

TRANSFORMÉE DE HOUGH ET DÉTECTION DE LINÉAMENTS SUR IMAGES SATELLITAIRES ET MODÈLES NUMÉRIQUES DE TERRAIN

N. Poncelet et Y. Cornet*

Unité de Géomatique, Dépt de Géographie, Université de Liège, Liège, Belgique

*Auteur correspondant. E-mail: ycornet@ulg.ac.be

Résumé

Une méthode basée sur la transformée de Hough a été développée pour la reconnaissance de linéaments et appliquée au résultat de détecteurs de limite. Après un test de contrôle des performances sur une image bien structurée, un parcellaire régulier de Hesbaye, elle a été appliquée à une image Landsat TM5 et un modèle numérique de terrain des massifs montagneux des Cima d'Asta et des Lagorai dans les Dolomites. Les résultats obtenus sur ces deux types de données spatiales sont comparés entre eux et à la structure géologique de la région. Leurs avantages et inconvénients respectifs sont discutés. La difficulté de reconnaître les structures naturelles et la problématique de l'échelle spatiale de la reconnaissance sont montrées. Les limites du programme implémenté sont analysées. Il est opérationnel mais l'efficacité du détecteur de limites est déterminante et la technique de normalisation permettant les traitements zonaux produit des effets biaisant le calcul des fréquences qui ne sont pas maîtrisés.

Mots-clés N. Poncelet et Y. Cornet*

Abstract

A method based on the Hough transform was developed for the recognition of features. It was applied to the result of edge detectors. After a control of the performances on a well structured cropland image of the Hesbaye, it was applied to Landsat TM5 image and a digital terrain model of the mountainous area of Cima d'Asta and the Lagorai in the Dolomites. The results obtained on both kinds of spatial data are compared between them and with the geological structure of the area. Their respective advantages and disadvantages are discussed. The difficulty in recognizing the natural structures and the problem of the spatial scale of the recognition are shown. The limits of the implemented program are analyzed. It is operational but the effectiveness of the edge detector used is essential and the frequency normalization technique allowing the zonal processing produces uncontrolled errors in the frequency computation.

Keywords

Satellite image, DTM, lineaments, Hough transform, Dolomites

1. INTRODUCTION

L'imagerie satellitaire est depuis de nombreuses années fréquemment utilisée pour aider à la localisation et à la cartographie des structures géologiques qui transparaissent dans la géomorphologie (Parsons et Yearley, 1986, Ozer *et al.*, 1988). L'identification de ces structures et plus spécifiquement des structures linéaires, ou linéaments, peut se faire par une interprétation visuelle des images, de façon assistée ou non par ordinateur, mais on recourt souvent à des traitements plus automatisés. Nous nous intéressons ici à la détection automatique des linéaments.

Les *linéaments* sont définis comme des structures linéaires apparaissant à la surface de la terre sous la forme de discontinuités dans le relief ou dans la couverture du sol. Sabins (1987) évoque la rectilinéarité de structures

qui traduisent l'influence d'un phénomène se manifestant sous la surface du sol. Pour Clark et Wilson (1994), il s'agit d'éléments rectilignes visibles à la surface de la terre et qui sont la représentation de phénomènes géologiques et/ou géomorphologiques. Dans des zones peu anthropisées et à la couverture végétale peu dense, ces discontinuités contribuent à la caractérisation de la lithologie et de la structure géologique sous-jacentes. En particulier, elles révèlent des failles ou des fractures. La densité et l'orientation des linéaments peuvent ainsi donner une idée de l'état de fracturation de la roche (Moore et Waltz, 1983, Casas *et al.*, 2000).

La reconnaissance automatique des linéaments a donc été développée dans les domaines de l'investigation de failles dans des zones difficiles d'accès, l'investigation de ressources en eau ou encore l'étude de l'histoire tectonique et structurale d'une région (Karnieli *et al.*,

1996). L'analyse de la localisation, de l'agencement et de la densité des fractures est aussi utile dans l'étude des tremblements de terre, des glissements de terrain, de la vulnérabilité aux pollutions ou encore lors de la sélection des sites pour la construction de routes, barrages ou ponts et la recherche de minerais ou de pétrole (Moore et Waltz, 1983, Wladis, 1999, Argialas et Mavrantza, 2004).

Ce type de traitement permet de réduire la subjectivité et le temps nécessaire à l'analyse des images par interprétation visuelle, dont les résultats sont rarement reproductibles à l'identique. Il peut aussi fournir à l'interprète un complément d'information car il constitue souvent une synthèse pertinente de l'information spatiale souvent surchargée des photographies aériennes ou des images satellitaires. L'utilisation de ces dernières pour la détection et l'analyse des linéaments présente les avantages, par rapport aux photographies aériennes, de considérer simultanément une aire régionale avec les mêmes paramètres de précision (Koike *et al.*, 1998) et de fournir une information spectrale plus riche (Casas *et al.*, 2000).

Plusieurs techniques de traitement d'image ont ainsi été développées et utilisées pour détecter ces structures, faisant appel à des images satellitaires ou à des modèles numériques de terrain (MNT). Quelle que soit la nature de la donnée utilisée, une question importante est celle du choix de l'échelle la mieux adaptée aux phénomènes que l'on souhaite identifier. La caractérisation de la fracturation à une échelle régionale conditionnera le choix d'une échelle suffisamment petite pour couvrir une large zone, sous des conditions homogènes de télédétection.

Dans le cas des images satellitaires ou, plus généralement, d'images enregistrées par un capteur numérique multispectral se pose aussi le choix de la bande spectrale à utiliser si des traitements monogéniques (traitements impliquant une seule bande spectrale) sont envisagés. Nombreuses sont les fracturations de la roche mère masquées en surface par un sol ne laissant rien apparaître sur les images dans le visible mais bien sur les thermographies infrarouge (IR). Dans la plupart des cas, le proche IR semble être un choix judicieux pour l'analyse de la lithologie et de la structure (Parson et Yearley 1986, Woldai, 1995). La résolution spatiale doit également être adaptée. Il peut être nécessaire de réduire la résolution pour ne conserver que les éléments les plus significatifs. Enfin, le choix de la saison de prise de vue doit également être optimisé pour la mise en évidence des influences structurales sur l'image. Généralement, les saisons à couverture végétale réduite sont favorisées. Les périodes printanières de ressuyage des sols peuvent être choisies, mais Quoilin *et al.* (2001) et Salmon *et al.* (2007) ont constaté que les périodes de sécheresse estivale peuvent aussi être intéressantes. En région montagneuse, les périodes de couverture neigeuse peuvent influencer de différentes façons la nature de l'information fournie par les images.

