

MISE EN ÉVIDENCE PAR ANALYSE NUMÉRIQUE DES STRUCTURES GÉOLOGIQUES EN ZONE MONTAGNEUSE INDÉPENDAMMENT DES CONTRASTES OMBRE-LUMIÈRE

Catherine MERING (1), Jean-François PARROT (2)

(1) Bureau de Télédétection, SSC. O.R.S.T.O.M., 70, route d'Aulnay F. 93140 Bondy

(2) Laboratoire de Géologie, SSC. O.R.S.T.O.M., 70, route d'Aulnay F. 93140 Bondy

RÉSUMÉ

Sur les scènes Landsat, la poursuite des structures que dessinent les unités lithologiques dans les régions montagneuses se heurte au problème que pose l'existence de zones d'ombre fortement contrastées. Des méthodes d'analyses numériques telles que le filtre gradient ou le filtre de Sobel tentent de répondre à cette problématique, mais elles ne font en fait qu'accroître les contrastes entre les différentes plages homogènes et ne fournissent qu'un labyrinthe de directions de toute nature où se perdent le plus souvent les directions structurales. Quant au ratioing, il ne donne que des indications complémentaires aux dégradations numériques pilotées.

La fonction proposée cherche au contraire à ne souligner que ces directions structurales ; elle repose sur le principe suivant : les valeurs des rapports entre pixels qui matérialisent les limites entre deux unités lithologiques doivent être identiques indépendamment de l'éclairage. Pour ce faire, les rapports entre les valeurs des pixels consécutifs sont calculés dans un même sens, soit selon les lignes de l'image satellite, soit selon les colonnes, en appliquant la fonction suivante :

$$\begin{aligned} & \text{(a) si } ID(K) \geq ID(K+1) \\ f[ID(K), ID(K+1)] &= \frac{\text{Log}(ID(K) + M_1) * M_2}{\text{Log}(ID(K+1) + M_1)} - M_2 \\ & \text{(b) si } ID(K) < ID(K+1) \\ f[ID(K), ID(K+1)] &= 0. \end{aligned}$$

$ID(K)$ et $ID(K+1)$ correspondent aux valeurs brutes de 2 pixels K et $K+1$ consécutifs ; M_1 et M_2 sont des constantes positives respectivement fixées, dans le cas de l'exemple retenu, à 20 et 500.

À l'issue du traitement numérique, on obtient un document cartographique dont toutes les ombres ont été supprimées (partant, le relief) et où ne subsistent que les traits structuraux et le réseau hydrographique. Il est alors possible de mettre en évidence, ainsi que l'illustre l'étude d'une zone test centrée sur les nappes de la Shillakong dans le Ladakh (Inde), non seulement les directions structurales dessinées par les unités lithologiques, mais encore les charnières des plis qui affectent cet ensemble.

ABSTRACT

GEOLOGICAL STRUCTURES IN MOUNTAINOUS AREAS THROUGH NUMERICAL ANALYSIS INDEPENDENTLY OF THE
CONTRASTED SHADE AND LIGHT ZONES

On Landsat scenes, lithological structures of mountainous regions recognized on sun lighted versants are more difficult to perceive on shady versants, because of the existence of high contrasts between light and shadow (fig. 2 and 3). Numerical methods, such as the gradient mask (fig. 4) or the Sobel mask (fig. 5) try to take into account this problem, but in fact, they accentuate only contrasts between all the homogeneous areas of different reflectance levels and give only a network of various directions where structural directions generally disappear. As far as the ratioing process (fig. 6) is concerned, it gives but complementary informations to single numerical recordings.

The method which is the main concern of this paper searches to emphasize but the structural directions. It is based on the following principle : values of ratio between pixels drawing boundaries between two adjacent lithological units

have to be similar in lighted and shady zones. However, the numerical scale of gross reflectance values in a shady zone is different from that of a lighted zone, i.e., in the test area of the Himalaya of Ladakh (India), the gross pixel values range, on band 6, from 0 to 20 in shady zones and from 21 to 127 in lighted zones. Thus, for a same boundary between two geological units, ratios between gross pixel values are much higher in the shadow than in the light. So, we have to try to harmonize the values of ratios obtained in both types of zones, by means of a transformation of gross values. A first harmonization is obtained by calculating the ratios by means of the logarithms of the pixel values.

On the other hand, with our available processing material (elementary informations are coded in an octet), the scale of the transformed values must range from 1 to 256. Therefore, the function under consideration will be an application of this interval on itself. Moreover, the encountered ratio, obtained from logarithms of gross values, being dispatched in two series (either between 0 and 1, or between 1 and 255), we decided to take into account ratios higher than 1, when doing transformations in a single way (from left to right in the row direction, and from top to bottom in the column direction).

Thus, possibilities given by the two following functions have been tested:

(a) a function g which takes into account all the values:

$$g[\text{ID}(K), \text{ID}(K+1)] = \frac{\text{Log}(\sup(\text{ID}(K), \text{ID}(K+1)) + M_1) * M_2}{\text{Log}(\inf(\text{ID}(K), \text{ID}(K+1)) + M_1)} - M_2$$

(b) a function f which selects the values as following:

$$\begin{aligned} & \text{(a) if } \text{ID}(K) \geq \text{ID}(K+1) \\ & f[\text{ID}(K), \text{ID}(K+1)] = \frac{\text{Log}(\text{ID}(K) + M_1) * M_2}{\text{Log}(\text{ID}(K+1) + M_1)} - M_2 \\ & \text{(b) if } \text{ID}(K) < \text{ID}(K+1) \\ & f[\text{ID}(K), \text{ID}(K+1)] = 0. \end{aligned}$$

In both cases, $\text{ID}(K)$ and $\text{ID}(K+1)$ correspond to the gross values of two consecutive pixels K and $K+1$. M_1 and M_2 are positive constants. M_2 , set to 500, betters the precision of the calculation and allows to move in the field $[0,255]$. M_1 makes possible the application of the logarithm function to the gross values and at the same time it permits the choice of the field of this application. M_1 has been set empirically to 20, considering this value as the most adapted to the requirements in the studied area.

The diagrams in figure 7 show the results obtained by applying both functions. On the one hand, they show that it is necessary to apply the functions in the direction of rows and in the direction of columns; on the other hand, they emphasize the qualities of function f which selects strictly the values. As a matter of fact, whatever the date of the shooting, the position of the sun in the latitude under consideration is such that the shadow extends always on the western and northern versants. Under these circumstances, owing to the direction of the formerly described transformations according to rows and columns, crest lines disappear systematically and on the contrary thalwegs are underlined. Moreover, if we take into account the boundaries between two adjacent lithological units only when going from a clear one to a darker one, function f can reveal, within some fine lithological series, structural features which disappear in the excessive amount of informations provided by function g .

By considering only the values whose linear gradient mask is positive, function f therefore emphasizes data which do not appear with a less selective function.

Using function f , we get at the end of the digital processing cartographic documents where only structural features and hydrographical network are kept; the latter can be mapped separately (fig. 8), which allows to distinguish it from the structural features when handling the resulting documents (fig 10 and 11). It is then possible to emphasize, as proved by the analysis of a test area centered on the Shillakong sheets in Ladakh (India), not only the structural directions drawn by the lithological units but also the fold bends present in those sheets (fig. 12).

Резюме

ВЫЯВЛЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ГОРНОЙ ЗОНЕ НА ФОНЕ КОНТРАСТОВ СВЕТА-ТЕНЬ

Прослеживание структур, очерчивающих литологические элементы на снимках Ландсата для гористых областей, сталкивается с трудностями в виду наличия сильно контрастных зон. Такие методы числового анализа, как фильтрация градиента или фильтрация Собеля имеют своей целью преодолеть эти трудности, но все, что они могут сделать, это подчеркнуть контрасты между различными однородными областями, и дают лишь сетку разного рода

направлении, где чаще всего теряются структурные направления. Что касается методу отношению, то он дает лишь дополнительные указания к прослеживаемым численным градиентам.

В противовес этому предлагаемая нами функция предназначена для выявления исключительно лишь структурных направлений; она базируется на следующем принципе: величина отношений двух пикселей, которые представляют собою пределы двух литологических элементов, должны быть одинаковыми и теми же независимо от освещенности. С этой целью отношения между величинами двух последовательных пикселей вычисляются в одном и том же направлении либо по линиям параллельного изображения, либо по колонкам с использованием следующих формул:

$$f [ID (K), ID (K + 1)] = \frac{\text{Log} (ID (K) + M_1) * M_2}{\text{Log} (ID (K + 1) + M_1)} - M_2$$

$$(a) \text{ если } ID (K) \geq ID (K + 1)$$

$$(b) \text{ если } ID (K) < ID (K + 1)$$

$$f [ID (K), ID (K + 1)] = 0$$

ID (K) и ID (K+1) соответствуют общим величинам двух последовательных пикселей, K и K-1; M₁ и M₂ являются положительными постоянными, которым в данном примере присвоены соответственно величины 20 и 500.

В итоге числовой обработки получается картографический документ, где все тени удалены (соответственно, и рельеф удален) и где присутствуют лишь черты, свойственные структурам, и гидрофизическая сеть. Тем самым, как это иллюстрирует анализ слоев Шиллаконг в Ладакхе (Индия), удается выявить не только структурные направления, обрисовываемые литологическими элементами, но также и точки изгибов слоев этой зоны.

INTRODUCTION

À la suite des travaux effectués au Bureau de Télédétection de l'O.R.S.T.O.M. pour le compte du GRECO Himalaya-Karakorum (1), nous nous sommes trouvés confrontés aux problèmes que pose l'approche des régions montagneuses, partant la poursuite dans les zones d'ombre, des unités lithologiques et des structures individualisées dans les zones éclairées. C'est afin de répondre à ce type de problème que la méthodologie décrite ici a été mise en œuvre.

La zone-test est centrée sur l'édifice des nappes du Zaskar (Ladakh, Himalaya) et notamment sur la série de la Shillakong, unité très fortement plissée et épimétamorphique reposant au nord et au sud sur l'unité de Lamayuru (BASSOULET *et al.*, 1980). En fait le choix de cette zone n'est pas tout à fait innocent; seulement connue par quelques coupes nord-sud, elle devait permettre de tester les possibilités d'extrapoler à l'aide des documents Landsat, les directions structurales relevées dans ces coupes; qui plus est, à l'exception de la haute vallée de l'Indus et de quelques sections du cours du Zaskar, les rivières découpent un réseau de direction essentiellement nord-sud, grossièrement perpendiculaire à la direction d'éclairément (cf. fig. 1 et 2).

