

APPORT DES OPÉRATEURS DE MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE A L'EXTRACTION DES FAILLES À PARTIR D'IMAGES SPOT PANCHROMATIQUE - EXEMPLE DE LA FAILLE DE HUALCA-HUALCA (SUD PEROU)

Annick LEGELEY-PADOVANI

ORSTOM, laboratoire de Géophysique
34, rue Henri Varagnat, 93143 Bondy, France

et Catherine MERING

ORSTOM, 213, rue La Fayette, 75010 Paris, France
Département de Géotectonique, UPMC
4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France

RÉSUMÉ

On cherche ici à cartographier à partir d'une image SPOT Panchromatique, les principales failles récentes dans une zone sismiquement active du Sud Pérou, dans la zone de subduction de la plaque Nazca sous la plaque Sud Américaine. Nous comparons les traitements réalisés à partir des filtres gradients directionnels et des filtres morphologiques.

Les failles ne peuvent être extraites par une simple étape de seuillage après l'application d'un seul filtre. Nous montrons ici comment réaliser le débruitage grâce au procédé de « reconstruction géodésique ». Suivant les cas, il faudra faire varier les paramètres de cette procédure en utilisant les masques et les marqueurs adéquats.

Mots clés : Carte structurale - Failles actives - Morphologie mathématique - Géodynamique andine.

1. INTRODUCTION

Après les photographies aériennes, les images satellitales ont été utilisées pour produire des cartes structurales. La reconnaissance des failles récentes sur les images se justifie tout particulièrement dans les zones tectoniquement actives. En effet, pour ces régions, l'activité sismique se traduit en général par une réactivation de ces failles. Par conséquent, la cartographie des failles est une étape indispensable pour l'étude des risques géologiques dans ces régions.

L'exploitation des images satellitales à haute résolution en vue d'identifier les structures géologiques se fait généralement par photo-interprétation. Cependant, les nouveaux développements de l'analyse d'image numérique ouvrent la voie à une « photo-interprétation assistée par ordinateur » qui

permet la mise en évidence des traits structuraux puis leur extraction. Dans notre esprit, la photo-interprétation assistée par ordinateur est une activité qui consiste à traiter les images numériques par des méthodes de traitement d'images de façon à aboutir à deux types de résultats. Tout d'abord on cherche à obtenir une image numérique où la lisibilité des objets à cartographier est améliorée ; les traitements qui permettent d'obtenir de tels résultats sont en général des filtres passe bande ou des filtres morphologiques numériques. On appelle cette étape la mise en évidence des objets. Le deuxième type de résultat, le plus difficile à obtenir, est l'extraction des objets sous forme d'une image binaire. Cette extraction est à mettre en parallèle avec le dessin effectué par le photo-interprète qui analyse la photographie pour produire une carte.

Aussi bien la mise en évidence que l'extraction consiste à opérer des séquences de traitements permettant d'arriver à un résultat optimum dans chacun des cas. Les traitements utilisés sont parfaitement reproductibles et leur choix est justifié à chaque étape. On verra que dans la pratique les traitements *ad hoc* c'est-à-dire dépendant de l'image utilisée sont très largement minoritaires dans les méthodes présentées ici. Les séquences proposées peuvent donc être aisément transposables à la manipulation d'autres images satellitales si on a pour but d'extraire les mêmes types d'objets, ici des failles. Contrairement à la photo-interprétation classique, la photo-interprétation assistée par ordinateur est une démarche reproductible puisque l'opérateur justifie les traitements qu'il a choisis ainsi que leur séquençement sur l'exemple traité. L'autre avantage de cette démarche sur la photo-interprétation c'est de produire des cartes qui peuvent être exploitées de différentes manières tout comme les cartes traditionnelles. S'agissant d'images numériques, elles peuvent être comparées à d'autres données géocodées à l'inté-



rieur d'un système d'informations géographiques (SIG). Par exemple, dans le cas traité ici, l'intérêt serait de combiner la carte structurale issue du traitement des images avec la carte des épacentres des séismes de la région ou d'autres données sismologiques (localisation et intensité des séismes de surface).

Sur les images satellitales des capteurs passifs, les structures géologiques n'ont pas de réflectance spécifique mais une morphologie caractéristique, c'est pourquoi les méthodes de classification multispectrale sont de peu d'utilité pour leur cartographie. Sur les images SPOT Panchromatique les structures géologiques sont détectées grâce à l'ombre portée résultant de l'illumination rasante sur le relief à l'heure de la prise de vue. C'est en particulier le cas ici des escarpements associés au rejet des failles normales.

Dans l'exemple qui suit, nous tentons de montrer comment traiter ces images par les méthodes numériques afin d'identifier ces structures. Nous avons recours ici principalement aux méthodes de filtrage par convolution avec des gradients directionnels ainsi qu'aux outils de la morphologie mathématique et en particulier aux transformations *morphologiques et géodésiques*, ces dernières ayant les propriétés de conserver la *morphologie* des structures à cartographier.

Nous montrons ici un exemple de mise en évidence et d'extraction de failles récentes perceptibles sur une scène de SPOT Panchromatique sur les Andes Centrales (région d'Arequipa au Sud du Pérou).

2. OBJECTIFS ET DONNEES

La scène SPOT étudiée est localisée au sud du Pérou dans la région d'Arequipa. Elle correspond au versant Pacifique de la Cordillère Occidentale (**Figure 1**). Les Andes du sud du Pérou et du nord du Chili présentent des traits géodynamiques particuliers comparés au reste de la chaîne des Andes. Du point de vue tectonique la zone étudiée est active depuis le Mésozoïque jusqu'au temps actuel en relation avec la fosse péruvienne où la plaque de Nazca passe sous la plaque Sud Américaine. De grandes failles normales (100 à 200 km de long) traversent le substrat volcanique de la zone d'Arequipa (Huaman-Rodrigo *et al.*, 1993) à l'aplomb d'une zone sismiquement active (Dorbath *et al.*, 1990). Le choix de cette région a été guidé par cette activité tectonique intense et encore actuelle.

La scène SPOT étudiée (KJ 661-381) a été acquise le 1er juillet 1990 à 11 heures du matin, heure locale en mode Panchromatique. Au moment de l'acquisition, l'élévation solaire, au centre de la scène, était de $42^{\circ}7'$ et l'azimut était de $34^{\circ}9'$; l'illumination de la scène est donc clairement NE. Deux failles (**F**, **planche 1**, page 190) sont bien exposées au coin NO de la sous-scène étudiée. La

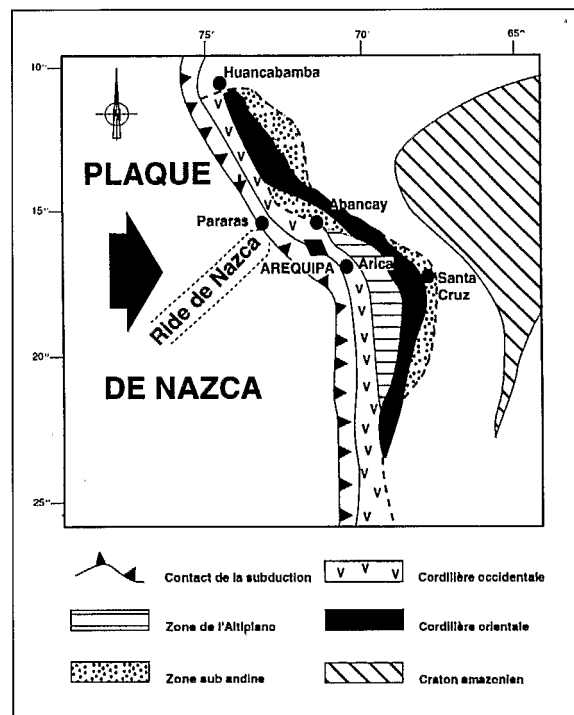


Figure 1 : Carte montrant la position de la zone d'étude dans la région d'Arequipa. La flèche noire montre la convergence entre les plaques de Nazca et sud américaine.

teinte sombre et l'épaisseur des lignes interprétées comme des failles dépend à la fois de la géomorphologie des escarpements et des conditions d'éclairement résultant de l'illumination sur le relief (Mering et Chorowicz, 1993). Nous avons sélectionné un extrait de cette vue SPOT (**Planche 2**, page 191) où les failles sont mises en évidence par l'ombre portée, car à cette heure de la journée (11 heures am) l'éclairement solaire est bas en hiver ce qui accentue le relief. Les vues obliques donnent en général des informations plus pertinentes sur le relief que les vues verticales c'est pourquoi nous avons choisi une vue SPOT prise à 20° de la verticale. De notre point de vue, si l'on cherche à détecter des escarpements, il est préférable de choisir une scène Panchromatique en visée oblique avec un éclairage rasant (mois d'hiver) dans la zone géographique considérée.

Les objets géomorphologiques que l'on veut détecter sont des escarpements de quelques mètres. Le pouvoir de résolution de SPOT Panchromatique (10 m) est compatible avec cet objectif.

Traditionnellement, la détection des failles sur les images satellitales se fait par photo-interprétation visuelle. De façon générale, la perception visuelle ne suffit pas à détecter systématiquement toutes les formes du relief significatives telles que les failles. D'autre part, l'effort visuel peut ne pas être continu dans l'analyse de toutes les parties d'une image, alors que les méthodes numériques traitent l'image de façon homogène et les détails sont mis en évidence de la même façon dans toute

l'image (Callot *et al.*, 1994). De plus le traitement peut être reproduit automatiquement.

Notre objectif, ici, est de proposer une méthode de traitement numérique permettant la mise en évidence et la cartographie des failles sur cette image comme proposé sur la figure 2. L'exposé détaillé de cette méthode permet son application à d'autres images.

3. METHODOLOGIE

La méthodologie de filtrage détaillée ici a été testée sur la sous scène localisée à l'ouest du volcan Hualca-Hualca (Figure 2).

L'interprétation structurale consiste à distinguer les lignes sombres continues correspondant aux escarpements de failles, des formes représentant les coulées de lave ou les pentes abruptes le long des vallées incisées.

Deux familles de filtres ont été utilisées et comparées pour l'étape de mise en évidence des failles :

- les filtrages par convolution avec les gradients directionnels correspondant aux directions principales des failles ;
- les filtrages morphologiques numériques.

Les résultats seront a priori différents : les filtres gradients vont souligner tous les linéaments de direction choisie et vont sans doute souligner de façon plus efficace les parties rectilignes de ces linéaments. Par contre, les filtres morphologiques souligneront les linéaments en fonction de leurs niveaux de jus et de leur épaisseur sur l'image originelle. Nous comparerons les résultats obtenus lors de cette étape de mise en évidence des failles.

L'étape d'extraction est plus délicate; elle fait appel à la capacité d'éliminer le bruit restant après le seuillage effectué sur les images en teintes de gris. Il

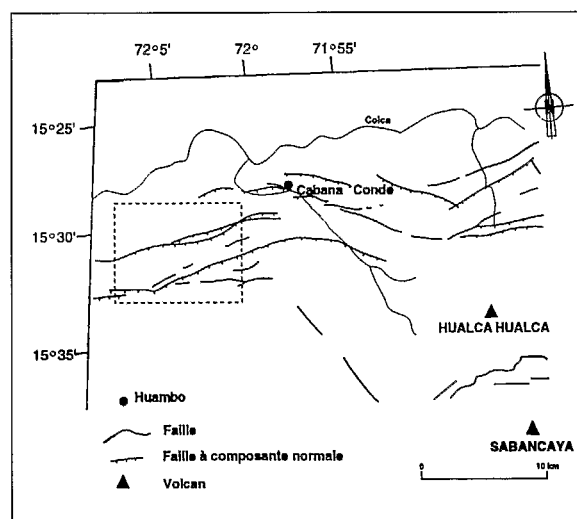


Figure 2 : Carte de la photo interprétation des failles sur l'image SPOT (Mering *et al.*, 1996). Le rectangle en pointillé donne la localisation de la sous-scène analysée.

faut donc effectuer des transformations de l'image binaire qui permettent d'éliminer les objets n'appartenant pas à l'ensemble recherché tout en conservant l'intégralité des objets recherchés. Les opérations simples qui permettent d'obtenir de tels résultats sont les opérations de la *morphologie mathématique*, nommées *reconstructions géodésiques*.

Une *reconstruction géodésique* consiste à redéfinir les entités sur une image binaire en utilisant une image « marqueur » qui représente un sous ensemble de l'image de départ appelée image « masque ». Les entités à conserver sont représentées par l'image « marqueur » ; cette image est dilatée jusqu'à *idempotence* c'est-à-dire jusqu'à ce que l'image résultat ne change plus. L'image ainsi reconstruite contient les entités connexes de l'image de départ dont les contours sont complètement restitués et ne contient plus les entités connexes non marquées (Legeley *et al.*, 1995).