Les techniques de reconnaissance de linéaments appartiennent aux domaines du traitement d'image relatifs à la détection de limites (*edge detection*) et à la connexion des limites (*edge linking*). La détection de limites consiste à dégager les discontinuités présentes au sein des images. L'identification et l'analyse des linéaments géologiques est l'une des principales utilisations de ces techniques d'*edge detection* (Mather 2004). La connexion des limites consiste à connecter les pixels, détectés par l'étape précédente, constituant une limite (*edge pixels*) afin de définir un ensemble de limites aux formes particulières, le plus souvent des segments de droite. On peut distinguer deux catégories de connecteurs de limites selon qu'ils sont locaux, utilisant le voisinage proche des *edge points*, ou globaux et considérant tous les *edge points* de l'image en même temps. Les pixels constituant une limite sont alors recherchés selon une contrainte de similarité, par exemple l'appartenance à une structure dont la forme est décrite par une même équation, et non une contrainte de voisinage. Ceci a son intérêt car les linéaments apparaissent presque toujours sous une forme discontinue sur une image. Au même titre que l'analyse 3D en coplanéité proposée par Eliason (1992) ou Cornet et Demoulin (1998), la transformée de Hough 2D appartient à la catégorie des techniques de connexion globale de limites. Cet outil permet donc la détection automatique de structures dont la forme géométrique répond à une équation analytique (droite, cercle, ellipse, ...). Elle a été décrite pour la première fois par Paul Hough en 1962 et est utilisée comme technique de reconnaissance de formes appliquée sur des images numériques.

Les applications de la transformée de Hough sont nombreuses et variées, telles que la détection des traits du visage sur des images, la reconnaissance des codes-barres ou d'empreintes digitales et la détection de routes dans des images de télédétection (Geman et Jedynak, 1996, Muniz *et al.*, 1999, Jain *et al.*, 1999, Dobes *et al.*, 2006, Couloigner I. et Zhang Q., 2007, Mejdani *et al.* 2008). Mais, cette technique présente également un grand intérêt dans les domaines de la géologie et de la géomorphologie. Ainsi, Karnieli *et al.* (1996) a appliqué un algorithme incorporant cette transformée pour la reconnaissance de linéaments sur des images et photos aériennes d'Israël et du pourtour de la Mer Noire et les a confrontés aux résultats d'une interprétation classique par un opérateur humain. Des éléments circulaires remarquables comme des diatrèmes de kimberlite ou encore des cratères d'impacts météoritiques ont aussi été détectés à l'aide de la transformée de Hough (Cooper, 2003, 2006, Cooper et Cowan 2004, Bandeira *et al.*, 2008). Argialas et Mavranza (2004) ont également testé différents opérateurs de détection de limites combinés à la transformée de Hough sur des images et un MNT en environnement volcanique sur l'île de Nisyros en Grèce. Ils soulignent l'importance d'un prétraitement adéquat tel que le choix du détecteur de bord appliqué préalablement à la transformée.

L'utilisation la plus simple de la transformée est la détection de droites, mais il est possible de détecter d'autres formes géométriques grâce à la transformée généralisée de Hough, décrite par Duda et Hart (1972) et notamment modifiée afin de reconnaître une courbe analytique quelconque. Généralement, la transformée est appliquée à une image binaire mettant, par exemple, en évidence les limites, mais elle a également été adaptée pour la détection de droites, cercles et paraboles dans des images en niveaux de gris plutôt qu'exclusivement dans des images binaires (Ballard, 1981). Fitton et Cox (1998) ont proposé son adaptation pour l'extraction de structures naturelles dissimulées dans un bruit lié à la présence d'autres éléments naturels ou anthropiques. De nouvelles solutions algorithmiques basées sur les réseaux de neurones ont encore récemment été développées pour solutionner la transformée (Huang *et al.*, 2008).

2. MÉTHODE

Deux étapes méthodologiques sont appliquées successivement à l'image ou au MNT considéré. La première est la détection des limites et la seconde est la transformée de Hough.

2.1. Détection des limites

Pour reconnaître les limites sur une image Landsat, nous avons exploité un filtre gradient de Sobel couramment appliqué en filtrage spatial. Les filtres gradients, directionnels ou non, permettent une détection des contours. Ainsi, le filtre Sobel est une combinaison de deux filtres gradients directionnels: un gradient selon l'axe des colonnes de l'image (Gc) et un gradient selon l'axe des lignes (Gl). La valeur S de l'image filtrée est définie par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{(Gc^2 + Gl^2)} \quad (1)$$

où Gc et Gl représentent le produit de convolution de l'image par les kernels respectifs suivants (filtre gradient selon l'axe des colonnes, à gauche, et des lignes, à droite):

$$\begin{array}{ccc|ccc} -1 & 0 & 1 & -1 & -2 & -1 \\ -2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 \end{array}$$

Dans le cas du traitement d'un MNT, nous avons appliqué une détection des limites par le calcul de la courbure de la surface topographique. Cette technique est également un traitement local qui fait appel à une fenêtre de convolution. La courbure correspond à la dérivée seconde de la surface topographique. Elle peut être décomposée en une courbure en plan et une courbure en profil. Une méthode de calcul de la courbure est basée sur la détermination des dérivées secondes partielles d'une fonction d'ordre 2 par rapport à l'axe des colonnes, d'une part, et des lignes, d'autre part. Cette fonction est obtenue par ajustement local d'une équation d'ordre 2 en utilisant les 9 pixels du voisinage centrés

au pixel courant où le calcul est effectué. La fonction d'ordre 2 prend la forme suivante :

$$Z(c,l) = Ac^2l^2 + Bc^2l + Ccl^2 + Dc^2 + El^2 + Fcl + Gc + Hl + I \quad (2)$$

Ses dérivées secondes partielles par rapport à c et l au centre du voisinage sont : 2 D et 2 E. La dérivée seconde ou courbure est la somme des dérivées partielles soit :

$$2(D + E) \quad (3)$$

Les coefficients de la fonction Z(c,l) sont obtenus aisément en choisissant un repère dont l'origine se trouve au centre de la fenêtre de voisinage. Les coefficients C et D en particulier sont obtenus par les formules suivantes :

$$D = [(Z4 + Z6) / 2 - Z5] / L^2 \quad (4)$$

$$E = [(Z2 + Z8) / 2 - Z5] / L^2 \quad (5)$$

où L = résolution. Pour obtenir les courbures en plan et en profil, il suffit d'appliquer une rotation du référentiel local positionné au centre du voisinage pour obtenir un axe des X correspondant à la ligne de plus grande pente et un axe des Y qui lui est perpendiculaire. Les dérivées en profil et en plan sont alors calculées en utilisant les équations suivantes :

$$d^2Z/dX^2 = 2D \cdot \sin^2\alpha + 2E \cdot \cos^2\alpha + 2F \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \quad (6)$$

$$d^2Z/dY^2 = 2D \cdot \cos^2\alpha + 2E \cdot \sin^2\alpha - 2F \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \quad (7)$$

où α = direction de ligne de plus grande pente mesurée dans le sens horaire par rapport à l'axe des Y et F est donné par la formule suivante:

$$F = (-Z1 + Z3 + Z7 - Z9) / 4L^2 \alpha \quad (8)$$

Dans les équations 4, 5 et 8, les valeurs Zi sont les valeurs d'altitude du voisinage suivant :

$$\begin{array}{ccc} Z1 & Z2 & Z3 \\ Z4 & Z5 & Z6 \\ Z7 & Z8 & Z9 \end{array}$$

L'image obtenue par l'application de l'un de ces filtres ou son seuillage en 2 classes (binaire) isolant un certain nombre de pixels susceptibles d'appartenir à des limites constitue la donnée soumise à la transformée de Hough.

