

Application du SIG et de l'imagerie radar à l'analyse morphologique et minéralogique du bassin versant de la Haute Moulouya (Maroc)

Application of GIS and radar imaging to the morphological and mineralogic analysis of the High Moulouya Basin (Morocco)

EL MEHDI BENYASSINE^(*) & ABDELILAH DEKAYIR^(*)

Abstract: The High Moulouya basin contains abandoned mines (Zeida, Mibladen and Aouli) with no remediation. Around these ones, Pb-Zn mining wastes (dumps) are exposed to meteoric elements and are sources of heavy metal pollution of waters and soils. At Zeida, during flood periods of the Moulouya river, huge amounts of waste are eroded and transported over long distances. The morphological analysis by GIS of High Moulouya basin improves a good understanding of the extent and direction of the heavy metals pollution. Analysis of ASTER satellite images of the studied area and particularly around tailings has also been used to map the distribution of clay minerals considered as excellent traps of heavy metals that can slow down the advance of the pollution.

Keywords: High Moulouya basin, GIS, ASTER image, MNT, SWIR Bands, Clay Minerals, Heavy metals, Pollution.

Résumé : Le bassin versant de la haute Moulouya renferme des mines abandonnées (Pb, Zn) sans aucun aménagement (mines de Zeida, Mibladen et Aouli). Autour de ces mines, des quantités énormes de déchets miniers contenant Pb et Zn (terrils) sont exposées aux agents météoriques et constituent des sources de pollution en métaux lourds des eaux et des sols. A Zeida, au cours des périodes de crue de l'oued Moulouya, des quantités énormes de ces déchets sont érodées et transportées sur des distances importantes, ce qu'accroît l'action des vents. Les résultats de l'analyse morphologique par SIG du bassin versant de la haute Moulouya permettent de comprendre l'extension et les directions de la pollution. L'analyse d'images satellitaires ASTER du bassin versant en question et plus particulièrement autour des résidus miniers a permis aussi de cartographier la répartition des minéraux argileux en surface considérés comme d'excellents pièges de métaux lourds capables de freiner l'avancée de la pollution.

Mots-Clés : Haute Moulouya, Bassin versant, SIG, Image ASTER, MNT, Bandes SWIR, Minéraux argileux, Métaux lourds, Pollution.

INTRODUCTION

Objectifs

Dans le secteur de la haute Moulouya, les mines abandonnées de Zeida, Mibladen et Aouli ont laissé en surface des masses énormes de stériles et des rejets de laverie. Ces déchets exposés à l'action météorique (vent et érosion par les eaux), en absence de mesures de protection, constituent une source importante de contamination par les métaux sur un grand rayon autour de ce secteur minier (EL HACHIMI *et al*, 2006 ; BAGHDAD, 2009 ; BOUNAKHLA, 2012). L'utilisation du SIG à l'échelle de la haute Moulouya permet d'extraire des cartes thématiques (cartes des pentes, d'expositions et du réseau hydrographique) qui aident à comprendre la mobilité des sédiments vecteurs de métaux à travers le réseau hydrographique de cette zone.

Dans les sites pollués, les minéraux argileux comme les oxyhydroxydes de fer se comportent comme des minéraux fixateurs de métaux. La distribution spatiale de ces minéraux argileux donne une indication sur l'étendue des zones capables de fixer les métaux lourds à l'échelle du bassin versant.

^(*) Equipe Géoexplorations & Géotechniques, Université Moulay Ismail, BP.11201, Zitoune, Meknès, Maroc
benyassine.elmehdi@gmail.com

Pour cartographier la distribution des minéraux argileux, nous avons utilisé les bandes spectrales SWIR des images ASTER où la plupart des minéraux présentent des absorptions spécifiques. Les résultats sont obtenus par comparaison des signaux spectraux des minéraux argileux rehaussés avec ceux de la librairie spectrale des argiles (JPL, USGS) (EL QAYEDY, 2006 ; MEZNED, 2008). Ces résultats seront vérifiés par l'analyse minéralogique des argiles d'échantillons de sol prélevés dans ces zones.

Milieu naturel

Le secteur d'étude est situé près du village minier de Zeida, au centre de la haute Moulouya. Ce bassin est encadré à l'ouest par les chaînes montagneuses du Moyen Atlas et au sud par le Haut Atlas et vers l'Est par la Moyenne Moulouya. La cuvette de la Haute Moulouya est formée par des faciès de nature et d'âges différents. Elle couvre une superficie de 10000 Km² dont 85 % de plaines et avec une altitude moyenne de 1500 m, et 15 % de montagnes culminant à Jbel El Ayachi à une altitude de 3676 m (EL HACHIMI, 2006).

Géologie

Le socle

Le socle paléozoïque est formé par des terrains schisteux et granitiques attribués au Cambro-Ordovicien (HOEPFFNER, 1987). Les schistes sont métamorphisés et intrudés par des granitoïdes d'âge 330 ± 2 Ma (OUKEMENI *et al.*, 1995). L'ensemble est affecté par la fracturation tardi-hercynienne et atlasique. Ces massifs granitiques affleurent, par le jeu de la tectonique, à l'ouest par des séries cristallophylliennes d'Aouli jusqu'à Zaïda et à Boumia Kerrouchène.

La couverture

Elle repose en discordance angulaire très prononcée par les terrains du Trias en premier, sur les formations du socle (EMBERGER, 1965). Elle remplit les milieux concaves de la paléo-surface (DERRAR, 1996). La série triasique est surmontée par les marnes et les calcaires liasiques de faible épaisseur et de multiples faciès littoraux (DAGALLIER, 1977). Sur la totalité de cette couverture détritique, les épaisseurs sont réduites, surtout à l'approche des boutonnières, sous l'action de l'érosion (JAOUANI, 2001) et aussi du fait que ces boutonnières restent après le Permien en position élevée (SCHMITT, 1976).

Le Permo-Trias

Il correspond à des formations à dominance argilo-salifères et détritiques rouges: conglomérats, arkoses, grès argileux rouges. Sur le substratum granitique, des argilites salifères aux passages gypsifères présentent des intercalations doléritiques basaltiques à la partie intermédiaire. Au cours de cette période, les épanchements de laves à la périphérie du bombement ont été formés par le socle : basaltes, sakalavites et trachytes, la région a connu aussi une série de transgressions/régressions causant le dépôt de faciès de grès, marnes, calcaire et argiles.

Le Trias

Les formations triasiques sont généralement subhorizontales et surmontent en discordance les terrains paléozoïques fracturés. Elles sont constituées à la base par un niveau conglomératique à galets de schistes et des arkoses peu épais (NAJI, 2004), arénites et rudites feldspathiques cimentés par l'hématite (FELENC & LENOBLE, 1965). Les arkoses sont liées par un ciment siliceux, carbonaté, ferrugineux ou barytique (AMADE, 1965). Les formations de contact avec le socle sont surmontées

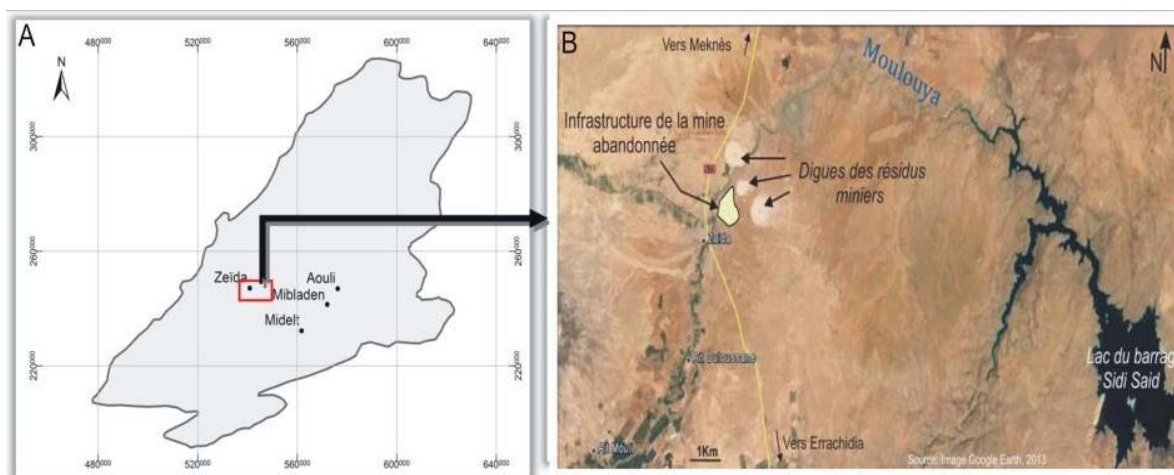


Figure 1. Localisation géographique de la zone d'étude.
A. Bassin versant de la Haute Moulouya B. Pourtour de la mine abandonnée de Zeida

