Bulletin de la Société belge de Géologie	99-1	pp. 21-40	Bruxelles 1990	
Bulletin van de Belgische Vereniging voor Geologie	99-1	pp. 21-40	Brussel 1990	

EXPLORATION DE L'ESPACE SPECTRAL D'UNE SOUS-SCENE THEMATIC MAPPER AU BURUNDI (REGION DE MUSONGATI). RECHERCHE DU PLAN DES SOLS'

par

J. LAVREAU²

RESUME

On effectue une analyse des informations apportées par le senseur TM de Landsat concernant les objets minéraux lorsque ceux-ci se trouvent mélangés à d'autres objets naturels, en particulier des végétaux. On envisage tout d'abord les limitations physiques apportées à la nature multivariable des données ; on examine ensuite ces variables isolément ou en combinaison et on les présente en perspectives graphiques. On calcule l'équation d'un plan minéral grâce à des transformations d'axes permettant de définir des pixels-sol principalement minéraux. On constate la faible extension de la partie du plan qu'occupent les objets minéraux, confirmant ainsi les résultats des campagnes de radiométrie au sol. La définition et le calibrage du plan des sols permettent de sélectionner des pixels-sol synthétiques situés en dehors de la zone restreinte qu'occupent les pixels-sols réels. Ces points sont de possibles constituants du pixel-sol considéré comme un mélange.

ABSTRACT

An analysis of the information given by the TM sensor of LANDSAT about mineral objects when these are mixed with vegetal ones is performed. The physical limitations to the multivariable nature of the data are first envisaged. The variables are further examined isolately or in association with others and presented in graphic perspectives. The soil plane is calculated from a transformation of the axes. The field occupied by real mineral objets is small in this plane, a feature evidenced by radiometric measurements on the ground, but the calibration of the plane allows to comute the spectral characteristics of synthetic objects possibly representing mixing end-members.

MOTS-CLES

Télédétection, Landsat Thematic Mapper, discrimination, végétation, sols, Burundi, géologie.

KEY WORDS

Remote sensing, Landsat Thematic Mapper, discrimination, vegetation, soils, Burundi, geology.

1. INTRODUCTION

L'analyse d'une image satellitaire à des fins géologiques a pour but l'identification ou, faute de mieux, la discrimination (ou reconnaissance relative) des roches constituant le sol ou le sous-sol de la région. Elle se heurte à la fois à des obstacles physiques et à des problèmes méthodologiques.

Si le but recherché est la reconnaissance directe des roches, la couverture végétale peut constituer, par sa continuité et son épaisseur, un écran pour les roches affleurantes. A moins qu'ils ne constituent un objectif en soi, les sols, qu'ils soient naturels (lithosols) ou cultivés (agrosols), donnent lieu à un autre type d'écran pour l'exploration lithologique, car leurs liens avec le sous-sol peuvent être lâches voire inexistants.

Par ailleurs, l'identification d'objets lithologiques ou minéraux se heurte fréquemment à l'impossibilité de distinguer, sur la base de la réflectance spectrale (c'est à dire pour une gamme de longueurs d'ondes déterminées) uniquement, un grand nombre des espèces (particulièrement les espèces silicatées). En effet, dans la gamme de longueurs d'ondes utilisées ici (0,4 à 2,5 µ), seuls trois facteurs liés au chimisme peuvent entrer en ligne de compte : 1° la présence des métaux transitoires, en particulier le fer dont les effets sont dominants par rapport aux autres de ces métaux, 2° la présence d'eau ou

¹ Communication présentée le 7 juin 1989 au 3ème Symposium sur la Télédétection à Tervuren.

Laboratoire de télédétection aérospatiale. Musée royal de l'Afrique centrale, Steenweg op Leuven, 13 - B-1980 Tervuren.

du groupe hydroxyle, 3° la présence de liens Al-OH ou Mg-OH, ou encore du groupe CO₃ = . On comprend dès lors que seules certaines roches ou minéraux typiques puissent être distingués ou discriminés (fig. 1b).

Il nous a dès lors semblé utile d'effectuer une analyse approfondie des informations que le senseur satellitaire Thematic Mapper (TM) de LANDSAT fournit au sujet des objets minéraux lorsque ceux-ci sont mélangés à des objets d'autre nature.

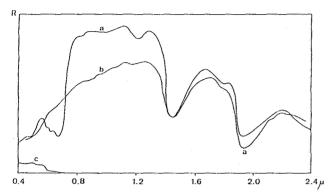


Figure 1a : Courbes de réflectance (en laboratoire) des végétaux (a), sols (b) et eaux (c), représentatives des objets télédétectés (sauf pour la correction atmosphérique).

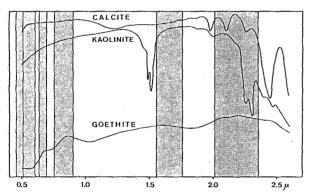


Figure 1b: Courbes de réflectance (en laboratoire) de quelques minéraux (argiles, calcite, goethite) ainsi que la position des "bandes" de mesure des senseurs Thematic Mapper.

1.1. DONNEES UTILISEES

Nous avons utilisé l'image numérique LANDSAT 5 n° Y5086307313X0, quart 1. La sous-scène étudiée s'étend de la ligne 512 à 1023 et la colonne 2253 à 2764. Cette scène a été enregistrée le 12 juillet 1986, donc en pleine saison sèche.

L'image a été acquise pour le compte de l'UNESCO/UISG dans la cadre du programme GARS (Geological Applications of Remote Sensing) de ces organismes, pour lequel cette étude constitue une contribution.

1.2. LE PAYSAGE DE MUSONGATI

La région, dont l'altitude varie entre 1600 et 2000 m, est constituée de hauts plateaux et de collines aux pentes adoucies où se distinguent notamment

la crête du Cene (limite ouest de la sous-scène étudiée) et le massif du Nkoma (situé à l'est de la sous-scène). Plusieurs aplanissements d'érosion ont été reconnus, dont un vers 1750 m, correspondant aux sommets des collines bordant la sousscène.

Le plateau de Musongati constitue une voûte surbaissée au sommet plat dont l'altitude moyenne est de 1675 m, donc moins élevée que les collines qui l'entourent. Le paysage végétal montre les effets de brûlis répétés sur la carapace latéritique ; ils ont donné lieu à une végétation pauvre en espèces herbacées. Le sol nu est apparent et peut représenter jusqu'à 50 % de la surface exposée. Le massif gabbro-noritique (voir ci-après) montre une couverture herbeuse plus normale avec çà et là des plantations.

Les fonds de vallées sont intensément cultivés. L'importance de la couverture végétale est toutefois variable selon le type de culture et son avancement. Les vallées plus étroites montrent un cordon de buissons et de petits arbres de sorte que l'eau libre est rarement visible.

1.3. GEOLOGIE DE LA REGION DE MUSONGATI

La région de Musongati est représentée sur la feuille de Mwishanga de la carte géologique du Burundi au 1:100 000. La surface couverte par la sous-scène analysée montre des roches précambriennes du Groupe du Burundi (Protérozoïque moyen). On y a distingué (Waleffe, 1979) (fig. 13):

- la Sous-formation de Musongati, constituée de roches pélitico-arénacées (schistes gréseux, grès et quartzites micacés avec intercalations de grès, grès ferrugineux, schistes, phyllades);
- la Sous-formation de la Nyamabuye, essentiellement pélitique (schistes et phyllades gris foncé à noir) avec rares intercalations de quartzites ou de quartzo-phyllades;
- la Formation du Tshene (Cene), montrant des roches arénacées et pélitiques, principalement des séricito-schistes et des quartzites, cataclasés et mylonitisés dans leur ensemble. Cette déformation la distingue des formations précitées.

Ces roches sont traversées par le massif intrusif de Musongati comprenant à l'ouest une masse basique gabbro-noritique et à l'est une masse ultrabasique composée de dunites, péridotites plus ou moins serpentinisées et de pyroxénites.

Les formations superficielles comportent différents types de sols qui sont en relation avec la nature lithologique du sous-sol. Parmi celles-ci il faut citer la cuirasse latéritique de Musongati recouvrant la zone d'altération de ce massif. Cette cuirasse s'étend localement à la Sous-formation de Musongati et au massif gabbroïque le plus occidental.

1.4. L'ESPACE SPECTRAL DE THEMATIC MAPPER

Les données numériques fournies par le senseur Thematic Mapper (TM) de LANDSAT sont comprimées sur 8 bits, donc sur une échelle de 256 valeurs numériques allant de 0 à 255. Elles correspondent à six éléments d'un senseur multispectral fournissant une mesure de l'intensité de la radiation montant de la fraction de la surface du sol échantillonnée par le senseur (le pixel-sol, de forme nominale carrée d'environ 30 m de côté, possède une surface de 900 m², contrairement au pixel s.s., il peut être divisé en composants) vers le satellite dans les bandes suivantes de longueurs d'onde:

canal 1 ou TM1 : 0,45 à 52 μ (lumière vertbleu)

canal 2 ou TM2 : 0.52 à 0.60 μ (lumière verte), canal 3 ou TM3 : 0.63 à 0.69 μ (lumière rouge).

canal 4 ou TM4 : 0.76 à 0.90 μ (infrarouge proche),

canal 5 ou TM5 : 1,55 à 1,75 μ (infrarouge moyen/proche),

canal 7 ou TM7 : 2,08 à 2,35 μ (infrarouge

moyen/proche),

(le canal 6 correspondant au rayonnement infrarouge thermique entre 10.3 et $12.5 \,\mu$ ne sera pas envisagé ici).