Classiquement, le marqueur utilisé dans le cas de la *reconstruction géodésique* binaire est une érosion. Dans ce cas, les entités sont éliminées en fonction de leur épaisseur. En effet, la *reconstruction géodésique* restaure les entités connexes qui contiennent l'ensemble marqueur et élimine les entités absentes de cet ensemble. On peut utiliser un autre ensemble marqueur que l'érosion si le critère de séparation entre « bruit » et ensemble à restaurer n'est pas uniquement l'épaisseur des entités. Le problème consistera alors à choisir l'image marqueur qui permet de conserver les entités significatives.

4. DESCRIPTION DES PRIMITIVES DE TRAITEMENT D'IMAGE UTILISÉES

Une grande part des traitements de morphologie mathématique binaire utilisés ici ont été exposés dans Legeley *et al.* (1995) à propos de la cartographie des coulées de lave à partir d'images SPOT.

Dans l'étude présentée ici, qui concerne plus particulièrement l'extraction des failles, nous avons eu recours à une nouvelle famille de traitements que sont les gradients directionnels et les transformations morphologiques en teintes de gris. Ces dernières constituent une extension de la notion de transformation morphologique d'images binaires au filtrage des images en teintes de gris.

4.1. Les filtres directionnels

Les filtres directionnels permettent de rehausser les alignements dans l'une des huit directions de la trame à l'aide d'un produit de convolution par une fonction numérique correspondant à un gradient directionnel (Robinson, 1977). Cette fonction comporte neuf coefficients numériques sur un voisinage élémentaire carré (3 pixels sur 3 pixels). Parmi les neuf coefficients, les coefficients négatifs sont placés dans les directions orthogonales à celles que l'on veut rehausser.

Sur l'image originelle (**Planche 2**, page 191), les failles suivent grossièrement deux directions : E-O et légèrement SSE-NNO. Pour rehausser ces linéaments, il faut donc utiliser les gradients dans les directions orthogonales N-S et NNO-SSE. Les fonctions de convolution que nous avons utilisées sont présentées **figure 3**.

L'application de ces filtres fournit des images en teintes de gris où les alignements suivant la direction du gradient choisi apparaissent plus clairs que les autres entités.

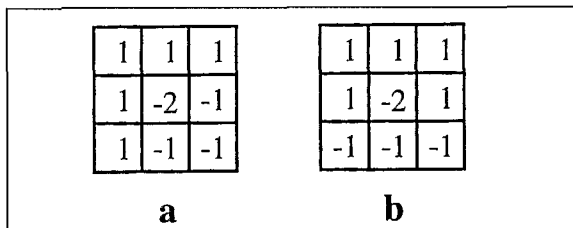


Figure 3 : Filtres directionnels NNO-SSE (a) et N-S (b).

4.2. Les transformations sur les images en teintes de gris

On applique la définition de *Transformation Morphologique* d'une image binaire (Serra, 1982) aux images en teintes de gris.

Dans ce cas, l'ensemble à transformer est défini de la façon suivante : on considère la fonction $f(x)$ qui représente la valeur numérique de l'image en teinte de gris au point x , l'ensemble à transformer correspondant à l'ensemble des points du sous graphe de $f(X)$, X correspondant à l'ensemble des points de l'image.

A l'aide d'un élément structurant B centré en x , qui est un point du sous graphe X ; $f(X)$, on définit les transformations élémentaires suivantes :

$$- \text{l'érosion} : E^B f(X) = \inf \left\{ f(u) : u \in B_X \right\}$$

$$- \text{la dilatation} : D^B f(X) = \sup \left\{ f(u) : u \in B_X \right\}$$

L'image *érodée* et l'image *dilatée* correspondent donc à des images en teintes de gris plus lisses et plus sombres dans le cas de l'*érosion* et plus lisses et plus claires dans le cas de la *dilatation*. L'*ouverture* et la *fermeture* des images sont, comme dans le cas de la morphologie binaire, déduites des transformations élémentaires :

$$- \text{l'ouverture} : f_B(X) = D^B (E^B f(X))$$

$$- \text{la fermeture} : f^B(X) = E^B (D^B f(X))$$

Ces transformations ne modifient l'image qu'en certains points : l'*ouverture* lisse uniquement les petites zones claires tout en les assombrissant alors

que la *fermeture* lisse uniquement les petites zones sombres en les éclaircissant.

4.3. Résidus des transformations morphologiques en teintes de gris : les Chapeaux Haut de Forme morphologiques

Les propriétés de l'*ouverture* et de la *fermeture* sont utilisées pour définir les Chapeaux Haut de Forme. Ces filtres permettent d'extraire les « pics » de la fonction $f(X)$ correspondant aux petites zones claires de l'image ou les « vallées » correspondant aux petites zones sombres (Debaine et al., 1985). Le terme de « petit » doit être compris ici dans le sens « dont le plus grand diamètre est plus petit que celui de l'élément structurant ».

Les résidus des transformations citées se nomment Chapeaux Haut de Forme (Top Hat, en anglais). Ce sont ces résidus qui permettent la mise en évidence d'éléments fins, très sombres ou très clairs, sur l'image d'origine. Ainsi, en effectuant la différence entre l'image initiale et son ouverture par un élément structurant B de taille n (B_n), on extrait les pics dont l'épaisseur est inférieure à n . On appelle cette transformation Chapeau Haut de Forme Blanc (*White Top Hat*, en anglais) soit :

$$WTH(X) = f(X) - f_{B_n}(X)$$

Pour extraire les vallées d'épaisseur inférieures à n , on effectue la différence entre la fermeture de l'image par un élément structurant B de taille n et l'image initiale. Cette transformation est appelée Chapeau Haut de Forme Noir (*Black Top Hat*, en anglais) soit :

$$BTH(X) = f^{B_n}(X) - f(X)$$

4.4. les filtres connexes

Serra (1988) a proposé des filtres en teintes de gris dits « connexes » pour obtenir des images dont les niveaux de gris sont répartis de façon plus homogène. Ces filtres permettent de lisser les images en teintes de gris sans que les formes soient modifiées de façon sensible. Ils sont obtenus soit par érosions itératives d'une fonction $g(X) \geq f(X)$ au-dessus de $f(X)$ jusqu'à idempotence ou bien de dilatations itératives d'une fonction $g(X) \leq f(X)$ au-dessous de $f(X)$. Les définitions sont directement issues de celles de filtres morphologiques :

- l'*ouverture connexe* f_c^B est obtenue par dilatation géodésique sous la fonction f de l'érosion morphologique initiale,

- la *fermeture connexe* f_{cb} est obtenue par érosion géodésique de la dilatation morphologique initiale.

Ici, nous avons utilisé la fermeture connexe dont l'algorithme est donné sur la **figure 4**.

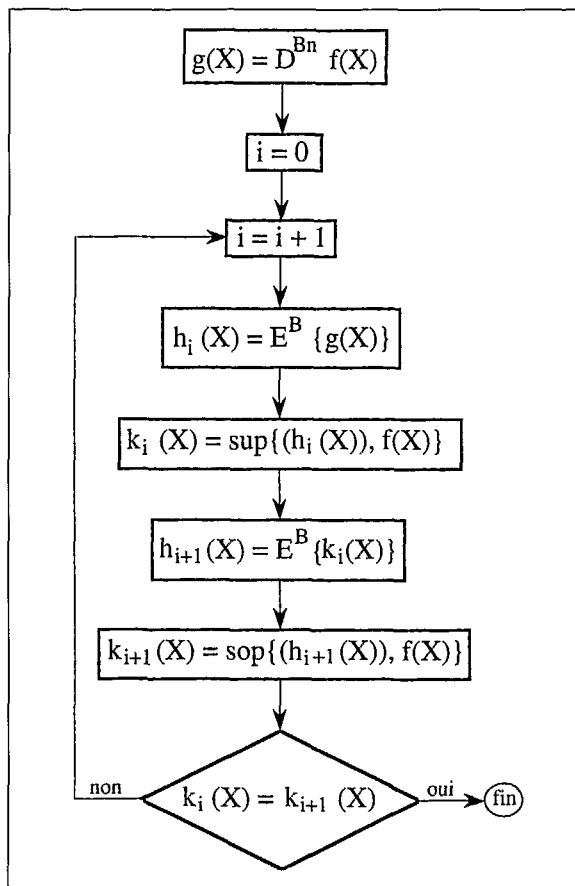


Figure 4 : Algorithme de la fermeture connexe

4.5. Les résidus des filtres connexes : les Chapeaux Haut de Forme par reconstruction

De la même façon qu'ont été définis les Chapeaux Haut de Forme WTH et BTH on définit des Chapeaux Haut de Forme par reconstruction de la façon suivante :

$$WTHR = f(X) - f_{cb}(X) \quad \text{et} \quad BTHR = f_c^B(X) - f(X)$$

Ces filtres ont d'autres propriétés que les Chapeaux Haut de Forme morphologiques, ils ne préservent pas la connexité des contours mais ils préservent les niveaux de gris présents sur l'image originale (Grimaud, 1991).

5. COMPARAISON DE DEUX METHODES POUR LA MISE EN EVIDENCE DES FAILLES

Dans cette partie, nous détaillons les traitements qui permettent la mise en évidence et l'extraction des failles majeures présentes sur l'image originale (**Planche 2**, page 191). Deux failles sont clairement perceptibles : elles se détachent du reste de

l'image, car il s'agit de linéaments sombres sub rectilignes ayant une certaine épaisseur.

5.1. Mise en évidence

Ici, nous exposons les deux étapes de la mise en évidence qui consiste à effectuer un rehaussement des linéaments puis à les extraire.

5.1.1. Rehaussement des linéaments

Sur la **planche 3**, page 192, on a représenté le résultat des filtrages par gradients directionnels NNO-SSE (**Planche 3a**, page 192) et N-S (**Planche 3b**, page 192) et du Chapeau Haut de Forme Noir ($BTH(X) = f^{B2}(X) - f(X)$) issu d'une fermeture de l'image originelle à l'aide d'un élément structurant octogonal de taille 2 (**Planche 3c**, page 192).

On observe que, sur ces trois images, les failles apparaissent comme des lignes claires et épaisses. La différence majeure entre les résultats des filtres gradients directionnels d'une part et le Chapeau Haut de Forme Noir d'autre part, réside dans la nature des linéaments autres que les failles qui sont présents sur les images. Sur les premiers subsistent d'autres linéaments fins aussi clairs que les failles. Il s'agit notamment des réseaux hydrographiques (H) et des lignes de crêtes (C). Sur les images correspondantes, nous indiquons la présence de ces éléments par les mêmes lettres. Sur l'image du Chapeau Haut de Forme Noir, d'autres éléments que les failles apparaissent également; il s'agit notamment des lignes épaisses et blanches qui correspondent aux bords d'anciennes coulées de lave et de ravins abrupts (R) au NO de l'image. Ceci s'explique par le fait que, sur cette dernière image, aucune direction n'a été filtrée mais que seules les lignes sombres et suffisamment épaisses sont rehaussées.

5.1.2. Seuillage des linéaments

Pour chaque image obtenue nous effectuons un seuillage bas pour obtenir une image binaire. Cette opération consiste à mettre à zéro tous les pixels ayant une valeur inférieure ou égale au seuil et à mettre à un tous les pixels dont la valeur est supérieure au seuil. Le choix du seuil bas doit être guidé par le souci de conserver le plus possible d'entités connexes alignées.

Nous avons choisi pour chaque filtre un seuil bas (SB) en fonction du critère cité ci-dessus :

- pour le gradient directionnel NNO-SSE (**Planche 3d**, page 192) SB = 20 ;
- pour le gradient directionnel N-S (**Planche 3e**, page 192) SB = 23 ;
- pour le Chapeau Haut de Forme Noir (**Planche 3f**, page 192) SB = 7.

On observe que sur ces trois images, les failles sont nettement perceptibles. La différence entre les

traitements gradients directionnels et le Chapeau Haut de Forme Noir est mieux soulignée que sur les images en teintes de gris : les réseaux hydrographiques (H), les lignes de crêtes (C) ainsi que les bords d'anciennes coulées de lave et des ravins abrupts (R) sont repérés sur les images correspondantes.

5.2. Extraction des linéaments

Sur les images binaires obtenues par seuillage, on remarque qu'il existe un bruit qu'il faut éliminer. Nous avons effectué des reconstructions géodésiques avec deux types de marqueurs. Nous comparons ici les avantages de deux marqueurs pour les trois traitements.

5.2.1. Une érosion comme marqueur

Dans tous les cas, nous avons utilisé un élément structurant carré. Si, pour le Chapeau Haut de Forme Noir, nous avons pris une taille 2 pour l'élément structurant (**Planche 4c**, page 193), pour les images issues des filtres, NNO-SSE (**Planche 4a**, page 193) et N-S (**Planche 4b**, page 193), nous avons dû nous limiter à une taille 1 ; en effet pour ces deux images une érosion de taille 2 éliminait la quasi totalité des entités et l'utilisation d'une taille 1, élimine des entités appartenant aux failles.

