

TELEDETECTION DES STRUCTURES TECTONIQUES PAR L'ANALYSE DE LA TEXTURE D'IMAGE (SPOT, MAROC HERCYNIE)

LE CORRE CL., QUETE Y., GOUBIN O. ¹

RESUME

L'analyse des structures tectoniques repose en partie sur l'observation directe du terrain et sur des mesures d'orientation à la boussole (fractures, discontinuités lithologiques, foliations...). Cette information permet d'élaborer des documents cartographiques synthétiques intégrant les diverses stations et pouvant être interprétés en termes dynamique et cinématique. Nous avons voulu tester dans quelle mesure on pouvait obtenir cette information à partir des données satellitaires, en particulier lorsque la résolution spatiale est assez fine (SPOT) pour définir une "texture d'image" représentative des structures tectoniques locales. La méthode repose sur une évaluation de l'hétérogénéité du signal de luminance dans diverses directions autour d'un point du plan image et permet d'obtenir un "polygone de texture" dont la forme, la taille et l'orientation caractérisent la texture locale. En particulier si cette texture est anisotrope l'orientation du grand axe du polygone traduit l'information recherchée et peut être matérialisée par un petit segment sur l'image. L'ensemble de ces segments, obtenus en mode automatique ou supervisé, constitue un document cartographique très comparable à ceux obtenus par les mesures directionnelles au sol. L'exemple présenté correspond à une étude menée dans le cadre du "Programme National de Télédétection Spatiale" dans les Jebilet centrales (N de Marrakech) où une bonne connaissance préalable du terrain permet de valider les résultats.

I - INTRODUCTION

Dans les zones tectonisées la déformation des roches se traduit, aux diverses échelles, par des structures rupturales ou ductiles. Les structures rupturales (fracturations, failles) sont localisées et discontinues tandis que les structures ductiles (stratification plissée, schistosité, foliation) sont plus continues dans l'espace. L'analyse des structures ductiles est essentiellement basée sur l'observation directe du terrain et sur des mesures d'orientation à la boussole conduisant à l'élaboration de cartes structurales venant compléter les cartes géologiques classiques (contours lithologiques). On peut en particulier mesurer systématiquement dans un grand nombre de stations l'orientation du litage sédimentaire ou encore celle de la schistosité ou de la foliation métamorphique

¹Centre Armoricaïn d'Etude Structurale des Socles (CNRS/INSU) Université de Rennes - Campus de Beaulieu - 35042 RENNES.

dans les domaines plus profondément érodés. Ces mesures structurales sont parfois synthétisées par des cartes de "trajectoires" intégrant les diverses orientations mesurées localement et peuvent ensuite être interprétées en termes dynamiques ou cinématiques (Fig.1).

La télédétection des grandes structures (limites lithologiques, failles) est réalisable à partir des images satellitaires soit de manière oculaire directe soit par le traitement automatique des données numériques grâce aux diverses méthodes d'extraction (filtrages, compositions colorées...). Cependant, avec les imageurs de haute résolution spatiale (SPOT, LANDSAT-TM), on accède maintenant à une information dont l'échelle devient compatible avec celle des observations du géologue sur le terrain (10 à 30 m). Dans ces conditions il est possible d'envisager de télédétecter la trace au sol des marqueurs de la déformation ductile grâce à l'analyse de la "texture d'image" induite à l'échelle de la dizaine de pixels.

L'objectif essentiel de cet article est : 1) de proposer une méthode d'extraction des paramètres significatifs de la texture locale basée sur l'hétérogénéité du signal dans les diverses directions du plan image ; et 2) d'appliquer ce traitement aux structures tectoniques dans une région-test bien adaptée (sol et végétation rares, marqueurs abondants...) et préalablement bien étudiée sur le terrain (Jebilet centrales, N de Marrakech, Maroc hercynien).

