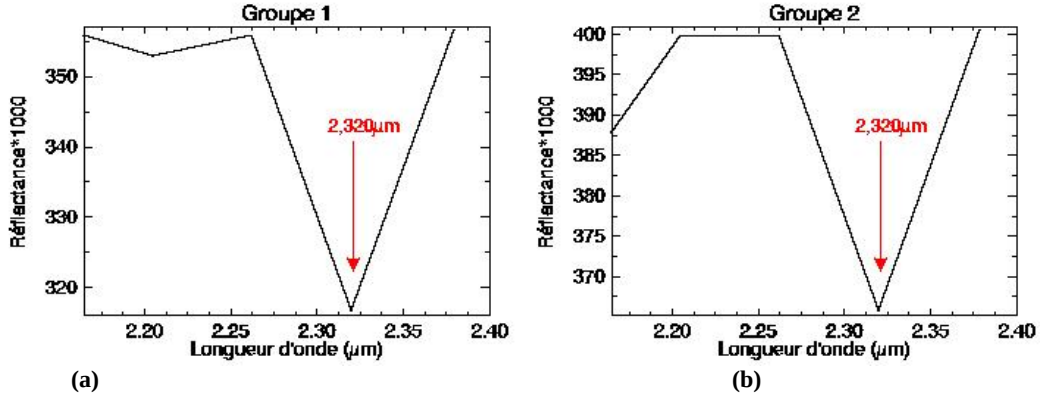


Figure 4 : Les signatures spectrales des rejets miniers (a) et (b) dans le domaine SWIR d'ASTER
Figure 4: *ASTER SWIR mine tailing spectral reflectance (a) and (b).*

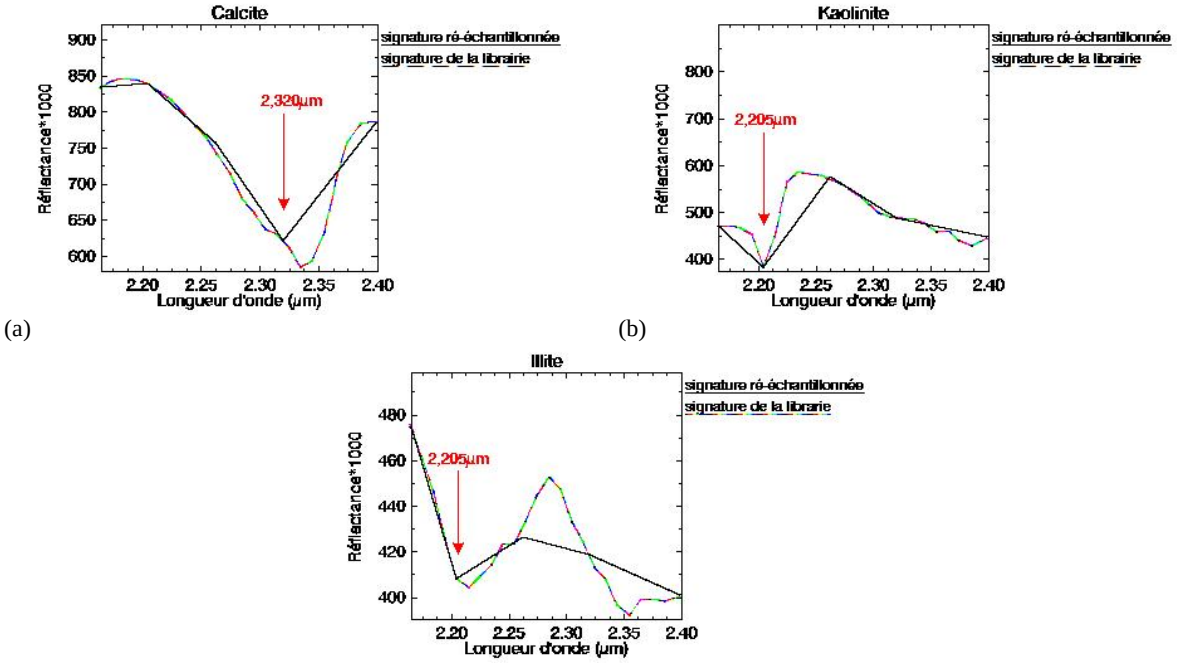


Figure 5 : Spectre de réflectance original de la librairie USGS et ré-échantillonné de la calcite (a), la kaolinite (b) et l'illite (c).
Figure 5: *USGS Original and resampled reflectance spectra of: calcite (a), kaolinite (b) and illite (c).*

