Bulletin de la Société belge de Géologie Bulletin van de Belgische Vereniging voor Geologie	T. 97 V. 97	fasc. 2 deel 2	pp. 101-113 blz. 101-113	Bruxelles 1988 Brussel 1988

METHODES ET REALISATIONS EN CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE DES DONNEES SATELLITAIRES

par Cl. BARDINET (°)

ABSTRACT - The infography of the geographic environment by remote sensing relies on digital analysis of satellite data at various scales by image processing and classification adapted to the studied theme and to the resolution of the data in relation with the graphic expression of the results.
The methods used are fundamentaly interactive because the procedure is based on supervised analysis. The data considered are usually multitemporal and multispectral, what allows an optimal discrimination of the objects from their environment.
The digital image of landscapes displayed on screen or plotter are based on mutisatellite, multistemporal and multiscale data files. The best conditions for interpretation are found in multidisciplinary teams.
This multidisciplinar approach is an essential condition for obtaining a synthetic interpretation. One shall indeed keep in mind that a synthesis results from a comprise between the thematic objectives, the potentially of the data revealed while processing the image and the possibility to identify a geographic object in terms of pixel or cluster of pixels.

RESUME - L'infographie des milieux géographiques par la télédétection, est l'analyse numérique des données satellitaires à des échelles variées et par des méthodes de traitement d'images et de classification adaptées aux thèmes traités, à la résolution des données et à l'échelle choisie pour l'expression graphique des résultats.
Les méthodes pratiquées sont fondamentalement des méthodes interactives, car la démarche est basée sur l'analyse dirigée. Les données prises en compte sont généralement multidates et multibandes, ce qui permet de créér les meilleures conditions de séparation des objets géographiques par rapport à leur environnement.
L'image numérique des paysages est produite à l'écran ou sur traçeurs à partir de fichiers de données multisatellites, multidates, multiscalaires. Les meilleures conditions d'interprétation des images numériques sont réunies au sein d'équipes multidisciplinaires.
Cette multidisciplinarité est la condition pour aboutir à une interprétation de synthèse. On ne perd pas de vue que la synthèse est le résultat d'un compromis entre les objectifs thématiques, les potentialités des données qui se révèlent durant le processus de traitement d'images, et la possibilité d'identifier un objet géographique en terme de pixel ou de grappe de pixels.

KEY-WORDS - Remote Sensing, Codata, Gars, Fralit, Lanchad, Landsat, MSS, TM, Spot, Noaa, Tiros-N, Meteosat, Geomulti, Computer aided mapping, Carto-PC.

MOTS-CLES - Télédétection, Codata, Gars, Fralit, Lanchad, Landsat, MSS, TM, Spot, Noaa, Tiros-N, Météosat, Géomulti, Infographie, Carto-PC.

(°) Ecole Normale Supérieure, 45, rue d'Ulm, 75230 Paris Cedex 05-F.

INTRODUCTION

Dans les sciences de la Terre, les applications de la télédétection sont limitées par la relation objective entre pixel et objet géographique, cette relation dépendant de la taille du pixel, de la date et des conditions de l'enregistrement et des bandes spectrales utilisées.

L'image numérique d'un paysage devient une carte dès lors qu'elle a été rectifiée dans un système de projection (MTU, Lambert, etc...). La rectification des images numériques est réalisée interactivement par la sélection d'amers ou points d'appuis repérés sur l'image à l'écran (en terme de pixel de coordonnées connues dans le fichier image), et sur une carte par l'intermédiaire d'une table de numérisation (en terme de point de coordonnées géographiques connues). Le résultat des traitements est proposé à l'impression en quadrichromie, directement à partir de typons tramés produits sur traceurs à laser.

L'image numérique satellitaire peut être verticale ou oblique. Dans le cas d'un enregistrement oblique (SPOT), on parle de vision stéréoradiométrique et l'on peut produire un modèle numérique de terrain qui est à l'infographie ce qu'était le bloc diagramme à la cartographie classique.

A partir d'une image numérique, on élabore une carte infographique par les étapes suivantes : - (1) sélection thématique de l'information, - (2) classification dirigée, - (3) rectification d'échelle dans un système de projection, - (4) construction d'une légende. La légende une fois contrôlée sur le terrain, la carte infographique peut être intégrée dans la banque de données cartographiques, pour y être confrontée aux cartes établies par d'autres méthodes. L'archivage des données des bantothèques vient compléter celui des cartothèques et des bibliothèques.

La recherche des textures et des structures qui caractérisent les images numériques permet une classification des zones homogènes de géographie physique et une classification des linéaments. On peut ainsi cartographier les unités de paysages classées par leur texture et leur structure à partir de la reconnaissance statistique des formes.

La classification des unités de paysages naturels ou aménagés utilise les méthodes dirigées (BERNARD et BARDINET, 1987), par exemple Bayeseinnes, pour classer les pixels à partir des caractéristiques spectrales de polygones vérifiés sur le terrain.

1. METHODES ET MOYENS

1.1. PROBLEMATIQUE

On cherche essentiellement à CHANGER DE POINT DE VUE par rapport à l'objet géographique analysé, et cela pour révéler ses caractéristiques peu connues en utilisant :

- la répétivité des enregistrements satellitaires; on parle d'analyse diachronique ou multidate;

- la résolution au sol et la relation pixel-image / tache élémentaire au sol;

- la résolution multibande des capteurs; on parle d'information multibande moyenne détectée par pixel.

1.2. METHODES

Les méthodes sont basées sur le traitement de l'information géographique et satellitaire, par l'intermédiaire de systèmes d'information géographique. Elles permettent la restitution cartographique multiscalaire par l'INFOGRAPHIE ou cartographie assistée par ordinateur (CAO).

Ces méthodes d'analyse numérique de l'espace géographique utilisent les logiciels de traitement d'images pour ce qui est de la texture et de la structure, et les logiciels de classification dirigée pour la discrimination des unités thématiques (lithologiques, pédologiques, de végétation, d'utilisation des sols...). Les différentes phases de traitement sont réalisées par l'intermédiaire d'une série de logiciels :

- logiciels de traitement d'images pour la détection des CONTOURS et des LINEAMENTS;

- logiciels de BASE DE DONNEES géographiques, permettant d'intégrer la connaissance thématique du milieu, par utilisation de méthodes dirigées;

- logiciels de contraction de l'information multibande sous la forme de NEOCANAUX thématiques réalisés par combinaison linéaire, filtrage et lissage, à partir des bandes spectrales initiales;

- logiciels de CLASSIFICATION DIRIGEE;

- logiciels d'INFOGRAPHIE des résultats, soit :
  - . recopie numérique d'écran (couleur, N/B) sur fichiers;
  - . transfert numérique des images écrans sur imprimantes couleur ou N/B;
  - . transfert numérique par synthèse additive (RBV) ou soustractive (CJM) sur typons photographiques pour offset.

1.3. MOYENS

Les moyens utilisés sont généralement décrits comme systèmes de traitement d'images numériques, comprenant :

- des systèmes d'information géographique permettant l'élaboration d'une base de données géographiques en format compatible avec les données satellitaires; on parle dans notre cas du système GEOMULTI (CTAMN, Monget, 1986);

- des systèmes d'infographie permettant la recopie numérique d'écran sur films tramés prêts pour l'impression en offset (dans notre cas la TRIADE-VIZIRCOLOR SEP du CTAMN).

En recherche infographique, matériels et logiciels évoluent rapidement.

TRGEO et FRACARTE (FRALIT, 1977) sont des exemples de logiciels infographiques assurant un bon niveau d'interactivité. Le système GEOMULTI (1981-1986) du CTAMN (Monget, 1986) basé sur un mini-ordinateur et ses périphériques a évolué vers le système CARTO-PC (CTAMN 1986) basé sur un micro-ordinateur et ses périphériques.