Dans le cadre des techniques usitées, qu'il s'agisse de simples « dégradations numériques » (2) pilotées, canal par canal ou sur une combinaison de canaux, ou à la suite d'une dispersion de lots par utilisation du traitement « Loterie » (O.R.S.T.O.M., 1978; LOINTIER et PIEYNS, 1981), il est évidemment toujours possible d'obtenir un document cartographique (tracé Benson ou Colorplot) où le découpage obtenu dans les zones d'ombre permette de suivre peu ou prou dans ces zones les unités lithologiques reconnues dans les zones éclairées. Il suffit pour ce faire, d'attribuer une couleur identique à des tranches de réflectance différentes mais correspondant en fait à des unités lithologiques considérées comme similaires, la différence enregistrée dans les valeurs respectives de ces classes de réflectance n'étant fonction que de l'éclairément. Cette première approche, très subjective, fait en partie disparaître le relief, le passage entre les zones d'ombre et de lumière se faisant alors plus ou moins sans solution de continuité; mais cette technique tend en fait à gommer sérieusement les distinctions lithologiques dans l'une et l'autre zone, et d'autre part elle estompe considérablement les structures.

C'est essentiellement pour répondre à cette dernière préoccupation que la méthode décrite ici a été mise au point. Nous verrons en effet qu'elle fait

(1) Groupement de Recherches Coordonnées Himalaya-Karakorum, C.N.R.S. n° 130013, 1, place Aristide-Briand, F. 92190 Meudon.

(2) Pour la définition de ce terme, cf. O.R.S.T.O.M. (1978).

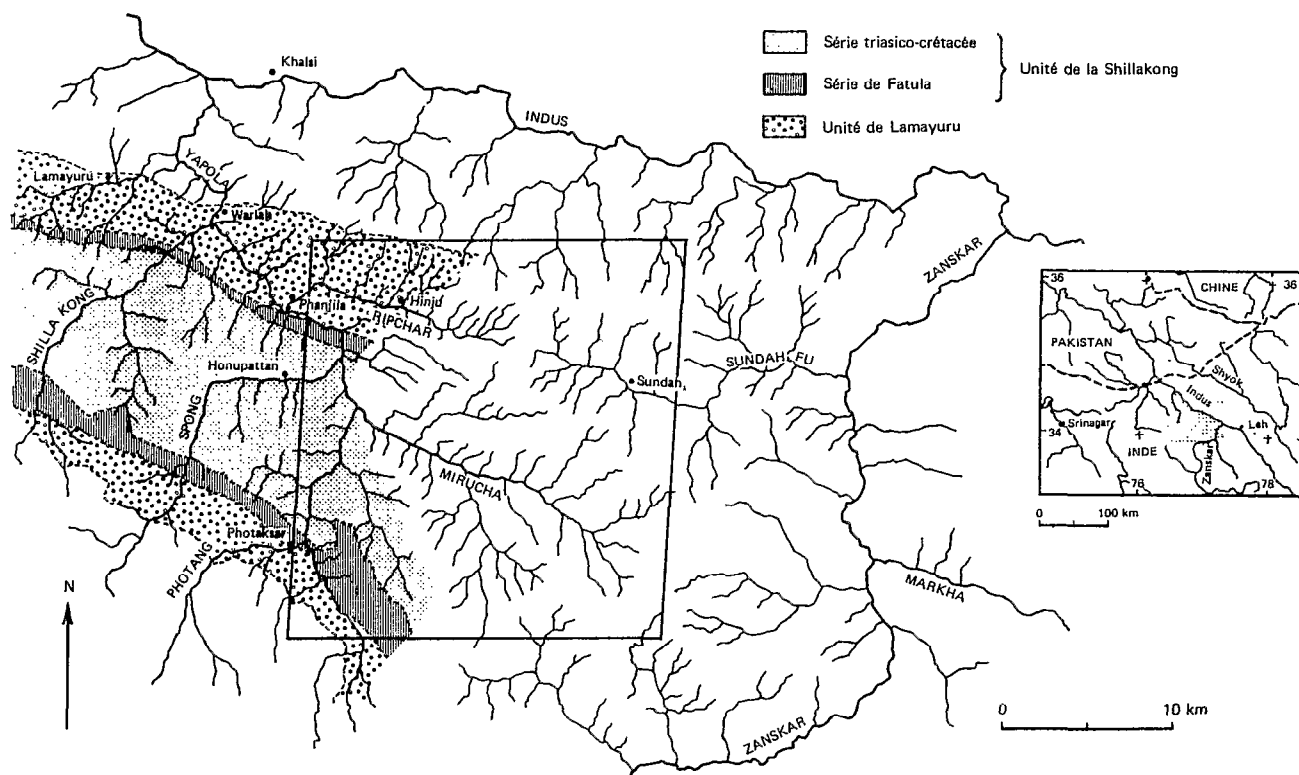


FIG. 1. — Carte de situation et relevé sur tirage photographique au 250 000^e du canal 7 du réseau hydrographique de la région étudiée. Le cadre correspond à la zone traitée numériquement.

ressortir toutes limites entre des plages à réflectance homogène et cela quels que soient les niveaux de réflectance considérés, et qu'elle permet également de suivre ces limites indifféremment dans les zones sombres et les zones éclairées.

PRINCIPE DE LA MÉTHODE

Sur chacun des quatre canaux d'une vue Landsat, chaque pixel unité qui correspond sur le terrain à une superficie de 50 m sur 70 m environ, prend selon la réflectance qui dépend de la nature du terrain (éventuellement de sa couverture végétale) et de l'éclairage, une valeur s'échelonnant de 0 à 127 sur les canaux 4, 5 et 6, de 0 à 63 sur le canal 7. Les valeurs enregistrées varient d'un pixel à son voisin, soit faiblement, soit brutalement, selon que l'on reste dans une plage homogène ou que l'on passe à une plage dont la réflectance moyenne est nettement plus faible ou nettement plus forte. Le rapport ou la différence entre les valeurs de deux pixels voisins sera faible si ceux-ci sont compris dans une plage homogène : en revanche, ces rapports ou ces différences seront forts si l'on quitte une plage homogène

pour passer à une autre, surtout si les niveaux moyens de réflectance respectifs de ces plages sont foncièrement différents. Ainsi, des valeurs fortes pourraient-elles matérialiser les limites existant entre diverses plages homogènes de nature différente ; *a contrario*, plus rien ne permettrait de distinguer les différentes plages homogènes, celles-ci étant alors dans tous les cas matérialisées par des valeurs faibles. Un simple traitement de substitution des valeurs brutes des pixels d'une vue Landsat par les valeurs obtenues en calculant ce rapport ou cette différence, pourrait théoriquement conduire à une image susceptible d'être traitée sur un écran de visualisation et fournir un document cartographique matérialisant ces limites.

Dans les scènes numérisées Landsat où il existe de forts contrastes dus à l'importance du relief, les zones d'ombre ont des valeurs de réflectance qui, généralement, ne dépassent pas 15, voire 20 ; dans les zones éclairées, ces valeurs varient alors entre 21 et 127 (15 et 63 dans le canal 7). Ainsi, les mêmes unités lithologiques sont étalonnées suivant une échelle numérique différente dans l'une ou l'autre zone. Il convient donc de corriger d'une façon ou d'une autre

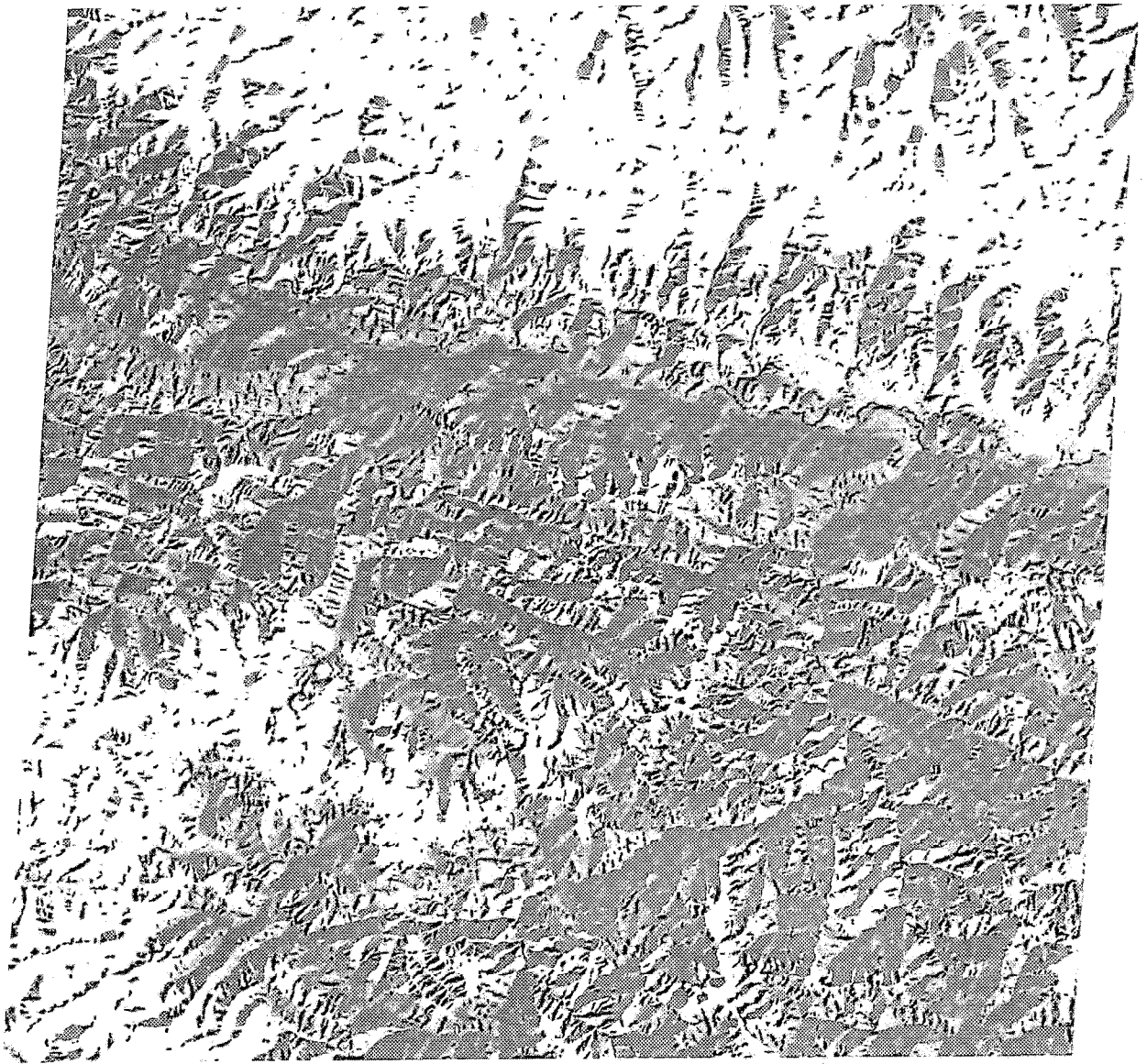


FIG. 2. — Image photographique du canal 7 de la région étudiée.

l'échelle globale des valeurs de réflectance, si l'on veut essayer de retrouver dans un même intervalle numérique ces mêmes unités.