IV.1.3. Les données TIR

Les données de l'infrarouge thermique (8 – 12µm) sont très utiles pour la détection des minéraux silicatés dont leurs absorptions spécifiques se situent vers 9,07µm. Un pic d'absorption est détecté au niveau de cette bande (figure 6), ce qui indique la présence du minéral quartz au niveau des rejets miniers. Ce résultat est conforme avec celui de la DRX et des sections polies.

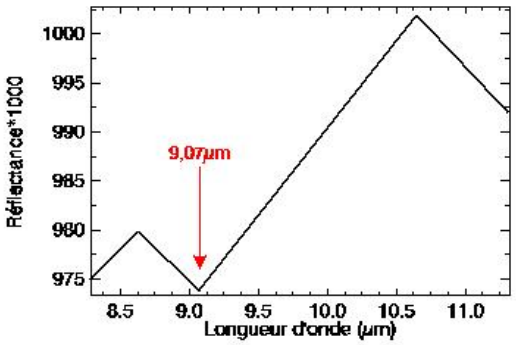


Figure 6 : Les signatures spectrales des rejets miniers dans le domaine TIR d'ASTER.
Figure 6: *ASTER TIR mine tailing spectral reflectance.*

IV.2. Analyse des rejets par Diffraction aux Rayons X (DRX) et par les sections polies

Les résultats des analyses aux rayons X des échantillons de digue (poudre) révèlent la présence de 7 minéraux (figure 7 et 8). Nous signalons la prédominance (avec pourcentage très élevé) de la calcite qui constitue l'essentielle de la gangue carbonatée. Les digues renferment également du quartz dont la présence n'est pas liée à la gangue, mais plutôt à la nature lithologique des sédiments au niveau du gisement. Le gypse est présent avec une importante concentration au niveau de la digue de Bouaouane. Sa concentration est moins élevée au niveau de la deuxième digue de Jebel Hallouf, mais il est absent au niveau de sa première digue. Enfin, la cérusite et la smithsonite se caractérisent par une concentration faible au niveau de la deuxième digue de Jebel Hallouf de même pour la sphalérite au niveau de Bouaouane.

L'analyse des lames d'argiles a permis de distinguer la kaolinite, présente au niveau des digues de Jebel Hallouf avec une concentration relativement importante, et absente au niveau de la digue de Bouaouane, contrairement à l'illite.

Les différents minéraux des digues sont récapitulés dans le tableau 2 qui montre le résultat de l'analyse plus fine des sections polies.

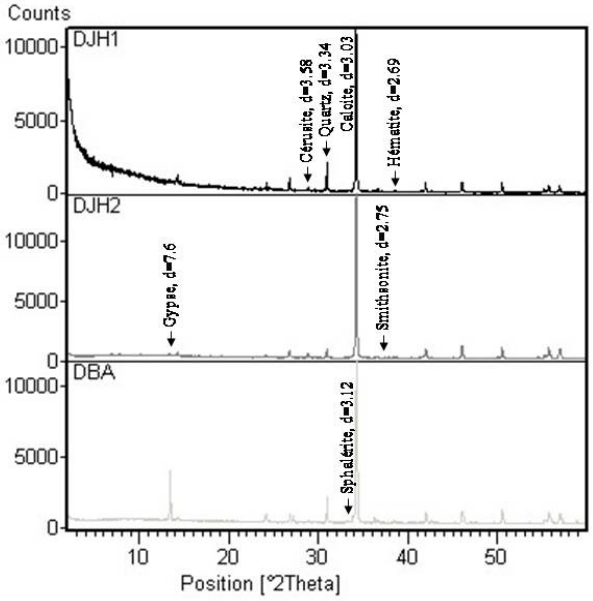


Figure 7 : Minéraux identifiés dans les digues de Jebel Hallouf (DJH1 et DJH2) et de Bouaouane (DBA) par DRX.
Figure 7: *Minerals identified in the Jebel Hallouf (DJH1 et DJH2) et de Bouaouane (DBA) deposit by XRD.*

