



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 1311–1320



<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Géodynamique

Synergie entre la télédétection multispectrale et les données de terrain pour la conception d'un nouveau modèle géodynamique d'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales (Maroc)

Abderrazak El Harti ^{a,b,*}, Abderrazak Bannari ^b, El Mostafa Bachaoui ^a,
El Mostafa Aarab ^c, Guillaume Girouard ^b, Abderrahmen El Ghmari ^a

^a Laboratoire de télédétection et des systèmes d'information géographique appliqués aux géosciences et à l'environnement, département de géologie, faculté des sciences et techniques de Béni Mellal, BP 523, Maroc

^b Laboratoire de télédétection et de géomatique de l'environnement, Ottawa–Carleton Geoscience Center, Université d'Ottawa (Ontario), Canada K1N6N5

^c Laboratoire de pétrologie, département de géologie, faculté des sciences Semlalia de Marrakech, université Cadi-Ayyad, Marrakech, Maroc

Reçu le 13 novembre 2003 ; accepté après révision le 19 juillet 2004

Disponible sur Internet le 11 septembre 2004

Présenté par Jacques Angelier

Résumé

Le modèle géodynamique d'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales est resté jusqu'à nos jours mal connu, malgré l'abondance des études géologiques qui ont été faites par les méthodes conventionnelles, à cause de la rareté des repères lithostratigraphiques et des structures synsédimentaires. Grâce à la synergie entre les données image du capteur TM du satellite Landsat et les données du terrain, nous avons mis en évidence de nouvelles données structurales, permettant de proposer un nouveau modèle d'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales. Cette ouverture se serait faite selon des décrochements dextres subméridiens, avec l'individualisation de failles normales subéquatoriales. **Pour citer cet article : A. El Harti et al., C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Synergy between multispectral remote sensing and ground data for the design of a new geodynamic model of the Paleozoic basin opening of central Jebilet (Morocco). The geodynamic model of the Palaeozoic basin opening of central Jebilet has been unknown before this study in spite of the abundance in the geological studies carried out in the studied sector using conventional methods. This is due to the scarcity of the key beds and synsedimentary structures. Using the synergy between the image data of the Landsat satellite TM sensor and the ground data, we have highlighted, herein, new structural

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : elharti@fstbm.ac.ma (A. El Harti).

data allowing the design of a new model of the Palaeozoic basin opening of central Jebilet. This opening could have been made according to dextral submeridian transverse faults with the individualization of subequatorial normal faults. *To cite this article: A. El Harti et al., C. R. Geoscience 336 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Jebilet centrales ; bassin paléozoïque ; télédétection ; cartographie géologique ; modèle géodynamique ; Maroc

Keywords : Central Jebilet; Palaeozoic basin; remote sensing; geological mapping; geodynamic model; Morocco

Abridged English version

1. Introduction

Remote sensing has recently become one of the fundamental tools of geological mapping and mining prospecting. It can provide images covering large territories in a short time and with very reasonable costs. Satellite images in the visible and infrared are commonly used for the restoration and cartography of the stratigraphic and structural units, which are useful for the study and the follow-up of the sedimentary basins' geodynamic evolution [7,10,17,22].

In this study, we have used the image of the Thematic Mapper (TM) sensor of Landsat satellite for the restoration and the mapping of the geological units and structures in the central Jebilet massif. This site has been the subject of many studies using conventional methods [1,4,8,9,12,16]. However, the geodynamic model suggested for the opening of the central Jebilet basin has remained non-confirmed, because of the monotony of the Visean series and the scarcity of synsedimentary tectonic structures.

2. Presentation of the study site

Our study was carried out at the level of the Palaeozoic massif of the central Jebilet of Morocco, situated about 8 km north of the City of Marrakech (Fig. 1). This central Jebilet massif represents the central portion of the Palaeozoic buttonhole of Jebilet. It is made of Palaeozoic rocks affected by folds and locally intersected with acid and basic magmatic rocks lined up to the NNE and ENE directions. Furthermore, central Jebilet is affected by a field of faults of major direction NE–SW to east–west. Under the effect of Hercynian deformation, the series of schists of central Jebilet and the associated rocks underwent a very tight folding accompanied with submeridian schistosity. This

synschistose tectonics makes difficult the lithostratigraphic study and largely erases the original structures (sedimentary stratification and polarity, synsedimentary faults, etc.).

3. Methodology

3.1. Image data pre-processing

The image used in this study was acquired by the TM sensor of the Landsat-5 satellite on 28 June 1986. It consists of six spectral bands, in the visible and the mid-infrared, with 30 m over 30 m of spatial resolution and one band in the thermal infrared, with 120 m over 120 m of spatial resolution. A radiometric calibration of the sensor was carried out and the image was corrected from atmospheric effects and geometric distortions.

The radiometric calibration of the sensor is the operation that leads to establish the relationship between the physical amounts measurable at the entry of the satellite sensor, the radiation flow reflected by the earth–atmosphere system, and the Digital Number (DN) at the exit of the instrument towards the reception stations [13]. The main goal of the sensor calibration is to make sure that we have precise geophysical and biophysical statements reproducible in space and time [3].