On voit qu'une combinaison des trois premières bandes spectrales permettrait, à première vue, de restituer, par apport additif, des couleurs "naturelles" au paysage. Cette propriété perd toutefois une grande partie de son intérêt à plus de 600 km d'altitude lorsque ces couleurs sont vues au travers d'un voile atmosphérique (voir ci-dessous).

Ces six variables correspondent à la "discrétisation" arbitaire du phénomène continu que constitue la réflectance de chacun des pixels-sols au long du spectre EM. La largeur et la position des bandes spectrales TM de LANDSAT ont été choisies par les concepteurs du satellite plus en fonction de l'énergie radiante disponible suite, d'une part, à la valeur de l'irradiance extra-atmosphérique (relativement peu importante au-delà de 1,5 μ) et, d'autre part, à la présence des bandes d'absorption dues à l'eau atmosphérique (autour de 1,4 à 1,9 μ) qu'en fonction des propriétés spectrales des objets naturels.

Les variables TM possèdent néanmoins un certain nombre de caractéristiques propres par rapport aux objets télédétectés. Pour les besoins de cette comparaison, on peut classer ces objets en quatre types : l'atmosphère, la végétation, les sols constituant avec les roches le groupe des objets minéraux (quoique la contribution d'éléments organiques dans les sols puisse être importante) et l'eau. Les spectres de réflectance de ces objets typiques vont nous permettre de définir les propriétés spécifiques des canaux TM à leur égard (fig. 1a).

TM1, du fait de sa sensibilité aux petites longueurs d'onde, est fort affecté par les gaz et les particules. Les effets atmosphériques y sont particulièrement visibles et éventuellement gênants en l'absence de correction atmosphérique. Cette dernière correction n'a pas été réalisée dans la présente étude.

TM2 est beaucoup moins sensible à la présence de gaz, mais la présence de particules (aérosols) s'y manifeste encore. Sa sensibilité au vert en fait, évidemment, une mesure directe de l'abondance de la chlorophylle (sur terre ou dans l'eau).

TM3, sensible au rouge, est un indicateur de l'état phénologique des végétaux (rougissement relatif dû à la dessication) et de l'abondance de certains objets minéraux (oxydes de fer) dans le pixel-sol.

TM4 correspond à la réflectance maximale de la matière vivante et constitue donc une mesure de l'abondance de celle-ci. Il est en outre, de même que les autres canaux de l'infrarouge, relativement peu sensible aux effets atmosphériques. Les objets minéraux ne montrent pas de réflectance importante dans cette région du spectre.

TM5 est "neutre" par rapport aux sols et la végétation (fig. la). Sa variation dépend donc surtout, pour des conditions d'éclairement constantes, de la quatrième composante thématique envisagée ici, c'est à dire l'eau ou, d'une façon plus générale, l'humidité des objets.

Dans la bande spectrale de TM7, enfin, on voit que les objets minéraux sont plus lumineux que les objets végétaux (fig. 1a). TM7 constitue donc une mesure de l'abondance des objets minéraux par rapport aux objets végétaux (de la même manière que TM3 mais sans être soumis, comme ce dernier, à l'interférence des objets végétaux morts). Cette bande possède quelques autres propriétés spécifiques aux objets minéraux. Les liaisons Al et Mg avec OH et le groupe CO₃ = possèdent dans cette région du spectre des pics d'absorption (respectivement vers $2,2 \mu$ et $2,35 \mu$) qui ont pour effet de diminuer la réflectance des minéraux hydratés (du type des argiles ou des micas notamment) et des carbonates (fig. 1b) de sorte que les roches contenant ces minéraux deviennent identifiables à l'aide de senseurs adéquats et, dans certains cas particuliers, discriminables par le senseur TM.

2. LIMITATIONS PHYSIQUES

2.1. NATURE MULTIVARIABLE DES DONNEES

Les données LANDSAT TM ne sont pas rigoureusement de type multivariable. On sait que les senseurs spectraux des canaux 1-4 (donnant lieu aux variables TM1, TM2, TM3 et TM4) équipant Thematic Mapper sont disposés dans le plan focal primaire de l'instrument, tandis que les senseurs correspondant aux canaux 5 et 7 (donnant lieu à TM5 et TM7) de l'infrarouge plus lointain sont disposés dans un plan focal secondaire refroidi (cf. Landsat 4 Users Manual). Le soin porté à l'arrangement géométrique de ces senseurs devrait assurer que c'est le même point au sol qui active à chaque instant les divers senseurs. Cette perfection gé-

ométrique n'est atteinte que dans une certaine mesure : on a pu calculer que les déviations réelles sont de l'ordre d'un quart à un tiers de pixel entre les canaux du visible et de plus d'un demi-pixel entre les canaux du visible et de l'infrarouge. Il en résulte que les relations entre variables sont entachées d'une erreur systématique dont la correction est laborieuse et dès lors rarement, sinon jamais, effectuée. Faute de mieux, on prend donc les variables TM à l'état brut.

2.2. EFFETS ATMOSPHERIQUES

L'atmosphère affecte les radiations qui la traversent de manière variable à la fois pour les longueurs d'ondes impliquées et pour la quantité d'énergie absorbée (fig. 2).

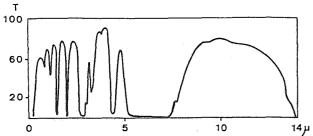


Figure 2: Courbe de la transmittance atmosphérique, illustrant l'étroitesse relative des bandes de transmission (fig. 1b).

Les propriétés spectrales des objets naturels sont mesurées au laboratoire dans des conditions expé-L'extrapolation de ces rimentales déterminées. propriétés à celles suscpetibles d'être mesurées par un satellite ne peut se faire que si l'on a une connaissance exacte de l'état de la portion de l'atmosphère se trouvant entre le soleil, le pixel-sol et le satellite au moment de la prise d'image. Un tel niveau de connaissance n'est jamais atteint, mais seulement approché grâce à l'utilisation soit de modèles atmosphériques dont les paramètres sont adaptés en fonction de circonstances locales, soit de modèles statistiques basés sur l'image elle-même. Il en résulte que la connaissance que l'on a des propriétés réelles des objets télédétectés est entachée d'un défaut de correction/calibration (composé d'un facteur multiplicatif et d'un terme additif) et, réciproquement, que la recherche d'objets dans une image à partir de leurs propriétés spectrales "théoriques" est le plus souvent impossible.

La figure 2 montre que les canaux TM correspondent en réalité à des fenêtres de transmission hétérogènes et que le signal mesuré est déterminé, même dans l'infrarouge, dans une large mesure par la présence de bandes d'absorption dues à des gaz atmosphériques. La valeur absolue des variables TM dépend évidemment aussi du calibrage des senseurs et des paramètres de la conversion analogique/numérique.

D'une façon générale, les effets atmosphériques aboutissent à une uniformisation des valeurs des pixels par addition d'un terme constant : augmentation relative des valeurs basses, diminution relative des valeurs élevées, donc à une réduction du contraste de l'image qui est particulièrement sensible dans les courtes longueurs d'onde.

2.3. NATURE DES PIXELS-SOL

Les éléments d'une image (pixels) ne sont que rarement définis sur le terrain (pixel-sol) par un objet unique, c'est à dire d'un ensemble spectralement homogène. A cause de la résolution au sol de 30 m X 30 m du senseur TM, plusieurs objets sont généralement détectés simultanément, constituant le pixel-sol. S'il n'existe aucune interférence entre les objets, leur contribution à l'énergie réflechie est proportionnelle à la surface qu'ils occupent dans le pixel-sol. Si, par contre, le rayonnement émis par un objet est absorbé (de manière variable selon les longueurs d'ondes) par les objets voisins, cette proportionnalité disparaît et le pixel-sol doit être considéré comme un volume à l'intérieur duquel se produisent des échanges énergétiques (c'est notamment le cas quand le pixel-sol détecté possède une allure stratifiée, par exemple dans les associations sols/végétation arborescente où le rayonnement incident traverse la strate végétale avant d'atteindre le sol et d'y être renvoyé directement ou non vers le senseur). La description rigoureuse d'un tel pixelsol n'est évidemment possible que si l'on en connaît la nature exacte.

Cette situation pose également des limitations à l'analyse multispectrale puisque les propriétés d'un pixel-sol ne peuvent pas être déduites uniquement de l'abondance de ses composants élémentaires. Des conditions supplémentaires doivent être remplies, correspondant à autant d'équations régissant les relations entre composants. Dans la majeure partie des cas, étant donné que la nature de la surface du sol et a fortiori ses propriétés sont inconnues, ces conditons et équations ne peuvent pas être déterminées. Le système doit donc être analysé comme tel, en remplaçant les propriétés des composants élémenaires réels ou théoriques par celles de composants apparents.

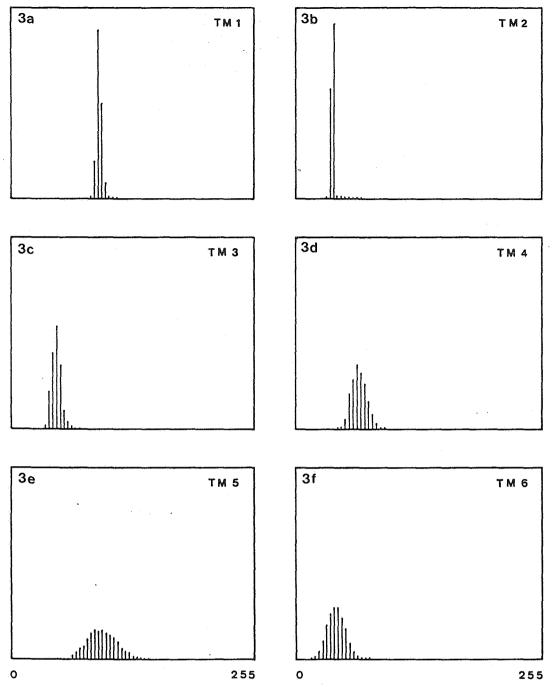
3. VARIABLES TM: PERSPECTIVES MONO- ET MULTISPECTRALES

Puisque nous les acceptons comme multivariables, les données TM peuvent être examinées en considérant chacune d'elles indépendamment des autres (n = 1), ou en relation avec ces dernières (n > 1).

