



HAL
open science

Apport de l'imagerie radar SAR-ERS à l'analyse de la géométrie de la déformation récente dans les monts des Béni Snassen (Maroc nord-oriental)

Hassan Tabyaoui, Fatima El Hammichi, Abdel-Ali Chaouni, Raouf Jabrane,
Lahsen Ait Brahim, Pierre Chotin

► To cite this version:

Hassan Tabyaoui, Fatima El Hammichi, Abdel-Ali Chaouni, Raouf Jabrane, Lahsen Ait Brahim, et al.. Apport de l'imagerie radar SAR-ERS à l'analyse de la géométrie de la déformation récente dans les monts des Béni Snassen (Maroc nord-oriental). Pangea infos, 2009, 45/46, pp.18-23. insu-00956874

HAL Id: insu-00956874

<https://insu.hal.science/insu-00956874>

Submitted on 7 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Apport de l'imagerie radar SAR-ERS à l'analyse de la géométrie de la déformation récente dans les monts des Béni Snassen (Maroc nord-oriental)

Contribution of the imagery radar SAR-ERS to the analysis of the geometry of the recent deformation in the Beni Snassen mounts (North-eastern Morocco)

Hassan TABYAOUÏ¹, Fatima EL HAMMICHÏ¹, Abdel-Ali CHAOUNÏ¹, Raouf JABRANE², Lahsen AIT BRAHIM³ & Pierre CHOTIN⁴

¹ Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Faculté polydisciplinaire de Taza, Laboratoire Energie, Ressources Naturelles et Modélisation, Equipe Risques Naturels, Aménagement des Territoires et Environnement, BP 1223, Taza-Gare, Maroc. e-mail labrisques@yahoo.fr

² Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Faculté des Sciences et Techniques, BP 2202, Fès-saïss, Maroc.

³ Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Dépt. Géologie, BP 1014, Rabat-Agdal, Maroc.

⁴ Université Pierre & Marie Curie, Tour 26, 4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France.

Reçu 17/05/2005; révisé 14/10/2005, 06/01/2009, 19/05/2009.

Résumé

Les techniques de traitement permettent, dès à présent, une exploitation opérationnelle des images satellitaires radar SAR-ERS dans un contexte cartographique. L'utilisation de cette imagerie au Maroc nord-oriental a permis d'extraire la géométrie de la déformation. Trois réseaux de failles de direction NW-SE, NE-SW et ENE-WSW apparaissent au travers des principales unités morphologiques. La disposition et le caractère récent des jeux de ces failles sont confirmés sur le terrain. Ceci a permis d'établir un modèle d'évolution structurale des monts des Béni Snassen dans le cadre de l'évolution des chaînes maghrébines en contexte de collision entre les plaques lithosphériques Afrique - Europe.

Mots clés : Télé-détection, radar SAR-ERS, Maroc nord-oriental, Béni Snassen, failles, déformation récente, rapprochement Afrique-Europe.

Abstract

Image processing techniques already allow the operational use of radar satellite SAR-ERS imagery for cartography. Its use in North-eastern Morocco made it possible to extract the geometry of the deformation. Three directions of major faults oriented NW-SE, NE-SW and ENE-WSW appear to the breadth of the main morphological units. The arrangement and the recent character of the sets of these faults are confirmed on the field. This was used to establish a model of structural evolution of the Beni Snassen mounts within the framework of the evolution of the maghrebin chains in context of collision between the African - European lithospheric plates.

Key words: Remote sensing, SAR-ERS images, North-eastern Morocco, Beni Snassen mounts, faults, recent deformation, Africa-Europe convergence.

1. INTRODUCTION

La télé-détection spatiale a débuté dans le domaine des hyperfréquences, au cours des années 1970, avec le satellite SEASAT. Ces images ont permis d'apprécier les avantages d'un tel système, ce qui a favorisé l'essor de la télé-détection active. Mais ce sont les années 90 qui ont vu le développement de la collecte systématique d'images radar à ouverture synthétique (SAR : Synthetic Aperture Radar) avec le lancement de nombreux satellites équipés d'une antenne SAR (dont ERS-1 en juillet 1991 et ERS-2 en avril 1995). Ces images complètent de manière efficace les informations apportées par les images optiques (SPOT, Landsat, ...) sur les objets terrestres. Elles permettent une reconnaissance des formes structurales d'une région par les géomorphologues et les géologues structuralistes.