De même, les matériels de cartographie automatique évoluent rapidement. En dix ans, dans la période 1976-1986, on est passé des traceurs automatiques à plume aux traceurs à laser. L'impression de la carte infographique a évolué rapidement vers la quadrichromie obtenue directement sur traceurs à jet d'encre, ou par procédé offset en quadrichromie sur la base de typons produits par traceur à laser sur films.

L'expérimentation a porté successivement sur tous ces systèmes et logiciels depuis TRGEO et FRACARTE (FRALIT, 1977) (LANCHAD, 1978-1980) jusqu'à GEOMULTI et CARTO-PC (MAB-16 1985, CODATA 1986 et GARS 1987). Les figures 2 à 5 sont extraites de cartes infographiques produites par nous aux diverses échelles de la cartographie de l'environnement (BARDINET *et al.*, 1981, 1982, 1984, 1985, 1986).

2. DONNEES SATELLITAIRES

En cartographie multisatellite, la plupart des projets utilisent les données des satellites suivants :

- LANDSAT MSS (depuis 1972), satellite héliosynchrone à orbite polaire assurant une répétitivité théorique de 18 jours au nadir de chaque scène de 185 km de côté et donnant une image numérique maillée sur la base d'un pixel de 79 m par 56 m;

- NOAA 6 et 7 (depuis 1979), satellite à orbite polaire assurant un enregistrement sur 3000 km utiles toutes les 24 heures le long de sa trace au sol et donnant une image numérique maillée sur la base d'un pixel de 4 km de côté pour le canal albédo (VIS) et de 7,5 km de côté pour le canal infrarouge thermique (IRTH), cette valeur du pixel étant valable sur la trace au sol avec une déformation croissante vers les plus grands angles de prise de vue;

- METEOSAT (depuis le 9.12.1977), satellite géostationnaire assurant un enregistrement d'une portion circulaire du globe terrestre d'un diamètre de 12.500 km dont le nadir est situé sur l'Equateur à la verticale du Golfe de Guinée et donnant une image numérique maillée sur la base d'un pixel, au nadir, de 2,5 km de côté pour le canal albédo (VIS) et 5 km de côté pour le canal infrarouge thermique (IRTH). Cette superficie du pixel est valable au nadir et subit une déformation croissante vers les plus grands angles de prise de vue (METEOSAT transmet toutes les demi-heures).

- SPOT (depuis le 22.2.1986), satellite héliosynchrone à orbite polaire assurant une répétitivité théorique de 26 jours au nadir de chaque scène de 60 m de côté et donnant une image numérique maillée sur la base d'un pixel de 10 m de côté dans le canal panchromatique et de 20 m de côté dans les canaux visibles et proche infrarouge, avec la possibilité d'enregistrements en vue verticale ou en vue oblique, ce qui permet des études stéréonumériques;

- LANDSAT 5 TM (depuis 1984), satellite héliosynchrone à orbite polaire assurant une répétitivité théorique de 18 jours au nadir de chaque scène de 185 km de côté et donnant une image numérique maillée sur la base d'un pixel de 30 m de côté pour les 6 canaux dans le visible et le proche infrarouge et sur la base d'un pixel de 120 m de côté dans le canal infrarouge thermique;

- TIROS N (depuis 1979), satellite à orbite polaire assurant un enregistrement toutes les 12 heures sur 3000 km utiles le long de la trace, et donnant une image numérique de résolution 1x1km sur la trace au sol, dans 4 canaux AVHRR couvrant le spectre de la lumière visible et du proche infrarouge (VIS) et le spectre de l'infrarouge thermique (IRTH).

- SIR-A, radar embarqué sur la navette spatiale Columbia(1981), donnant des enregistrements analogiques de 40 m de résolution; SIR-B le suivant de la série donne des enregistrements numériques. Parmi les satellites radar on doit mentionner SEASAT (1978).

On doit également mentionner HCMM (1978-1979) pour les températures de surface et MOS-1 (depuis 1987) pour les canaux MSS et le radar.

L'information multisatellitaire révèle autant d'objets géographiques non reconnus dans les travaux antérieurs, qu'elle pose de questions à propos des objets déjà cartographiés, classés et décrits, mais qui peuvent paraître différents vus sous l'étrange éclairage (variant en fonction de l'azimut et de la hauteur du soleil à l'instant T) et l'étrange lumière (divisée en bandes spectrales) qu'enregistrent les capteurs.

Selon l'échelle d'observation, on est conduit soit à contrôler exhaustivement des aires de 60 km de côté (scène Spot), soit à contrôler par sondage des aires de la taille d'une scène Landsat de 185 km de côté, soit à prendre comme réalité de terrain la cartographie existante quand la dimension du fichier couvre des superficies de plus de 100 km de côté, ce qui est courant avec les données de Noaa, Tiros-N ou Météosat, ou lorsque l'on dispose de mosaïques de scènes Landsat ou Spot.

3. BANQUES DE DONNEES GEOGRAPHIQUES :

LE CAS DE GEOMULTI

La recherche géographique se réalise de façon complémentaire, sur le terrain et en laboratoire. La télédétection se pratique dans les laboratoires où sont réunis les équipements permettant l'analyse géographique des données. Cette analyse est basée sur des systèmes et sous-systèmes permettant en particulier :

- l'acquisition de données;
- le traitement statistique et la classification de données;
- l'infographie c'est-à-dire la cartographie automatique des classifications et des phases du traitement d'images numériques.

Le traitement infographique des données géographiques suppose la constitution de banques de données enregistrées sous forme codée et sur supports magnétiques (bandes, disques ou disquettes).

La banque de données est interrogée interactivement par l'intermédiaire du système informatique. Elle contient trois types principaux d'informations codées qu'il est possible de compléter à tous moments, à savoir :

- les données de terrain obtenus lors des enquêtes dans le milieu géographique;
- les données de terrain tirées des documents préexistant à la recherche (bibliographie, photographies aériennes, cartes) et que l'on a transcrit sous forme d'informations codées;
- les données enregistrées automatiquement par les stations au sol (climatologie ... etc) et par les stations de réception en relation avec les capteurs embarqués à bords d'avions, de ballons ou de satellites.

En aménagement du territoire, l'interrogation de la banque de données géographique permettra, par exemple, de rechercher des corrélations entre, d'une part, la taille des ménages et les types de construction dénombrées par enquête statistique et, d'autre part, la densité des constructions et les types de toits mesurés par les niveaux de luminance enregistrés par le radiomètre embarqué sur un avion ou dans un satellite.

En recherche minière, on utilise la corrélation entre indices de minéralisation et linéaments détectés.

Le dialogue entre le chercheur et le système en vue d'utiliser les données et d'aboutir à des résultats est réalisé par l'utilisation de logiciels ou ensembles de programmes.

Dans la recherche géographique utilisant les méthodes informatiques on peut distinguer les chercheurs qui élaborent les logiciels, principalement les mathématiciens et les informaticiens, de ceux qui utilisent les logiciels pour une analyse thématique (on parle alors de thématiciens).

Les meilleurs systèmes infographiques permettent un dialogue interactif très complet entre l'utilisateur et les options des programmes. On parle alors de convivialité des systèmes informatiques. Les programmes EXPERT, basés sur les principes de l'intelligence artificielle, intègrent dans la mémoire du système les modifications proposées par l'utilisateur. Plus le dialogue entre spécialistes du système et thématiciens est ouvert, plus les méthodes de traitement sont efficaces.