Tableau 1 : Caractéristiques des données ASTER.
Table 1 : *ASTER data characteristics.*

Bande	Longueur d'onde	Résolution spatiale
B1	VNIR 0.52-0.6 µm	
B2	VNIR 0.63-0.69 µm	15m
B3	VNIR 0.76-0.86 µm	
B4	SWIR 1.6-1.7 µm	
B5	SWIR 2.145-2.185 µm	
B6	SWIR 2.185-2.225 µm	30m
B7	SWIR 2.235-2.285 µm	
B8	SWIR 2.95-2.365 µm	
B9	SWIR 2.36-2.43 µm	
B10	TIR 8.125-8.475 µm	
B11	TIR 8.475-8.825 µm	
B12	TIR 8.925-9.275 µm	90m
B13	TIR 10.25-10.65 µm	
B14	TIR 10.95-11.65 µm	

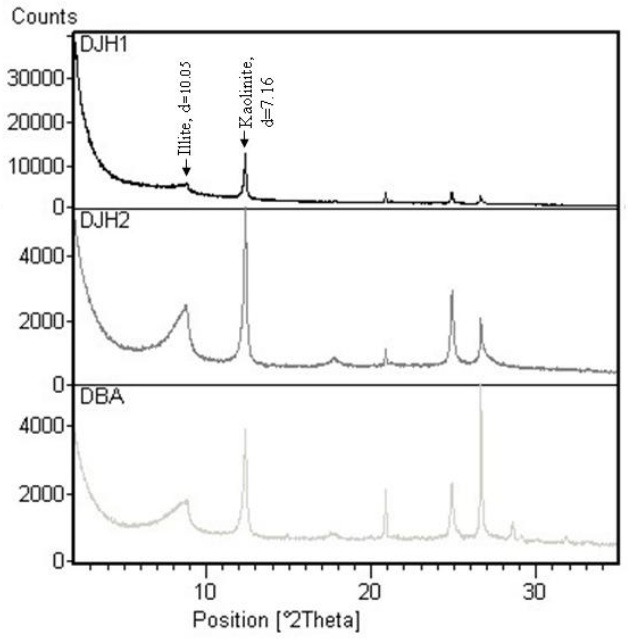


Figure 8 : Minéraux argileux identifiés dans les digues de Jebel Hallouf (DJH1 et DJH2) et de Bouaouane (DBA) par DRX.
Figure 8: *Clay minerals identified in Jebel Hallouf (DJH1 and DJH2) and Bouaouane (DBA) deposit by XRD.*

Tableau 2 : Résultats des analyses de sections polies montrant les différents minéraux identifiés au niveau des digues.
Table 2: *Polished section analysis results showing different mineral identified within dykes.*

Minéraux de la DJH1	Minéraux de la DJH2	Minéraux de la DBA
Calcite	Calcite	Calcite
Quartz	Gypse	Gypse
Fluorine	Quartz	Quartz
Hematite	Barytine	Fluorine
Goethite	Hematite	Hematite
Pyrite	Goethite	Goethite
Galène	Pyrite	Pyrite
Cérusite	Galène	Galène
	Cérusite	Cérusite
	Smithsonite	Sphalérite

V. DISCUSSION

La calcite, le quartz et les minéraux argileux, la kaolinite et l'illite, détectés par l'image, ont été signalés également par la DRX et au niveau des sections polies avec des concentrations variables. Ces concentrations se traduisent au niveau de l'image par des pics d'absorption des minéraux de différentes intensités.

