LA SPECTRORADIOMÉTRIE, OUTIL D'ÉTUDE DES IMPACTS DES REJETS MINIERS SUR L'ENVIRONNEMENT.
Application aux rejets de la mine de Jalta (tunisie)

Sonia GANNOUNI[1], Abdallah BEN MAMMOU[1], Abderrazek BELGHITH[2], Saadi ABD ELJAOUED[1]

[1] Laboratoire des Ressources Minérales et Environnement
Faculté des Sciences de Tunis El Manar 2092 Tunis.
[2]Centre National de Télédétection de Tunis El Aouina.
E_mail : gannouni_sonia@yahoo.fr

Soumis le 30 mai 2008 , accepté le 3 février 2009 - © *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 4, p. 257-269

Résumé

L*'ancienne mine de Jalta, située au Nord de la Tunisie (à 83 km de Tunis), a permis l'exploitation des minerais de plomb et de zinc de 1900 à 1986. Elle a généré des rejets solides qui ont été stockés sous forme de bassins à stériles. Exposés aux différents facteurs météoriques, les sulfures de la digue à stériles sont soumis à une oxydation générant ainsi des eaux acides (Drainage Minier Acide ou DMA) capables de mobiliser et libérer les métaux lourds associés aux sulfures. Dans cette étude, l'utilisation des techniques de la spectroradiométrie dans le domaine spectral du proche et du moyen infrarouge nous a permis de caractériser l'impact de ces rejets miniers sur l'environnement. Ce travail est basé sur l'identification des figures d'absorption caractéristiques de chaque minéral pour la caractérisation minéralogique des surfaces minérales de la zone d'étude à partir des mesures spectroradiométriques de terrain. Les différentes figures d'absorption des surfaces minérales étudiées dans cet article se chevauchent ou sont peu exprimées. Il faut donc trouver un moyen de les accentuer et de les différencier la dérivation seconde des courbes spectrale permet de d'atteindre cet objectif (Brasset, 1995). On retrouve, dans les rejets de la digue ainsi que dans les alluvions de l'oued Gzenni et le sol environnants des concentrations plus ou moins élevées en bisulfures de fer (pyrite et marcassite), des sulfures de plomb (galène) et accessoirement des sulfures de zinc (sphalérite). Les bisulfures de fer sont oxydés en goethite et en hématite.*

Les sulfures ont été remobilisés par voie hydrique depuis la digue jusqu'aux environs du lac Ichkeul à travers l'oued Gzenni qui draine la digue de la mine de Jalta. Celle-ci constitue donc une source de contamination probable du lac Ichkeul.

Mots clés : rejets miniers, drainage minier acide, spectroradiométrie, réflectance, dérivée seconde, figures bandes d'absorption.

SPECTRORADIOMETRY, A TOOL FOR STUDYING IMPACTS ON THE ENVIRONMENT OF MINING RELEASES. APPLICATION TO RELEASES OF THE JALTA MINE (TUNISIA)

Abstract

The mine of Jalta (exploited from 1900 to 1986) is located 83km from Tunis city in the North -Western part of Tunisia. Large dumps result from the accumulation of solid mining wastes after the processing of the Pb-Zn ore within the borders of the mining area. Exposed to different meteoric factors, sulphides from the tailings dams and wastes are oxidized thus generating acid mining drainage (AMD) capable to mobilize and release heavy metals associated to sulphides. In this survey, the impact of these mining wastes on the environment has been controlled for the first time in Tunisia by means of spectroradiometry. This work is based on the identification of characteristic spectral absorption features of each mineral in view of the mineralogical characterization of the mineral surfaces in the study area from their spectroradiometric measurements. The different absorption features of mineral surfaces studied in this paper either overlap or are poorly visible. It is hence necessary to find means to enhance them and therefore to differentiate

them. The second derivative of spectral curves enables the achievement of this objective (Brasset, 1995). The mineralogical characterization by spectra second derivative reveals the existence, in waste dam as well as in alluvium of oued Gzenni and surrounding soil of iron bisulfides (pyrite, marcasite) and lead sulfides (galena) along with accessory zinc sulfides (sphalerite, shalenblende) either in the dump wastes or in the superficial sediments of dump draining watercourses of oued Gzenni and the soil to surroundings of the dam and the river. The analysis has shown that iron disulfidess are often subjected to oxidation giving rise to iron hydroxides (goethite) and less commonly to iron oxides (hematite). Consequently, sulfides are remobilized by run-off from the dump up to the surroundings of Lake Ichkeul. As a conclusion, the mining wastes under consideration correspond to large barren accumulations containing heavy metal contents that are responsible for the accumulation of the surface sediments of Lake Ichkeul.

Key words : mining wastes, acid mining drainage (DMA), spectroradiometry, reflectance, second derivative, band absorption.

1. INTRODUCTION

Les déchets miniers de type sulfures métalliques tels la pyrite (FeS2), les chalcopyrites (CuFeS2), la sphalérite (ZnS) ou la galène (PbS) sont généralement source d'un problème environnemental majeur lié à la production de drainage minier acide (DMA) (Aubertin *et al*., 2002 et Ballivy *et al*., 1997) résultant de l'oxydation des sulfures. Au nord de la Tunisie, les mines d'exploitation de plomb, de zinc et de cuivre ont engendré la production de quantités importantes de ces déchets. La région de la mine de Jalta, située au nord de la Tunisie (fig.1), illustre parfaitement cette situation (Ben Arfa, 2003). Celle-ci est sillonnée par un réseau hydrographique assez dense avec entre autres l'oued Gzenni qui draine la digue de la mine de Jalta à minéraux sulfurés divers (galène, sphalérite, pyrite et marcassite) associés à une gangue composée de silice et de carbonate (Moissef, 1959 et Roussev *et al*., 1976). Les analyses métallographiques et géochimiques confirment l'oxydation des sulfures de ces rejets par les eaux météoriques. Ces rejets de la digue occupent une position dominante sur le plan topographique, génèrant ainsi des eaux acides qui s'écoulent du SSW vers le NNE vers les marécages du lac Ichkeul (Ben M'barek., 2001).

Jusqu'à présent, les études de l'impact des rejets des mines sont basées sur des analyses pétrographiques, métallographiques et géochimiques. On se propose ici de développer une nouvelle approche basée sur les propriétés spectrales des rejets, des alluvions, des sols et du couvert végétal.

Cette démarche a fait ses preuves dans la dernière décennie par l'utilisation de la spectroradiométrie dans diverses études pédologiques (Escadafal et Huete, 1992 et Mougenot, 1994) et surtout dans des projets environnementaux tel que le projet MINEO financé par le communauté Européenne dans le cadre du programme " Technologie de la société de l'Information " (1998-2002) et qui vise a évaluer et surveiller les incidences des rejets miniers sur l'environnement en Europe en utilisant ces nouvelles technologies (Chevrel *et al.*, 2003, Chevrel *et al.*, 2002, Dittmann et Vosen, 2002)

Notre objectif principal est de détecter et caractériser l'impact du drainage minier acide sur l'environnement à l'aide de la spectroscopie en réflectance diffuse (SRD) dans une région subhumide.

2. MÉTHODOLOGIE

Des mesures spectrales réalisées sur le terrain, dans le but de caractériser les différents minéraux du milieu, ont été effectuées sur la base de l'échantillonnage d'une vingtaine de points. Six mesures de réflectance (Em1-Em6) Au niveau de la digue. Trois au pied des rejets (Em7-Em9) et six au niveau des alluvions (Em10 –Em15). Sur les berges de l'oued, les réflectances du sol nu et de couvert végétal ont été également mesurées (Ev1-Ev8) (fig. 1).

Les deux instruments de mesures utilisés sont deux spectroradiomètre de type ASD (Analytical Spectral Device, Boulder, Colorado). L'un opère dans les domaines du Visible et proche infrarouge couvrant la gamme spectrale de 340 nm à 1070 nm et l'autre dans le domaine de l'infrarouge avec une gamme spectrale comprise entre 1300 nm et 2500 nm. Ces deux instruments mesurent un signal directionnel (fig. 2), qui caractérise deux phénomènes majeurs responsables des bandes d'absorption : les vibrations atomiques dans l'infrarouge et les transitions électroniques dans le visible (Madeira, 1993).