4. CARTOGRAPHIE MULTISATELLITE DE L'ENVIRONNEMENT

Notre expérience en ce domaine est basée sur une série d'expérimentations menées sur des milieux variés à diverses échelles. Citons les recherches infographiques suivantes :

- l'atlas LANCHAD, région de N'Djamena au Tchad (BARDINET et MONGET, 1978-1980);

- l'environnement d'Annaba en Algérie (BARDINET *et al.*, 1982) (MAB-16 1985) par Landsat MSS;

- l'analyse multisatellite, région de Mopti/Bandiagara au Mali par Météosat/Landsat MSS (BARDINET *et al.*, 1982) et par Spot (BARDINET *et al.*, *in* GDTA, 1985);

- l'analyse multisatellite de la Tanzanie occidentale et centrale (CODATA 1986) par Météosat, Landsat MSS et TM, NOAA/TIROS-N (BARDINET *et al.*, 1986, 1987);

- l'analyse lithologique et structurale de Karema en Tanzanie par Landsat TM (GARS report 1987);

- l'analyse géomorphologique du Djebel Amour en Algérie par Spot (BARDInet, 1987);

-l'infographie de la région de Handan-Xingtai par Landsat MSS (BARDINET, 1987).

4.1. APPLICATIONS DES METHODES BAYESIENNES

La classification au maximum de vraisemblance est une analyse dirigée réalisée à partir d'une BASE DE DONNEES GEOCODEES accessible dans un fichier CANAL et donnant toute information thématique sur les polygones d'entraînement (BARDINET *et al.*, 1982).

La relation entre données de REFERENCE et données de TELEDETECTION est d'importance. Elle suppose le contrôle de la base de données sur le terrain d'abord pendant les enregistrements, puis pendant le processus de traitement d'image. L'utilisation de radiomètres de terrain pendant ces contrôles est particulièrement recommandée (BARDINET *et al.*, 1987).

Soulignons l'apport déterminant de l'analyse multisatellite et diachronique à la cartographie des milieux naturels et de l'environnement, en particulier pour :

- l'identification des SIGNATURES SPECTRALES diachroniques des objets géographiques dans les différentes conditions climatiques d'enregistrement;

- la séparation des OBJETS ELEMENTAIRES géographiques constituant une scène satellitaire en fonction de la résolution du pixel;

- la COMBINAISON DES DONNEES numériques multibandes et des données qualitatives et quantitatives digitalisées dans la base GEOCODEE.

La classification dirigée basée sur les méthodes bayesiennes comprend trois étapes principales :

- sélection de polygones d'entraînement de taille réduite, dans la liste des objets géographiques contrôlés au sol et classés en parcelles spectralement homogènes et hétérogènes;

- affection des spectres aux classes selon la règle dite du maximum de vraisemblance avec hypothèse de classes équiprobables (cas particulier de la règle de Bayes);

- sélection des classes dont la signification taxonomique est sûre, par dialogue à la console graphique; suppression des classes dont la fonction de distribution n'est pas gaussienne;

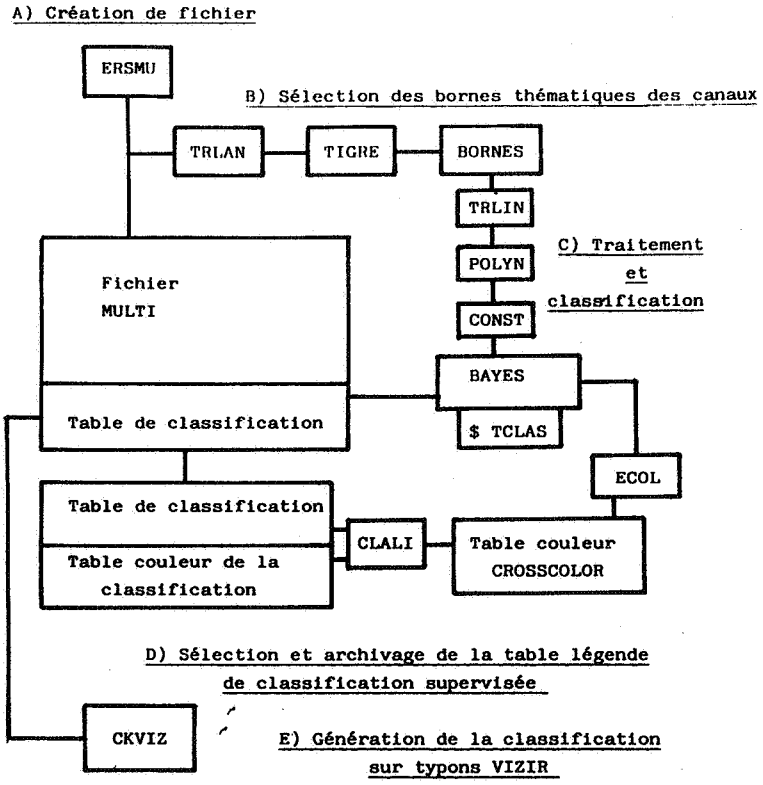
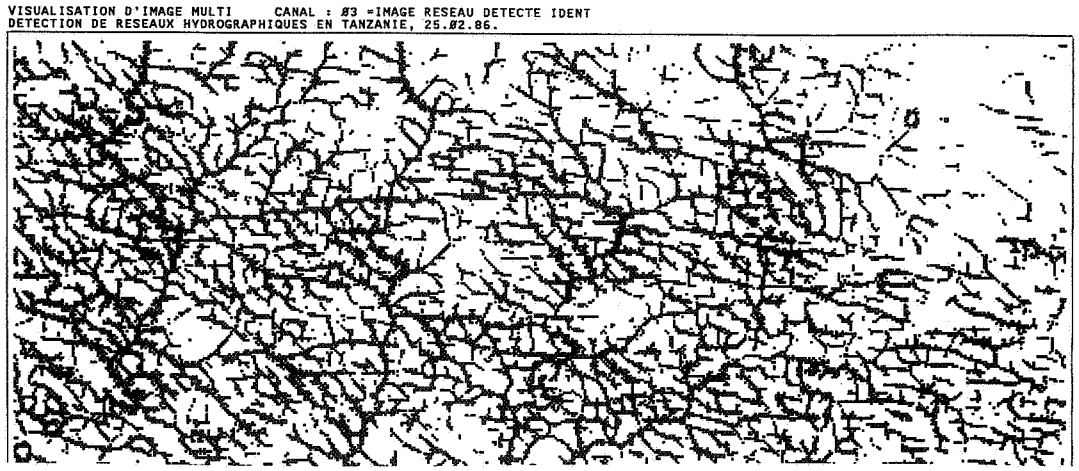
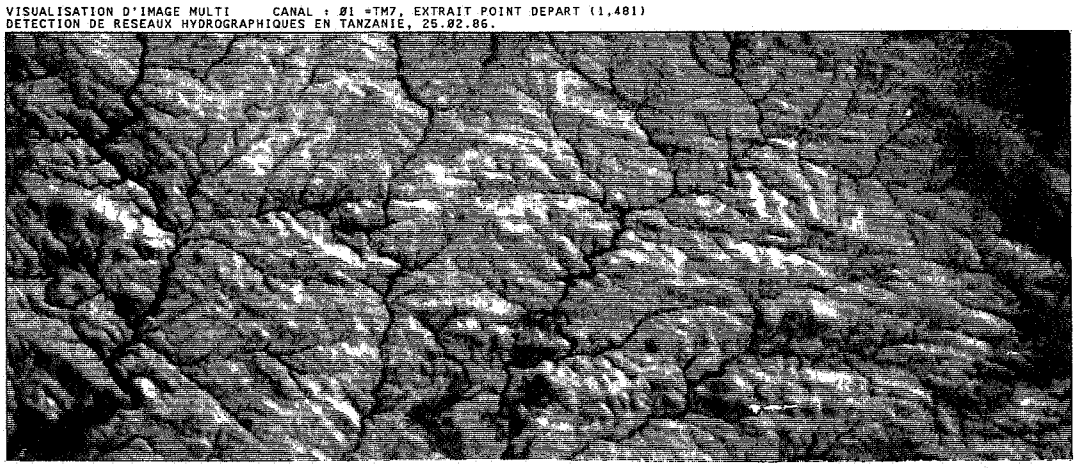


FIGURE 1 : Ordinogramme d'une classification dans GEOMULTI.