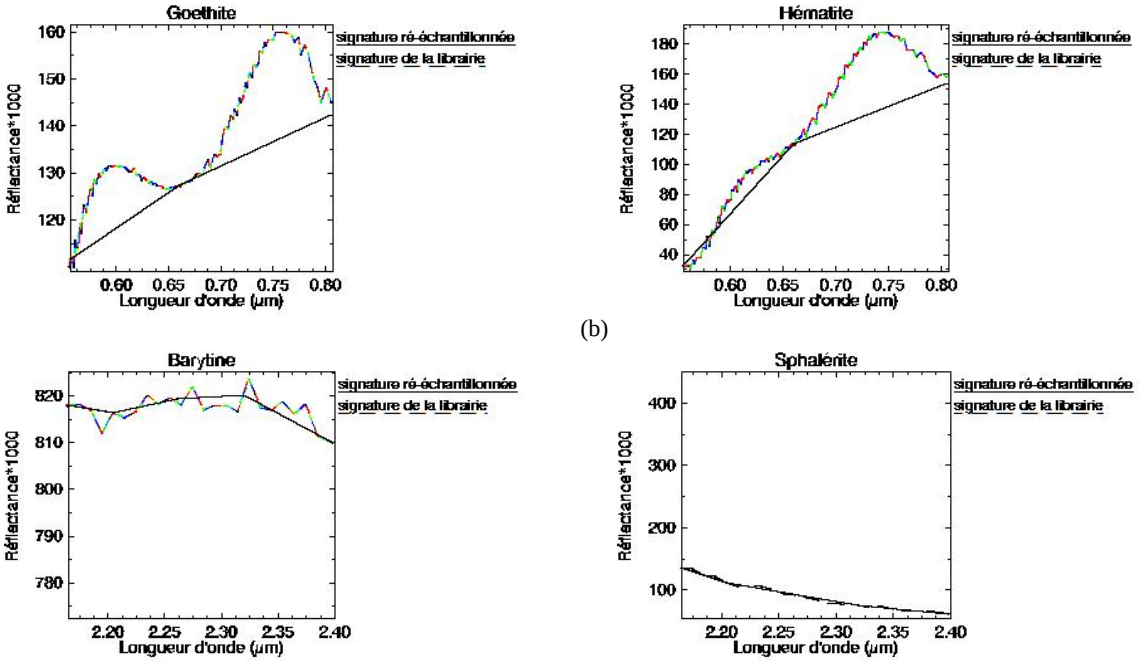
Les autres minéraux (figure 9), non détectés par l'image, sont la goethite, l'hématite, la barytine, la sphalérite, la pyrite, le gypse, la galène, la cérusite et la fluorine. En effet, leurs réflectances ré-échantillonnées dans les bandes de l'image (VNIR, SWIR) ne montrent aucun pic d'absorption bien distingué. Particulièrement, la goethite et l'hématite qui présentent une composition minéralogique caractérisée par la présence des ions ferriques (fer trivalent Fe3+) de l'hématite et des ions ferreux de la goethite, sont responsables d'une absorption dans le visible et le proche infrarouge. Les pics d'absorption de l'hématite et de la goethite sont situés, respectivement, vers 0,53µm (ce qui lui confère une couleur rouge) et vers 0.48µm (ce qui lui donne une couleur ocre). Ces deux états d'oxydation de fer peuvent produire une absorption vers 0,65 µm (Hunt, 1979 ; Blom et al. 1980). Ces minéraux ré-échantillonnés dans les bandes ASTER VNIR, ne montrent aucune absorption. La faible résolution spectrale de ce domaine limite la détection de ces minéraux.

Les signatures ré-échantillonnées de la barytine et de la sphalérite, ne présentent aucun pic d'absorption dans l'intervalle de longueur d'onde du domaine SWIR. Ces minéraux ne peuvent pas donc être détectés. De même pour la pyrite qui présente également un spectre plus au moins plat ce qui la rend impossible à identifier. Toutefois, dans ce genre d'environnement, la pyrite a tendance à s'altérer et donc à favoriser la formation d'oxydes et d'hydroxydes de fer (concentration de l'hématite et de la goethite de l'ordre de 3 et 5 %, respectivement, au niveau de la digue de Bouaouane et Jebel Hallouf).

- le gypse, ré-échantillonné dans les bandes SWIR, montre une absorption très faible vers 2,205µm (figure 9.f). La bande d'intense absorption sur les spectres de référence effectués en laboratoire apparaît vers 1,945µm. Ce pic est non détecté par le capteur ASTER, car il n'acquiert pas d'image dans cette gamme de longueur d'ondes, pour la raison que cette absorption est masquée par l'absorption de la vapeur d'eau atmosphérique.