3.1. N = 1

3.1.1. Analyse statistique

Les histogrammes déterminés par les images TM1-TM7 couvrant Musongati (fig. 3a-3f) montrent une forme qu'on peut rapporter en première analyse à celle d'une distribution gaussienne unimodale. Plusieurs "mécanismes" peuvent concourir à une distribution de ce type.

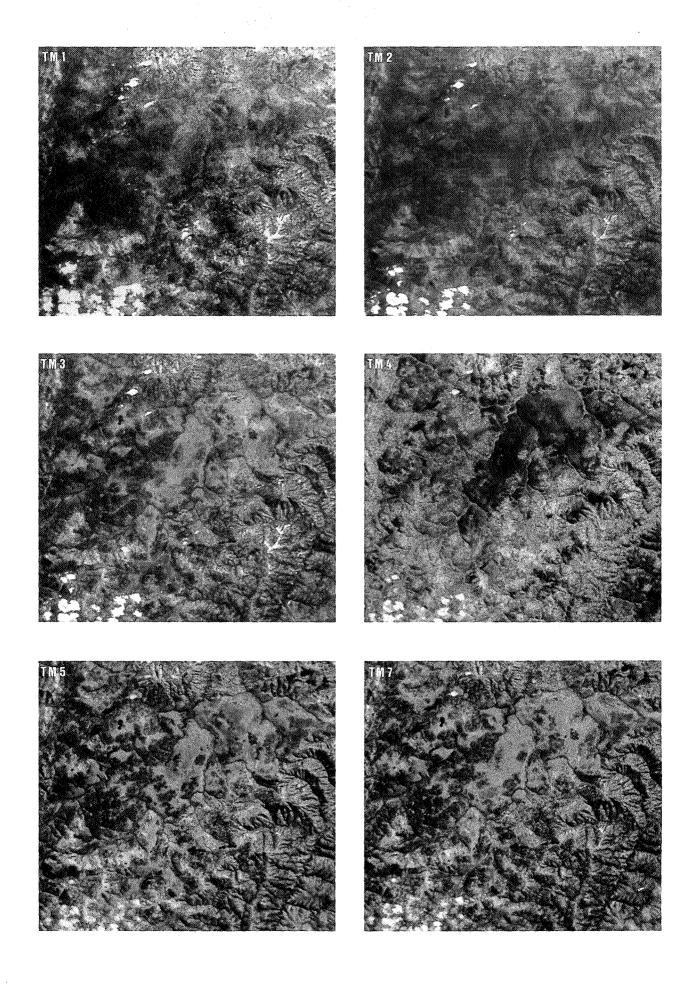


Figures 3a-3f: Histogrammes de TM1-TM7. Les valeurs de DN sont généralement peu étalées, illustrant la relative homogénéité du paysage de Musongati. Ces valeurs ont été étalées sur toute la gamme disponible sur les photographies correspondantes 1-6.

Dans l'hypothèse strictement gaussienne, on aurait affaire à des pixels dont la valeur oscille de manière aléatoire autour d'une valeur centrale. L'examen de la scène nous montre que cela est peu probable ; elle montre en effet une variété d'objets distincts, c'est à dire déterminés par le groupement spatial de pixels-sol de radiance relativement constante (plantations, savane, champs, etc.).

Une première variante à l'hypothèse gaussienne peut dès lors être imaginée, dans laquelle les objets remplacent les pixels-sol. Une image montre en général un nombre important d'objets (environ 40 classes définissables par classification hiérarchique non supervisée sont nécessaires pour expliquer "visuellement" l'image couvrant la région étudiée) : une variation thématique générale qui peut se limi-

ter à quelques taxons (unités thématiques), par exemple forêt, savane, plantations, cours d'eau, sols nus, se multiplie en effet par les variations locales liées notamment aux conditions d'éclairement (valeur et orientation des pentes) ou à des circonstances considérées à priori comme non essentielles dans une étude à orientation thématique déterminée (par exemple la nature géologique du milieu caractéristique de chaque objet). Si les objets sont "purs" (c'est à dire que tous les pixels-sol qui les composent appartiennent à la même classe spectrale), leur histogramme sera très étroit voire composé d'une seule classe. L'allure "gausenne" de l'histogramme de l'image entière peut alors s'expliquer par le nombre relativement élevé d'objets de radiance moyenne variant dans des limites relativement étroites. Les pixels-sol mixtes, c'est à



Photos 1 à 6. : Photographie d'écran: images TM1 à TM7 de la région de Musongati. La dynamique a été étalée entre les extrêmes définis par les pixels-sol non nuageux.

dire couvrant physiquement plusieurs objets (d'autant plus nombreux que le rapport entre la taille des objets et celle des pixels est petit) concourent à ce lissage de l'histogrammme de la scène.

Une deuxième variante peut se concevoir en inversant la relation objet/pixel: on peut considérer un pixel-sol comme une association d'objets et non l'inverse. La dimension des objets considérés n'est pas de première importance. Ils peuvent être de taille inféieure à celle du pixel-sol et concourir, par leur abondance réelle dans ce pixel-sol et par leurs propriétés spectrales propres, à la valeur de chaque pixel dans les diverses bandes spectrales. Ils peuvent être de taille supérieure et déterminer l'existence de pixels-sol mixtes tels ceux décrits plus haut. Dans un cas comme dans l'autre, les limitations physiques définies plus haut sont de règle.

3.1.2. Les images

Les variables TM originales et les images auxquelles elles donnent lieu recèlent déjà une quantité considérable d'information. Celle-ci est parfois peu visible du fait de la valeur (trop faible ou trop forte, c'est à dire donnant lieu à une image trop foncée ou trop claire voire saturée) ou du faible étalement de la dynamique des gris de l'image (manque de contraste). Des modifications de la valeur des pixels destinées à en faciliter l'examen peuvent être effectuées par transformation de l'échelle des gris originale en une nouvelle plus étalée ou transformée en une échelle de couleurs.

L'image TM1 (photo 1) montre, comme on pouvait s'y attendre, un voile atmosphérique important donnant lieu à un paysage très uniforme dont la dynamique ne s'étend, les zones nuageuses étant exclues, que sur une vingtaine de valeurs numériques TM et où seuls ressortent, par des valeurs élevées, quelques crêtes de collines (fig. 3a et tab. 1). Cet élément ressortira d'ailleurs sur toutes les images TM.

L'image TM2 n'est guère plus contrastée (dynamique d'environ vingt valeurs, voir fig. 3b et tab. 1). Quelques contrastes dus à la végétation peuvent cependant être distingués là où les plantations jouxtent des herbages ainsi qu'au long des rivières (photo 2).

L'image TM3 (photo 3) possède une dynamique plus large (35 valeurs, voir fig. 3c et tab. 1) et révèle la majeure partie des éléments du paysage. Un certain nombre de zones à haute valeur de TM, correspondant donc à des pixels-sols très rouges (ou très blancs si des valeurs élevées existent pour le même pixel dans les autres bandes du visible) permettent d'identifier des sols faiblement couverts voire nus, notamment sur le plateau de Musongati.

L'image TM4 (photo 4) montre une dynamique de près de 70 valeurs (fig. 3d, tab. 1). Elle permet de distinguer les paysages végétaux : basses valeurs de TM4 pour les zones herbeuses, hautes valeurs pour

les plantations et zones à haute activité chlorophyllienne. Les variations dans la lithologie apparaissent indirectement par leur effet sur le couvert végétal. Ainsi, le plateau latéritique de Musongati et les schistes de la Formation de Nyamabuye sont mis en évidence par la pauvreté de leur couvert végétal. A l'opposé, les zones à sous-sol gabbroïque (ainsi que la partie occidentale du massif de Musongati) apparaissent grâce aux plantations établies sur des sols apparamment plus favorables pour la culture.

L'image TM5 (photo 5) possède une dynamique de plus de 170 valeurs (fig. 3e, tab. 1). contrastes végétaux y sont toujours sensibles (quoique inversés par rapport à TM4), mais l'image est dominée par des effets de relief donnant lieu à des jeux d'ombres sur les flancs de colline. La texture qui en résulte fait ressortir le plateau latéritique, relativement homogène, par rapport aux séries sédimentaires dans lesquelles l'érosion à créé des ravines d'importance variable selon la nature de la roche. Par ailleurs, l'abondance des ombres projetées par les végétaux dressés font ressortir les pixels-sols à couverture végétale arborescente importante par des valeurs basses de TM5. Par rapport à TM4, TM5 permet donc de discriminer la végétation arborescente de la végétation herbacée.

L'image TM7 (photo 6) montre une dynamique plus faible: 90 valeurs (fig. 3f, tab. 1) et un contenu thématique proche de TM5. Les plages constituées de sols nus y apparaissent particulièrement bien avec une tonalité claire.