Les mesures ont été réalisées en visée nadir (verticale), le capteur étant placé à 1,5 m au dessus de la surface du sol. Ce positionnement permet d'observer, une surface circulaire d'un rayon de 25 cm environ.

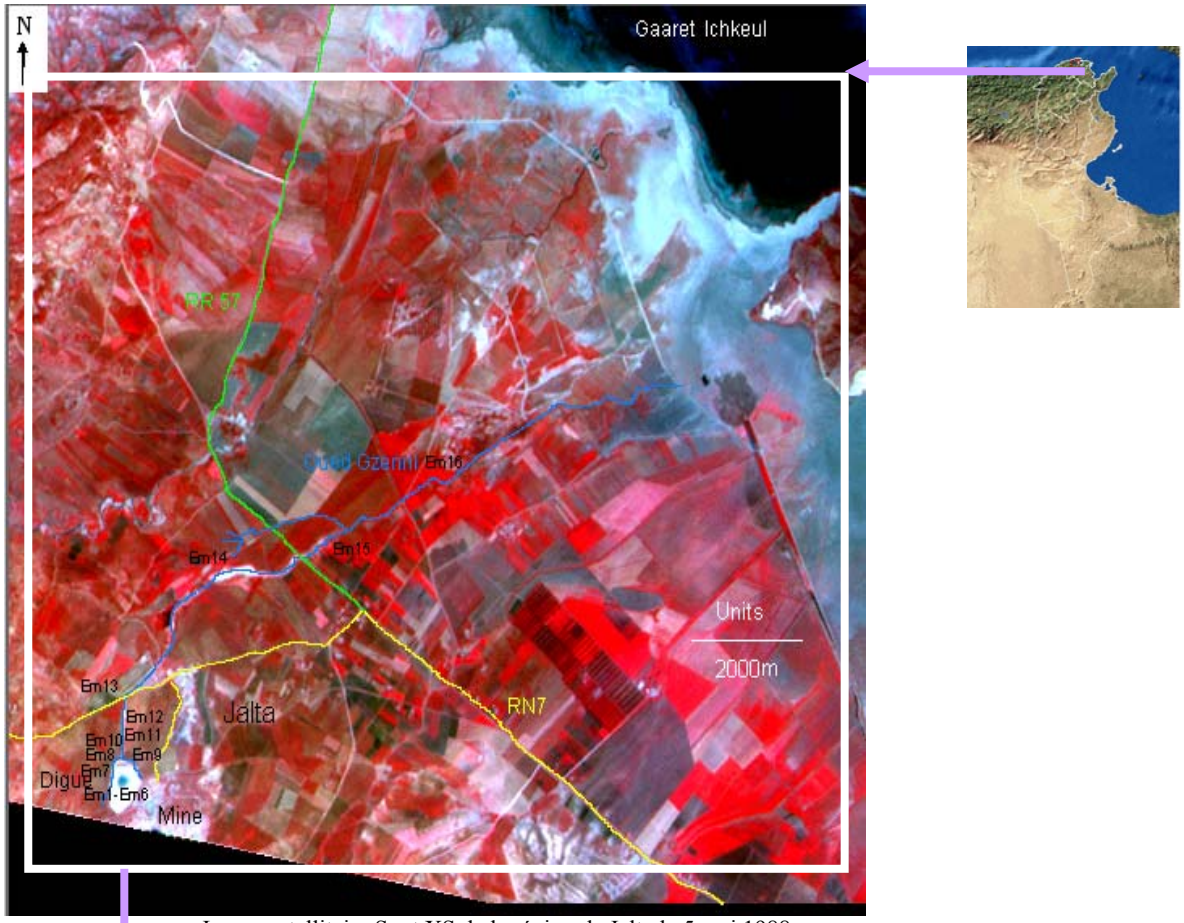


Image satellitaire Spot XS de la région de Jalta le 5 mai 1988

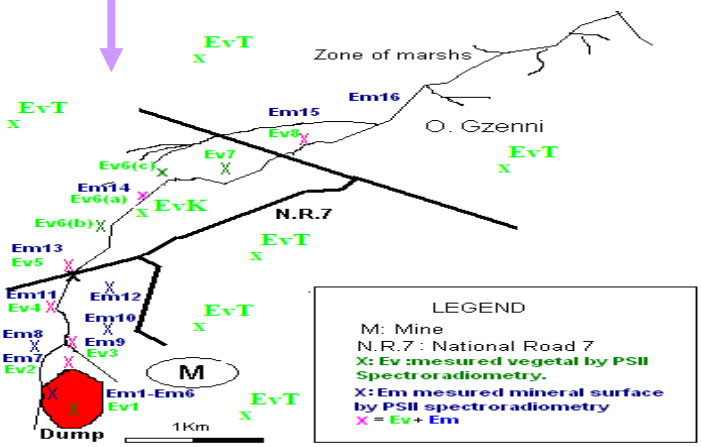


Figure 1 : Carte de situation de la zone d'étude et emplacement des différents sites mesurés par le spectroradiomètre.
Figure 1: *Map of situation of the survey zone and different site measured by the spectroradiomètre.*

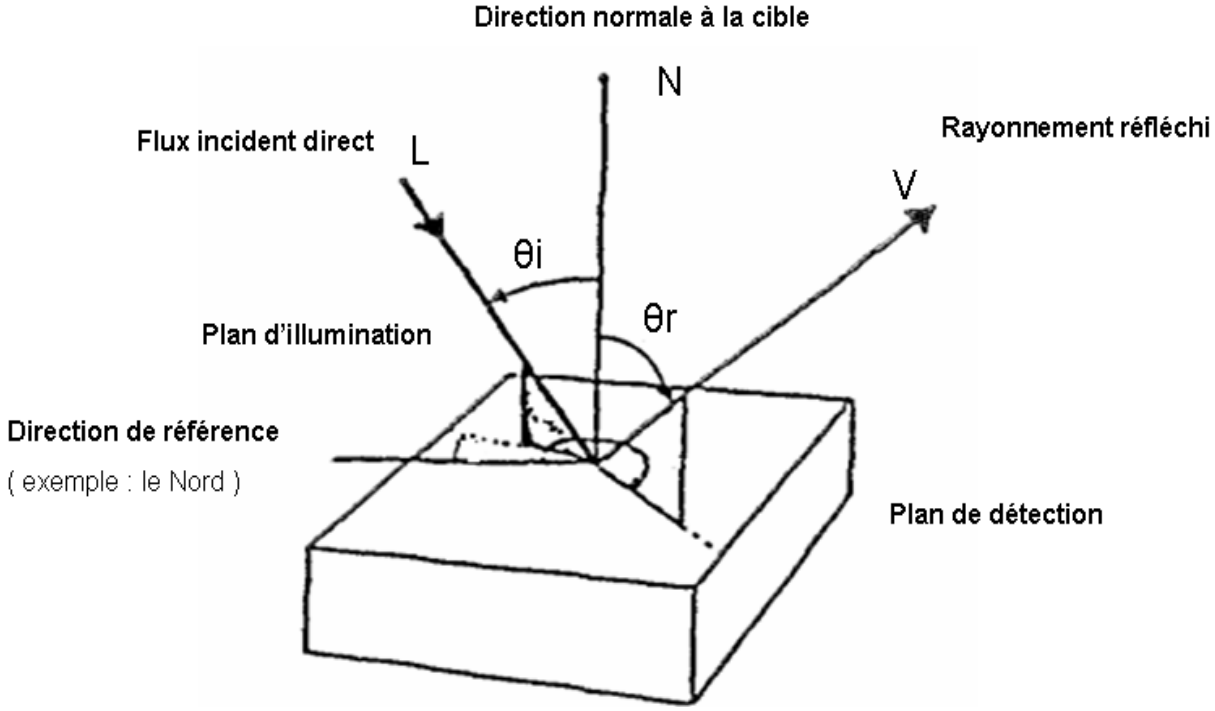


Figure 2 : Le concept de la réflectance bidirectionnelle.
Figure 2 : *The concept of bidirectional reflectance.*