After calibration of the sensor, we started correcting our image from the effects of atmospheric diffusion and absorption. In fact, taking into account the atmospheric parameters recorded by the weather services in our study site during the acquisition of the image, all the atmospheric parameters necessary for the atmospheric correction were calculated using the radiating transfer model called '5S' (Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) [24].

In order to have a geo-referenced image, we have proceeded to its geometrical correction. This step allows the passage from the image that is not geo-

referenced in a 'line-column' unit to a geo-referenced image. The precision of this geometrical correction is of 0.27 pixel according to the axis of abscissas and of 0.63 pixel according to the axis of ordinates.

3.2. Image data processing

After many spectral bands combinations and colour composites analyses, the enhancement and the displaying of the colour composite of bands 1, 3 and 5, assigned respectively to blue, green and red, allowed us to establish a geological space-map that restored precisely all the geological structures and units of central Jebilet (Fig. 2). The schist is restored in blue, the cornstone limestone in grey, the basic magmatic bodies in purple, and the acid magmatic bodies in ochre. The mixture of the magmatic bodies, acid and basic, is restored in a mixture of the last two colours; the predominance of one colour or another depends on the predominance of the acid terms or the basic terms in the intrusion. The space-map highlights for the first time the existence of a kilometric graben of NNE–SSW direction.

4. Analysis and discussion

The kilometric graben restored during the processing of our image is materialized on the ground by a level mark of salient cornstone limestone, cut up by subequatorial faults at the level of the talwegs. The close observation of this mega-structure shows centimetric to metric micro-grabens and micro-halfgrabens. The micro-faults present a major east–west to WNW–ESE direction and a dip of about 60° towards the southwest of the northeastern side of the mega-structure and towards the northeast of the southwestern side of the mega-structure. These micro-faults are normal, listric and fossilized by the higher beds of the cornstone limestone (Fig. 3). The remittance of the sedimentary stratification on the horizontal position allows the restoration of the geometry of the collecting basin of this Palaeozoic sedimentation. Thus, the basin is of NNE–SSW direction, with east–west to WNW–ESE normal faults and an extension of about 17 km (Fig. 4).

The statistical analysis of the fractures azimuths of the studied site shows that the essential part of fractures is of the major direction ENE–WSW (Fig. 5). In addition to this major direction, the central Jebilet

massif is bordered to the west by the Rabat–Tichka fault (ZCOC), and to the east by the Marrakech fault (ZCOR). The shearing character of these two submeridian faults has already been reported [14,15].

Given together, these results allow us to suggest a new model for the opening of central Jebilet basin according to submeridian transverse faults, with the individualization of subequatorial normal faults (Fig. 6). This model comes within the framework of the opening of the Palaeozoic basins of Morocco and North America under the effect of the anti-clockwise rotation of Gondwana to the south and the approaching of Laurentia-Baltica to the north during the Devonian [19]. The coming together of these old continental masses was due to an ENE–WSW constraint that engendered dexterous submeridian shears and the individualization of subequatorial normal faults.

5. Conclusion

The coupling of the multispectral remote sensing data with the results of the ground works has brought out new structural elements allowing us to suggest a new geodynamic model of the Palaeozoic basin opening of central Jebilet. This opening could have been carried out according to dexterous submeridian shears with the individualisation of subequatorial normal faults, and the installation of acid-basic magmatic bodies.

1. Introduction

La cartographie géologique est à la base de toute prospection du sol et du sous-sol. Bien qu'elles soient précises, les méthodes conventionnelles de cartographie et d'exploration minière nécessitent un travail long, laborieux, coûteux et à haut risque. Pour cela, de nouvelles techniques de cartographie et de prospection des ressources naturelles sont utilisées. C'est ainsi que la télédétection spatiale est devenue récemment l'un des outils fondamentaux de la cartographie géologique et de la prospection minière. Elle peut fournir des images couvrant de grands territoires en peu de temps et avec des coûts très raisonnables. Le caractère numérique des images couvrant une large gamme spectrale (visible et infrarouge) permet de mieux discriminer les différentes unités géologiques. En effet,

les images satellitaires dans le visible et l'infrarouge (0,4–2,5 μm) sont communément utilisées pour la restitution et la cartographie des unités stratigraphiques et structurales utiles pour l'étude et le suivi de l'évolution géodynamique des bassins sédimentaires [7,10,17,22]. De plus, l'avancement informatique et le développement algorithmique dans le domaine de traitement d'image offrent une multitude de possibilités de visualisation et d'interprétation non offertes par les méthodes conventionnelles.

Nous avons utilisé dans cette étude les données image du capteur TM du satellite Landsat pour la restitution et la cartographie des unités et des structures géologiques du massif des Jebilet centrales. Ce site d'étude a fait l'objet de nombreuses études par les méthodes conventionnelles [1,4,8,9,12,16]. Cependant, le modèle géodynamique proposé pour l'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales est resté non confirmé, à cause de la monotonie de la série viséenne et de la rareté des niveaux stratigraphiques repères et des structures tectoniques synsédimentaires. Grâce à la télédétection multispectrale couplée aux observations de terrain, nous présentons de nouvelles données géologiques mettant en cause le modèle géodynamique d'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales, adopté jusqu'à maintenant, et nous proposons un nouveau modèle d'ouverture.

