Télédétection, 2006, vol. 5, n°4, p. 379-391
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

ANALYSE DU DYNAMISME MORPHOGÉNÉTIQUE DU BASSIN DE LA HAUTE ET MOYENNE MOULOUYA (MAROC) PAR COUPLAGE D'IMAGERIE LANDSAT ET DU MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN

Abderrahim AMRANI[*1], Mohamed El WARTITI[2], Alberto MARINI[3], Mohamed ZAHRAOUI[4] et Luca NAITZA[5]

[1*] *Laboratoire de géologie appliquée, Université Mohammed V, Avenue Ibn Battouta, BP. 1014, Rabat, Maroc.*
Téléphone 00212 – 605 519 52 ;
Courriel : abderrahimamrani@yahoo.fr.

[2] *Laboratoire de géologie appliquée, Université Mohammed V, BP. 1014, Avenue Ibn Battouta, Rabat, Maroc.*
Téléphone : 00212-377 719 57. télécopieur : 00212-377 719 57 ;
courriel : wartiti@fsr.ac.ma

[3] *Université de Cagliari, via Trentino, 51 - 09127 Cagliari, Italie. Télé. +39 070 675 7701. Fax : +39 – 706 757 707 ;*
courriel : marini@unica.it.

[4] *Laboratoire de géologie appliquée, Université Mohammed V, BP. 1014, Avenue Ibn Battouta, Rabat, Maroc.*
Téléphone +212 – 377 719 57 ; télécopieur : 00212-377 719 57 ;
courriel : zahraoui@fsr.ac.ma

[5] *Université de Cagliari, via Trentino, 51-09127 Cagliari, Italie.*
Téléphone : +39 070 675 7701 ; télécopieur : +39 706 757 707 ;
courriel : l.naitza@yahoo.it

Soumis le 11 mars 2005 ; révisé le 21 septembre 2005 ; accepté le 28 février 2006

L'étude morphostructurale du bassin de la Haute et Moyenne Moulouya (HMM) est fondée sur la combinaison d'une analyse numérique surfacique et d'une approche synthétique classique (contrôles de terrain…). L'intégration et la superposition de l'ensemble des données géocodées à travers un SIG ont permis de mieux comprendre les processus morphogénétiques. Les travaux de terrain en outre nous ont permis de valider les résultats.
L'étude que nous avons entreprise ici a pour objectif l'explication de l'évolution morphohydrographique et morphostructurale du bassin de la HMM, vis-à-vis de sa géomorphologie et de son environnement climatique. Les grands accidents structuraux réactivés ont guidé l'évolution morphostructurale du bassin. Les réactivations tectoniques conjuguées au drainage concentré et violent sont les deux principaux facteurs qui contrôlent les processus de la morphogenèse. Le facteur pente conjugué aux facteurs climatiques contrôle largement la potentialité de drainage. Le couvert végétal est dispersé et très réduit le long des oueds. Le processus de dégradation naturelle et anthropisée des sols fragiles conduira au développement d'un milieu rhexistasique.

Mots clés : Landsat 7 ETM+, MNT, géologie, géomorphologie, linéaments, morphogenèse, Haute et Moyenne Moulouya, Maroc.

CONTRIBUTION OF LANDSAT SATELLITE IMAGERY AND DIGITAL TERRAIN MODEL FOR THE ANALYSIS OF THE MORPHOGENETIC DYNAMISM OF THE HIGH AND MIDDLE MOULOUYA BASIN (MOROCCO).

The morphostructural study of the High and Middle Moulouya basin (Morocco) is based on the combination of a digital analysis of the surface and a classic approach based on ground surveys. The integration and superposition of the geocoded data set integrated into a GIS permits a better understanding of the morphogenesis processes. Field work was instrumental in validating the results.
The survey that we undertook in this present work has for objective the explanation of the morphohydrographic and morphostructural evolution of the High and Middle Moulouya basin, with regard to its geology and climatic environment. The highly faulted terrain guided the morphostructural evolution of the basin. The tectonic reactivations in conjunction with the concentrated and violent drainage are the two main factors that control the processes of morphogenesis. The slope factor in conjunction with the climatic factors control the drainage potential. The vegetation cover is sparse and reduced along rivers. The process of natural and anthropogenic degradation of the fragile soils will lead to the development of a middle rhexistatic environment.

Keywords: Landsat 7 ETM+, Digital Terrain Model (DTM), Geology, Geomorphology, Tectonics, Morphogenesis, High and Middle Moulouya, Morocco.

1. INTRODUCTION

1.1. Objectifs

Le bassin de la Moulouya a suscité de nombreux travaux et recherches aussi bien géologiques que géomorphologiques : Emberger (1965), Felenc et Lenoble (1965), Lahlou (1975), Hoepffner (1987), Laville et Piqué (1991), Filali et al. (1999), Ouali et al. (2000), que climatiques : Belghyti (2004). Cependant, avec l'avènement des nouvelles technologies de Systèmes d'Information Géographique (SIG) et télédétection aérospatiale, l'information géographique s'est fortement améliorée quantitativement et qualitativement, améliorant le rendement de la photogrammétrie. Désormais, l'établissement des cartes géologiques et géomorphologiques thématiques nécessite l'utilisation d'un SIG bien adapté et capable d'extraire les données surfaciques et sub-surfaciques**.**

En raison de l'étendue de la zone d'étude, il s'impose de recourir à l'exploitation des données couplées du MNT et d'imagerie satellitaire ETM+ de Landsat en fausses couleurs (images fausses des canaux 7, 3, 1 et 4, 3, 2). Cette technique est capable d'apporter un plus, aussi bien quantitatif que qualitatif, pour l'explication de l'impact de plusieurs facteurs sur le dynamisme morphogénétique : la tectogenèse, la pente, la lithologie très sensible à l'érosion et les précipitations violentes (climat semi-aride). Ainsi, il devient possible de cartographier, à partir de la téléanalyse en 2D et 3D, les éléments physiques tels que : le bassin versant, la carte des pentes, la carte de la fracturation, le réseau hydrographique et la carte d'anomalies hydrographiques. Nous avons choisi la dépression de la Haute et Moyenne Moulouya et ses bordures sud moyen atlasique et nord haut atlasique, car celles-ci disposent de la même histoire géologique et représentent le même dynamisme de dégradation des sols. En effet, dans cette étude nous nous intéresserons aux relations entre les morphostructures et les processus morphogénétiques.

1.2. Présentation générale du secteur d'étude

L'analyse de l'imagerie ETM+ de Landsat et du MNT montre que la dépression de la Haute et Moyenne Moulouya occupe une grande surface de la Meseta oranaise occidentale du Maroc oriental. Il s'agit d'une dépression intramontagneuse située entre les deux branches atlasiques (Moyen et Haut Atlas) qui s'ouvre largement sur la Méditerranée. Il s'est avéré, lors de l'analyse du MNT, que cette vaste dépression géomorphologique ayant échappé aux déformations structurales atlasiques est formée de larges plateaux plus ou moins fracturés et basculés.

