Télédétection, 2003, vol. 3, n° 1, p. 33-47
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR L'ANALYSE DE LA FRACTURATION DU DOMAINE INTERNE RIFAIN (MAROC) : RELATION AVEC LA RÉPARTITION DES SOURCES

LAHCEN AIT BRAHIM*[a], FAÏÇAL SOSSEY ALAOUI[b]

Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat,
avenue Ibn Battouta Rabat – Agdal, Boîte Postale 1014, Rabat, Maroc.
Téléphone [(a,b)] : +212 37 77 19 57 ; +212 37 77 19 57.
Télécopieur : +212 37 77 19 57
Courriel [(a,b)] : aitbrahi@challa.fsr.ac.ma ; faicalsa@hotmail.com

(soumis le 18 mars 2002 ; révisé le 21 mai 2002 ; accepté le 15 juillet 2002)

Le Rif interne est situé sur le coté méditerranéen du Maroc. C'est une région où le relief très accidenté et karstique de la dorsale calcaire est caché par le couvert végétal, ce qui constitue un handicap majeur pour suivre le tracé des failles sur le terrain. À l'aide des images HRV (XS) de SPOT, RSO de ERS-1, de photographies aériennes et d'un contrôle sur le terrain, nous avons réalisé une carte des failles du domaine interne du Rif septentrional. Nous mettons en évidence quatre directions principales de failles : N-S, NE-SO, NO-SE et E-O. Cette fracturation, qui guide en surface la majorité du réseau hydrographique, montre aussi une étroite corrélation avec la répartition des sources de la côte méditerranéenne entre Sebta et Jebha. Les principales sources sourdent le long des failles de direction NE-SO et E-O, surtout au niveau des nœuds tectoniques qui correspondent au croisement des accidents NE-SO, NO-SE, E-O et N-S. Le modèle tectonique de circulation d'eau proposé en fonction de la direction actuelle de la contrainte principale σ1 (N167), montre que : les fractures de direction N160-170, se comportent comme des fractures ouvertes, favorisant le transfert des eaux. Celles de direction N070-080, correspondent à des fractures fermées. Quant à celles de direction N045 et N135, elles auraient un comportement hydraulique semi-fermé ou semi-ouvert. La relation fracturation - circulation des eaux et les cartes réalisées, constituent un premier pas, permettant d'orienter la prospection hydrogéologique dans cette partie de la péninsule de Tanger.

Mots-clefs : SPOT ; ERS-1 ; fracturation ; sources d'eau ; Rif ; Maroc.

USE OF REMOTE SENSING DATA FOR THE ANALYSIS OF THE FRACTURING IN THE RIFAIN INTERNAL DOMAIN (MOROCCO) : RELATIONSHIP WITH THE DISTRIBUTION OF SOURCES

The internal Rif is located on the Moroccan Mediterranean edge. It is an area where the very broken and karstic character of the calcareous Dorsal is hidden, because of the vegetation cover, which constitutes a major handicap to follow the fault network on the ground. By using satellite images (SPOT XS, SAR of ERS-1), aerial photographs, and a ground control, we carried out a structural map of the Northern Rif internal domain. We have find out four principal directions of faults : N-S, NE-SW, NW-SE and E-W. This fracturing which guides on the surface the main part of the hydrographical network shows also a relationship with the distribution of the springs in the Mediterranean coast between Sebta and Jebha. The main springs ooze along the faults within a NE-SW and E-W directions ; and especially at tectonic nodes, which correspond to the crossing of NE-SW, NW-SE, E-W and N-S accidents. The proposed tectonical model of water circulation, according to the current direction of the principal stress axis σ1 (N167), shows that : the fracturing N160-170 oriented, behave like opened fractures, supporting the transfers of water. Those within a N070-080 direction, correspond to closed fractures. As for those N045 and N135 oriented, they would have a half-closed or half-open hydraulic comportment. The relation fracturing - circulation of water and the structural maps carried out constitute a preliminary study in order to direct hydrogeologic prospection in this part of Tangier peninsula.

Keywords : SPOT ; ERS-1 ; fracturing ; spring ; Rif ; Morocco.

1. INTRODUCTION

La chaîne rifaine, située sur le coté méditerraéen du Maroc, doit son évolution au cours du Tertiaire supérieur, à la fois au déplacement de la micro-plaque d'Alboran vers l'ouest et au rapprochement des plaques Afrique-Europe. Le Rif interne, objet de cette étude (figure 1), correspond au domaine le plus interne de la chaîne rifaine (Durand-Delga *et al.*, 1962). Il est limité au nord par le détroit de Gibraltar, au sud par l'accident de Jebha et à l'est par la mer d'Alboran. À l'ouest, il est limité par le Rif

* Correspondant principal

externe (Unité de Tanger). Le Rif interne est constitué de trois unités structurales (Durand-Delga *et al.*, 1962 ; Kornprobst, 1974) qui sont, du nord au sud et de l'est vers l'ouest : les Sebtides, les Ghomarides et la Dorsale calcaire. Cette dernière, occupe la partie la plus externe du Rif interne. Elle est subdivisée selon Griffon (1966), Nold *et al.* (1981), Wildi (1983) et Olivier (1984) en Dorsales interne, intermédiaire et externe. Elle est constituée par la chaîne du Haouz entre le détroit de Gibraltar et Tétouan et la Dorsale calcaire (s.s.) entre Tétouan et Jebha. Sur les cartes géologiques au 1 : 50 000 du Rif interne, nous avons remarqué que les failles cartographiées correspondent uniquement aux contacts tectoniques subméridiens majeurs entre les principales unités structurales. Les premières missions de terrain ont montré que les affleurements accessibles des calcaires de la Dorsale étaient fracturés, aussi bien à l'échelle microtectonique qu'à l'échelle pluri-métrique. Le caractère accidenté et karstique de la Dorsale calcaire, souvent caché par le couvert végétal, constitue un handicap majeur pour suivre le tracé des failles sur le terrain.

Dans cette étude, l'utilisation de données de télédétection spatiale et aéroportée, couplées aux techniques de traitement d'image et à l'analyse morphostructurale a pour objectifs de : *1)* cartographier la fracturation responsable de la structuration du Rif interne, *2)* recenser sur le terrain les principales sources et analyser la relation fracturation-circulation des eaux en milieu calcaire fracturé, *3)* orienter la prospection hydrogéologique dans le secteur.

2. ANALYSE DE LA FRACTURATION SUR L'IMAGERIE SATELLITAIRE

2.1. Données utilisées et méthodologie d'approche

Pour l'analyse de la fracturation, on a eu recourt à une mosaïque de trois images HRV (XS) de SPOT (figure 2), soit 033-278 du 18-07-1993, 033-279 du 30-07-1993 et 034-279 du 15-08-1993, d'une mosaïque de quatre images RSO de ERS-1 de la phase C d'acquisition (orbite montante/rang, date : 10 939/711, 18-08-1993 ; 10 939/693, 18-08-1993 ; 6 158/711, 18-09-1993 ; 11 168/693, 03-09-1993), d'un modèle numérique d'altitude, ainsi que d'une série de photographies aériennes au 1 : 20 000. L'analyse et le traitement de ces données pour l'interprétation de la fracturation ont été effectués selon les étapes suivantes (figure 3) :

– extraction des linéaments à partir de l'application de gradients linéaires sur les images ;

– complément par photo-interprétation ;

– confrontation des résultats avec la réalité du terrain ;

– établissement d'une carte structurale sur laquelle seront reportées les sources ;

– mise en évidence de la relation fracturation-circulation des eaux.

Dans le but d'extraire l'information géologique ainsi que les structures cassantes à partir des données satellitaires, nous avons réalisé quatre types de traitements. Le premier, est la réalisation d'une composition colorée de l'image en fausse couleurs (figure 4B), qui a permis de reconnaître la Dorsale du Haouz (DH), en gris vert, de Jbel Moussa à Tétouan, les Sebtides (S) qui ressortent en rouge foncé avec relief apparent, l'Unité Intra-Rifaine (UI) caractérisée par une teinte vert-clair à texture fine. Le deuxième, est la transformation RVB–ITS (figure 3C), qui a permis de mettre en évidence avec une teinte bleue les péridotites de Beni Bouchraa (PBB). Le troisième, est l'analyse en composantes principales (figure 4D), qui a surtout permis de mettre en évidence les terrains quaternaires en rose fluorescent. Quant aux Ghomarides (GH), ils se distinguent par une couleur vert clair et rouge à texture grossière. Le dernier, est l'étalement par décorrélation de l'information entre les trois canaux (figure 4E), qui a permis de différencier à gauche de l'image, les nappes de flyschs en rouge en cas de prédominance gréseuse (NF1) et en vert foncé en cas de prédominance pélitique (NF2). Malgré le couvert végétal, la Dorsale calcaire au centre de l'image, se distingue avec des teintes mauve clair à relief apparent et vert-bleu ; au SO de Talembote, les Ghomarides (GH) apparaissent avec une teinte vert clair à texture fine.