Dans le cas d'une caractérisation spectrale, les objets sont généralement mesurés individuellement. On débute par la mesure de courant de fond puis panneau de calibration ensuite la cible et on termine par la mesure de calibration et le courant de fond. Plusieurs opérations peuvent être appliquées sur ces données bruts : calculs de moyennes, calcul de la réflectance en prenant en compte de la dérive de l'éclairement et les propriétés optique du panneau de référence. Le logiciel specpro a été conçu et développé pour réaliser de façon interactive l'ensemble de l'opération de traitement des données (Gouinaut *et al*., 1995). Il réalise en particulier la soustraction du courant de fond et le calcul des valeurs de réflectance (fig. 3) en calculant le rapport entre la luminance obtenue sur les objets mesurés (sol, végétation….) et la valeur obtenue sur le panneau de calibration selon la formule :

ρ c = Lc/ Lp . ρp
ρc : réflectance de la cible
ρp : réflectance du panneau
Lc et Lp : luminances mesurées au dessus de la cible et du panneau.

Le spectroradiometres fournissent des spectres de réflectance continus. Le mode standard d'acquisition se fait sur 141 bandes pour les valeurs de longueurs d'ondes obtenues par le spectroradiomètre couvrant l'intervalle compris entre 370 nm et 1070 nm, avec un pas de 5 nm ; il se fait sur 1201 bandes pour les valeurs de longueur d'ondes obtenues par le spectroradiomètre couvrant l'intervalle entre 1300 nm et 2500 nm et avec un pas de 1 nm.

Le logiciel" specpro" permet de modifier le nombre de bandes en sortie par rééchantillonnage. Pour calculer les valeurs de réflectance correspondant aux bandes spectrales d'un capteur satellite donné, le logiciel reéchantillonne ces spectres suivant les courbes de transmission des filtres du capteur correspondant (fig. 4).

Pour une caractérisation précise des principaux minéraux sulfurés des rejets, des sédiments et des sols au niveau de la zone d'étude on a calculé les dérivées secondes des spectres de ces surfaces minérales afin d'identifier leur bandes d'absorption les plus caractéristiques dans les deux intervalles de spectre 370 nm-1070 nm et 1300nm-2500nm.

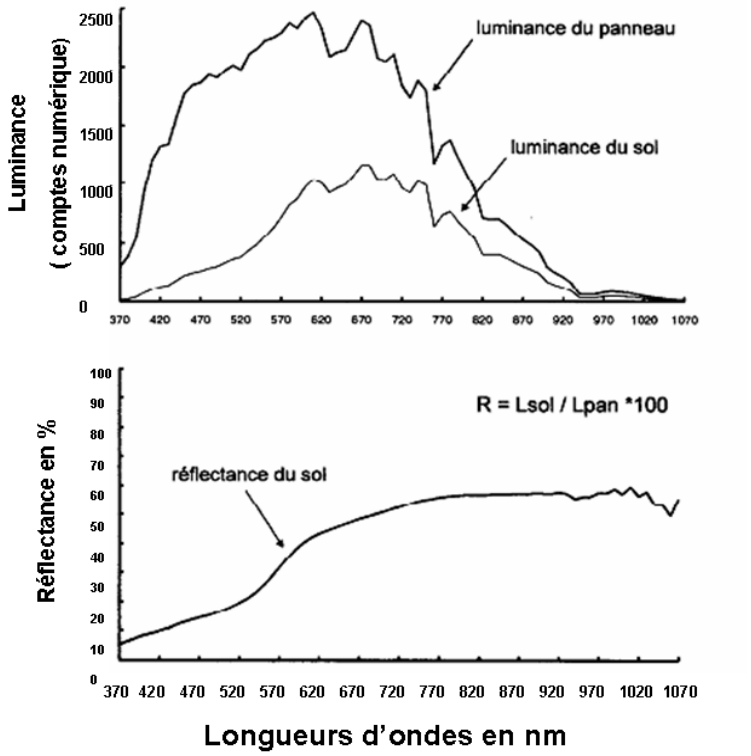


Figure 3 : Calcul de la réflectance à partir des luminances mesurées sur le sol et sur la cible de référence. Le spectre de réflectance est bruité dans le domaine spectral où la luminance est faible (970-1070 nm) (Tiré de Escadafal *et al.*, 1993).
Figure 3 : *Computing reflectance from radiances measured over the soil and the reference panel. The reflectance spectrum is affected by noise in the spectral range where radiances are low (970-1070 nm) (data of Escadafal et al., 1993).*

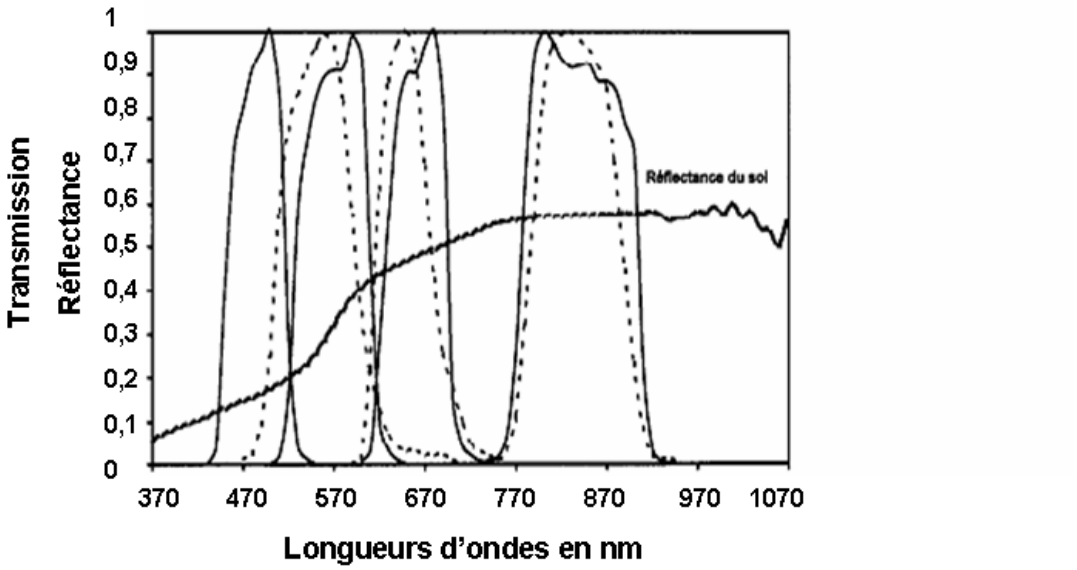


Figure 4 : Calcul de la réflectance dans les bandes satellitaires par convolution avec les courbes de transmission des capteurs (trait continu: les quatre bandes Thematic Mapper de Landsat; pointillé: les trois bandes de HRV de Spot) (Tiré de *Escadafal et al.*, 1993).
Figure 4 : *Computing reflectance in satellite bands by convolution with sensors transmission functions (dotted lines: Spot- HRV bands, solid line : Landsat Thematic Mapper bands* (*data of* Escadafal *et al*., 1993).

3. RÉSULTATS

3.1. Réflectance de la végétation

Le choix de matériel végétal à mesurer par le spectroradiomètre portable est directement lié à la nature de l'activité agricole habituelle de la région. Celle-ci est caractérisée surtout par la plantation de champ de blé dans les environs plus au moins immédiats de l'oued Gzenni. La date de la mission de terrain est le mois de Mai, période où l'activité végétative est en plein développement pour les grandes cultures (blés).