Le secteur d'étude est partagé en trois principales zones naturelles qui sont du nord au sud : le Moyen Atlas, le bassin de la Moulouya (Moyenne et Haute Moulouya) et le Haut Atlas (figure 1). Les deux dépressions de la Haute et Moyenne Moulouya se trouvent partagées par l'accident tectonique de Ksabi.

Le dispositif orographique atlasique contrasté qui entoure la dépression de la HMM, sous forme de **V** ouvert vers l'est, est le facteur principal de son aridité. La zone d'étude est caractérisée par des précipitations orageuses violentes apportant des produits érodés de l'amont.

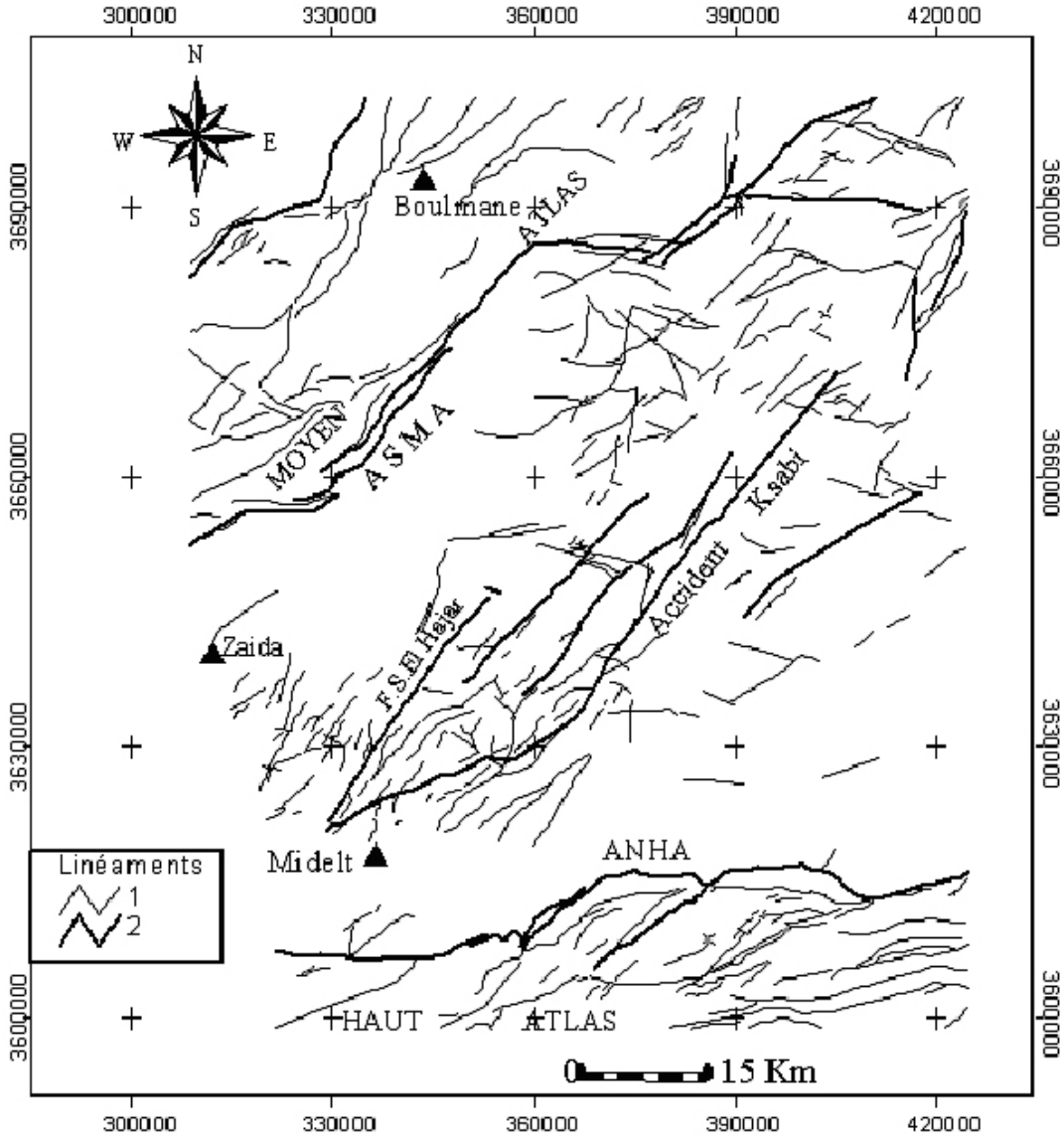


FIGURE 1 : Image ETM+ de Landsat 7, combinaison fausses couleurs des canaux 7, 3, 1 et de la bande 8, du bassin de la Haute et Moyenne Moulouya et les deux bordures de la chaîne atlasique. Système de projection UTM et ellipsoïde WGS 84. *Landsat 7 ETM+ image, channel 7, 3, 1 false color and channel 8 combination, of the High and Middle Moulouya basin and the two boundaries of the Atlas chain. UTM Projection system and WGS 84 Ellipsoid.*

Devant la multitude de sources de données, nous avons élaboré une base de données contenant toutes les géoinformations nécessaires. Ces géoinformations, obtenues à partir des différentes données, nous ont permis d'établir des cartes thématiques pour différentes utilisations en aménagement environnemental (plan de reboisement de la zone de risque, projet d'installation des digues pour la lutte contre l'érosion hydrique…).

1.3. Matériels et méthodes

La présente étude est fondée sur la photo-interprétation assistée par ordinateur des données numériques spatiales en 2D et 3D (images satellites ETM+ de Landsat 7, modèle numérique de terrain (MNT), réseau hydrographique, carte

de linéaments, carte géologique) et une approche synthétique classique (contrôles de terrain, colonne stratigraphique). L'ensemble de données est intégré dans un système d'information géographique (SIG). Dans la présente étude, le MNT de la zone d'étude a été réalisé à partir de cartes topographiques au 1 : 100 000 (feuilles de Midelt, Ksabi, Immouzzer Marmoucha et Boulmane). Ce MNT est le résultat de plusieurs algorithmes permettant l'interpolation de l'altimétrie. Il nous a permis d'établir une grille de maille régulière d'élévations. Pour aboutir à la réalisation des cartes thématiques schématiques, il nous a fallu traiter et interpréter nos données numériques spatiales et valider les résultas obtenus par des contrôles de terrain.

Les images satellitaires utilisées sont livrées avec un niveau de corrections radiométrique et géométrique détaillé par le fournisseur. Le choix de la scène ETM+ de Landsat (trace 200, rangée 037, acquise le 21/10/2001) a été fait en fonction du calendrier climatique de la région (sols nus, absence de nuages, minimum de neige). Les coordonnées centres de la scène sont 3672087.502 m de latitude nord et 368 502.600 m de longitude ouest de la zone 30 dans le système de projection Universelle Transverse Mercator (UTM).