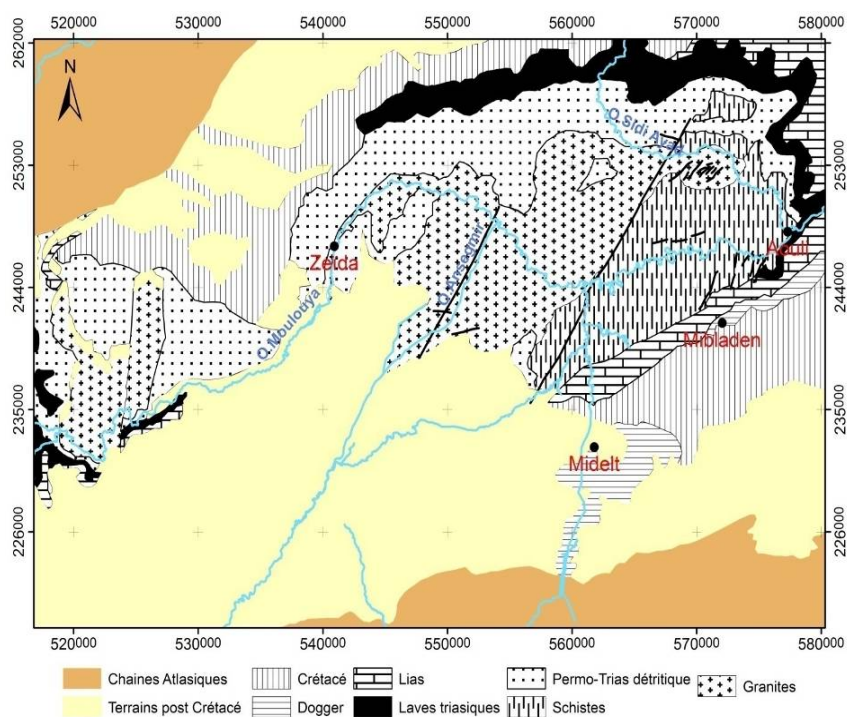


Figure 2. Carte géologique du secteur oriental de la Haute Moulouya (EMBERGER, 1985).

d'une série détritique d'argile gréseuse rouge (SCHMITT, 1976) de 30 m d'épaisseur, celle-ci est composée de pélites et d'argilites (AMADE, 1965). Ces faciès sont considérés comme une série argileuse triasique inférieure (Naji, 2004). L'ensemble est suivi d'une série basaltique grise tholéitique du rifting atlasique de 200 m d'épaisseur (EMBERGER, 1965 ; GANZEEV *et al.*, 1978) daté de la période Sinémurien-Hettangien (TOUAHRI, 1991).

Le Jurassique

La série jurassique repose en discordance sur les terrains sous-jacents ; il s'agit d'une puissante série de plates-formes carbonatées constituées de calcaires et calcaires dolomitiques (FELENC & LENOBLE, 1965) fortement karstifiés (DAGALLIER & MACAUDIERE, 1987). Elle affleure sur les bordures des Atlas. La minéralisation plumbo-barytique de Mibladen est logée dans ces formations carbonatées en deux niveaux intercalés (NAJI, 2004).

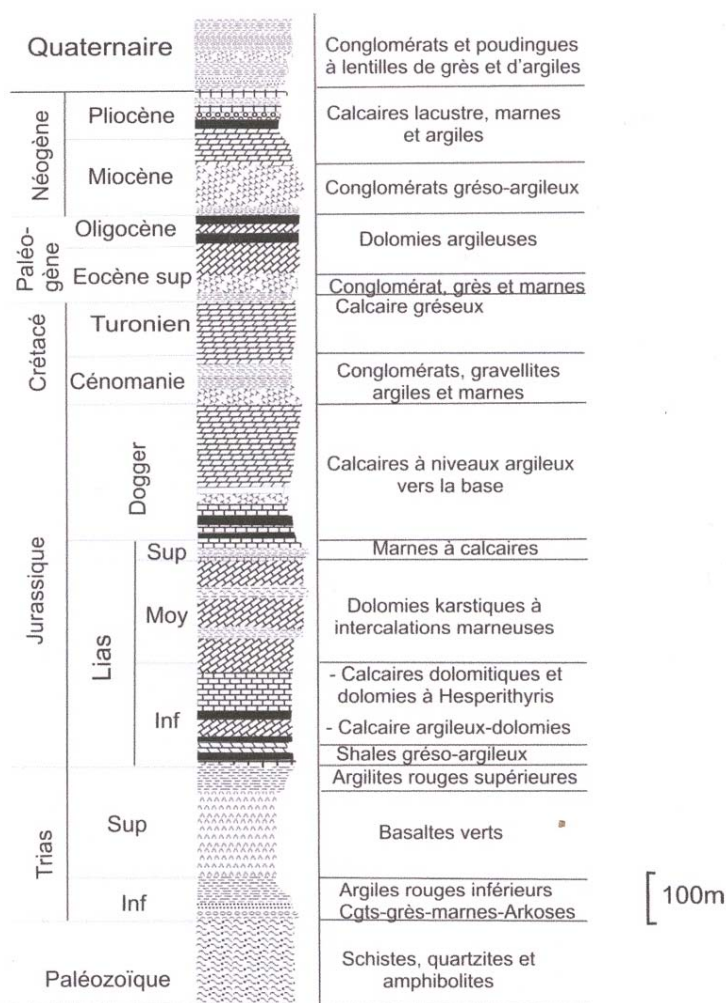


Figure 3. Log stratigraphique synthétique de la Haute Moulouya et ses bordures atlasiques (NAJI, 2004).

Le Crétacé

Sous l'effet de l'érosion et de l'émersion, le Crétacé repose directement sur le Dogger moyen (EMBERGER, 1965). Les formations du Crétacé sont probablement les premiers terrains recouvrant entièrement la boutonnière de Zeida (SCHMITT, 1976).

Par endroit, il repose sur le Trias et même sur le socle (NAJI, 2004). Cette série commence par une phase transgressive d'âge cénomanien qui couvre la totalité du bassin de la haute Moulouya. La colonne stratigraphique débute par les formations de l'Infra-Cénomaniens de caractère lagunaire représentées par des conglomérats à cimentation calcaire ou gréseuse (NASLOUBI, 1993) partiellement minéralisés en barytine (NAJI, 2004), des grès, des argilites et des marnes (FELENC *et al.*, 1965). Le sommet du Crétacé est représenté par le calcaire du Turonien en barres intercalées par des lits d'argile (DERRAR, 1996).

Le Tertiaire

Les terrains du Paléogène sont des dépôts continentaux formés à la base par des conglomérats suivis par des marnes intercalées par des calcaires, des argiles et aussi par des dolomies (NAJI, 2004). Le Néogène est représenté particulièrement par les formations du Miocène (MICHARD, 1976).