- la galène montre un faible pic d'absorption à 2,205µm (figure 9.g), et pour s'assurer si ce résultat est lié à la qualité du spectre bruité, nous avons utilisé le spectre de la librairie JPL plus fin. Ce pic existe pour le spectre de type A (figure 9.g') qui caractérise les grains dont la taille entre 125-500µm. Au niveau des rejets, et d'après l'analyse détaillée des sections polies, les grains de galène observés, de faible concentration, sont de type B (45-125µm) et dont le spectre ne montre aucune absorption vers 2,205µm. Donc la galène n'est pas détectée par l'image SWIR dans le site de Jebel Hallouf-Bouaouane. Ce résultat est conforme avec celui de la DRX.

En l'absence de leurs signatures spectrales, l'analyse de la cérusite et la fluorine n'était pas possible avec la USGS, nous avons eu donc recours à la JPL. Les signatures ré-échantillonnées de la cérusite et la fluorine (figure 10. a et b) ne montrent aucune absorption. Particulièrement la cérusite ne présente pas d'absorption à 2,32µm, malgré la présence du radical CO3 mais plutôt des absorptions vers 2,42, 2,07 et 2,236µm qui, une fois le spectre ré-échantillonné à ASTER, disparaissent et donnent un spectre « en pente ». Ces minéraux ne sont pas donc détectables par le domaine SWIR d'ASTER. Cependant, la smithsonite montre un pic d'absorption de CO_3 vers 2,32µm. Ce minéral est donc détecté par les données SWIR.