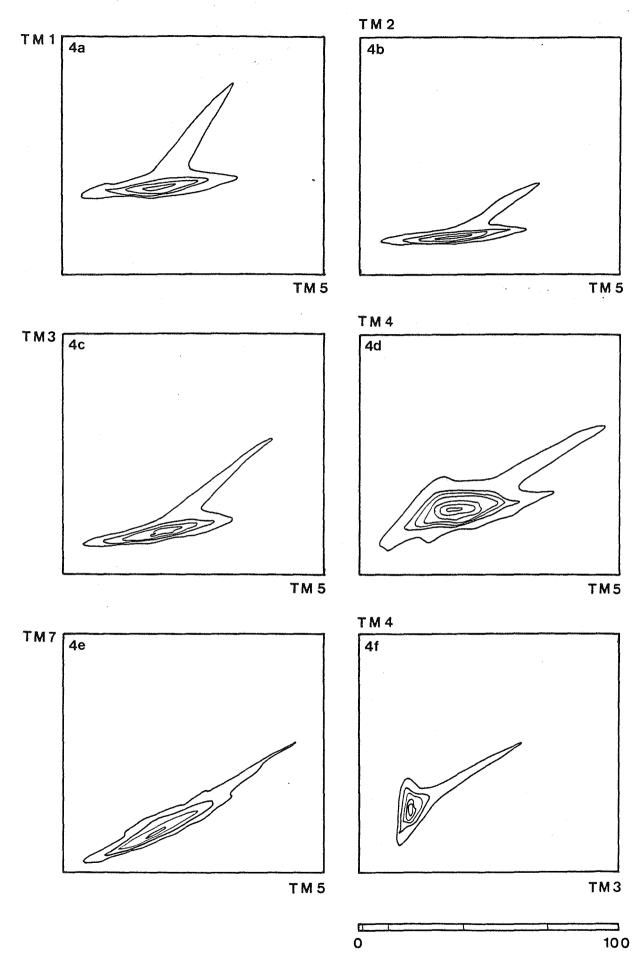
D'une manière générale relativement peu d'objets sont définissables à la fois du point de vue thématique et du point de vue spectral. Les zones cultivées ne peuvent pas être considérées comme homogènes (la variation de DN ³ entre pixels voisins le prouve), et les pixels-sol dépourvus de végétation sont rares ou inexistants.

Les zones ombragées peuvent cependant, dans une certaine mesure (car les ombres sur les pixels-sol végétaux, aqueux ou minéraux ne sont certainement pas identiques), être assimilées (à quelques DN près) à des zones spectralement homogènes. Comme telles, elles représentent donc les seuls objets thématiques caractérisables dans la sous-scène étudiée, avec les valeurs suivantes de DN, choisies sur des flancs de colline non éclairés ou sur les taches d'ombre portée sur les nuages :

TM1(ombre) = 85 TM2(ombre) = 32 TM3(ombre) = 36 TM4(ombre) = 33 TM5(ombre) = 20 TM7(ombre) = 8

Ces valeurs sont nettement plus élevées que les DN minimum relevés sur l'image (tab. 1). Les autres objets thématiques devront être identifiés au moyen d'autres critères.

³ Digital Number



Figures 4a-f: Bi-histogramme de TMx versus TM5 et TM4 vs. TM3. Les pixels-sol réels n'occupent que la région des hautes fréquences du diagramme, le reste correspond aux zones affectées par les nuages (très étendues, mais de très faible fréquence).

Canal	TM1	TM	TM2		1 3	TM4	TM5	TM7			
Longueur d'onde	450/520	520/6	520/600		690	760/900	1550/1750	2080/2350 μm			
Valeurs des TMx (DN)											
Moyenne Ecart-type Minimum Maxiumum	91.88 9.86 77 255	37.24 5.07 29 144	:	45.57 7.66 29 185		63.76 8.97 24 156	93.00 10.01 12 244	39.50 10.57 4 145			
Matrice des v	ariances-cov	ariances			-						
TM1 TM2 TM3 TM4 TM5 TM7	97.14	47.62 25.73	:	65.62 35.75 58.66		41.48 25.17 27.20 80.44	90.76 57.52 109.53 63.00 361.36	55.08 33.78 65.88 23.96 189.38 111.72			
Matrice des corrélations											
TM1 TM2 TM3 TM4 TM5 TM7	1.000	0.952 1.000		0.869 0.920 1.000		0.469 0.553 0.396 1.000	0.484 0.596 0.752 0.369 1.000	0.529 0.630 0.813 0.253 0.942 1.000			
Régressions (l	ligne sur colo	onne) : coeffi	cients	angulai	res.		I 	· !			
TM1 TM2 TM3 TM4 TM5 TM7	1.000 1.851 1.119 0.516 0.251 0.493	0.490 1.000 0.609 0.313 0.159 0.302		0.676 1.389 1.000 0.338 0.303 0.590		0.427 0.987 0.464 1.000 0.174 0.214	0.934 2.236 1.867 0.783 1.000 1.6951	0.567 1.313 1.123 0.298 0.524 1.000			
Régressions (l			ots à l				1				
TM1 TM2 TM3 TM4 TM5 TM7	0.000 22.940 40.890 59.000 68.523 72.407	-7.796 0.000 9.470 17.298 22.443 25.203		-16.49 -6.17: 0.000 24.01 17.38 22.28	5) 4 8	24.520 27.323 42.621 0.000 47.545 55.287	7.154 9.729 7.894 43.066 0.000 26.034	-12.589 -9.394 -11.688 20.513 -9.236 0.000			
ACP : Poids	des vecteurs	propres (sur	base c	les cova	riances)	- 7ème col. : p	ourcentage de c	contribution.			
PC4 PC5 PC6	0.274 0.650 -0.394 0.332 -0.434 -0.220	0.162 0.296 -0.125 -0.017 0.183 0.915	0.25 ·0.25 ·0.25 ·0.25 ·0.7 ·0.35	52 92 93 58 29	0.171 0.491 0.823 -0.213 -0.027 -0.076	0.447 0.087 0.003	0.425 -0.190 -0.179 -0.745 -0.441 0.037	76.4 14.4 7.6 1.0 0.4 0.1			
Poids des para	amètres Tass	seled Cap uti	lisés -	7ème c	ol. : terr	ne additif.					
TC1 TC2 TC3 TC4 TC5 TC6	0.291 -0.273 0.145 0.846 0.055 0.119	0.249 -0.217 0.176 -0.073 -0.023 -0.807	0.44 -0.5 0.3: -0.4 0.0: 0.4	51 32 64 34	0.557 0.722 0.340 -0.003 -0.194 0.057	0.073 -0.621 -0.049 0.416	0.171 -0.165 -0.419 0.012 -0.782 -0.022	10.369 -0.731 -3.383 0.788 -2.475 -0.034			
"DN" des composants des TCx.											
TC1 TC2 TC3 TC4	26.7 -25.1 13.3 77.7	9.3 -8.1 6.5 -2.7	:	21.9 -25.1 15.3 -21.1		35.5 46.0 21.7 -0.2	41.3 6.8 -57.8 -4.5	7.7 -6.5 -16.5 0.5			

Tableau 1 : Caractéristiques statistiques globales de la sous-scène LANDSAT TM de Musongati.

3.2.1. Analyse statistique

Les données TM peuvent être prise deux à deux (dans deux bandes spectrales) et projetées sur le plan défini par les variables ainsi considérées dans l'espace TM (diagrammes bi-variables). Elles définissent des nuages plus ou moins allongés en fonction du degré de corrélation existant entre les variables considérées (figs. 4a-4h) (ce coefficient de corrélation est maximal entre TM1 et TM2 et minimal entre TM4 et TM7, comme le montre la matrice des corrélations, cf. tabl. 1).

Lorsque toute la scène est considérée, les diagrammes bi-variables montrent un certain nombre de caractéristiques communes.

1° Le caractère allongé des nuages de points (représentés par leur enveloppe externe dans les figures de la série 5) résulte en grande partie de la faible dispersion des valeurs TM dans certains canaux par rapport à d'autres (un effet atmosphérique parmi d'autres). Le haut degré de corrélation n'est dès lors pas significatif puisque le coefficient angulaire (résultant du calcul de la régression de TMx sur TMy) est proche de zéro (tabl. 1).

2° La forme du nuage n'est pas caractéristique en elle-même car elle résulte de la projection de l'ensemble multivariable sur deux de ces variables selon une perspective arbitraire. En particulier, des points extrêmes ou excentriques apparaissant sur les figures de la série 5 ne correspondent pas nécessairement à des objets purs ou remarquables du point de vue spectral.

3° Les nuages de points sont délimités par des droites ou par des lignes brisées à deux segments. Parmi ces droites-limites, celles qui délimitent l'espace TM3 (le canal du rouge) vs. TM4 (le canal de l'infrarouge le plus proche) contient ce qui a été appelé "la droite des sols" (fig. 5f). Cette droite possède un coefficient angulaire proche de 1 et passe près de zéro (tab. 1). Des données expérimentales obtenues au sol (voir notamment Lavreau, 1988) ont en effet montré que cette droite comprend surtout les objets minéraux ; elle s'étend des sols minéraux humides (faibles valeurs de TM3) à des sols (et roches) secs et brillants (valeurs élevées de TM3). Au-dessus de cette droite on trouve les pixels-sol constitués par un mélange d'objets végétaux et d'objets minéraux, le point montrant une valeur maximale en TM4 étant considéré comme le plus "purement végétal". On doit toutefois se rappeler que cette droite des sols constitue en fait la projection sur le plan TM3/TM4 d'un "hyperplan des sols" (voir plus loin). Des droites de sols analogues existent entre TM4 d'une part et TM5 ou TM7 de l'autre.

Les bi-histogrammes (ou diagrammes de fréquence à deux dimensions ou encore scatterogrammes) définis par les variables TM1-TM7 correspondent aux matrices de co-occurence de ces variables prises deux à deux (fig. 4). Ils sont semblables, quant à la forme extérieure, aux graphiques de la série 5,

dont les points correspondent d'ailleurs à un niveau déterminé de co-occurence (5 points présents).