Le MNT élaboré de la HMM, représente explicitement les éléments physiques tels que le réseau hydrographique, les crêtes montagneuses, les ruptures de pentes, les accidents structuraux et leurs rejets apparents ou réels. L'intégration de l'ensemble de données spatiales dans un SIG est une opération d'intégration de la géoinformation. Dans le présent travail, nous aborderons les SIG pour préciser leur intérêt pour l'intégration de l'imagerie satellitaire et du modèle numérique d'altitude (MNA). À ce titre, nous utilisons l'information géographique comme une correspondance entre les objets physiques spatiaux du bassin (pentes, morphologie, tectonique, lithologie et réseau hydrographique), géographiquement localisés et l'évolution morphologique de la dépression de la HMM dans le temps et l'espace. En bref, la présente étude propose une approche méthodologique de l'impact de la morphotectonique et du facteur climat sur le processus de la dégradation des sols à partir de (1) données géologiques (carte géologique, carte structurale, colonne stratigraphique) ; (2) données géomorphologiques (réseau hydrographique, modèle numérique d'altitude (MNA), carte de pentes) ; et (3) des images numériques ETM+ de Landsat 7.

2. GÉOLOGIE RÉGIONALE

Les données géologiques du bassin sont extraites de documents et des cartes géologiques de Rabat au 1 : 500 000 et de la carte géologique d'Emberger (1965) au 1 : 25 000, disponibles et publiées, et de l'analyse de l'image fausses couleurs des canaux 7, 3, 1 (figure 2). Les principales unités lithologiques reconnues dans le secteur sont présentées sur la colonne stratigraphique (figure 3). De bas en haut, nous distinguons :

- Le socle paléozoïque formé de terrains schisteux et gréso-pélitiques attribués au Combro-Ordovicien (Hoepffner, 1987). Ceux-ci sont métamorphisés et intrudés de massifs granitiques d'âge 330 ± 2 Ma (Oukemeni *et al*., 1995). L'ensemble est affecté par la fracturation tardi-hercynienne et atlasique.
- Les formations triasiques sont généralement subhorizontales et surmontent en discordance les terrains paléozoïques fracturés. Elles sont constituées à la base par un niveau conglomératique et des arkoses surmontés d'une série détritique argileuse rouge inférieure (jebel Bouselloum). L'ensemble est surmonté d'une série puissante de basaltes (250 m d'épaisseur) gris, altérés. Leur mise en place est rattachée au rifting atlasique (Laville et Piqué, 1991). Une formation argileuse rouge considérée comme série supérieure triasique surmonte les basaltes altérés.
- A Ksar Ahouli (figure 1), le contact des terrains triasiques et ceux du Lias est un contact entre deux lithologies différentes : argiles altérées et calcaires Jurassiques résistants et durs. À Mibladen, le contact se fait par une série détritique hétérogène gréso-argileuse (10 à 20 m).
- 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 et Lenoble, 1965) fortement karstifiés (Dagallier et Macaudière, 1987).
- Le Crétacé est formé essentiellement de grès argileux à ciment calcaire et de formations marno-calcaires dont l'épaisseur peut dépasser les 100 m, intercalées avec des niveaux évaporitiques minces (Mibladen et Aguddim).
- Les terrains cénozoïques sont des dépôts continentaux formés essentiellement de dépôts calcaro-dolomitiques, argileux et conglomératiques et de calcaires lacustres friables.
- Les formations quaternaires sont constituées de terrasses fluviatiles. Elles affleurent sous forme

de séries emboîtées et recouvertes de dépôts essentiellement limoneux et d'étagements conglomératiques. Ce sont des terrasses fluviatiles, modérément disséquées et consolidées, qui affleurent sur les deux rives de l'oued Moulouya.

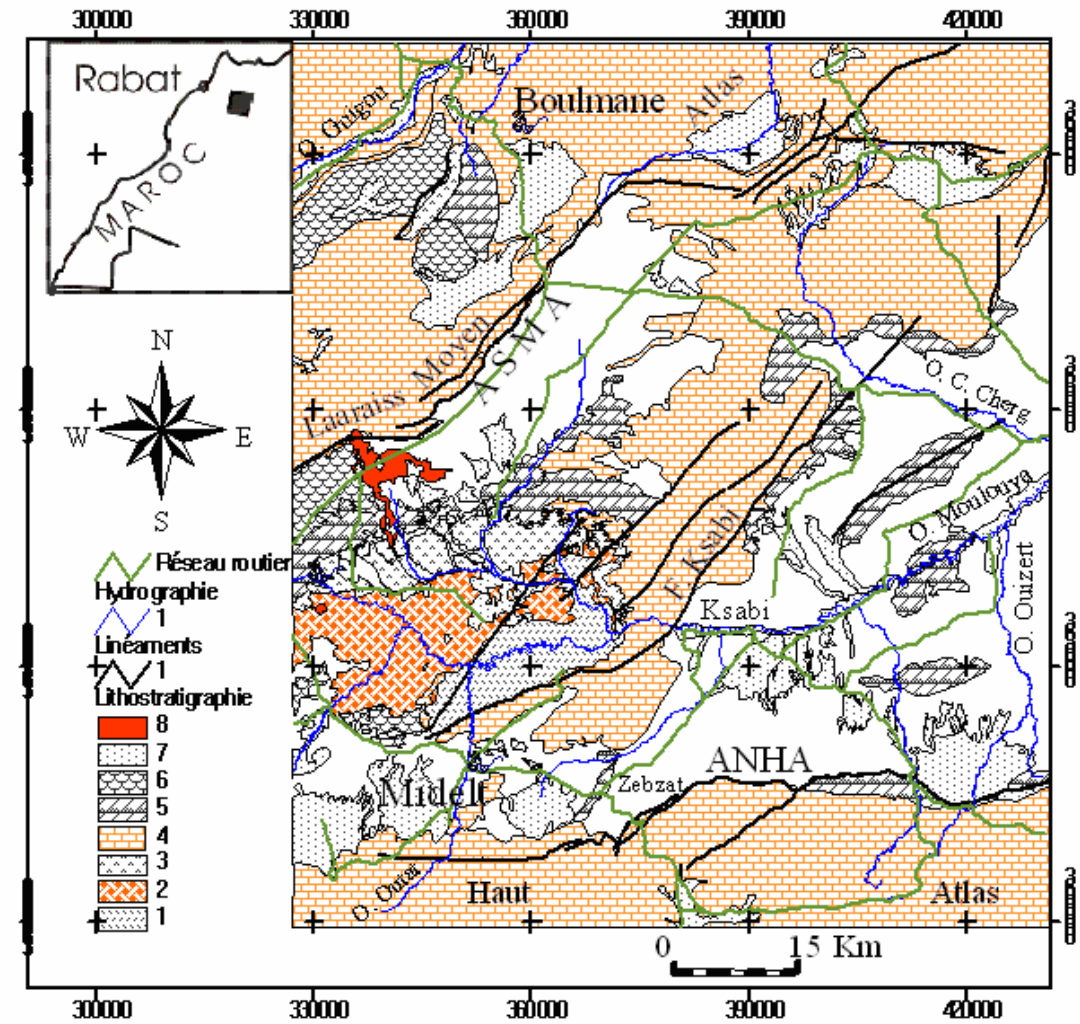


FIGURE 2 : Carte géologique schématique du bassin de la Haute et Moyenne Moulouya et les deux bordures de la chaîne atlasique, extraite par analyse de l'image ETM+ de Landsat 7 et de la carte géologique 1 : 500 000 (feuille de Rabat). Système de projection UTM, Ellipsoïde WGS 84. 1 : schistes, quartzites et amphibolites paléozoïques, 2 : granites massifs hercyniens, 3 : argiles et basaltes du Trias. 4 : calcaires, calcaires dolomitiques et marnes du Jurassique, 5 : calcaires et marnes du Crétacé, 6 : grés, conglomérats, argiles, calcaires lacustres du Paléogène et Néogène, 7 : dépôts alluvionnaires plio-quaternaires, 8 : coulées volcaniques plio-quaternaires, 9 : accidents majeurs. MA : Moyen Atlas, HA : Haut Atlas, ASMA : Accidents Sud Moyen Atlasiques, ANHA : Accidents Nord Haut Atlasiques.