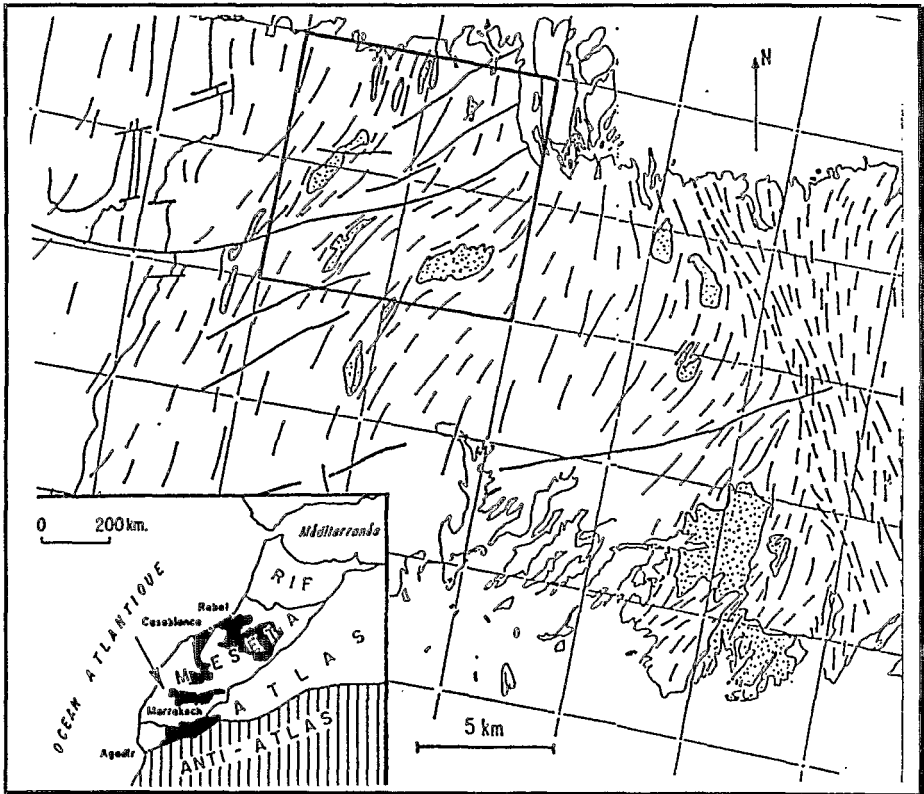


Fig.1 - Carte structurale avec trajectoires de déformation (foliation) des Jebilet Centrales (Synthèse d'après Huvelin 1977, Lagarde et Choukroune 1982, Chemsseddoha 1986, Aït Tahar 1987, Le Corre et Saquaque 1987, Essaifi 1989, Lagarde 1989). La zone encadrée correspond aux figures 5 et 6.

II - TEXTURE DES IMAGES SATELLITAIRES

1 Texture d'image et tectonique

La notion de "texture", souvent assez mal définie (HARALICK, 1979; POUUDIOGO, 1988), recouvre diverses approches selon que l'on s'intéresse aux "objets" ou primitives et à leur règle de placement (textures structurées), ou à la répartition statistique des niveaux de gris dans l'image (textures aléatoires). Dans le domaine des images satellitaires utilisables en tectonique ductile, l'approche "objet" ne nous paraît pas la plus fructueuse. En effet, même s'il est possible de voir des "objets" géologiques, ils sont variés et il est difficile de définir un motif se répétant suivant une règle précise sauf éventuellement dans des plages localisées à lithologie homogène. En revanche, à l'échelle de la dizaine de pixels, il existe parfois une texture fine non isotope pouvant traduire une structure tectonique locale souvent bruitée par d'autres effets (ombre, géomorphologie, couverture pédologique, végétation...) introduisant un flou dans la perception des objets.

Dans les zones tectonisées l'origine de cette texture locale plus ou moins linéaire est surtout liée à la trace au sol de marqueurs lithologiques stratifiés peu épais (métriques à décimétriques) mais dont les signatures spectrales sont contrastées. Il peut s'agir aussi d'une structuration, à l'échelle de l'affleurement, liée à la déformation ductile (schistosité, foliation, cf. plan d'aplatissement) mise en évidence indirectement par l'effet de l'altération et de l'érosion différentielles localisant le ruissellement ou la végétation. Lorsque la trace au sol des marqueurs lithologiques et celle de la foliation sont parallèles, ce qui n'est pas généralisable mais souvent le cas dans les zones intensément déformées, tous ces effets directs ou indirects induisent une texture d'image linéaire marquée. L'orientation de cette texture locale est parfois détectable visuellement et on peut alors extraire cette information manuellement sur photos. Ce travail reste fastidieux et la texture est souvent trop fine ou imprécise pour être convenablement détectée visuellement. C'est pour résoudre ce problème que nous avons développé une méthode et des outils logiciels permettant d'extraire plus facilement l'information structurale recherchée dans les images.