Le reste de l'image étant couvert par une couverture végétale, la reconnaissance de certains terrains des Sebtides et des Ghomarides s'est faite sur la rugosité spectrale de l'image. Ensuite, pour affiner les contours des terrains géologiques, nous avons utilisé le rehaussement spatial par Crisp (Faust, 1989). L'extraction des linéaments à partir des images HRV a été faite à partir du résultat d'une série de rehaussement spatiaux : Laplaciens, Sobels et gradients linéaires. Concernant les linéaments de direction NO-SE, entre Sebta et Tétouan ainsi qu'au sud de l'oued Laou, nous avons retrouvé ceux décrits sur les images RSO par Chotin *et al.* (1995). En absence de données HRV pour compléter l'extraction des linéaments dans la région de Jebha (sud de l'image), nous avons aussi traité et interprété les données RSO de ERS-1 utilisées par Chotin *et al.* (1995).

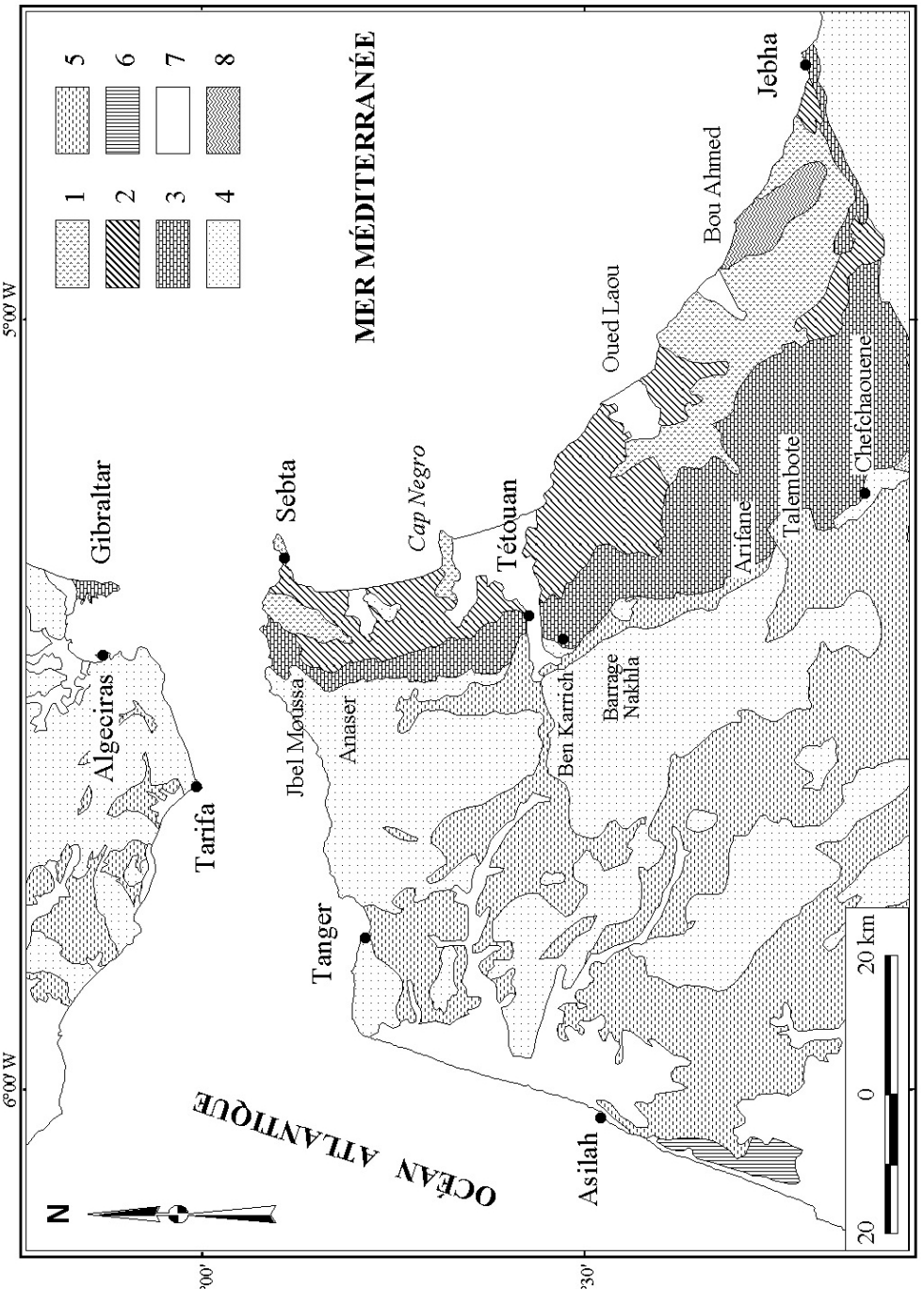


FIGURE 1 Principales unités structurales du Rif septentrional. 1– Sebtides; 2– Ghomarides ; 3– Dorsale calcaire ; 4– Nappes de flyschs ; 5– Unités intra-rifaines ; 6– Prérif ; 7– Néogène et Quaternaire ; 8– Péridotides de Béni Bouchraa. *Northern Rif principal structural units. 1– Sebtides; 2– Ghomarides ; 3– Calcareous Dorsal ; 4– Flyschs nappes ; 5– Intra-rifain units ; 6– Prerif ; 7– Neogene and Quaternary ; 8– Peridotides of Béni Bouchraa.*

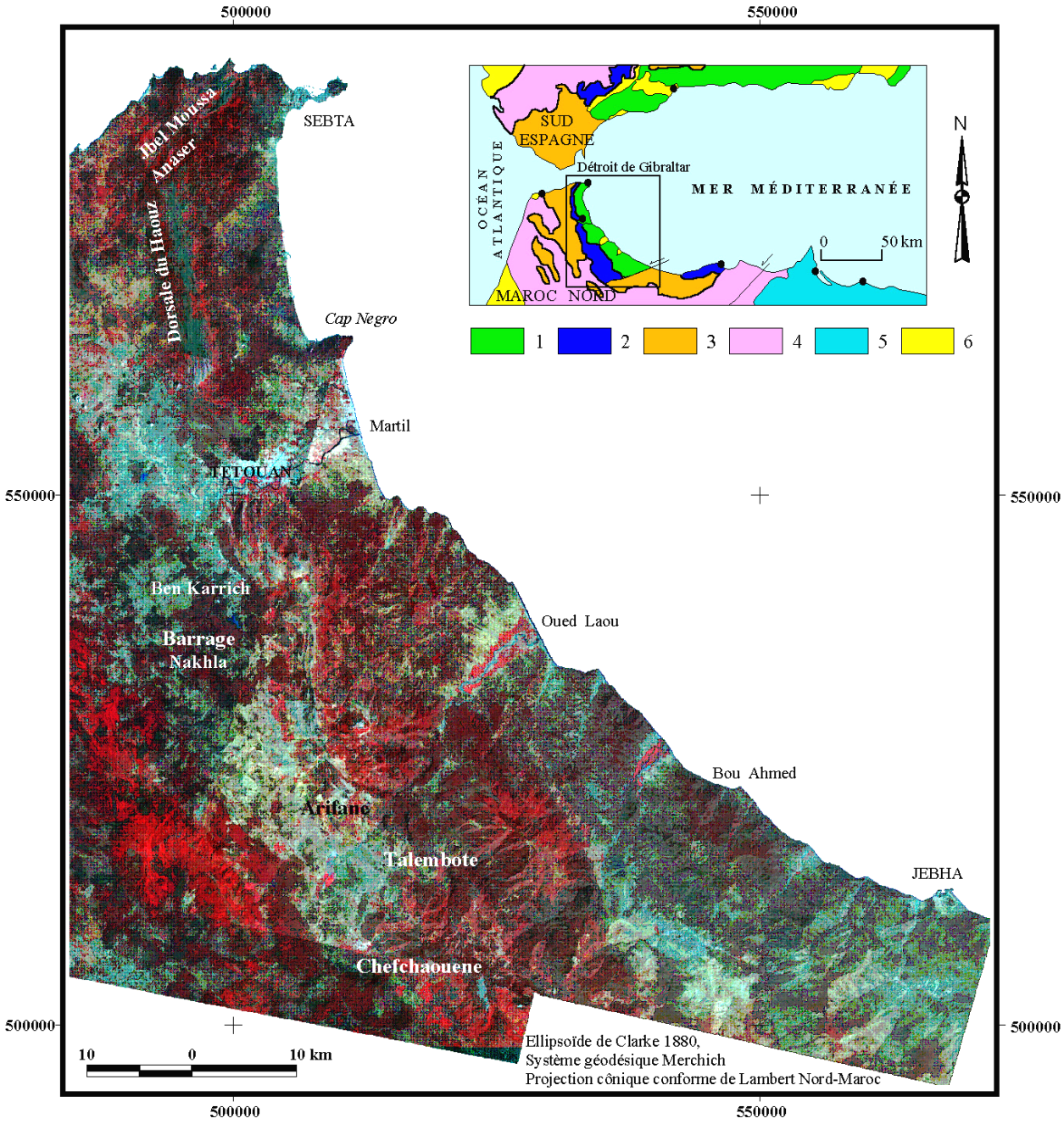


FIGURE 2 Domaine interne rifain ; mosaïque HRV en fausses couleurs. 1– Sebtides et Ghomarides ; 2– Dorsale calcaire ; 3–Nappes de flyschs ; 4– Rif externe ; 5– Avant pays marocain ; 6– Néogène et Quaternaire. *Internal Domain of Northern Rif, false colour SPOT (XS) mosaic. 1– Sebtides and Ghomarides ; 2– Calcareous Dorsal ; 3– Flyschs Nappes ; 4– External Rif ; 5– Moroccan Foreland ; 6– Neogene and Quaternary.*