Or, pour prendre cet exemple, le passage d'une unité lithologique à une autre unité qui diffère de la précédente par le niveau moyen de sa réflectance, est marqué par un « saut » de réflectance d'un pixel au pixel voisin, et cela quel que soit l'éclairement ;

mais, pour une même limite entre deux mêmes unités, l'importance du « saut » varie selon l'éclairement. Dans ces conditions, si l'on se contente de remplacer les valeurs brutes de réflectance par la différence que présentent ces valeurs entre deux pixels voisins, il est évident que les contrastes en zone éclairée seront à nouveau plus importants qu'en zone d'ombre. En revanche, si l'on effectue le

rapport de ces valeurs, on peut constater que l'échelle obtenue est considérablement plus étalée en zone d'ombre qu'en zone éclairée.

En effet, les rapports obtenus aux limites de deux plages homogènes distinctes situées dans une zone d'ombre, c'est-à-dire dans une zone à réflectance faible, sont généralement beaucoup plus élevés que ceux obtenus aux limites de deux plages distinctes dans une zone éclairée. Car, si la discrimination est faible dans les zones sombres, en revanche, les rapports de pixel à pixel dans ces zones sont plus élevés que dans les zones éclairées ; ainsi, pour un rapport de l'ordre de 10, observable dans les zones à faible réflectance, l'obtention d'un rapport équivalent dans les zones éclairées exige dans la plupart des cas, des valeurs absolues de réflectance supérieures à la limite maximum de l'échelle de référence (63 ou 127). Dans ce cas, la valeur moyenne des rapports qui matérialisent la limite existant entre deux unités lithologiques, change lorsque l'on passe d'une zone éclairée à une zone sombre.

Il faut alors chercher à harmoniser les valeurs des rapports rencontrées dans ces deux genres de zones de manière à obtenir une échelle de valeurs contrôlée et adaptable par l'opérateur aux problèmes rencontrés dans le secteur étudié.

DESRIPTIF DE LA MÉTHODE

Considérations générales

Le but recherché consiste donc à rendre comparables, voire identiques, dans un canal donné (ici le canal 6 sur lequel la méthode a été testée et dont l'image obtenue par dégradation numérique pilotée fait l'objet de la figure 3), les rapports entre les valeurs des pixels limitant deux plages homogènes et contiguës se différenciant entre elles, dans une zone sombre, par la valeur moyenne de leur réflectance respective, et les rapports des valeurs des pixels limitant ces deux mêmes plages dans une zone éclairée. En d'autres termes, les valeurs des rapports qui matérialisent les limites entre deux unités lithologiques doivent être identiques indépendamment de l'éclairage.

Or, pour un canal donné (hormis le canal 7 dont la dynamique s'étale de 0 à 63), les réflectances peuvent prendre des valeurs comprises entre 0 et 127. Par ailleurs, nous avons déjà signalé que, sur le canal 6 de la vue Landsat 81.115.04.555 du 15 novembre 1972 sur lequel la méthode a été testée, les pixels compris dans les zones d'ombre ont une réflectance qui varie *grosso modo* entre 0 et 20, les pixels de la zone éclairée étant compris entre 21 et 127. La limite située autour de la réflectance 20 dépend bien sûr de la date de prise de vue et ne saurait être considérée comme une constante. Elle

peut être plus faible lorsque l'élévation solaire est plus importante que dans le cas de la scène étudiée ici (élévation solaire : 32°, azimuth : 152°). C'est donc une variable dont il faudra tenir compte pour adapter la méthode à d'autres prises de vues.

Quoi qu'il en soit, pour que les rapports des valeurs des pixels contigus compris dans une zone d'ombre soient comparables aux rapports des valeurs des pixels d'une zone éclairée, on est conduit à transformer les valeurs brutes.

Cette transformation peut être obtenue lorsque l'on effectue, non pas le rapport des valeurs brutes de réflectance de deux pixels juxtaposés, mais le rapport des logarithmes de ces valeurs. En effet, le logarithme népérien est une fonction continue et monotone dont la courbe représentative dans un repère orthonormé est toujours située sous la première bissectrice. Il tend donc à rééquilibrer les rapports obtenus dans les deux zones.

D'autre part, afin de pouvoir constituer une image superposable à l'image d'origine à partir des valeurs transformées, et compte tenu des moyens de traitement d'images numériques dont nous disposons actuellement (l'information élémentaire est codée sur un octet, c'est-à-dire 256 valeurs entières), il faut faire en sorte que l'échelle des valeurs transformées varie de 1 à 256.

La fonction f à utiliser doit donc être une application de l'intervalle $[1,256]$ sur lui-même.

Si l'on envisageait tous les rapports possibles entre les logarithmes des valeurs brutes des pixels, on obtiendrait évidemment deux séries de valeurs, la première étant comprise entre 0 et 1, la seconde entre 1 et 255. Il faudrait alors effectuer deux types de transformations suivant le type d'inégalité existant entre les valeurs de deux pixels juxtaposés.

Cela nous a amenés à ne retenir que les rapports supérieurs à 1 en décidant par ailleurs de toujours effectuer ces rapports dans un seul sens (par exemple, de la gauche vers la droite pour des transformations faites dans la direction que dessinent les lignes, ou bien de haut en bas pour des transformations selon les colonnes).

Fonction retenue

Toutes les considérations précédentes, les calculs effectués sur les sorties imprimantes des valeurs brutes des pixels de l'image et les séries d'essai à l'écran de visualisation, nous ont conduits à retenir la fonction f suivante :

Soient $ID(K)$ et $ID(K+1)$ les valeurs brutes des réflectances de deux pixels K et $K+1$ consécutifs dans un même sens (soit sur une même ligne, soit sur une même colonne),

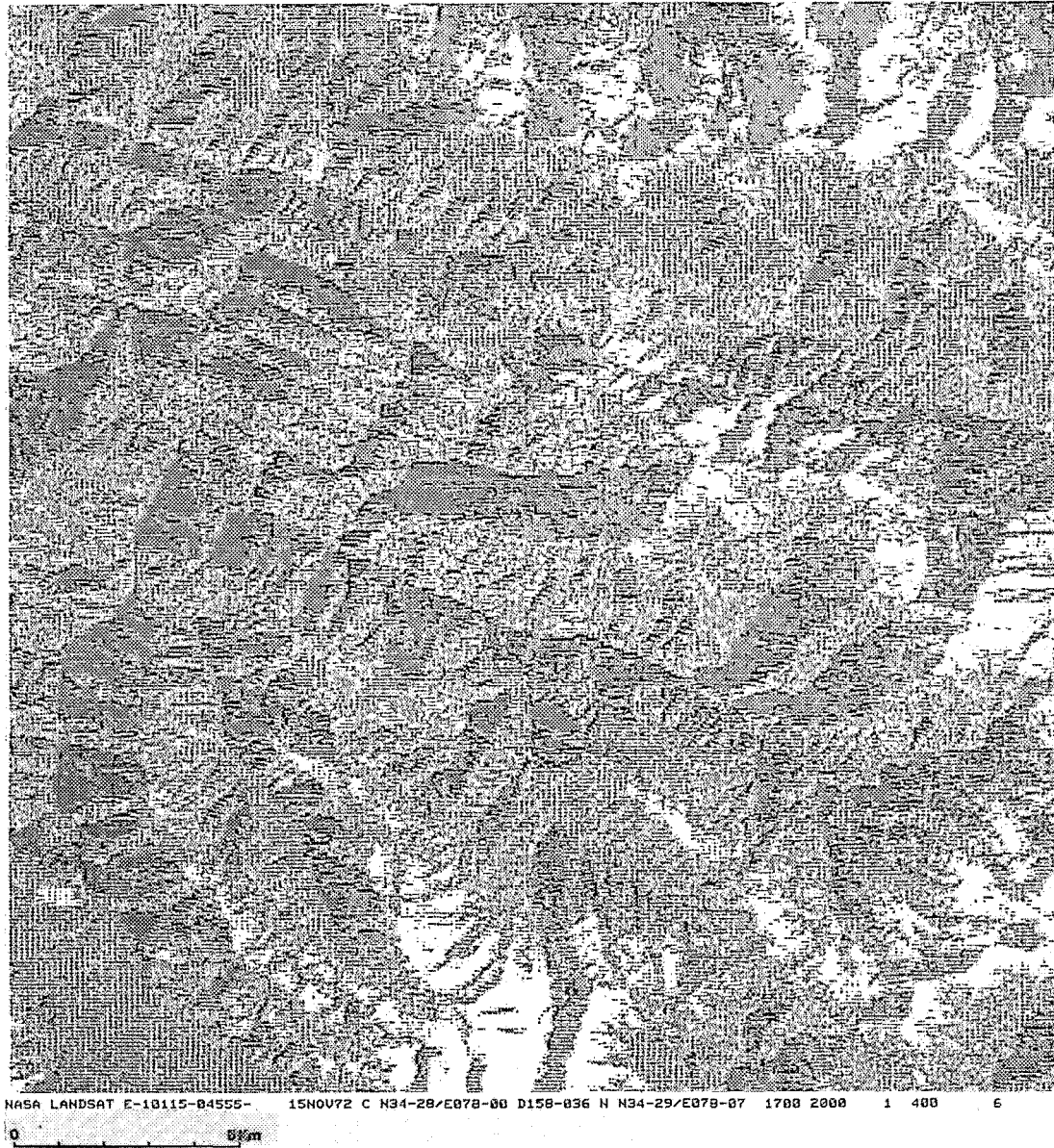


FIG. 3. — Image obtenue par « dégradation numérique » pilotée sur le canal 6.

si $ID (K) \geq ID (K+1)$

$$f [ID (K), ID (K+1)] = \frac{\text{Log} (ID (K)+M_1) \cdot M_2}{\text{Log} (ID (K+1)+M_1)} - M_2$$

si $ID (K) < ID (K+1)$

$$f [ID (K), ID (K+1)] = 0$$

M_2 et M_1 sont des constantes positives. M_2 sert à la précision du calcul des valeurs (elle est égale à 500). M_1 permet de se déplacer dans le domaine $[0,255]$. Il est évident que l'on doit corriger les valeurs brutes faibles des pixels avant d'appliquer la fonction

Log, puisque cette fonction n'est pas définie entre 0 et 1. La constante M_1 a donc été fixée empiriquement pour traiter l'image à analyser. La valeur 20 s'est imposée comme étant la mieux adaptée au but recherché, à savoir suivre les structures quel que soit l'éclaircissement, en tout cas pour la région test étudiée sur le canal 6.