5.2.2. Un seuil haut comme marqueur

Dans le cas où les reconstructions après érosion restent trop bruitées, on utilise un autre type de couple (marqueur, masque) pour reconstruire l'image. Un seuil bas de niveaux de gris sélectionne trop d'objets. Un seuil haut en élimine trop, mais il permet néanmoins de marquer les entités connexes les plus claires. On procède donc par reconstruction géodésique en choisissant l'image du seuil bas comme masque et l'image du seuil haut comme marqueur.

Nous sélectionnons un seuil haut (SH) c'est-à-dire une limite supérieure qui permet de conserver le maximum de linéaments de longueur significative après reconstruction. En fonction de ce critère, nous avons choisi pour chaque filtre un seuil haut (SH) différent :

- pour le gradient directionnel NNO-SSE (**Planche 4d**, page 193) SH = 45 ;
- pour le gradient directionnel N-S (**Planche 4e**, page 193) SH = 51 ;
- pour le Chapeau Haut de Forme Noir (**Planche 4f**, page 193) SH = 11.

Ce type de *reconstruction géodésique* permet d'éliminer le bruit pour les gradients directionnels alors que, dans le cas du Chapeau Haut de Forme Noir, le bruit résiduel est très important. Toutefois, sur les images obtenues par les gradients directionnels on remarque que le réseau hydrographique (H) et les lignes de crêtes (C) sont toujours présents.

5.3. Conclusions

Lors du rehaussement, comme il était attendu, les gradients directionnels rehaussent les entités connexes appartenant aux failles mais aussi le réseau hydrographique ainsi que les lignes de crêtes. Quant au Chapeau Haut de Forme Noir, il rehausse uniquement les entités connexes sombres sur l'image originelle. Dans ce dernier cas, des bords d'anciennes coulées de lave et des ravins abrupts sont aussi rehaussés mais nous gardons le maximum d'entités appartenant aux failles.

Lors de la phase d'extraction, nous montrons l'importance du choix du marqueur pour la reconstruction géodésique. Si pour les gradients directionnels, le seuil haut, a donné les meilleurs résultats c'est l'*érosion* qui a été la plus adéquate pour le Chapeau Haut de Forme Noir. Pour tous les traitements, c'est à l'opérateur de choisir le meilleur marqueur. Si l'on compare les trois résultats les plus favorables lors de la reconstruction géodésique, à savoir le marqueur SH pour les gradients directionnels, et l'*érosion* pour le Chapeau Haut de Forme Noir, nous pouvons dire que ce dernier est meilleur, car :

- le réseau hydrographique et les lignes de crêtes ne se sont pas extraits ;
- nous obtenons le maximum d'entités appartenant aux failles.

Même s'il y a encore présence d'entités indésirables, telles que les bords d'anciennes coulées de lave et des ravins abrupts, leur forme ne peut être confondue avec celle des failles.

6. EXTRACTION DES FAILLES

Compte tenu des expériences faites ci-dessus pour comparer les résultats des deux méthodes, nous avons arrêté notre choix sur l'image du Chapeau Haut de Forme Noir. Nous avons comparé les résultats de ce filtre à ceux produits par le Chapeau Haut de Forme Noir par reconstruction obtenu après une fermeture connexe qui permet aussi l'extraction d'objets linéaires sombres ayant une épaisseur donnée (cf. paragraphe 4.5).

Sur les images binaires résultantes, les éléments indésirables seront progressivement éliminés après chaque étape de filtrage et de seuillage par reconstruction géodésique en utilisant différents types de marqueurs.

6.1. A partir d'un Chapeau Haut de Forme morphologique Noir seul

Nous avons déjà éliminé à l'étape précédente les entités à la fois les plus fines et plus courtes (**Planche 4c**, page 193) à l'aide d'une reconstruction géodésique en prenant une érosion de taille 2 comme marqueur. On observe cependant que de

nombreuses entités linéaires ont été conservées qui se sont pas assimilables aux failles et qui n'ont pas les mêmes orientations.

Les failles sont, en effet, des éléments sub-rectilignes ayant une orientation pratiquement constante sur l'image (SSE-NNO) ; nous allons utiliser cette caractéristique pour éliminer les éléments n'ayant pas cette direction. Pour fabriquer un marqueur de directions, nous avons utilisé le filtre directionnel de Robinson (Legeley et al., 1995) où chacune des 8 directions de la trame est codée sur l'image résultante du calcul du gradient optimal (Figure 5). L'image issue du filtrage directionnel a subi un lissage majoritaire avec un octogone de taille 1 pour élargir les entités de moyenne importance. Nous avons extrait les directions 3 et 4 obtenues avec ce traitement parce qu'elles correspondent aux directions des failles sur l'image, puis lissée (Planche 5a, page 194) puis nous les avons « nettoyées » par reconstruction géodésique utilisant une érosion de taille 2 avec un élément structurant carré pour éliminer les petites entités (Planche 5b, page 194). Cette image a servi de marqueur pour la deuxième reconstruction géodésique de l'image obtenue par reconstruction géodésique avec l'érosion (Planche 4c, page 193).

Le résultat de ce traitement (Planche 5c, page 194) montre que des entités indésirables ont été conservées, en particulier au NO de la sous scène. Il s'agit de lignes marquant les bords des coulées volcaniques ; ces lignes peuvent se distinguer de celles constituant les failles parce qu'elles sont rapprochées topographiquement, ce qui n'est pas le cas des failles qui sont isolées.

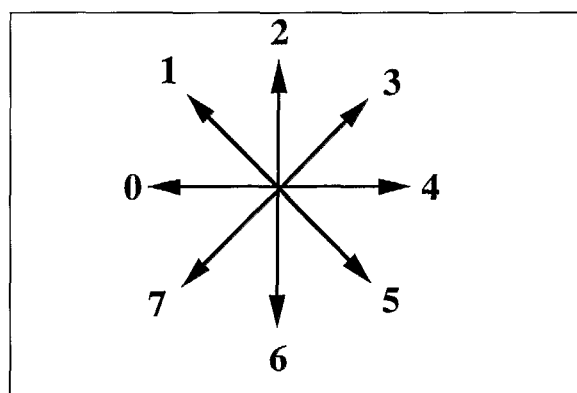


Figure 5 : Directions locales du gradient de Robinson

A ce stade, on réalise un masque qui délimite l'ensemble des entités indésirables. Ce masque ne doit pas comporter des éléments appartenant aux failles; ces éléments sont éliminés par reconstruction géodésique. Une fermeture de taille 2 avec un carré (Planche 5d, page 194) met en évidence cette distinction. Pour éliminer les trous, qui peuvent être considérés comme du bruit, dans la partie NO, cette image est inversée, reconstruite avec une érosion et

réinversée (Planche 5e, page 194). On remarque aussi que la ligne de faille la plus à gauche est connectée avec des éléments n'en faisant pas partie pour remédier à ceci nous avons effectué une ouverture de taille 1 avec un carré (Planche 5f, page 194). Pour obtenir le masque on opère une reconstruction géodésique avec une érosion de taille 5 avec un octogone (Planche 6a, page 195). Cette image a été inversée (Planche 6b, page 195) pour obtenir un masque que nous avons intersecté avec le résultat des 2 précédentes reconstructions (Planche 5c, page 194). Le résultat (Planche 6c, page 195) permet d'obtenir les failles par extraction après un étiquetage automatique des entités connexes (Planche 6f, page 195).

6.2. A partir d'un Chapeau Haut de Forme Noir par Reconstruction uniquement

Sur l'image SPOT Panchromatique (Planche 2, page 191), nous avons appliqué un Chapeau Haut de Forme Noir par Reconstruction qui fait ressortir les parties sombres ($BTHR = f_c^{Bz}(x)$). Cette transformation étant le résidu d'une transformation géodésique (fermeture connexe) qui préserve la connexité des entités en teintes de gris va produire une image où les linéaments seront plus fins et moins bien connectés que sur le Chapeau Haut de Forme morphologique (Grimaud, 1991). Nous avons voulu comparer ici les deux résultats provenant de la même séquence de traitements à partir des deux Chapeaux Haut de Forme.

Dans un premier temps, les éléments les plus épais ont été seuillés de 2 à 255 (Planche 7a, page 196). Cette image a été nettoyée comme dans le cas précédent par reconstruction géodésique avec une érosion comme marqueur (Planche 7b, page 196) puis avec les directions 3 et 4 du gradient de Robinson nettoyées (Planche 5b, page 194) comme marqueur. Dans ce cas, le résultat est mieux nettoyé que dans le cas du Chapeau Haut de Forme morphologique (Planche 7c, page 196) et un simple étiquetage automatique des entités connexes et d'effectuer une extraction (Planche 7d, page 196). Les failles sont mieux dessinées mais l'épaisseur n'est pas bien restituée.

6.3. Méthode du « post-it »

Il existe une solution proposée par Meyer (1993) qui utilise simultanément les propriétés des deux transformations Chapeau Haut de Forme morphologique et par Reconstruction. On considère l'image obtenue par un seuillage haut d'un Chapeau Haut de Forme par Reconstruction comme un marqueur pour nettoyer l'image obtenue par un seuillage bas du Chapeau Haut de Forme morphologique. Cette méthode s'appelle méthode du *post-it*.

La comparaison des histogrammes montre bien la différence entre les deux types de Chapeaux Haut

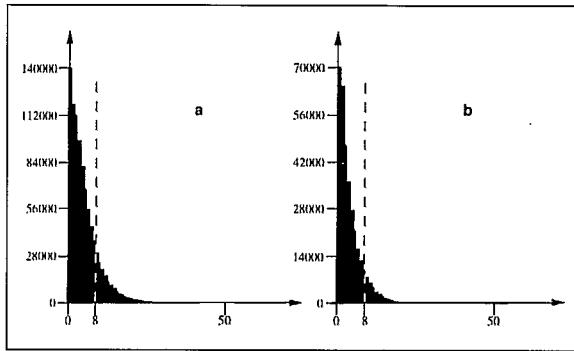


Figure 6 : Comparaison des histogrammes des Chapeaux Haut de Forme Noirs morphologique (a) et par Reconstruction (b). La barre verticale pointillée montre le seuil adopté pour chacun

de Forme morphologique et par Reconstruction (**Figure 6**).

Le seuillage, de 8 à 255, du Chapeau Haut de Forme par Reconstruction (**Planche 8b**, page 197) a servi de marqueur pour la reconstruction du seuillage, de 8 à 255, du Chapeau Haut de Forme morphologique (**Planche 8a**, page 197). L'image résultante (**Planche 8c**, page 197) est très bruitée sur sa partie gauche et nécessite la fabrication d'un masque pour le débruitage. L'image reconstruite présente les mêmes imperfections que celle présentée sur la **planche 5c**, page 194. Nous avons utilisé une procédure similaire pour éliminer les entités indésirables. L'image a subi une fermeture de taille 2 avec un carré, les trous ont été bouchés par inversion, reconstruction géodésique avec une érosion et réinversée. Là encore, la faille située au NO est légèrement reliée aux parties issues des lignes de bord des coulées, nous avons donc effectué une ouverture de taille 1 avec un carré pour la déconnecter. Les failles ont été éliminées par reconstruction géodésique avec une érosion de taille 5 avec un octogone. A ce stade le masque présentait de grands trous, nous avons effectué une fermeture de taille 30 avec un octogone, puis nous avons inversé l'image pour obtenir le masque (**Planche 8d**, page 197). Le masque ainsi obtenu a été intersecté avec le résultat du *post-it* (**Planche 8c**, page 197).

Sur l'image résultante (**Planche 8e**, page 197) les failles ont été extraites après étiquetage automatique (**Planche 8f**, page 197).

7. CONCLUSIONS

Nous avons montré que la cartographie des failles, à partir des images SPOT Panchromatique, peut être effectuée par différentes méthodes de traitement d'image. Lorsque les failles ont un rejet important, comme c'est le cas ici, les filtres morphologiques appelés *Chapeaux Haut de Forme* donne de meilleurs résultats que les filtres par gradient directionnel.

Par ailleurs, nous avons également montré que l'on ne pouvait pas obtenir l'extraction des linéaments en une seule étape de traitement. En effet, pour éliminer les différentes entités de l'image n'appartenant pas aux failles, il est nécessaire d'opérer plusieurs filtres par reconstruction géodésique, en faisant varier les images marqueurs. Les séquences sont entièrement détaillées et le choix des marqueurs est justifié par la forme des éléments à garder et à éliminer ainsi que leur orientation et leur contexte spatial. De ce point de vue, on peut dire que les chaînes de traitements proposées sont reproductibles et facilement adaptables à d'autres cas similaires.