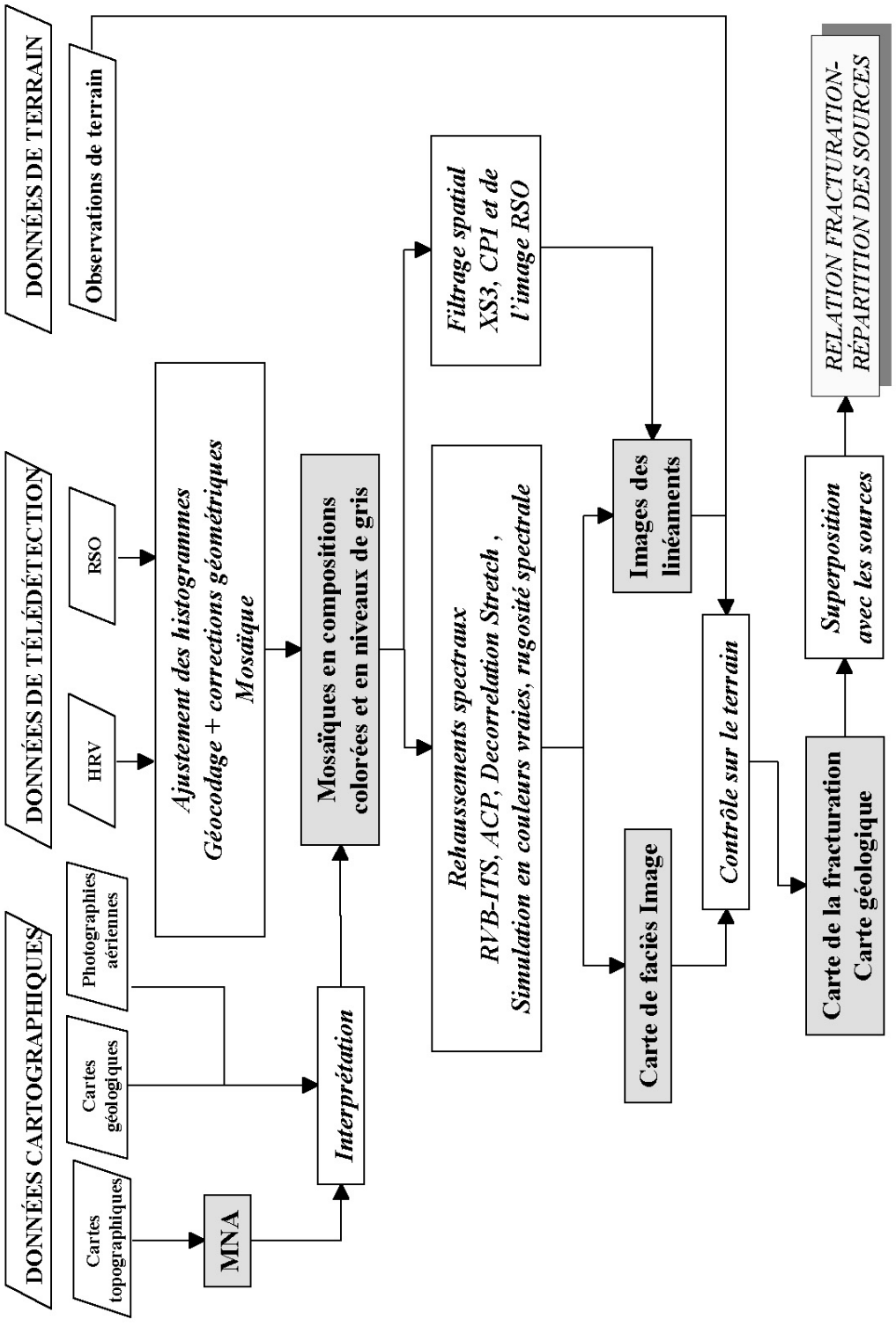


FIGURE 3 Méthodologie. *Methodology.*

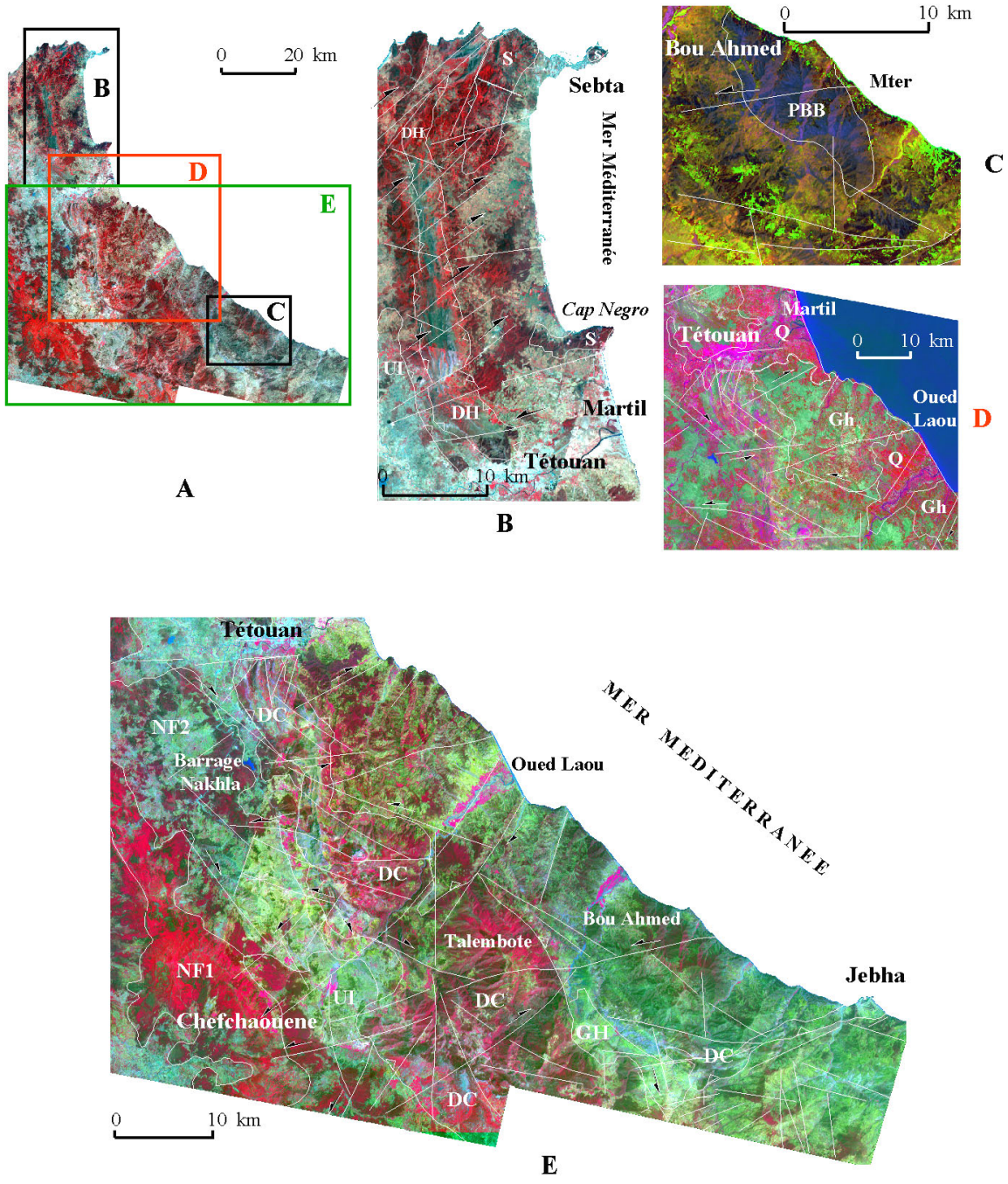


FIGURE 4 Rehaussements de l'imagerie satellitaire HRV (XS). A : Localisation des fenêtres ; B : Composition colorées en fausses couleurs ; C : Transformation RVB-ITS ; D : Analyse en composantes principales (composition colorée 123) ; E : Étalement par décorrélation PBB : Péridotites de Beni Bouchraa ; S : Sebtides ; GH : Ghomarides ; DC : Dorsale calcaire ; DH : Dorsale calcaire du Haouz ; NF : Nappes de flyschs ; UI : Unités intra-rifaines ; Q : Néogène et Quaternaire. *SPOT XS digital enhancements. A : Localisation of the windows ; B : False colour composite ; C : RGB-IHS transformation ; D : Principal component analysis (123 Colour composite) ; E : Decorrelation Stretch PBB : Beni Bouchraa Predidotites ; S : Sebtides ; GH : Ghomarides ; DC : Calcareous Dorsal ; DH : Calcareous Dorsal of the Haouz ; NF : Flyschs Nappes ; UI : Intra-Rifain Units ; Q : Neogene and Quaternary.*

2.2. Analyse de la fracturation

Dans le domaine interne de la péninsule de Tanger, on observe des failles de taille régionale qui affectent les terrains des Sebtides, des Ghomarides, de la Dorsale calcaire et de l'Unité de Tanger. Ces failles s'expriment sur les images HRV et RSO par des linéaments structuraux plus ou moins rectilignes qui délimitent ou décalent des zones de texture, de teintes et de contrastes lithologiques différents. L'analyse des linéaments a permis de déceler quatre grandes familles de failles : N-S, NE-SO, E-O et NO-SE (figure 4). La détermination du sens des jeux et l'évaluation des rejets horizontaux des différentes failles repérées ont été déduites à partir des décalages des structures tectoniques et des limites d'affleurements des différentes lithologies.