Propriétés d'une telle fonction

Cette fonction filtre très sévèrement les valeurs. En effet elle ne retient que celles dont le gradient

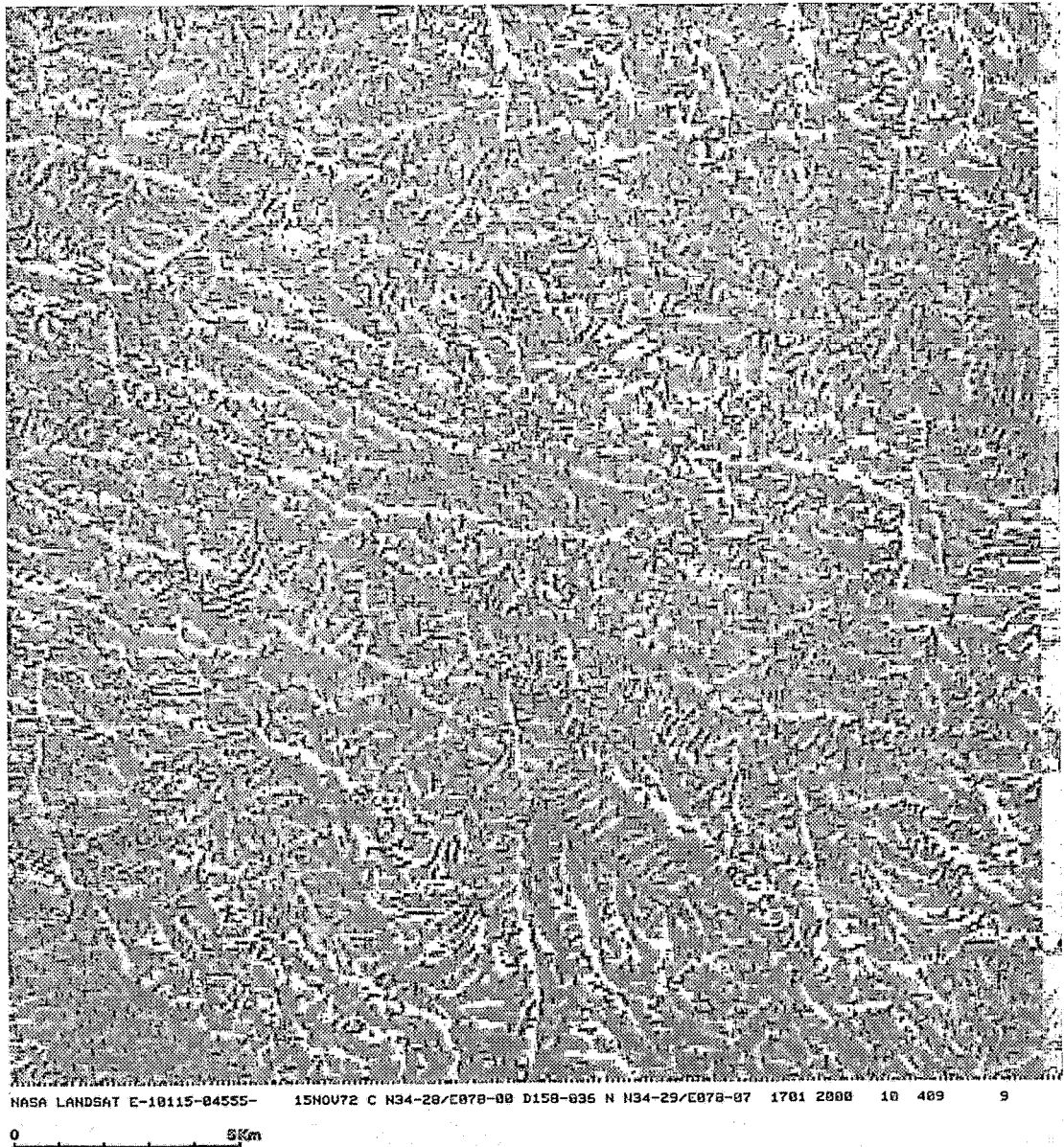


FIG. 4. — Image résultant d'un filtre gradient sud-ouest.

en ligne est positif. Elle annule les autres. Éliminant ombre et lumière, elle fait disparaître le relief. C'est évidemment à cause des qualités de l'image résultante (cf. fig. 10 et 11) qui semblait bien répondre à nos questions que nous l'avons retenue.

Nous verrons plus en détail dans le chapitre consacré à l'exploitation géologique les raisons qui justifient ce choix. Mais il convient de voir avant tout si d'autres méthodes numériques parviennent ou non au même résultat.

COMPARAISON AVEC D'AUTRES MÉTHODES VISANT À FAIRE APPARAÎTRE LES CONTOURS SUR UNE IMAGE SATELLITE

Les filtres

Les filtres (PRATT, 1978) sont des traitements ne s'appliquant qu'à un seul canal à la fois (comme notre fonction).

Appliquer un filtre à une image revient à calculer une convolution entre la fonction image et une

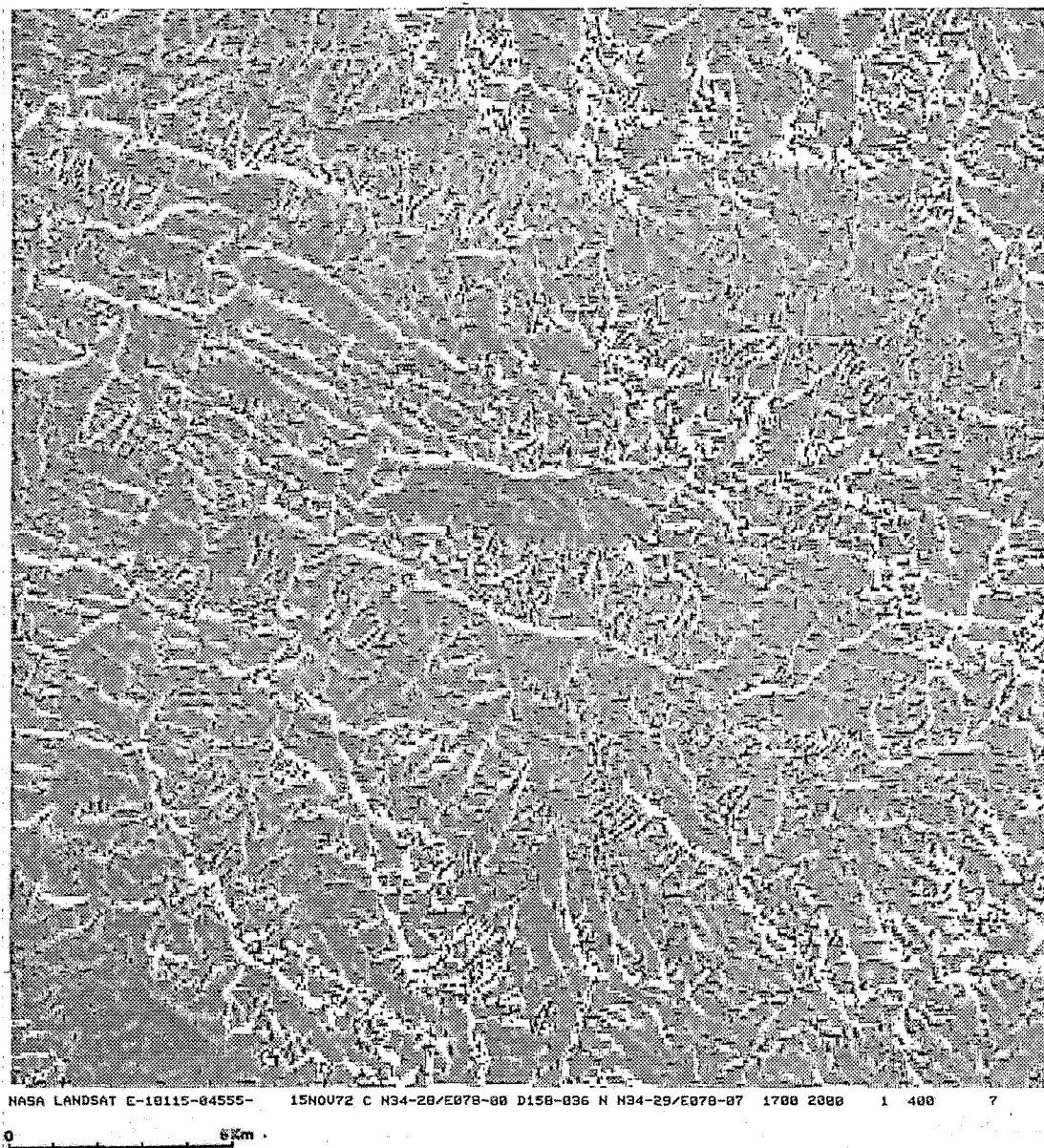


FIG. 5. — Image résultant de l'application du filtre de Sobel.

fonction quelconque que l'on désigne sous le terme de filtre. Les filtres linéaires sont des fonctions linéaires des valeurs numériques des pixels. Par exemple, on connaît le filtre « moyenne » communément appelé « lissage », et le filtre gradient.

Les traitements que nous avons effectués sont des convolutions 3×3 : la matrice filtre est de dimension 3 et la convolution entre la fonction filtre et la fonction définie par un carré formé par 9 pixels de l'image à traiter a pour effet de remplacer la valeur

du pixel central de ce carré par une combinaison linéaire de cette valeur et de celles de ses huit voisins.