- série de logiciels permettant la sélection des données satellitaires en fichiers GEOMULTI;
- série des logiciels de classification bayesienne dirigée;
- série de logiciels de sélection interactive des couleurs dans la table de classification;
- série des logiciels d'archivage des données sur bandes et d'édition sur VIZIR laser.
- gestion et acquisition de données cartographiques (réalité de terrain et banques de données géographiques);
- correction géométrique des enregistrements;
- synthèse multivariée assistée;
- visualisation et manipulation interactive du codage des couleurs;
- génération des typons d'impression.

(B)





(A)

Figure 2 : Détection des réseaux hydrographiques dans TM7 scène de Karema/Kankulukulu en Tanzanie.

On observe en (A) l'image TM7 masquée entre les bornes significatives et traitée en contrastes d'albédo selon le schéma de la figure 3.

On observe en (B) la détection du réseau hydrographique par analyse statistique des structures locales autour des pixels et sélection des lignes de contraste d'albédo (Yu, Bardinet 1986).

L'utilisation de la règle de Bayes en analyse multibande des données de télédétection date de près de 15 ans (DUDA et HART, 1973)(FRALIT, 1977, 1981) (LANCHAD,1978, 1980).

Les programmes développés dans GEOMULTI (MONGET, 1986) permettent de contrôler la relation entre statistique spectrale des parcelles d'entraînement et statistique spectrale des classes, puis de contrôler interactivement à l'écran la relation entre concentration du spectre et répartition du taxon/classe (Fig. 1).

L'idéal est de sélectionner des PARCELLES HOMOGENES aux différentes dates de l'observation. En effet, la moyenne (spectre moyen) et la matrice de variance-covariance, permettant de reconstituer intégralement la fonction de distribution de la classe à condition que celle-ci soit parfaitement gausienne. Notons qu'à priori ce type de parcelle n'existe pas ou n'existe qu'exceptionnellement.

Le classement des parcelles d'entraînement selon la concentration des spectres (SPHERE ou ELLIPSE) est un moment important de la classification dirigée. Le choix du taux de REJET ou probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe est également important. Il précède l'analyse, par dialogue interactif à l'écran, de la relation parcelle d'entraînement/ classe.

Durant toute la phase du DIALOGUE INTERACTIF, on procède de façon systématique à la critique de la réalité de terrain, des données de l'enregistrement analysé et des bornes spectrales définissant l'espace MULTIBANDE correspondant au thème étudié (par exemple eau, végétation, lithologie, sols nus, sols construits, agriculture, aérosols ...).

4.2. APPLICATIONS EN INFOGRAPHIE DE L'ENVIRONNEMENT

L'expérience acquise en particulier dans la réalisation de programmes Lanchad (1978-1980), CODATA (1982-1986) et GARS (1986-1987) nous permet de souligner l'importance du facteur scalaire dans la relation entre données, thèmes et transcription infographique.

Ces applications sont conduites par l'intermédaire de systèmes de logiciels permettant :

- gestion et acquisition de données cartographiques (réalité de terrain et banques de données géographiques);

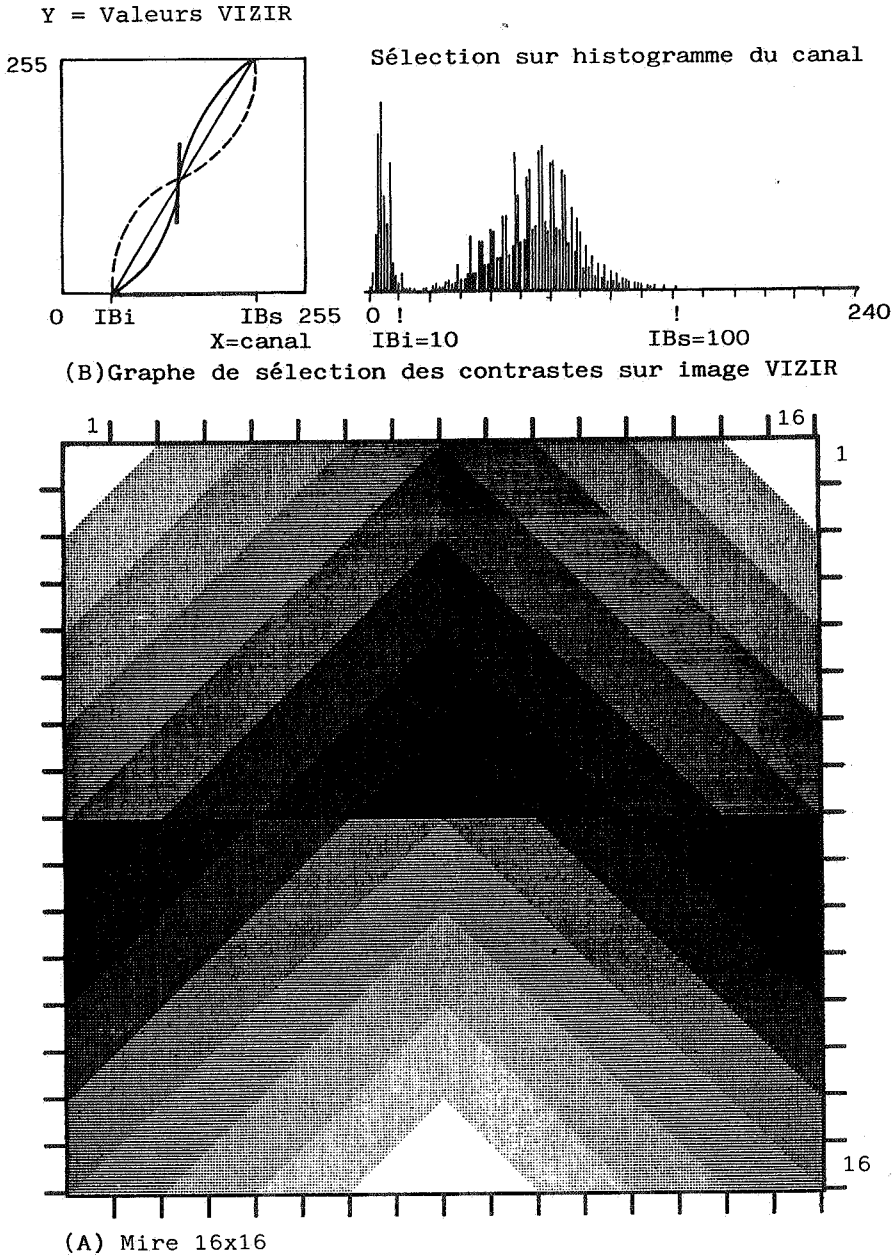


Figure 3 : Test graphique sur mire 16x16 des programmes TRLIN- et TIGRE de GEOMULTI et graphe de sélection- des bornes des canaux combinés en X,Y.

On observe en (A) la mire 16x16 permettant la manipulation interactive de la charte couleur en 256 niveaux de gris ou de couleur trichrome RVB. Cette manipulation permet d'affecter une couleur à chaque pixel ou grappe de pixels d'une image écran 1024x1024.

On observe en (B) le graphe de sélection des bornes adaptable à chaque thème. On crée dans ce cas un masque sur l'eau en plaçant IBi =10 sur l'histogramme du canal. Il est possible ensuite de réétalonner les valeurs IBi,IBs entre 0 et 255 pour augmenter les contrastes dans l'image. La figure 2 donne une application au cas de Landsat TM7 sur Karema.