2.2.1. Les failles de direction N-S

Sur l'image HRV (figure 4B), le réseau de failles de direction N-S se répartit d'une façon homogène sur l'ensemble du secteur d'étude. Ce réseau est généralement parallèle aux limites des différentes formations géologiques des principales unités des Sebtides, des Ghomarides, de la Dorsale calcaire et de l'Unité de Tanger. Sur le terrain, il correspond souvent aux fronts de chevauchement de ces unités les unes sur les autres. Entre Sebta et Tétouan, les fronts de chevauchement N-S s'expriment nettement sur l'image HRV au niveau de la chaîne du Haouz (Dorsale calcaire) qui montre trois tronçons (le Haouz septentrional, le Haouz central et le Haouz méridional) avec une diminution de la largeur d'affleurement du sud vers le nord. Sur le terrain, ces chevauchements N-S ont la particularité de présenter une double vergence, la bordure ouest chevauche l'Unité de Tanger et la bordure est est rétrocharriée sur les Ghomarides. Entre Tétouan et Jebha (figure 4E), les fronts de chevauchement s'expriment nettement entre l'oued Laou et Jebha et ils ont tendance à prendre une direction NNO-SSE. Parmi les structures méridiennes cartographiques, citons aussi les axes des plis observés au niveau de la Dorsale calcaire : l'anticlinal de Tarrante (AT) qui longe le Haouz central et l'anticlinal frontal de Nator (AN) situé sur la bordure occidentale de la Dorsale calcaire au sud de Tétouan. Ce dernier anticlinal (AN), occupe le sommet orographique de la structure et la base du flanc inverse chevauchant l'Unité de Tanger (domaine externe) au niveau de Ben Karrich. Notons que ces structures N-S à NNO-SSE (fronts de chevauchement et axes de plis), subissent des torsions à proximité des accidents NE-SO, E-O et NO-SE.

2.2.2. Les failles de direction NE-SO

Les failles de direction NE-SO s'observent sur l'image HRV aussi bien dans les Ghomarides que dans les Sebtides et dans la Dorsale calcaire ainsi qu'au niveau de l'Unité de Tanger. Elles s'expriment mieux avec une densité importante dans la Dorsale du Haouz entre Tétouan et le détroit de Gibraltar. Parmi les plus importantes, les failles de Fahies (F1) et de Jbel Moussa (F2) qui se présentent aussi bien sur l'image HRV que sur le terrain par un jeu décrochant dextre, attesté par l'expulsion de la terminaison nord de la chaîne rifaine vers le NE. Entre l'accident de Taghremt (F4) et Jbel Fahies, le chaînon d'Anasser présente une structure arquée. Au niveau du Haouz central, limité par les accidents cartographiques de Taghremt au nord et celui d'El Onsar (F9) au sud, on observe les failles plurikilométriques de Khouaime (F6), d'Agla (F8) et de Kouf (F7). Les plis N-S de Tarrante (AT) et les fronts de chevauchement méridiens de la Dorsale calcaire ainsi que les accidents NE-SO, subissent à leur contact une torsion pour prendre une direction NE-SO attestant le jeu dextre. Le jeu dextre de l'accident d'El Onsar est responsable du décalage des fronts de chevauchement du Haouz central vers le NE par rapport au Haouz méridional. Au sud de Tétouan, l'accident NE-SO de Tamezzakt (F13) met en contact la Dorsale calcaire avec l'unité de Tanger. Son jeu en décrochement dextre, est attesté par la rotation horaire que subit l'extrémité nord de l'anticlinal frontal de Nator (AN) d'axe N160 qui passe successivement à la direction N-S voir N010 à N020 (figure 5). Au nord de Talembote, se dégage aussi bien sur l'image HRV que RSO l'accident NE-SO de l'oued Laou (F15) comme une structure cartographique plurikilométrique qui traverse l'ensemble du domaine interne et se prolonge vers le SO dans le domaine externe (Unité de Tanger). Dans la région d'Arifane, le front de chevauchement de la Dorsale sur l'Unité de Tanger à vergence ouest et l'axe de plissement de la Dorsale externe subissent une virgation de N170 à N130 en réponse au jeu en décrochement senestre de l'accident de l'oued Laou. Le caractère récent de cette faille est attesté par le fait que son trajet est emprunté par le cours de l'oued Laou. Fortement encaissé dans les calcaires massifs de la Dorsale, cet oued a donné naissance à une cluse (du même nom) à versants verticaux, siège d'écroulements importants et continus. D'autres accidents d'orientation NE-SO prennent naissance dans le domaine externe (Unité de Tanger et nappes de flyschs) et ne semblent pas se prolonger dans le domaine interne. Ils décalent en décrochement senestre les accidents de direction NO-SE à NNO-SSE.