L'utilisation de l'imagerie radar SAR-ERS au Maroc dans la péninsule de Tanger (Chotin *et al.*, 1995; Chaouni, 1996, 1999), dans la région d'Al Hoceïma

(Chotin *et al.*, 1997) et dans les monts de Taourirt (Tabyaoui *et al.*, 1996) a apporté une vision synoptique nouvelle des réseaux de failles qui ont affecté le Rif et son avant-pays à partir du Néogène. Elle a permis de suivre sur de très longues distances les mégastructures linéamentaires, surtout dans les régions boisées et d'accès difficile. Son exploitation doit cependant être précédée d'une parfaite connaissance des paramètres physiques de la surface des terrains. Les corrections géométriques et les filtrages utilisés sont nécessaires pour une bonne interprétation géologique et géomorphologique (Blom, 1988; Hanks et Guritz, 1997; Deroïn et Scanvic, 1995; Drury, 1993).

Les monts des Béni Snassen ont surtout fait l'objet d'études sédimentologiques et lithostratigraphiques des séries paléozoïques, mésozoïques et néogènes (Benabdellah, 1952; Cattaneo, 1987; Naciri, 1994; Mehdi, 1995). Les études tectoniques et microtectoniques (Cattaneo, 1980; Chotin *et al.*, 2000; Tabyaoui, 1993, 2000) ont permis la caractérisation des mécanismes des

phases tectoniques mésozoïques et tertiaires. Cependant la carte du Maroc oriental (feuille d'Oujda) au 1/500 000 est très générale et la géométrie d'ensemble pose encore de nombreux problèmes non résolus. L'image radar du satellite ERS offre ainsi un cadre adéquat synthétique pouvant permettre, grâce à son pouvoir synoptique, de cartographier les principales structures tectoniques et de comprendre la géométrie d'ensemble.

L'objet de cet article est de montrer dans quelle mesure l'utilisation du radar imageur à ouverture synthétique SAR du satellite ERS permet :

- 1/ d'associer la cartographie des traces lithologiques à l'analyse du relief pour faire ressortir les mégastuctures tectoniques ;
- 2/ de préciser la géométrie de la déformation dans les monts des Béni Snassen, et
- 3/ de proposer une interprétation de la structuration récente de cette région dans le cadre du rapprochement Afrique-Europe.

2. CADRE GEOLOGIQUE

Le massif des Béni Snassen appartient au Maroc nord-oriental. Il s'étend suivant une direction E-W sur une distance d'environ 100 km (fig. 1). Ce massif est limité au nord par la plaine de Triffa et la chaîne des Kbdana ; à l'ouest par la chaîne des Béni Bou Yahi ; au sud par le bassin néogène de Guercif-Angad et à l'est par la chaîne des Traras, en Algérie.

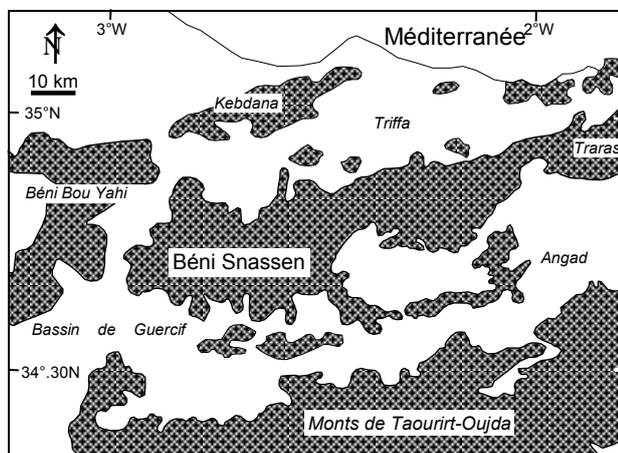


Fig. 1 – Situation des monts des Béni Snassen.

Le socle paléozoïque affleure dans la partie centrale des Béni Snassen orientaux. Il est constitué de terrains viséens, légèrement métamorphisés (Benabdellah, 1952), traversés par un granite extrusif (granite de Jbel Bou Zabel). La couverture mésozoïque repose en discordance sur le socle et comprend une série volcano-sédimentaire rouge du Trias, une série essentiellement carbonatée du Lotharingien-Bajocien, une série argilo-sableuse et gréseuse du Bathonien-Oxfordien, une série carbonatée du Kimméridgien à Tithonique et une série gréseuse du Crétacé inférieur (Cattaneo, 1987; Naciri, 1994; Mehdi,

1995). Les formations tertiaires sont discordantes sur les différents termes paléozoïques et mésozoïques. Elles sont constituées de marnes et de grès du Miocène moyen et d'un olistostrome et de marnes datés du Miocène supérieur (Monition, 1958; Wernli, 1987). Le Quaternaire couvre localement les terrains plus anciens. Il est constitué de sédiments continentaux (Barathon, 1987).

L'évolution de la tectonique des Béni Snassen s'est déroulée en plusieurs phases majeures, essentiellement distensives au cours du Mésozoïque et compressives de l'Eocène à l'Actuel (Cattaneo, 1980; Chotin *et al.*, 2000; Tabyaoui, 1993, 2000).