- correction géométrique des enregistrements;

- synthèse multivariée assistée;

- visualisation et manipulation interactive du codage des couleurs;

- génération des typons d'impressions.

Soulignons quelques LIMITES.

Tout d'abord, la REPETITIVITE insuffisante des enregistrements (nuages, bruits, données non enregistrées) fait que l'on dispose rarement des données à date idéale; soit le nombre d'enregistrements existants est réduit, soit le BUDGET de recherche ne permet pas d'acquérir et de traiter un nombre suffisant d'enregistrements. Ensuite, il est rare que la REALITE DE TERRAIN puisse être collectée ou mise à jour PENDANT L'ENREGISTREMENT. Enfin, CERTAINS OBJETS géographiques ne peuvent être analysés dans la RESOLUTION radiométrique utilisée.

Il en résulte que, pour obtenir de BONS RESULTATS, on est amené à préférer l'acquisition d'une IMAGE MOINS BONNE mais dont la DATE d'enregistrement serait plus SIGNIFICATIVE pour le THEME étudié.

Dans le cas où la date d'enregistrement convient pour l'analyse DIACHRONIQUE, se pose la question des décalages spectraux dus aux différentes conditions météorologiques (BARDINET et MONGET, 1978, 1980) (GARS report, 1987).

A un niveau fin de l'analyse géographique on se préoccupe de l'identification des taxons, pixel par pixel et à chaque date, en vue d'interpréter correctement la relation classe-taxon-pixel.

La signification géographique et l'interprétation correcte des classifications diachroniques n'est possible que si l'on a vérifié le pourcentage de superposition des objets géographiques (un OBJET est défini comme une GRAPPE de PIXELS). Selon la taille des objets géographiques on devra analyser le % de pixels répartis sur leur contour, pour lesquels les défauts de superposition des enregistrements sont les plus importants.

Dans l'étape de SELECTION DES BORNES des valeurs spectrales, on tient compte de deux aspects particulièrement importants de l'analyse diachronique (Fig. 3) :

- l'identification des valeurs spectrales caractérisant le thème ou le milieu étudié, ce qui permet de reporter les valeurs restantes en classe de rejet;

- l'estimation du décalage spectral qu'entraînent les différences de transparence atmosphérique.

L'espace MULTIBANDE est défini selon le niveau thématique recherché: utilisation du sol, géologie, pédologie, hydrogéologie.

On peut par exemple créer un MASQUE sur l'eau. On peut également modifier la dynamique de l'histogramme des canaux pour tenir compte du décalage spectral dû aux conditions atmosphériques et à la charge en aérosols.

4.3. NEOCANAUX THEMATIQUES

Une étape importante de l'analyse consiste en la création de NEOCANAUX. On utilise pour cela l'addition, la soustraction, la multiplication et le quotient des canaux.

Par l'addition des canaux Landsat MSS5 et MSS7 on met en évidence les distributions des pixels, le long de la droite des sols, dans les domaines non chlorophylliens. Par soustraction des canaux MSS5 et MSS7 on met en évidence la distribution des pixels en relation avec l'indice de biomase, ce qui permet une sélection des types de végétation.

Par la multiplication ou le quotient des canaux MSS4, MSS5 et MSS7, l'on peut analyser par exemple l'effet de l'ombre sur la réflectance, dans les massifs montagneux ou dans les vallées encaissées.

Le test sur les néocanaux doit être conduit à chaque date du ficher puis sur un fichier diachronique.

Les NEOCANAUX testés par nous (Lanchad 1978, 1980) (Codata 1986) (Gars 1987) concernent les satellites et les thèmes suivants :

- Landsat MSS, droite des sols (MSS5+MSS7), indice de végétation (MSS5-MSS7);

- Landsat TM, indice de végétation (TM4-TM3) = VEG;

- Landsat TM, relief/végétation (TM7-VEG) / (TM7+VEG);

- Landsat TM, indice de transparence atmosphérique (TM1-TM2);

- Landsat TM, indice de turbidité (TM6-TM4);

- Landsat TM, indice lithologique Log (TM3) et Log (TM7-TM5);

- Spot XS, indice de végétation (XS1-XS3);

- Spot XS, indice lithologique (XS1+XS3) / (XS3 lissé haute fréquence);

- NOAA/TIROS-N, indice de végétation (AVHRR1-AVHRR4);

- METEOSAT, indice lithologique (IRTh12-IRTh24) x (IRTh6) lissé haute fréquence;

- METEOSAT combiné avec Landsat MSS (somme MSS4567 lissé H.F.) / (IRTh12-IRTh24 lissé H.F.).

Soulignons l'importance des néocanaux dans la phase d'interprétation.

5. INFOGRAPHIE MULTISATELLITE DE L'ENVIRONNEMENT

La CARTOGRAPHIE DE L'ENVIRONNEMENT par données de satellites diffé-

rents permet une analyse à l'échelle zonale, régionale ou locale de tous types de paysages et de tous types d'objets géographiques. De Spot (10 m de résolution au sol) à Météosat (5 km de résolution au sol), de très nombreux satellites de ressources terrestres (Landsat MSS et TM) ou climatologiques (NOAA, TIROS N) ou de satellites radar (SEASAT, SIR-A et SIR-B) enregistrent les images numériques des rayonnements électromagnétiques réfléchis ou émis par les composants de la biosphère (eau, sol, végétation).

L'infographie multisatellite de l'environnement suppose le recours aux systèmes d'information géographique intégrant l'utilisation des données satellitaires et des banques de données géographiques.

Pour traiter ces données dans les délais compatibles avec les objectifs de la recherche, on recourt aux méthodes numériques de traitement d'images, qui permettent de :

- rectifier géométriquement les données satellitaires dans les divers systèmes de projection utilisés, par exemple MTU ou Lambert;

- procéder à une réduction de l'information, donc d'économiser le temps de calcul par des tests sur la validité thématique des données disponibles;

- mettre en évidence, par le recours aux méthodes de filtrages optique et de lissage, les informations de structure qui caractérisent les zones géographiques considérées;

- produire des classifications automatiques;

- produire des taxonomies géographiques fondées sur les méthodes de classification dirigée qui tiennent compte des informations collectées sur le terrain et de la connaissance des milieux étudiées obtenue par d'autres méthodes de recherche;

- proposer des synthèses numériques résultant de la combinaison des données multisatellites et des données géographiques numérisées dans les banques de données.

La télédétection des milieux physiques révèle des systèmes structuraux, des typologies lithologiques et des systèmes hydrologiques qui ne pouvaient pas être observés aussi complètement par les techniques antérieures.

Les applications économiques de ce genre d'études sont importantes pour les recherches minières. Cette approche nouvelle permet de renforcer les connaissances théoriques, en particulier dans le domaine structural et dans le domaine de la classification des types de sols et des types de roches et d'établir ainsi des corrélations avec les bases de données géologiques.

5.1. IMAGES NUMERIQUES MULTISATELLITES

Les images numériques de satellite nous donnent une vision nouvelle des paysages aux différentes échelles d'observation.

On passe de l'image à la carte lors du processus de rectification géométrique par rapport aux systèmes conventionnels de projection cartographique (MTU, Lambert ..). La carte rectifiée est le support d'une infographie thématique.

La télédétection des écosystèmes continentaux par l'étude des données numériques de satellites permet l'étude de modèles caractérisant les différents types de milieux. Les cartes infographiques dérivées sont un outil indispensable pour l'aménagement des territoires et le contrôle de l'environnement.

L'observation par satellites fait évoluer l'analyse spatiale des principaux écosystèmes et des perturbations naturelles ou anthropiques qu'ils subissent.