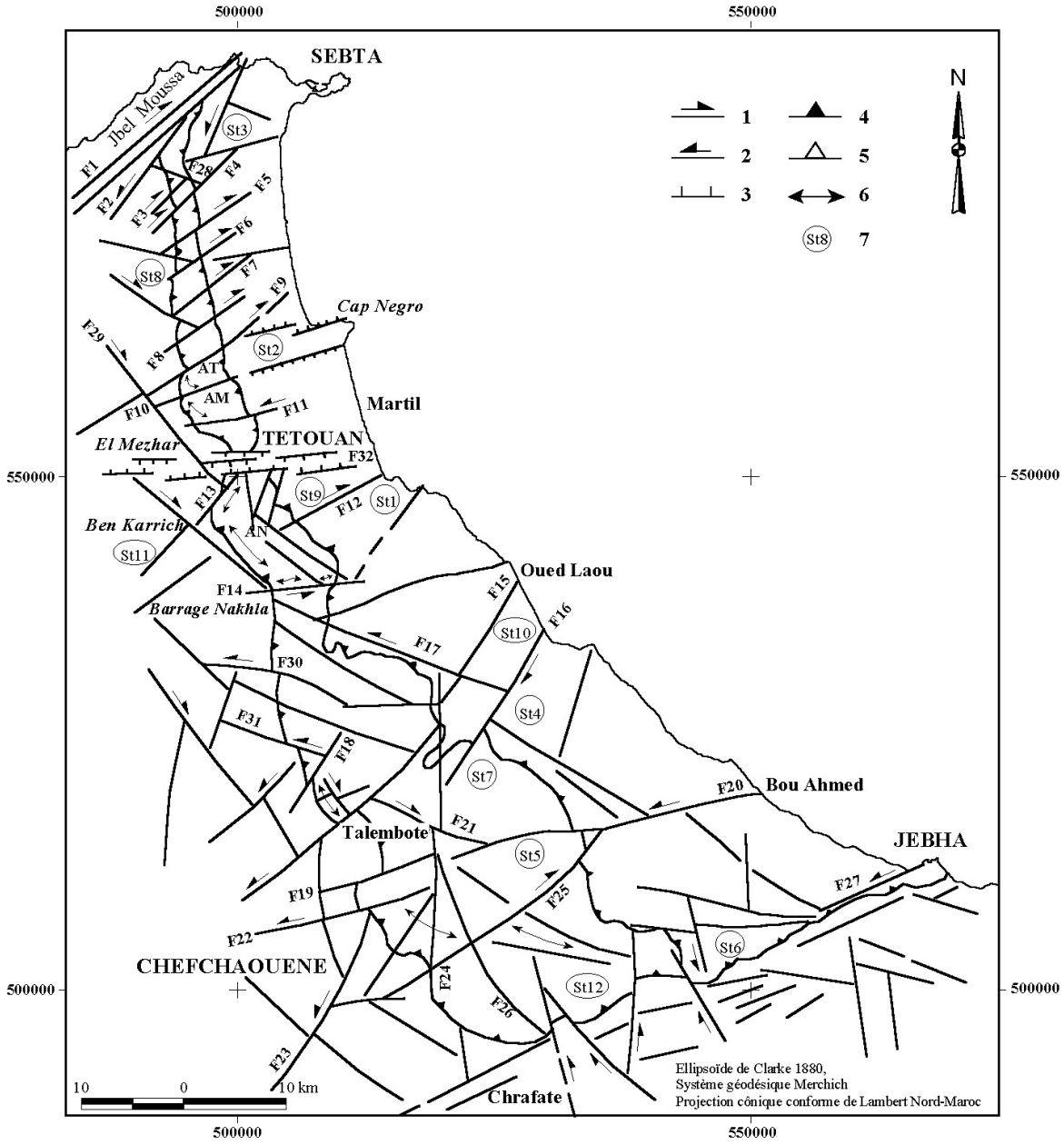


FIGURE 5 Télé-analyse de la fracturation du domaine interne rifain à partir de l'imagerie HRV (XS) et RSO, contrôlée sur le terrain. 1– Décrochement dextre ; 2– Décrochement senestre ; 3– Faille normale ; 4– Front de chevauchement ; 5– Front de nappes ; 6– Axe anticlinal ; 7– Station de mesures microtectoniques. Les numéros de failles sont dans le texte. *HRV (XS) and ERS-1 SAR fracturing Tele-Analysis of the Internal Rifain Domain, followed by a control at the ground. 1– Dextral Strike-slip fault ; 2– Sinistral Strike-slip fault ; 3– Normal fault ; 4– Overlapping Front ; 5– Nappes Front ; 6– Anticline axis ; 7– Station of microtectonic measures. Numbers of faults are on the text.*

2.2.3. Les failles de direction E-O

Parmi les plus importantes failles, celle de Jebha (F27) de direction ENE-OSO, présente sur l'image HRV (figure 4E) un jeu décrochant senestre et un jeu apparent normal. Le premier jeu (décrochant senestre) est attesté par le développement de crochons cartographiques responsables de la torsion des fronts de chevauchement de la dorsale sur l'Unité de Tanger qui passent successivement de la direction N140 à N110, voire N080-090 (figure 5). Sur l'image RSO, on le retrouve délimitant de part et d'autre deux compartiments à textures différentes : les dolomies massives de la Dorsale au nord et les gréso-pélites des nappes de flyschs (Tiserène) au sud. Au niveau de Tétouan, sur l'image HRV, on observe une série de failles parallèles de direction E-O qui, de la côte, se prolongent vers l'ouest en recoupant toutes les unités des domaines interne et externe. Deux jeux peuvent être mis en évidence : le premier jeu en décrochement senestre, s'observe au niveau des accidents de Semsa (F11) et de Saddina (F10), entraînant des décalages (senestres) du front de chevauchement de la Dorsale du Haouz sur le domaine externe. L'axe N-S de l'anticlinal de Mezhar (AM) subit une torsion anti-horaire en passant à la direction NO-SE, compatible avec le jeu senestre des accidents F10 et F11. Le second jeu en failles normales s'observe au niveau des accidents de la cluse de Tétouan (F32) à rejet vertical important, qui se marque dans la topographie par une série d'escarpements. Le caractère récent de ces failles est attesté par le fait que leur tracé est emprunté par le cours de l'oued Martil. Ce dernier, fortement encaissé dans les dépôts plio-quaternaires et les calcaires massifs de la Dorsale, a donné naissance à la cluse de Tétouan. D'autres accidents de moindre importance que ceux de Jebha et de Tétouan se dégagent sur l'image HRV. Au nord de Tétouan, les accidents N080 à rejet vertical et à regards opposés délimitent le socle cristallophyllien des Sebtides (Kornprobst, 1974) en position de horst par rapport aux bassins avoisinants de Martil et de Smir. Au sud de Tétouan, l'accident E-O de Dar-Râai (F14) décale vers l'ouest l'ensemble des écailles dorsaliennes. Il déforme les extrémités de l'axe anticlinal frontal N140 de Nator qui subit une rotation anti-horaire en passant par la direction N120 à 090 à proximité de l'accident attestant ainsi de son jeu décrochant senestre.

2.2.4. Les failles de direction NO-SE

Les failles de direction NO-SE se manifestent d'une façon localisée et discontinue entre Tétouan et le détroit de Gibraltar. Elles s'expriment mieux entre Tétouan et Jebha (figure 5). Parmi les failles les plus importantes, on retrouve le linéament de Zinate (F17) qui prend naissance au niveau de la cluse de Tétouan pour rejoindre l'accident de Jebha (F27). Il est décalé en décrochement dextre par la faille NE-SO de l'oued Ahrousse (F16) et en décrochement senestre par la faille de Bou Ahmed ENE-OSO (F20). Au nord de Tétouan, l'accident NO-SE de Mrhaba (F28) présente un jeu décrochant senestre. Il est attesté, d'une part, dans la Dorsale calcaire par le développement d'un méga-crochon qui passe de la direction NE-SO à la direction NNO-SSE. Il décale d'autre part, l'accident NE-SO d'Amezzouk (F3). Au sud de Tétouan, les failles NO-SE d'Akouarene (F30) et de Bouattou (F31) montrent un jeu de décrochement senestre responsable du décalage du front de chevauchement de la Dorsale externe sur l'Unité de Tanger. Sur le terrain, les failles NO-SE à jeu décrochant senestre s'associent aux failles de direction NE-SO à jeu décrochant dextre pour former un réseau conjugué à petite et grande échelle. Entre Tétouan et Jebha, au niveau de l'Unité de Ketama et des nappes de flyschs, on observe sur l'image HRV un réseau NO-SE qui décale cette fois en décrochement dextre le réseau NE-SO à NNE-SSO et avec lequel il forme un nouveau réseau conjugué.

3. ÉPISODES DE DÉFORMATION ET ÂGE DE LA FRACTURATION

La reconnaissance des failles sur les images HRV et RSO, l'analyse structurale et l'identification des paléocontraintes (Angelier, 1992) à partir des données de terrain permettent de reconnaître trois épisodes tectoniques successifs (figure 6).

3.1. L'épisode compressif E-O à ENE-OSO

À l'échelle microtectonique, l'épisode compressif de direction E-O à ENE-OSO se matérialise (figure 6, St1 à St4) par le jeu d'un réseau conjugué de décrochements dextres de direction N030 à N065 et senestres de direction N100-140, auxquels sont associés des failles inverses de direction N160-010 (figure 6, St1). À l'échelle cartographique, on retrouve le même réseau conjugué décrochant (NE-SO et NO-SE). Les failles inverses de direction subméridienne sont responsables de la structuration de la Dorsale calcaire en nappes et écailles, du chevauchement des Sebtides et des Ghomarides sur la Dorsale calcaire et du charriage de l'ensemble du Rif interne sur le Rif externe (Durand Delga *et al.*, 1962 et Nold *et al.*, 1981). Les plis métriques à plurikilométriques, dont les axes varient de N150 à N010, sont associés à ces failles chevauchantes.

3.2. L'épisode compressif NE-SO

L'épisode compressif NE-SO se caractérise à l'échelle microtectonique (figure 5, St5 à St8) par le jeu en

décrochement senestre des failles de direction N060-090 et dextre des failles de direction N010-030, auxquelles sont associées les failles de direction N120-140 à jeu inverse (figure 6, St7). L'accentuation du jeu en décrochement senestre des accidents kilométriques orientés E-O à ESE-ONO (F10, F11, F14, F20, F27), va segmenter transversalement la Dorsale calcaire en entraînant sa translation vers l'ouest.

Les deux épisodes compressifs E-O et NE-SO, appartiennent à la même phase compressive qui affecte les dépôts de l'Aquitanien et du Burdigalien inférieur (Olivier, 1984), des Ghomarides et de la Dorsale calcaire. Elle est scellée par les dépôts marins du Pliocène inférieur (Wernli, 1988). En absence de dépôts du Miocène moyen et supérieur dans le Rif interne, et étant donné que les déformations développées par cette phase plus à l'ouest du secteur d'étude sont scellées par le Tortonien post-nappes de Charf El Akab (Wernli, 1988), nous lui attribuons un âge post-Burdigalien inférieur-anté-Tortonien. Au cours de cette phase, les deux accidents transverses qui délimitent le Rif interne sont représentés, au nord, par l'accident de Fahies (NE-SO) à jeu décrochant dextre et par l'accident de Jebha (N080) à jeu décrochant senestre, qui ont valeur de rampes latérales ayant guidé l'expulsion du domaine interne vers l'ouest.