2 - Méthode du polygone de texture

Le principe repose sur l'analyse du signal de luminance dont les variations autour d'un point traduisent les propriétés géométriques locales de la texture. Inspirée de BARBA et RONCIN (1984) la méthode consiste à tester l'hétérogénéité du signal de luminance dans différentes directions du plan image autour du point de mesure. Si $[X, Y]$ est le plan image et Z la luminance on peut considérer le signal à partir du point M dans une direction X' définie par l'angle Θ_i (fig.2). La distance élémentaire dl entre deux points de cette courbe de luminance est telle que :

$$dl = [(kdx)^2 + (dz)^2]^{1/2}$$

où k est un facteur d'échelle liant les variations de distance (x') et de luminance (z).

La longueur $\mu = \sum dl$ (intégrale curviligne) de la courbe de luminance entre le point initial (M) et un point situé à une distance A_i caractérise la plus ou moins grande hétérogénéité de la texture. Réciproquement, si on se fixe la longueur μ , on peut calculer la corde $A_i = \sum dx'$ qui sera d'autant plus courte que la texture est hétérogène dans la direction explorée. La mesure de la corde A_i est réalisée dans différentes directions Θ_i du plan image [X,Y], par exemple tous les $\Pi/8$. Il convient naturellement de rééchantillonner convenablement le signal en fonction de l'orientation par rapport à la maille des pixels.

L'ensemble des valeurs A_i permet de définir une "étoile" ou un "polygone" que l'on peut symétriser (fig.2). Finalement, en chaque point du plan image, on peut obtenir un "polygone de texture" ou "forme texturale" (DANIEL et al. 1987, 1988), plus ou moins ovoïde, dont la forme, la taille et l'orientation caractérisent la texture locale. L'information contenue dans chaque polygone de texture peut être simplifiée en calculant l'orientation du moment d'inertie principal, le rapport d'excentricité et la surface qui traduisent l'orientation de l'anisotropie de texture et son "intensité".