Les bi-histogrammes de la région de Musongati n'occupent qu'une petite portion de l'espace TM disponible (nous avons vu que l'espace TM est restreint à des valeurs entières comprises entre 0 et 255), conséquence de la faible dispersion des valeurs déjà notée. Lorsque tous les pixels-sol sont envisagés, ils montrent une forme complexe dans laquelle les hautes fréquences n'occupent qu'un espace restreint (fig. 4). Cette forme particulière résulte en partie de la présence de nuages donnant lieu à des valeurs de TM élevées. Lorsque l'on exclut ces pixels-sol (voir plus loin pour le procédé utilisé), il se dessine un ensemble centré d'allure unimodale pour les fréquences élevées, tandis que les basses fréquences dessinent une surface triangulaire (fig. 4). Dans le cas de TM3 vs. TM4, la comparaison avec l'image permet d'affirmer que les apex de ce triangle sont déterminés respectivemet par des pixels-sol occupés en majorité par la végétation saine (plantations), par des surfaces humides (agrosols encore nus) et par des sols minéraux (lithosols) brillants et secs (sommets de colline soumis à une érosion intense).

3.2.2. Les images

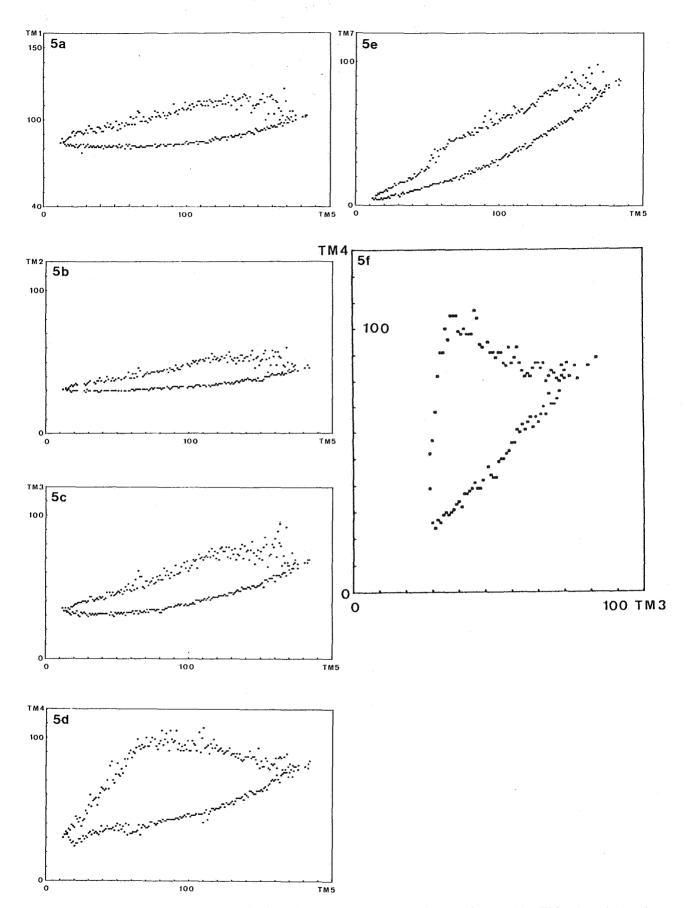
Deux images peuvent être combinées par une opération arithmétique ou algébrique (application de fonction) portant sur leur contenu numérique considéré point par point (pixel par pixel). telles opérations vont donner lieu à de nouvelles images (néocanaux) basées sur de nouvelles variables (néovariables). Ces dernières ne vont pas correspondre de manière univoque à des pixels-sols déterminés car il existe une infinité de combinaison de variables qui peuvent aboutir à une valeur déterminée d'une néovariable. Les différences entre deux images vont cependant pouvoir être soulignées par ces procédés. Si on veut conserver intacte (ou presque car une compression de la dynamique de l'image est nécessaire afin que la somme des apports des images reste dans la limite de 8 bits imposée par la carte graphique de l'ordinateur) l'information contenue dans chaque canal, on procède à une superposition ou composition colorée dans laquelle la première variable sera représentée par (au maximum) 16 nuances de rouge (par exemple) et la seconde par 16 nuances de vert (par exemple), la combinaison des deux donnant lieu à $16 \times 16 = 256 \text{ couleurs}.$

La photo couleurs 1 a été obtenue suivant cette méthode au départ de néovariable TC1 à TC3 (combinaisons linéaires de TM, voir plus loin).

3.3. N = 3

3.3.1. Analyse statistique

Le domaine à trois dimensions défini par trois variables TM peut être analysé à l'aide d'une matrice de co-occurence à trois entrées ou selon une perspective graphique créée par sélection d'un niveau de fréquence déterminé de cette matrice.



Figures 5a-f: Section TMx/TM5 et TM4/TM3 dans l'hyper-volume défini par les variables TMx. Les pixels-sol nuageux ont été masqués. Ces sections correspondent aux zones de fréquence > ou = à 5 de la matrice de co-occurence situées à l'extérieur de l'hyper-volume TMx.

Les combinaisons de TM3, TM4, TM5 et TM7 sont probablement les plus intéressants de ce point de vue du fait de leur large dynamique et de leur contenu géologique potentiel. La perspective résultant de la combinaison de TM3, TM4 et TM5 donne lieu à un solide aux contours complexes. Or, on sait que les valeurs de TM4 et de TM3 sont particulièrement influencées l'une par la végétation, l'autre par les sols (rouges), tandis que TM5 est relativement neutre par rapport à ces objets. En outre, les combinaisons de TM4 avec TM3, TM5 ou TM7 permettent de mettre en évidence des "lignes des sols" (voir plus haut) correspondant aux basses valeurs relatives de TM4. On va donc pouvoir observer l'allure d'une "surface de sols" en combinant ces variables et en limitant la représentation graphique à la partie inférieure du solide, celle qui est susceptible de contenir les sols (voir plus haut) (fig. 6).

Cette approximation de la surface des sols dessine une forme de barque au fond assez plat, ce qui explique la formation d'une ligne des sols par projection de la surface sur les plans TM3/TM4 et TM5/TM4 de la figure 5. La barque n'en possède pas moins des flancs qui, dans cette projection, vont donner lieu à des points dans le champ sol/végétaux de cette figure. Il n'est évidemment pas exclu a priori que ce soit également le cas dans la réalité, mais, comme nous le verrons plus loin, cette situation provient en fait du petit nombre de points correspondant à des pixels-sol réellement ou essentiellement minéraux.

3.3.2. Les images

La composition colorée de trois canaux implique une compression sévère de la dynamique des images puisqu'elles devront être codées sur une combinaison de 3, 3 et 2 bits (soit, respectivement, 8 alors que les données TM en possèdent 3 à 20 fois plus -, 8 et 4 valeurs) à répartir sur les trois couleurs (une combinaison 4/2/2 bits est également possible mais encore plus sévère du point de vue de la compression des données). Ces superpositions ou compositions colorées fournissent toutefois des documents très riches en informations qui pourront servir tels quels à l'interprétation géologique. La superposition de TM4 (3 bits dans le vert), TM7 (2 bits dans le bleu) et de TM3 (3 bits dans le rouge) (photo coul. 2) nous semble particulièrement favorable pour une telle interprétation.

3.4. N > 3

3.4.1. L'analyse des composantes principales

Effectuée au départ de la matrice des variancescovariances et non à partir de la matrice de corrélation afin d'exploiter au maximum la dynamique des valeurs de TM (tab. 1), l'analyse des composantes principales (ACP) va nous permettre : 1°, par la création de nouveaux axes de projection, d'examiner dans une perspective favorable les données relatives à chaque pixel et de réaliser des projections bi-variables plus significatives,

2°, suite au classement de la "variance expliquée" que permet cette analyse, de réduire le nombre de variables aux plus significatives et dès lors d'examiner le problème sous une perspective de moins de 6 variables. Ainsi, dans la région de Musongati, les deux premières composantes expliquent 90,79 % de la variance observée et les trois premières 98,44.

3° De connaître la contribution (poids) de chaque variable TM dans l'explication de la variance observée et, éventuellement, d'estimer la signature spectrale dès lors la nature de chaque composant.

3.4.1.1. Analyse des images

La première composante principale (CP1) explique 76,41 % de la variance observée. Déterminée par des poids de même signe et de même ordre de grandeur des variables originelles (tab. 1), CP1 peut être rapprochée d'une mesure non spectrale de la radiance (albedo) de chaque pixel-sol. Dans le paysage de Musongati, les variations de radiance proviennent d'une part du relief (flancs de vallée opposés au soleil ou à l'ombre) et d'autre part du contraste entre les zones de savane herbeuse (déjà largement jaunies lors de la prise d'image) et les zones à végétation encore luxuriante (arbres, plantations dnas les vallées humides) (photo 7).

La deuxième composante principale (CP2) explique 14.4 % de la variance observée. Elle est fortement marquée par les poids positifs de TM1 et des autres canaux du visible et de l'infrarouge le plus proche (TM2-TM4), en opposition aux poids négatifs montrés par TM5 et TM7 (tab. 1). L'association de la réflectance dans le visible et dans l'infrarouge le plus proche d'une part et l'opposition de ces variables par rapport à celles de l'infrarouge le plus lointain est caractéristique des objets végétaux par rapport aux objets minéraux (fig. 1a). La nette opposition entre TM4 et TM7 accentue le contraste végétation/sols (voir plus haut). CP2 peut donc être assimilée à un indice de végétation basé sur le rapport TM4/TM7. L'image correspondante (photo 8) permet la distinction entre les divers types de végétation et stades phénologiques. On remarque en outre que cette image est largement débarassée des effets de relief dont on a vu qu'ils étaient accentués dans CP1 (photo 7).