Le Quaternaire

Les formations quaternaires sont constituées de terrasses fluviales. Ces terrasses renferment des poudingues, des galets, des sables et des argiles sableuses et des travertins. (COMBE & SIMONOT, 1971). Les formations basaltiques sont mises en place à travers deux appareils volcaniques présents dans la région : au nord de Zeida, le petit cône de projection de Bou Idarne caractérisé par un cratère évasé (SCHMITT, 1976) ; au nord de Boumia, le cône de Touguejdjdid est le deuxième appareil volcanique du bassin de la Haute Moulouya (SCHMITT, 1976).

Climat

Le climat de la haute Moulouya est largement influencé par l'orographie atlasique. Les températures sont nettement contrastées par un été très chaud et orageux et un hiver froid, il est doté d'une atmosphère sèche purement continentale quoique relativement fraîche lorsque les vents occidentaux dominant.

Sur l'ensemble du bassin, les précipitations moyennes annuelles sont très variables, elles sont liées à l'altitude et à l'exposition (DERRAR, 1996). Les régimes de précipitations annuelles sont caractérisés par une alternance de maxima et de minima que l'on trouve sur la totalité du bassin (COMBE & SIMONOT, 1971). En effet, sur les bordures montagneuses occidentales, les précipitations moyennes annuelles varient entre 196 mm à Ansegmir et 206,4 mm à Zeida et entre 400 mm et 660 mm dans les zones montagneuses.

MATERIEL ET METHODES

Le logiciel Arc GIS (9.3) a été utilisé pour dégager les caractéristiques morphologiques du bassin versant et construire un modèle numérique de terrain. Les images ASTER ont été traitées par le logiciel ENVI (4.7). Pour établir une carte de répartition des minéraux argileux du bassin versant, les réflectances tirées des images satellitaires (SWIR 1.6-2.43µm) ont été comparées aux signatures spectrales des mêmes minéraux argileux dans la librairie spectrale USGS (United States Geological Survey), ré-échantillonnées dans les bandes spectrales du domaine SWIR.

La différence entre les valeurs de réflectance de l'image et de la librairie est due à la différence de pureté des minéraux en relation avec les conditions d'altération, la nature de la lumière lors de la mesure de la réflectance et les absorptions des minéraux (MEZNED, 2008). Les argiles ont des réflectances maximales dans l'intervalle des longueurs d'ondes 2-2,4 µm (Tableau 1) (domaine SWIR) couvrant les longueurs d'absorption des silicates d'alumine (Al-OH) avec les bandes 5 à 7.

Pour mettre en évidence les réflectances de ces argiles, nous avons utilisé les rapports de bandes suivants : $[(b5 \times b7) / (b6 \times b6)]$, $[(b5 + b7) / b6]$, $[b7 / b5]$ et $[(b4 + b6) / b5]$ (Tableau 1). Dans une seconde étape du traitement des données, des filtres de convolution de type passe-bas et gaussien passe-bas ont été utilisés respectivement afin de renforcer les bordures et d'augmenter la clarté de l'image (Tableau 2).

Tableau 1. Standards utilisés pour l'amélioration des produits ASTER
(KALIKNOWSKI & OLIVER, 2004)

Minéral	Rapport de bande	Description	Référence
Silicates			
Sericite/Muscovite/Illite/Smectite	(b5+b7)/b6	Altération en argile	Rowan(USGS) Hewson(CSIRO)
Alunite/Kaolinite/Pyrophyllite	(b4+b6)/b5		Hewson(CSIRO)
Phengite	b5/b6		Rowan(USGS)
Muscovite	b7/b6		Hewson
Kaolinite	b7/b5	Approximative	Hewson
Argile	(b5×b7) / (b6×b6)		Bierwith
Altération	b4/b5		Volesky
Roche hôte	b5/b6		Volesky

Tableau 2. Matrice du filtre de convolution, gaussien passe-bas 5 x 5

0	1	2	1	0
1	3	4	3	1
2	4	-44	4	2
1	3	4	3	1
0	1	2	1	0

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Géomorphologie du bassin versant

Le bassin de la Haute Moulouya, séparé des Atlas par l'accident Sud Moyen Atlasique au nord et par l'accident Nord Haut Atlasique au sud, est marqué par l'existence d'une structuration morphologique irrégulière sous l'effet d'une tectonique en compression. À l'intérieur du bassin, la faille de Ksabi divise celui-ci en deux dépressions : l'une à l'ouest, composée essentiellement par des plateaux subhorizontaux fortement fracturés et l'autre à l'est, en forme plus allongée et dérangée par des structures anticlinales d'âge crétacé (AMRANI *et al*, 2006).

Le modèle numérique du terrain (MNT) permet de réaliser une analyse spatiale représentative car il reflète des informations relatives à la structure morphologique sur l'ensemble du bassin versant (ZHOU, 2009) ; il donne aussi des prévisions sur la nature et l'intensité des précipitations. A l'exception des bordures, le secteur minier de Zeïda est caractérisé par une topographie plane et régulière. Les altitudes diminuent en allant vers l'amont de ce bassin versant ; elles sont généralement classées en deux catégories : sur les plaines les altitudes sont inférieures à 2000 m alors que sur les montagnes elles dépassent les 2000 m. Dans la plaine, des changements brusques d'altitude sont identifiés. Ces changements très locaux sont causés par le jeu des failles de Souk Lahjer, d'Aouli et d'Amarouzif orientées NE-SW (Figure 4). Cette structuration donne au bassin l'aspect d'un gradin à grande l'échelle.

Les failles du socle ont joué au cours des phases tectoniques récentes et recoupent ainsi la couverture. Durant le rifting atlasique, il y a eu naissance d'un système de horst (Haute Moulouya) et graben (fosses atlasiques) (LAVILLE & PIQUE, 1991). La dépression de la Haute Moulouya est devenue un endroit privilégié de réception des produits de démantèlement en provenance des chaînes de montages environnantes.

Analyse des pentes

La carte des pentes a été établie à partir du MNT de la région étudiée (Figure 5). Ces cartes révèlent la présence de ruptures et de variations morphologiques le long des pentes (COLLIN, 2009). Sur l'ensemble du bassin versant, les terrains sont caractérisés par des pentes faibles qui se sont développées sur les bordures atlasiques au nord et au sud de ce bassin. Le paléo-seuil d'Aouli, apparent à l'extrémité est de la plaine par des valeurs de pentes qui dépassent les 20° et qui suivent la direction NE-SW sur des dizaines de kilomètres. Ce paléoseuil forme la limite naturelle entre la Haute et la Moyenne Moulouya (AMRANI, 2005). L'existence de massifs, éparpillés au nord et au sud du bassin versant, donne naissance à des sous-bassins versants drainés par des cours d'eau. Les précipitations, sous forme d'averses, provoquent sur le bassin de la Haute Moulouya des ruissellements violents, apportant les matériaux de démantèlement de la chaîne atlasique (AMRANI, 2006).

Les pentes fortes accentuent le phénomène d'érosion par l'instabilité des terrains. La mobilité des masses d'air causée par le dénivelé d'altitude, donne naissance à des courants d'air qui se mobilisent vers les plaines. Ces courants représentent un facteur important de transport d'éléments détritiques érodés sur la totalité du bassin de la Haute Moulouya.

Tableau 3. Superficies en (%) des différentes classes de pente du bassin versant de la Haute Moulouya

Classes	< 6°	6° - 12°	12° - 20°	20° - 30°	30° - 48°
Superficies en (%)	55	15	12	9	9

L'analyse spatiale des pentes montre que les zones à pente faible couvrent 55% de la superficie totale du bassin versant soit 5050 km², alors que celles à pente élevée (30° à 70°) sont de l'ordre de 9% occupant une superficie de 900 km².

Analyse des expositions

La carte des expositions nous a permis d'interpréter les variations de ces dernières sur l'ensemble du bassin. Sur les bordures, les expositions sont généralement influencées par l'orographie des chaînes atlasiques bien qu'elle dessine des irrégularités très locales liées aux effets d'érosion. Par contre, la plaine se distingue par une exposition monotone dérangée dans quelques endroits par les boutonnières et les massifs du socle en affleurement.