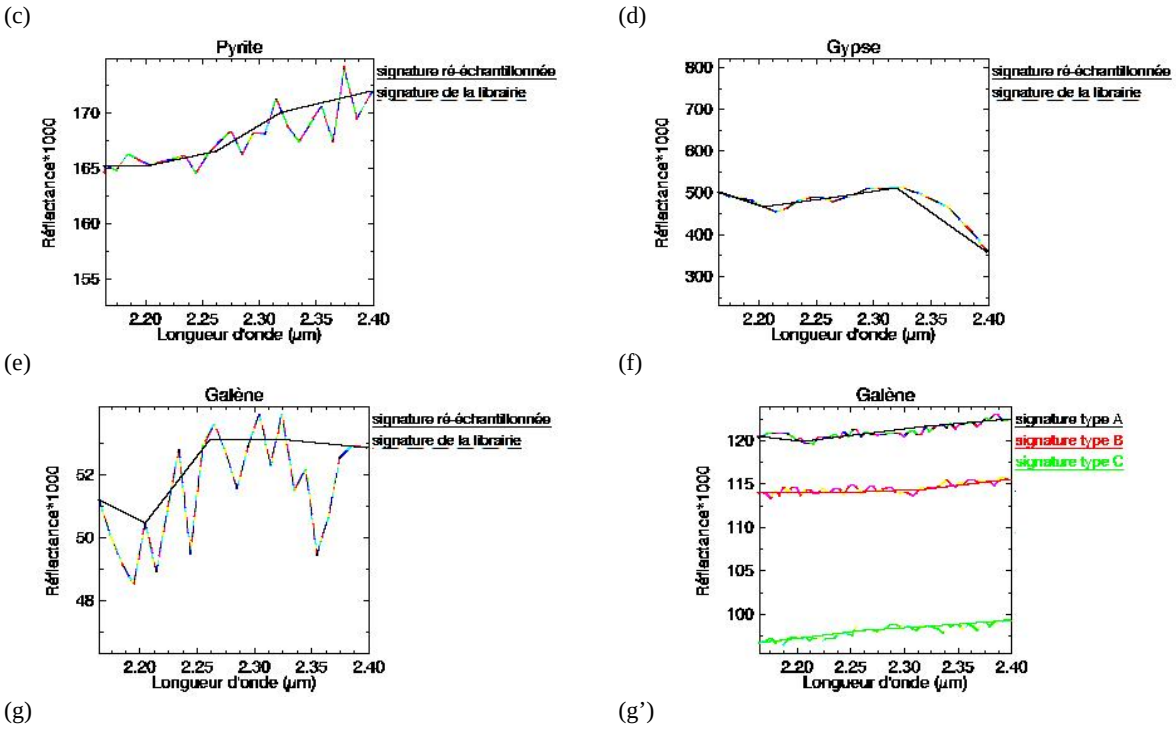


Figure 9 : Spectre de réflectance original de la librairie USGS et ré-échantillonné de la goethite (a), l'hématite (b), la barytine (c), la sphalérite (d), la pyrite (e), le gypse (f) et la galène (g), et (g') de la librairie JPL.

Figure 9: *USGS Original and resampled reflectance spectra of goethite (a), hematite (b), barite (c), sphalerite (d), pyrite (e), gypse (f) and galena (g), and (g') of the JPL library.*

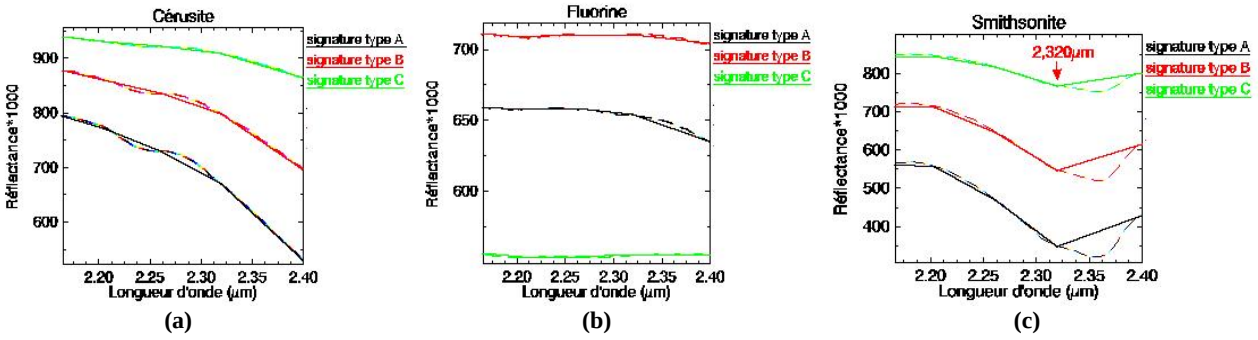


Figure 10 : Spectre de réflectance original de la librairie JPL et ré-échantillonné de : la cérusite (a), la fluorine (b) et la smithsonite (c). La signature de type A correspond aux grains de cérusite de taille 125-500µm, celle de type B correspond aux grains de taille 45-125µm et celle de type C correspond à ceux de taille <45µm.

Figure 10 *: JPL Original and resampled reflectance spectra of : cerussite (a,) fluorite (b) and smithsonite (c). A type spectra correspond to cerussite with grain size 125-500µm, B type correspond to 45-125µm grain size and C type to <45µm grain size.*

VI. CONCLUSION

Notre objectif était de montrer l'intérêt des données VNIR, SWIR et TIR dans l'analyse spectrale des rejets miniers dans le site de Jebel Hallouf-Bouaouane. L'analyse établie dans cette étude montre qu'en utilisant une librairie spectrale de référence, il est possible de détecter certains minéraux de rejets miniers sans connaissance préalable de leur composition minéralogique. La librairie spectrale a pu également remplacer l'absence des données spectrales mesurées sur le terrain par le spectroradiomètre. D'autre part, la comparaison des résultats de l'analyse spectrale avec les données minéralogiques par DRX et aux observations des sections polies a permis de confirmer les identifications spectrales. Cependant, cette détection reste limitée à cause de la moyenne résolution spectrale et le nombre limité des canaux ASTER. Cette étude sera consolidée par l'utilisation d'images de meilleure résolution surtout spectrale pour améliorer cette détection.

Bibliographie

Blom R. G., Abrams M. J. et Adams H. G. (1980): Spectral reflectance and discrimination of plutonic rocks in the 0.45- to 2.45 µm region. Journal of geophysical research, pp 2638-2648, May 10.