On remarque que les réponses spectrales des échantillons mesurés à proximités (de zéro à un mètre) de la digue et de l'oued Gzenni (Ev1,2,3,4,5,6,7 et 8) sont caractérisées par une amplitude de réponse spectrale faible par rapport à celles localisées à environ 1000 m de la source de la pollution EvT. Ce pendant on remarque qu'il une différence important d'amplitude de ces réponses spectrales d'un site à l'autre pour les blés qui sont localisé près la digue ou de l'oued (Ev1,2,3,4,5,6,7 et 8).

On a présenté au niveau de la figure 5 les réflectances des blé qui sont localisés près de la source de pollution et on a présenter un seul exemple des blés localisés loin des rejets comme un témoin (EvT) de réponse spectrale de blé dans son états sain.

Pour le site Ev 1, Ev 4 et Ev 8 on retrouve les plus faibles amplitudes des réponses spectrales des blés pour les sites Ev 2, 3, 5, 6 et 7, les réponses spectrales des blé sont presque similaires pour tous les échantillons sauf le site Ev6 caractérisé par une amplitude de réponse maximale des blés.

La similitude de l'allure des courbes de signatures spectrales est due à la nature même du matériel végétal, il s'agit dans ce cas de blés, plante annuelle qui a un signal typique "d'une végétation active". Cette végétation ne peut donc être caractérisée que par une réponse spectrale faible dans la bande rouge et élevée dans le proche infrarouge (PIR), typique des végétaux verts (Guyot, 1989, Bonn et Rochon, 1992 et Robin, 1993).

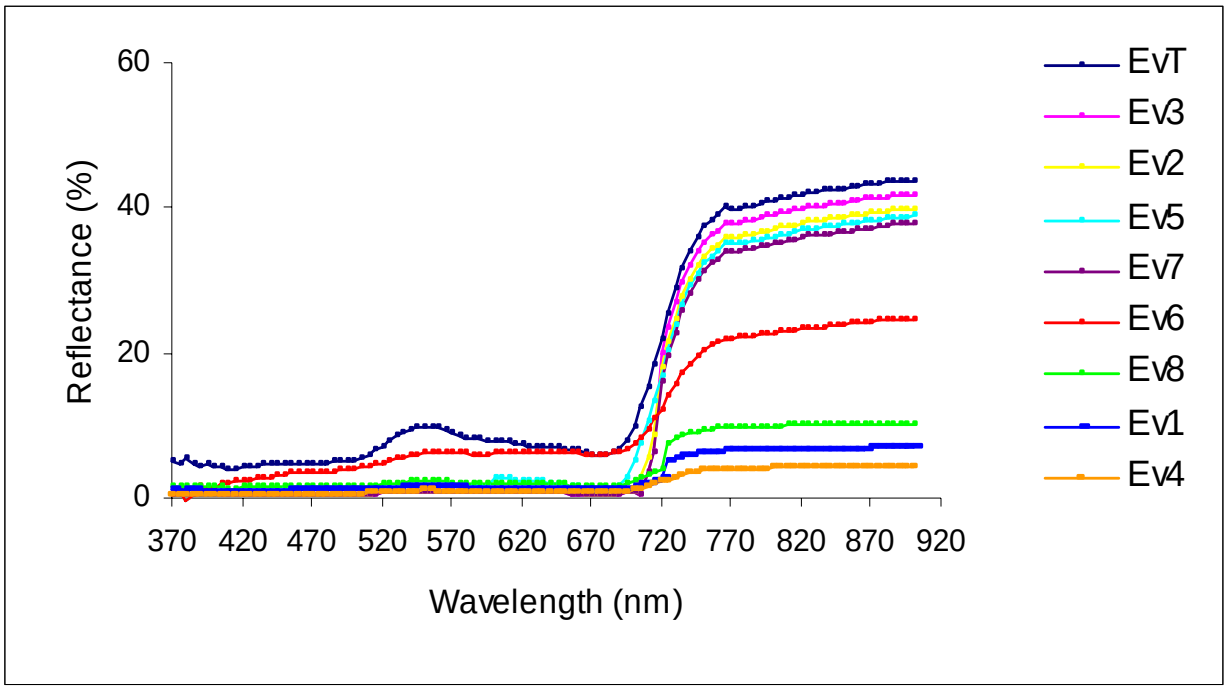


Figure 5 : Spectres de réflectance de la végétation au niveau de la zone d'étude.
Figure 5: *Reflectance Spectra of vegetation at the study area.*

La différenciation des réponses spectrales de blés dans les sites étudiés est due à la variation des conditions des milieux de culture : les réponses spectrales des blés localisées près de la digue et de l'oued au niveau des sites Ev1, 4 et 8 sont les plus faibles à cause du stress hydrique dans le proche infrarouge causé par le drainage important aux alentours de la digue et au niveau des sites Ev4 et 8. A part l'effet de drainage pour le site Ev1 les blés mesurées se situent au pied de la digue, où il y a une accumulation importante des produits d'érosion de la digue ; les réponses spectrales faibles des blés peuvent donc être dues au variation de la nature minéralogique des sols ou influencées par la variation des sols et la formation d'un sol remanié sur lesquels les végétaux peuvent pousser moins bien, pour des raisons rhéologiques indépendantes de la nature minéralogique.

Par ailleurs,on remarque une faible diminution des réponses spectrales des sites Ev 2, 3,5 et 7. Leurs réponses spectrales sont compris entre 30 % et 37 % . Cette diminution est de l'ordre de 3 % à 10 % par rapport aux réponses des blés témoins et peut être due à l'effet de pente, changement de la granulométrie et / ou aux variations des sols surtout au niveau de site Ev 5 qui est localisé au voisinage d'une route.

On a mesuré la réflectance des blés aux extrémités et au centre du site Ev 6 (coïncidant avec le site Em14 en zone de dépôts des rejets). On remarque que la réponse est la même dans les trois mesures (fig. 6)

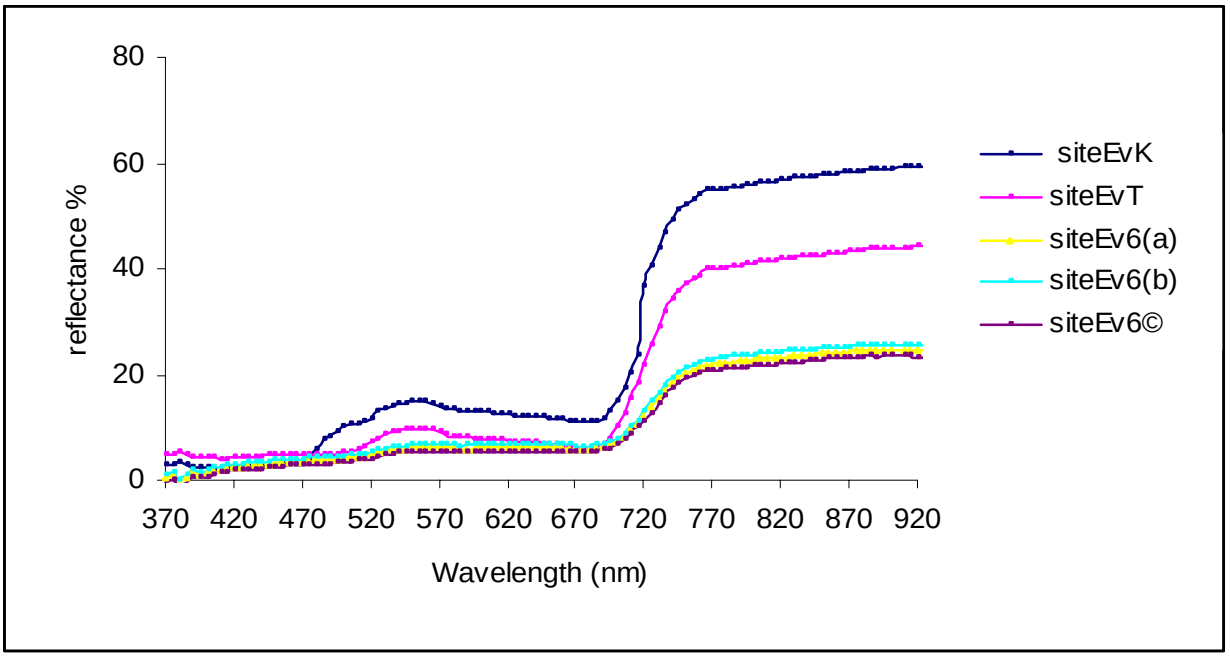


Figure 6 : Spectres de réflectance de céréales et de Hypercium Triqutrifolium au niveau de siteEv6.
Figure 6 : *Reflectance curves of cereal and of Hypercium Triqutrifolium at Ev6site.*