3. ANALYSE DE L'IMAGE SATELLITE RADAR

3.1. Acquisition et traitements des données

L'imagerie satellitaire radar utilisée dans le présent travail correspond à la bande C d'acquisition (fréquence : 5.3 Ghz). La zone d'étude se situe dans la moitié septentrionale de l'image SAR du 07/06/93 (orbite : 9901, frame : 2925, polarité VV). Celle-ci a été obtenue en orbite ascendante. La visée se fait vers l'est avec un angle d'incidence de 23°. La résolution au sol est en moyenne de 25 m.

Plusieurs techniques de traitements d'images ont été appliquées afin de rendre opérationnelles la lecture et l'exploitation de l'imagerie radar (élimination ou atténuation du Speckle, test de différents filtres, essai de rectification géométrique). Elles ont été traitées au Laboratoire de Géologie Structurale Géomorphologie et Télédétection, à l'université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

L'analyse structurale est faite par analyse visuelle à partir de documents papier restitués en noir et blanc à l'échelle de 1/250 000, de zooms donnant des agrandissements allant jusqu'à 1/50 000 et par visualisation et traitements sur station HP. Cette lecture répétée dans le temps, sur documents multiscalaires, est faite afin de limiter les phénomènes d'accommodation aux images et par la suite de ne représenter que les structures les plus marquées. La carte télé-analytique obtenue a été calée par confrontation aux documents topographiques, comparée à celle obtenue à partir de photographies aériennes et suivie d'un contrôle de terrain. Les données ont été géocodées et insérées dans des bases de données géoréférencées. Cette étude a permis d'établir la carte de la fracturation et une analyse des structures tectoniques et de la géométrie de la déformation.

3.2. Analyse visuelle radar

Sur l'image SAR, les monts des Béni Snassen se distinguent assez aisément des bassins avoisinants (fig. 2). Les monts des Béni Snassen correspondent à deux ensembles morphostructuraux bien visibles : les Béni Snassen orientaux, à l'est, et les Béni Mahiou, à l'ouest, où les reliefs sont moins importants.

Les Béni Snassen orientaux correspondent à une succession d'anticlinaux de direction E-W, aux reliefs relativement élevés (1522 m à Jbel Fourhal). L'anticlinal principal (AP. fig. 2 et 3) à grand rayon de courbure montre sur l'image radar un aspect en croissant ouvert vers le nord. Sa charnière montre un relief en creux à vallées étroites et sinueuses (où affleurent le socle paléozoïque et le Trias) et des crêtes d'interfluves où dominant des dolomies liasiques.

Son flanc nord, en position de surbrillance, est marqué par des crêtes à front sud, entaillées par des vallées en entonnoirs. Sa couverture liasique est reconnue par son modelé ruiniforme. Elle montre un pendage apparent faible de 15° à 30°N. Son flanc sud, court et redressé, montre des couches à pendage apparent de plus de 60°S. A l'ouest, les rivières qui le traversent soulignent des escarpements de failles de direction NW-SE (faille de Tafouralt). A l'est, cet anticlinal est limité par des failles de direction NE-SW.

Au sud de cet anticlinal, le faciès-image change et montre des reliefs moutonnés et moins élevés. Du NE au SW, on peut distinguer :

- l'anticlinal de Jbel Tizmi (AT. fig. 2 et 3), d'axe N050°E à N060°E, visible en partie sur l'image radar. Il se redresse vers l'ouest et ne s'exprime plus.
- l'anticlinal d'Arhil Oumanzi (AO. fig. 2 et 3), à cœur érodé et d'axe de direction N075°E, qui s'ouvre à

l'ouest sur le bassin de Bessara. A l'est, les tracés des bancs semblent disparaître en biseau le long de failles orientées NE-SW. Sur l'image radar (fig. 2), les strates des formations liasiques du flanc sud de l'anticlinal d'Arhil Oumanzi paraissent fortement redressées, voire même renversées. Sur le flanc nord, les couches liasiques présentent un pendage faible. Ces différences de pendage sont dues à l'effet de rabattement des reliefs faisant face au radar, ce qui donne l'impression d'un anticlinal déversé. Le contrôle sur le terrain montre qu'il s'agit d'un anticlinal faiblement déjeté vers le sud, avec des couches du flanc nord à pendage de 15° à 20°N et ceux du flanc sud de 30° à 45°.