2.2. Transformée de Hough

Le fonctionnement de la transformée de Hough se base sur l'utilisation d'un espace paramétrique, appelé espace de Hough, permettant de simplifier le problème complexe de détection globale de formes dans l'espace image. En effet, dans cet espace paramétrique, la détection est locale et donc plus simple. Toute courbe qui peut être décrite par des paramètres est susceptible d'être détectée par la transformée de Hough. Puisque les linéaments que l'on souhaite mettre en évidence ont une allure rectiligne, nous nous limiterons ici à la reconnaissance de droites.

L'espace de Hough sera donc constitué de deux dimensions, soit le nombre de paramètres nécessaires à l'expression analytique d'une droite. Les deux paramètres utilisés sont ceux apparaissant dans l'équation normale d'une droite :

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (9)$$

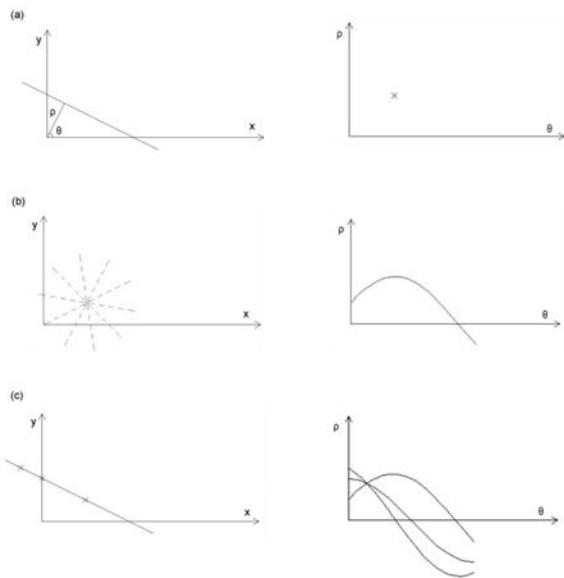


Figure 1. Correspondances géométriques entre l'espace image (espace géographique), à gauche, et l'espace paramétrique de Hough, à droite.

où ρ est la longueur et θ l'orientation du vecteur normal de la droite depuis l'origine d'un référentiel cartésien choisi pour se repérer dans l'image (fig. 1); nous avons positionné son origine au centre de l'image, l'axe des x étant parallèle à l'axe des colonnes et l'axe des y parallèle et opposé à l'axe des lignes. Ces deux paramètres définiront le système de référence de l'espace paramétrique de Hough pour la reconnaissance de droites.

La formulation normale de l'équation de la droite est préférable à sa formulation cartésienne ($y = a x + b$) car, contrairement à l'espace (a, b) , l'espace paramétrique (θ, ρ) est borné et homogène (Duda et Hart, 1972, Hu, 1993).

De cette façon, une droite définie par un couple (θ, ρ) passant par un point de coordonnées (x, y) dans l'espace image peut être représentée dans l'espace de Hough par un seul point (fig. 1a). Il existe un nombre infini de droites passant par un même point (x, y) et dont seule l'orientation varie. La représentation de ce faisceau de droites dans l'espace de Hough donnera lieu à une sinusoïde (fig. 1b). Lorsque plusieurs points sont alignés, la droite qui les relie correspondra dans l'espace paramétrique de Hough à l'intersection de plusieurs sinusoïdes (fig. 1c).

La méthode de la transformée de Hough utilise ces propriétés afin de détecter des ensembles de pixels alignés dans une image, via leur représentation dans ce nouvel espace à deux dimensions. Dans cet espace, le problème de détection de droites se transforme alors en un simple problème d'identification de pics de fréquence (Fitton et Cox, 1998, Fernandes et Oliveira, 2008). On peut aussi concevoir ce fonctionnement comme un système de vote. Chaque élément de l'espace image vote pour un ensemble d'éléments de l'espace paramétrique

de Hough (Milgram, 1993). Les éléments votants peuvent par exemple être tous les points portant la valeur 1 dans une image binaire résultant du seuillage d'un détecteur de limites. Lors de ce vote, chaque point peut aussi avoir un poids différent et proportionnel à la valeur du détecteur de limites. L'espace paramètre constitue une matrice accumulative où la valeur en un point peut être ou non incrémentée à chaque itération. Ce sont les points par où les sinusoïdes passent qui sont incrémentés. La définition d'un seuil sur les fréquences obtenues permet ensuite de ne garder que les points auxquels correspondent les fréquences les plus élevées. La position de ces points donne alors les paramètres des droites à représenter.

Un aspect important est la discrétisation de l'espace de Hough. Comme l'espace image, il est divisé en cellules (on peut aussi parler de pixels), dont la largeur correspond à des intervalles de valeurs de θ et ρ . Le nombre de cellules de la matrice dépend donc du choix de la largeur de l'intervalle, qui détermine par ailleurs les précisions angulaire ($\Delta\theta$) et de distance ($\Delta\rho$) avec lesquelles les droites seront déterminées. Ce choix revêt une grande importance sur la détection des alignements. Ainsi, la distance séparant deux points candidats et la précision angulaire déterminent leur appartenance à une même droite. La fréquence associée à chaque couple de valeurs (θ, ρ) est dépendante des valeurs de $\Delta\theta$ et $\Delta\rho$ adoptées.

Afin de représenter dans l'espace image les droites détectées, on effectue une transformation inverse. Les coordonnées (θ, ρ) des points de la matrice accumulative où sont situés les pics de fréquence de valeur supérieure à un certain seuil sont lues et utilisées pour représenter les droites correspondantes. Les droites sélectionnées sont représentées dans l'espace image de départ en mode vecteur par calcul de leurs intersections avec les bordures de l'image.

Nous avons écrit un code (disponible sur demande) sous MatLab afin d'appliquer le traitement par transformée de Hough à des fichiers images. La première partie du programme applique la transformée de Hough à une image d'entrée codée sur 8 bits non-signés dont on spécifie le nombre de lignes et de colonnes. En sortie trois images sont produites, représentant les histogrammes obtenus dans l'espace de Hough. L'axe des abscisses de cet espace présente les valeurs de θ (angle de 0 à 360° mesuré dans le sens trigonométrique par rapport à l'axe des x de l'image) et l'axe des ordonnées les valeurs de ρ .