Dans l'analyse des processus géologiques et des milieux naturels aménagés, la télédétection satellitaire contribue de façon importante à la recherche sur les points suivants:

- relations entre linéaments et minéralisation;

- relations entre réseaux hydrographiques actuels et fossiles et la géomorphologie sédimentaire;

- minéralisation en relation avec l'évolution des systèmes de terrain et la géotectonique depuis l'Archéen dans l'exemple de la Tanzanie;

- inventaire des ressources et des potentialités des sols;

- estimation de la quantité de matériaux enlevés des continents par les processus d'érosion ;

- mesure du dépôt et de la répartition des aérosols provenant des éruptions volcaniques et de l'érosion éolienne;

Le traitement numérique des images satellitaires permet :

- la détection des contours de transition d'albédo et détection des unités texturales;

- l'inventaire et la classification des linéaments au regard des connaissances structurales actuelles et en particulier la recherche des linéaments actifs par rapport aux linéaments anciens stabilisés;

- l'inventaire et la classification des types de sol et de substrat rocheux au regard de la cartographie existante.

Les facteurs de l'environnement qui peuvent être mesurés par données satellitaires sont :

- l'albédo de surface et les températures de surface;

- la couverture végétale, l'humidité et l'évapotranspiration;

- l'extension et la profondeur de la neige, donc l'approvisionnement en eau des bassins versants et des ouvrages hydrauliques;

- les facteurs climatiques en particulier la pluviométrie (fréquence et intensité), l'ennuagement, les vents, les perturbations atmosphériques, la dispersion des aérosols.

La figure 2 est un exemple de traitement des lignes de transition d'albédo par analyse des structures locales autour d'un pixel. L'application porte sur la détection des réseaux hydrographiques dans Landsat TM7, zone de Karema-Kankulukulu en Tanzanie (YU et BARDINET, 1986).

5.2. INFOGRAPHIE PAR RESTITUTEUR VIZIR A LASER

Les systèmes d'infographie thématique sont développés à partir de mini ou de micro-ordinateurs équipés de périphériques graphiques.

Les périphériques graphiques (BARDINET *et al.*, 1982) du type visualisateur d'images VIZIR-SEP restituent sur films photographiques tramés les résultats du traitement d'images numériques. Cela permet d'une part, d'imprimer en quadrichromie des fichiers numériques satellitaires rectifiées géométriquement, et d'autre part, d'établir la relation entre charte de couleur offset VIZIR (CMJ) et charte de couleur TRIADE écran (RVB).

La logiciel graphique décrit ici, a été conçu au CTAMN sur HP-1000 par M. ALBUISSON en 1979, pour tramer des films en densité de points et pour produire des typons sur films tramés au trait en vue de l'impression offset en quadrichromie (BARDINET, 1981).

La figure 3 présente en (A) la MIRE 16x16 qui permet la sélection de 256 couleurs ou niveaux de gris. Chaque pixel écran (1024x1024) peut être identifié par sa couleur sur la mire et par sa valeur spectrale sur chaque histogramme des axes X,Y de la mire. Elle présente en (B) le GRAPHE de SELECTION des contrastes de densité de gris pour un fichier monocanal, et la sélection thématique des bornes. On établit la relation numérique entre VALEURS D'ENTREE (réflectance du canal) et VALEURS SORTIES (niveaux vidéo VIZI ou TRIADE). L'analyse des contrastes en vue de la mise en valeur d'objets géographiques significatifs est obtenue par l'utilisation d'un facteur de pente. La figure 2 donne une application sur TM7.

La figure 4 présente la construction du PIXEL VIZIR, élément de base du logiciel graphique. Pour produire des typons d'impression des classifications, il faut générer des typons tramés au trait en vue de la quadrichromie. La gamme de tons dans la couleur résulte de la superposition des trames et permet un grand choix de couleurs identifiables par le ton et par le tramé. Le tachel VIZIR de 320x320 micromètres est composé de 64 carrés élémentaires de 40x40 micromètres répartis en 8 lignes.

La description du figuré est réalisée ligne par ligne sur BASE OCTALE, soit :

0=000, 1=001, 2=010, 3=011, 4=100, 5=101, 6=110, 7=111

Par exemple, en BASE OCTALE, le figuré 7 (fig. 4) est codé ligne par ligne comme suit :

001100110 (146)
011111111 (377)
011111111 (377)
001100110 (146)
011111111 (377)
011111111 (377)
001100110 (146)

La figure 4 suggère quelques orientations préférentielles des figurés de la trame en fonction de la couleur.

La figure 5 donne un exemple extrait de la préparation de la carte Landsat MSS d'Annaba (BARDINET *et al.*, 1982). On observe le typon Cyan de la quadrichromie. Les numéros des figurés VIZIR donnés en légende peuvent être utilisés en valeur positive (par exemple le figuré 3) ou en valeur négative (par exemple le figuré -3), ce qui augmente la gamme des tons possibles dans la couleur choisie.

Tels sont résumés quelques-uns des problèmes qui se posent en infographie.

CONCLUSION

Les images numériques de satellite nous donnent une vision nouvelle des paysages aux différentes échelles d'observation.

Vision nouvelle, car multibande, c'est-à-dire fondée sur l'image numérique des paysages observés, dans chaque bande spectrale du rayonnement électro-magnétique (lumière solaire réfléchie, infrarouge proche et thermique, ondes radar).

Vision nouvelle, bande par bande selon les satellites utilisés, mais plus encore en combinaison de bandes spectrales pour former des images numériques multisatellites en composition colorée multibande ou en classification.

Vision nouvelle, car bénéficiant de la fonction de zoom qui permet d'observer les paysages depuis l'image globale à l'échelle de la cartographie zonale, jusqu'à l'image des objets géographiques à l'échelle de la cartographie régionale et thématique (sols, lithologie, utilisation des sols).

Vision nouvelle, car non seulement multibande, mais également multitemporelle (ou diachronique). Les satellites sur orbite polaire nous donnent périodiquement des scènes de 185 km de côté tous les 18 jours (LANDSAT) ou de 60 km de côté tous les 26 jours (SPOT). Les satellites sur orbite géostationnaire (METEOSAT) nous donnent toutes les demi-heures une portion de la Terre vue de 36.000 km d'altitude. Entre ces deux types extrêmes, les satellites sur orbite polaire de la série NOAA et TIROS N, nous donnent toutes les 12 heures une image numérique continue sur 3000 km de large le long d'une même trace.

Il en résulte par exemple, que l'on peut observer par METEOSAT toute l'Afrique toutes les demi-heures; par NOAA et TIROS N, toute la Tanzanie toutes les 12 heures; par LANDSAT MSS ou TM toute la région d'Annaba ou de Karema tous les 18 ou 16 jours, et par SPOT tous les 26 jours.

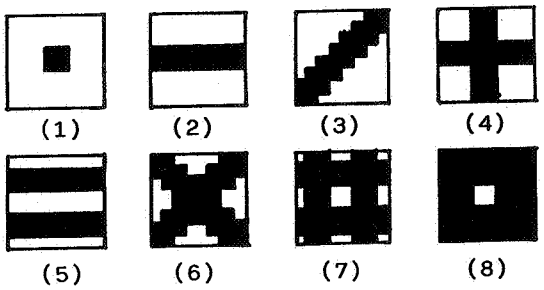
Cette vision nouvelle permet des zooms sur les objets géographiques en fonction de la résolution au sol (pixel) des enregistrements. Les images METEOSAT concernent tous les objets géographiques dont la taille est supérieure à 2,5 km, les images NOAA et TIROS N tous ceux de plus d'1 km de côté, celle de LANDSAT TM tous ceux de plus de 30 m de côté et celles de SPOT, enfin, tous ceux de plus de 10 m de côté et dans ce dernier cas avec une vision stéréoradiométrique.

Outre ces données de satellites en orbite depuis plusieurs années, on dispose également de données radar sur de courtes périodes; c'est le cas du radar SIR-A et SIR-B embarqués sur la navette spatiale ou de Seasat en orbite géostationnaire.