A l'ouest des Béni Snassen orientaux, les Béni Mahiou présentent des reliefs moins élevés. Le rabattement y est moindre, et les structures et les oueds s'y distinguent mieux (fig. 2). Les reliefs élevés, constitués de crêtes assez étroites, s'observent au milieu de vallées assez larges. De nombreuses ondulations anticlinales et synclinales s'y distinguent (fig. 2 et 3). D'axe E-W à l'est de la chaîne, elles passent au NW-SE au centre et à l'ouest. Ces structures plissées présentent à leurs extrémités des torsions ayant valeur de crochons aux contacts des failles orientées NW-SE à NNW-SSE, compatibles avec un jeu décrochant dextre.

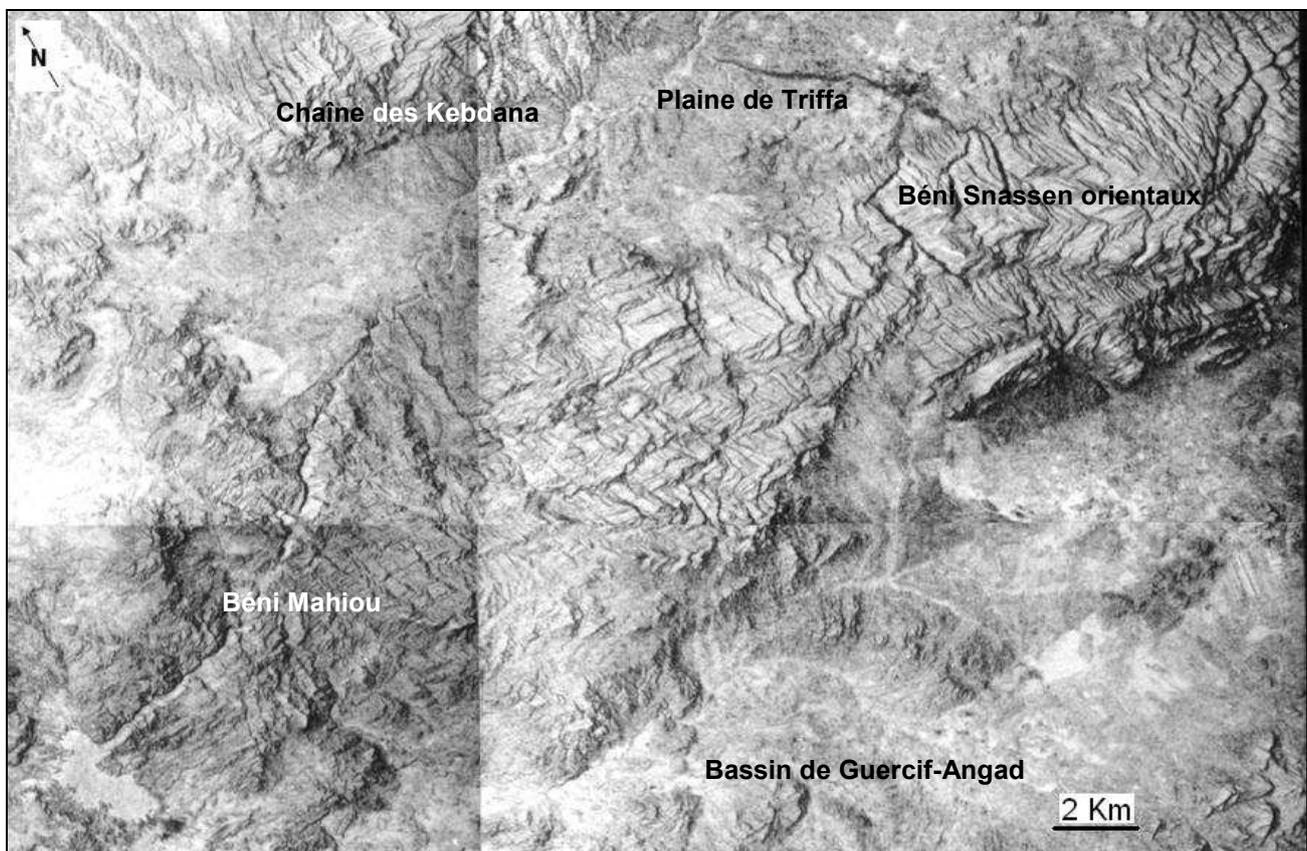


Fig. 2 – Mosaïque radar SAR ERS (orbite : 9901, frame : 2925, date : 07/06/93) centrée sur les Béni Snassen.

Au sud-ouest des Béni Mahiou, le phénomène de rabatement entraîne une torsion des structures dans la région de Mechra Klila. L'observation sur l'image radar de chevrons et de V dans les vallées indique que le pendage des couches est vers le NW (fig. 2 et 3). Les ravins qui traversent les bancs sont orientés parallèlement à la visée radar. Le contrôle sur le terrain montre que le pendage des couches est en réalité vers le SE de 20° à 35°. Le renversement du pendage est dû au fait que les assises carbonatées du Jurassique forment un ensemble de compartiments de style isoclinal avec de petits escarpements de dimension décamétrique, très accentués à regard vers le NW.