2. Présentation du site d'étude

Notre étude s'est effectuée au niveau du massif paléozoïque des Jebilet centrales du Maroc. Il est situé à environ 8 km au nord de la ville de Marrakech et se localise entre les longitudes 8°17' et 8°00' et les latitudes 31°47' et 31°56' (Fig. 1). Les Jebilet centrales représentent la portion centrale de la boutonnière paléozoïque des Jebilet, qui s'étend en direction est-ouest sur une longueur de 170 km et une largeur allant de 7 à 40 km. L'observation des affleurements et des structures géologiques est idéalisée par une absence quasi totale de la végétation durant toute l'année.

Le massif hercynien des Jebilet est formé de roches paléozoïques, affectées de plis et localement recoupées de roches magmatiques acides et basiques. Les Jebilet sont subdivisées en trois parties [12] :

- les Jebilet occidentales, formées de schistes, de calcaires et de conglomérats d'âge variant du Cambrien au Carbonifère ;
- les Jebilet centrales, formées d'une série schisteuse rapportée au Viséen supérieur, connue sous le nom de schistes de Sarhlef ; elles sont déformées et métamorphosées et comportent un cortège magmatique varié acido-basique ;
- les Jebilet orientales, formées d'une série flyschoïde d'âge Viséen supérieur.

Les Jebilet centrales comportent des corps magmatiques, sous forme de filons et d'intrusions disposés selon des alignements de direction NNE et ENE. Trois activités magmatiques sont distinguées : (i) une activité dite pré-orogénique, qui se compose d'un cortège magmatique à dominance de roches basiques (gabbros et dolérites) associées à des termes acides (trondhjemites) la nature tholéiitique abyssale de ces matériaux et le type de déformation qu'ils enregistrent concordent avec une mise en place contemporaine de l'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales [1,8] ; (ii) une activité qualifiée d'orogénique, marquée par la présence de granites calco-alcalins syntectoniques [18] ; (iii) une activité dite post-orogénique, qui correspond à la mise en place de filons de nature lamprophyrique [1].

Sous l'effet de la déformation hercynienne, l'ensemble des schistes des Jebilet centrales et des roches associées a subi un plissement très serré, accompagné d'une schistosité de flux subméridienne. De plus, le massif des Jebilet centrales est affecté par un champ de failles de direction majeure NE–SW à est–ouest. Cette tectonique synschisteuse rend difficile l'étude lithostratigraphique et a gommé en grande partie les structures originelles (stratification et polarité sédimentaire, failles synsédimentaires, etc.).

3. Méthodologie

3.1. Pré-traitement des données image

L'image satellitaire utilisée dans cette étude est celle du capteur TM (*Thematic Mapper*) du satellite Landsat-5 acquise le 28 juin 1986. Elle comporte six bandes spectrales dans le visible et le moyen infra-