La troisième composante (CP3) explique 7,6 % de la variance globale. Les poids de TM1, TM2, TM3 et TM7 y sont opposés à ceux de TM4 et TM5 (tab. 1). En particulier TM4 y est opposé à TM3; on aurait donc affaire à un deuxième indice de végétation totalement décorrélé avec le précédent (résultat de l'ACP), basé cette fois sur le rapport TM4/TM3 (voir plus haut). La comparaison entre CP2 et CP3 (par exemple au moyen de l'image basée sur le rapport CP3/CP2, photo 11) montre que les différences les plus marquantes portent sur l'individualisation de certaines plages (fréquemment limitées par des ruisseaux ou des pistes) dans les zones de savane herbeuse. Il semble bien, au vu des photographies aériennes de la région, qu'il

s'agisse de plages où des feux de brousse se sont développés au cours d'une saison sèche précédente. L'image de CP3 (photo 9) est dès lors semblable à celle de CP2 (photo 8) sauf pour les zones nuageuses qui sont exprimées en blanc et non en noir.

La quatrième composante (CP4), qui n'explique plus que 1 % de la vairance, montre TM1 et TM5 opposés à toutes les autres variables et en particulier à TM7, le poids de TM2 étant en tout état de cause faible. Cette répartition des poids ne se retrouve pas directement, comme c'était le cas pour les autres composantes, dans les courbes de réflectances de référence (fig. 1). L'image (photo 10) est totalement dépourvue d'effet de relief, les nuages y sont presqu'invisibles tandis que les différences de couvert végétal (plantations, savane, etc.) sont fort atténuées. Par contre, les pistes de terre rouge y apparaissent de manière frappante, de même que certaines crêtes dénudées. CP4 constitue donc apparemment un détecteur des sols nus et,

simultanément, un effaceur des contrastes entre types végétaux.

Les cinquième et sixième composantes ne recèlent plus qu'une quantité infime d'information (respectivement 0,0003 et 0,00009 % de la variance globale). Les images correspondantes montrent un bruit important avec accentuation du lignage présent dans certains canaux TM originaux à faible dynamique.

En réalité la plus grande partie de la variance observée dans les images est due à la présence de nuages et de l'ombre de ceux-ci (fig. 4). Il s'en suit que le calcul des vecteurs propres est largement déterminé par ces objets parasitaires qui se situent en dehors de l'hypervolume déterminé par les pixels-sol. Une transformation qui tiendrait a priori compte de cet état de choses est donc à préférer. C'est en principe le cas pour la transformation Tasseled Cap décrite ci-après.

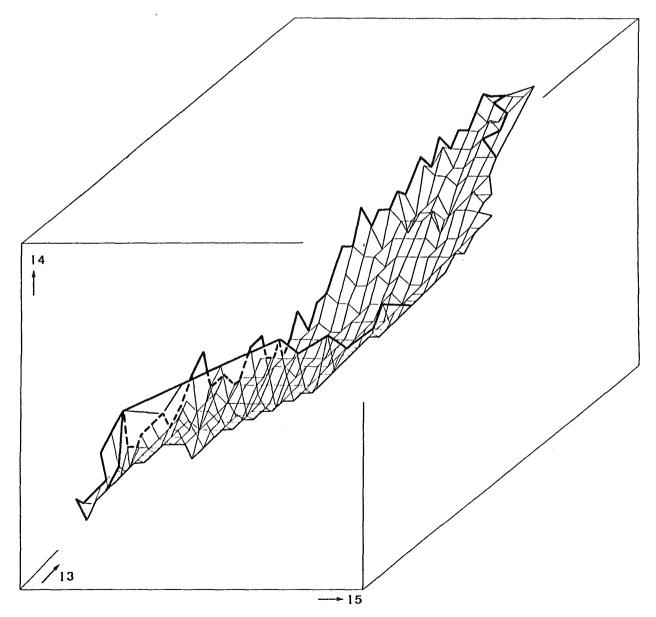
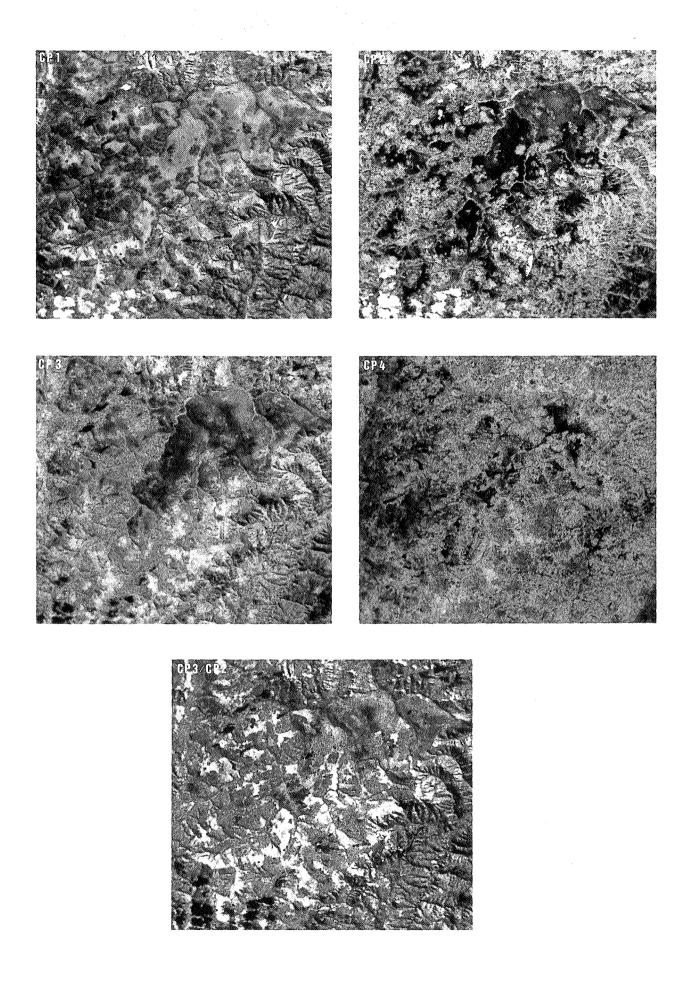
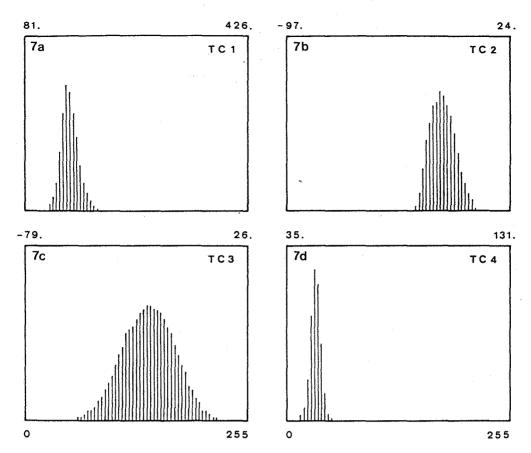


Figure 6 : Perspective I5/I4/I3 destinée à illustrer la "surface des sols". Les variables I correspondent aux variables TM5, TM4 et TM3 comprimées sur 5 bits. Seule la partie inférieure du volume a été représentée (c'est à dire les valeurs minimales de I4 rencontrées pour chaque couple I4/I3).



Photos 7-10: Images de CP1 à CP4 (étalement de la dynamique entre les valeurs extrêmes de CP). Photo 11: Image de CP3/CP2.



Figures 7a-7c: Histogrammes de TC1-TC4. Les néovariables TC1, TC2 et TC4 discriminent les zones nuageuses, ce que ne fait pas TC3: le plan des sols défini par TC1/TC3 doit donc être "filtré" par TC4 pour être significatif. Les valeurs extrêmes des néovariables TC (échelle supérieure en nombres décimaux) ont été recodées linéairement entre 0 et 255 (échelle inférieure).

3.4.2. La transformation Tasseled Cap

La transformation Tasseled Cap (TTC ou bonnet à pompon, allusion à l'aspect des bi-histogrammes) consiste, comme l'ACP sur lesquelles elle est d'ailleurs en partie basée, en une combinaison linéaire des canaux TM. Elle a été établie au départ de données satellitaires complétées par des données acquises au sol sur lesquelles on a effectué une ACP suivie d'un basculement des axes principaux (Crist, Laurin et Cicone, 1986). Cette dernière opération avait pour but de conférer aux néovariables une signification thématique aussi univoque que possible. Ainsi la néovariable n° 1 (TC1 ou BRIghtness) correspond à la brillance des pixels-sol, la néovariable n° 2 (TC2 ou GREenness) à leur "verdeur végétale", n° 3 (TC3 ou WETness) à leur teneur en eau et n° 4 (TC4 ou HAZe) à l'épaisseur du voile atmosphérique ("brume") qui les recouvre. La projection des pixels-sol sur ces axes permet donc de les classer selon ces quatre thèmes. Les néovariables TC ne sont pas liées, comme c'était le cas pour les CP, à la structure multivariable de la scène considérée (en particulier aux conditions atmosphériques), les poids des variables TM utilisées dans la transformation y étant prédéterminés (tab. 1). La TTC possède donc un caractère "universel" qui fait son intérêt.

Les diagrammes bi-variables TC permettent de définir des plans thématiques sur lesquels ces variables peuvent être projetées. TC2 et TC3 constituent

ainsi le plan de la végétation et TC3 et TC1 celui des sols (fig. 7).

Nous utiliserons notamment la TTC comme filtre des données TM puisque l'on peut sélectionner pour chacune de ces variables des pixels-sol caractérisés par certaines valeurs limites (seuils) de TC.