Bouhlel S. (1993) Gîtologie, minéralogie et essai de modélisation des minéralisations à F-Ba-Sr-Pb-Zn-(S°) associées aux carbonates (jurassiques et cretacés) et aux diapirs triasiques: gisements de Stah-Kohol, Zriba-Guebli, Bou Jaber et Fej Lahdoum (Tunisie Septentrionale) Thèse d'Etat Es-Sciences géologiques, Université de Tunis, FST, 293p.

Clark, R.N., Swayze, G.A., Gallagher, A.J., King, T.V.V. and Calvin, W.M. (1993): The US Geological Survey, digital spectral library: Version 1: 0.2 to 3.0 microns. US Geological Survey, Open File Report 93-592. http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib05/spectral-lib04.html.

Clark, R. N., G. A. Swayze, K. E. Livo, R. F. Kokaly, S. J. Sutley, J.B. Dalton, R. R. McDougal, and C. A. Gent (2003): Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems, J. Geophys. Res., 108(E12), 5131, doi:10.1029/2002JE001847, pages 5-1 to 5-44, December.

Gallie, E. A., Mcardle, S., Rivard, B. and Fraicis, H. (2002) : Estimating sulphide ore grade in broken rock using visible/infrared hyperspectral reflectance spectra. International Journal of Remote Sensing, Vol. 23, n° 11, p. 2229-2246.

Grove C. I., Hook S. J., and Paylor E. D. (1992): Laboratory reflectance spectra for 160 minerals 0.4 - 2.5 micrometers: JPL Publication 92-2, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA.

Houssa R. (1993) : Etude radiométrique des sols d'une zone sahélienne (programme Hapex-Sahel) : analyse multi-échelle : du laboratoire au satellite. Paris : ORSTOM, 1997, 226 p.

Hunt G. R., 1977. Spectral signatures of particle minerals in the visible and near-infrared, Geophysics, 42:501-513.

Hunt G. R., 1979. Near infrared (1.3-2.4 µm) spectra of alteration minerals, potential for use in remote sensing, Geophysics, Vol. 44, p. 1974-1986.

Hunt, G. R. and Salisbury, J. W. (1976) Visible and near infrared spectra of minerals and rocks XII: Metamorphic rocks. Modern Geology, vol. 5, p. 219-228.

Kergomard C. (1990) : La télédétection aérospatiale: une introduction. Cours de télédétection, Ecole Normale Supérieure Paris.

Mansouri A. (1980) Gisements de Pb-Zn et Karstification en milieu continental: le district du Jbel Hallouf- Sidi Bou Aouane (Tunisie Septentrionale). Thèse de doctorat, Univ. de Pierre et Marie Curie, Paris VI, 199 p.

Mezned N., Abdeljaouad S. et Boussema M. R. (2006): Mine tailings mapping using Landsat multispectral imagery of the versant basin amont of Medjerda river in the north of Tunisia. IEEE, International Geoscience And Remote Sensing Symposium, IGARSS'06.

Ourfelli K., Sebei A., Sfar R. et Abdeljaouad S. (2005) : Impact des activités minières sur le domaine karstique de la region de Sidi Bouaouane (Nord de la Tunisie), First International Conference on the Geology of the Tethys, 11-14 November en Egypt.

Ould Bagga M. A., Abdeljaouad S. et Mercier E. (2006) : La zone des nappes de Tunisie : une marge méso-cénozoïque en blocs basculés modérément inversée (Région de Taberka/Jendouba ; Tunisie nord occidentale), Bull. Soc. Géol. Fr., 2006, t. 177, n°3, pp. 145-154.

Rouvier H. (1973) : Nappes de charriages en Tunisie Septentrionale : preuves et conséquences paléogéographique. ANN. Mines et Géol., n°26, Tunis, n°26, pp. 33-47.

Sainfeld P. (1952) : Les gîtes plombo-zincifères de Tunisie. Annales des mines et de la géologie N°9, 78p.

Slim Shimi N. (1992) : Minéralogie et paragenèses des gîtes polymetalliques de la zone des nappes en Tunisie. Conditions géochimiques de depôt et implications génétiques. Thèse Es-Sciences géologiques, Univ. de Tunis II, FST, 235 p.