Tableau 4 : Superficies en (%) des différentes classes d'exposition du bassin versant de la Haute Moulouya

Classes	N0-N45	N45-N90	N90-N135	N135-180	N180-N225	N225-N270	N270-N315	N315-N360
Superficie En (%)	12	13	12	13	12	13	12	13

Dans le secteur de Zeïda, les zones exposées vers l'est et vers l'ouest sont les plus affectées par l'érosion. Les digues des résidus miniers sont balayées par le vent ou par le ruissellement des eaux de pluie vers la Moulouya. Les vents dominants dans cette région varient suivant les saisons : en hiver, les vents arrivent de l'Ouest, par-dessus les barrières du Moyen Atlas entraînant des masses d'air froides et humides ; en été, deux types de vents sont observés ; le Chergui qui arrive de l'est et le Sirocco qui vient du sud et qui entraînent des masses d'air sèches et chaudes d'origine sahélienne (AHAMROUNI, 1996).

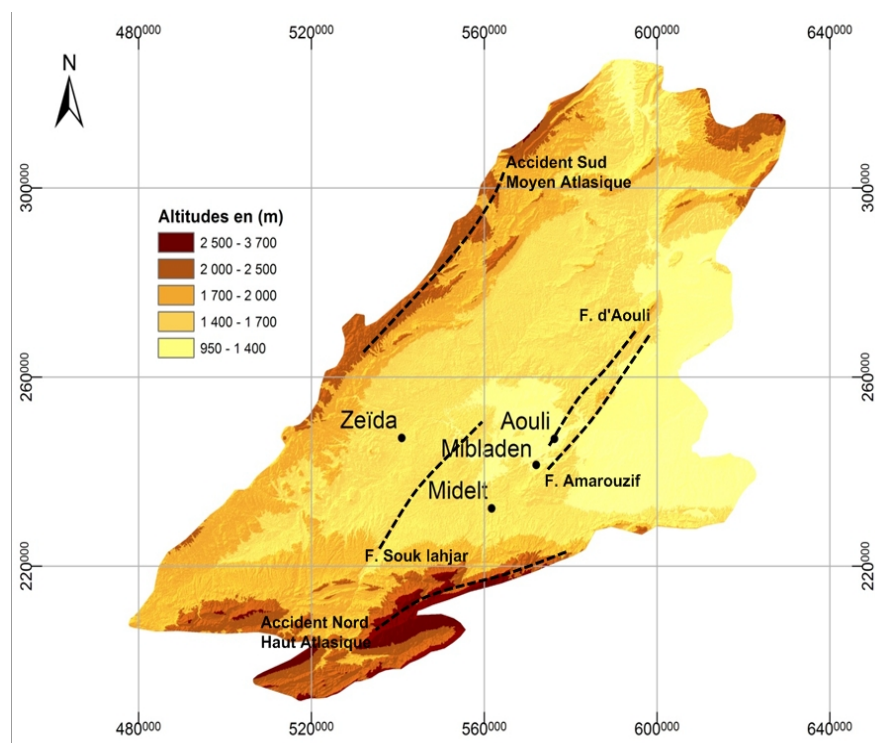


Figure 4. Modèle numérique de terrain du bassin versant de la Haute Moulouya édifié à partir des données SRTM 30m. Système de projection, Lambert conforme conique, Datum Merchiche.

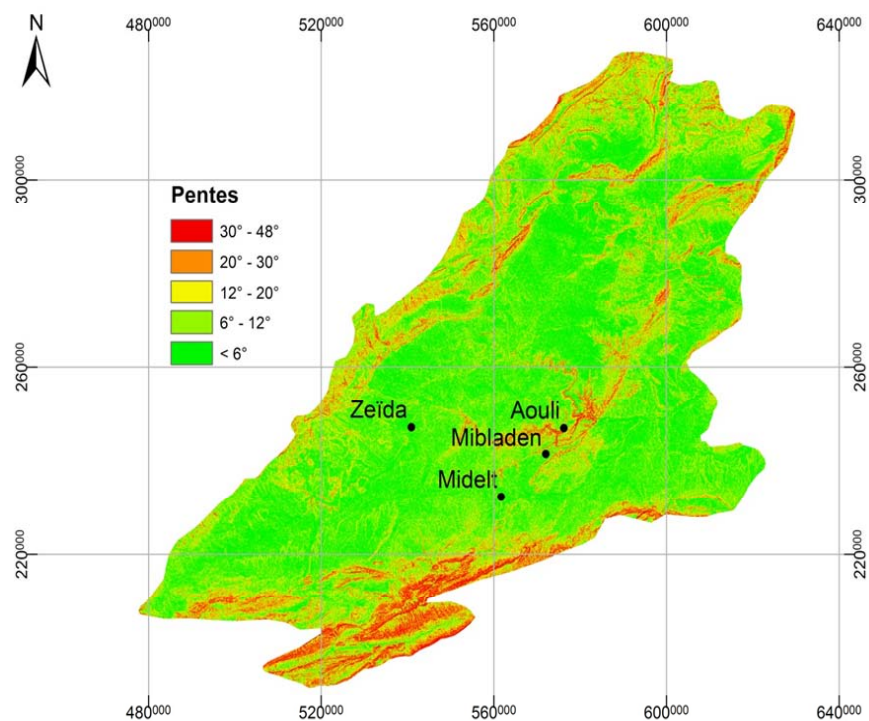


Figure 5. Carte des pentes du bassin versant de la Haute Moulouya édifiée à partir des données SRTM 30m, Système de projection, Lambert conforme conique. Datum, Merchiche.

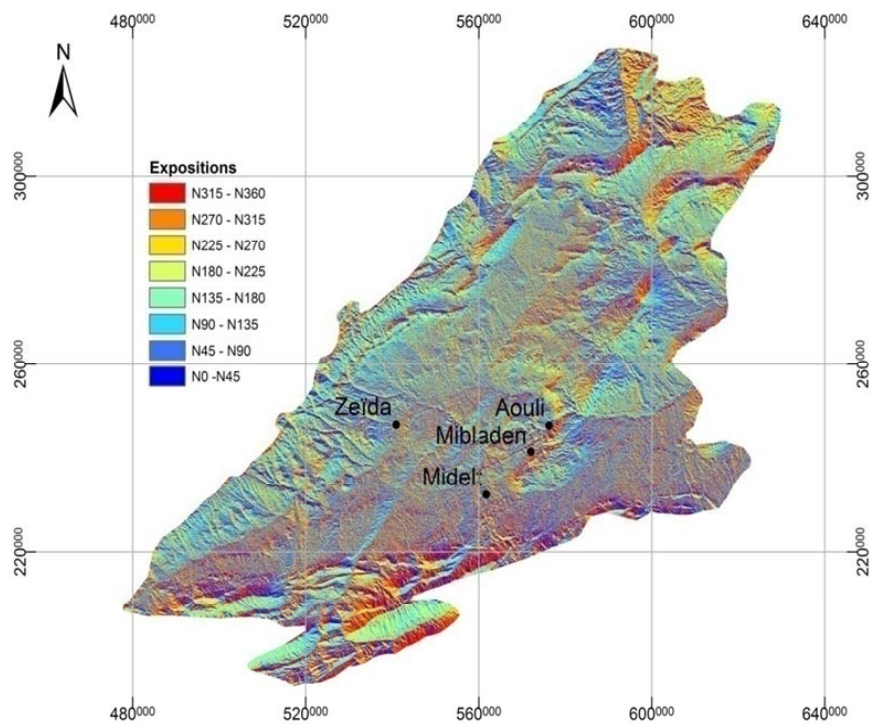


Figure 6. Carte des expositions du bassin versant de la Haute Moulouya édifée à partir des images SRTM 30m, Système de projection, Lambert conforme conique. Datum Merchiche,