Il est possible de régler la précision sur ρ , longueur du vecteur entre l'origine et la droite. La précision sur cette distance est, par défaut, une largeur d'un pixel, ce qui correspond à la résolution de l'image, mais elle peut être améliorée. Cette précision conditionne le nombre de cellules (ou pixels) sur la hauteur de la matrice accumulative. Étant donné que l'origine du référentiel (x, y) est positionné au centre de l'image, la valeur maximale que peut prendre ρ est la longueur de la demi-diagonale

de l'image.

Nous ne devons pas considérer des valeurs de ρ négatives dans le dimensionnement de l'espace de Hough, étant donné qu'il s'agit d'une valeur de distance à l'origine. Un faisceau de droites passant par un point (x,y) prendra des valeurs de θ comprises dans un intervalle angulaire de -90 degrés à $+90$ degrés mesuré par rapport au vecteur position du point considéré dans l'image. Dans l'espace des paramètres (θ,ρ) , la courbe décrite par l'ensemble des couples (θ,ρ) correspondant à ce faisceau est comparable à un demi-lemniscate de Bernoulli.

La précision angulaire a été réglée en fonction des dimensions de l'image, la valeur du plus petit angle possible interceptant une largeur d'un pixel dans un des coins de l'image est calculée: il s'agit de la distance verticale entre deux pixels l'un au dessus de l'autre dans le coin de l'image si cette dernière est plus haute que large, ou de la distance horizontale entre deux pixels l'un à côté de l'autre si l'image est plus large que haute. L'introduction d'un coefficient permet de modifier la précision sur l'angle. Une précision angulaire trop fine est inutile et nécessite un temps de calcul trop long. Par ailleurs, elle produit une redondance d'alignements constitués des mêmes pixels candidats.

La définition des seuils de détection à employer se fait empiriquement, par interprétation des matrices accumulatrice. Ensuite, la seconde partie du programme permet de définir un seuil de fréquence dans l'espace paramètre et de déterminer les positions (θ,ρ) des points dépassant ce seuil. Les intersections des droites définies par ces paramètres (θ,ρ) avec les bords de l'image sont alors calculées pour permettre la représentation en mode vecteur dans l'espace image.

Cette méthode de détection des linéaments présente plusieurs originalités. Tout d'abord, il nous est apparu

capital de procéder à une normalisation des fréquences dans l'espace de Hough. En effet, en appliquant la transformée telle quelle, la méthode détecte moins bien les alignements situés dans les coins de l'image. Le seuillage sur la fréquence dans l'espace de Hough favorise en effet les droites passant à proximité du centre de l'image puisqu'elles sont susceptibles de contenir plus de pixels de l'image. La normalisation consiste à exprimer la fréquence dans l'espace de Hough par rapport à la fréquence maximale possible pour chaque combinaison de valeur (θ,ρ) , qui dépend de la longueur du segment de droite traversant l'image. Nous avons donc construit une matrice de normalisation calculée comme le résultat de la transformée de Hough d'une image, de même dimension que l'image sur laquelle on applique la transformée, mais où tous les pixels auraient la valeur 1. Il suffit alors de diviser chaque élément de la matrice accumulatrice, résultat de la transformation de l'image, par son homologue dans la matrice de normalisation. De cette façon, on obtient un résultat plus représentatif et plus homogène sur la totalité de l'espace image.

Comme nous l'avons déjà précisé, il est également possible d'appliquer ce traitement à une image non binaire. Pour cela, on peut directement utiliser le résultat d'un détecteur de limite, un filtre gradient par exemple, reclassé en 256 niveaux pour être codé sur 8 bits. Ceci permet d'éviter le seuillage du détecteur préalablement à l'application de la transformée et d'exploiter sa valeur comme poids des pixels de l'espace image dans la construction de la matrice accumulatrice. Ceci permet d'attribuer plus de poids aux pixels de fort gradient, par exemple.

Notre programme offre aussi la possibilité d'utiliser un masque sur l'image pour appliquer une transformée zonale. Les alignements ne sont alors recherchés que sur la partie de l'image où le masque vaut 1 et la nor-



Figure 2. Résultat de la transformée appliquée à une image de Hesbaye au parcellaire bien structuré, terrain d'application idéal pour tester le programme de détection de structures linéaires.