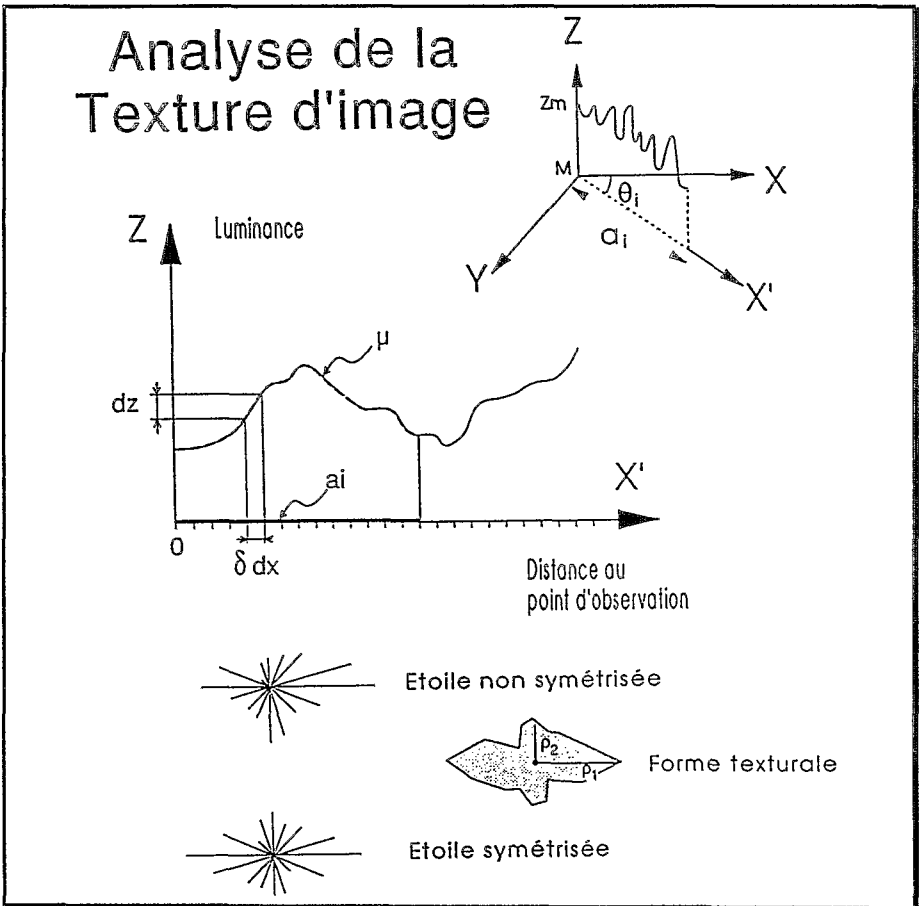


Fig.2 - Principe de la méthode d'analyse de la texture d'image autour d'un point et "forme texturale" déduite de l'ensemble des valeurs A_i (voir texte).

Ces paramètres sont sensibles aux valeurs utilisées pour les constantes k et μ . Le facteur d'échelle k , lorsqu'il augmente tend à lisser les variations, ce qui revient à rendre la texture plus floue et à limiter la distance d'exploration (Ai moyen). Réciproquement, un k petit souligne les variations locales, la situation limite étant d'évaluer l'hétérogénéité du signal par la somme des variations dz ($k = 0$). L'expérience montre qu'une valeur égale à 0,1 ou 2 donne des résultats équilibrés. Le choix le plus important est celui de la valeur de μ car elle fixe la taille des fenêtres d'exploration. Un μ petit conduit à analyser la texture très localement (quelques pixels) autour du point de mesure. Au contraire un μ très grand agrandit la fenêtre mais avec le risque d'obtenir un résultat de plus en plus flou si la texture n'est pas homogène à toutes les échelles. De ce point de vue, l'analyse de quelques zones d'image en faisant varier la valeur de μ est intéressante (Fig. 3 et 4). Pour une zone à texture isotrope (Fig.4), le rapport d'excentricité (R) reste toujours très faible (<1.1) tandis que la direction (D) varie beaucoup au gré des structures locales rencontrées. Dans les zones à texture bien orientée (Fig.3), la valeur de R passe par un maximum pour une valeur de μ correspondant à l'échelle de la texture locale dominante, tandis que les variations de D restent modérées ($\pm 5^\circ$) dès que μ est assez grand pour lisser les accidents très locaux. Si la texture est homogène sur une longue distance R reste élevé mais l'augmentation de μ a généralement tendance à bruite l'information. Le cas particulier d'une route plus ou moins perpendiculaire aux structures tectoniques du terrain est significatif (Fig.4). Ainsi l'effet de la route est très sensible pour une valeur de μ faible (10-15) compatible avec l'échelle de la perturbation (1 ou 2 pixels), puis progressivement, à mesure que μ augmente, la structure tectonique reprend de l'influence mais n'est clairement détectée que pour un μ supérieur à 20.