La bordure nord des Béni Mahiou montre un aspect très sinueux. Les reliefs y sont très marqués et sont exposés à une érosion vive. Le bas de la pente est jalonné par d'importants cônes d'éboulis.

Les monts des Béni Snassen sont limités au nord par la plaine de Triffa (ouverte sur la Méditerranée) et au sud par la plaine de Bessara. Sur l'image radar, ces bassins montrent une surface fortement disséquée par le réseau hydrographique (fig. 2). La pénétration des ondes électromagnétiques permet de mettre en évidence les cours des

oueds qui drainent ces bassins (Oued Moulouya, Oued Tagma, Oued Chraa, Oued Ksob, ...). L'alignement des confluences, l'aspect rectiligne du tracé de certains cours d'eau et l'allure des coudes hydrographiques témoignent de la réactivation récente des structures tectoniques de direction NE-SW et NW-SE.

33. Analyse de la carte de fracturation

Dans les Béni Snassen orientaux, l'image radar met en évidence trois réseaux de failles : NE-SW, NW-SE et ENE-WSW à E-W (fig. 3). Certaines grandes structures rectilignes s'observent sur l'image radar par l'alignement des bordures successives de rabatement dues essentiellement à la dénivelée assez importante des reliefs.

– Les failles de direction NE-SW correspondent généralement à des décrochements senestres. Elles s'observent essentiellement à l'est du massif. Certaines affectent le socle paléozoïque et la couverture liasique. L'image radar montre que ces failles recoupent en décrochement senestre les failles de direction E-W et les plis subéquatoriaux. La plus importante de ces failles est celle de Jbel Farouane (fig. 2 et 3). Elle déli-