8. REMERCIEMENTS

Nous remercions SPOT-image, le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et GDTA pour avoir fourni l'image Spot, ainsi que les programmes de recherche nord-sud soutenu par la CEE.

Ce travail et ces documents ont été réalisés à l'aide du logiciel planetes - Laboratoire d'Informatique Appliquée, Bondy et du logiciel OSIRIS V3.0 - LATICAL/ESTEL, Nouméa.

RÉFÉRENCES

- CALLOT Y., MERING C. & SIMONIN A., 1994 - Analysis of sand hills massifs on high resolution images : an application to the Great Western Erg (Algeria). *Int. J. Remote Sens.*, 15, 3799-3822.
- DEBAINE F., MERING C. & PONCET Y., 1985 - La Morphologie Mathématique en teintes de gris appliquée à la mise en évidence de réseaux. *Photo-interpretation*, 5 (2), 17-26.
- DORBATH L., CISTERNAS A. & DORBATH C., 1990 - Assessment of the size of large and great historical earthquakes. *Bulletin of Seismology Society American*, 80 (3), 551-576.
- GRIMAUD M., 1991 - La géodésie numérique en Morphologie Mathématique. Thèse Docteur-Ingénieur, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.
- HUAMAN-RODRIGO D., CHOROWICZ J., DEFFONTAINES B., GUILLANDE R. & RUDANT J.P., 1993 - Cadre structural et risques géologiques étudiés à l'aide de l'imagerie spatiale : La région du Colca (Andes du Sud Pérou). *Bull. Soc. Géol. de France*, 164 (6), 807-818.
- LEGELEY-PADOVANI A., MERING C., GUILLANDE R. & HUAMAN D., 1995 - Méthode de cartographie des coulées de lave par traitement des images SPOT - L'exemple du Sabancaya (Pérou). *Photo-interpretation*, 1, 3-17 et 33-41.

- MERING C. & CHOROWICZ J., 1993 - Extraction of faults SPOT imagery by numerical analysis. *In* : International Symposium Andean Geodynamics, Oxford, 21-23 September 1993, (ORSTOM : Paris), 102-106.
- MERING C., HUAMAN-RODRIGO D., CHOROWICZ J., DEFFONTAINES B. & GUILLANDE R., 1996 - New data on the geodynamics of southern Peru from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images. *Tectonophysics*, 259, 153-169.
- MEYER F., 1993 - Morphological Image Segmentation for Coding. *In* : P. Salembier & J. Serra (Editors), *Mathematical Morphology and its Applications to Signal Processing*. Barcelona, May 12-14, 1993, 46-51.
- ROBINSON G., 1977 - Edge detection by compass gradient mask. *CGIP*, vol. 6, 492-501.
- SERRA J., 1982 - *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Theoretical Advances, (London - Academic Press), 422 p.
- SERRA J., 1988 - *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Vol. 2. (London, Academic Press), 411p.

THE CONTRIBUTION OF MATHEMATICAL MORPHOLOGICAL OPERATORS IN THE EXTRACTION OF FAULTS FROM PANCHROMATIC SPOT IMAGES - THE HUALCA-HUALCA FAULT (SOUTHERN PERU)

Annick LEGELEY-PADOVANI and Catherine Mering

1. INTRODUCTION

The SPOT scene (KJ 661-381) acquired on July 1st, 1990 is located in the Arequipa region of southern Peru, which lies in the zone of the Western Cordillera (**Fig. 1**). Large normal faults (100 to 200 km in length) (**Plate 1**, page 190) are clearly exposed in the NW corner of the studied sub-scene. They go across the volcanic bedrock of this seismically active zone.

The filtering methodology detailed herein was tested on the sub-scene situated to the west of the Hualca-Hualca volcano (**Fig. 2**).

We compared the results of the directional filtering method with those of the Morphological Transformations. We use the SPOT image (**Plate 2**, page 191) to show how we extracted the lines of dark and sub-rectilinear faults.

2. COMPARISON OF TWO METHODS OF REVEALING FAULTS

Plate 3, page 192 shows the result of directional gradient filtering in the NNW-SSE direction (**Plate 3a**, page 192) and N-S direction (**Plate 3b**, page 192) and the *Black Top Hat* (**Plate 3c**, page 192).

The images resulting from the gradient filters display other fine lineaments as clearly as the faults: hydrographical network (H), ridge lines (C). The N-W area of the *Black Top Hat* image shows the edges of old lava flows and precipitous ravines (R) as well as faults.

Each image obtained underwent low thresholding to obtain a binary image.

We chose a low threshold for each image:

- NNW-SSE directional gradient (**Plate 3d**, page 192),
- N-S directional gradient (**Plate 3e**, page 192),
- *Black Top Hat* (**Plate 3f**, page 192),

We then subjected these binary images to geodesic reconstruction with two types of markers:

a - an *erosion* (**Plates 4a, 4b, 4c**, page 193),

b - a high threshold (**Plates 4d, 4e, 4f**, page 193).

If one compares the three most favourable results from the geodesic reconstruction, that is to say the high threshold marker for the directional gradients, and erosion for the *Black Top Hat*, we can say that this last is better because:

- the hydrographical network and the ridge lines are not extracted,
- we obtain the maximum number of items belonging to the faults.

Even if unwanted items such as the edges of old lava streams and precipitous ravines are still present, their shape cannot be confused with that of the faults.

3. EXTRACTION OF THE FAULTS

Taking the image obtained on **Plate 4c**, page 193, we give a step-by-step illustration of how we use the Morphological Transformations to extract the fault lines.

One can see that numerous linear features which cannot be compared with faults are kept.

The reason for this is that the faults are subrectilinear items with a practically constant orientation on the image (SSE-NNW). We used a Robinson's directional filter (**Fig. 5**) to produce a directions marker. We extract directions 3 and 4 obtained because they correspond to the directions of the faults on the image (**Plate 5a**, page 194), then we « clean » them by geodesic reconstruction using an erosion (**Plate 5b**, page 194). This image is used as a marker for the second geodesic reconstruction obtained from this erosion (**Plate 4c**, page 193). The result of this processing (**Plate 5c**, page 194) shows that unwanted items have been kept.

At this stage we made a mask, and all unwanted items outside this mask were eliminated. A closing (**Plate 5d**, page 194) highlights this distinction.

To fill in the gaps, this image was inverted, reconstructed with an erosion, then reinverted (**Plate 5e**, page 194). The connection between the mask and the fault was eliminated by an opening (**Plate 5f**, page 194). The mask was obtained by performing a *geodesic reconstruction* with an *erosion* (**Plate 6a**, page 195); this image is inverted (**Plate 6b**, page 195). The mask was obtained by intersecting the previous two images (**Plate 6c**, page 195). The result enabled faults to be obtained by extraction after automatic labelling of the connected entities (**Plate 6d**, page 195).

We compared this result with that obtained by *reconstruction with the Top Hat*. These filters are defined as the rests of connected openings or closings (**Fig. 4**). The linear items are less well connected than on the conventional *Top Hats* but the levels of grey of the original image are better preserved.

The thickest features were thresholded (**Plate 7a**, page 196). This image was cleaned by geodesic reconstruction using *erosion* as a marker (**Plate 7b**, page 196), and then the cleaned directions 3 and 4 of Robinson's gradient (**Plate 5b**, page 194) as a marker. The result in this case was better cleaned than previously (**Plate 7c**, page 196) and an extraction was performed by simple automatic labelling of the related items (**Plate 7d**, page 196). The faults were more clearly outlined, but thickness was poorly restored.

A method which uses simultaneously the properties of the two types of Top Hat does however exist. This method is called *post-it*.

Thresholding of the Top Hat by reconstruction (**Plate 8b**, page 197) was used as a marker for the *reconstruction* of the thresholding of the morphological Top Hat (**Plate 8a**, page 197). The reconstructed image (**Plate 8c**, page 197) displayed the same imperfections as the image obtained previously (**Plate 5c**, page 194). We therefore used a similar procedure with a mask (**Plate 8d**, page 197) to eliminate the unwanted items. The mask obtained in this way was intersected with the result of the geodesic reconstruction (**Plate 8c**, page 197). The faults were extracted from the resulting image (**Plate 8e**, page 197) after automatic labelling (**Plate 8f**, page 197).

4. CONCLUSIONS

We have shown that the mapping of faults from Panchromatic SPOT images can be carried out by different image processing methods. When the faults display large throws, as was the case in this study, the morphological filters called Top Hats give better results than the directional gradient filters.

We have also shown that lineaments cannot be extracted in a single processing step. This is because to eliminate the various image entities that do

not belong to the faults, several geodesic reconstruction filtering operations have to be carried out, varying the marker images. The choice of markers is justified by the shape, orientation and spatial context of the items to be kept or eliminated. In this respect it can be said that the proposed processing sequences are reproducible and easily adapted to other similar cases.

BIBLIOGRAPHY

See French text

LIST OF FIGURES

Figure 1: Map showing the position of the study zone in the Arequipa region. The black arrow shows the convergence between the Nazca and South American plates.

Figure 2: Map of the photointerpretation of the faults on the SPOT image (Mering et al., 1996). The dotted-line rectangle shows the location of the analyzed sub-scene.

Figure 3: Directional filters: NNW-SSE (a) and N-S (b).

Figure 4: Algorithms of the connected closing

Figure 5: Local directions of Robinson's gradient

Figure 6: Comparison of the histograms of the Morphological Black Top Hats (a) and the Reconstruction Black Top Hats (b). The vertical dotted line shows the threshold chosen for each one.

LIST OF PLATES

Plate 1: Sub-scene of the SPOT image (KJ : 661-381) acquired on July 1st, 1990 in Panchromatic mode. The letters F indicate the faults in the study zone (Plate 2).

Plate 2: Extract of the SPOT image centred on the Hualca-Hualca zone.

Plate 3: Showing up the faults

1. enhancing the lineaments: **a-** NNW-SSE directional gradient, **b-** N-S directional gradient, **c-** Black Top Hat;

2. thresholding the lineaments: **d-** NNW-SSE directional gradient, **e-** N-S directional gradient, **f-** Black Top Hat;

(F = fault, H = hydrographical network, C = ridge lines, R = ravines)

Plate 4: Extraction of the faults by geodesic reconstruction using the following markers:

1. an erosion with a square structuring element: **a-** NNW-SSE directional gradient, size 1, **b-** N-S directional gradient, size 1, **c-** Black Top Hat, size 2;

2. a high threshold (SH): **d**- NNW-SSE directional gradient, SH = 45, **e**- N-S directional gradient, SH = 51, **f**- Black Top Hat, SH = 11; (F = fault, H = hydrographical network, C = ridge lines, R = ravines)

Plate 5: Extraction of the faults using a morphological Black Top Hat:

a- extraction of directions 3 and 4 of the smoothed Robinson's gradient; **b**- directions cleaned by geodesic reconstruction with an erosion; **c**- geodesic reconstruction of 4c with 5b as a marker; **d**- closing of 5c; **e**- inversion, geodesic reconstruction by erosion of 5d and reinversion; **f**- morphological opening of 5e;

Plate 6: Extraction of the faults using a Morphological Black Top Hat (cont'd):

a- elimination of items belonging to the faults by geodesic reconstruction with an erosion; **b**- inver-

sion of 6a to obtain a mask; **c**- intersecting of 6b and 5c; **d**- extraction of faults after automatic labelling of 6c.

Plate 7: Extraction of the faults using a Black Top Hat by reconstruction. **a**- thresholding of the Black Top Hat by reconstruction; **b**- cleaning of 7a by geodesic reconstruction with an erosion; **c**- geodesic reconstruction of 7b using 5b as a marker; **d**- extraction of faults after automatic labelling of 7c.

Plate 8: Post-it method: **a**- thresholding of the morphological Black Top Hat by reconstruction; **b**- geodesic reconstruction of the thresholding of the morphological Top Hat with thresholding of the morphological Black Top Hat by reconstruction as a marker; **c**- inverted mask for isolating the faults; **d**- intersection of 8c with the inverted mask; **e**- extraction of faults after automatic labelling.

CONTRIBUCIÓN DE LOS OPERADORES DE MORFOLOGÍA MATEMÁTICA EN LA EXTRACCIÓN DE LAS FALLAS A PARTIR DE IMÁGENES SPOT PANCROMÁTICAS : EJEMPLO DE LA FALLA DE HUALCA-HUALCA (SUR DEL PERU)

Annick LEGELEY-PADOVANI y Catherine MERING

1. INTRODUCCIÓN

La imagen SPOT (KJ 661 - 381) del 1 de julio de 1990 se localiza al sur del Perú en la región de Arequipa. Esta imagen corresponde a la zona de la Cordillera Occidental (**Figura 1**). Enormes fallas normales (de 100 a 200 Km de largo) (**Lámina 1**, pagina 190) son visibles en la esquina NO de la sub-imagen estudiada. Estas fallas atraviesan el substrato volcánico de ésta zona, que presenta una actividad sísmica de profundidad.