Cette réponse spectrale des blés est de l'ordre de 20%, si on additionne la différence (3% à 10%) estimer pour les sites Ev2, 3,5 et 7 causée par l'effet de pente, de la granulométrie et de la variation de sols, on remarque qu'il reste encore une autre différence de l'ordre de 10%. Cette différence peut être due soit au changement de la composition minéralogique du sol soit aux variations des sols et la formation des sols remaniés sur lesquels les végétaux s'y adaptent plus facilement. Pour vérifier ces deux hypothèses on a mesuré la réflectance d'une autre plante qui existe sur ce site, il s'agit de Hypercium Triqutrifolium. C'est une plante herbacée dont le cycle de vie est de quelques semaines. Une durée assez courte pour permettre une accumulation significatives des métaux lourds dans les tissus de la plante (Boussen, 2004).

La réponse spectrale de cette plante (EvK), est très importante avec une réflectance de l'ordre de 60%. Cette réponse ne peut être obtenue que pour une plante qui vit dans des conditions édaphiques favorables (fig. 6).

Donc, les résultats obtenus confirment que la différence remarquée sur les blés au niveau de site Ev 6 ne peut être due qu'a l'effet de changement de la composition minéralogique des sols à proximité des déchets et la fixation des métaux lourds d'autant que le blé qui est une plante annuelle ne tolère pas l'élévation des taux de métaux lourds (Boussen, 2004).

3.1.2 Réflectances des surfaces minérales

Dans cette étude nous avons entrepris des mesures au niveau de la digue, des produits d'érosion de la digue, des alluvions et des sols aux alentours de l'oued Gzenni dans les deux domaines spectraux :l e visible et l'infrarouge.

La figure 7 présente un exemple de courbes de reflectance spectrale pour 7 échantillons de surfaces très différents mesurés in situ. Dans les deux domaines spectraux étudiés (visible et infrarouge) Il y a trois types de réponses spectrales des surfaces minérales :

* La première catégorie de réponse spectrale (1) avec une réflectance de l'ordre de 55% à 60% dans le domaine de visible et de l'ordre de 60% à 70% dans l'infrarouge, est caractérisé par le site Em1(au niveau de la digue) et le site E14 (zone de dépôts des rejets distante de 3300 m par rapport à la digue).

* La deuxième catégorie de réponse spectrale (2) caractérisée par les zones localisées entre la digue et de la zone de dépôts :

- La courbe de réflectance (a) de site Em7, localisé au pieds de la digue est de l'ordre de 50% dans le visible et dans l'infrarouge

- Les courbes de réflectance (b) et (c), des sites Em10 et Em12 les alluvions de l'oued Gzenn,i sont de l'ordre de 30% dans le visible et dans l'infrarouge.

* La troisième catégorie de réponse spectrale (3) caractérise les zones localisées au delà de la zone de dépôts ; elles ont des réflectance de l'ordre de 10% à 20% dans les deux domaines spectraux étudiés.

Les techniques d'analyse spectrale ont précisément pour objectif de trouver les bandes d'absorption caractéristiques permettant d'identifier des composants particuliers. Compte tenu de la granulométrie grossière des échantillons mesurées au niveau du secteur d'étude, les différences de signatures spectrales sont faible puisque l'efficacité d'absorption des objets varie faiblement en fonction de leur diamètre et de leur longueur d'onde (Bedidi et Cervelle, 1993). Cette faible discrimination des caractéristiques spectrales des cibles nous a conduit à faire recours à d'autre traitement sur les spectres. En effet les dérivées secondes des spectres nous a permis de mettre en évidence les bandes d'absorption (Kosmas *et al.*, 1984 et1986 et Escadafal *et al.*, 1993).

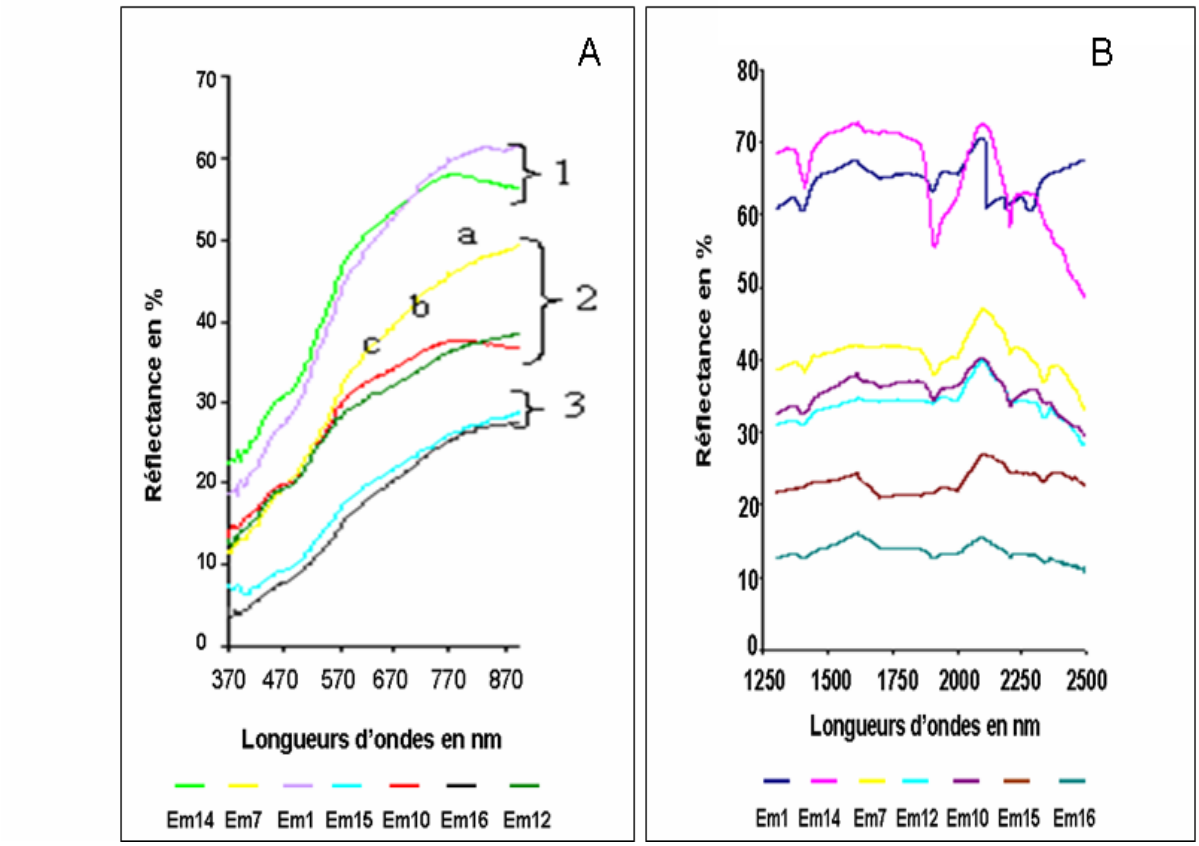


Figure 7 : Principaux types de spectres de réflectances observés sur La série de 16 échantillons étudiée. A : domaine de visible et B : domaine infrarouge

Figure 7 : *Main types of reflectance sprctra observed on the set of 16 samples studied. A : visible domain and B: infrared domain*

3.2. Dérivée seconde des spectres

La comparaison des courbes des dérivées secondes des différents sites avec celles des minéraux purs (Hunt et Salisbury, 1976, Hunt, 1977 et Clark *et al*., 1993) a été faite sur chaque minéral d'une manière indépendante.