Si l'on appelle H la matrice filtre et P le carré de 9 pixels, le pixel central a_{ij} (i correspond à la ligne sur laquelle se situe le pixel central, j à la colonne) prendra après traitement la valeur commandée par la formule suivante :

$$a_{ij} = \sum h_{lm} p_{l'm'} ; l = 1, \dots, 3 ; m = 1, \dots, 3 \\ l' = i-1, \dots, i+1 ; m' = j-1, \dots, j+1$$

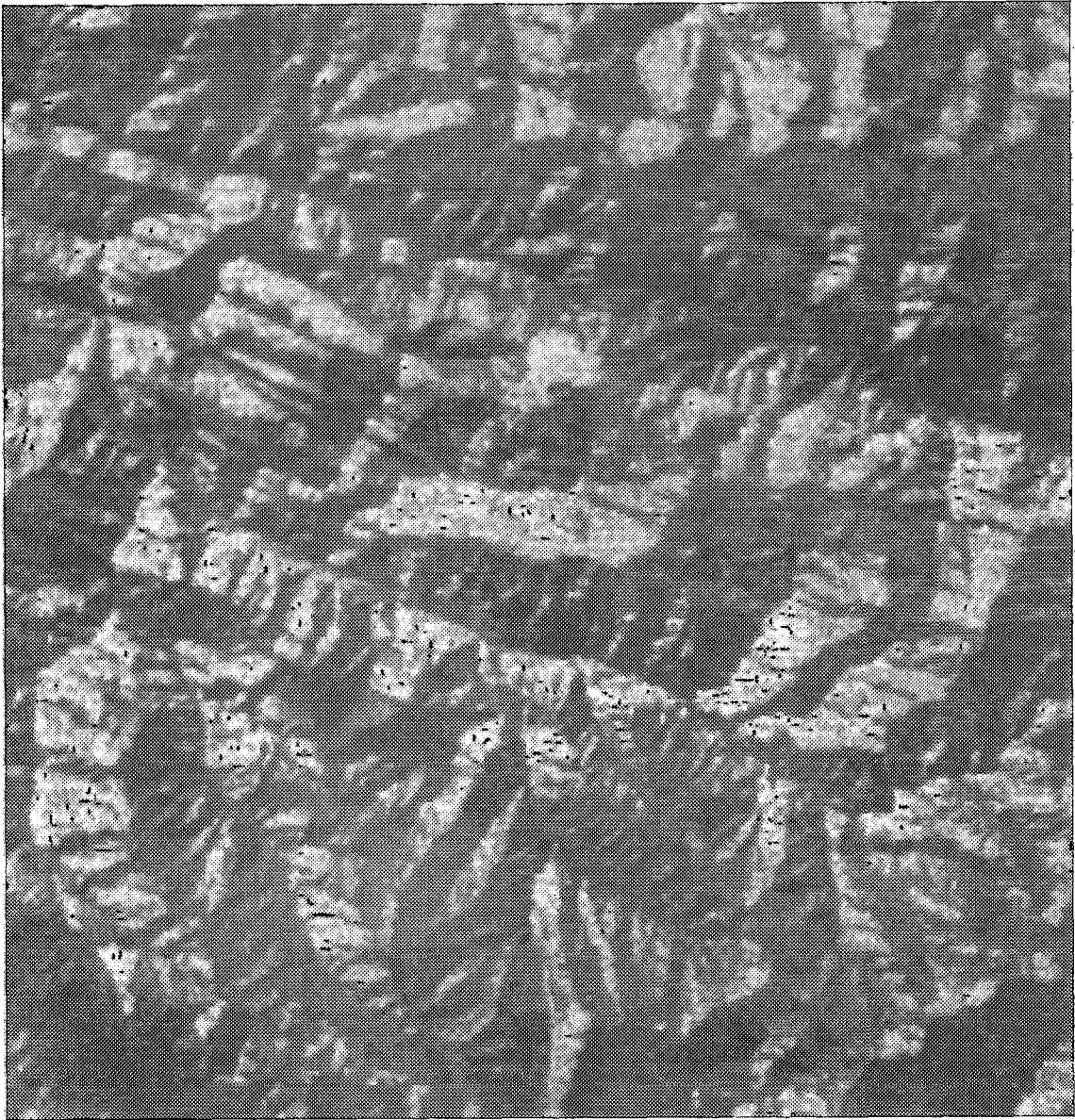


FIG. 6. — Composition colorée obtenue par la méthode du ratioing.

Dans le cas d'un lissage, tous les coefficients h_{im} sont positifs. Dans le cas d'un gradient, ils sont tous négatifs et seuls certains d'entre eux le sont lorsque l'on utilise un gradient directionnel. Nous avons appliqué, au canal 6 de l'image de la zone test du Ladakh, un gradient sud-ouest, cette direction étant à peu près perpendiculaire à celle que dessinent les principales structures lithologiques de cette région. La matrice H correspondante a la forme suivante :

$$H = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Le contraste sud-ouest (cf. fig. 4) se trouve rehaussé et le relief disparaît. Mais on ne parvient pas dans ce cas à suivre les structures géologiques indépendamment de l'éclairage.

Nous avons également appliqué au même canal de

la même vue un filtre non-linéaire. SOBEL (*in* DUDA et HART, 1973) en a imaginé un théoriquement capable de détecter toutes les frontières existant sur une image. La formule de ce filtre est la suivante :

$$H(j, k) = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

X est l'image résultante après application du filtre H_x

$$H_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

et Y l'image résultante de l'application du filtre H_y

$$H_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Un grand nombre de lignes visualisant l'ensemble des frontières apparaît sur l'image résultante (cf. fig. 5), mais la classification de ces directions ne répond pas à notre souci. Un tel traitement n'est pas assez sélectif pour notre cas.

Le ratioing

Il s'agit d'un traitement qui prend en compte les 4 canaux Landsat et qui vise à éliminer les effets du trop grand contraste dû à l'éclairage de l'image (MAURIN et RIGUIDEL, 1978).

Pour ce faire, chaque canal est divisé par un autre canal. On obtient 3 canaux résultants qui sont les rapports des 4 canaux deux à deux. On peut ensuite effectuer une composition colorée de ces 3 canaux. Dans tous les canaux les données faiblement éclairées ont des valeurs basses et les données éclairées ont des valeurs élevées. Aussi, les valeurs basses seront proportionnellement plus élevées en sortie d'un tel traitement que les valeurs élevées. Nous voyons que l'image résultante fait penser à un négatif amélioré de l'image brute. Un tel traitement permet effectivement de particulariser des zones qui ne ressortaient pas nettement sur l'image d'origine. On peut ainsi faire une bonne synthèse de l'image indépendamment de l'éclairage (cf. fig. 6), sans toutefois répondre complètement à la problématique envisagée.

EXPLOITATION GÉOLOGIQUE

Considérations générales

Si les filtres ne font qu'accroître les contrastes entre les différentes plages homogènes et ne donnent qu'un lacis de directions de toute nature qui tend à masquer en partie les grandes directions structurales, la méthode proposée les fait au contraire ressortir. Qui plus est, les lignes de partage entre les plages homogènes correspondant aux diverses couches géologiques se poursuivent indifféremment dans les zones sombres et les zones éclairées. Ainsi se trouvent soulignés les traits structuraux de la région étudiée. Mais bien évidemment d'autres indications demeurent même si par rapport aux filtres elles sont largement estompées. Il faut donc les individualiser au mieux afin de ne prendre en compte, lors de l'interprétation géologique, que ce qui ressort uniquement du domaine structural. Nous verrons plus loin que cela se révèle somme toute assez facile, dans la mesure où les directions autres que structurales, sont essentiellement dues au réseau hydrographique.

En raison de la nature des transformations envisagées, il faut en fait prendre soin de confronter le document obtenu par des rapports entre les valeurs des pixels effectués selon les lignes et celui obtenu par des rapports entre les valeurs des pixels faits selon les colonnes. Les trois premiers schémas de la figure 7 mettent en évidence cette nécessité ; il s'agit d'un cas théorique simple destiné à illustrer les résultats obtenus :

(a) dans le premier schéma, on envisage l'existence d'une couche verticale à réflectance faible et de direction est-ouest, allant d'un thalweg de direction nord-sud à un autre thalweg de même direction en passant par une ligne de crête également nord-sud. Par analogie avec ce que l'on observe sur les images Landsat de cette région, le versant occidental est dans l'ombre, le versant oriental étant éclairé.

En regard des valeurs brutes dans un canal des pixels de cette vue théorique, est porté le résultat d'une dégradation numérique classique ;

(b) dans le deuxième schéma de la figure 7, les rapports entre les valeurs des pixels sont faits selon la direction que dessinent les lignes, en appliquant la fonction g suivante (1) :

$$g[\text{ID}(K), \text{ID}(K+1)] = \frac{\text{Log}(\sup(\text{ID}(K), \text{ID}(K+1)) + M_1) \cdot M_2}{\text{Log}(\inf(\text{ID}(K), \text{ID}(K+1)) + M_1)} - M_2$$

(1) En fait, les premiers essais numériques que nous avons effectués ont été faits à l'aide de la fonction g. Bien qu'ayant presque la même formulation, la fonction f qui en découle a été finalement retenue pour les qualités de l'image résultante.

47 48 19 17 16 18 21 22 23 31 48 49 48 50 49 51 19 21 23
 48 49 17 18 19 20 21 21 21 22 49 50 51 52 20 18 21
 50 51 17 18 17 18 20 21 20 20 49 50 52 51 49 51 19 19 18
 20 20 8 8 7 8 8 11 31 32 30 30 32 30 30 7 7 8
 20 27 8 8 8 8 10 11 32 30 30 30 31 30 30 7 8 8
 31 30 8 7 8 10 8 11 31 30 30 31 32 30 30 6 6 7
 30 49 18 19 21 22 19 20 31 32 33 30 31 32 33 17 18 19
 33 31 19 20 20 20 20 20 33 33 33 49 50 49 18 19 20

A. Valeurs locales des pixels d'une scène théorique et résultat d'une catégorisation numérique effectuée sur cette scène.

2 88 4 4 7 10 3 74 3 8 2 2 3 2 3 82 7 8
 2 88 7 4 4 8 7 74 2 2 2 0 2 2 3 88 7 10
 0 88 4 4 4 7 3 70 0 2 2 3 2 3 3 82 0 4
 3 97 0 8 8 8 10 72 2 8 0 8 8 0 3 80 0 8
 8 80 0 11 8 8 8 78 8 3 3 3 3 8 3 83 0 0
 8 94 8 8 10 8 10 72 3 3 8 2 2 13 3 97 0 8
 2 82 4 7 3 10 3 78 2 2 8 2 2 2 8 88 4 4
 2 82 3 7 7 0 0 78 2 8 2 7 8 0 2 82 4 3

B. Utilisation de la fonction g dans la direction des lignes.

2 2 4 7 7 4 7 3 3 2 2 2 3 2 2 3 3 10 8
 3 2 0 4 4 4 3 0 2 0 0 0 3 0 2 3 3 4 10
 43 48 54 58 48 48 41 40 39 41 43 41 48 41 47 58 58 58
 3 8 0 0 8 8 8 0 2 3 0 3 8 3 3 0 0 0
 8 3 0 6 0 8 8 8 2 3 3 8 8 8 3 3 8 0 8
 48 47 58 58 57 48 44 37 42 47 51 39 40 39 54 48 54 58 58
 3 3 4 3 3 7 3 0 2 2 8 2 3 3 8 2 4 4 3

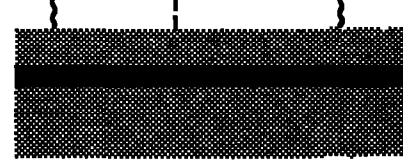
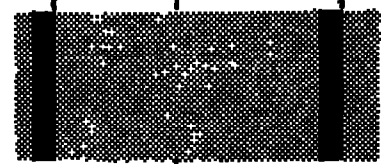
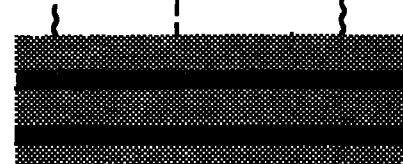
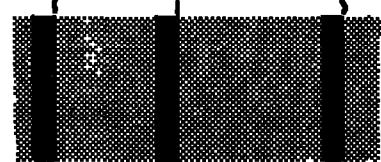
C. Utilisation de la fonction g dans la direction des colonnes.