El método de filtraje que se detalla aquí, fue probado en la sub-imagen localizada al oeste del volcán Hualca-Hualca (**Figura 2**).

Comparamos los resultados de los métodos de filtraje direccional con los métodos de transformaciones morfológicas. En la imagen SPOT (**Lámina 2**, pagina 191) mostramos como se extrajeron las líneas de las fallas oscuras y sub-rectilíneas.

2. COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS PARA LA PUESTA EN EVIDENCIA DE LAS FALLAS

En la **lámina 3** presentamos el resultado de los filtros de gradiente de dirección NNO-SSE (**Lámina 3a**, pagina 192), los de dirección N-S (**Lámina 3b**, pagina 192) y los del *Sombrero Alto de Forma Negro* (**Lámina 3c**, pagina 192).

En las imágenes resultantes de los filtros de gradiente persisten otros lineamientos finos tan obvios como las fallas : red hidrológica (**H**) y líneas de cresta (**C**). En la imagen del *Sombrero Alto de Forma Negro* aparecen, además de las fallas, los bordes de antiguos colados de lava y de barrancos abruptos (**R**) al N-O de la imagen.

Para cada imagen obtenida, se efectuó una fijación de umbrales bajos para obtener una imagen binaria.

Para cada tipo de filtro escogimos un umbral bajo :

- gradiente direccional NNO-SSE (**Lámina 3d**, pagina 192)
- gradiente direccional N-S (**Lámina 3e**, pagina 192)
- Sombrero Alto de Forma Negro (**Lámina 3f**, pagina 192)

Sobre las imágenes binarias, efectuamos reconstrucciones geodésicas con dos tipos de marcadores :

- a. una erosión (**Láminas 4a, 4b y 4c**, pagina 193)
- b. un umbral alto [SH] (**Láminas 4d, 4e y 4f**, pagina 193)

Comparando los tres resultados más favorables luego de la reconstrucción geodésica, a saber el marcador SH para los gradientes direccionales, y la erosión para el *Sombrero Alto de Forma Negro*, podemos decir que éste último es mejor, puesto que :

- no se extraen ni la red hidrológica ni las líneas de cresta,
- obtuvimos el máximo de entidades pertenecientes a las fallas

A pesar de la presencia de entidades indeseables, como los bordes de antiguas coladas de lava y de barrancos abruptos, su forma no se puede confundir con la de las fallas.

3. EXTRACCIÓN DE LAS FALLAS

Partiendo de la imagen obtenida en la **lámina 4c** (pagina 193) mostramos, etapa por etapa, como utilizamos las Transformaciones Morfológicas para extraer las líneas de fallas.

Observamos que numerosas entidades lineares son conservadas aun si éstas no son asimilables a las fallas.

Las fallas son, en efecto, los elementos rectilíneos que tienen una orientación prácticamente constante en la imagen (SSE-NNO). Para fabricar un marcador de direcciones utilizamos el filtro direccional de

Robinson (**Figura 5**). Se extrajeron las direcciones 3 y 4 obtenidas, ya que éstas corresponden a las direcciones de las fallas en la imagen (**Lámina 5a**, página 194), luego las « limpiamos » por medio de una reconstrucción geodésica utilizando un filtro de erosión (**Lámina 5b**, página 194). Esta imagen sirve de marcador para la segunda reconstrucción geodésica de la imagen, obtenida a partir de ésta erosión (**Lámina 4c**, página 193). El resultado de éste tratamiento (**Lámina 5c**, página 194) muestra que las entidades indeseables fueron conservadas.

A éste nivel, se realizó una máscara al exterior en la cual son eliminadas las entidades indeseables. Un lisaje de cierre (**Lámina 5d**, página 194) pone en evidencia ésta distinción. Para colmar los huecos, esta imagen es invertida y reconstruida con un lisaje de erosión, luego reinvertida (**Lámina 5e**, página 194). Se eliminó la conexidad entre la máscara y la falla por medio de un lisaje de abertura (**Lámina 5f**, página 194). Para obtener la máscara, se llevó a cabo una reconstrucción geodésica con un lisaje de erosión (**Lámina 6a**, página 195), ésta imagen es invertida (**Lámina 6b**, página 195). La máscara es obtenida por la intersección de dos conjuntos precedentes (**Lámina 6c**, página 195). El resultado permite la obtención de las fallas por medio de la extracción, seguida de una etiquetación de las entidades conexas (**Lámina 6d**, página 195).

Este resultado se comparó con el obtenido para el lisaje de Sombrero Alto de Forma por reconstrucción. Estos filtros son definidos como los residuos de la aberturas o de los cierres conexas (**Figura 4**). Las entidades lineares obtenidas son menos conexas que las obtenidas con los Sombreros Clásicos, pero los niveles de gris de la imagen son mejor conservados.

Se fijaron nuevos umbrales para los elementos mas espesos (**Lámina 7a**, página 196). Esta imagen se limpió por medio de una reconstrucción geodésica usando un lisaje de erosión como marcador (**Lámina 7b**, página 196), luego usando los filtros de dirección 3 y 4 del gradiente de Robinson limpios (**Lámina 5b**, página 194) como marcadores. En este caso, el resultado se limpia mejor que en el caso precedente (**Lámina 7c**, página 196) y la simple etiquetación automática de las entidades conexas, permite efectuar la extracción (**Lámina 7d**, página 196). Las fallas son mejor delineadas pero su espesor no es bien restituido.

Existe una solución que utiliza simultáneamente las propiedades de los dos tipos de Sombrero Alto de Forma. Este método se llama *post-it*.

La fijación de umbrales del Sombrero Alto de Forma por reconstrucción (**Lámina 8b**, página 197) sirve de marcador para la reconstrucción de la fijación de umbrales del Sombrero Alto de Forma morfológico (**Lámina 8a**, página 197). La imagen reconstruida (**Lámina 8c**, página 197) presenta las mismas imperfecciones que las obtenidas anteriormente (**Lámina 5c**, página 194). Utilizamos

entonces un procedimiento similar, por máscara (**Lámina 8d**, página 197), para eliminar las entidades indeseables. La máscara así obtenida se interseca con el resultado de la reconstrucción geodésica (**Lámina 8c**, página 197); en la imagen resultante (**Lámina 8e**, página 197) las fallas son obtenidas después de la etiquetación automática (**Lámina 8f**, página 197).

4. CONCLUSIONES

Mostramos que la cartografía de las fallas a partir de las imágenes pancromáticas de SPOT, se puede efectuar por diferentes métodos de tratamiento de imágenes. Cuando las fallas son un residuo importante, como es el caso aquí, los filtros morfológicos llamados Sombrero Alto de Forma dan mejores resultados que los filtros por gradiente direccional.

Mostramos igualmente que no era posible de obtener la extracción de los lineamientos en una sola etapa de tratamiento. En efecto, para eliminar las diferentes entidades de la imagen que no pertenecen a las fallas, es necesario aplicar varios filtros por reconstrucción geodésica, haciendo variar las imágenes marcadoras. La elección de los marcadores se justifica por la forma de los elementos a retener y a eliminar, así como por su orientación y su contexto espacial. Desde éste punto de vista, se puede decir que las series de tratamientos propuestos son reproducibles y fácilmente adaptables a otros casos similares.

BIBLIOGRAFIA

Ver el texto en francés.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Mapa mostrando la localización de la zona de estudio en la región de la Arequipa. La flecha negra muestra la convergencia entre las placas de Nazca y sur americana.

Figura 2 : Mapa de la foto interpretación de las fallas en la imagen SPOT (Mering et al., 1996). El rectángulo punteado muestra la localización de la sub-escena analizada.

Figura 3 : Filtros direccionales NNO - SSE (a) y N - S (b).

Figura 4 : Algoritmo de cierre conexo.

Figura 5 : Direcciones locales del gradiente de Robinson.

Figura 6 : Comparación de los histogramas de los Sombreros Alto de Forma Negros morfológico (a) y por Reconstrucción (b). Las barras vertical pun-

teadas muestran los umbrales adoptados para cada uno.

LISTA DE LAMINAS

Lámina 1 : Sub-escena de la imagen SPOT (KJ : 661 - 381) adquirida el 1 de julio de 1990 en modo pancromático. Las F indican las fallas de la zona de prueba. (Lámina 2).

Lámina 2 : Extracción de la imagen SPOT centrada sobre la zona de Hualca-Hualca.

Lámina 3 : Puesta en evidencia de las fallas

1. realce de los lineamientos : **a**- gradiente direccional NO-SSE, **b**- gradiente direccional N-S, **c**- Sombrero Alto de Forma Negra ;

2. fijación de umbrales de los lineamientos : **d** - gradiente direccional NNO-SSE, **e**- gradiente direccional N-S, **f**- Sombrero Alto de Forma Negro.

(**F** = falla, **H** = red hidrológica, **C** = líneas de cresta, **R** = Barrancos)

Lámina 4 : extracción de las fallas por reconstrucción geodésica utilizando como marcador,

1. de una erosión con un elemento estructurante cuadrado : **a**- gradiente direccional NNO - SSE, talla 1, **b**- gradiente direccional N - S, talla 1, **c**- Sombrero Alto de Forma Negro, talla 2;

2. de un umbral alto (SH) : **d**- gradiente direccional NNO-SSE, SH = 45, **e**- gradiente direccional N-S, SH = 51, **f**- Sombrero Alto de Forma Negro, SH = 11.

(**F** = falla, **H** = red hidrológica, **C** = líneas de cresta, **R** = Barrancos)

Lámina 5 : Extracción de las fallas a partir de un Sombrero Alto de Forma morfológica Negro. **a**- extracción de las direcciones 3 y 4 del gradien-

te de Robinson; **b**- limpieza de direcciones por reconstrucción geodésica con una erosión; **c**- reconstrucción geodésica de 4c usando 5b como marcador; **d**- cierre de 5c; **e**- inversión, reconstrucción geodésica con una erosión de 5d y reinversión; **f**- abertura morfológica de 5e.

Lámina 6 : Extracción de las fallas a partir de un Sombrero Alto de Forma morfológica Negra (continuación). **a**- eliminación de los elementos pertenecientes a las fallas por reconstrucción geodésica con una erosión; **b**- inversión de 6a para obtener una máscara; **c**- intersección de 6b y de 5c; **d**- extracción de las fallas luego de su etiquetación automática de 6c.

Lámina 7 : Extracción de las fallas a partir de un Sombrero Alto de Forma Negro por Reconstrucción. **a**-fijación de umbrales del Sombrero Alto de Forma Negro por Reconstrucción; **b**- limpieza de 7a por reconstrucción geodésica con una erosión; **c**- reconstrucción geodésica de 7b usando 5b como marcador; **d**- extracción de las fallas luego de la etiquetación automática de 7c.

Lámina 8 : Método de « post-it ». **a**- fijación de umbrales para el Sombrero Alto de forma morfológica; **b**- fijación de umbrales del Sombrero Alto de Forma por reconstrucción; **c**- reconstrucción geodésica de la fijación de umbrales del Sombrero Alto de Forma morfológica con la fijación de umbrales del Sombrero Alto de Forma por reconstrucción como marcador; **d**- mascara inversa permitiendo el aislamiento de las fallas; **e**- intersección de 8c con la máscara invertida; **f**- extracciones de las fallas luego de la etiquetación automática.