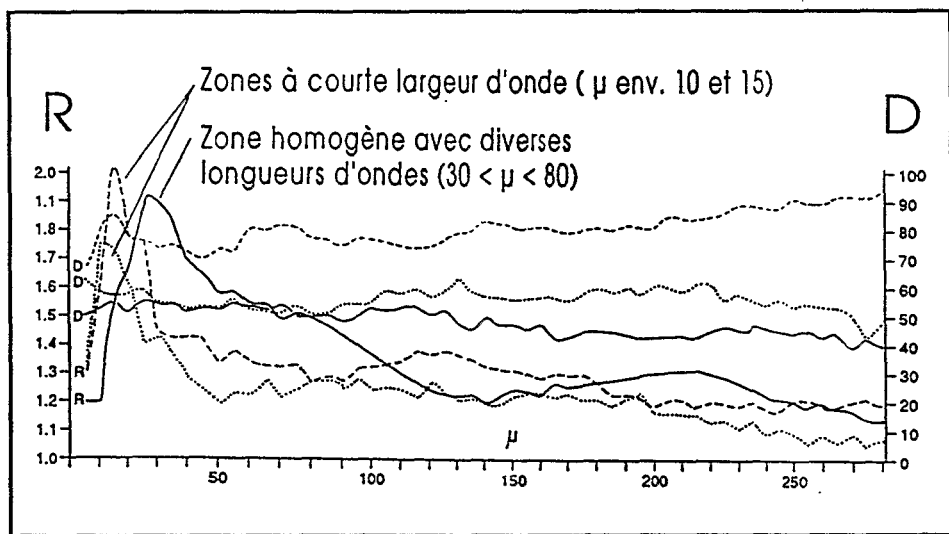


Fig.3 - Courbes d'évolution de la direction (D) et du rapport d'excentricité (R) pour des valeurs croissantes de μ dans diverses zones d'image : zone homogène aux diverses échelles (trait plein), zones homogènes sur une courte distance (tireté et pointillé). La valeur $\mu = 50$ correspond à une distance d'exploration de l'ordre de 300 m au sol.

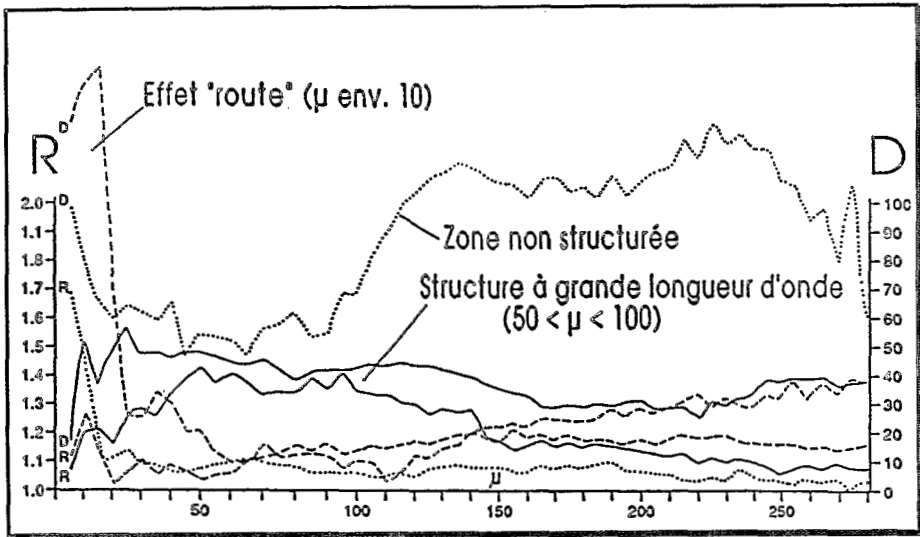


Fig.4 - Courbes d'évolution de la direction (D) et du rapport d'excentricité (R) pour des valeurs croissantes de μ dans diverses zones d'image : zone isotrope où D est très variable et R toujours très faible (pointillé), zone structurée à grande longueur d'onde (trait plein), zone avec une route perpendiculaire aux structures tectoniques introduisant une perturbation pour les faibles valeurs de μ (tireté). La valeur $\mu = 50$ correspond à une distance d'exploration de l'ordre de 300 m au sol.

Ces tests montrent qu'en choisissant la valeur de μ on détermine l'échelle de la texture que l'on veut extraire. Pour les problèmes de tectonique ductile analysés ici, une valeur comprise entre 15 et 50 permet d'extraire convenablement l'information recherchée.

III - APPLICATION AUX JEBILET CENTRALES

Au Nord de Marrakech, le Massif des Jebilet (Fig.1), d'âge paléozoïque, constitue l'un des témoins de l'orogénèse hercynienne au Maroc (PIQUE et MICHARD, 1989). Dans la zone centrale de ce massif affleurent des terrains carbonifères (schistes et volcanites du Sarhlef) associés à de petites intrusions endogènes acides ou basiques déjà bien cartographiées (HUVELIN, 1977). Cet ensemble est affecté par une intense déformation ductile (plissement et schistosité) synchrone d'un métamorphisme de bas ou moyen grade associé à la mise en place de granites syntectoniques tardicarbonifères (LAGARDE et CHOUKROUNE, 1982 ; LE CORRE et SAQUAQUE, 1987 ; LAGARDE, 1989 ; ESSAIFI, 1989). A cette déformation ductile se superpose, en fin d'évolution, une tectonique cassante (Fig. 1).