Domaine de visible (fig. 8)

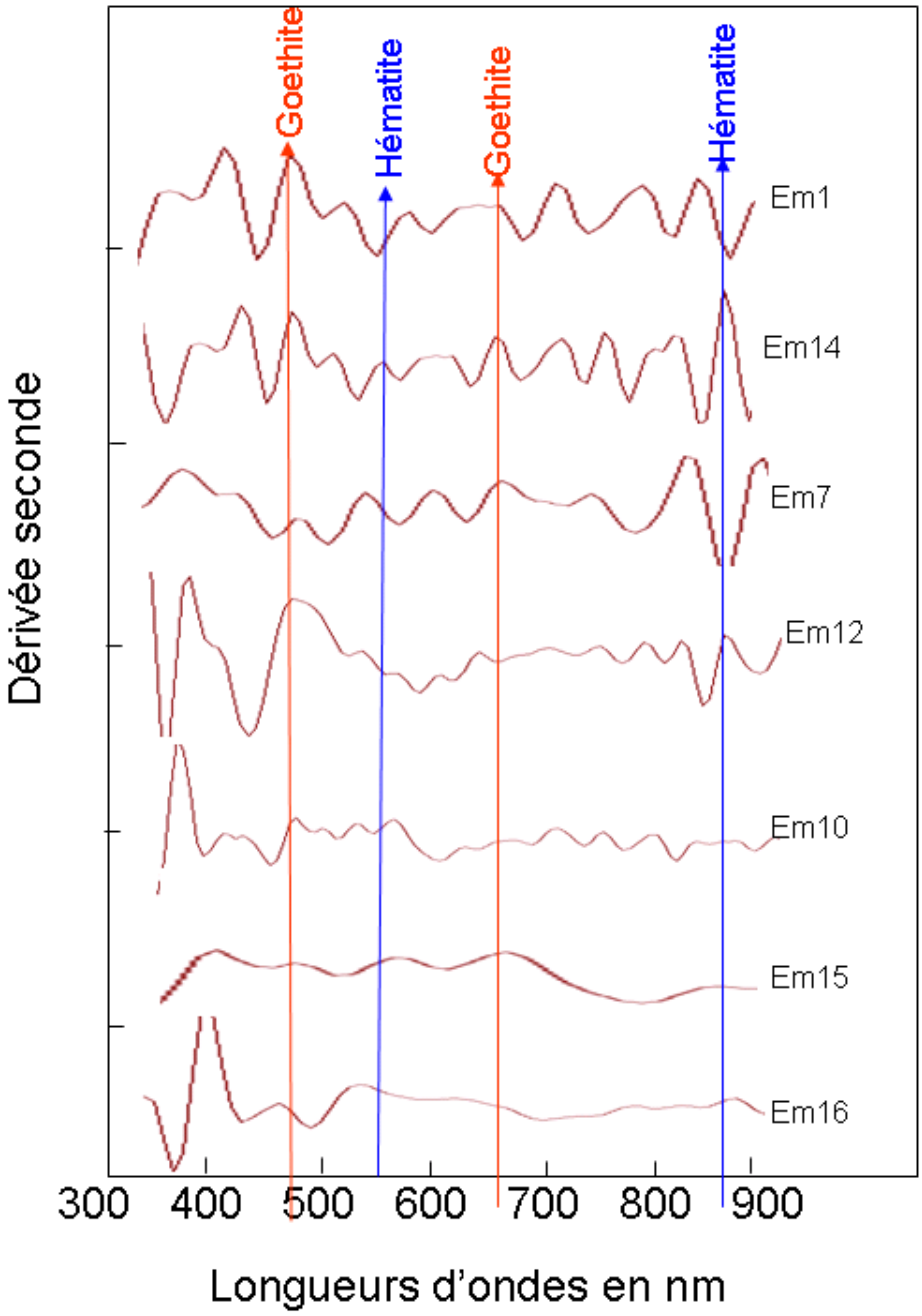


Figure 8 : Exemple de comparaison de**s** courbes de dérivée seconde des principaux sites mesurés au niveau du secteur d'étude avec celle de l'hématite et de goethite.
Figure 8 : *Example of comparison of second derivative curves different measured site at the survey area with the* ***hematite*** *and* ***goethite.***

L'Hématite et goethite présentent les bandes d'absorption caractéristiques dans le visible.

La comparaison des bandes caractéristiques des geothite et de l'hématite avec les principales courbes de réflectances des échantillons mesurés par le spectroradiométre révèle l'existence de ces deux minéraux dans tous les échantillons mesurés et l'absence d'hématite sauf au niveau de la digue EV1 et de site Em7 qui est localisé au pied de la digue.

Domaine de l'infrarouge (figs. 9 et 10)

Les absorptions fondamentales de la pyrite, la sphalerite, la galéne, la calcite, et la dolomite se situent dans le moyen infrarouge.

Les bandes d'absorptions caractéristiques de calcite et de dolomite apparaissent au delà de 2200 nm comme illustre la figure 9. La comparaison des courbes des minéraux des roches encaissantes à calcite et dolomite avec les courbes des dérivées secondes des sites mesurés montrent leur présence dans tous les échantillons mesurés.

Les bandes d'absorptions des minéraux sulfurés sont respectivement pour (la pyrite 1925 nm et 2025 nm, sphalérite (2075nm et2175 nm et la galène 2275nm et1625nm). La comparaison des bandes des ces minéraux sulfurés avec les courbes des dérivées seconde des sites étudiés prouve la présence de pyrite, galène et sphalérite au niveau de tous les échantillons mesurés.