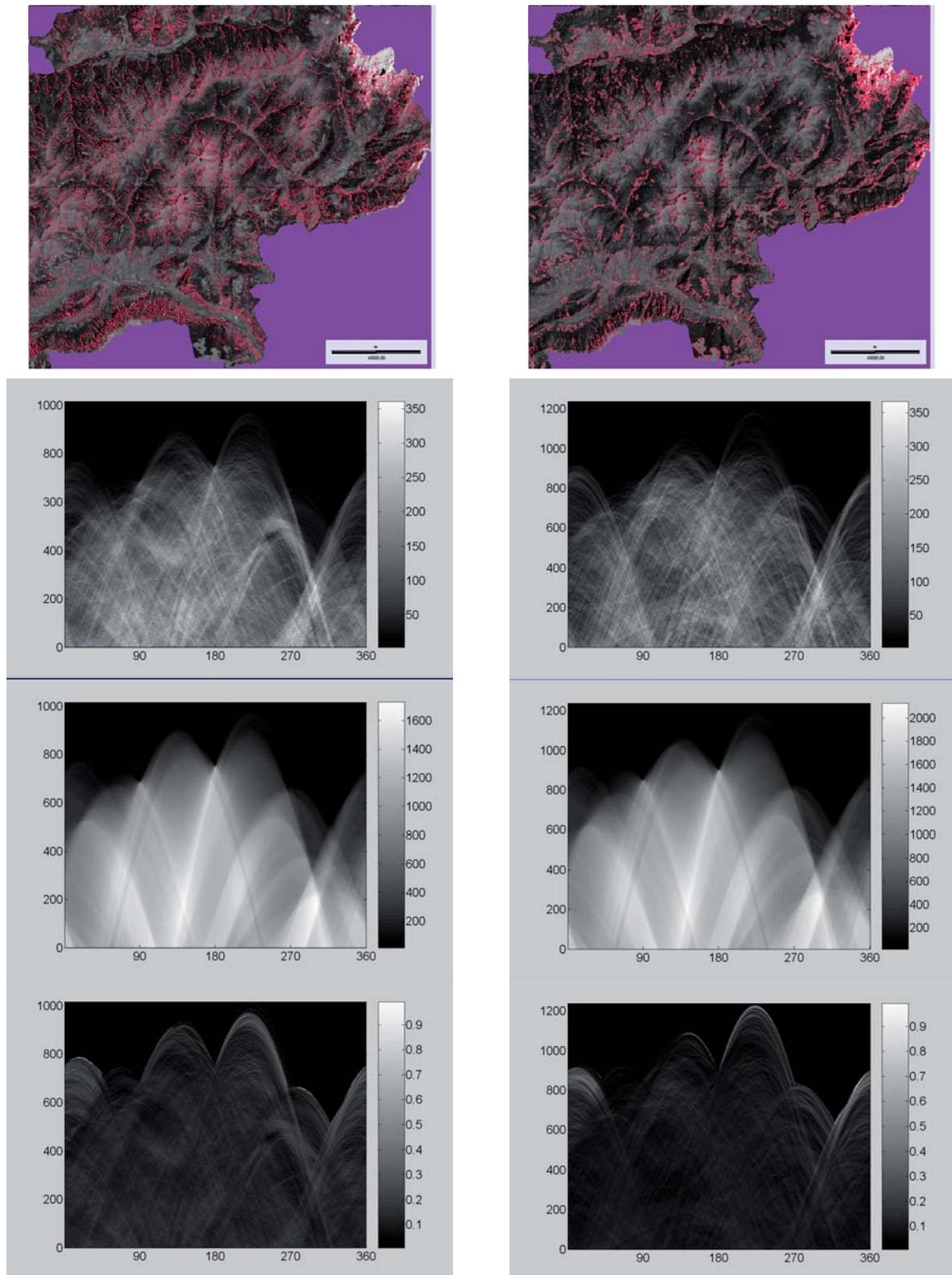


Figure 3. (Haut) en superposition à l'image Landsat TM5, images binaires soumises au traitement (échelle graphique: 10 km): à gauche, concavités calculées sur le MNT puis seuillées; à droite, gradients calculés sur l'image Landsat puis seuillés. (Bas) 3 histogrammes résultant de la transformées de Hough (sur l'image LANDSAT, elle a été appliquée aux seuls pixels de la zone commune au MNT - province de Trento): en haut, histogramme non normalisé; au centre, histogramme de référence pour la normalisation; en bas, histogramme normalisé.

malisation se fait alors en fonction de la forme du masque. Cela permet d'adapter le seuil de détection à des

zones spécifiques de l'image. Ainsi, il est par exemple possible d'utiliser des masques en fonction de types de

lithologie produisant des morphologies plus ou moins accidentées, induisant des contrastes et donc des limites différemment affirmées.

3. TEST, APPLICATION ET RÉSULTATS

En guise de test, le programme a d'abord été appliqué au canal proche infra-rouge de la nouvelle orthoimage de la Wallonie produite par la DGA en 2006 et 2007 (Ministère de la Région Wallonne (Direction Générale de l'Agriculture) et Université de Liège, Laboratoire Surfaces (Unité de Géomatique), 2008). Il s'agit d'une image de Hesbaye dont le paysage est constitué de formes anthropiques bien structurées. Elle constitue un terrain d'application idéal pour la détection de structures linéaires. Ce test a permis de vérifier l'efficacité sur ce genre de données de la transformée telle que nous l'avons implémentée (fig. 2).

Nous l'avons ensuite appliquée à une image satellitaire et à un MNT d'une zone du sud des Dolomites située dans la province de Trento, au nord de l'Italie, dont nous souhaitons étudier la fracturation à l'échelle régionale (fig. 3). Cette zone s'étend approximativement sur 20 x 20 kilomètres carrés. Elle comprend le sud de la chaîne des Lagorai, ainsi que le massif de Cima d'Asta et ses alentours. Du point de vue structural, les Dolomites peuvent se concevoir comme un large synclinorium de direction axiale O-E, dont le cœur est constitué principalement de dolomie triasique (Bosellini, 1989, Cassinis et Perotti, 2007). Sur les bordures septentrionale et méridionale, les roches les plus anciennes du socle paléozoïque affleurent. Notre zone d'étude est située à la limite sud de ce synclinorium et est caractérisée par une lithologie très variée (fig. 4) :

- roches magmatiques effusives, rhyolites et andésites, au nord, représentées par la large plate-forme volcanique de la province de Bolzano, témoin d'une longue et intense activité volcanique développée au Permien (Cassinis et Perotti 2007) ;
- roches métamorphiques schisteuses et roches mag-

matiques intrusives au centre correspondant aux affleurements du socle paléozoïque ;

- roches sédimentaires plus récentes, principalement des dolomies et calcaires, de part et d'autre de la vallée du Brenta (Valsugana) au sud de notre zone ainsi que dans la région des Pale di San Martino au nord-est de notre zone..

Le sud de la zone est traversé par la *Linea della Valsugana*, un système de failles de direction générale OSO-ENE appartenant à la ceinture de chevauchements à vergence sud du domaine des Alpes sud-orientales sur les Préalpes vénitiennes. Il s'agit d'un important élément structural s'inscrivant au sein d'un système de compression polyphasé plus large ayant affecté les Alpes méridionales durant le Tertiaire après la collision de la microplaque adriatique et de la plaque européenne. Elle sépare les masses rocheuses plus anciennes et plus rigides du nord des roches sédimentaires plus récentes, tendres et plissées qui affleurent au sud.

Les deux exemples reproduits aux figures 3 et 4 montrent les résultats obtenus, d'une part, sur la bande 5 d'une image Landsat TM enregistrée en automne et, d'autre part, sur un MNT à 30 m de résolution.

L'image Landsat a été prétraitée par filtrage de type Sobel visant à une accentuation des contours suivi d'un seuillage. L'image binaire obtenue a ensuite été soumise à notre programme de transformée de Hough. Un masque a été utilisé afin de travailler sur la même zone que celle couverte par le MNT, dont les limites sont celles de la région administrative du Trentin.

La courbure de la surface topographique a été calculée sur le MNT. Les valeurs de courbure négatives, qui correspondent aux concavités tournées vers le haut, ont été sélectionnées et seuillées afin de ne garder que les courbures suffisamment marquées de pieds de versant ou de parties de versant ainsi que les fonds de vallée. L'image binaire obtenue a servi d'entrée à la transformée de Hough.

Les paramètres utilisés pour ces prétraitements sont reportés dans le tableau 1.

Tableau 1. caractéristiques du prétraitement effectué sur les deux produits soumis à la transformée de Hough et seuils choisis pour la détection des droites.

	MNT	Bande 5 image Landsat TM
Prétraitement effectué	Dégradation de 10 à 30 m, calcul de la courbure et seuillage	Filtre Sobel 3x3 et seuillage
Type d'input	Raster Binaire	Raster Binaire
Histogramme choisi	Histogramme non normalisé	Histogramme non normalisé
Seuil choisi pour la représentation des droites	S = 280	S = 270

Les histogrammes obtenus et les résultats dérivés pour les deux cas sont présentés aux figures 3 et 4.