SUBSCRIPTION FORM

Photo Interprétation

Mail to :

Éditions ESKA, 12, rue du Quatre Septembre, 75002 PARIS - FRANCE
Tél. 01 42 86 56 00 - FAX 01 42 60 45 35

YES, start sending me revue PHOTO-INTERPRÉTATION (1 year - 4 issues)
(Airmail charges to be added)

For the year 1998 FRANCE 1 128 FF
 OUTSIDE FRANCE ... 1 421 FF

For the year 1999 FRANCE individual 1 265 FF - institution 1 455 FF
 OUTSIDE FRANCE individual 1 265 FF - institution 1 518 FF

Payment enclosed

Name :

Company :

Address :

City : State : Zip code : Country :

Price per copy	Year 1993 : 290 FF	Year 1989 : 185 FF
	Year 91-92 : 250 FF	Year 1988 : 175 FF
	Year 1990 : 190 FF	Year 1987 : 165 FF

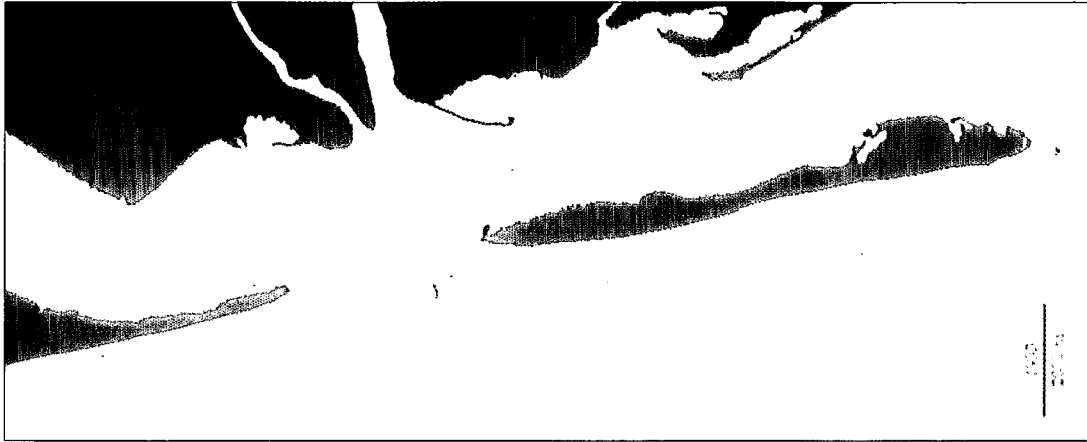


Planche 6 : Evolution du trait de côte de la flèche de Sangomar ; années : a - 10/1991 ; b -1992 et c - 1993.

Plate 6: *Development of the Sangomar spit coa.*

Lámina 6 : *Evolución de la línea costera de la flecha de Sangomar; años : a - 10/1991; b - 1992 y c - 1993.*

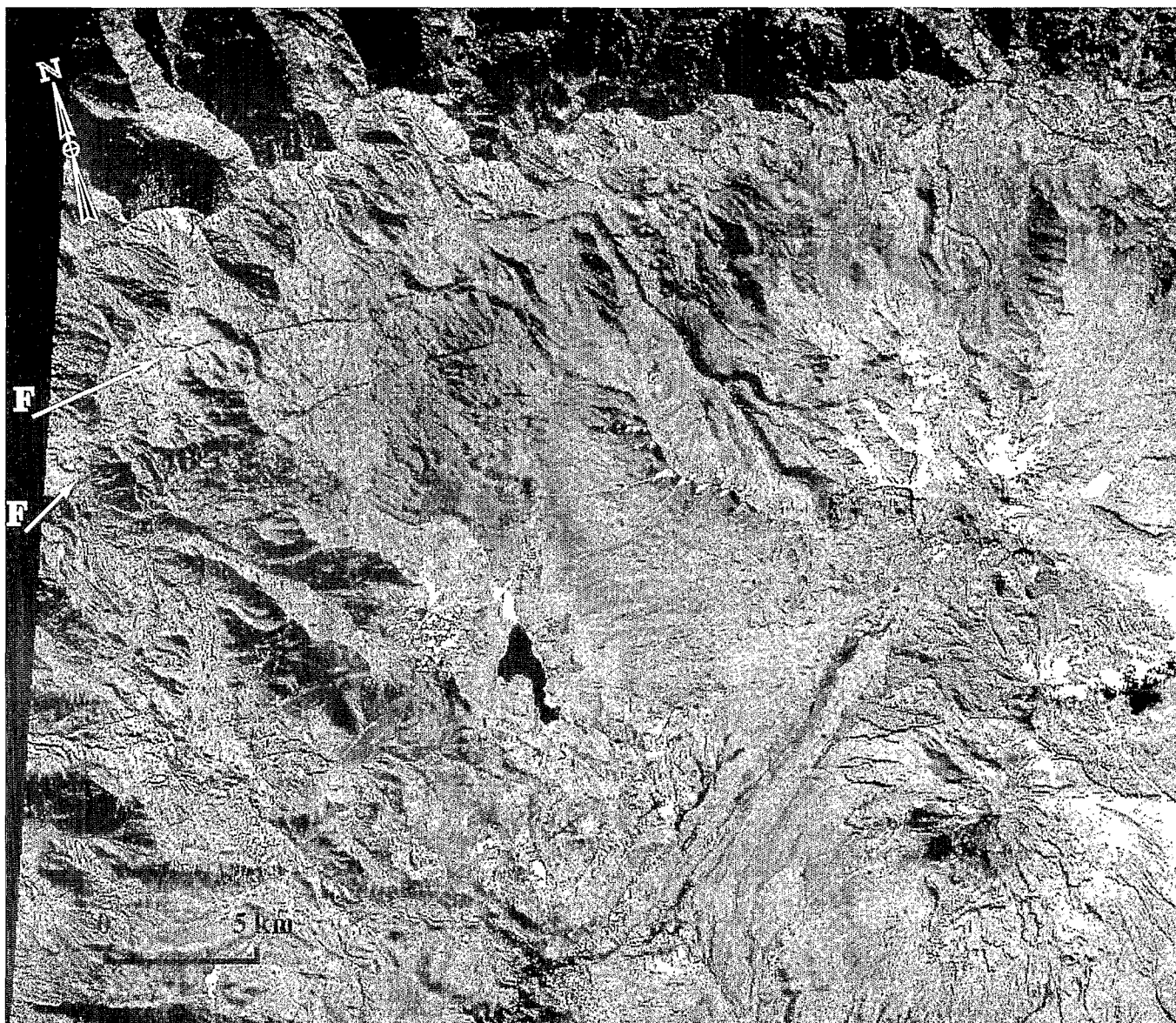


Planche 1 : Sous scène de l'image SPOT (KJ : 661-381) acquise le 1 juillet 1990 en mode Panchromatique. Les F indiquent les failles de la zone test (Planche 2).

Plate 1: Sub-scene of the SPOT image (KJ : 661-381) acquired on July 1st, 1990 in Panchromatic mode. The letters F indicate the faults in the study zone (Plate 2).

Lámina 1 : Sub-escena de la imagen SPOT (KJ : 661 - 381) adquirida el 1 de julio de 1990 en modo pancromático. Las F indican las fallas de la zona de prueba. (Lámina 2).

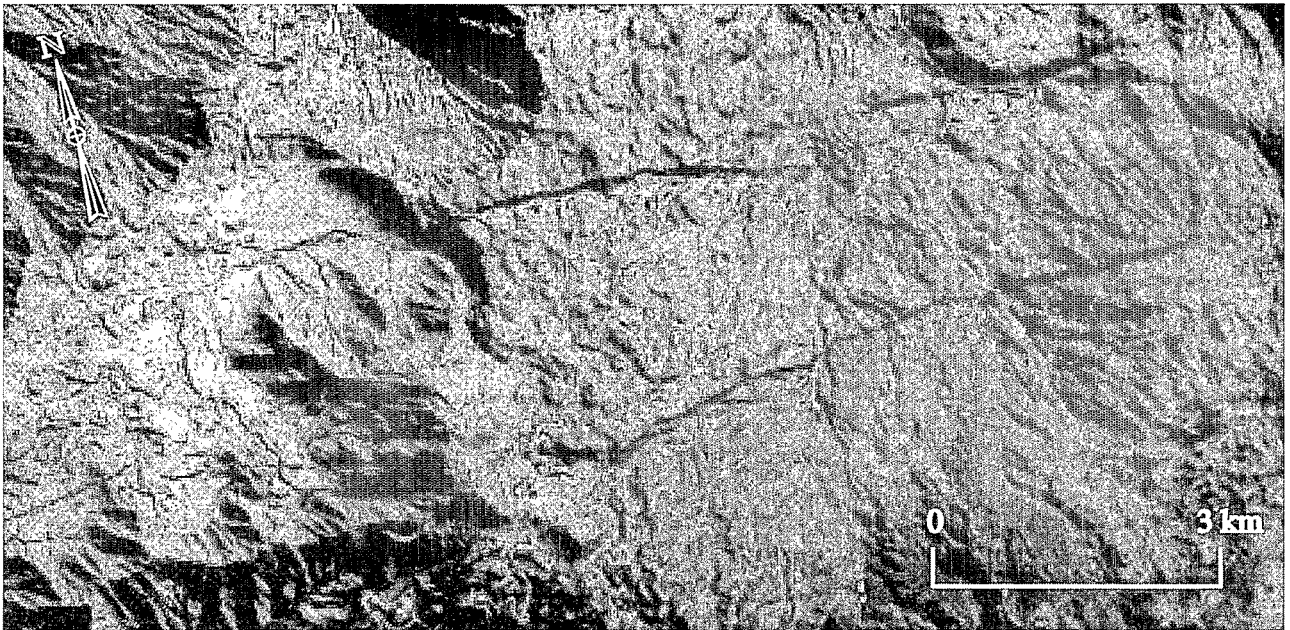


Planche 2 : Extrait de l'image SPOT centrée sur la zone de Hualca-Hualca.

Plate 2: Extract of the SPOT image centred on the Hualca-Hualca zone.

Lámina 2 : Extracción de la imagen SPOT centrada sobre la zona de Hualca-Hualca.

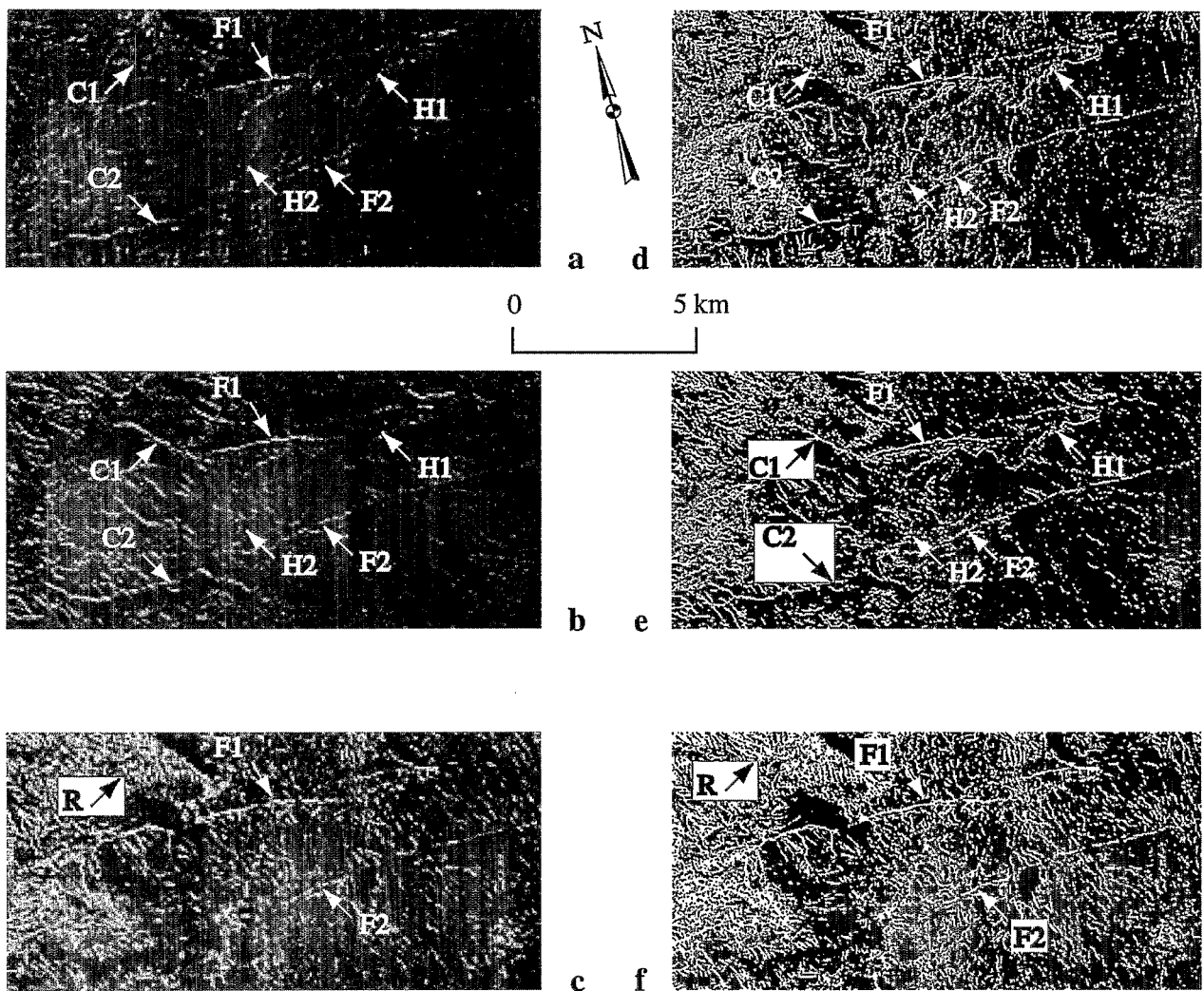


Planche 3 : Mise en évidence des failles :

1. rehaussement des linéaments : a - gradient directionnel NNO-SSE, b - gradient directionnel N-S, c - Chapeau Haut de Forme Noir ;

2. seuillage des linéaments : d - gradient directionnel NNO-SSE, e - gradient directionnel N-S, f - Chapeau Haut de Forme Noir.