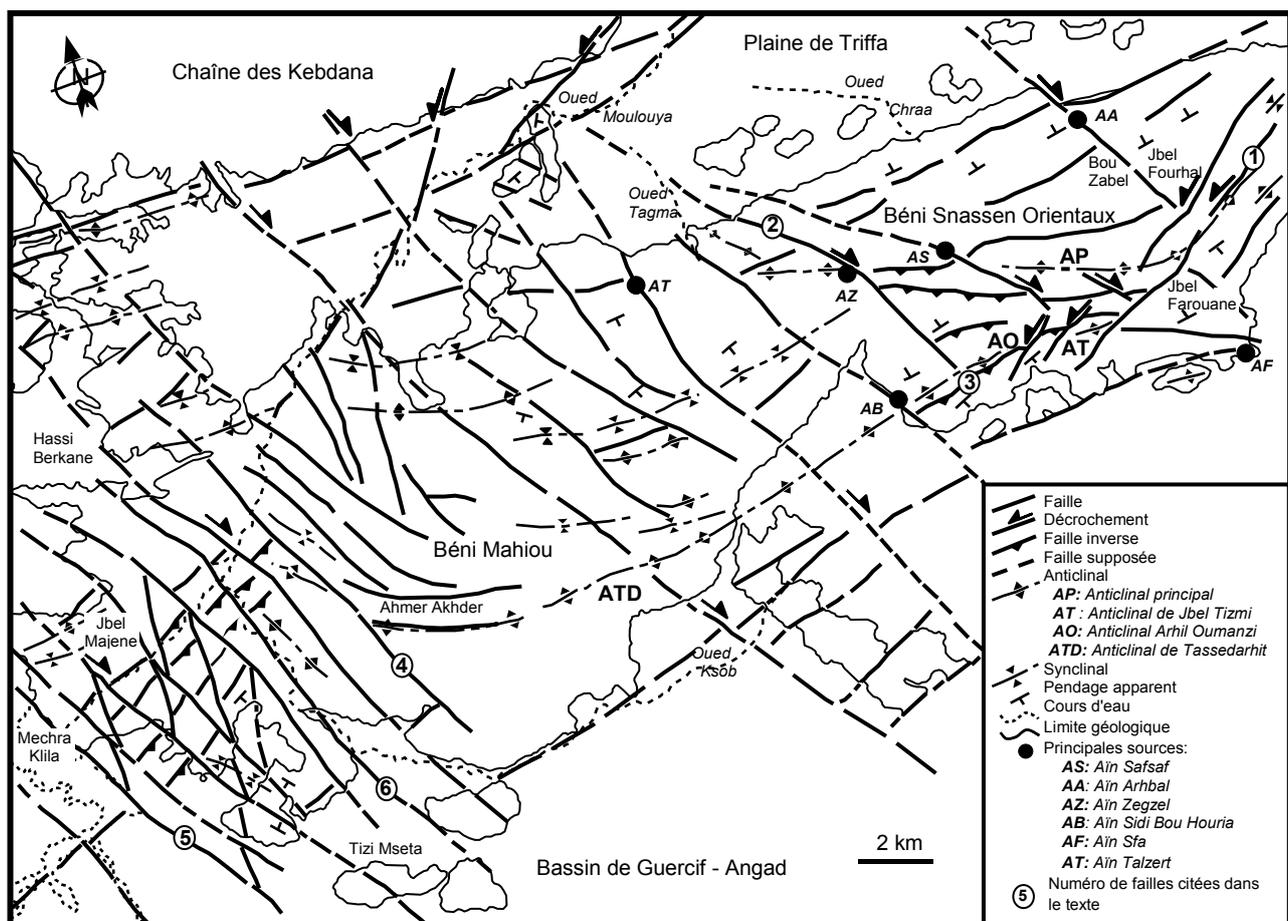


Fig. 3 – Carte tél-analytique synthétique de la fracturation des monts des Béni Snassen et ses bordures à partir de l'analyse de l'image radar contrôlée sur le terrain.

Failles citées dans le texte : 1. faille de Jbel Farouane; 2. faille de Tafouralt; 3. faille de Tizmi-Azrou-Azizar, 4. faille de Mechra Homadi; 5. faille de Mechra Klila; 6. faille de Oued Ksob.

mite le flanc sud de l'anticlinal principal et décale en décrochement senestre l'axe de l'anticlinal de Jbel Tizmi.

- Les failles de direction NW-SE décimétriques à kilométriques, à jeu décrochant dextre, s'associent aux accidents de direction NE-SW pour constituer un réseau décrochant conjugué qui s'observe aussi bien à petite qu'à grande échelle. Ces failles affleurent principalement à l'ouest et au sud de l'anticlinal principal. L'image radar nous a permis d'effectuer une cartographie détaillée de la faille de Tafouralt. Les faciès-images différents de part et d'autre de cet accident (dolomies liasiques pour le compartiment oriental et marno-calcaires du Malm pour le compartiment occidental) nous ont permis de le suivre sur plus de 4 km. Vers le nord, cet accident est souligné par le cours de l'oued Tagma, qui est fortement rehaussé sur l'image radar, du fait de sa position topographique encaissée. Vers le sud, la netteté de son tracé s'atténue au contact de l'anticlinal d'Arhil Oumanzi.
- Un réseau de failles de direction ENE-WSW à E-W montre une répartition assez homogène. Il traverse parallèlement la chaîne. L'image radar montre que les failles les plus importantes se situent au centre et au sud de l'anticlinal principal, et montrent surtout un jeu en faille inverse.

Ces failles inverses, à regard sud de 60° à 70° sont décalées par le réseau conjugué NE-SW et NW-SE. D'autres failles de même direction (qui sont décalées de façon dextre par le système NW-SE) apparaissent aux extrémités septentrionale et méridionale des Béni Snassen orientaux et montrent un rejet vertical important. Au sud, l'alignement des confluences du réseau hydrographique se positionne exactement au passage d'une faille normale. Celle-ci coïncide aussi avec une série d'escarpements topographiques. Elle délimite au nord la plaine de Bessara.

Dans la chaîne des Béni Mahiou, on peut distinguer trois réseaux de failles de directions principales NNW-SSE, NE-SW et WSW-ENE (fig. 3). La direction dominante est NNW-SSE à NW-SE. Cette direction apparaît sur l'image radar sous forme d'objets rectilignes empruntés par une anamorphose de bords de rabatement successifs de reliefs. La faille la plus importante est celle de Mechra Homadi (fig. 3). L'image radar montre que cette faille se prolonge au nord et affecte les séries néogènes de Hassi Berkane. Vers le sud, elle se dédouble en deux branches : l'une de direction WNW-ESE, emprunte les crêtes de Jbel Ahmer Akhder (881 m) et coïncide avec la terminaison de l'anticlinal de Tasse-darhit, l'autre au sud de direction NNW-SSE, affleure dans la vallée de Tizi Mseta. La géométrie des structures secondaires associées à cette faille (crochons, décalage des failles ENE-WSW, ...) indique que le sens du décrochement est dextre.

Dans la partie centrale et orientale des Béni Mahiou à faible rabatement (NE de la faille de Mechra Homadi), un certain nombre de structures géologiques sont recon-

naissables. Elles correspondent à des plis décimétriques à kilométriques associés à des failles. D'est en ouest, les plis à grand rayon de courbure et de direction E-W, se resserrent et deviennent NW-SE, formant ainsi une courbure à convexité vers le sud. Au SW de la faille de Mechra Homadi, l'image radar met en évidence un réseau de failles de direction NNW-SSE. Parmi les plus importantes de ce secteur, citons celles de Mechra Klila et de l'Oued Ksob. Elles montrent un dernier jeu cartographique dextre, attesté au niveau de Jbel Majene par des crochons de failles.