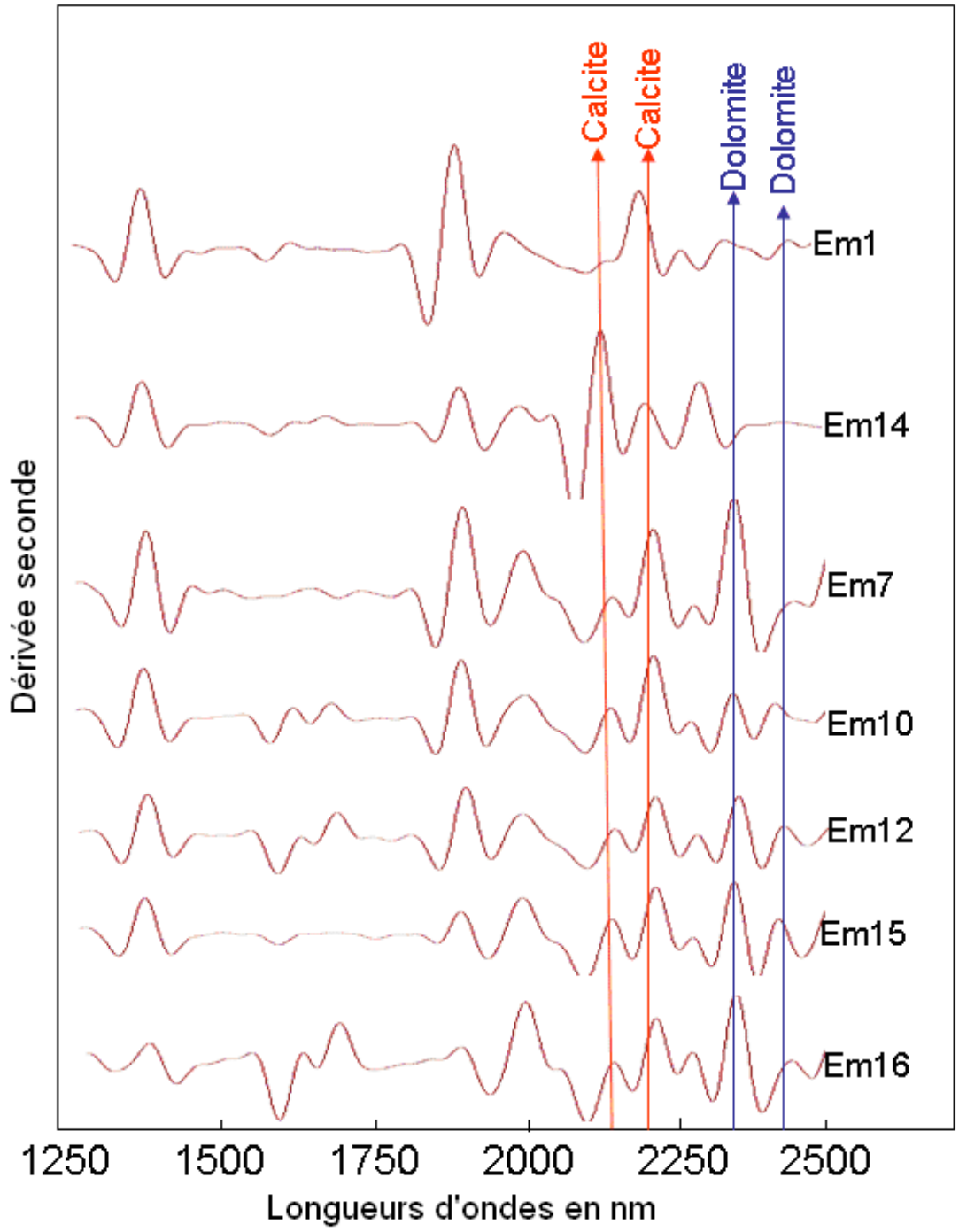


Figure 9 : Exemple de comparaison des courbes de dérivée seconde des principaux sites mesurés au niveau du secteur d'étude avec celle de calcite et de dolomite.

Figure 9: *Example of comparison of second derivative curves different measured site at the survey area with the cacite and dolomite.*

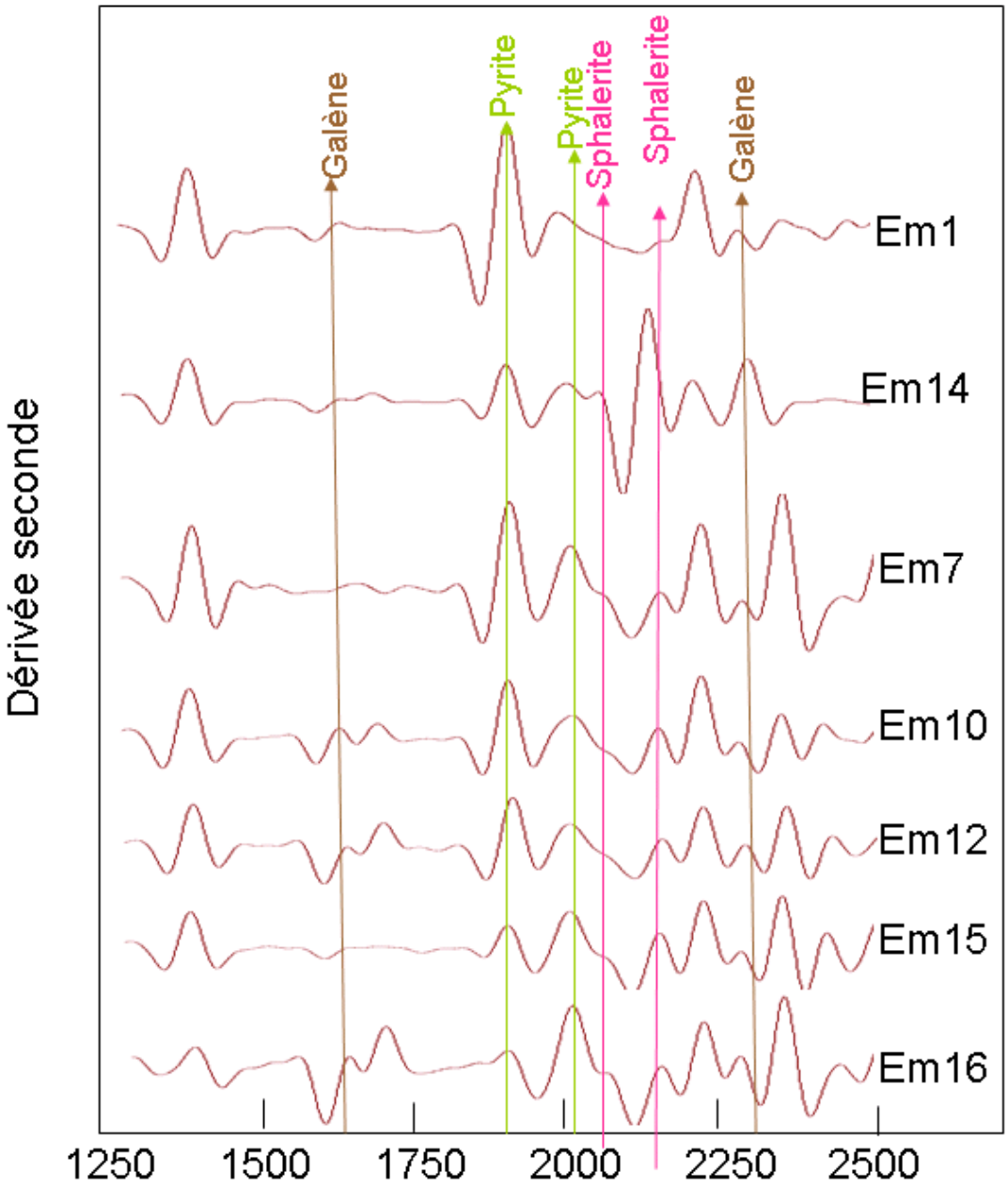


Figure 10 : Exemple de comparaison des courbes de dérivée seconde des principaux sites mesurés au niveau du secteur d'étude avec celle de la pyrite, la sphalerite et la galène.
Figure 10 : *Example of comparison of second derivative curves different measured site at the survey area with the pyrite, the sphalerite and the galena.*

4. INTERPRETATION

Les mesures spectroradiométriques ont fourni des informations significatives sur l'état de la végétation en terme de pollution de part et d'autre de l'oued Gzenni. Ceci se confirme, surtout au niveau du point Ev6 qui est localisé au voisinage de la zone dépôts des rejets de la mine Em14, la présence des faibles réflectance representatives de la chlorophylle pour les végétaux qui sont localisés à proximité des déchets et une augmentation des signatures spectrales pour ceux qui sont localisés loin des déchets.

De la même manière, les différences de réflectance spectrale des surfaces minérales des différents sites révèlent que la zone affectée par les rejets s'étend de la digue jusqu'au site Em14. Les plus importantes réponses spectrales des alluvions et des sols correspondent à la zone la plus polluée qui est localisée au niveau du site Em14 (figs. 9 et 10). Néanmoins, cette première analyse est dépendant de la nature granulométrique dans le secteur. La détermination de la composition minéralogique ne s'effectue par la première analyse que pour une granulométrie de faible taille où l'efficacité d'absorption est assez importante.

Le traitement des courbes en dérivées secondes obtenues confirme la présence actuellement des minéraux sulfurés et de leurs produits d'altération (goethite et hématite) au niveau de la digue, des alluvions et des sols.

Comme il a été décrit par (Ballivy *et al.*, 1977 ; Blanchard, 2000 et Brill et Floch'h, 2001), les minéraux sulfurés qui ont subi une oxydation au contact de l'air vont entraîner une acidification du milieu, sous forme de drainage minier acide. Cette acidité de l'eau engendre la libération dans l'environnement des métaux lourds associés aux sulfures (Ben Arfa, 2003).

La contamination des sols par des métaux lourds aux environs des rejets de la mine est serait prouvée par la réponse spectrale des végétaux localisés au voisinage de ces rejets qui se traduit par une diminution de la taille, de la densité des végétaux en fonction de l'accroissement de libération des métaux lourds au niveau des sols. Cet augmentation de concentration des métaux lourds influes fortement sur l'activité photosynthétiques des plantes qui se traduit par une réduction de la réflectance (Planquart *et al.*, 2000). En effet, Ben Guirat en 1997 a montré que l'excès en plomb, est peu toxique à la germination, mais inhibe la croissance des plantes, ce qui se traduit par une activité photosynthétique faible.