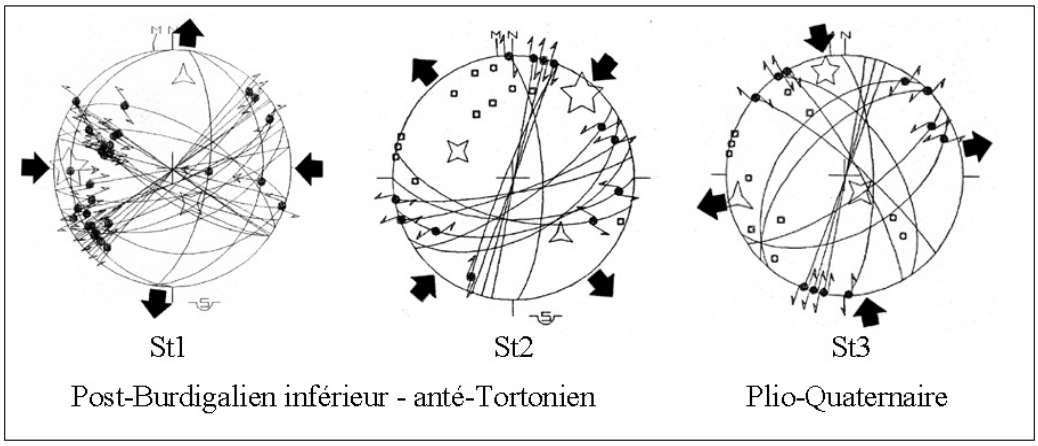


FIGURE 6 Exemples de diagrammes caractéristiques des principaux systèmes de failles des épisodes compressifs E-O (St1), NE-SO (St7) et NNO-SSE (St9). Projections stéréographiques des plans de failles et des stries sur diagramme de Schmidt, hémisphère inférieur : les plans de failles sont représentés par des courbes et les pôles par des carrés blancs, les stries par des petites flèches centrifuges pour les failles normales et centripètes pour les failles inverses ou des doubles flèches pour les failles décrochantes ; étoile à 5 branches : σ1, étoile à 4 branches : σ2 et étoile à 3 branches : σ3. Les flèches centrifuges noires indiquent la direction d'extension et les flèches centripètes noires indiquent la direction de compression). Pour la localisation, voir la figure 5, St1 à 12. *Diagram examples of the characteristic principal fault systems in compressive episodes E-W (St1), NE-SW (St7) and NNW-SSE (St9). The stereographic projections illustrate fault plane solutions in Schmidt lower hemisphere projection : fault planes are shown as curves and poles as open squares, slickenside lineations as small centrifugal arrows (normal faults) ; centripetal arrows (reverse faults) or double arrows (strike-slip faults) ; 5 branchs star : σ1 ; 4 branchs star : σ2 ; 3 branchs star : σ3 ; centrifugal black arrows indicate the direction of extension and centripetal ones, the direction of compression, in the horizontal plane). For localisation, see figure 5, St1 to 12.*

3.3. L'épisode compressif N-S à NNO-SSE

L'épisode compressif N-S à NNO-SSE, se matérialise par le jeu des décrochements senestres de direction N020 à N050, auxquels sont associés des décrochements dextres de directions N120 à N140 (figure 6, St9). Le caractère récent de ces décrochements est attesté par le fait qu'ils recoupent les structures développées lors des phases précédentes. Ils traversent l'ensemble du domaine interne, le domaine externe (Unité de Tanger) et le Domaine des flyschs. Dans la région de Tétouan, ils affectent aussi bien les sables jaunes pliocènes que les travertins quaternaires (Chaouni, 1999), ce qui permet d'attribuer un âge plio-quaternaire à cet épisode. Cet état de contrainte se poursuit actuellement, puisque les mécanismes au foyer des séismes les plus proches de la zone d'étude (tableau 1) montrent des axes de pressions sub-horizontaux orientés selon une direction N167 ± 10 (Udias *et al.*, 1986 ; Cherkaoui, 1991).

TABLEAU 1 Mécanisme au foyer des séismes enregistrés dans le Rif septentrional. *Focal mechanism of earthquakes recorded in northern Rif.*

Date	h-mn-s (heure, minute, seconde)	Lat. N	Lon. O	M (magnitude)	Direction P (axe de pression)	Réf.
15 nov. 1964	20-03-54	34,90	5,42	5,0	**177**	Cherkaoui (1991)
22 jan. 1968	07-19-07	35,08	5,66	4,4	**168**	Udias *et al.* (1986)
10 fév. 1980	03-39-44	35,29	4,94	4,0	**176**	Cherkaoui (1991),
22 juin. 1980	23-18-33	35,96	5,23	4,7	**159**	Udias *et al.* (1986)

4. RELATION ENTRE LA FRACTURATION ET LA RÉPARTITION DES SOURCES D'EAU

Le domaine interne de la péninsule de Tanger reçoit en moyenne annuellement entre 470 et 1100 mm de précipitations (Chaouni, 1999). La Dorsale calcaire formant barrière aux eaux atmosphériques, ces dernières ruissellent en quasi totalité jusqu'à la mer. Seules les pluies qui tombent sur la Dorsale calcaire sont susceptibles d'y être régularisées avec un certain retard, notamment par la présence d'un nombre important de résurgences qui livrent une eau d'excellente qualité à longueur de l'année. Nous avons recensés sur le terrain une centaine de sources (figure 7).

La corrélation entre le réseau de fracturation mis en évidence par l'analyse des données HRV et RSO et la répartition des sources d'eau recensées dans ce secteur (tableau 2 et figure 7) montre que : *1)* la majorité des sources est liée à l'aquifère des calcaires de la Dorsale du domaine interne ; *2)* il y a une concentration importante des sources dans la région de Tétouan, zone de convergence du dièdre compressif formé par les décrochements NE-SO prédominant dans la dorsale du Haouz (entre Tétouan et le détroit de Gibraltar) et les décrochements NO-SE prédominant entre Tétouan et Jebha ; *3)* 65 % des sources se localisent sur le front de chevauchement de la Dorsale calcaire, aussi bien à vergence ouest sur les nappes de flyschs et l'Unité de Tanger qu'à vergence est retrocharriée sur les Ghomarides et les Sebtides.

En fonction des débits (6 l/s à 350 l/s), toutes les sources mentionnées sur le tableau 2, assurent dans un premier temps, l'alimentation en eau potable des villages avoisinants et dans un deuxième temps, l'irrigation de quelques hectares de cultures essentiellement maraîchères.

5. DISCUSSIONS ET CONCLUSION

L'analyse des données satellitales HRV et RSO, complétée par les études de terrain, montrent que le domaine interne de la péninsule de Tanger est affecté essentiellement par un réseau de failles conjuguées décrochantes dextres de direction NO-SE et senestres de direction NE-SO, auxquelles sont associées des failles subméridiennes inverses, des chevauchements à double vergence ouest et est. La fracturation responsable de la structuration du domaine interne du Rif septentrional a été développée par les épisodes E-O et NE-SO de l'Aquitano-Burdigalien inférieur au Miocène supérieur. L'expulsion du domaine interne vers l'ouest guidée, au nord, par l'accident de Fahies (NE-SO) à jeu décrochant dextre et, au sud, par l'accident de Jebha (N080) à jeu décrochant senestre, ayant valeur de rampes latérales est liée au déplacement de la microplaque d'Alboran vers l'ouest (Leblanc et Olivier, 1984 ; Morel, 1988 ; Chalouan *et al.,* 1995). Au Plio-Quaternaire, la réactivation de cette fracturation par l'épisode NNO-SSE est surtout liée à la convergence Afrique-Europe (Ait Brahim, 1991 ; Chalouan *et al.,* 1995). Cette fracturation guide en surface les principaux cours d'eau : oueds Martil (E-O), Laou (NE-SO) et Talembote (NO-SE). Elle montre aussi une étroite relation avec la répartition des principales sources : 1) le long d'un couloir faillé de direction E-O (sources de Sadina, Samsa, Tarannakt, Tergal) ; 2) le long d'un couloir faillé de direction NE-SO (sources d'El Onsar et de Bayine) ; 3) surtout au niveau de nœuds tectoniques qui correspondent aux différentes combinaisons de croisements des accidents NE-SO, NO-SE, E-O et N-S (sources de Snawes, Zerka, Zinate, El Hamra, Nmilienne, Souyah, Ras Al Ma, Majjou et Chrafate).

L'analyse microtectonique effectuée dans le domaine interne rifain indique, pour la période plio-quaternaire, une direction N167 ± 10 pour la contrainte principale σ1, et une direction d'extension horizontale N077 ± 10. Ceci est en accord avec les mécanismes au foyer des séismes les plus proches de la zone d'étude (tableau 1), qui montrent des axes de pression sub-horizontaux orientés selon une direction N167 ± 10. En fonction de l'orientation de chaque famille de fractures par rapport à la contrainte principale σ1, son comportement hydraulique est présenté dans le cadre d'un modèle tectonique de circulation d'eau (figure 8). Les fractures parallèles à σ1 (N167 ± 10)

se comportent comme des fractures ouvertes (fentes de tension ou failles normales) favorisant le transfert des eaux. Celles perpendiculaires à σ1 (N077 ± 10) se comporteraient comme des fractures fermées, où l'eau circule difficilement. Les fractures de direction NE-SO et NO-SE auraient un comportement hydraulique plus imprévisible (semi fermées, semi ouvertes). Cependant, certaines sources (Saddina, Semsa, Tarennakt, Tergal, figure 7), sont situées le long de fractures E-O à ENE-OSO (F10, F11, F14, F19), lesquelles sont théoriquement fermées puisqu'elles sont perpendiculaires à la contrainte maximale σ1 actuelle. Étant donné que nous sommes en présence d'un système karstique, il faut prendre en considération les différentes directions de contraintes maximales (σ1) qui sont responsables de la structuration de la Dorsale calcaire. En effet, la dissolution préférentielle liée à la circulation des eaux le long des fractures ouvertes par les paléocontraintes néogènes (E-O à ENE-OSO et NE-SO) peut permettre actuellement le transit de l'eau lorsque ces fractures ne sont pas colmatées.