Schematic geological map of the High and Middle Moulouya basin and its two boundaries of the Atlas chain, extracted from the photo-interpretation of the Landsat 7 ETM+ image and the 1 : 500 000 geological map, UTM Projection system, WGS 84 Ellipsoid. 1 : Paleozoic shists, quartzites and amphibolites, 2 : Hercynian massive granites, 3 : Trias clays and basalts. 4 : Jurassic limestones, dolomitic limestones and marls, 5 : Cretaceous calcareous and marls, 6 : Paleogene and Neogene sandstones, conglomerates, clays, lacustrine limestones, 7 : Plio-quaternary alluvial deposits, 8 : Plio-quaternary volcanic, 9 : majors accidents. MA : Middle Atlas, HA : High Atlas, ASMA : Southern Middle Atlas Faults, ANHA : Northern High Atlas Faults.

Des coulées volcaniques surmontent les dépôts quaternaires et villafranchiens ; celles-ci sont attribuées à des activités volcaniques plio-quaternaires et reflètent une réactivation néotectonique (volcan de Laarais et Bou Idarne).
Dans la dépression de la HMM, une rapide reconnaissance lithologique nous a laissé entrevoir la grande variété lithologique et son degré de friabilité et de découvrir la sensibilité à l'érosion de chaque faciès (lithologiquement altérés, friables et/ou fortement fracturés). Dans les parties qui suivent, nous aborderont le problème de l'incision de la roche tout en insistant sur l'interactivité entre les facteurs pente, hydrographie, tectonique et climat.

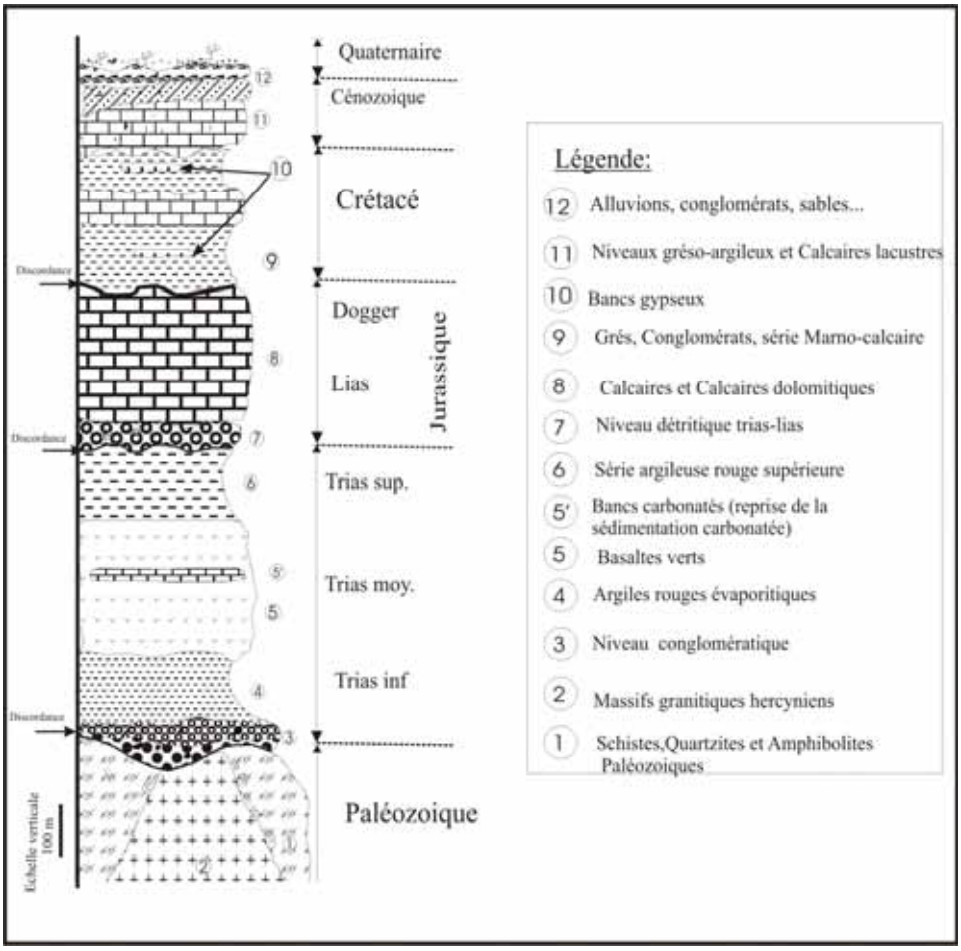


FIGURE 3 : Colonne stratigraphique synthétique du bassin d'étude issue des travaux antérieurs (thèses, cartes géologiques) et résultats de terrain. *Synthetic stratigraphic column of the study basin from previous works (theses, geological map) and field work.*

3. CLIMAT DU BASSIN

Le climat du bassin de la Moulouya est largement influencé par l'orographie atlasique qui se présente sous forme d'un **V** ouvert vers l'est et fermé à l'ouest. Le dispositif qui l'entoure est le facteur principal de son aridité. Son régime thermique est extrêmement contrasté avec des étés très chauds et orageux. Il est doté d'une atmosphère sèche et d'un climat purement continental sec, relativement frais lorsque les vents occidentaux dominent.
Le régime pluviométrique est marqué par des faibles précipitations conjuguées à une extrême variabilité et irrégularité. Le total pluviométrique moyen de 1967 à 2000 est de 199,54 mm/an (Belghyti, 2004), parfois plus si les conditions

climatiques le favorisent. Les précipitations neigeuses tiennent au sol plusieurs jours voire quelques semaines et elles constituent une importante source d'infiltration des eaux souterraines et de ruissellement superficiel.