(F = faille, H = réseau hydrographique, C = lignes de crêtes, R = ravins)

Plate 3: Showing up the faults

1. enhancing the lineaments: a - NNW-SSE directional gradient, b - N-S directional gradient, c - Black Top Hat;

2. thresholding the lineaments: d - NNW-SSE directional gradient, e - N-S directional gradient, f - Black Top Hat;

(F = fault, H = hydrographical network, C = ridge lines, R = ravines)

Lámina 3 : Puesta en evidencia de las fallas

1. realce de los lineamientos : a - gradiente direccional NO-SSE, b - gradiente direccional N-S, c - Sombrero Alto de Forma Negra ;

2. fijación de umbrales de los lineamientos : d - gradiente direccional NNO-SSE, e - gradiente direccional N-S, f - Sombrero Alto de Forma Negro.

(F = falla, H = red hidrológica, C = líneas de cresta, R = Barrancos)

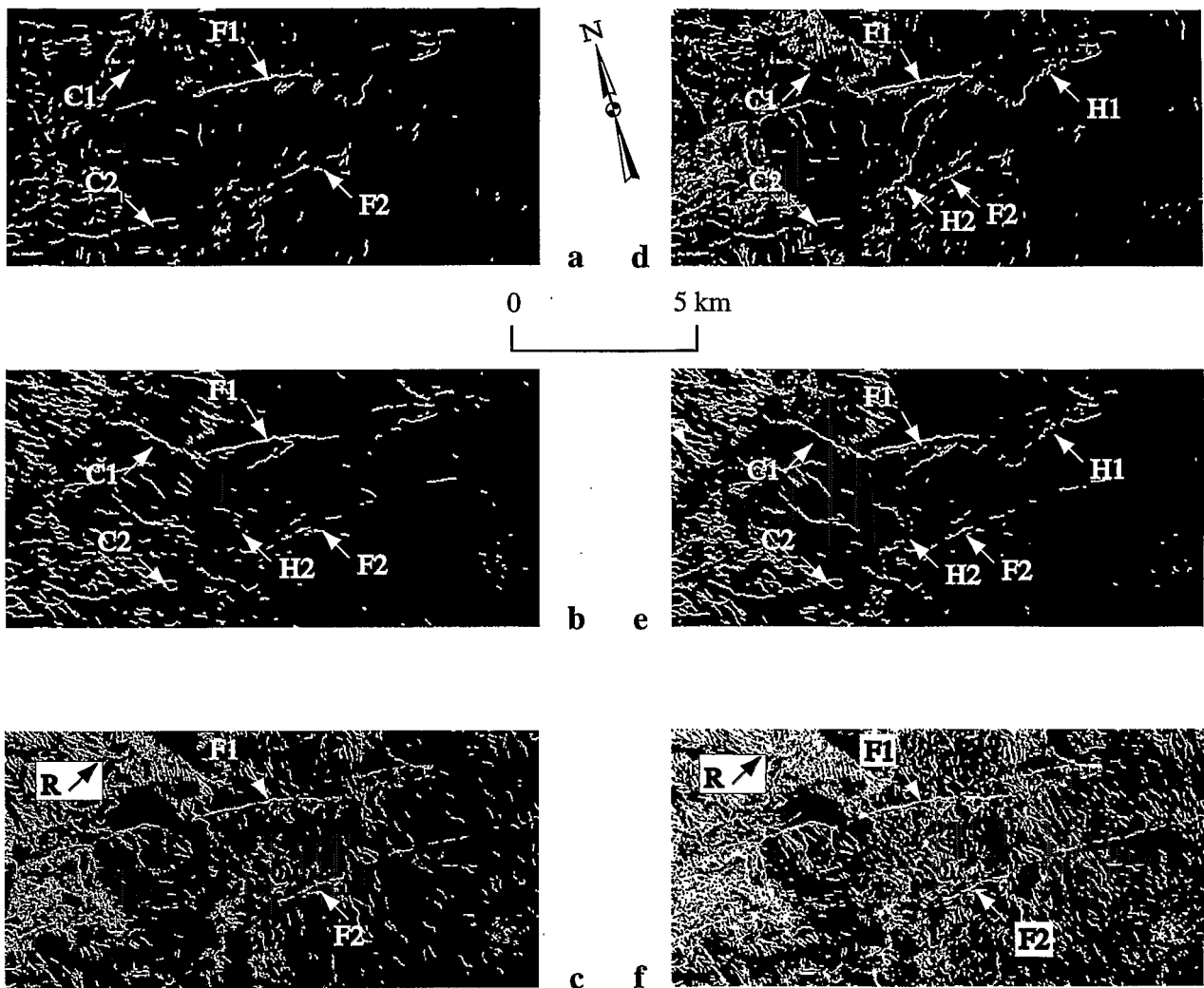


Planche 4 : extraction des failles par reconstruction géodésique avec utilisation, comme marqueur :

1. d'une érosion avec un élément structurant carré : a - gradient directionnel NNO-SSE, taille 1 ; b - gradient directionnel N-S, taille 1 ; c - Chapeau Haut de Forme Noir, taille 2 ;

2. d'un seuil haut (SH) : d - gradient directionnel NNO-SSE, SH = 45 ; e - gradient directionnel N-S, SH = 51 ; f - Chapeau Haut de Forme Noir, SH = 11.

(F = faille, H = réseau hydrographique, C = lignes de crêtes, R = ravins)

Plate 4: Extraction of the faults by geodesic reconstruction using the following markers:

1. an erosion with a square structuring element: a - NNW-SSE directional gradient, size 1, b - N-S directional gradient, size 1, c - Black Top Hat, size 2;

2. a high threshold (SH): d - NNW-SSE directional gradient, SH = 45, e - N-S directional gradient, SH = 51, f - Black Top Hat, SH = 11;

(F = fault, H = hydrographical network, C = ridge lines, R = ravines)

Lámina 4 : extracción de las fallas por reconstrucción geodésica utilizando como marcador,

1. Una erosión con un elemento estructurante cuadrado : a - gradiente direccional NNO - SSE, talla 1, b - gradiente direccional N-S, talla 1, c - Sombrero Alto de Forma Negro, talla 2 ;

2. de un umbral alto (SH) : d- gradiente direccional NNO-SSE, SH = 45, e - gradiente direccional N-S, SH = 51, f - Sombrero Alto de Forma Negro, SH = 11.

(F = falla, H = red hidrológica, C = líneas de cresta, R = Barrancos)

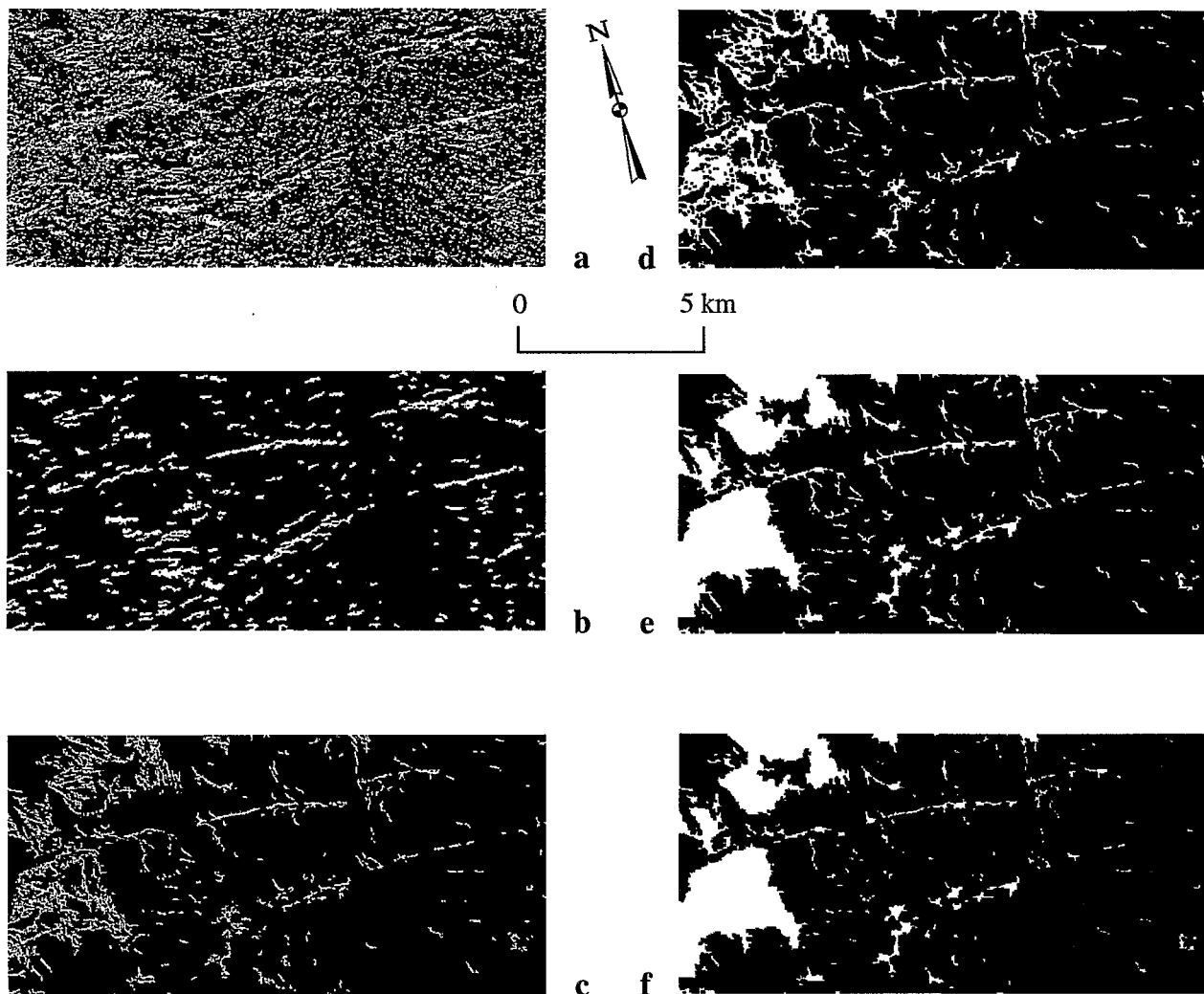


Planche 5 : *Extraction des failles à partir d'un Chapeau Haut de Forme morphologique Noir : a - extraction des directions 3 et 4 du gradient de Robinson lissé ; b - directions nettoyées par reconstruction géodésique avec une érosion ; c - reconstruction géodésique de 4c avec 5b comme marqueur ; d - fermeture de 5c ; e - inversion, reconstruction géodésique par une érosion de 5d et réinversion ; f - ouverture morphologique de 5e.*

Plate 5: *Extraction of the faults using a Morphological Black Top Hat:*

a - extraction of directions 3 and 4 of the smoothed Robinson's gradient; b - directions cleaned by geodesic reconstruction with an erosion; c - geodesic reconstruction of 4c with 5b as a marker; d - closing of 5c; e - inversion, geodesic reconstruction by erosion of 5d and reinversion; f - morphological opening of 5e.