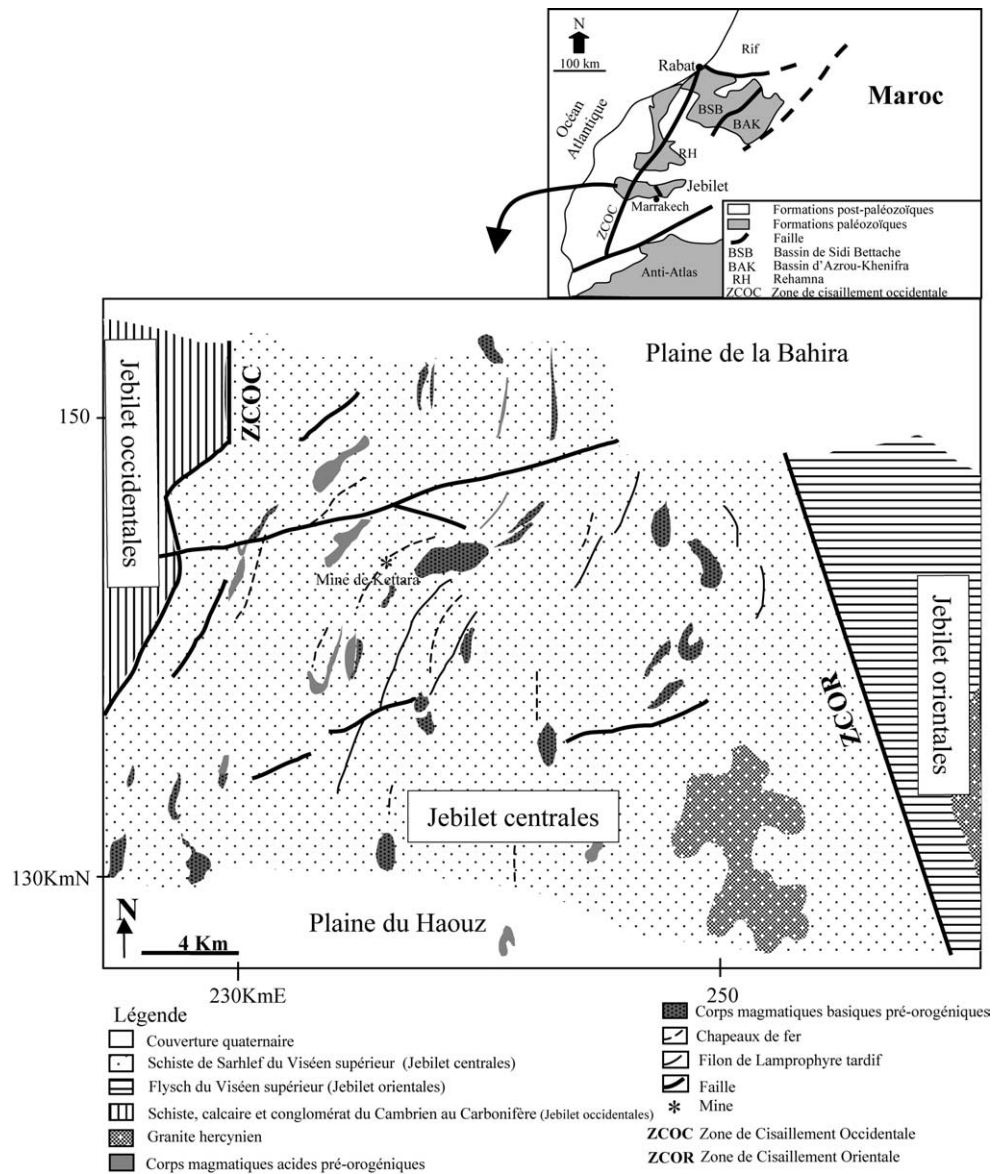


Fig. 1. Carte géologique simplifiée du secteur d'étude (d'après [11]) et croquis de situation.

Fig. 1. Simplified geological map of the study area (after [11]) and sketch map.

rouge, avec une résolution spatiale de 30 m sur 30 m, et une bande spectrale dans l'infrarouge thermique avec une résolution spatiale de 120 m sur 120 m.

Avant de procéder au traitement numérique, les données image ont été corrigées des effets atmosphériques et des distorsions géométriques, et un étalonnage radiométrique du capteur a été effectué.

3.1.1. Étalonage radiométrique du capteur

L'étalonnage radiométrique d'un capteur satellitaire est l'opération qui permet d'établir la relation existante entre la quantité physique mesurable en entrée du capteur satellitaire, le flux du rayonnement réfléchi par le système terre-atmosphère et le compte numérique (CN) en sortie de l'instrument vers les sta-

tions de réception [6,13]. Le but principal de l'étalonnage du capteur est de s'assurer l'obtention de relevés géophysiques et biophysiques précis et reproductibles dans l'espace et dans le temps [3].

3.1.2. Correction atmosphérique

Cette opération permet la correction de l'image des effets de la diffusion et de l'absorption atmosphérique [23]. En se basant sur les paramètres atmosphériques enregistrés par les services météorologiques les plus proches de notre site d'étude lors de l'acquisition de l'image, tous les éléments nécessaires pour la correction des effets atmosphériques ont été calculés à l'aide du modèle de transfert radiatif dit «5S» (*Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) [24].

3.1.3. Correction géométrique

Elle permet le passage de l'image non géoréférencée en unité de «ligne-colonne» à une image géoréférencée, dont les coordonnées sont celles de la carte topographique. Cette opération est fondée sur la recherche de points d'appui communs aux différents documents (image et carte topographique), permettant de calculer un modèle de déformation [2]. Les points d'appui qui ont été sélectionnés sont des croisements de routes, de pistes ou de cours d'eau, figurés sur la carte topographique au 1:50 000 de la région. Le modèle de correction, qui est une transformation polynomiale de second degré, tient compte du système de projection conique conforme de Lambert, adopté par le Maroc. Ce modèle nous a permis d'obtenir une précision planimétrique de 0,27 pixel selon l'axe des X et de 0,63 pixel selon l'axe des Y .

3.2. Traitement des données image

Après plusieurs combinaisons des bandes spectrales et analyses des composés colorés, l'affichage et le rehaussement du composé coloré des bandes 1, 3 et 5, assignées respectivement au bleu, au vert et au rouge, nous ont permis la réalisation d'une spatio-carte géologique. Cette dernière nous a permis de restituer de façon précise toutes les structures et les unités géologiques des Jebilet centrales (Fig. 2). Les schistes sont restitués en bleu, les calcaires gréseux en gris, les corps magmatiques basiques en violet et les corps magmatiques acides en ocre. Les corps magmatiques composites (acido-basiques) sont restitués en

un mélange des deux couleurs; la prédominance de l'une ou l'autre couleur étant fonction de la prédominance des termes acides ou basiques dans l'intrusion. Cette spatio-carte a mis en évidence, pour la première fois, l'existence d'un graben kilométrique de direction NNE–SSW. Son observation est favorisée par le redressement du litage sédimentaire sous l'effet de la tectonique hercynienne. Ce graben est tracé par un niveau repère de calcaire gréseux interstratifié dans les schistes de Sarhlef et découpé par des failles de direction est–ouest à WSW–ENE (Fig. 2).