4. GÉOMORPHOLOGIE RÉGIONALE

4.1. Analyse du réseau hydrographique

L'analyse manuelle du MNT de la HMM nous a permis de constater que la profondeur des talwegs des affluents qui descendent des montagnes diminue rapidement jusqu'à leur disparition au cœur des glacis. À l'exception des grands affluents qui entaillent les glacis aux piedmonts, ceci s'explique par la forte charge solide transportée et libérée brutalement sous l'effet de la diminution de la pente. Les affluents principaux et secondaires de la Moulouya ont un tracé différent (figure 4a). Ceux qui viennent du Haut Atlas ont, le plus souvent, des directions NE-SW et N-S et ont la capacité de franchir les terrains traversés, les autres venant du versant nord montrent une direction principalement NW-SE des cours d'eau pour rejoindre la Moulouya. Parfois on assiste à des formes sub-parallèles.



FIGURE 4A : Carte régionale du réseau de talwegs extrait manuellement à partir des cartes topographiques 1 : 100 000 de Midelt, Ksabi, Immouzer de Mermoucha et Boulmane. Système de projection UTM, Ellipsoïde WGS 84. *Regional map of the thalweg network extracted manually from the 1 : 100 000 topographic maps of Midelt, Ksabi, Immouzer of Mermoucha and Boulmane. UTM projection system, WGS 84 Ellipsoid.*

La zone d'étude contient plusieurs lignes de crêtes. Les principales sont celles qui séparent, au NW et au sud, le bassin et la chaîne atlasique. Les deux dépressions de la HMM sont séparées par une ligne de crête qui coïncide parfaitement avec la faille de Ksabi.

Par ailleurs, une grande quantité d'eau est dirigée vers la dépression de la Moulouya par le biais de l'Ansegmir, Sidi Ayad, Chouf Cherg, Outat (figure 4a) et de leurs affluents. Certains talwegs sont caractérisés par des vallées sèches avec des ruissellements intermittents. Le débit n'augmente qu'après des averses, généralement violentes et certains cours d'eau disparaissent avant de rejoindre le cours principal. Ceci explique la perméabilité de la couverture traversée ajoutée à la faible quantité d'eau courante. On assiste parfois à un arrêt d'écoulement superficiel et à des disparitions périodiques des cours d'eaux dans des terrains karstifiés. La majorité des affluents ont des lits asséchés. Certains de ces oueds parviennent jusqu'à l'oued Moulouya (Oued N'sarid, Sidi Ayad,…), tandis que les autres se perdent au pied de la falaise d'érosion au cœur des glacis.

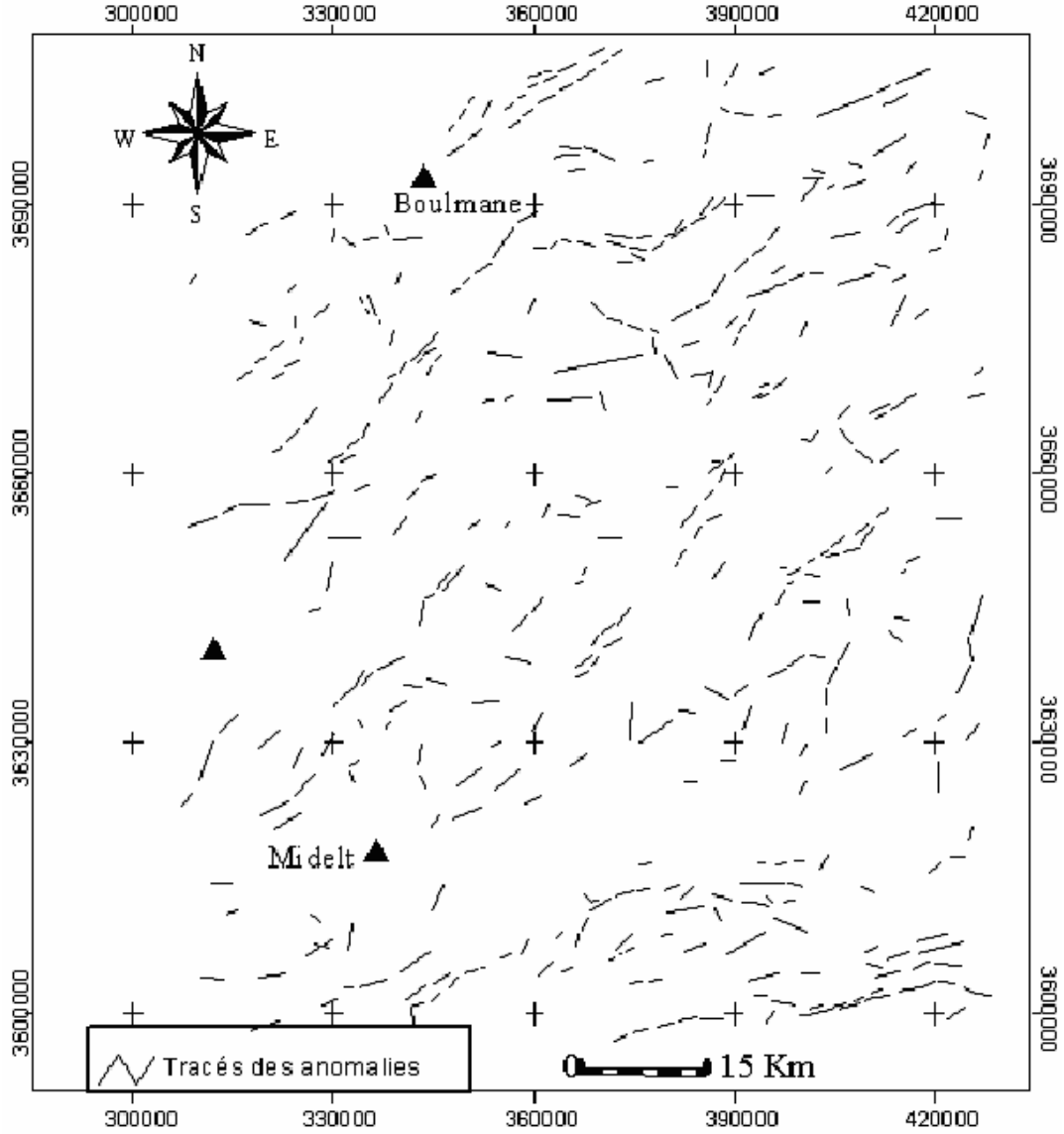


FIGURE 4B : Carte du tracé des anomalies de talwegs dans le bassin interprétées à partir de la carte du tracé de talwegs. *Map of the talweg anomalies of the Moulouya basin interpreted from the thalweg network map.*

4.2. Analyse des anomalies hydrographiques

Les anomalies, soulignant l'existence des données structurales et provoquant des modifications parfois profondes du tracé hydrographique, ont été interprétées selon la méthode de Deffontaines et Chorowicz (1991), à partir de la carte du réseau des talwegs de la zone d'étude. La direction structurale NE-SW est bien marquée par le réseau hydrographique du bassin. L'analyse de la carte des anomalies montre la présence de plusieurs orientations morphologiques, selon le facteur de la pente et de la structure. Les tracés des cours d'eau ne suivent pas une direction uniforme et ceux-ci sont guidés par les morphostructures des terrains traversés. Les directions E-W et NW-SE sont moins visibles. Les grands linéaments tectoniques, Accident Sud Moyen Atlasique (ASMA), Accident Nord Haut Atlasique (ANHA) et celui de Ksabi sont bien marqués par leur tracé et influencent le système hydrographique du bassin (figure 4b).