Ainsi, l'imagerie satellitaire HRV et RSO s'est avérée un outil adapté surtout à l'analyse de la fracturation dans une région où le caractère très accidenté et karstique de la Dorsale calcaire et caché par le couvert végétal ont constitué un handicap majeur pour suivre le tracé des failles sur le terrain. Le résultat de ce travail permettra de compléter et de détailler la fracturation sur les cartes géologiques au 1 : 50 000 du Rif interne. La relation fracturation-circulation des eaux mise en évidence et les cartes réalisées constituent un premier pas permettant d'orienter la prospection hydrogéologique dans cette partie de la péninsule de Tanger où la demande en eau ne cesse d'augmenter en raison de la forte expansion démographique. Cependant, l'absence de recouvrement imperméable confère aux bassins hydrogéologiques des sources de forts coefficients d'infiltrations qui induisent une vulnérabilité à la pollution. Ceci est attesté par une pollution fécale d'origine animale ou humaine allant de 2 germes/100 ml à 80 germes/100 ml, d'où, l'intérêt d'aménager les points de résurgences autour desquels on devrait établir des périmètres de protection. De plus, le besoin en eau qui ne cesse de croître indique que l'heure actuelle se doit d'être aux transferts de l'eau sur de longues distances, afin d'exploiter et de gérer de façon rationnelle et optimale de telles richesses.

TABLEAU 2 Relations entre les principales sources* et la fracturation du Rif interne. *Relations between the principal sources and the fracturing of internal Rif.*

Source numéro	**Nom**	**Type de contact**	*Débit moyen* (en l/s)
1	Bayine	Croisement de l'accident NE-SO de Kouf (F7) avec le front de chevauchement de la Dorsale du Haouz sur les terrains des Ghomarides.	38
2	El Onsar	Croisement de l'accident NE-SO d'Agla (F8) avec le front de chevauchement de la Dorsale du Haouz sur les terrains des Ghomarides.	45
3	Saddina	Croisement de l'accident NE-SO de Saddina (F10) avec le front de chevauchement du Haouz méridional sur les nappes de flyschs du domaine externe.	40
4	Semsa	Accident de Semsa (F11) orienté N070 à N080.	48
5	Zerka	Croisement de l'accident NE-SO d'Azla (F12) avec le front de chevauchement à vergence est de la Dorsale calcaire interne de Ferkennix sur les terrains paléozoïques des Ghomarides.	58
6	Snawes	Croisement de l'accident NE-SO de Tamezzakt (F13) avec le contact majeur N-S qui fait chevaucher les formations carbonatées de la Dorsale calcaire externe de Nator sur les grès de Beni Idder	55
7	Zinate	Contact chevauchant de la nappe de Nator sur la nappe de Tanger interne	49
8	Tarennakt	Nœud tectonique formé, d'une part, par le front de chevauchement sub-méridien de la Dorsale calcaire externe de Nator sur les terrains des unités intra-rifaines et, d'autre part, par l'accident E-O de Dar-Râai (F14).	65
9	El Hamra	Croisement correspondant au recoupement de l'accident NE-SO de Arejdal (F18) avec le contact chevauchant entre la Dorsale calcaire externe et les nappes de flyschs.	61
10	Nmilienne	Croisement des accidents N-S de oued Farda (F24) et NO-SE de oued Talembote (F21).	15
11	Tergal	croisement entre l'accident dextre NE-SO d'Amharchine (F19) et le front de chevauchement N-S de la Dorsale calcaire externe sur les unités intra-rifaines.	6
12	Souyah	Croisement formé par le chevauchement sub-méridien des dolomies de la Dorsale calcaire interne sur les terrains paléozoïques des Sebtides et par l'accident décrochant dextre NE-SO de l'oued Adelmane (F25).	350
13	Ras El Ma	Nœud tectonique formé par le contact chevauchant de la Dorsale calcaire externe sur les nappes de flyschs, l'accident N080 de Jbel El Kelaa (F22) et l'accident NE-SO de oued Tazarine (F23).	200
14	Majjo	Nœud tectonique formé par le contact chevauchant de la Dorsale calcaire externe sur les nappes de flyschs, l'accident décrochant dextre F25 orienté NE-SO et l'accident N-S F24.	57
15	Chrafate	Croisement formé par le front de chevauchement de la dorsale externe et les unités intra-rifaines et par l'accident NO-SE d'Ametrasse (F26).	250

**Nota bene* : les sources sont localisées sur la figure 7.

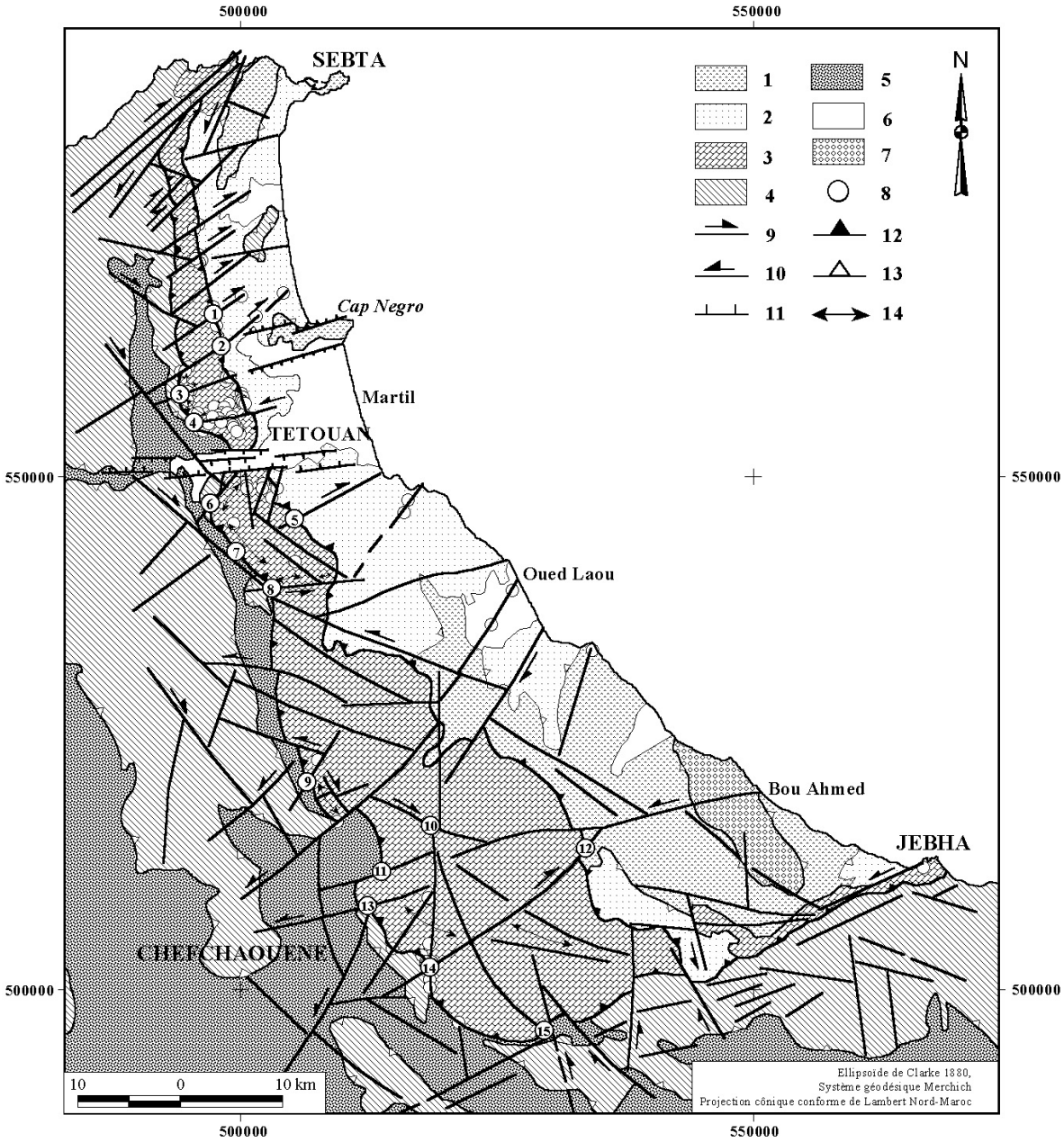


FIGURE 7 Répartition des sources en relation avec la fracturation et la géologie des différentes unités du Rif interne. 1– Sebtides ; 2– Ghomarides ; 3– Dorsale calcaire ; 4– Nappes de flyschs ; 5– Unités intra-rifaines ; 6– Néogène et Quaternaire ; 7– Péridotites de Beni Bouchraa ; 8– Source ; 9– Décrochement dextre ; 10– Décrochement senestre ; 11– Faille normale ; 12– Front de chevauchement ; 13– Front de nappe ; 14– Axe anticlinal. Les numéros des sources sont sur le tableau 2. *Distribution of the sources in relation to the fracturation and geology of the various units of Iternal Rif. 1– Sebtides ; 2– Ghomarides ; 3– Calcareous Dorsal ; 4– Flyschs Nappes ; 5– Intra-rifain Units ; 6– Neogene et Quaternary ; 7– Peridotites of Beni Bouchraa ; 8– Source ; 9– Dextral Strike-slip fault ; 10– Sinistral Strike-slip fault ; 11– Normal fault ; 12– Overlapping front ; 13– Nappes front ; 14– Anticline axis. Numbers of sources are in the table 2.*