Les données utilisées pour tester la méthode sur cette région correspondent à une image panchromatique (P) et à une image multispectrale (XS) de la même

scène SPOT 30-286 acquises le 26 août 1987¹. On peut utiliser soit la dynamique initiale des images (40/120), soit une dynamique étalée ou encore une image recalculée en composante principale à partir des trois canaux XS1, XS2 et XS3. Deux procédures différentes automatique ou supervisée sont utilisables.

- Procédure supervisée

L'opérateur peut fixer la valeur de μ et choisir le point de mesure sur l'image en fonction de ses propres critères. Le point est localisé à la "souris" et un zoom de la zone permet de bien visualiser la texture locale. Le polygone de texture calculé est affiché ainsi que les valeurs des paramètres d'orientation (D), de rapport d'excentricité (R) et de surface (S) qui lui sont associés. La mesure est alors retenue ou rejetée en particulier si la valeur de R semble trop faible (<1.1) pour être significative d'une orientation préférentielle locale. Si la mesure est retenue, l'axe principal d'inertie du polygone est matérialisé sur l'image par une petite barbule convenablement orientée (Fig.5). Une telle démarche qui pourrait sembler subjective est en réalité celle du géologue sur le terrain qui ne fait pas sa mesure n'importe où, mais choisit un affleurement de qualité représentatif de son échelle d'observation (roche en place, non altérée, sans perturbation locale...).

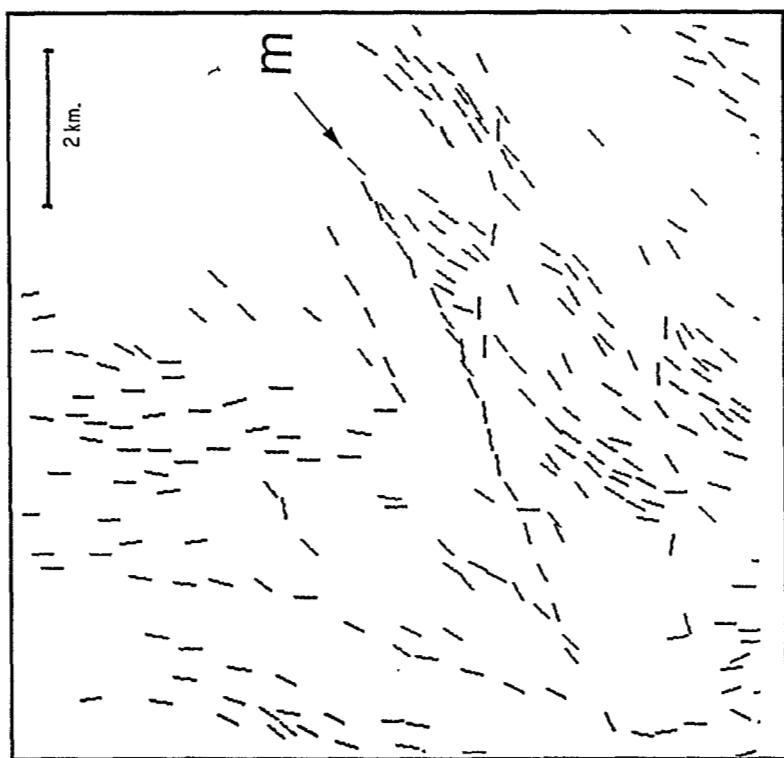


Fig.5 - Exemple de carte structurale obtenue en mode supervisé dans la zone encadrée de la figure 1. La flèche indique l'extrémité NE de la faille de Mesret (M) à mouvement dextre.

¹Financement obtenu dans le cadre d'un projet du Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS) en 1989 et 1990.