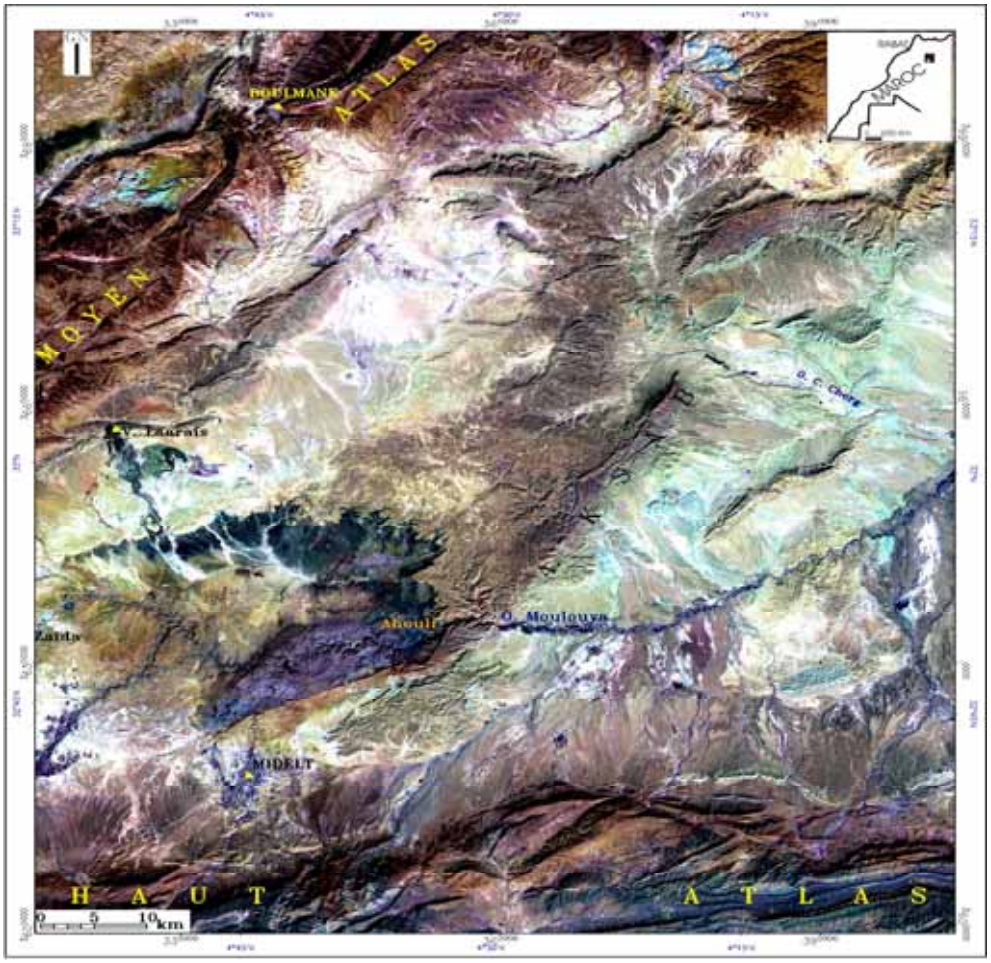


FIGURE 5 : Carte synthétique des linéaments du bassin de la Haute et Moyenne Moulouya et les deux bordures de la chaîne atlasique, extraits de l'analyse de l'image ETM+ de Landsat 7 et du MNT. Système de projection UTM, Ellipsoïde WGS 84. 1 : failles, 2 : accidents majeurs, ASMA : Accidents Sud Moyen Atlasiques, ANHA : Accidents Nord Haut Atlasiques. *Synthetic lineament map of the High and Middle Moulouya basin and the two borders of the Atlas chain, extracted from the photo-interpretation of the Landsat ETM+ image and DTM. UTM projection system, WGS 84 Ellipsoid. 1 : faults, 2 : major accidents, ASMA : Southern Middle Atlas Faults, ANHA : Northern High Atlas Faults.*

4.3. Analyse structurale

L'analyse typologique de la carte linéamentaire (figure 5) a permis de signaler une répartition inégale du réseau de fracturation tectonique. Cela s'explique, certainement, par une répartition inégale des contraintes et aussi par des matériaux récemment déposés couvrant une grande surface de la zone d'étude. Le réseau de linéaments présente trois directions majeures : NE-SW, ENE-WSW et NW-SE. Les failles E-W et NE-SW sont des failles rectilignes et présentent certaines concavités tournées vers les fosses atlasiques (chaîne intracontinentale). Le réseau de fracturation est très dense aux bordures du Haut et Moyen Atlas et au cœur du socle paléozoïque. Les failles affectant la couverture coïncident parfaitement avec celles du socle, ce qui confirme les modèles de réactivation des failles hercyniennes (Laville et Piqué, 1991 ; El Kochri *et al*., 1992). Les directions NE-SW à NNE-SSW sont dominantes. Ce sont des failles déca-kilométriques. La faille de Ksabi de direction NE-SW, qui s'étend vers le NE jusqu'au Moyen Atlas, correspond à une ligne de partage de deux dépressions. Sa réactivation est conforme à la surrection de la chaîne des Atlas.

4.4. Mécanismes de dégradation des sols

Dans presque la totalité du territoire de la Haute Moulouya et dans les zones de Ksabi, les sols sont généralement minces et peu évolués. Lahlou (1975) a distingué trois groupes de sols en fonction de la roche mère : les sols sur granites, les sols sur les formations arkosiques du Trias et les sols sur les formations carbonatées du Jurassique. Les précipitations violentes qui caractérisent le bassin de la Moulouya limitent l'action de la pédogenèse. Elles provoquent des ruissellements violents, apportant les matériaux de démantèlements de la chaîne atlasique.

Dans les plaines de Zaïda et Midelt jusqu'à Zebzat, le couvert végétal est plus dispersé. Il est constitué essentiellement de steppes à armoise, xérophytes épineux et graminées, qui s'adaptent parfaitement au climat aride, mais qui sont fortement exposées au pâturage. Les glacis sont aussi le siège d'une culture de céréales de faible rendement. Sur l'image fausses couleurs des canaux 4, 3, 2, la dépression de la HMM se présente sous forme d'une zone assez claire. Le couvert végétal, illustré en rouge, se trouve réduit le long de la Moulouya et de ses principaux affluents. Sur les deux glacis moyen et haut atlasiques, la végétation steppique tellement dispersée, ne recouvre pas suffisamment les sols sensibles au processus d'érosion hydrique par précipitations violentes. L'analyse comparative du MNT et les contrôles de terrain montrent que le processus d'incision se limite sensiblement aux versants à faible pente (figure 6), ce qui peut conduire au développement d'un type d'érosion en nappe.