3.4.2.1. Analyse des images

TC1 est fort semblable à CP1 pour ce qui est de la valeur relative des poids donnés aux variables TM (tab. 1). Il en est de même de l'image correspondante (TC1) qui est rehaussée pour les effets d'éclairement et dès lors pour le relief tandis que les contrastes végétaux sont atténués (photo 12). Le relief est largement effacé dans TC2 tandis que la végétation pauvre recouvrant le plateau de Musongati apparaît nettement contrastée par rapport aux parcelles plantées et aux fonds de vallées (photo 13). Dans l'ensemble, TC2 et CP3 (photo 9) sont assez semblables; elles sont d'ailleurs largement corrélées. TC3 donne lieu à une image où le relief apparaît à nouveau et où la végétation est soulignée par son humidité relative : sèche sur les plateaux herbeux, humide dans les vallées et flancs de colline ombragés (photo 14). TC4, enfin, montre une image bimodale où les pixels-sol nuageux ou brumeux sont nettement discriminées par rapport aux zones indemnes de voile atmosphériques (photo 15). La transformation TC a donc répondu à notre attente.

Il faut noter que, par rapport à une scène provenant d'une région tempérée, la scène de Musongati n'occupe qu'une très petite portion de l'espace TC. Les variations de brillance, verdeur et humidité s'y produisent donc dans des limites plus étroites que dans les régions tempérées.

Les histogrammes de TC1, TC2 et TC4 sont nettement bimodaux, tandis que TC3 semble unimodal (fig. 7). En fait, les deux populations apparemment présentes correspondnet, comme nous l'avons vu avec l'image TC4, d'une part aux zones couvertes de nuages, et d'autre part aux pixels-sol sensu stricto. L'histogramme de TC4 va nous permettre de déterminer le seuil séparant les pixels de nuages par rapport à ceux du sol et de débarasser ainsi les autres néovariables des effets des nuages. La figure 7d nous montre qu'un tel seuil peut se placer vers TC4 = 58. Les bihistogrammes de la figure 7 montrent les effets de ce filtrage.

Le paramètre TC2 = GRE, mesure de l'abondance de la végétation dans le pixel-sol, devrait permettre de déterminer la position des pixels-sol minéraux qui sont en principe caractérisés par une valeur faible de ce paramètre. Nous allons donc examiner quelles sont les valeurs de TMx qui donnent lieu à une valeur déterminée de TC2. Les figures de la série 10 montrent les valeurs extrêmes de TMx rencontrées, ainsi que la dispersion de la moyenne entre + 1 σ et -1 σ . TC2/TM5 montre ainsi une allure de cloche avec long appendice (fig. 9).

Après filtrage des pixels-sol montrant une valeur de TC4 plus élevée que 58 (fig. 7d), le diagramme GRE/TM5 se trouve amputé des valeurs de GRE

inférieures à -36 et des valeurs de TM5 supérieures à 190, sans que la valeur et la répartition des autres pixels-sol s'en trouve affectée (fig. 10e). Le filtre de TC4 au seuil de 58 agit donc bien uniquement sur les pixels-sol "brumeux".

La figure 9 montre qu'une très large gamme de valeurs de TM5 pour un niveau de GRE déterminé. Cette large gamme doit correspondre, au moins en partie, à des variations de TC3 (= WET). En effet, en représentant de manière distincte les pixels-sol possédant une valeur de WET plus petite ou plus grande que zéro (valeur arbitraire puisque l'histogramme de WET est centré et symétrique), deux groupements de pixels-sols se dessinent (figs. 10a-10e). Il s'agit de deux populations distinctes car il n'y a pas de recouvrement des populations à 1 o de la moyenne. Il existe donc des pixels-sol "secs" par rapport à des pixels-sol "humides" pour un niveau "végétal" (c'est à dire GRE) déterminé.

4. RECHERCHE DE LA VEGETATION PURE

Bien que ce soient les objets minéraux qui nous intéressent au premier chef, l'importance volumétrique du composant végétal dans le pixelsol nécessite une connaissance précise de ces caractéristiques spectrales, ne serait ce que pour mieux connaître les autres composants par différence. Or, même dans le cas d'un recouvrement végétal total (pixel-sol purement végétal), un pixel-sol n'en contient pas moins une importante surface (plusieurs dizaines de %) occupée par de l'ombre. On doit donc concevoir un procédé qui permettrait de

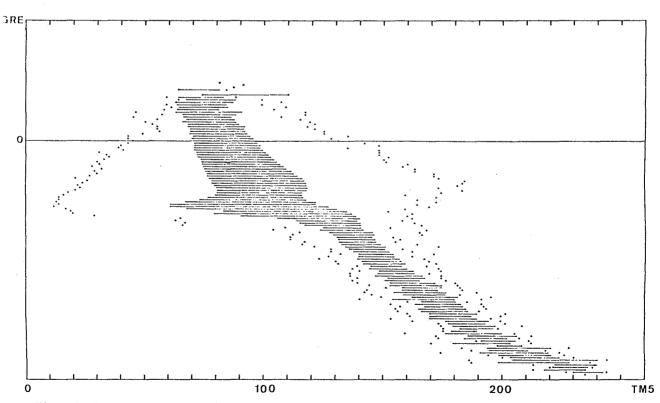
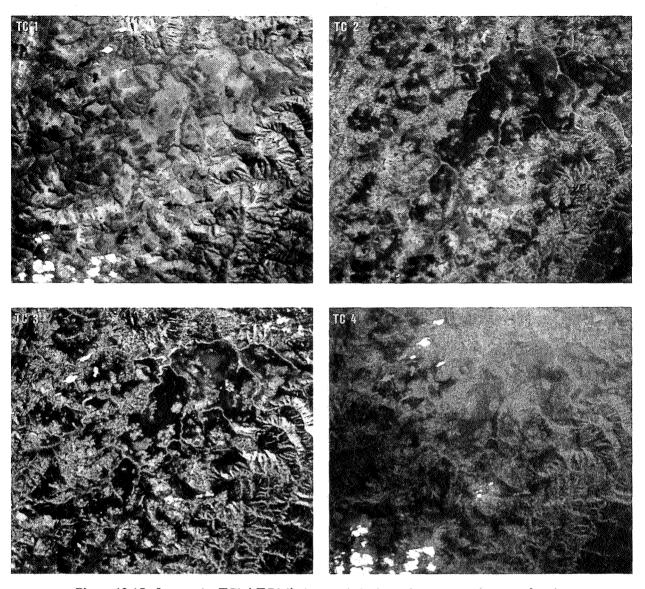
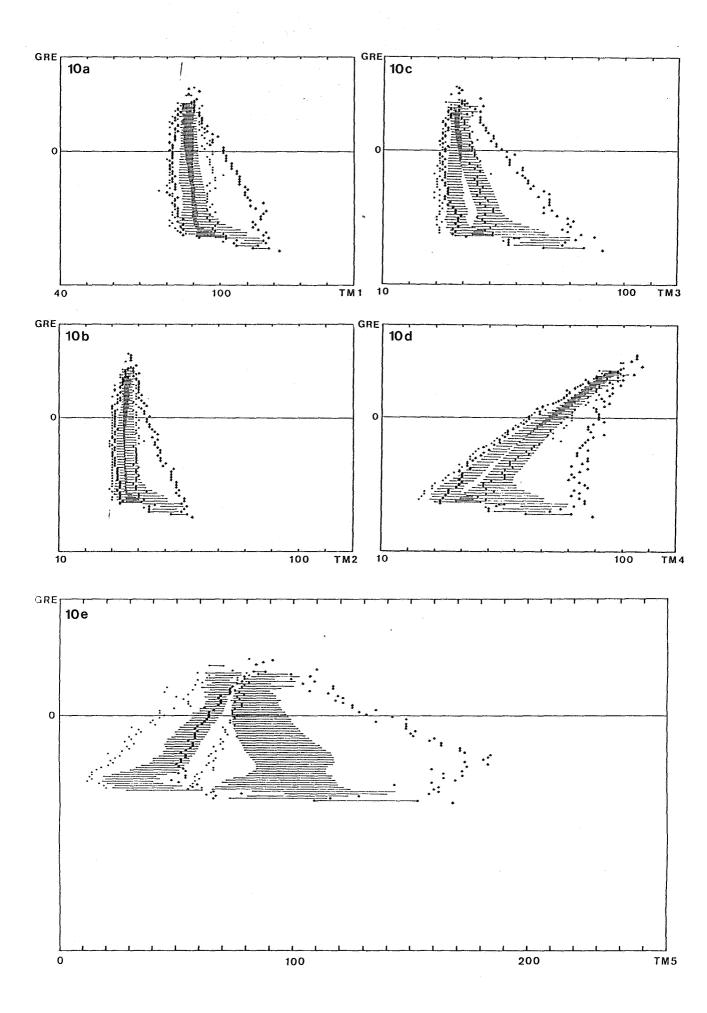
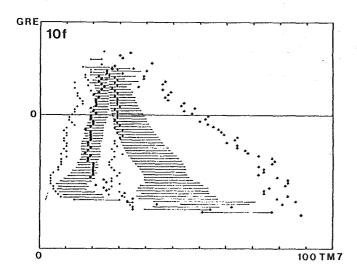


Figure 9 : Diagramme GRE/TM5 non filtré. Analyse de la signification de la néovariable GRE en fonction de TM5. Dans ce diagramme et les suivants les valeurs de TMx définissant un niveau de GRE déterminé sont figurées par leurs extrêmes (points/croix et par l'étalement de la gamme entre -1σ et $+1 \sigma$).



Photos 12-15: Images des TCl à TC4 (étalement de la dynamique entre valeurs extrêmes).





Figures 10a-10e: Diagrammes GRE/TMx filtré pour TC4 > 58 et pour les pixels-sol dont TC3 > ou < que 0. Des sous-populations définies par TC3 apparaissent pour un niveau de GRE déterminé. La convergence des valeurs extrêmes permet de se faire une idée de la valeur TMx définissant un niveau de GRE plus élevé (30-35?) que le maximum rencontré dans l'image (soit 24,5) et de définir ainsi les propriétés spectrales d'un pixel-sol dépourvu à la fois d'ombre et de sol minéral.