4. Analyse et discussion

Le modèle géodynamique d'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales est resté jusqu'à nos jours mal connu à cause de la rareté des repères lithostratigraphiques et des structures synsédimentaires. En se basant uniquement sur l'alignement des corps magmatiques pré-orogéniques, un modèle d'ouverture selon des décrochements senestres ENE–WSW avec l'individualisation de failles normales subméridiennes a été proposé auparavant par [1,8,21] pour l'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales.

Le graben kilométrique restitué lors du traitement de notre image se matérialise sur le terrain par un niveau repère de calcaire gréseux saillant, découpé par des failles subéquatoriales au niveau des talwegs. L'épaisseur du calcaire gréseux est de 120 m dans la partie centrale du graben et de 50 m vers les bordures, et fait partie du flanc normal d'un pli subméridien qui structure la région. L'observation de près de cette mégastructure montre des micrograbens et des microhemigrabens, centimétriques à métriques. Les microfaiilles présentent une direction majeure est–ouest à WNW–ESE et un pendage d'environ 60° vers le sud-ouest du côté nord-est de la mégastructure et vers le nord-est du côté sud-ouest de la mégastructure. Ces microfaiilles sont normales, listriques et par endroit fossilisées par les bancs supérieurs du calcaire gréseux (Fig. 3). On a observé à ce niveau des structures d'enroulement et des structures de glissement en *slump*, dont l'axe est de direction N80 à N100, avec un plongement d'environ 45° , témoignant d'une instabilité tectonique lors de la sédimentation. Le litage sédimentaire est de direction N20 à N30, avec un pendage de 60° à 70° vers le nord-ouest. La remise à l'horizon-

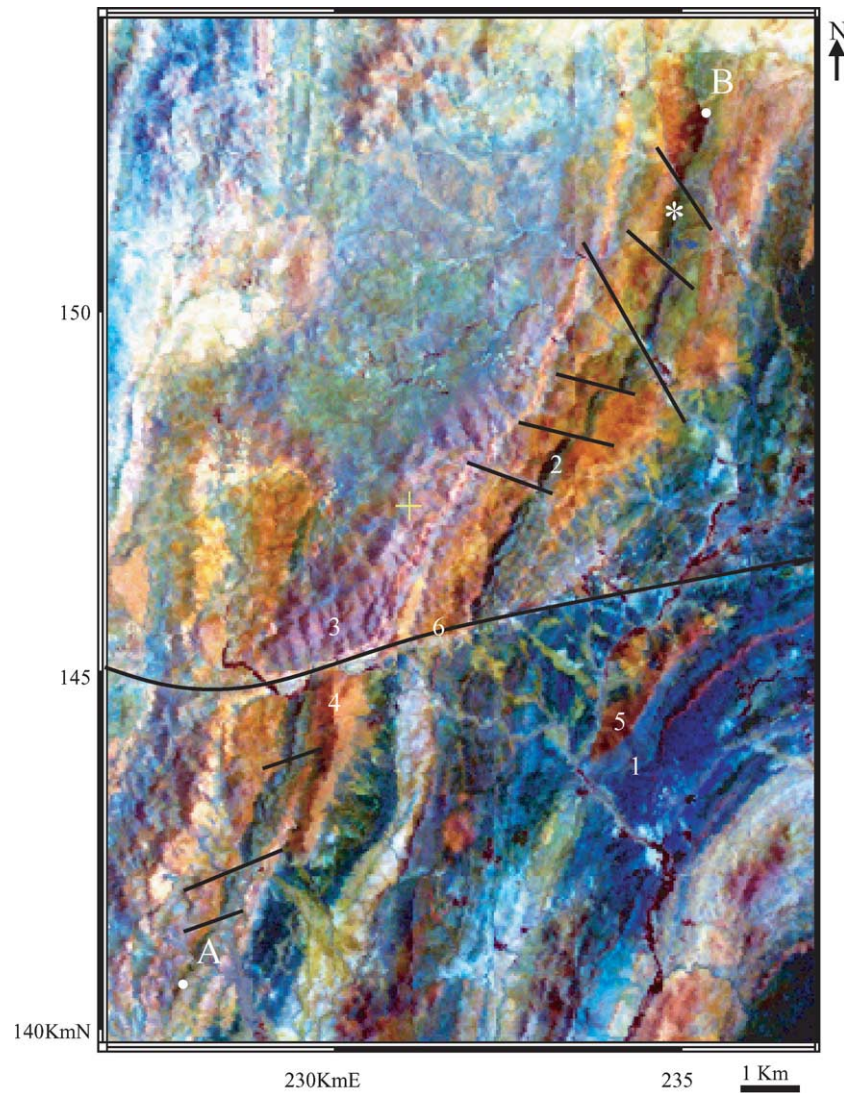


Fig. 2. Spatiocarte montrant la structure en graben des Jebilet centrales. **1** : schiste du Viséen supérieur, **2** : calcaire gréseux du Viséen supérieur, **3** : corps magmatique basique pré-orogénique, **4** : corps magmatique acide pré-orogénique, **5** : corps magmatique composite pré-orogénique, **6** : faille de Mesret, * : emplacement de la photographie de la Fig. 3. A–B : coupe de la Fig. 4.