5. SYNTHÈSE ET DISCUSSIONS

5.1. Évolution morphohydrographique

La téléanalyse en trois dimensions ou la morphométrie numérique nous ont permis de mieux comprendre la spécificité du bassin. Les structures de relief sont des données essentielles pour l'analyse de l'évolution du réseau hydrographique, puisqu'elles l'orientent. L'analyse de la carte hydrographique et du MNT montre que les deux dépressions de la HMM sont dominées au sud par les hautes crêtes du Haut Atlas : les premiers reliefs se présentent sous forme d'un arc et constituent la ligne de partage des eaux entre le bassin de la Moulouya au nord et le bassin du Ziz au sud (figure 2). Les talwegs des affluents qui traversent ces chaînons sont étroits et profonds, alors qu'au nord et à l'ouest, le bassin est limité par les premiers chaînons du Moyen Atlas de direction NE-SW à E-W. Le contact hydrographique entre les deux dépressions se fait par l'étroite gorge d'Ahouli.

La susceptibilité des versants à l'érosion varie suivant le degré de fragilité du terrain (basaltes du Trias, formations calcaro-marneuses friables et massifs granitiques fortement fracturés), le taux de fracturation des terrains et le degré de pente. On assiste à un régime d'érosion en nappe aggravé par des ruissellements violents temporaires. De plus, ces terrains, déjà fragiles et fracturés, sont nus et les surfaces recouvertes de végétation sont très réduites le long des oueds. Une grande superficie de terrain est directement exposée aux agents de météorisation et à un appauvrissement remarquable du sol sur les deux versants du bassin. Les précipitations orageuses violentes accélèrent l'évacuation des matériaux érodés.

En bref, le processus de dégradation du sol aboutira à la disparition du couvert végétal steppique, déjà réduit et dispersé, et expose davantage les sols aux agents morphogénétiques. La conséquence de ce phénomène tend, sans doute, vers une situation de stérilité du milieu naturel et à la création d'un milieu purement rhexistasique (Bonn et Escadafal, 1996).

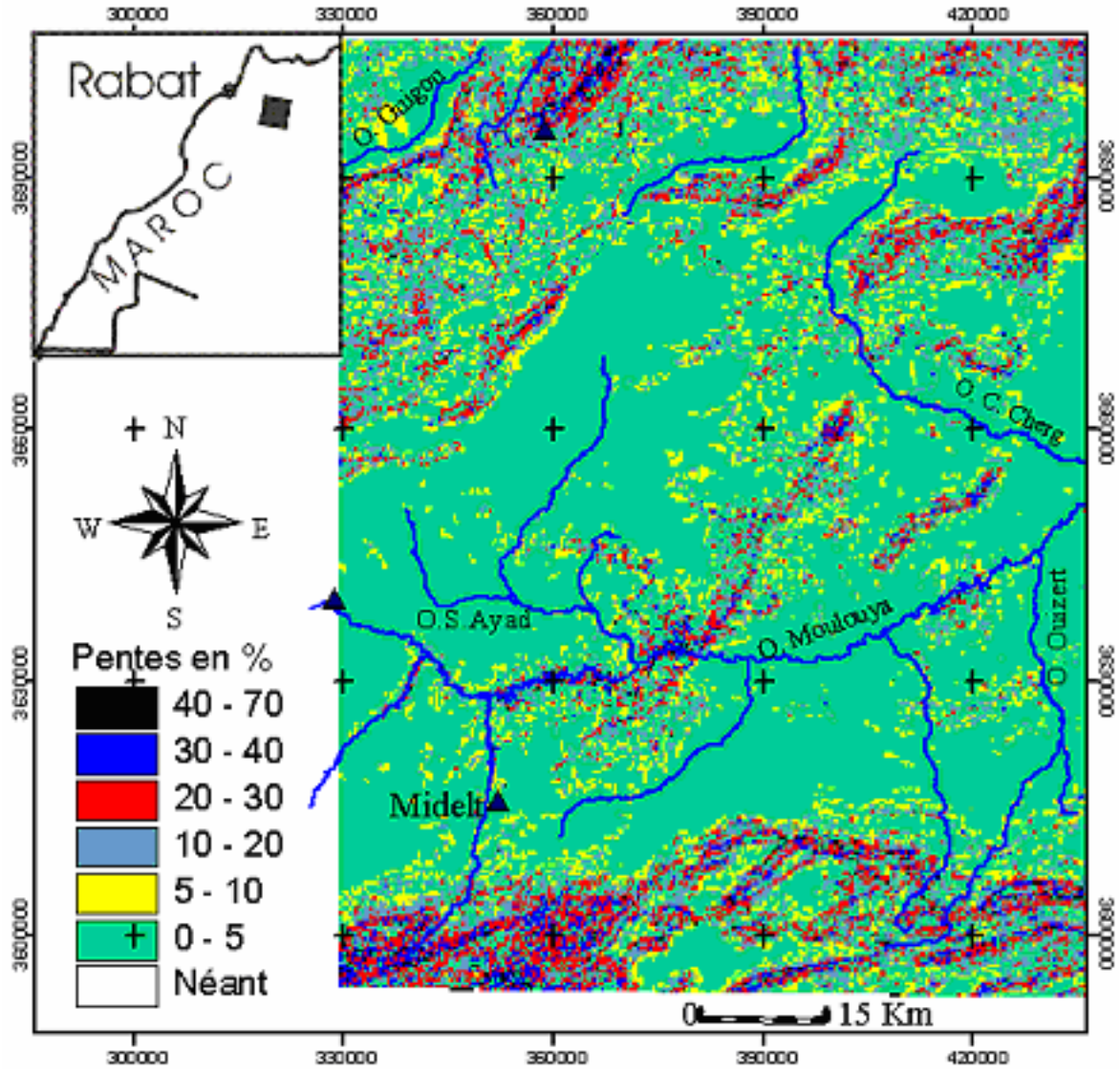


FIGURE 6: Carte des pentes du bassin extraite automatiquement à partir des valeurs numériques d'élévation (VNE). *Slope map of the basin extracted automatically from the digital elevation values (DEV).*

5.2. Évolution morphostructurale

Pour mieux comprendre l'effet de la fracturation sur l'évolution morphogénétique, il faut intégrer le contexte structural du bassin. Le bassin d'étude contient des plateaux érodés et accidentés et leurs contacts avec la chaîne atlasique sont bien marqués par deux grandes lignes de discontinuités : Accidents Sud Moyen Atlasique (ASMA) au nord et Accident Nord Haut Atlasique (ANHA) au sud. À l'intérieur, la faille de Ksabi partage le bassin en deux dépressions : l'une à l'ouest formée essentiellement de plateaux subhorizontaux fortement fracturés (figure 6) et l'autre à l'est sous forme d'une large dépression perturbée par des structures anticlinales des terrains du Crétacé. Les grands accidents ont guidé la morphostructure du bassin. Au sein des deux dépressions, certaines failles présentes dans la couverture secondaire, ont montré une activité tectonique continue pendant toutes les phases de la tectogenèse (failles réactivées). Dans les formations récentes, la néotectonique est localement exprimée par un réseau linéamentaire discret ; leur présence suggère, parfois, la

réactivation locale d'anciennes failles (faille active de Sahb Roa).
Durant le rifting atlasique, nous avons eu un système de horsts (Haut Moulouya) et grabens (fosses atlasiques), qui est complètement différent de l'état actuel (Laville et Piqué, 1991), et où la Haute Moulouya est devenue à son tour une dépression qui reçoit les produits de démantèlement de la chaîne nouvellement formée. En bref, l'inversion morphostructurale est la conséquence d'un changement radical du régime tectonique extensif à un régime compressif (phase alpine). Le processus de démantèlement et la préparation des produits transportables lors des averses violentes se poursuivent par un système d'érosion régressive. Dans les glacis, le processus d'accumulation s'est fait avec des épaisseurs variables et de façon plus ou moins continue.