Quatre documents sont montrés à la figure 3 pour chaque type de données fourni en entrée (MNT à gauche et image LANDSAT à droite). Le premier est l'image

binaire des courbures seuillées calculées sur le MNT ou celle des gradients seuillés calculés sur la bande 5 de l'image LANDSAT. Le second est la représentation de la matrice d'accumulation dans l'espace de Hough sans normalisation. Le troisième est la matrice de nor-

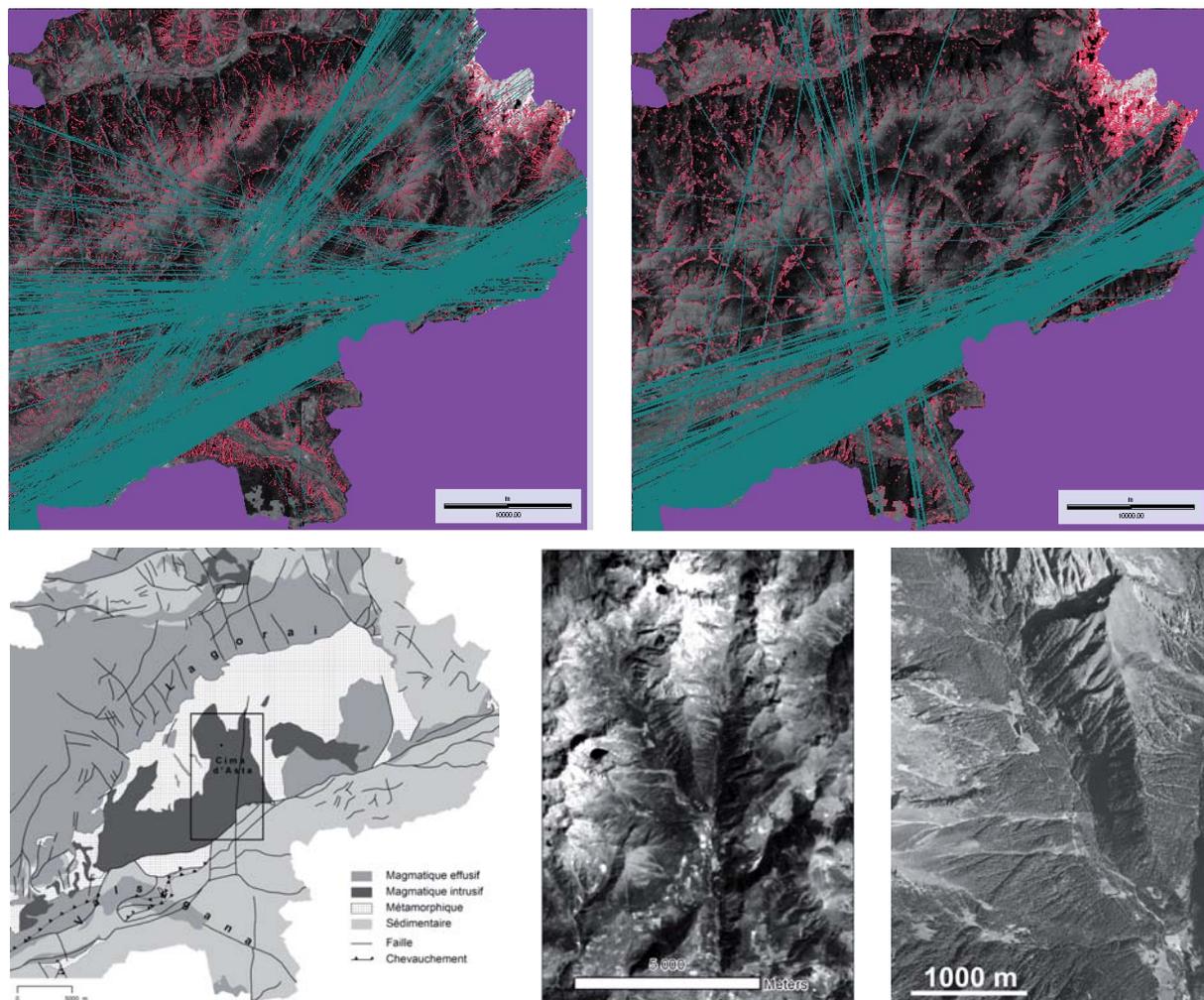


Figure 4. (Haut) représentation dans l'espace image des droites obtenues par l'application de la transformée de Hough à des images seuillées des courbures du MNT (à gauche) et des gradients de l'image LANDSAT (à droite). (Bas) à gauche: pour comparaison, carte géologique simplifiée avec délimitation de la zone montrée sur les deux images suivantes; au milieu: bande 5 de l'image LANDSAT; à droite : photographie aérienne (vol IGM-IT 1986).

malisation. Le quatrième est la matrice d'accumulation normalisée, elle correspond à la division de la première matrice par la deuxième.

Les droites présentées à la figure 4 sont celles produites par notre programme. Le seuil de détection des droites, repris au tableau 1, est choisi sur base de l'histogramme de la première image de la figure 3, représentant les fréquences non normalisées. Les seuils de 280 et 270 ont été déterminés de façon empirique de manière à obtenir, dans l'espace image de départ, un maximum de droites tout en conservant une représentation lisible et interprétable. Les droites détectées sur cette base sont représentées dans l'espace image. De plus, la figure 4 présente un extrait simplifié de la carte géologique de la région.

4. DISCUSSION

La qualité des résultats obtenus ne peut être évaluée que par comparaison avec une interprétation d'image réalisée par un géomorphologue structuraliste expé-

menté. Notre réflexion est moins ambitieuse et se limitera à une comparaison avec les structures géologiques connues et la carte géologique du Trentin.

Les linéaments présentés à la figure 4 mettent en évidence quelques grandes directions préférentielles. La direction SW-NE de la succession de failles du chevauchement principal de la Valsugana apparaît nettement, tant sur le MNT que sur l'image Landsat. Par contre, la direction préférentielle N-S, notamment représentée par la vallée du Tolva au centre de la zone d'étude, n'est pas identifiée. La direction NW-SE qui est surtout développée dans la chaîne du Lagorai au N n'apparaît que de façon très peu marquée sur les deux images-résultats. Cette constatation souligne un problème inhérent aux données de base sur lesquelles nous avons appliqué la transformée de Hough. La faille de la vallée du Tolva est relativement longue mais elle est très mal représentée sur les images de gradient et de courbure. C'est donc l'étape de détection des limites qui a failli en raison de la trop grande largeur de la vallée par rapport à la dimension du voisinage considéré pour la dé-

tection des limites.

Par ailleurs, il existe des différences importantes entre l'information extraite du MNT et de l'image. Une famille de droites WSW-ENE et une autre NE-SW sont mises en évidence sur le MNT, mais pas sur l'image. La première de ces familles est peu, voire pas du tout représentée sur la carte géologique et résulte en partie de l'effet morphologique des torrents d'ordre 1 qui s'écoulent selon la ligne de plus grande pente sur les versants des différentes vallées coulant vers le sud. Par contre, la direction de la seconde est en accord avec un système de failles apparaissant dans la chaîne du Lagorai, mais la position des droites identifiées par la transformée de Hough ne l'est pas. Néanmoins, cette direction est aussi présente dans la zone traversée par les droites identifiées à partir du MNT (fig. 4, en bas au centre et à droite). Il est cependant évident qu'en plus de la nature de l'information (MNT ou réflectance), la résolution joue probablement un rôle déterminant. Ainsi, les ravins SW-NE sont particulièrement bien marqués sur la photographie aérienne alors qu'ils le sont moins sur l'image Landsat soumise à l'analyse.