Fig. 2. Space-map showing the graben structure of the central Jebilet.

tale du litage sédimentaire permet la restitution de la géométrie du bassin collecteur de cette sédimentation paléozoïque. Ce bassin est de direction NNE–SSW, avec des failles normales est–ouest à WNW–ESE et une extension d’environ 17 km (Fig. 4).

Pour l’analyse du champ de failles du secteur d’étude, une carte de fracturation a été extraite de la carte géologique des Jebilet centrales [11] et com-

plétée à partir de la spatiocarte. L’analyse statistique des azimuts des fractures du domaine étudié montre que l’essentiel des fractures sont de direction majeure ENE–WSW (Fig. 5). En plus de cette direction majeure, les Jebilet centrales sont bordées à l’ouest par l’accident de Rabat–Tichka, dénommé ici zone de cisaillement occidentale (ZCOC), et à l’est par l’accident de Marrakech dénommé zone de cisaillement

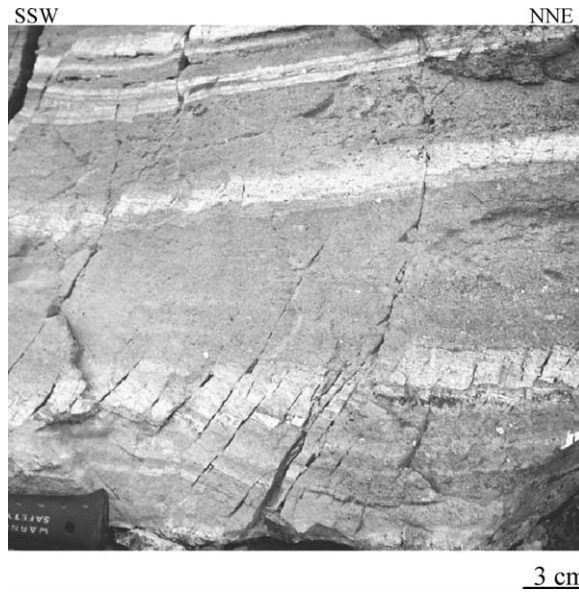


Fig. 3. Hémigraben avec des failles normales synsédimentaires listriques.

Fig. 3. Halfgraben with synsedimentary normal listric faults.

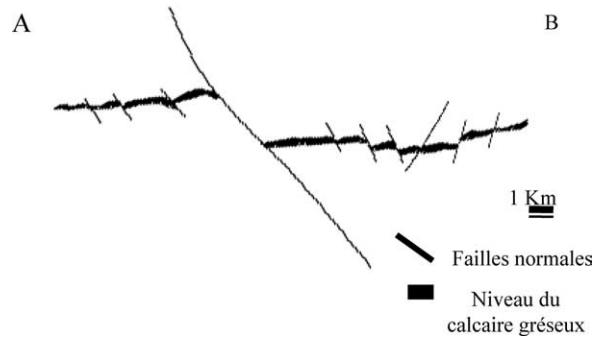


Fig. 4. Structure en graben des Jebilet centrales après remise à l'horizontale du litage sédimentaire.

Fig. 4. Graben structure of central Jebilet after the remittance of the sedimentary stratification on a horizontal position.

orientale (ZCOR) (Figs. 1 et 5). Le caractère cisailant de ces deux grands accidents subméridiens a été démontré [14,15]. La genèse des bassins paléozoïques au Maroc se fait sur le tracé de ces accidents et est contrôlée par des cisaillements dextres subméridiens durant la période Dévonien–Dinantien [5,19].

L'ensemble de ces résultats permet d'avancer un nouveau modèle d'ouverture du bassin paléozoïque