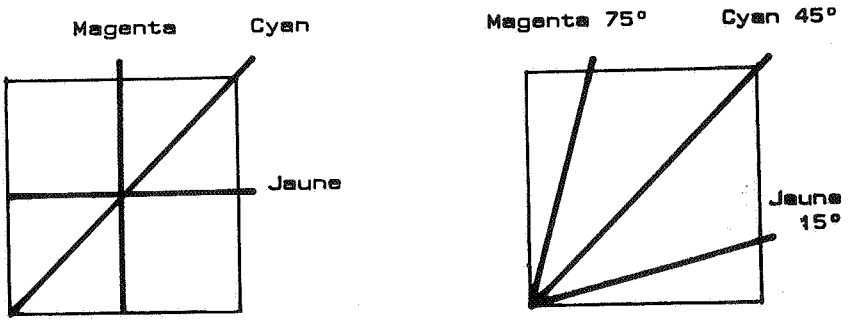
On utilise dans les banques de données géographiques, non seulement ces informations multisatellites, mais des photographies aériennes et des cartes numérisées. Les milieux physiques, les milieux aménagés et leur environnement sont ainsi redécouverts, avec toute la précision que donnent des informations synoptiques, multibandes et diachroniques.

On peut compléter ces données par les enregistrements radiométriques de géophysique et les banques de données géochimiques.

La figure 4 suggère quelques orientations préférentielles des figurés de la trame en fonction de la couleur.



(A) Hiérarchie des huit symboles VIZIR en trichromie



(B) Règles d'orientation des symboles en trichromie

Figure 4 : Eléments de sémiologie graphique sur symboles VIZIR pour traçeurs laser de typons en quadrichromie.

En cartographie géologique et géomorphologique, l'apport des systèmes d'information géographique et des banques de données multisatellites permet un développement de la recherche, en particulier dans le domaine structural, dans le domaine lithopédologique et dans le domaine de la morphologie dynamique.

L'infographie multisatellite est utilisée dans de nombreux domaines d'application, de la géologie minière jusqu'à l'aménagement du territoire, en passant par la cartographie géomorphologique.

La figure 5 donne un exemple extrait de la préparation de la carte Landsat MSS d'Annaba (Bardinet et al. 1982). On observe le typon Cyan de la quadrichromie. Les numéros des figurés VIZIR donnés en légende peuvent être utilisés en valeur positive (par exemple le figuré 3) ou en valeur négative (par exemple le figuré -3), ce qui augmente la gamme des tons possibles dans la couleur choisie.

Tels sont résumés quelques-uns des problèmes qui se posent en infographie.

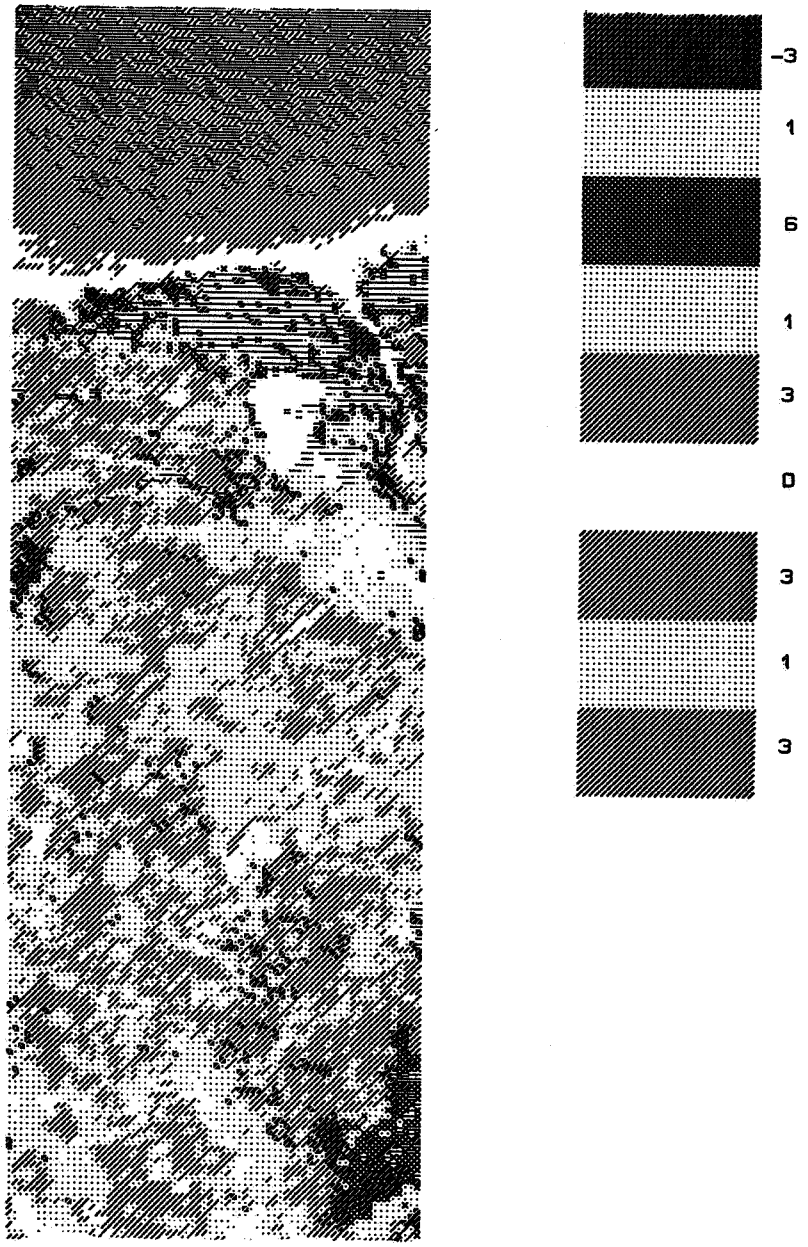


Figure 5 : Exemple d'application des symboles VIZIR à la carte Annaba 5 (Bardinet et al. 1982 et MAB-16 1985). On on observe ici le typon Cyan.

BIBLIOGRAPHIE

BARDINET, C. (1981) - Classification supervisée des données Landsat 2 de la zone d'Annaba (Algérie); cartographie automatique sur restituteur VIZIR à laser. - *Bull. Comité Fr. Cartogr.*, 90, Paris.

BARDINET, C. (1987) - Télédétection, environnement et urbanisation : de l'image globale aux objets géographiques, applications à l'impact de l'urbanisation sur les paysages en Afrique et en Chine. - *Thèse de doctorat d'Etat ès-Lettres et Sciences Humaines, soutenue à l'université de Paris 8 le 25 septembre 1987.*

BARDINET, C., MONGET, J.M. (1978-80) - LANCHAD, Télédétection et géographie appliquée en zone sahélienne du Tchad. - *Coll. ENSJF 12*, 543 p., cartes, fig., Paris.

BARDINET, C., GABERT, G. (1986) - Legend and interpretation of the multisatellite thematic map (Tanzania). - *Codata Bull. Pergamon Press*, 62, Oxford, 51-72.

BARDINET, C., MONGET, J.M. (1986) - Multisatellite data processing. - *Codata Bull. Pergamon Press*, 62, Oxford, 35-50.

BARDINET, C., YU, Z. (1986) - Image preprocessing for line detection based on local structure analysis. - *Codata Bull., Pergamon Press*, 62, Oxford, 9-26.

BARDINET, C., FOSSET, R., MONGET, J.M. (1982) (Editeurs *et al.*) - Télédétection et géographie appliquée en zone aride et sud-méditerranéenne. - *Coll. ENSJF 19*, 412 p., cartes, fig., Paris.