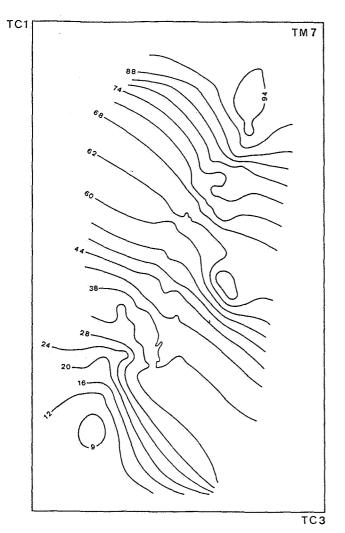


Figure 11: Carte des isovaleurs de TM7 dans le plan des sols, estimées au départ des DM de pixels-sol de TCM2 = GRE faible (< -30).

maximaliser l'apport végétal par rapport à celui de l'ombre, alors que l'on ne connaît pas avec exactitude (voir plus haut) la composition spectrale de celle-ci. Le paramètre GRE va nous permettre de résoudre ce problème en considérant la tendance de ce paramètre en rapport avec les variables TMx.

La figure 10 permet de définir ces tendances en considérant, par exemple, la courbe déterminée par les pixels-sol extrêmes à chaque niveau de GRE. Ces valeurs extrêmes convergent vers un niveau de GRE d'environ 30 (la valeur maximale rencontrée dans l'image est 24,5). Ce niveau peut être considéré comme le meilleur estimateur de la végétation indemne d'ombre ou d'effet de sol. La même figure permet d'obtenir les valeurs TMx recherchées pour cette valeur élevée de GRE.

Il apparaît ainsi que des pixels-sol purement végétaux auraient des valeurs suivantes de DN:

TM1(TC2 = 30) = 85 TM2(TC2 = 30) = 35 TM3(TC2 = 30) = 37 TM4(TC2 = 30) = 110 TM5(TC2 = 30) = 77 TM7(TC2 = 30) = 22

3.5. RECHERCHE DU PLAN DES SOLS

Le plan déterminé par TC1 et TC3 a été appelé "plan des sols (Crist, Laurin et Cicone, op.cit.). Lorsque tous les pixels-sol de l'image sont considérés, il représente en fait la projection sur ce plan de l'ensemble de ces points, ce qui nous est relativement peu utile. Comme TC2 constitue en principe une mesure de la distance des pixels-sol au plan des sols, les points caractérisés par une valeur faible de TC2 (préalablement filtrés par TC4 pour ne pas créer de confusion avec les pixels-sol nuageux que TC3, comme nous l'avons vu plus haut, ne discrimine pas) seront les plus proches du plan qui nous intéresse. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour le définir:

- à l'aide de pixels-sol minéraux (ou supposés tels) réels, en recherchant l'équation de la meilleure surface (de degré non prédéterminé voire le plan) qui les contient, ou

- à l'aide des équations des axes TC1 et TC3 et d'un déplacement (translation) du plan que ces axes déterminent en fonction de TC2 pour une valeur fixée à TC4-6.

Nous serons alors à même de déterminer les valeurs TMx des points contenus dans ce plan, donc de caractériser des pixels-sols en principe purement minéraux.

La figure 11, obtenue selon la première procédure, montre que les pixels-sol les plus "minéraux" restent très groupés et déterminent en fait un "axe des sols" plutôt qu'un plan, ce à quoi nous pouvions d'ailleurs nous attendre suite aux essais décrits plus haut (notamment la dimension du fond de la barque de la figure 6). Les lignes d'isovaleur TM montrent un aspect tourmenté à proximité des

points expérimentaux (du en grande partie au programme de calcul des isovaleurs utilisé) mais, audelà, leur aspect général devient plus régulier. Le réseau qu'elles déterminent suggère, par leur parallélisme, qu'il s'agit bien d'un plan.

Pour définir le plan qui nous intéresse par la seconde méthode, il convient d'adopter des valeurs fixées pour TC2, TC4, TC5 et TC6. Pour TC2, nous avons choisi une valeur relativement faible mais pas trop éloignée de celle montrée par des pixels-sol réels, soit -40. Pour TC4, nous avons pris le centre de l'histogramme des points non brumeux. Pour TC5 et TC6, nous avons également pris les valeurs centrales de leur histogramme respectif, c'est à dire zéro. La figure 12, obtenue selon cette seconde méthode, montre bien entendu une régularité parfaite puisque les paramètres TCx sont des combinaisons linéaires des TMx. La comparaison avec les précédentes montrent que, dans les limites de l'extrapolation, les plans se ressemblent et les valeurs de TM qu'ils permettent de définir sont proches.

Cette figure 12 est une abaque qui permet de retrouver, dans le plan des sols TC1/TC3 les valeurs

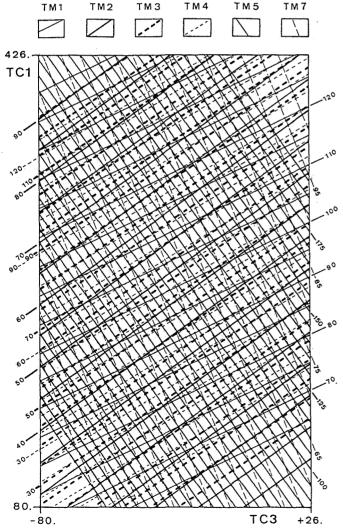


Figure 12: Abaque permettant de trouvers les DN des variables TM dans le plan des sols (TC1/TC3) défini pour des valeurs fixées de TC2 (-35), TC4 (50), TC5 (0) et TC6 (0).

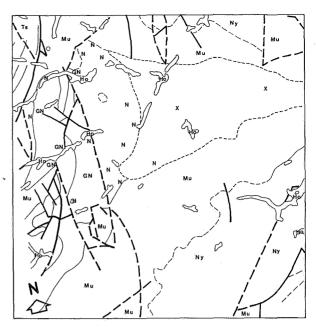


Figure 13: Esquisse géologique de la région de Musongati (d'après Waleffe, 1979). Légende: Ho: Holocène; Mu, Ny, Ts: sous-formations de Musongati, Nyamabuye et Tshene (Précambrien); GN, N, X: gabbro-norites, norites, Peridotites (Massif intrusif de Musongati).

TM de points quelconques. Les pixels-sol minéraux n'occupent dans ce plan qu'une zone restreinte correspondant grosso modo à la diagonale de l'abaque (comparer avec la figure 11). En dehors de cette zone axiale, chaque point du plan correspond à des pixels-sol purement minéraux de nature "synthétique" (c'est à dire dont les caractéristiques spectrales ne correspondent à aucun mineral) ou "réelle" (c'est à dire dont les caractéristiques spectrales correspondent à un composant du pixelsol mais qui ne s'expriment pas nécessairement comme telles étant donné leur mélange parmi les autres composants du pixel-sol).

6. CONCLUSIONS

Un "plan des sols" existe dans l'espace spectral TM. Ces caractéristiques géométriques peuvent être calculées au moyen des transforamtions de l'image. La transformation Tasseled Cap, de caractère théoriquement universel, peut être utilisée pour ce calcul. Les valeurs TM (DN) qu'on peut trouver dans ce "plan des sols" sont, entre autres usages, susceptibles d'être utilisées comme termes extrêmes dans les équations de mélanges.

REFERENCES

CRIST, E.P., LAURIN, R. & CICONE, R.C., 1986 - Vegetation and soil informtion contained in transformed thematic mapper data. Proceedings of IGARSS'86 Symposium, Zürich, 8-11 Sept. 1986, ESA pub. SP-254, 1465-1470.

LAVREAU, J., 1988 - Discrimination of natural objects in the Karema area, Tanzania, using a SPOT-calibrated radiometer. In: Image analysis, geological control and radiometric survey of Landsat TM data in Tanzania. The UNESCO/IUGS GARS Program in Africa (J. Lavreau et C. Bardinet, Eds.). Mus. roy. Afr. centr., Ann. série in 8°, Sc. géol., 96: 13-27.

WALEFFE, A., 1979 - Carte géologique du Burundi au 1/100000, feuille Mwishanga. *Minist. Indust. & Mines, Bujumbura.*

Manuscrit reçu le 15 septembre 1989 et accepté pour publication le 22 décembre 1989.

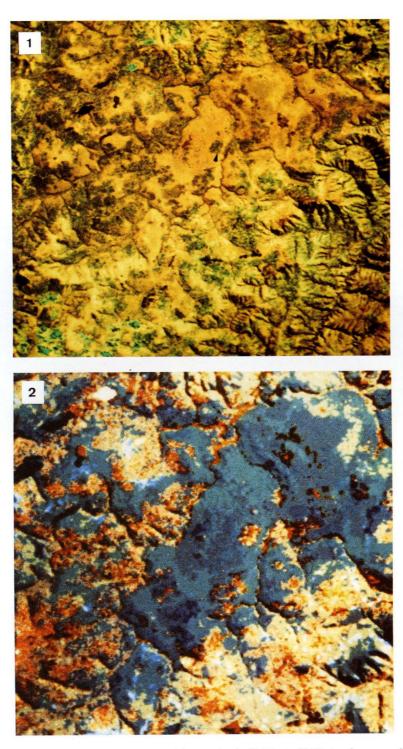


Photo couleur 1: Photographie d'écran: composition colorée TC1 + TC3 (codage sur 8 bits, soit deux fois 16 valeurs en rouge et vert).

Photo couleur 2: Photographie d'écran: composition colorée TM3 + TM5 + TM7 (codage sur 8 bits, soit 8 valeurs dans le rouge, 8 dans le vert et 4 dans le bleu).