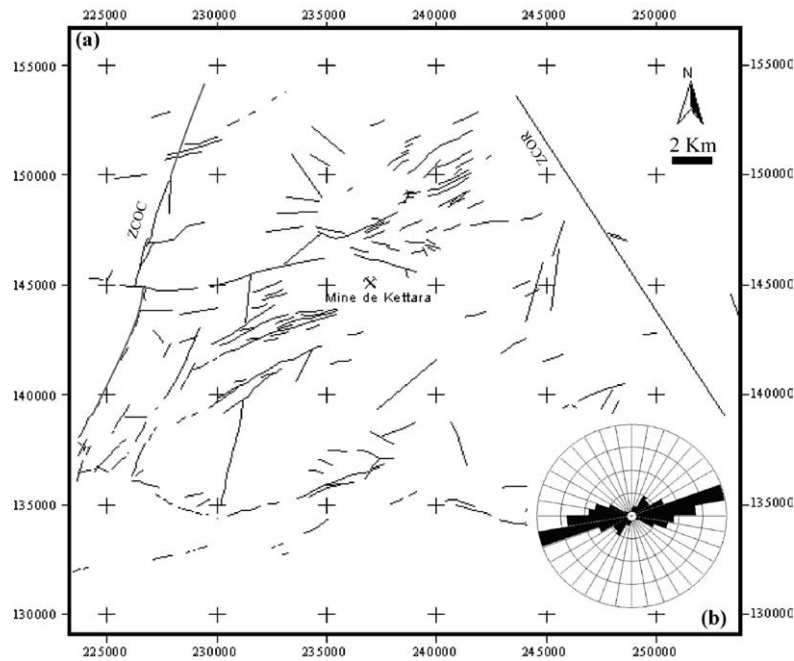


Fig. 5. (a) Carte de fracturation des Jebilet centrales ; (b) rosace directionnelle des failles.

Fig. 5. (a) Fracturing Map of central Jebilet; (b) directional rosette of the faults.

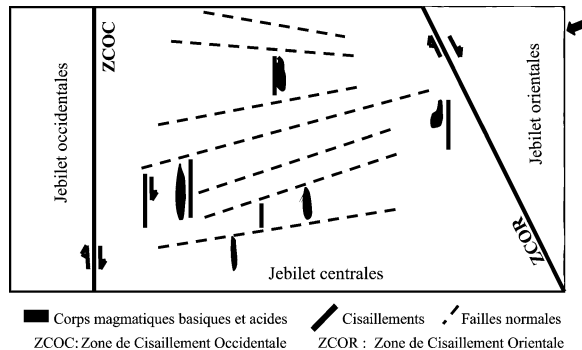


Fig. 6. Modèle d'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales pendant le Dévonien–Dinantien.

Fig. 6. Palaeozoic basin opening model of central Jebilet during the Devonian–Dinantien.

des Jebilet centrales selon des décrochements sub-méridiens, avec l'individualisation de failles normales subéquatoriales. Cette géométrie d'ouverture concorde avec celle proposée pour l'ouverture d'autres bassins paléozoïques au Maroc, tels que les bassins de Sidi-Bettache et d'Azrou–Khenifra [5,20]. Le modèle proposé ici s'inscrit dans le cadre de l'ouverture des bassins paléozoïques du Maroc et de l'Amérique du Nord sous l'effet de la rotation anti-horaire du Gondwana, au sud, et son rapprochement de Laurentia–Baltica, au nord, durant la période du Dévonien–Dinantien [19]. Le rapprochement de ces anciennes masses continentales du fait d'une contrainte ENE–WSW aurait engendré un jeu cisailant dextre des failles subméridiennes (ZCOC et ZCOR), avec l'individualisation de failles normales subéquatoriales et, par conséquent, l'ouverture sur décrochements du bassin paléozoïque des Jebilet centrales (Fig. 6). L'ouverture de ce bassin a été accompagnée d'une activité magmatique acido-basique [1,8]. L'alignement sub-méridien des ces corps magmatiques pré-orogéniques plaide en faveur d'une mise en place le long des accidents subméridiens. Les perturbations locales de direction des corps magmatiques à l'approche des failles de direction est–ouest sont dues aux rejeux tardifs de celles-ci.

5. Conclusion

Le couplage des données de télédétection multispectrale issues du capteur TM du satellite Landsat et

des travaux de terrain a permis d'apporter des précisions à la carte géologique des Jebilet centrales utilisée actuellement. Nous avons détecté de nouvelles structures syn-sédimentaires et un graben kilométrique. L'analyse de la structure de celui-ci, de la microtectonique syn-sédimentaire et du champ de fracturation du secteur d'étude, nous a permis de proposer un nouveau modèle géodynamique d'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales. L'ouverture de ce bassin serait contrôlée par des décrochements dextres sub-méridiens, avec l'individualisation de failles normales subéquatoriales et la mise en place de corps magmatiques acido-basiques.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Otan et l'université d'Ottawa pour leur soutien financier, la faculté des sciences et techniques de Béni Mellal et la faculté des sciences Semlalia de l'université Cadi-Ayyad de Marrakech pour le support logistique apporté lors des missions de terrain.