0 88 0 4 0 0 0 0 3 8 0 2 0 2 0 82 0 0
 0 88 0 4 0 0 0 0 2 2 0 0 0 2 0 88 7 0
 0 88 0 4 0 0 0 0 2 0 0 2 3 0 82 0 4
 3 97 0 0 0 0 0 0 0 8 0 8 0 8 0 3 80 0 8
 8 80 0 0 0 0 0 0 8 0 3 0 0 8 0 83 0 0
 8 94 0 0 0 8 0 0 3 3 0 0 0 13 0 97 0 0
 2 82 0 0 0 10 0 0 0 8 0 0 0 8 88 0 0
 2 82 0 0 7 0 0 0 0 8 2 0 8 0 2 82 0 0

D. Utilisation de la fonction f de gauche à droite sur les lignes.

0 0 0 0 0 0 7 3 3 2 0 0 0 0 0 0 10 8
 0 0 0 4 4 4 0 0 2 0 0 0 0 0 1 3 3 0 10
 43 48 54 58 48 48 41 40 39 41 43 41 48 41 47 58 58 58
 3 8 0 0 0 0 0 0 0 8 0 3 8 0 3 0 0 0
 8 0 0 0 0 8 8 0 2 0 3 0 0 0 3 3 8 0 0
 8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 8 0 0 0 0 7 0 0 0 0 8 2 0 3 8 2 0 0 0

E. Utilisation de la fonction f de haut en bas sur les colonnes.



~ thalweg - - - ligne de crête

FIG. 7. — Schémas destinés à illustrer les propriétés de la méthode.

Comme dans le cas de la fonction f, les constantes positives M_1 et M_2 ont été respectivement fixées à 20 et 500. La fonction g diffère de la fonction f en ce sens que les rapports des valeurs de réflectance de tout couple de pixels voisins ne sont nuls que si ces deux valeurs sont identiques.

Dans la dégradation située en regard de la grille des rapports calculés, ceux-ci ne font ressortir que la ligne de crête et les thalwegs, matérialisant ainsi le partage entre zone d'ombre et zone éclairée ;

(c) dans le troisième schéma, les rapports entre les valeurs des pixels sont faits comme précédemment,

mais selon les colonnes ; sur la dégradation numérique correspondant à cette transformation, seuls ressortent des traits horizontaux figurant les limites nord et sud de la couche géologique de direction N 90 ; ces limites, pour un seuil de réflectance donné, se suivent parfaitement dans les deux zones.

On constate ainsi que toute limite entre deux plages homogènes disparaît si elle est parallèle à la direction dans laquelle sont effectués les rapports entre pixels. Les directions horizontales s'estompent pour des rapports faits selon les lignes ; inversement, les directions verticales disparaissent pour des rapports faits selon les colonnes. L'expérience montre de plus que cela est valable pour des directions faisant un angle faible de part et d'autre de la verticale ou de l'horizontale suivant le sens de la transformation retenue.

L'illustration qui vient d'être faite sur les deuxième et troisième schémas de la figure 7, des résultats obtenus à l'aide de la fonction g , est destinée à faire ressortir tout d'abord la nécessité d'effectuer deux traitements, l'un selon les lignes, l'autre selon les colonnes. Elle doit également rendre plus explicite les raisons du choix de la fonction f , raisons qui sont détaillées dans les paragraphes suivants à l'aide des résultats que fournit cette fonction sur la même vue théorique ;

(*d*) sur les documents obtenus en appliquant cette fois la fonction f définie précédemment, les directions autres que celles qui correspondent aux structures géologiques découlent essentiellement du réseau hydrographique, car les lignes de crêtes sont systématiquement gommées par la méthode utilisée. Le quatrième schéma de la figure 7 en donne la raison. En effet, nous avons vu plus haut qu'en allant d'un pixel K à un pixel $K + 1$, le rapport des valeurs modifiées de ces pixels est considéré comme nul si la réflectance du pixel $K + 1$ est supérieure à celle du pixel K . Or, dans la région étudiée, la prise de vue est toujours faite aux alentours de 5 heures GMT, soit 10 h. 30 à l'heure locale d'hiver et 9 h. 30 à l'heure locale d'été ; partant, l'élévation solaire varie de 28° au solstice d'hiver à 54° au solstice d'été, et l'azimut passe pour sa part de 154° N en hiver à 111° N en été. Nous voyons que dans ces conditions et quelle que soit la date de prise de vue, seuls les versants orientaux et méridionaux sont éclairés. Ainsi, le passage d'un pixel K présentant une valeur de réflectance inférieure à celle du pixel $K + 1$ qui

lui fait suite, se rencontre chaque fois que l'on atteint une ligne de crête lorsque l'on effectue les rapports des valeurs des pixels, que ce soit de gauche à droite dans la direction des lignes, ou de haut en bas dans celle des colonnes. Dans ce cas, le rapport est par définition égal à zéro et les lignes de crêtes disparaissent (cf. schéma 4 de la figure 7) ;

(*e*) de plus, comme l'illustre le cinquième schéma de la figure 7, il en va de même lorsque l'on passe d'une couche géologique plus sombre à une couche géologique plus claire ; ainsi, lors du calcul des rapports entre les valeurs des pixels dans un même sens, une couche géologique sombre située dans un contexte plus clair ou inversement une couche claire dans un contexte plus sombre, ne seront-elles matérialisées que par l'une de leurs deux bordures. Si la fonction f retenue et notamment le fait qu'elle ne prend en compte que les valeurs dont le gradient est positif, ne mettent en évidence que l'une de ces deux bordures, cela présente l'avantage de faire ressortir les lignes structurales que dessinent des couches géologiques dont la largeur minimale est de l'ordre de deux, voire même dans certains cas d'un seul pixel. En revanche, si cette condition n'existait pas, la matérialisation de l'ensemble des bordures des unités lithologiques de faible largeur ne permettrait pas, dans bien des cas, de faire ressortir les traits structuraux dessinés par des successions lithologiques fines, puisqu'il pourrait y avoir coalescence de tous les traits matérialisant ces bordures.

Le fait de ne prendre en compte que les rapports correspondants à des couples de pixels dont les valeurs de réflectance présentent un gradient en ligne positif, les autres rapports étant considérés comme nuls, est donc une condition essentielle de la mise en évidence des traits structuraux d'une région donnée (1).

Indépendamment des tracés qui limitent les champs de neige (vers l'est dans le cas d'un traitement de gauche à droite selon les lignes ; vers le sud, pour un traitement de haut en bas selon les colonnes) en raison du fort contraste existant entre eux et les roches environnantes, les documents obtenus par la méthode décrite ici soulignent donc essentiellement les grandes lignes du réseau hydrographique et les grandes lignes structurales.

Signalons d'ailleurs que le passage entre ombre et lumière étant très fortement tranché dans les thalwegs, les rapports obtenus dans ce cas sont nettement plus élevés que lors du passage d'une unité litholo-

(1) Il faut également faire remarquer qu'il est toujours possible d'effectuer des traitements de droite à gauche sur les lignes, ou de bas en haut selon les colonnes. Sur les documents correspondants à des traitements de ce type, on gomme alors le réseau hydrographique, on matérialise les lignes de crêtes et l'on fait éventuellement ressortir d'autres traits structuraux indispensables à la compréhension d'ensemble de la région étudiée.

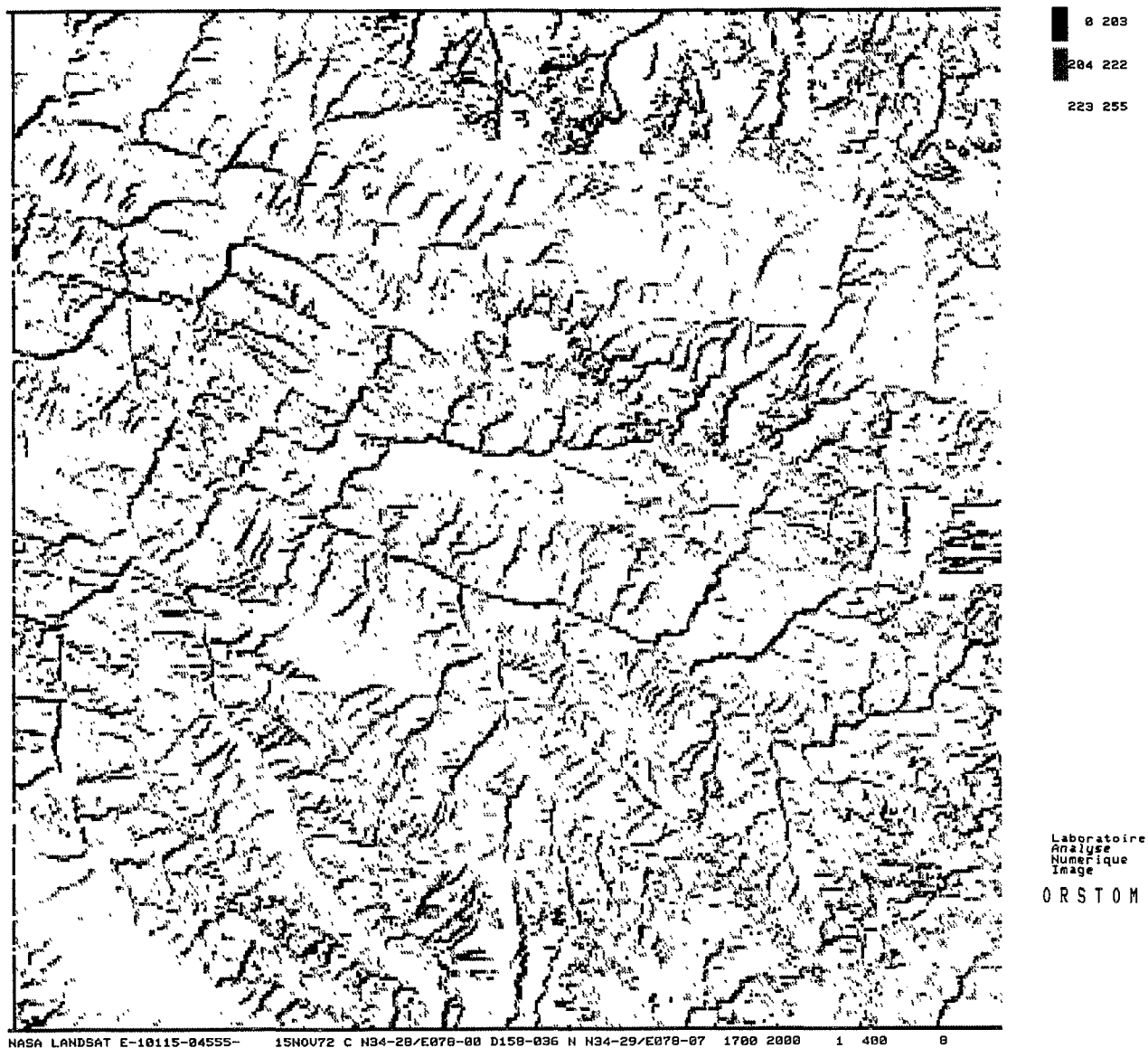


FIG. 8. — Visualisation du réseau hydrographique par surimpression du résultat obtenu par traitement selon les lignes et de celui obtenu par traitement selon les colonnes. Seules ont été retenues les classes numériques correspondant essentiellement au réseau hydrographique.

gique à une autre. Il est ainsi possible d'effectuer des sorties imprimantes différenciant (sur des sorties couleurs) ou ne prenant en compte (cf. fig. 8) que les directions du réseau hydrographique.