6. CONCLUSION : IMPACT DE LA FRACTURATION ET DU DRAINAGE SUR LA MORPHOGENÈSE

L'étude proposée ici permet de bien comprendre le dynamisme morphogénétique dans la dépression de la Haute et Moyenne Moulouya. Par ailleurs, les discussions entamées dans cette étude ont permis de contribuer à l'explication de l'évolution morphohydrographique et morphostructurale de la zone en question du point de vue géologique, géomorphologique et climatique. Elles ont permis de mieux comprendre l'effet morphoclimatique et morphostructural sur l'évolution morphogénétique. À cet effet, certaines conclusions ont été tirées :

- l'analyse de l'imagerie spatiale ETM+ de Landsat et du MNT nous a permis d'apporter une approche synthétique morphostructurale du bassin, notamment pour étudier l'évolution morphogénétique ;
- l'analyse typologique du réseau linéamentaire a permis de préciser les directions de fracturation structurale majeure qui ont guidé l'évolution morphostructurale de la dépression de la HMM ;
- les grands accidents (ASMA, ANHA et Ksabi) ont guidé l'évolution morphostructurale de la dépression ;
- la faille active de Sahb Roa (volcan Laaraiss), qui correspond exactement à l'ASMA, est bien marquée sur l'imagerie satellitaire. Elle correspond à des failles réactivées durant la phase orogénique alpine ;
- actuellement la HMM est une dépression qui reçoit les produits de démantèlement de la chaîne atlasique. Sa morphostructure actuelle est la conséquence d'un changement radical du régime tectonique extensif à un régime compressif (phase alpine) ;
- le facteur pente de deuxième ordre conjugué aux facteurs climatiques contrôle largement la potentialité de drainage. Ce processus se poursuit jusqu'à présent par un système d'érosion régressive. Les glacis sont le siège du processus d'accumulation avec des épaisseurs variables ;
- la profondeur des talwegs descendant des Atlas diminue rapidement jusqu'à leur disparition au cœur des glacis de Midelt sous l'effet de la forte charge solide transportée et libérée brutalement sous l'effet du changement rapide de la pente ;
- les surfaces recouvertes de végétation dense sont très réduites le long des oueds, et donc, une grande superficie du sol est mise à nu et soumise à une forte météorisation ;
- les glacis sont recouverts d'une végétation steppique très dispersée et exposée au fort pâturage, ce qui favorise le développement d'un régime d'érosion en nappe ;
- le processus de dégradation, naturelle et anthropisée, des sols est continu et la tendance conduira à une situation de stérilité de l'écosystème naturel et à la création d'un milieu purement rhéxistasique.

D'une manière générale, cette étude thématique nous a permis de révéler la problématique de la morphogenèse qui caractérise la dépression de la HMM et l'importance de la méthode appliquée. Par ailleurs, ce travail a permis d'élaborer une base de données synthétique. Celle-ci intervient à la fois à l'amont, dans la caractérisation de l'état de risque morphogénétique (thème de recherche), et à l'aval, comme support d'aide à la décision pour l'élaboration d'un plan d'aménagement de la zone d'étude (projet de recherche).

Remerciements

Le présent travail a été réalisé au laboratoire de Telegis (Italie) et au laboratoire de géologie appliquée (Université Mohammed V, Rabat, Maroc). Nous tenons à remercier le professeur Rafale Caboie (responsable de coopération) et Stefano Ravagnan (de l'ambassade italienne au Maroc) pour leur aide.

Références

Belghyti, D. (dir.) (2004) Étude de cadrage de la biodiversité du bassin versant de la Moulouya et recensement des activités polluantes. ENDA Maghreb, 2004. p. 44.

Bonn, F. et Escadafal, R (1996) La télédétection appliquée aux sols. Précis de télédétection, applications thématiques, Vol. 2, Chapitre 3, PUQ/AUPELF, p. 93-136.

Dagallier, G. et Macaudière, J. (1987) Contrôles tectoniques des concentrations Pb-Ba en milieu carbonaté de Mibladen (Maroc). Bulletin de la Société Géologique de France, série 8, tome III, fascicule 2, p. 387-394.

Deffontaines, B. and Chorowicz, J. (1991) Principle of drainage basin analysis from multisource data. Application to the structural analysis of the Zair basin. Tectonophysics, 194, 3, p. 237-263.

El Kochri, A., Chorowicz, J. et Alem E. M. (1992) Paléocontraintes et évolution du Haut Atlas centro-oriental, Maroc. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, Rabat, N° 366, p. 267-276.

Emberger, A. (1965) Carte polygénétique des minéralisations plombifères de la Haute Moulouya (gisements d'Aouli, Mibladen et Zaida), Maroc. C. R. Acad. Sci. Paris, 260, p. 3433-3436.

Felenc, R. et Lenoble, J.P. (1965) Les gites de plomb de Mibladen. Notes et Mém. Ser. Géol. Maroc, N° 181, p. 186-196.

Filai, R., Guiraud, M et Burg, J.P. (1999) Évolution pétrostructurale de la boutonnière d'Ahouli (Haute Moulouya, Maroc). Réunion extraordinaire de la Société Géologique de France, Marrakech, 25-28 Avril, 1995, Communication orale.

Hoepffner, C. (1987) La tectonique hercynienne dans l'est du Maroc. Thèse ès Sciences, U.L.P., Strasbourg, 280 p.

Lahlou, M. (1975) Études des sols de la Haute Moulouya. Mémoire de fin d'études, Institut Rech. Agron. et Vétérin., Rabat.

Laville, E. et Piqué, A. (1991) La distension crustale atlantique et atlasique au Maroc au début du Mésozoïque : le rejeu des structures hercyniennes. Bull. Soc. Géol. Fr., 166, 4, p. 365-374.

Ouali, H., Briand, B., El Maatoui, H. et Bouchardon, J.L. (2000) Les Amphibolites de la boutonnière paléozoïque de Midelt (Haute Moulouya, Maroc) : Témoins d'une extension intraplaque au Cambro-Ordovicien. Notes et M. Serv. Géol. Maroc, N°408.

Oukemeni, D., Bourne, J. et Krogh, T. E. (1995) Géochronologie U-Pb sur Zircon du Pluton d'Aouli. Haute Moulouya. Maroc. Bull. Soc. Géol. Fr., 166, N° 1, p. 15-22.