Références

- [1] E.M. Aarab, Genèse et différenciation d'un magma tholéitique en domaine extensif intracontinental : exemple du magmatisme pré-orogénique des Jebilet (Maroc hercynien), thèse d'État, université Cadi-Ayyad, faculté des sciences Semlalia, Marrakech, 1995, 253 p.
- [2] A. Bannari, D. Morin, G.B. Benie, F. Bonn, A Theoretical Review of Different Mathematical Models of Geometric Corrections Applied to Remote Sensing Images, *Remote Sens. Rev.* 13 (1995) 27–47.
- [3] A. Bannari, M.-P. Teillet, G. Richardson, Nécessité de l'étalonnage radiométrique et standardisation des images numériques de télédétection, *J. Can. Télédélect.* 25 (1) (1999) 45–59.
- [4] J. Beauchamp, Le Carbonifère inférieur des Jebilet et de l'Atlas de Marrakech (Maroc) : migration et comblement d'un bassin marin, *Bull. Soc. géol. France* (7) XXVI (6) (1984) 1025–1032.
- [5] M. Bouabdelli, A. Piqué, Du bassin sur décrochement au bassin d'avant-pays : dynamique du bassin d'Azrou–Khenifra (Maroc hercynien central), *J. Afr. Earth Sci.* 23 (2) (1996) 213–224.
- [6] B.P. Clark, Eosat, Landsat Technical Notes, No. 1, Computer Sciences Corp. Silver Spring, August 1986.
- [7] A.P. Crosta, J. McMoore, Geological mapping using Landsat Thematic Mapper imagery in Almeria Province, southeast Spain, *Int. J. Remote Sens.* 10 (1989) 505–514.
- [8] A. El Harti, Mode de gisement, étude structurale et contexte de mise en place des corps magmatiques pré-orogéniques des Jebilet centrales. Sur l'exemple des intrusions de Koudiat Kettara

- (Maroc hercynien), thèse de 3^e cycle, université Cadi-Ayyad, faculté des sciences Semlalia, Marrakech, Maroc, 1995, 142 p.
- [9] A. Essaifi, Relation entre magmatisme, déformation et altération hydrothermale. L'exemple des Jebilet centrales (Hercynien, Maroc), thèse d'État, université Cadi-Ayyad, faculté des sciences Semlalia, Marrakech, Maroc, 1995, 331 p.
- [10] S.J. Fraser, Discrimination and identification of ferric oxides using satellite Thematic Mapper data: a Newman case study, *Int. J. Remote Sens.* 12 (1991) 635–641.
- [11] P. Huvelin, Carte géologique et gîtologique des Jebilet centrales au 1/100 000, *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc*, 1972.
- [12] P. Huvelin, Étude géologique et gîtologique du massif hercynien des Jebilet (Maroc occidental). *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc*, n° 232bis, 1977, 307 p.
- [13] C.J. Kastner, P.N. Slater, In-Flight Radiometric Calibration of Advanced Remote Sensing Systems, in: *Proc. SPIE*, vol. 356, 1982, pp. 158–165.
- [14] J.-L. Lagarde, P. Choukroune, Cisaillement ductile et granitoïdes syntectoniques : l'exemple du massif hercynien des Jebilet (Maroc), *Bull. Soc. géol. France* (7) XXIV (2) (1982) 299–307.
- [15] J.-L. Lagarde, A. Michard, Stretching normal to the regional thrust displacement in a thrust-wrench shear zone, Rehamna Massif, Morocco, *J. Struct. Geol.* 8 (3/4) (1986) 483–492.
- [16] J.-L. Lagarde, Les plutons granitiques hercyniens marqueurs de la déformation crustale : l'exemple de la Meseta marocaine, thèse d'État, université de Rennes, 1987, 381 p.
- [17] H.R. Lang, M.J. Bartholomew, C.I. Grove, E.D. Paylor, Spectral reflectance characterization (0.4 to 2.5 and 8.0 to 12.0 mm) of Phanerozoic Strata, Wind River Basin and Southern Bighorn Basin areas, Wyoming, *J. Sediment. Petrol.* 60 (1990) 504–524.
- [18] C. Le Corre, A. Saquaque, Comportement d'un système pluton-encaissant dans un champ de déformation régional : le granite du Bramram (Jebilet, Maroc hercynien), *Bull. Soc. géol. France* (8) III (4) (1987) 665–673.
- [19] J.-P. Lefort, Basement correlation across the North Atlantic, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989, 148 p.
- [20] A. Piqué, Un élément majeur de la Meseta marocaine nord-occidentale : le bassin dévono-dinantien de Sidi-Bettache, *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc* 43 (321) (1987) 41–64.
- [21] T. Remal, L'évolution tectono-magmatique intracontinentale du cycle hercynien. Étude du complexe magmatique du district d'El Hammam et de zones comparables pour le magmatisme pré-orogénique dans le massif central et les Rehamnas (Méséta occidentale marocaine), thèse d'État, université Hassan-II, Aïn Chock Casablanca, 2000, 267 p.
- [22] A. Riaza, R. Mediavilla, J.I. Santisteban, Mapping geological stages of climate-dependent iron and clay weathering alteration on lithologically uniform sedimentary units using Thematic Mapper imagery (Tertiary Duero Basin, Spain), *Int. J. Remote Sens.* 21 (5) (2000) 937–950.
- [23] D. Tanré, Interaction rayonnement-aérosols, applications à la télédétection et au calcul du bilan radiatif, thèse d'État, université des sciences et des techniques de Lille, 1982, 258 p.
- [24] D. Tanré, C. Deroo, P. Duhaut, M. Herman, J.-J. Morcrette, J. Perbos, P.Y. Deschamps, Description of a computer code to Simulate a Satellite Signal in the Solar Spectrum: The 5S Code, *Int. J. Remote Sens.* 14 (4) (1990) 659–668.