5. CONCLUSION

Les rejets de la mine de Jalta, continue à être une source de contamination de la région en métaux lourds (le plomb et le zinc) capable effectivement de dégrader la qualité des eaux (DMA) et des alluvions. Dans notre étude, nous nous sommes basés sur l'utilisation de l'approche radiomètrique qui permet la surveillance ponctuelle de la dynamique spatiale et temporelle de ces contaminations. Le drainage minier acide comme il se présente est l'un des plus important problèmes environnementaux auxquels doit faire face l'industrie minière par l'identification, l'évaluation des contaminants par une étude multi- sources utilisant des nouvelles technologies.

L'évolution de la télédétection multispectrale et hyperspectrale ouvre des nouveaux horizons pour l'application de ces techniques pour l'identification et la cartographie des drainage miniers acides. En effet la télédétection hyperspectrale permet une vision synoptique, précise, réduit le coût et la durée des investigations au sol. Des models de corrélations doivent être établis encore entre la spectroscopie et la géochimie environnementale tels que nous pouvons obtenue des résultas de l'ancien, de l'actuel et même de ceux du plus tard.

6. RÉFÉRENCES

AUBERTIN M., Boussière B. et Bernier L (2002) : Environnement et gestion des rejets miniers. Manuel sur Cédéron. Bibliotheques Nationale du Canada. ISBN 2-663-01030-3

BALLIVY G., BELLALOUI A. et NARASIAH S. (1997) : Stabilisation des résidus miniers acides à l'aide des poussières de four de cimenteries comme source basique. Projet NEDEM. Rapport final N° GR 97-10-02, Univ. Sherrooke .115 pp.

BEDIDI A., CERVELLE B. (1993) : Diffusion de la lumière par des particules minérales. Cah. Orstom, sér. Pédol., vol XXVIII, n°1 : pp. 7-14.

BEN ARFA O. (2003) : Caractérisations minéralogique et chimique des rejets miniers et des sédiments de surface du district de Jalta (Mateur). D.E.A, Faculté des Sciences de Tunis. 97 pp.

BEN GUIRAT S. (1997) : Contribution à l'étude de la pollution des terres agricoles par les rejets industriels et miniers. Cas de la sidérurgie de Menzel Bourguiba et de la mine de Bou Grine. D.EA., Faculté des Sciences de Tunis. 122 pp.

BEN M'BAREK N. (2001) : Etude de l'écosystème du lac Ichkeul et de son bassin versant "caractéristiques physiques et géologiques des eaux et des sédiments. Thèse d'université. Faculté des Sciences de Tunis El Manar. 252 pp.

BLANCHARD C. (2000) : Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués. Thèse doctorat. Institut national des Sciences appliquées de Lyon. 241p.

BOUSSEN S . (2004) : Impacts des rejets de la mine de Jalta sur la ditrubition du plomb et du Zinc dans l'environnement pédologiques de la région de Ghezala (Mateur). Mém.DEA, Faculté des Sciences de Tunis, 87p.

BONN F. et ROCHON G. (1992) : *Précis de télédétection, Vol.1, Principes et méthodes*. Presses universitaires du Québec, 512 pp.

BRASSET. T. (1995) : Etude par spectroscopie en reflectance diffuse(visible et proche infrarouge) de la transformation de l'heritage ferrallitique en Basse- Casamance (Senegal). These de doctorat. Universite Denis Diderot- Paris VII. 220 p

BRILL H. et FLOC'H J.P. (2001) : "Le devenir des metaux provenant des anciennes mines l'exemple du massif central français". *Revue geologues.* Union Française des Geologues n°130/131, pp. 233-241.

CHEVREL S., KUOSMANEN V., GRÖSEL K., MARSH S., TUKIAINEN T., SCHAFFER U., QUENTAL L., VOSEN P., LOUDJANI P., AASTRUP P., 2003 – "Remote-sensing monitoring of environmental impacts", *Mining Environmental Management*, Vol 11, Nb 6, November 2003, pp 19-23.

CHEVREL S., KUOSMANNEN V., BELOCKY R., MARSH S., TAPANI T., MOLLAT H.., QUENTAL L., VOSEN P., SCHUMACHER V., KURONEN E., AASTRUP P, (2001) - Hyperspectral airborne imagery for mapping mining-related contaminated areas in various european environments - First results of the MINEO Project. 5th International Airborne Remote Sensing Conference, San Francisco, California, 17-20 September 2001, CD-ROM

CLARK. R. N., SWAYZE G.A., GALLAGHER A. J., King T.V.V. and CALVIN W.M. (1993): Digital spectral library, version 1 (0.2-3µm), U.S.Geological Survey. Open file Report 93-592, 1326 pages

DITTMANN,C and VOSEN,P.(2002) : Assessing and monitoring the environmental impact of mining activities in Europe using advanced Earth Observation techniques. projet MINEO final report, funded by the European Community under the Information Society Technology programme (1998-2002), N° IST-1999-10337. Germany, 2002, 77 p.

ERICK. B. (1988) : Méthode de caractérisation pédo-hydrique des sols basés sur l'analyse de la courbe de retrait. Cahi.orstom.sér.pédol., vol XXIV, n°3 pp179-189.

ESCADAFAL R. et HUETE A.R. (1992) : Soil optical properties and environmental applications of remote sensing. Int. Arch. Phtogramm. Rem. Sens., Vol 29 pp.709-715.

ESCADAFAL R., GOUINAUD C., MATIEU R. et POUGET M. (1993) : Le spectroradiomètre de terrain : outil de la télédétection et de la pédologie. Cah. Orstom, sér.Pédo. volXXVIII . n°1 : pp. 15-29

ESCADAFAL R., GOUINAUD C. et LEFORT P. (1995) : Manuel utilisateur du logiciel Specpro, CNT- Orstom, 25pp.

GUYOT G. (1989) : Les signatures spectrales, télédétection satellitaires, coll. Verger, France, 178 pp.

HUNT G. R. and SALISBURY J. W. (1976): visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: XI sedimentary rocks. Modern Geology, 5, pp211-217

HUNT G. R. (1977): "Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near- infrared". *Geophysics*, 42, pp 501-513

KOSMAS C.S., CURI N., BRYANT R.B et FRANZMIER D.P.(1984) : "Characterisation of iron oxide minerals by second-derivatrice visible spectroscopy". *Soil Sci*.,48, pp.401-405

KOSMAS C.S., FRANZMIER D.P. et SCHULZE D.G. (1986) : "Relationship among derivatrice spectroscopy, color, crystallite dimensions and AL substitution of synthetic goethites and hematites". *Clays and Clay minerals*, 34, 6, pp.625-634

MOISSEF A. (1959) : Etude géologique et métallographique du district minier El Gréfa – Basina – Le Semène. Thèse d'université. Faculté des Sciences de Tunis El Manar. 250 pp

MOUGENOT B. (1994) : Effet des sels sur la réflectance et télédétection des sels salés.Cah.Orstom,sér.Pédol.,vol XXVIII, n°1 : pp.45-54

ROBIN M. (1993) : *La télédétection « des satellites aux systèmes d'information géographiques »*. Coll. Nathan, F., 318pp.

PLANQUART P., BONIN G., PRONE A. et MASSIANI C. (2000) : Distribution, movement and plant availability of trace metals in soils amended with sewage sludge composts : application to low metal loadings. Sci.Total Environ.vol241,p161_179.

ROUSSEV G., RADIVOEV B. et PAPOV A. (1976) : Gisement de plomb de Jalta. Rapport géologique, campagne de recherche 1974 – 1975. Société tunisienne d'expansion minière. Convention de renouvellement des réserves des mines en activité du 11 .06 .1974 -Technoexportstroy – Bulgarproremi – Bulgarie. 101 pp.