Dans le cas de l'image satellitaire, les linéaments sont susceptibles de s'exprimer à la surface du sol à la faveur d'une série d'éléments du paysage incluant principalement la topographie, le réseau de drainage et la végétation. Mais tout ce qui est visible n'est pas significatif du point de vue géologique. Or la transformée détecte tous les alignements, parmi lesquels beaucoup sont en fait inexploitable. De même, sur le MNT, si tous les éléments possèdent une signification morphologique, seuls certains d'entre eux peuvent indiquer des linéaments géologiques. Parmi les directions détectées par la transformée de Hough, un certain nombre ne sont en tout cas pas en accord avec la fracturation de la roche ou les alignements morphostructuraux ou morpholithologiques connus.

A l'opposé, il existe des éléments significatifs du point de vue géologique que la transformée de Hough ne détecte pas. L'exemple du Tolva cité ci-dessus illustre cette constatation. Ici, les alignements des fins de segments correspondant à de petites structures transverses à un linéament majeur N-S ne permettent pas de détecter ce dernier car, par principe, la transformée de Hough ne le permet pas alors qu'il est évident à l'analyse visuelle des images. C'est aussi le cas d'alignements de cols, particulièrement visibles dans le NE de la zone étudiée au pied du versant sud des Lagorai (fig. 4).

Nous constatons aussi que la transformée de Hough associe des segments ou certains pixels leur appartenant quoiqu'ils soient parfois très éloignés les uns des autres et aient peu de relation directe entre eux d'un point de vue structural. A l'inverse certaines structures de petite taille et non connectées à d'autre ne sont pas reconnues. Dans ces cas, l'effet de l'échelle d'analyse par rapport à la dimension caractéristique des structures est flagrant. Étant donné le caractère local de ces éléments significatifs, ils ne sont pas détectés par la transformée parce

qu'ils ne sont pas constitués de suffisamment de points alignés pour engendrer un pic de fréquence dans l'histogramme. Pourtant, dans ce cas, c'est l'élément 'anormal' par rapport à la direction la plus fréquente qui est le plus révélateur de la structure géologique. La seule solution possible pour remédier à cet inconvénient est une transformée locale.

Enfin, les linéaments géologiques peuvent se dessiner sous la forme d'enchaînements de segments de directions assez proches, mais variant légèrement en fonction de l'interaction entre le relief, l'érosion, et la disposition des failles, des fractures, des couches de lithologies différentes. L'alignement dans un contexte montagneux n'est apparent que si les discontinuités géologiques influençant la morphologie sont quasiment verticales.

Notre application permet d'identifier et de représenter des droites sur l'entièreté du cadre de l'image et non des segments. Ce sont donc les directions des alignements qui sont détectées et représentées mais aucune information n'apparaît sur leur segmentation spatiale. Par ailleurs, les structures naturelles correspondant à des morphologies d'origines tectonique, lithologique et/ou structurale n'ont pas nécessairement la forme parfaitement régulière d'une droite sur une longueur suffisante relativement à la longueur maximale possible pour un couple (θ, ρ) donné. Elles peuvent alors échapper au traitement par transformée de Hough. A l'analyse des pixels marqués par le détecteur de limites et appartenant aux droites reconnues par la transformée de Hough, il apparaît même que certaines droites peuvent résulter de l'alignement de pixels appartenant à un grand nombre de structures qui leur sont obliques. Enfin, si la transformée est reconnue pour être peu sensible au bruit, il semble toutefois que le choix du détecteur de limite et son seuillage ainsi que l'optimisation du seuil de fréquence dans l'espace de Hough sont essentielles afin de minimiser ces diverses difficultés.

La transformée de Hough telle que nous l'avons implémentée montre donc ses limites dans le cas de la détection des linéaments géologiques dans les Dolomites. L'exemple de la Hesbaye souligne par ailleurs que la détection des alignements par la transformée de Hough est d'autant plus efficace que les données de départ sont structurées. L'extraction des linéaments sur des images géographiques couvrant une région aussi peu homogène que celle que nous avons traitée dans les Dolomites, est très éloignée du problème simple de détection d'objets individualisés sur un fond uniforme et elle demande des adaptations particulières. Les images de télédétection contiennent en effet beaucoup d'information «parasite» concernant l'ensemble des éléments présents sur le territoire et les linéaments extraits ne correspondent pas uniquement à des structures géologiques.

Bien que nous ayons souligné l'importance de la normalisation, seul le résultat obtenu par l'analyse de l'histogramme des fréquences cumulées non normalisées a été choisi pour illustrer notre étude. Ce choix est justifié

par l'examen de l'histogramme des fréquences normalisées (fig. 3) qui montre des fréquences très fortement exagérées pour les valeurs maximales de ρ , c'est-à-dire pour les structures les plus éloignées du centre de l'image. Ces fréquences excessives résultent de la propagation d'erreur produite par le fait que la dérivée de ρ par rapport à θ dépend de x , y et θ . Ce problème mérite certainement une amélioration future.

5. CONCLUSION

La méthode d'extraction d'alignements dans une image par la transformée de Hough exploite un concept simple et est peu sensible au bruit. Elle est applicable à peu près à n'importe quel type d'image et permet de faire varier de nombreux paramètres.

Nous l'avons implémentée et avons contrôlé son efficacité sur une image bien structurée de Hesbaye avant de l'appliquer à une région montagneuse des Dolomites pour y détecter des linéaments. Dans l'exemple rapporté, nous avons utilisé en entrée deux détecteurs de limite différents, un calcul de courbure sur un MNT et un calcul de gradient sur une image LANDSAT TM5. Bien que notre implémentation permette de traiter les résultats de ces calculs reclassés en 256 niveaux, les tests discutés concernent leur reclassification par seuillage empirique en deux modalités (image binaire).

L'efficacité du détecteur de limite utilisé, son seuillage et le type de donnée spatiale (MNT ou image satellite) auquel il est appliqué sont déterminants sur les performances de l'étape de connexion des limites par la transformée de Hough. Par ailleurs, le traitement global pour la détection des structures naturelles apparaît assez peu performant. Le choix, également empirique, du seuil sur ces fréquences non normalisées pour la représentation des droites dans l'espace image est particulièrement délicat. Il mène à une sous-représentation des droites proches des coins des images et n'est pas adapté à un traitement zonal. Pour y remédier, nous avons envisagé une normalisation des fréquences, mais notre méthode produit un effet inverse mal maîtrisé.

En traitement global, certaines lignes ne correspondent à aucune structure réelle et connectent des segments ou pixels très éloignés les uns des autres. Une solution par traitement zonal telle que celle proposée par Couloigner et Zhang (2007) pour la reconnaissance d'éléments routiers semble constituer une alternative prometteuse. Cette solution permettrait de mieux maîtriser l'échelle spatiale de la reconnaissance qui reste néanmoins influencée par la résolution spatiale des données.