4. CONCLUSION

Grâce à sa vision synoptique et sa résolution au sol qui permettent de travailler depuis l'échelle de 1/250 000 jusqu'à 1/50 000, l'imagerie satellitaire active SAR du satellite ERS s'est avérée un outil très appréciable pour la reconnaissance des unités morphologiques et de la fracturation dans les monts des Béni Snassen. L'angle d'incidence de 23° semble assez bien adapté puisqu'il nous a permis de cartographier pour la première fois un certain nombre de structures géologiques (failles, plis) surtout dans les régions d'accès difficile et dans les régions à couverture végétale relativement dense. Les quelques déformations des objets géologiques dues au rabatement (impression de renversement de pendage, déformation de certains objets géologiques et des tracés de certaines failles) ont été corrigées en faisant appel aux photographies aériennes, suivies de contrôles sur le terrain.

Ainsi nous montrons que la géométrie d'ensemble de la chaîne des Béni Snassen est sous le contrôle d'accidents de direction NW-SE, NE-SW et ENE-WSW à E-W :

- les failles de direction ENE-WSW à E-W ayant guidé la sédimentation au cours du Mésozoïque (Cattaneo, 1987; Naciri, 1994; Chotin *et al.*, 2000; Tabyaoui, 2000) vont être réactivées au cours du Pliocène quaternaire en failles inverses à composante décrochante dextre. Elles sont responsables dans les Béni Snassen orientaux de chevauchements locaux à vergence N à NW (faille chevauchante de Tizmi-Azrou-Azirar) auxquels sont associés des plis d'axe ENE-WSW à E-W.
- les failles de direction NE-SW et NW-SE constituent un réseau conjugué. La direction NW-SE, d'ordre kilométrique, est nettement dominante dans les Béni Snassen. Elle présente un jeu décrochant dextre attesté par le décalage de failles orientées ENE-WSW à E-W et la présence de structures en crochons le long des failles de Mechra Homadi, Mechra Klila, Tafouralt et Oued Ksob. Les failles de direction NE-SW présentent un jeu décrochant senestre qui décale les failles E-W et développent des crochons.

Le caractère récent de cette fracturation qui affecte les monts des Béni Snassen est attesté par le fait qu'elle recoupe les structures développées lors des phases mésozoïques et tertiaires (Chotin *et al.*, 2000). Elle guide la

majorité du réseau hydrographique, ainsi que la répartition des principales sources. Celles-ci sourdent le long du couloir faillé de direction NW-SE (sources de Aïn Safsaf, Zegzel, Sidi Bou Houria) et au niveau du prolongement d'accidents ENE-WSW (sources de Aïn Arhbal, Aïn Sfa).

Cette fracturation trouve une interprétation satisfaisante dans le cadre du rapprochement des plaques Afrique-Europe qui a développé dans le Maroc nord oriental un

épisode compressif plio-quadernaire de direction NNW-SSE repéré par des études microtectoniques (Hervouet, 1985; Ait Brahim, 1991; Tabyaoui, 2000). Cet épisode compressif est responsable de la création et de la réactivation d'un réseau conjugué constitué de failles décrochantes dextres de direction NW-SE auxquelles sont associées des failles de direction NE-SW à jeu décrochant senestre et des failles inverses à composante décrochante dextre de direction ENE-WSW à E-W. □