Cette procédure est également intéressante puisqu'elle permet d'analyser des structures d'échelles différentes en fonction du choix de μ et sur des points ou zones précises selon la thématique envisagée. Par exemple, l'analyse d'une structure très localisée liée à une faille permet de montrer le sens du mouvement (Fig.5, faille dextre de Mesret). Par ailleurs, l'ensemble des mesures retenues constitue un document comparable à celui réalisé par un géologue ayant reporté ses mesures sur une carte (Fig.1 et 5), tandis que les autres paramètres calculés (R, S) peuvent constituer des fichiers utilisables (voir ci-après).

- Procédure automatique

Le caractère fastidieux du mode supervisé, dès que l'on désire obtenir une bonne densité de mesure, conduit à automatiser la procédure. Il faut choisir une valeur m adaptée aux structures recherchées soit par exemple comprise entre 20 et 30 pour éviter les accidents trop locaux mais sans dégrader l'information. Le pas de la grille de mesure est choisi en fonction du lissage désiré et du temps de calcul toléré. Avec un m de 20 et un pas de 3 pixels on obtient un résultat acceptable. Ce pas étant trop petit pour permettre une visualisation de toutes les barbules directionnelles, on peut faire un histogramme dans une fenêtre et prendre la classe la plus fréquente comme caractéristique. L'ensemble des barbules constitue une carte de trajectoire de texture (Fig.6). Dans la zone analysée ce document peut être comparé à celui obtenu en mode supervisé (Fig.5) et à la synthèse des mesures faites sur le terrain par les géologues (Fig.1). La similitude entre ces documents (direction générale des barbules, rotation d'ensemble, effets des discontinuités...) valide la méthode proposée. Cependant la procédure automatique ne discrimine pas l'origine des structures initiant la texture d'image et le résultat peut localement être bruité par des structures non tectoniques.

Enfin, les autres paramètres calculés (R, S), peuvent être exploités par exemple sous la forme d'une carte du rapport S/R, permettant de discriminer les zones à la fois hétérogènes (cf. rugosité) et à texture très orientée, c'est-à-dire de quantifier l'"intensité" des textures locales.

IV - CONCLUSIONS

Dans certaines conditions d'affleurement favorables, comme dans les Jebilet centrales (relief modéré, marqueurs lithologiques peu épais, végétation et sol rares...) la méthode développée constitue une sorte de "téléboussole" utilisable en tectonique. En fixant la valeur du paramètre μ on peut choisir l'échelle des structures recherchées. Les documents obtenus, en mode supervisé ou automatique, sont comparables à ceux réalisés à l'aide des mesures directes sur le terrain. Les cartes d'intensité de texture valorisent également la méthode en permettant l'extraction de zones structurales pouvant être associées à un gradient de déformation.

Cependant il reste évident, comme pour la cartographie des contours lithologiques, que cette approche basée sur les données satellitaires ne saurait dispenser le praticien de l'observation directe sur le terrain pour bien identifier ce que l'on mesure. Il s'agit également d'une analyse 2D ne donnant aucune information sur le pendage des structures que seules les données stéréoscopiques avec les modèles numériques de terrain pourraient nous apporter. Mais déjà

comme traitement de routine préliminaire ou pour combler les lacunes de mesures sur des zones difficiles d'accès, notre approche est justifiée et serait probablement applicable à d'autres thématiques que la tectonique, comme par exemple l'hydrographie ou les structures agraires.