Résultats obtenus sur la région test étudiée

L'essai d'interprétation structurale de la région du Ladakh occidental sur laquelle la méthode a été testée et mise au point, montre le parti que l'on peut tirer des différents documents obtenus.

Cette région est comprise entre un secteur occidental contigu étudié par ANDRIEUX *et al.* (1977), FUCHS (1977, 1979), BASSOULET *et al.* (1978a, 1978b, 1980, 1982) et une région plus orientale non contiguë, décrite par BAUD *et al.* (1981) immédiatement à l'ouest de la vallée du Zanskar. Une faille N 170 à jeu dextre située à la limite orientale du champ de l'étude décale vers le sud ce dernier secteur. Ce coulissage dextre est notamment mis en évidence par le déplacement de la bordure sud de l'occurrence septentrionale des flyschs de Lamayuru qui, dans



FIG. 9. — Composition en fausse couleur à partir des canaux 4, 5 et 6.

le secteur étudié, suit la vallée du Ripchar qui présente une direction N 110, alors que, dans le secteur cartographié par BAUD *et al.* (1981), cette même bordure suit la Markha, vallée de même direction mais nettement plus méridionale.

Une partie de la formation de Lamayuru couvre environ le quart supérieur de la scène étudiée qui est en fait essentiellement traversée d'ouest en est par une unité fortement plissée : l'unité de la Shillakong qui est bordée au nord et au sud par des termes appartenant à la formation de Lamayuru.

Il ne nous appartient évidemment pas, dans le cadre de cette étude, de trancher le différend qui oppose FUCHS (1979) et BASSOULET *et al.* (1978a, 1982), au sujet de l'interprétation structurale que ces auteurs proposent respectivement pour cette unité. Mais il nous semble cependant indispensable d'esquisser, au vu des plus récentes publications, les grands traits stratigraphiques et structuraux de la nappe de la Shillakong, puisque c'est sur elle que la méthode proposée a été centrée.

L'unité de la Shillakong est une unité essentielle-

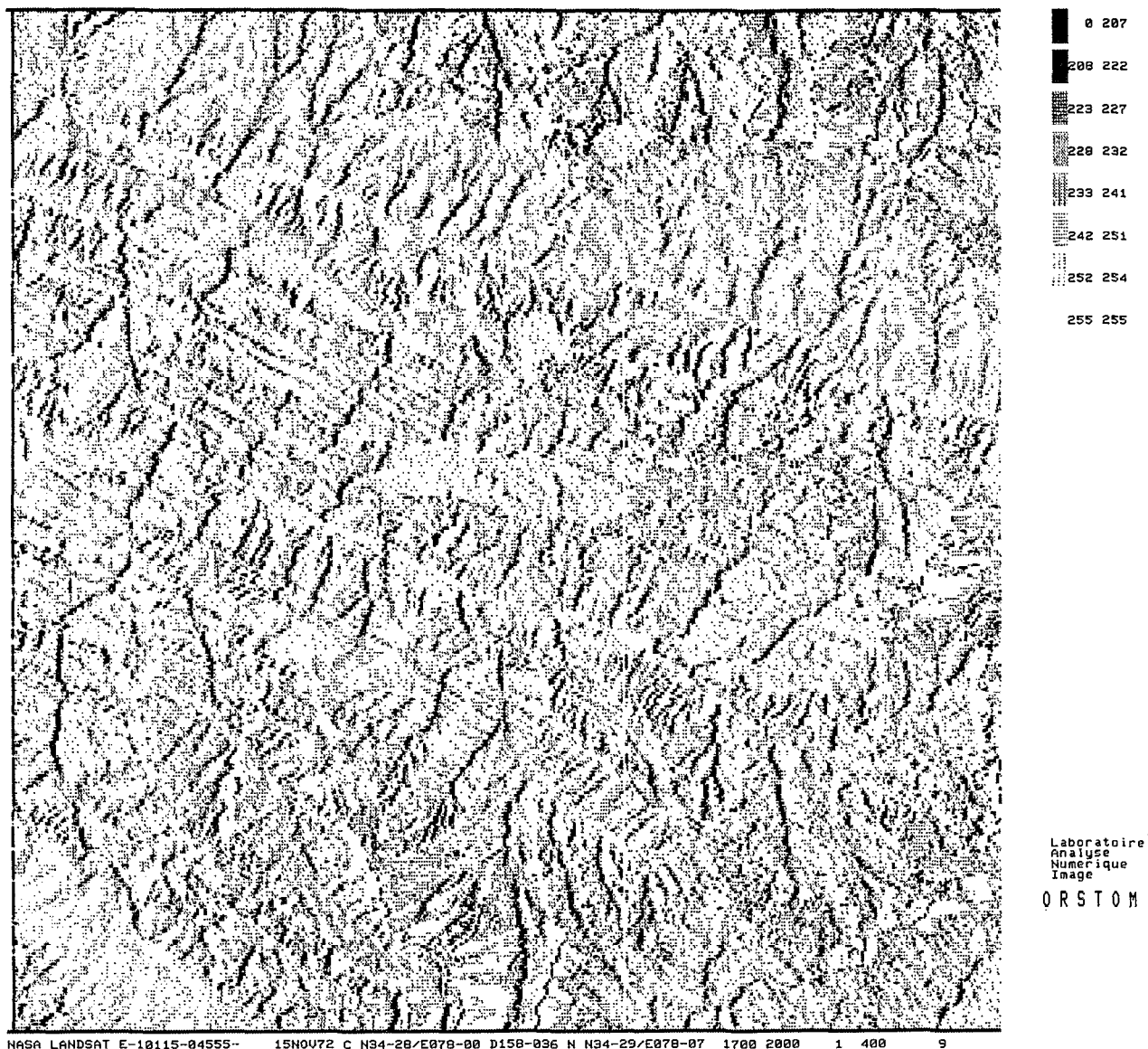


FIG. 10. — Visualisation des structures après traitement de l'image en appliquant la fonction f de gauche à droite dans la direction des lignes.

ment carbonatée; on y observe notamment des alternances bariolées de calcaires et calcschistes en plaquettes constituant une série épaisse et fortement plissée. Cette série se situe généralement à la base de la nappe qui correspond en fait au flan inverse d'un grand pli couché; elle a tout d'abord été considérée par BASSOULET *et al.* (1978a) et FUCHS (1977, 1979) comme étant d'âge triasique (Scytho-anisien). Mais, d'après la découverte récente de fossiles identifiables (BASSOULET *et al.* 1978b, 1980, 1982), on lui attribue à présent un âge crétacé supérieur (Albo-

aptien). Cette série, dénommée « calcaires bariolés de Fatula », est discordante sur la plupart des séries d'âge plus ancien dont la succession stratigraphique est la suivante :

(a) des quartzites et grès à plantes du Trias supérieur se développant sur 150 mètres d'épaisseur, voire moins, et qui sont parfois totalement absents ;

(b) des calcaires du Norien supérieur et du Lias formant sur 300 mètres d'épaisseur une séquence constituée par une alternance de bancs épais ; cette

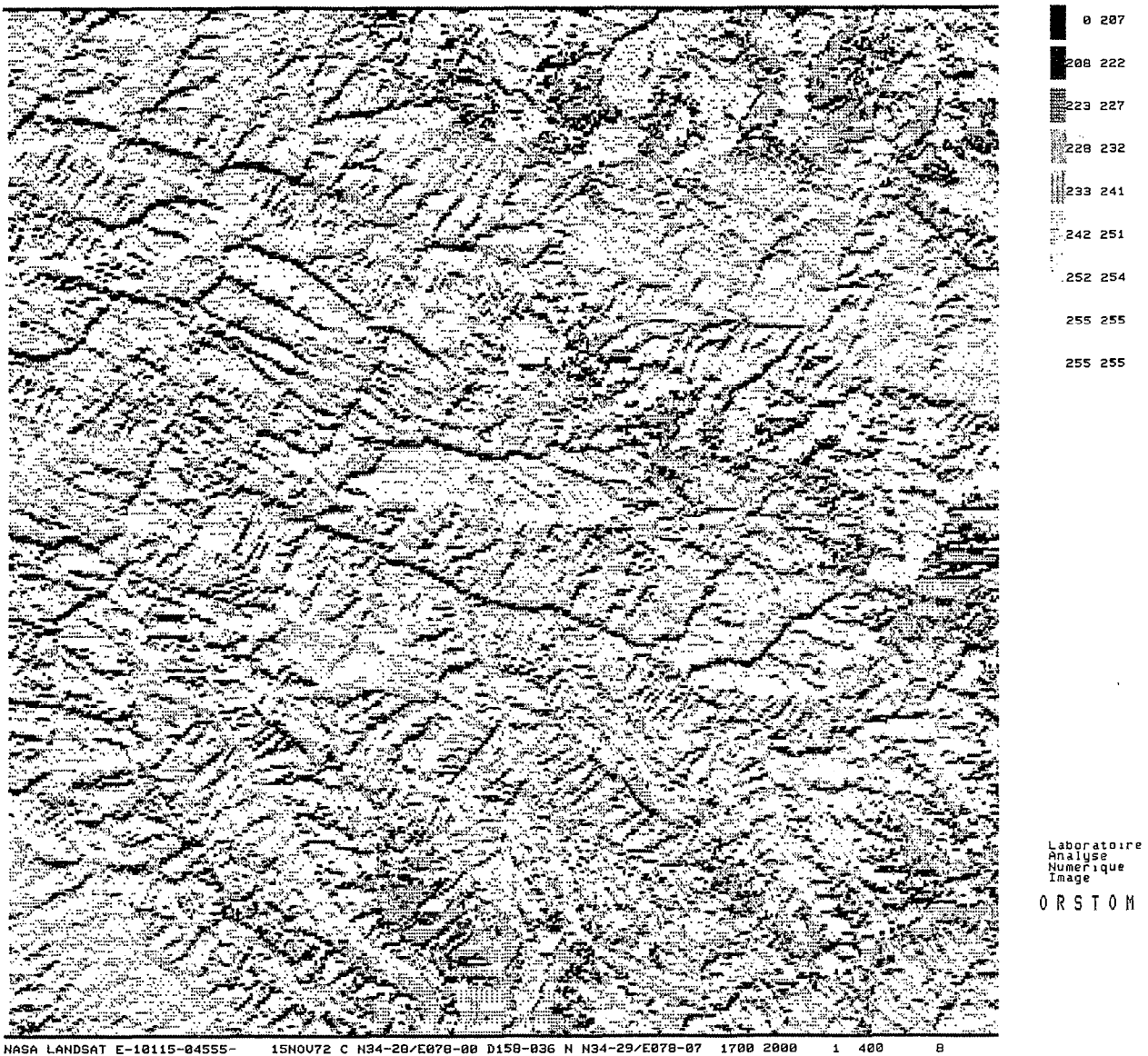


Fig. 11. — Visualisation des structures après traitement de l'image en appliquant la fonction f de haut en bas dans la direction des colonnes.