Références bibliographiques

- Ait Brahim L. (1991) – Tectonique cassante et état de contraintes récent du Maroc Nord. Résultat de la cinématique des plaques Afrique-Europe et du bloc d'Alboran. – Thèse Doct. Etat, Univ. Rabat, 233 p.
- Barathon J.J. (1987) – Bassins et littoraux du Rif oriental (Maroc) : évolution morpho-climatique et tectonique depuis le Néogène supérieur. – Thèse, Univ. Poitiers, 592 p.
- Benabdellah A. (1952) – Etude géologique et métallogénique de la partie orientale du massif des Béni Snassen (Maroc oriental). – Rapp. inédit, Serv. Geol. gîtes miner., Maroc, n° 321.
- Blom R.G. (1988) – Effects of variation in look angle and wavelength in radar images of volcanic and aeolian terrains. Or now you see it, now you don't. – *Int. J. Remote Sensing*, vol. 9, n° 5, p. 945-965.
- Cattaneo G. (1980) – Sédimentation carbonatée liasique, chronologie et interprétation des événements tectoniques dans les Béni Snassen orientaux (Maroc nord-oriental). – *Bull. Soc. Géol. France*, 7, t. XXII, n° 2, p. 185-191.
- Cattaneo G. (1987) – Les formations du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur de l'avant-pays rifain oriental (Maroc) – Thèse, Univ. Bourgogne, Dijon, 300 p.
- Chaouni A. (1996) – Apport des données Landsat M.S.S., Radar ERS1-SAR ; modèles numériques de terrain ; données morphométriques et structurales de terrain à la compréhension de la cinématique des principales failles de la péninsule de Tanger depuis l'Oligocène supérieur jusqu'à l'Actuel (Rif septentrional, Maroc). – Thèse D.E.S., Univ. Mohammed V, Rabat, 295 p.
- Chaouni A. (1999) – Relation entre la circulation des eaux, les instabilités des bassins versants avec la fracturation dans la rive sud du détroit de Gibraltar (Rif septentrional, Maroc). – Thèse Doct. Nationale, Univ. Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, 320 p.
- Chotin P., Ait Brahim L., Deffontaines B., Rudant J.P. & Chaouni A. (1995) – Apports des données ERS-1 SAR sur la reconnaissance du réseau de failles dans la Péninsule de Tanger (Maroc) – *Photo-Interprétation*, n° 1995/2, p. 146-152.
- Chotin P., Deffontaines B., Ait Brahim L. & Nakhcha C. (1997) – La faille du Bas-Nekor : Témoin de la dynamique actuelle d'échappement du Maroc septentrional vers l'ouest. – *Photo-Interprétation*, n° 1997/3-4, p. 159-170.
- Chotin P., Ait Brahim L. & Tabyaoui H. (2000) – The southern Tethyan margin in north-eastern Morocco, sedimentary characteristics and tectonic control. – *Peri-Tethys Mémoire 5. Mém. Mus. Natl. Hist. Nat.*, Paris, 182, p. 107-128.
- Deroin J.P. & Scanvic J.Y. (1995) – Apport de l'imagerie radar à la cartographie géologique : Exemples et réflexions. – *Bull. S.F.P.T.* n° 138 (2), p. 96-109.
- Drury S.A. (1993) – Images interpretation in Geology (2nd ed.). – London, Chapman & Hall, 283 p.
- Hanks C.L. & Guritz R.M. (1997) – Use of Synthetic Aperture (SAR) for Geologic reconnaissance in Arctic regions. An Example from the Arctic National Wild life Refuge, Alaska. – *A.A.P.G. Bulletin*, vol. 81, 1, p. 121-134.
- Hervouet Y. (1985) – Géodynamique alpine (Trias - Actuel) de la marge septentrionale de l'Afrique au nord du bassin de Guercif (Maroc oriental). – Thèse d'état, Univ. Pau, 367 p.
- Mehdi M. (1995) – Stratigraphie intégrée, analyse séquentielle et micropaléontologique du Jurassique et du Crétacé inférieur de l'avant-pays oriental (Maroc). – Thèse Doct. ès Sci., Univ. Mohammed I, Oujda, 471 p.
- Monition L. (1958) – Etude géologique de la région de Mechra Klila (application à l'étude d'un projet de barrage). – *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc*, n° 140, 96 p.
- Naciri T. (1994) – Evolution sédimentaire, environnements et contrôle dans le Lias-Dogger des Béni Snassen orientaux (Maroc nord-oriental). – Thèse Doct. ès Sci., Univ. Mohammed I, Oujda, 224 p.
- Tabyaoui H. (1993) – Analyse de la déformation cassante alpine et actuelle dans les Béni Snassen orientaux (Maroc nord-oriental). – Mémoire C.E.A., Univ. Rabat, 213 p.
- Tabyaoui H., Ait Brahim L., Chotin P. & Gelard J.P. (1996) – Exemples d'artefacts à l'utilisation de l'imagerie radar SAR ERS-1. Effet de rabattement au sommet : faille de l'oued Za. Monts de Taourirt-Oujda. – Actes du 13^e Coll. Bassins sédimentaires marocains, Marrakech, p. 192.
- Tabyaoui H. (2000) – Apport des données satellitaires (Spot-XS, Radar SAR-ERS, Landsat-MSS) à la cartographie des structures géologiques du Maroc nord-oriental. Tectonique cassante, cinématique et contexte géodynamique du Trias à l'Actuel. – Thèse Doct. Nationale, Mohammed V, Rabat, 338 p.
- Wernli R. (1987) – Micropaléontologie du Néogène post-nappes du Maroc septentrional et description systématique des foraminifères planctoniques. – *Notes Mém. Serv., Géol. Maroc*, n° 331, 266 p.
- Carte géologique d'Oujda au 1/500 000, Service géologique Maroc.