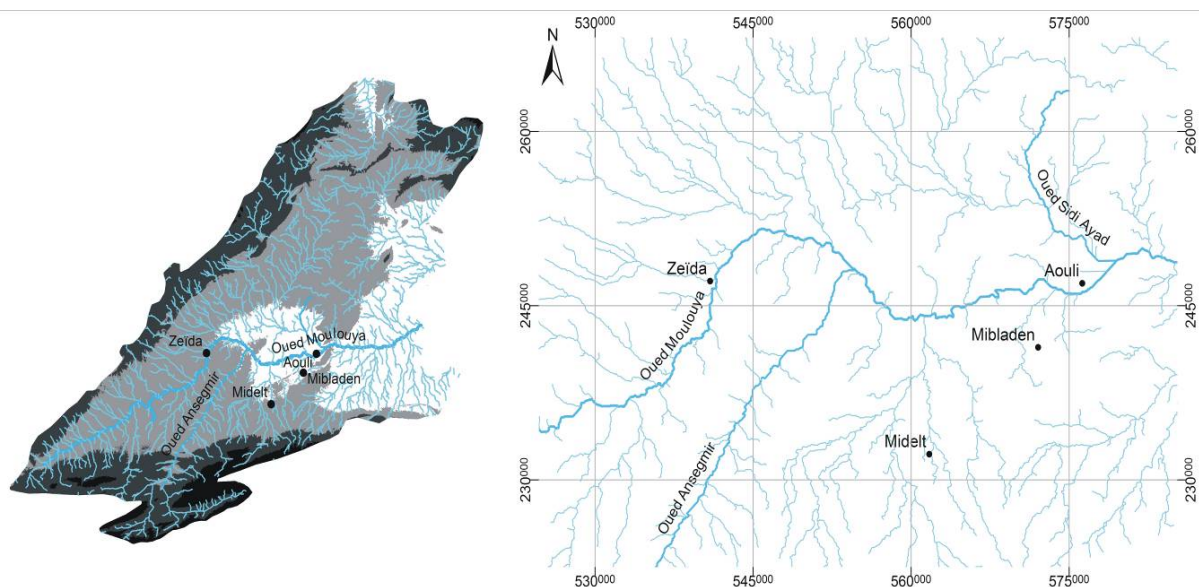


Figure 7 : Réseau hydrographique numérisé de la Haute Moulouya et du périmètre de Zeida édifées à partir des images SRTM 30m, système de projection, Lambert conforme conique. Datum Merchiche.

Analyse hydrographique

Le réseau hydrographique de la haute Moulouya est l'un des principaux facteurs responsable du transport des sédiments vers les retenues et les barrages. Il est donc nécessaire de décrire les caractéristiques hydrographiques de ce réseau.

Le bassin versant de la Haute Moulouya est drainé par une hydrographie très dense. L'oued Moulouya est le collecteur principal du bassin, il reçoit le long de son parcours un très grand nombre d'affluents dont les rares pérennes sont l'oued Ansegmir et l'oued Sidi Ayad (AHAMROUNI, 1996). Ce réseau hydrographique est dense sur les flancs des montagnes et faible sur les plaines, à l'exception des grands affluents qui gardent leur taille depuis les pieds des montagnes et creusent fortement les formations superficielles dans les plaines ; ceci s'explique par l'augmentation de la vitesse des cours d'eau et du débit solide des oueds par les sédiments déposés lors de l'affaiblissement de l'énergie des eaux générée par la diminution des pentes (AMRANI, 2006). Pour identifier le type du bassin versant drainé par ce réseau hydrographique, l'indice de compacité K_G est utilisé :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

P : Périmètre du bassin (Km) = 554 Km

A : Surface du bassin (Km²) = 9660 Km²

$$K_G = 1,54$$

La comparaison du K_G de ce bassin avec ceux des bassins standard, permet de distinguer la forme allongée du bassin de la Haute Moulouya. En effet, les pluies reçues s'écoulent en surface jusqu'à l'exutoire. Dans le cas étudié, le temps d'arrivée d'une averse à un point donné est réduit par rapport à un bassin versant arrondi.

Le bassin est subdivisé en deux parties, une au sud qui renferme les affluents de provenance du Haut Atlas caractérisés par une direction majeure N-S et une au nord, qui renferme les affluents d'origine du Moyen Atlas et généralement orientés NW-SE. La zone d'étude contient plusieurs lignes de crêtes, les principales sont celles qui séparent le bassin de la Haute Moulouya de la chaîne atlasique. La Haute Moulouya est séparée de la Moyenne Moulouya par une ligne de crête qui coïncide parfaitement avec la faille de Ksabi (AMRANI *et al.*, 2006).

Cartographie des minéraux argileux

La figure 8, présente les résultats cartographiques des minéraux argileux dans le bassin versant de la haute Moulouya, obtenus sur la base des rapports de bandes : le rapport $((b5 \times b7) / (b6 \times b6))$ pour mettre en évidence les argiles de manière générale (Figure 8a) et le rapport $(b5+b7)/b6$ pour distinguer l'illite (Figure 8b). Dans le cas de la kaolinite, deux rapports ont été calculés $(b4+b6)/b5$ et $b7/b5$. Les résultats montrent que le second rapport permet un bon rehaussement de ce minéral (Figure 8d). A partir des résultats obtenus, il paraît évident que les argiles cartographiées sont liées aux cours d'eau et sur les massifs granitiques notamment vers l'aval. En effet, l'altération météorique du granite aboutit à la formation d'arènes riches en illite et en kaolinite. Ces formations superficielles sont érodées et transportées dans les cours d'eaux qui drainent le bassin versant.

Sur les images filtrées (Figure 9), on remarque clairement l'effet des opérations de filtrage par le biais du filtre gaussien passe-bas qui donne des résultats très satisfaisants comparés à ceux obtenus par le filtre passe-bas. Ces images permettent de voir la répartition de chaque composante spectrale. En effet, les argiles sont bien contrastées par rapport à leur entourage géologique et avec une réflectance maximale. Elles forment une entité, marquée sur l'image a2 par un trait noir discontinu, localisée dans la partie NE du secteur minier de Zeïda. On peut voir aussi le contraste entre les cours d'eau et les lacs et leur entourage. L'abondance des minéraux phylliteux (Al-OH) est plus contrastée par rapport à celle des granites hercyniens et du basalte quaternaire.