Lámina 5 : *Extracción de las fallas a partir de un Sombrero Alto de Forma morfológica Negro. a - extracción de las direcciones 3 y 4 del gradiente de Robinson ; b - limpieza de direcciones por reconstrucción geodésica con una erosión ; c - reconstrucción geodésica de 4c usando 5b como marcador ; d - cierre de 5c ; e - inversión, reconstrucción geodésica con una erosión de 5d y reinversión ; f - abertura morfológica de 5e.*

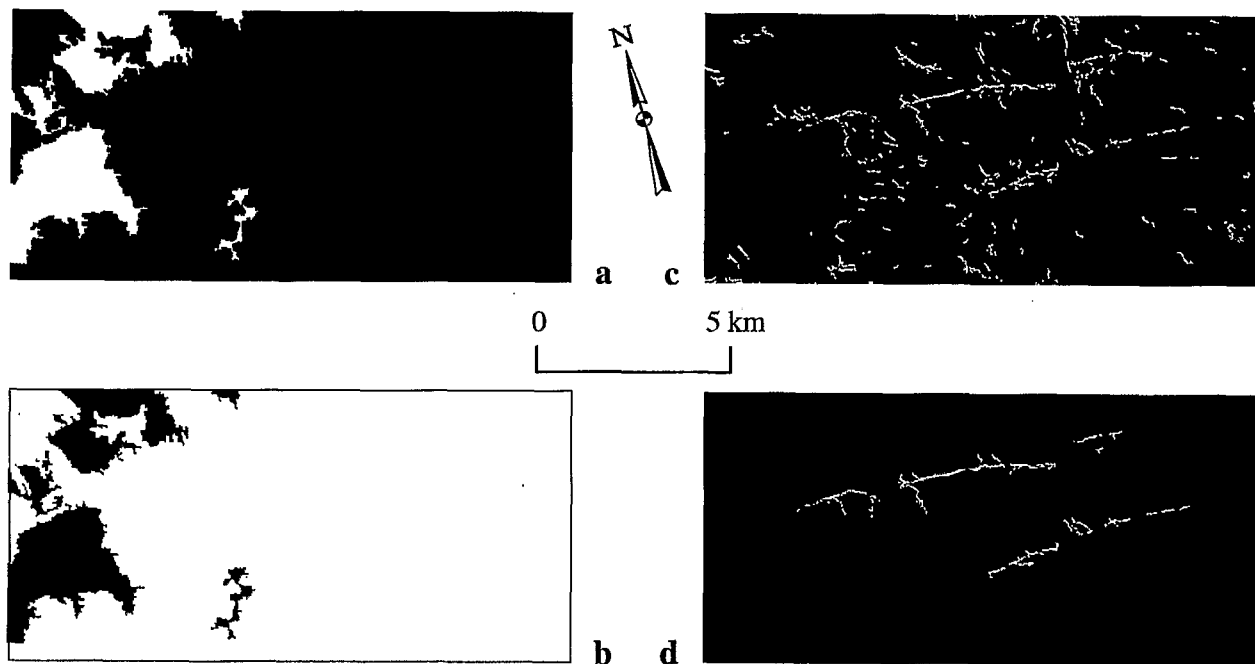


Planche 6 : *Extraction des failles à partir d'un Chapeau Haut de Forme morphologique Noir (suite) : a - élimination des éléments appartenant aux failles par reconstruction géodésique avec une érosion ; b - inversion de 6a pour obtenir un masque ; c - intersection de 6b et de 5c ; d - extraction des failles après étiquetage automatique de 6c.*

Plate 6: *Extraction of the faults using a Morphological Black Top Hat (cont'd):*

a - elimination of items belonging to the faults by geodesic reconstruction with an erosion; b - inversion of 6a to obtain a mask; c - intersecting of 6b and 5c; d - extraction of faults after automatic labelling of 6c.

Lámina 6 : *Extracción de las fallas a partir de un Sombrero Alto de Forma morfológica Negra (continuación). a - eliminación de los elementos pertenecientes a las fallas por reconstrucción geodésica con una erosión ; b - inversión de 6a para obtener una máscara ; c - intersección de 6b y de 5c ; d - extracción de las fallas luego de su etiquetación automática de 6c.*

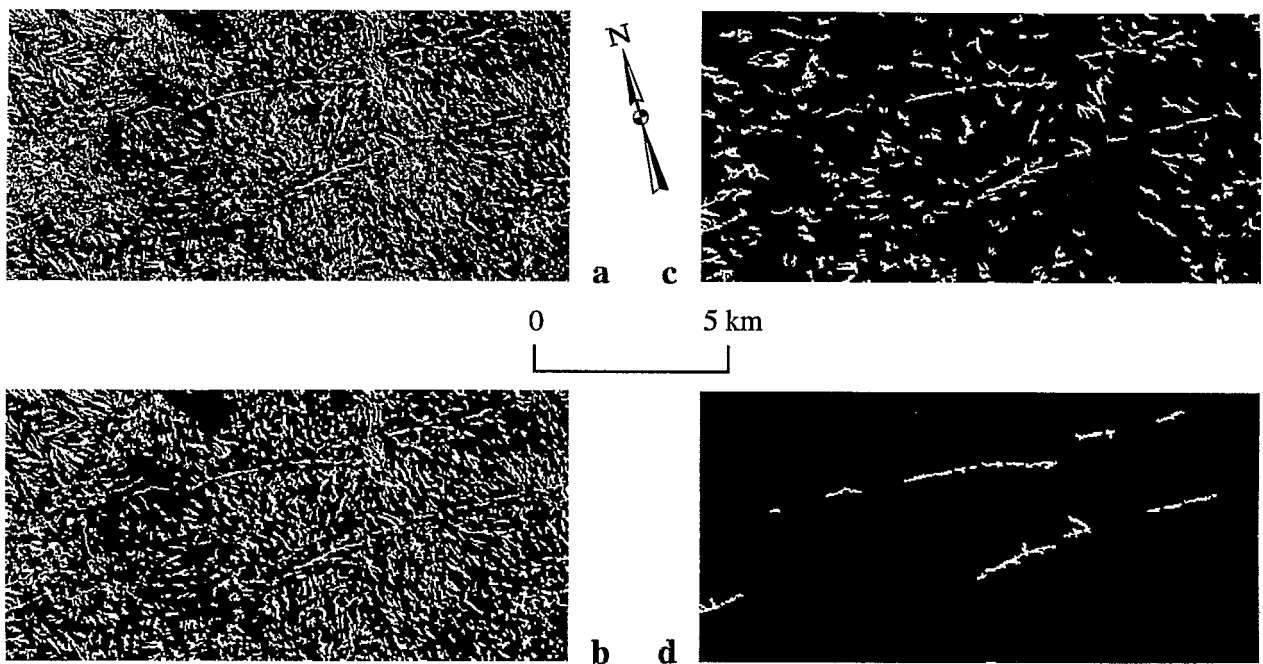


Planche 7 : *Extraction des failles à partir d'un Chapeau Haut de Forme Noir par Reconstruction : a - seuillage du Chapeau Haut de Forme Noir par Reconstruction ; b - nettoyage de 7a par reconstruction géodésique avec une érosion ; c - reconstruction géodésique de 7b avec 5b comme marqueur ; d - extraction des failles après étiquetage automatique de 7c.*

Plate 7: *Extraction of the faults using a Black Top Hat by Reconstruction. a - thresholding of the Black Top Hat by Reconstruction; b - cleaning of 7a by geodesic reconstruction with an erosion; c - geodesic reconstruction of 7b using 5b as a marker; d - extraction of faults after automatic labelling of 7c.*

Lámina 7 : *Extracción de las fallas a partir de un Sombrero Alto de Forma Negra por Reconstrucción. a - fijación de umbrales del Sombrero Alto de Forma Negra por Reconstrucción ; b - limpieza de 7a por reconstrucción geodésica con una erosión ; c - reconstrucción geodésica de 7b usando 5b como marcador ; d - extracción de las fallas luego de la etiquetación automática de 7c.*

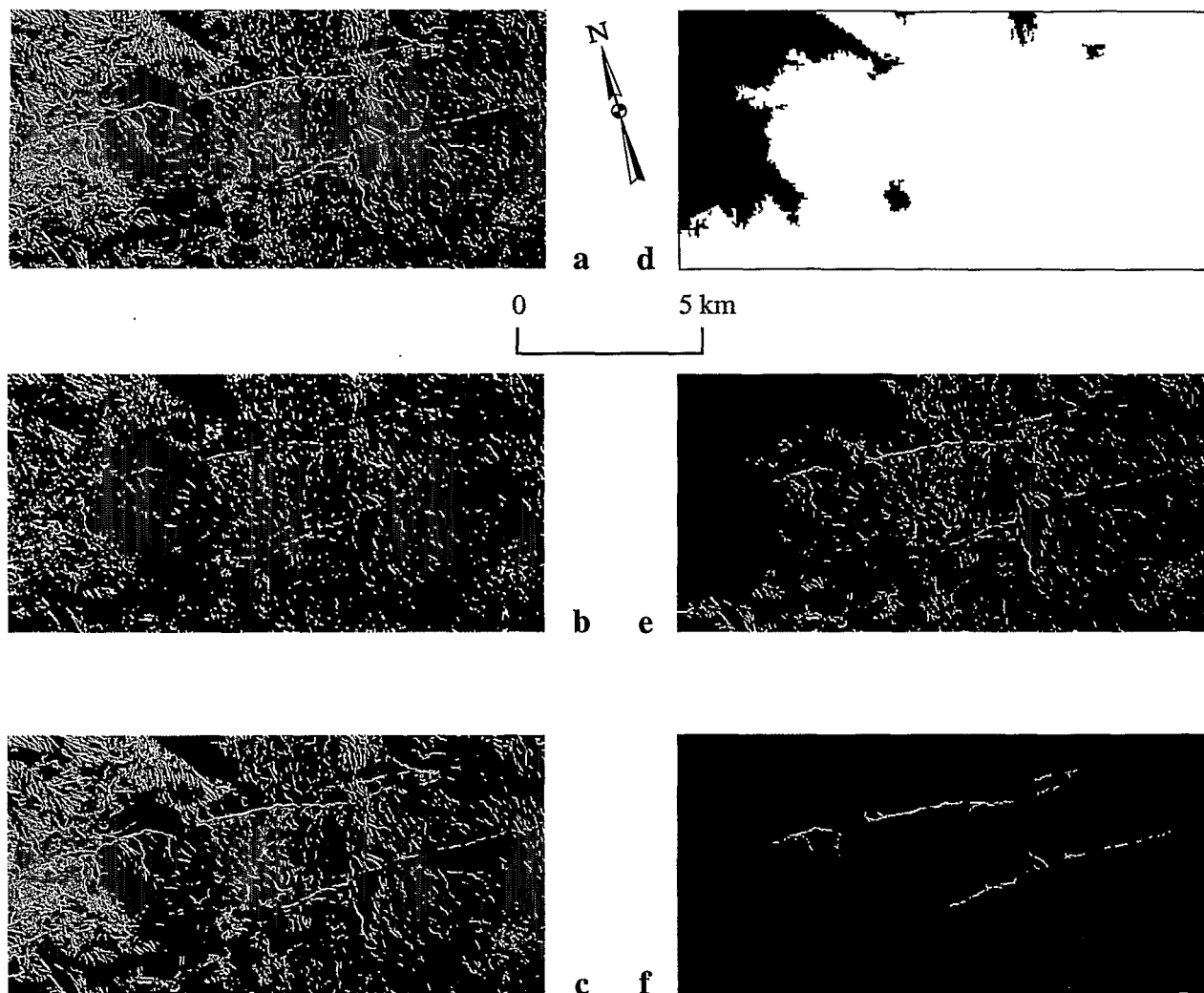


Planche 8 : Méthode du post-it : a - seuillage du Chapeau Haut de Forme morphologique ; b - seuillage du Chapeau Haut de Forme par Reconstruction ; c - reconstruction géodésique du seuillage du Chapeau Haut de Forme morphologique avec le seuillage du Chapeau Haut de Forme par Reconstruction comme marqueur ; d - masque inversé permettant d'isoler les failles ; e - intersection de 8c avec le masque inversé ; f - extractions des failles après étiquetage automatique.

Plate 8: Post-it method: a - thresholding of the Morphological Black Top Hat by Reconstruction; b - geodesic reconstruction of the thresholding of the Morphological Top Hat with thresholding of the Morphological Black Top Hat by Reconstruction as a marker; c - reconstruction géodésique de la fijación de umbrales del Sombrero Alto de Forma morfológica con la fijación de umbrales del Sombrero Alto de Forma por reconstrucción como marcador; d - mascara inversa permitiendo el aislamiento de las fallas; e - intersección de 8c con la máscara invertida; f - extracciones de las fallas luego de la etiquetación automática.

Lámina 8 : Método de « post-it ». a - fijación de umbrales para el Sombrero Alto de Forma morfológica ; b - fijación de umbrales del Sombrero Alto de Forma por reconstrucción ; c - reconstrucción geodésica de la fijación de umbrales del Sombrero Alto de Forma morfológica con la fijación de umbrales del Sombrero Alto de Forma por reconstrucción como marcador ; d - mascara inversa permitiendo el aislamiento de las fallas ; e - intersección de 8c con la máscara invertida ; f - extracciones de las fallas luego de la etiquetación automática.

BULLETIN D'ABONNEMENT

Photo Interprétation

Retourner à :

Éditions ESKA, 12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS - FRANCE

Tél. 01 42 86 56 00 - FAX 01 42 60 45 35

OUI, je désire souscrire un abonnement à la revue PHOTO-INTERPRÉTATION
(1 an - 4 numéros - Frais de port par avion en sus)

Pour l'année 1998

FRANCE 1 128 FF
 ÉTRANGER 1 421 FF

Pour l'année 1999

FRANCE individuel 1 265 FF - institution 1 455 FF
 ÉTRANGER individuel 1 265 FF - institution 1 518 FF

Ci-joint mon règlement

Nom :

Société :

Adresse :

Ville : Code postal : État : Pays :

Prix de vente au numéro	Année 1993 : 290 FF	Année 1989 : 185 FF
	Année 91-92 : 250 FF	Année 1988 : 175 FF
	Année 1990 : 190 FF	Année 1987 : 165 FF