D'autres linéaments ne sont pas reconnus par la transformée car, par principe, elle ne le permet pas. Il s'agit d'alignements de cols. Enfin, des éléments morphologiques organisés de façon quasi systématiques tels que les torrents d'ordre 1 s'écoulant selon la ligne de plus grande pente sur les versants de vallées plus importantes et n'ayant aucune origine structurale peuvent produire des détections sans signification structurale particulière.

Remerciements

Nous tenons à remercier Matteo Massironi, chercheur à l'Université de Padoue, qui a mis à notre disposition la version numérique de la carte géologique de la province de Trente basée sur la carte d'Italie au 1 : 100 000^{ème} ainsi que le MNT.

Bibliographie

- Argialas, D.P. et Mavrantza, O. D., 2004. Comparison of edge detection and Hough transform techniques for the extraction of geologic features. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34, 1-6.
- Ballard, D.H., 1981. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition*, 13, 2.
- Bandeira, L., Barreira M., Pina, P. et Saraiva, J., 2008. A comparison of automated crater detection methods. *European Planetary Science Congress Abstracts* 3.
- Bosellini, A., 1989. *La storia geologica delle Dolomiti*. Edizioni Dolomiti, 148 p.
- Casas, A.M., Cortes, A.L., Maestro, A., Soriano, A.M., Riaguas, A. et Bernal, J., 2000. LINDENS: a program for lineament length and density analysis. *Computers and Geosciences*, 26, 1011-1022.
- Cassinis, G. et Perotti, C.R., 2007. A stratigraphic and tectonic review of the Italian Southern Alpine Permian. *Palaeoworld*, 16, 140-172.
- Clark, C.D. et Wilson, C., 1994. Spatial analysis of lineaments. *Computers et Geosciences*, 20, 7-8, 1237-1258.
- Cooper, G.R.J., 2003. Feature detection using sun shadings. *Computers et Geosciences*, 29, 941-948.
- Cooper, G.R.J., 2006. Geophysical applications of the Hough Transform. *South African Journal of Geology*, 109, 555-560.
- Cooper, G.R.J. et Cowan, D.R., 2004. The detection of circular features in irregularly spaced data. *Computers et Geosciences*, 30, 101-105.
- Cornet, Y. et Demoulin, A., 1998. Neotectonic implications of a lineament-coplanarity analysis in Southern Calabria, Italy. in Stewart I. S. et Vita-Finzi C., "Coastal Tectonics", Geological Society Special Publications, 146, 111-127.
- Couloigner, I. et Zhang, Q., 2007. Iterative and Localized Radon Transform for Road Centerline Detection from Classified Imagery. in M. Kamel et A. Campilho (Eds.), *ICIAR 2007, LNCS 4633*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1093-1104.
- Dobes, M., Martinek, J., Skoupil, D., Dobesova, Z. et Pospisil, J., 2006. Human eye localization using the modified Hough transform. *Optik*, 117, 468-473.
- Duda, R.O. et Hart, P.E., 1972. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM*, 15, 1, 11-15.
- Eliason, J.R., 1992. Mapping fractures remotely for earthquake hazard assessment by the use of topographic and seismic hypocenter data. *Episodes*, 15, 1, 75-82.
- Fernandes, L.A.F. et Oliveira, M.M., 2008. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme. *Pattern Recognition*, 41, 299-314.
- Fitton, N.C. et Cox, S.J.D., 1998. Optimising the application of the Hough transform for automatic feature extraction from geoscientific images. *Computers et Geosciences*, 24, 10, 933-951.
- Geman, D. et Jedynek, B., 1996. An active testing model for tracking roads in satellite images, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 18, 1-14.
- Hu, Z.Y., 1993. About Hough Transform. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences Appliquées de l'Université de Liège.
- Huang, K.Y., Chen, K.J., You, J.-D. et Tung, A.-C., 2008. Hough transform neural network for pattern detection and seismic applications. *Neurocomputing*, 71, 3264-

- 3274.
- Jain, A. K., Prabhakar, S. et Chen, S., 1999. Combining multiple matchers for a high security fingerprint verification system. *Pattern Recognition Letters*, 20, 11-13, 1371-1379.
- Karnieli, A., Meisels, A., Fisher, L. et Arkin, Y., 1996. Automatic extraction and evaluation of geological linear features from digital remote sensing data using a Hough transform. *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing*, 62, 5, 525-531.
- Koike, K., S. Nagano, E. et Kawaba, K., 1998. Construction and analysis of interpreted fracture planes through combination of satellite-image derived lineaments and digital elevation model data. *Computers et Geosciences*, 24, 6, 573-583.
- Mather, P. M., 2004. *Computer processing of remotely-sensed images. An introduction. Third edition.*, John Wiley et Sons, 324p.
- Mejdani, S., Egli, R. et Dubeau, F., 2008. Old and new straight-line detectors, description and comparison. *Pattern Recognition*, 41, 1845-1866.
- Milgram, M., 1993. *Reconnaissance des formes - Méthodes numériques et connexionnistes.* Armand Colin, 176p.
- Ministère de la Région Wallonne (Direction Générale de l'Agriculture) et Université de Liège, Laboratoire Surfaces (Unité de Géomatique), 2008. *Etude du contrôle de la qualité de l'orthoimage et du Modèle Numérique de Surface. Vols 2006-2007. Rapport de projet, disponible sur demande auprès de la DGA - IG2, 39 p.*
- Moore, G. K. et Waltz, F. A., 1983. Objective procedures for lineament enhancement and extraction. *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing*, 49, 5, 641-647.
- Muniz, R., Junco, L. et Otero, A., 1999. A robust software barcode reader using the Hough transform. In *International Conference on Information Intelligence and Systems*, 313p.
- Ozer, A., Marion, J.M., Roland, C. et Tréfois, P., 1988. Signification des linéaments sur une image S.P.O.T. dans la région liégeoise. *Bulletin de la Société Belge de Géologie*, 97, 2, 153-172.
- Parsons, A.J. et Yearley, R.J., 1986. An analysis of geologic lineaments seen on LANDSAT MSS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 12, 1773-1782.
- Quoilin, H., Ozer, A., Cornet, Y. et Pissart, A., 2001. La photographie aérienne en période de sécheresse comme source de renseignements géologiques en Wallonie. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 40, 33-40.
- Sabins, F.F. JR., 1987. *LINDENS: A program for lineament length and density analysis.* in *Remote Sensing. Principles and Interpretation.* W. H. Freeman and Co, New York, 449 p.
- Salmon, M., Ozer, A. et Pissart, A., 2007. Les images satellitaires prises en périodes de sécheresse, outil utile pour la cartographie géologique de la Belgique. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 49, 67-74.
- Wladis, D., 1999. Automatic lineament detection using digital elevation models with second derivative filters. *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing*, 65, 4, 453-458.
- Woldai, T., 1995. Multiple-source remotely sensed data for lithologic and structural mapping. *ITC Journal*, 2, 95-113.
-