BARDINET, C., MONGET, J.M., PATOUREAUX, Y. (1982) - Combined use of daily thermal cycle of Meteosat imagery and multispectral Landsat data : application to the Bandiagara Plateau, Mali. - *Proc. Earsel, ESA-SP 175*, Igls, Austria, 95-101.

BARDINET, C., GABERT, G., MONGET, J.M. (1985) - A new method for the application of multisatellite data in Geoscience research using Meteosat, Noaa, Tiros-N, Landsat, Unescro report contract SC/RP 203 098 4, CTAMN/85/R/20, Sophia Antipolis, 2 folded maps inserted (Mali and Tanzania), to appear in Annales Musée royal de l'Afrique centrale, sér. in-8°, Sc. Géol., Tervuren.

BARDINET, C., GABERT, G., MONGET, J.M., YU, Z. (1988) - Application of multisatellite data to thematic mapping. - *Geol. Jb. B 67*,3-74,3 folded map inserted, Hannover.

BARDINET, C., BENARD, M., BLANCK, J.P., MONGET, J.M., TRICART, J. (1984) - Cartographie automatique et détection de contours des unités géomorphologiques dans la zone de Mopti-Bandiagara (Mali) par données multisatellites (Landsat, Simulation Spot, radar SIR-A). - *Proc. 8e Symp. Canad. Téléd. et 4e Congr. Ass. Quebec Téléd.*, Montréal, 187-194.

BARDINET, C., KLERKX, J., LAVREAU, J., LE PAGE, A., ROGGERI I., TREFOIS, Ph., WEBER, C., YU, Z. (1987) - First results of the IUGS-Unesco programme on geological applications of remote sensing (GARS) in Eastern Africa. - *Adv. Space Res., vol. 7 (3); COSPAR, Pergamon Press*, Oxford, 19-23.

BARDINET, C., LAVREAU, J., LE PAGE, A., ROGGERI, I., RUDANT, J.P., TAMAIN, G., TREFOIS, PH. (1987) - Lithology discrimination in tropical conditions using TM data supplemented with a radiometric ground survey in western Tanzania. Current research in African earth sciences. - *in* : Matheis & Schandelmeier Ed., Rotterdam.

BENARD, M., BARDINET, C. (1987) - Les méthodes de classification dans les images. - *Cours Ecole Nat. Sup. Télécom., Dpt. ISV.*, ENST Ed., Paris.

CODATA (1986) - Methodology for multisatellite thematic mapping, a report of the CODATA Task Group on Multi satellite Thematic Mapping (MTM), Bardinet C., Gabert, G., Monget, J.M., Yu Z., Codata Bul. 62, oct. 1986, 86 p. 1 folded map inserted, Ph. Glaeser ed., ICSU, Pergamon Press, Oxford.

COSPAR (1987) - Potential of remote sensing for the study of global change. - *Adv. Space Res., vol. 7 (1)*,S.I. Rasool Ed., *Pergamon Press*, Oxford, 97 p.

COSPAR (1987) - Remote sensing : Earth's surface and atmosphere. - *Adv. Space Res. vol. 7 (3)*, W.D. Carter, A. Arking, M.P. McCormick, E. Raschke, Eds. *Pergamon Press*, Oxford, 252 p.

DUDA, R.O., HART, P.E. (1973) - Pattern classification and scene analysis. - *Ed. J. Wiley*, New York.

FRALIT (1977) - Télédétection du littoral océanique de la France. - *Coll. ENSJF 11*, 310 p., cartes, fig., Paris.

FRALIT (1981) - Télédétection du marais poitevin et de ses marges. - *Coll. ENSJF 13*, 311 p., cartes, fig., Paris.

GARS report 1987 (sous presse) - Remote sensing applied to geology, a multidisciplinary approach : the Unesco/IUGS Geological Application of Remote Sensing programme in Tanzania. *Ann. Mus. roy. Afr. centr., Tervuren, sér. in-8°, Sc. Géol.*,(J. Lavreau and C. Bardinet, Eds.).

GDTA (1985) - Expériences de simulation du satellite SPOT en Afrique de l'Ouest GDTA Ed., 168 p., cartes couleur, 1 carte h.t., Toulouse.

MAB-16 (1985) - Cartographie intégrée de l'environnement : un outil pour la recherche et pour l'aménagement. Notes techniques du MAB 16, dirigée par A. Journaux, UGI, 55 p., 10 cartes h.t., Unesco, Paris, ISBN 92-3-202347-4.

MONGET, J.M. (1986) - The Geomulti database management system. - *Codata Bull., 62, Pergamon Press*, Oxford, 27-34.

Produits chimiques, matières plastiques,... connaissez-vous SOLVAY ?

☐ 2e entreprise belge.

☐ figure parmi les 12 premières sociétés chimiques européennes.

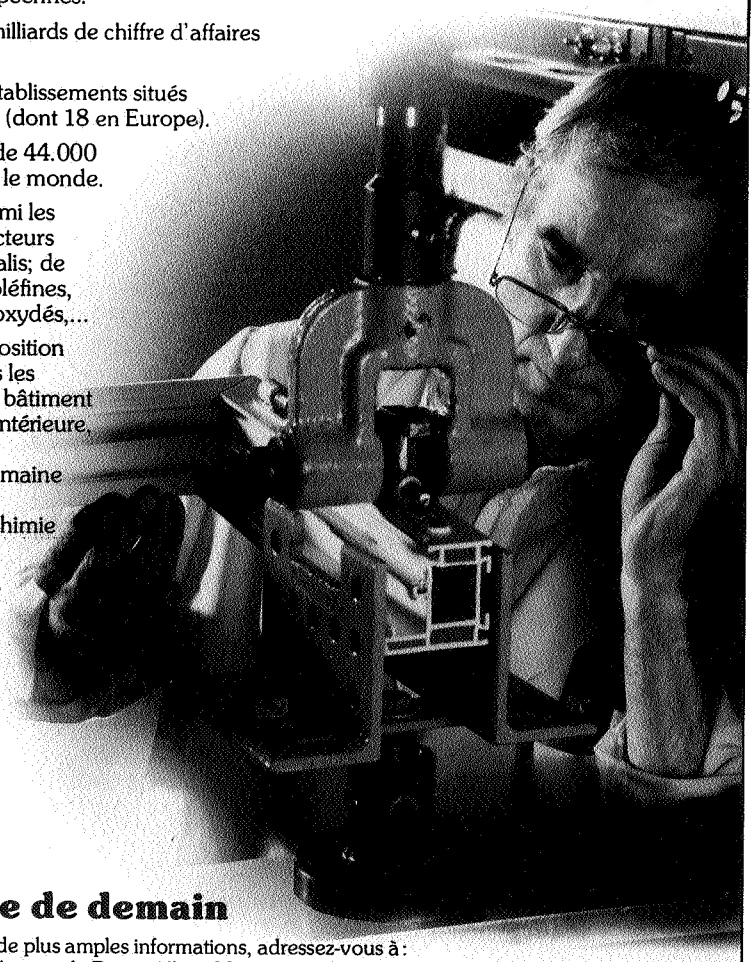
☐ plus de 200 milliards de chiffre d'affaires en 1984.

☐ plus de 290 établissements situés dans 34 pays (dont 18 en Europe).

☐ occupe plus de 44.000 personnes dans le monde.

☐ se trouve parmi les premiers producteurs mondiaux d'alcalis; de chlore; de polyoléfines, de produits peroxydés,...

☐ détient une position importante dans les produits pour le bâtiment et la décoration intérieure, l'emballage, la pharmacie humaine et vétérinaire, la biochimie et la chimie fine,...



SOLVAY

La chimie de demain

Si vous souhaitez de plus amples informations, adressez-vous à :
SOLVAY & Cie S.A. - rue du Prince Albert 33 - B-1050 Bruxelles - Tél. 02/516.61.11