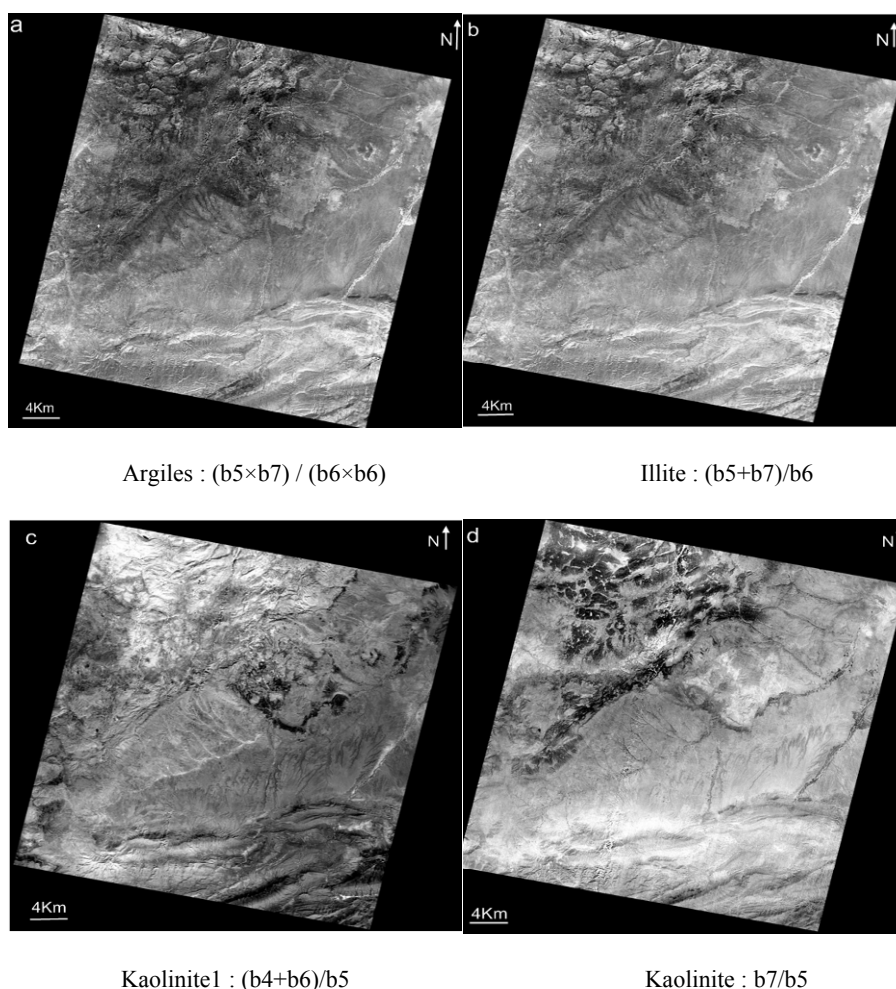


Figure 8. Cartes de répartition des argiles, de la kaolinite et de l'illite dans le bassin versant de la Haute Moulouya

L'affichage du rapport de bande des argiles sur les canaux RVB, montre une répartition similaire à celle obtenue par les niveaux gris (Figure 10).

Les spectres de réflectance originaux des deux minéraux argileux de la librairie USGS montrent des caractéristiques très semblables à ceux des spectres tirés directement des images traitées à l'exception de la kaolinite où un pic d'absorption est bien marqué à $2,20 \mu\text{m}$, cette grande ressemblance est due du fait que ces minéraux (illite et kaolinite) sont détectés en un seul groupe d'argile (MEZNED, 2008). La comparaison des spectres issus du ré-échantillonnage dans les bandes spectrales de type SWIR avec ceux de la librairie USGS, révèle que les pics des absorbances et les pics de réflectances sont très proches avec des écarts faibles dus aux effets atmosphériques (Figure 11). L'illite représente des pics d'absorption liés aux vibrations de l'ion hydroxyle (OH). La bande d'absorption très forte, qui apparaît vers $2,20 \mu\text{m}$, est due à la liaison Al-OH (Madeira, 1997). Cette bande d'absorption est bien repérée sur l'image et elle est encadrée par deux bandes de réflectance maximale ($2,14 \mu\text{m}$ et $2,28 \mu\text{m}$). Comme pour l'illite, la kaolinite est caractérisée par cette même absorption indexée à $2,20 \mu\text{m}$ (Figure 11).

Afin de confirmer les résultats d'imagerie ASTER, des échantillons de surface ont été prélevés et analysés par diffraction des rayons X. Le spectre de diffraction de la fraction $< 2 \mu\text{m}$ à l'état normal, chauffé et glycolé de l'échantillon (d) sont donnés dans la Figure 12.

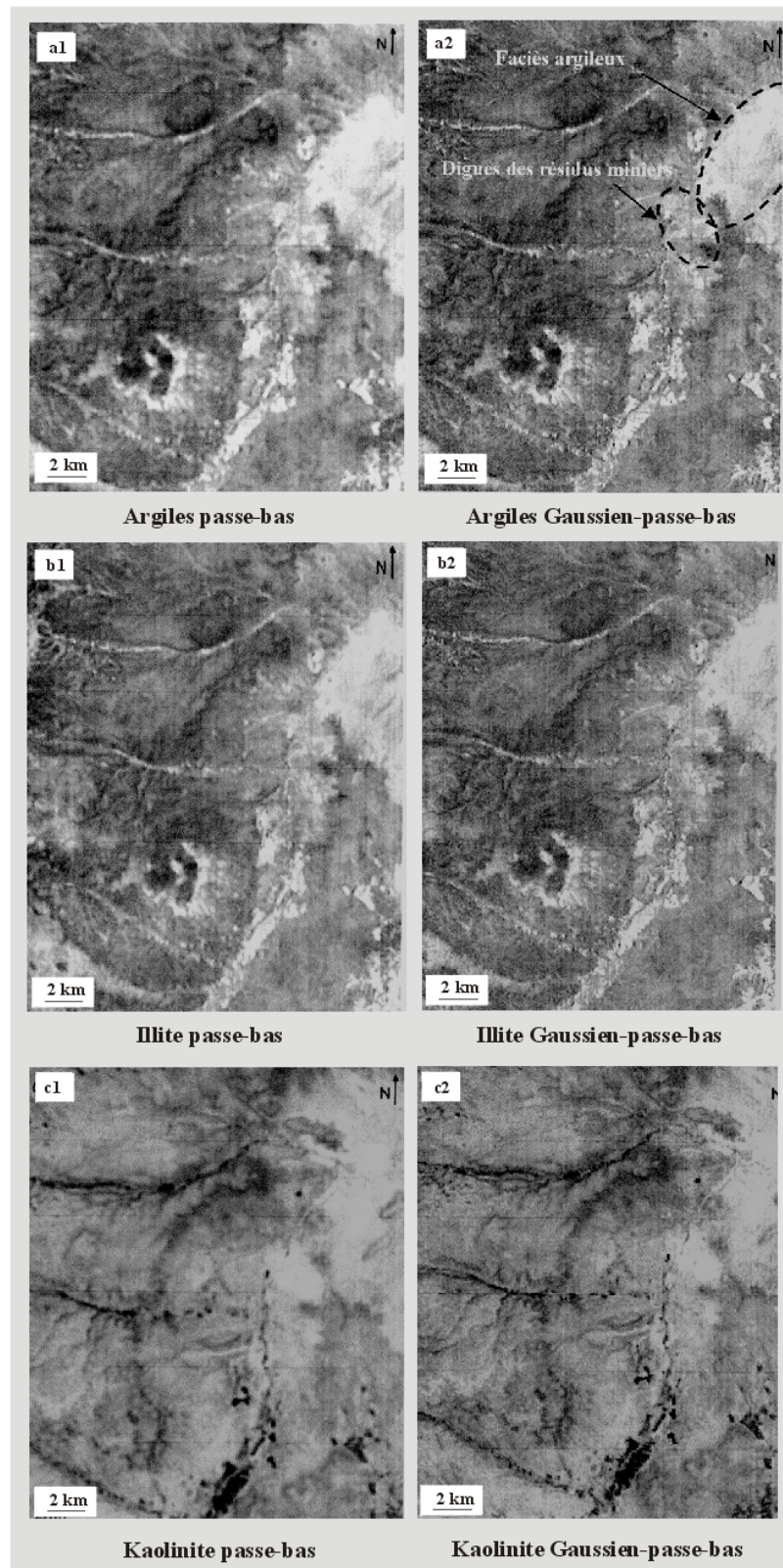


Figure 9. Comparaison entre les filtres de convolution appliqués sur les images ASTER traitées.