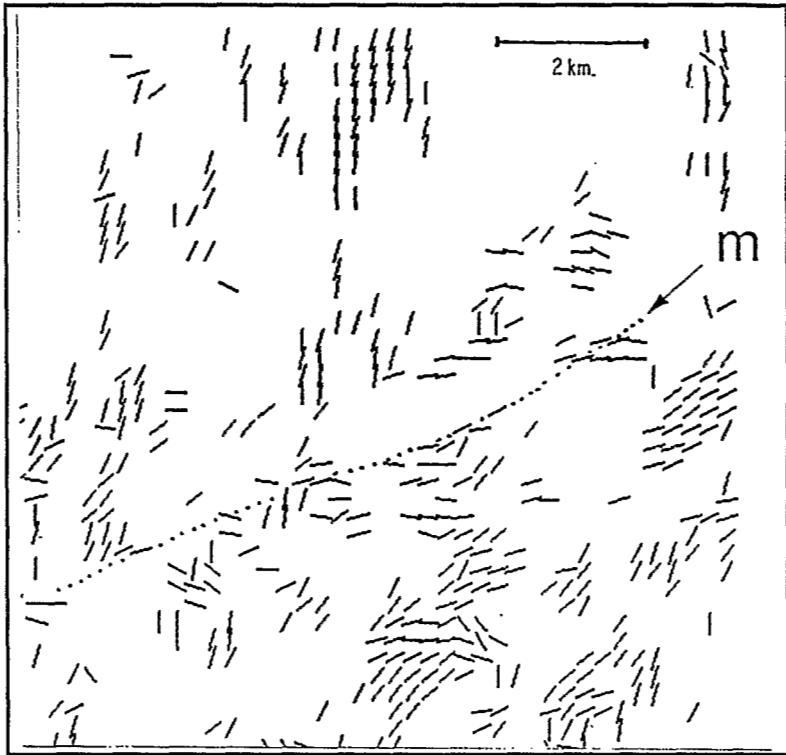


Fig.6 - Exemple de carte structurale obtenue en mode automatique dans la zone encadrée de la figure 1. Le résultat reste comparable aux figures 1 et 5 mais certaines structures d'origine non tectonique peuvent localement être représentées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AIT TAHAR M. (1987). Géométrie et cinématique de la déformation post-viséenne autour des gabbros des Jebilet : Kettara et Jbel El-Harcha (Maroc). Thèse 3ème cycle, Université Marrakech : 1-144.
- BARBA D., RONSIN J. (1983). New method in texture analysis in the context of image segmentation. Eupsico 83 - Erlangen : 283-286.
- CHEMSSEDDOHA A. (1986). Cisaillement ductile et granites syntectoniques dans les Jebilet centrales : l'exemple du pluton hercynien des Oulad-Ouaslam (Jebilet, meseta sud-marocaine). Thèse 3ème cycle, Université Rennes : 1-155.

- DANIEL Th., GAPAIS D., LABIT C., LE CORRE C. (1987). An application of textural and morphological processing to deformation analysis within granitic rocks. *Acta Stereologica*, 6 : 1041-1046.
- DANIEL T., GAPAIS D. & LE CORRE C. (1988). Application du traitement de l'image à l'analyse de la déformation des granites. *Sci. Géol. Bull.*, 41, 2 : 143-161.
- ESSAIFI A. (1989). Le magmatisme acide-basique des Jebilet centrales (Maroc), ses relations avec la déformation synschisteuse, implications géodynamiques. Thèse, Université Marrakech : 1-153.
- HARALICK R.M. (1979). Statistical and structural approaches to textures. *Proc. IEEE* : 786-804.
- HUVELIN P. (1977). Etude géologique et géologique du massif hercynien des Jebilet (Maroc occidental). Notes et mémoires du service géologique du Maroc, 232 bis : 1-307.
- LAGARDE J.L. (1989). Granites tardi-carbonifères et déformation crustale : l'exemple de la Méséta marocaine. Thèse Univ. Rennes et Mémoires et Documents du CAESS, 26 : 1-342.
- LAGARDE J.L. & CHOUKROUNE P. (1982). Cisaillements ductiles et granitoïdes syntectoniques : l'exemple du massif hercynien des Jebilet (Maroc). *Bull. Soc. Géol. France*, XXIV, 2 : 299-307.
- LE CORRE C. & SAQUAQUE A. (1987). Comportement d'un système pluton-encaissant dans un champ de déformation régional : le granite du Bramram (Jebilet, Maroc hercynien). *Bull. Soc. Géol. France*, III, 4 : 665-673.
- PIQUE A., MICHARD A. (1989). Moroccan Hercynides : a synopsis. The paleozoic sedimentary and tectonic evolution at the northern margin of West Africa. *Amer. Jour. of Science*, 289 : 286-330.
- POUDIOUGO P. (1988). Texture : un état de l'art. Journées Télédétection, in Colloque et Séminaire, Edition ORSTOM : 167-177.