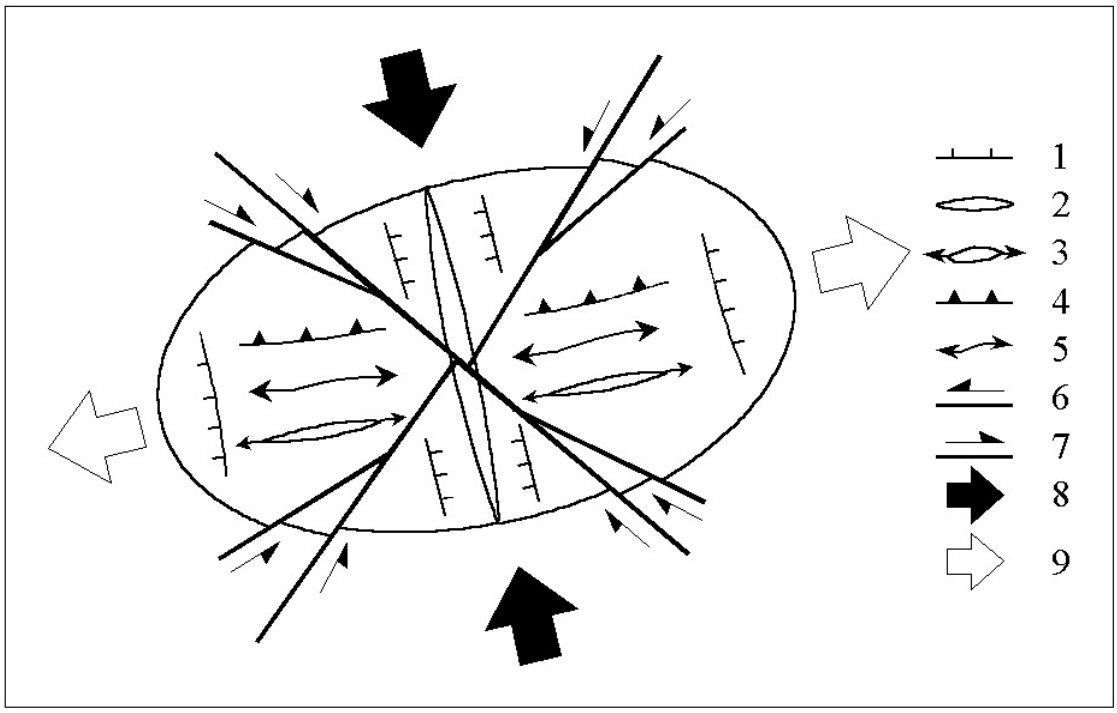


FIGURE 8 Modèle de circulation des eaux dans le cadre de la déformation actuelle du Rif interne. Fractures ouvertes : 1– Failles normales ; 2– Fente de tension ; 3– Fente d'extrados. Fractures fermées : 4– Failles inverses ; 5- Plis faillés. Fractures semi-fermées, semi-ouvertes : 6– Décrochement senestre ; 7– Décrochement dextre ; 8– Axe de compression σ1 (N167) ; 9– Axe de distension σ 3 (N077). *Model of circulation of water within the current deformation of Internal Rif. Opened fractures : 1– Normal fault; 2– Tension fissure; 3– Extrados fissure. Closed fractures: 4– Reverse fault ; 5– Folds faulted. Half-closed, half-opened fractures: 6– Sinistral Strike-slip fault; 7– Dextral Strike-slip fault ; 8– Compression axis σ1 (N167) ; 9– Extension axis σ3 (N077).*

Remerciements

L'organisation des images HRV de SPOT et la recherche ont été effectuées dans le cadre de l'Action Intégrée n° 219/ ST4 entre les facultés de sciences de Lemans (France) et de Rabat (Maroc). Nous remerciements vont à Jean-Marie Dubois et Q.U.J. Gwyn, de l'université de Sherbrooke, au correcteur anonyme pour leurs remarques justifiées et fort constructives, ainsi qu'au professeur Pierre Chotin de l'UPMC de l'université de Paris VI pour les images RSO d'ERS-1.

Références

Aït Brahim, L. (1991) Tectonique cassante et états de contraintes récents du Maroc Nord. Résultats de la cinématique des plaques Europe-Afrique et du bloc d'Alboran. Thèse de doctorat, Université Mohammed V, Rabat, 233 p.

Angelier, J. (1992) Sur l'incorporation des structures de pression et de tension dans la détermination des états de contrainte en tectonique cassante : un élargissement des méthodes d'inversion. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, n° 314, Paris, p. 1233-1238.

Chalouan, A., Benmakhlouf, M., Mouhir, L., Ouazani-Touhami, R. Saji et Zaghloul, M. N. (1995) Les étapes tectoniques de structuration alpine du Rif interne. Sociedad-Española de Estudios para la communication Fija a travès del Estrecho de Gibraltar, Madrid, p. 163-191.

Chaouni, A. (1999) Apport des données Landsat M.S.S., Radar ERS1-SAR ; Modèles Numériques de Terrain et morphométrie structurale de Terrain à la compréhension de la cinématique des principales failles de la Péninsule de Tanger depuis l'Oligocène supérieur à l'actuel. Thèse de doctorat, Université Mohamed V, Rabat, 284 p.

Cherkaoui, T.E. (1991) Contribution à l'étude de l'aléa sismique au Maroc. Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, 209 p.

Chotin, P., Ait Brahim, L., Deffontaines, B., Rudant J.-P. et Chaouni, A. (1995) Nouvelles données ERS1-SAR sur la reconnaissance du réseau de failles dans la péninsule de Tanger Maroc. Photo-interprétation, n° 1995/2, p. 129-152.

Faust Nickolas, L. (1989) Image Enhancement. Volume 20, Supplement 5, in A. Kent & J. G. Williams (réd.) Encyclopedia of Computer Science and Technology. Marcel Dekker. Inc., New York, 130 p.

Durand Delga, M., Hottinger, L., Marcais, J., Mattauer, M., Milliard, Y. et Suter, G. (1962) Données actuelles sur la structure du Rif. Livre à la mémoire du professeur Fallot, Mémoires hors série. Société Géologique de France, Tome 1, Paris, p. 399-442.

Griffon, J.C. (1966) La dorsale calcaire au sud de Tétouan. Notes et Mémoires du Service géologique, n° 184, Rabat, p. 149-224.

Kornprobst, J. (1974) Contribution à l'étude pétrographique et structurale de la zone interne du Rif. Notes et Mémoires du Service géologique, n° 251, Rabat, 256 p.

Leblanc, D. and Olivier, Ph. (1984) Role of strike-slip faults in the betic-rifian orogeny. Tectonophysics, n° 101, p. 345-355.

Morel, J. L. (1988) Évolution récente de l'orogène rifain et de son avant-pays depuis la fin de la mise en place des nappes. Mémoire Géodiffusion, n° 4, Paris, 584 p.

Nold, A., Uttinger, J. et Wildi, W. (1981) Géologie de la Dorsale Calcaire entre Tétouan et Assifane (Rif interne, Maroc). Notes et Mémoires du Service géologique, n° 300, Rabat, 223 p.

Olivier, P. (1984) Évolution de la limite entre zones internes et zones externes dans l'arc de Gibraltar (Maroc, Espagne). Thèse de doctorat, Université de Toulouse I, 229 p.

Udias, A., Espinosa, A.F., Mezcua, J., Buforn, E., Vegas, H., Nishenko, P., Martinez-Solares, J.M. and Lopez-Arroyo, A. (1986) Seismicity and tectonic map of the North Eurasian plate boundary (Azores-Iberia-Tunisia). U.S. Geological Survey OFSS, Denver, carte au 1 : 12 500 000.

Wernli, R. (1988) Micropaléontologie du Néogène post-nappes du Maroc septentrional et description systématique des foraminifères planctoniques. Notes et Mémoires du Service géologique, n° 331, Rabat, 266 p.

Wildi, W. (1983) La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. Revue de géologie dynamique et de géographie physique, n° 24, p. 201-297.