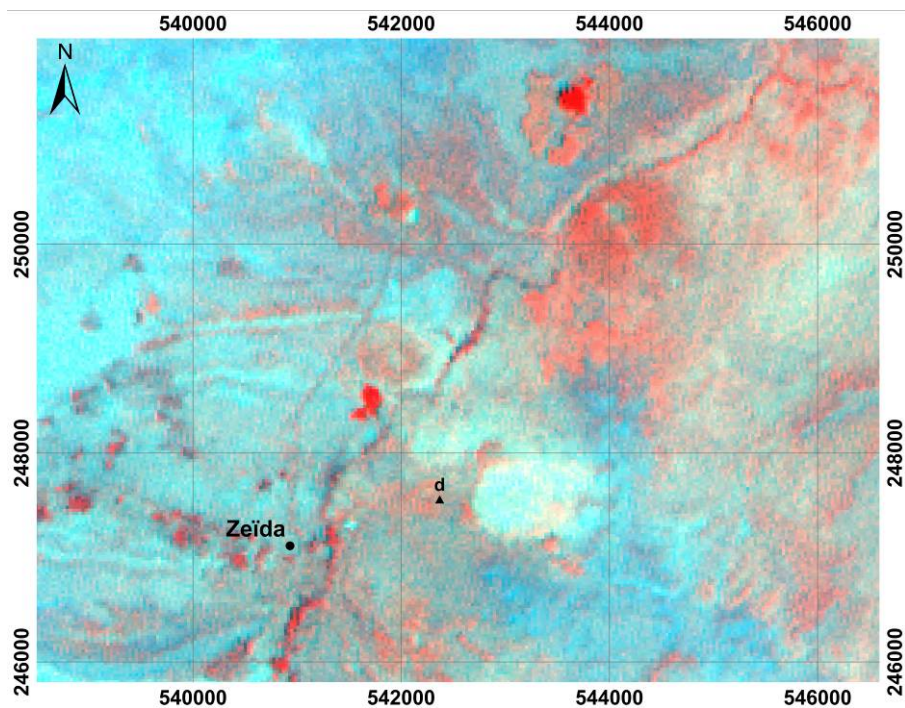


Figure 10. Localisation des points de prélèvement sur l'image de rapport de bandes des argiles en RVB, R ; (b5×b7) / (b6×b6), V ; bande 6, B ; bande 7.

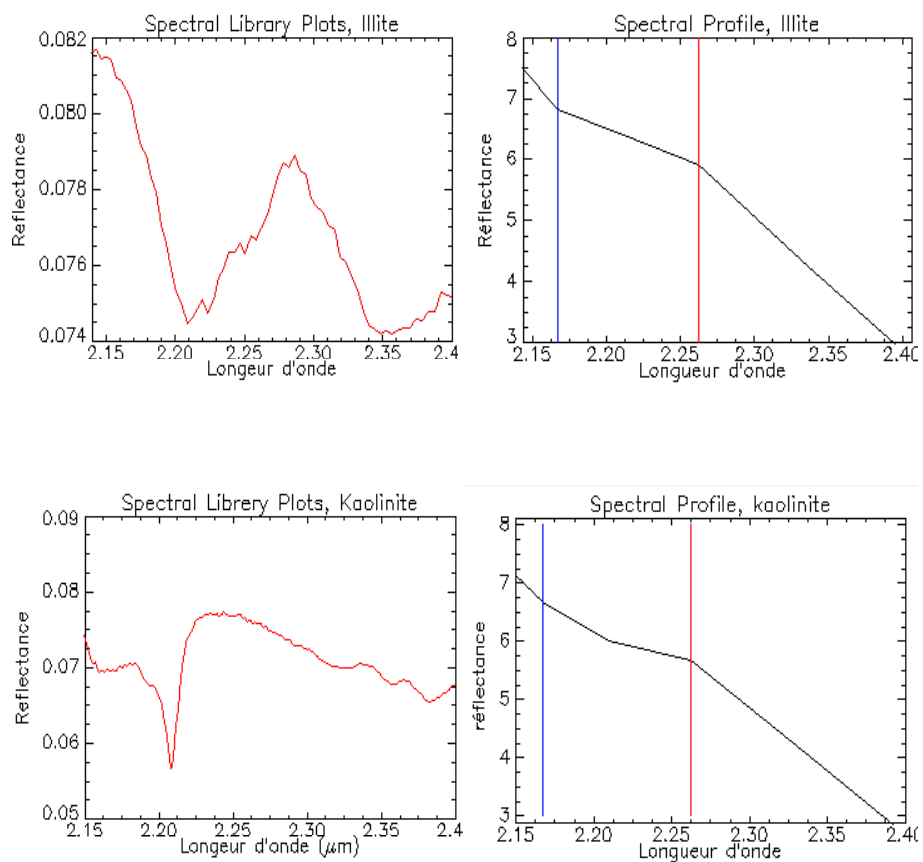


Figure 11. Comparaison entre les spectres de réflectance de l'illite et la kaolinite dans la libre et ceux ré-échantillonnés sur l'image ASTER étudiée

Le comportement aux différents traitements montre bien que la fraction argileuse est composée d'illite (pic à 10 Å°, invariant aux différents traitements) et de kaolinite (pic à 7,15 Å° dont l'intensité diminue après 1 h au chauffage).

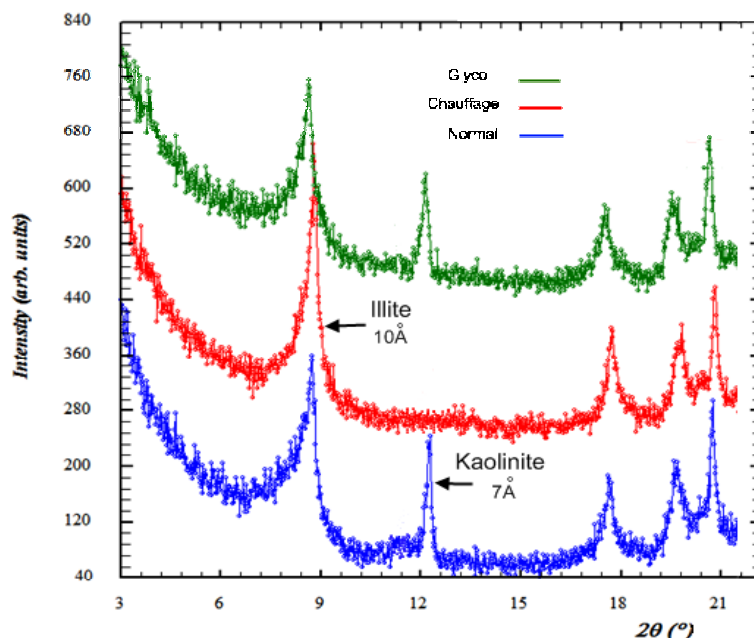


Figure 12. Spectres de diffraction des RX de la fraction argileuse extraite de l'échantillon du sol (d).

Minéraux argileux pièges de métaux lourds

De nombreux minéraux sont utilisés dans la décontamination des eaux usées et des sols. Parmi, ces minéraux les argiles possèdent un pouvoir très important de rétention des métaux lourds en raison de leur structure cristalline en feuillets (DESCHAMPS *et al.*, 2006, KABATA-PENDIAS, 2001). Cette dernière est à l'origine de leur capacité d'échange cationique (CEC). Les argiles gonflantes comme la bentonite, les zéolites etc. retiennent plus de métaux que les autres minéraux argileux (montmorillonite > vermiculite > illite, chlorite > kaolinite > halloysite). Cette rétention dépend d'autres paramètres tels que : la taille des grains, le pH, la concentration des solutions et le type d'élément à fixer. En effet, la rétention des métaux augmente avec le pH (SIS & UYSAL., 2014)

Dans le district minier de Zeida, les eaux des différents lacs analysés montrent un caractère alcalin (EL HACHIMI, 2006 ; BAGHDAD, 2009 ; MAKHOUKH *et al.*, 2011) ; dû à la présence de terrains calcaires favorisant ainsi la fixation des métaux. Ceci a été confirmé par la baisse des teneurs dans les eaux des lacs analysés.

Les terrains riches en minéraux argileux tels que les sols et les sédiments des cours d'eau constituent de bons pièges pour les métaux lourds véhiculés par l'eau ou par le vent. Ils permettent de freiner l'avancée de la contamination surtout autour des sites miniers abandonnés comme Zeida.

CONCLUSION

Les variations topographiques et l'existence d'un réseau hydrographique intense et distribué sur la totalité du bassin versant de la Haute Moulouya favorisent la dispersion des métaux lourds en provenance des digues de résidus miniers de la mine de Zeida.