série qui fait stratigraphiquement suite aux grès et quartzites mais qui est spatialement située sous ces derniers, est connue sous le nom de « Kioto limestones » ;

(c) 100 à 150 mètres de pélites noires du Jurassique supérieur (Spiti shales) ;

(d) une épaisse série de grès sombres datant du Crétacé inférieur (Giumal Sandstones).

BASSOULET *et al.* (1978a, 1980, 1982) ont reconnu quatre phases de déformations dans l'unité de la

Shillakong : la première synschisteuse et épimétamorphique, est associée à des plis d'axe N110 et correspondrait au déversement originel des nappes vers le sud ; la seconde proviendrait de la reprise de cette unité par des plis hectométriques isoclinaux déversés vers le nord ; l'ensemble serait affecté par une troisième schistosité de fracture originellement plate, et repris en synforme tardive ; on observe enfin une quatrième phase marquée par la formation de knickens liés à des failles verticales submériidiennes.



PHOTO 1. — Unité de la Shillakong. Plis hectométriques dans la série de Kioto (calcaires du Trias supérieur et du Lias). Vue prise vers l'ouest sud-ouest dans la vallée de la Shillakong.
Cliché Jean MARCOUX.



PHOTO 3. — Unité de la Shillakong vue de Photaksar; cliché pris vers le nord nord-est. Contact de l'unité de la Shillakong sur la formation de Lamayuru, visible dans la gorge du Photang. L'unité de la Shillakong est essentiellement représentée ici par la formation de Fatula. *Cliché Monique FORT.*

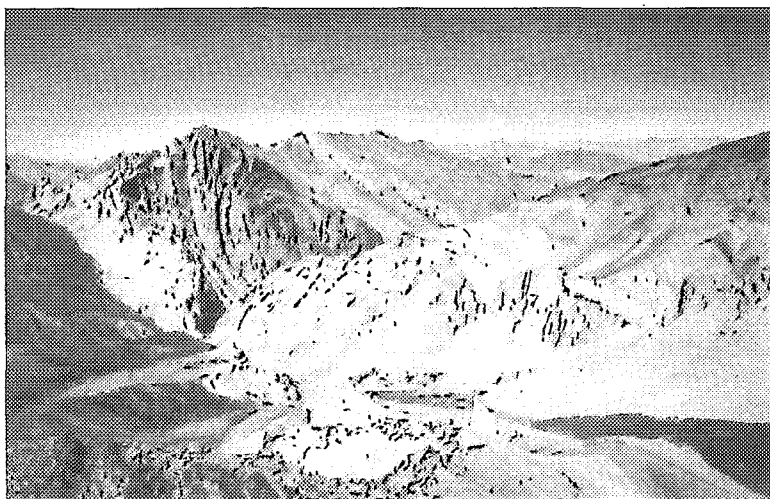


PHOTO 2. — Unité de la Shillakong. Vue prise vers l'ouest nord-ouest depuis la klippe ophiolitique de Spong tang. Contact entre la formation de Lamayuru située au premier plan et l'unité de la Shillakong. La formation de Lamayuru englobe des écaïlles de la formation de Fatula. L'unité de la Shillakong comprend des calcaires de Kioto formant ici un vaste pli anticlinal surmonté par des termes de la série des calcaires bariolés de Fatula (Crétacé supérieur). Entre cette série et les calcaires de Kioto, notamment sur le flanc gauche de l'anticlinal, présence de pélites de Spiti et de grès de Giupal. *Cliché Jean MARCOUX.*



FIG. 12. — Relevé de quelques structures lithologiques de l'unité de la Shillakong soulignées par le traitement numérique (fonction f).

Signalons pour terminer ces rappels destinés à situer le problème dans son contexte géologique que les cartes qui accompagnent les travaux de BASSOULET *et al.* (1978a, 1980, 1982) sont assez schématiques et que les limites tracées entre les différentes unités lithologiques, notamment vers l'est, sont très approximatives. En revanche, la carte géologique dressée par FUCHS (1977) est nettement plus précise et les indications structurales qu'elle comporte correspondent parfaitement à celles que l'on obtient par notre traitement numérique comme cela peut être vérifié dans la zone où cette carte et le document Landsat étudié se recouvrent.

Si l'on prend soin de relever l'intégralité du réseau hydrographique et de repérer les directions inhérentes à ce réseau, soit sur le document de la fig. 8, soit sur

un document en fausses couleurs de même échelle (cf. fig. 9), il est alors parfaitement loisible d'isoler de la sorte, sur les cartes provenant des transformations numériques faites en appliquant la fonction f (cf. fig. 10 et 11), nombre de directions qui n'appartiennent qu'aux structures géologiques proprement dites.

La fig. 12 illustre en partie les résultats obtenus. Les limites lithologiques pertinentes ont été soulignées. On constate tout d'abord qu'il est possible de les suivre indépendamment de l'orientation des versants et ensuite qu'elles dessinent parfois des plis dont les charnières sont aisément repérables sur les documents des figures 10 et 11.

On conçoit ainsi aisément ce que la technique proposée dans cet article peut apporter comme infor-

mation aux structuralistes travaillant dans des régions d'accès difficile et où l'encaissement des vallées ne permet pas toujours de suivre sur les versants les structures relevées dans les thalwegs.

CONCLUSIONS

La richesse des informations contenues dans les documents Landsat est telle que l'on est amené à filtrer le plus sévèrement possible ces informations pour faire ressortir des indications structurales détaillées. Ainsi, avons-nous vu que le filtre gradient et le filtre de Sobel n'étaient pas assez sélectifs pour répondre à cette problématique. C'est pour tenter d'y répondre que la fonction proposée dans cet article a été mise au point et retenue. On obtient en effet des documents où ne subsistent plus que le

réseau hydrographique et des directions structurales ; ces documents permettent donc de suivre, dans les zones montagneuses, les limites entre unités lithologiques indépendamment des contrastes ombrelumière. Comme tout document télédétection traité numériquement, il vise à fournir un outil supplémentaire aux équipes travaillant sur le terrain.

Dans une deuxième étape, il conviendra de voir si cette nouvelle méthode appliquée à d'autres types de régions, est susceptible de fournir des indications structurales ou des informations de tout autre nature. Cela suppose une étude diversifiée où notamment l'influence de l'élévation solaire et de l'azimut sur les termes de l'équation proposée doit être quantifiée.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.,
le 5 mars 1982.*

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIEUX (J.), BRUNEL (M.) et SHAH (S. K.), 1977. — La suture de l'Indus au Ladakh (Inde). *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 284, sér. D : 2327-2330.
- BASSOULET (J.-P.), COLCHEN (M.), MARCOUX (J.) et MASCLE (G.), 1978 a. — Une transversale de la zone de l'Indus de Khalsi à Photaksar, Himalaya du Ladakh. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 286, D : 563-566.
- BASSOULET (J.-P.), BELLIER (J.-P.), COLCHEN (M.), MARCOUX (J.) et MASCLE (G.), 1978 b. — Découverte du Crétacé supérieur calcaire à faciès pélagique dans le Zaskar (Himalaya du Ladakh). *Bull. Soc. Géol. Fr.* (7^e sér.) ; 20 : 964-968.
- BASSOULET (J.-P.), COLCHEN (M.), JUTEAU (Th.), MARCOUX (J.) et MASCLE (G.), 1980. — L'édifice des nappes du Zaskar (Ladakh-Himalaya). *C. R. Acad. Sci., Paris*, 290, D : 389-392.
- BASSOULET (J.-P.), COLCHEN (M.), JUTEAU (Th.), MARCOUX (J.), MASCLE (G.) and REIBEL (G.), 1982. — Geological studies in the Indus suture zone of Ladakh (Himalayas). *Gupta* (sous presse).
- BAUD (A.), ARN (B.), BUGNON (P.), CRISNEL (A.), DOLIVO (F.), ESCHER (A.), HAMMERSCHLAG (J. C.), MARTHALER (M.), MASSON (H.), STECK (A.) et TIECHE (J. C.), 1981. — Le contact Gondwana-peri-Gondwana dans le Zaskar oriental (Ladakh Himalaya). *Bull. Soc. Géol. Fr.* (sous presse).
- DUDA (R. O.) and HART (P. E.), 1973. — Pattern classification and Scene analysis. *J. Willey and Sons*. Édit., New York, 482 p.
- FUCHS (G.), 1977. — Traverse of Zaskar, from the Indus to the valley of Kashmir. A preliminary note. *Jb. Geol.*, B-A, Vienne, 120 (2) : 219-229.
- FUCHS (G.), 1979. — On the geology of the western Ladakh. *Jb. Geol.*, B-A, Vienne, 122 (2) : 513-540.
- LOINTIER (M.) et PIEYNS (S.), 1981. — Méthodologie de constitution d'une base de données d'occupation du sol par Télédétection. *Init. Doc. Tech. O.R.S.T.O.M.*, 47, *Télédétection* 4, 91 p.
- MAURIN (A.-F.) et RIGUIDEL (M.-J.), 1978. — Éléments de morphologie. Généralités. *C.F.P., Notes et mém.*, 14, 134 p.
- O.R.S.T.O.M., 1978. — Analyse multivariable. Procédure « Loterie ». Application à l'analyse multispectrale en Télédétection. *Init. Doc. Tech. O.R.S.T.O.M.*, 39, *Télédétection* 2, 78 p.
- PRATT (W. K.), 1978. — Digital image processing. *J. Willey and Sons*. Edit. New York, 750 p.