L'utilisation des images ASTER pour le rehaussement des minéraux argileux a permis de cartographier la distribution spatiale des minéraux argileux autour des résidus miniers. En effet, ces

argiles sont représentées principalement par la kaolinite et l'illite, produits d'altération de surface des granites. Ces argiles sont érodées et déposées dans le lit des cours d'eau avoisinants la Moulouya. Les minéraux argileux en raison de leur surface spécifique possèdent une capacité d'échange importante faisant de ces minéraux d'excellents pièges pour les métaux lourds. L'établissement d'une carte de distribution de ces minéraux argileux permet de se faire une idée sur l'étendue de la dispersion par les eaux et par le vent des métaux lourds autour de la mine abandonnée de Zeida.

Les résultats de cartographie des minéraux argileux obtenus par l'analyse et le traitement d'images satellitaires ASTER sont validés par les données minéralogiques obtenues par diffraction des rayons X.

BIBLIOGRAPHIE

- AHAMROUNI, J., 1996. Erosion hydrique dans le bassin versant de la Moulouya (Maroc oriental). Recherche des zones sources d'envasement de la retenue du barrage Mohamed V. Thèse de troisième cycle en géologie appliquée, Université Cheikh Anta Diop. 190p.
- AMADE, E., 1965 : Les gisements de plomb de Zaida et de Bou Mia. *Notes et mém. Serv. Géol. Maroc*, 181 : 175-184
- AMRANI, A., 2006. Analyse du dynamisme morphogénétique du bassin de la Haute et Moyenne Moulouya (Maroc) par couplage d'imagerie Landsat et du modèle numérique de terrain. *Rev. Télédét.*, 5, 4 : 379-391.
- BAGHDAD, B., 2009. Evaluation de la contamination et évolution de la qualité des eaux au voisinage d'une mine abandonnée d'extraction de Plomb (Zaida-Haute Moulouya-Maroc). 2ème Conférence Inter Régionale Enviro Wat 2009, Marrakech (Maroc). 13p.
- BOUNAKHLA, M., 2012. PGAA metals analysis in tailings in Zaida abandoned mine, High Moulouya, Morocco. *J. Radioanal Nucl Chem.*, 291 : 129-135.
- COLLIN, N., 2009. Geodynamic framework of large volcanic fields highlighted by SRTM DEMs: Method evaluation and perspectives exemplified on three areas from the Cameroon Volcanic Line. *J. Volcano and Geoth Res.*, 187 : 13-25.
- COMBE, M. & SIMONOT, M., 1971. La Haute Moulouya, le sillon d'Itzer-Enjil et le massif de Bou-Mia-Aouli. Ressources en eau du Maroc (Tome1). Domaine du Rif et du Maroc oriental. *Notes et Mém. Serv. Géol., Maroc* : 193-201.
- DAGALLIER, G., 1977. Une série carbonatée littorale : le Lias moyen à Pb-Ba de Mibladen (Maroc). *Sciences de la terre*, 21 : 53-101.
- DAGALLIER, G. & MACAUDIERE J., 1987. Contrôles tectoniques des concentrations Pb-Ba en milieu carbonaté de Mibladen (Maroc). *Bull. Soc. Géol. de France*, série 8, 3 : 387-394.
- DERRAR, N., 1996. Synthèse géologique et hydrologique de la Haute et la Moyenne Moulouya (Maroc). Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale de l'Industrie Minérale, Rabat, Maroc. 169p.
- DESCHAMPS, T., BENZAAZOUA, M., BUSSIERE, B., BELEM, T. & MBONIMPA, M. 2006. «Mécanismes de rétention des métaux lourds en phase solide: cas de la stabilisation des sols contaminés et des déchets industriels». *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*. vol. 7, no 2. 18p
- EL HACHIMI, M.L., 2006. Pb et As dans des eaux alcalines minières : contamination et risques (mine abandonnée de Zeida, Maroc). *Rev. des sciences de l'eau*, 20 : 1-13.
- EL QAYEDY, J., 2006. Caractérisation lithologique du haut atlas marocain à l'aide des données d'aster et de mesures spectrales de terrain. *Rev. Télédét.*, 6 : 153-175.
- EMBERGER, A., 1965. Carte polygénétique des minéralisations plombifères de la Haute Moulouya (gisements d'Aouli, Mibladen et Zeida), Maroc. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 160 : 3433-3436.
- FELENC, R. & LENOBLE, J.P., 1965. Les gîtes de plomb de Mibladène. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, 181 : 186-196.
- GANZEEV, A., GROUZDEV, V. & MITIAEV, A., 1978. Structure géologique de la région de la Haute Moulouya. *Mines. Géol et Energ. Rabat*, 44 : 111-114.
- HOEPFFNER, C., 1987. La tectonique hercynienne dans l'Est du Maroc. Thèse ès Sciences, Université de Strasbourg. 280p.
- JAOUANI, L., 2001. Etude géologique et géochimique des gisements plombifères de la boutonnière d'Aouli (Aouli, Zeida, Mibladen) Haute Moulouya (MAROC). Thèse en géologie appliquée. Université Mohammed V Rabat. 252p.
- KABATA-PENDIAS, A., 2001. Trace Elements in Soils and Plants, Third Edition. Edition CRC. 432p.
- KALIKNOWSKI, A. & OLIVER, S., 2004. ASTER Mineral Index Processing. Remote Sensing. Application Geoscience Australia, 37p

- LAVILLE, E. & PIQUE, A., 1991. La distension crustale atlantique et atlasique au Maroc au début du Mésozoïque : rejeu des structures hercyniennes. *Bull. Soc. Géol. France*, 162 : 1161-1171.
- MADEIRA, J., 1997. Spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils : Application to a Thematic Mapper (TM) image for soilmapping in Brasilia, Brazil. *Internal J. Rem. Sens.*, 18, 13 : 2835-2852.
- MAKHOUKH. M, SBAA. M, BERRAHOU. A. & VANCLOOSTER.M. 2011. Contribution à l'étude de l'impact d'un site minier abandonné dans la haute Moulouya sur la qualité de l'Oued Moulouya, Maroc. *Afrique Science*, 07, 3 : 33 – 48.
- MEZNED, N., 2008. Caractérisation des rejets miniers dans le bassin versant de la Mejerda en utilisant les données Aster. *Rev. Télédét.*, 8, 2 : 83-92.
- MICHARD, A., 1976. Eléments de géologie marocaine. *Notes et mém, Serv. Géol du Maroc*, Rabat, 252p.
- NAJI, M., 2004. Les minéralisations plombo-barytiques du district de la Haute Moulouya : contexte géologique, contrôle tectonique et modèle de mise en place – gisements d'Aouli – Mibladène, Maroc. Thèse en géologie appliquée. Université Mohammed V. Rabat. 218p.
- NASLOUBI, M., 1993. Genèse et modélisation des minéralisations plombifère de la haute Moulouya (Maroc). Mémoire de maîtrise. Université du Québec à Montréal. 107p.
- OUKEMENI, D., BOURNE, J. & KROGH, T. E., 1995. Géochronologie U-Pb sur Zircon du Pluton d'Aouli. Haute Moulouya. Maroc. *Bull. Soc. Géol. France*, 166 : 15-22.
- SIS, H. & UYSAL, T., 2014. Removal of heavy metal ions from aqueous medium using Kuluncak (Malatya) vermiculites and effect of precipitation on removal. *Applied Clay Science*, 95: 1–8
- SCHMITT, J.M., 1976. Sédimentation, paléaltération, géochimie et minéralisation en plomb de la série triasique de Zeida (Haute Moulouya, Maroc). Thèse en sciences et techniques minières, Ecole nationale supérieure de Paris. 110p.
- TOUAHRI, B., 1991. Géochimie et métallogénie des minéralisations à plomb et zinc du nord de l'Algérie. *Publ. Off. Nat. Géol*, 4 : 260.
- ZHOU, L., 2009. Longitudinal and transverse profiles of hilly and mountainous watersheds in Japan. *Geomorph.*, 111 : 17-26.