

Actes de la Table Ronde Internationale CNRS

APPORTS DE LA TÉLÉTECTION SPATIALE À L'ÉTUDE
DES PAYSAGES ET DES SYSTÈMES AGRAIRES TROPICAUX

25, 26 et 27 octobre 1989

Centre d'Études de Géographie Tropicale - CEGET-CNRS
Bordeaux-Talence, France

SYSTÈME EXPERT ET TÉLÉTECTION EN MONTAGNE

BLAMONT D., MERING C.

RÉSUMÉ:

Les exigences de répétitivité, la complexité des milieux montagnards et le nombre de variables introduites dans les traitements ont rendu nécessaire l'élaboration d'un système qui non seulement permet le chaînage de ces différents traitements, utilisant différentes variables, dans des ordres différents, afin de choisir le meilleur en vue du résultat recherché, mais encore qui disposât de critères propres lui permettant de piloter lui-même la construction des chaînes de traitements et de choisir celle qui donne la meilleure carte, ainsi que de contrôler l'absence de contradiction entre données de base et données produites. Le système expert CIME pilote ainsi la classification des pixels de parcelles d'entraînement à l'aide de règles de production opérant des segmentations successives sur les variables. Il permet l'introduction en amont de connaissances thématiques soit explicitement par l'énoncé de règles (pour l'instant encore, d'ordre topographique; par exemple, il n'y a pas de champs sur des pentes supérieures à 45°), soit implicitement par le choix des parcelles. Développé pour la cartographie de milieux montagnards très complexes, il est cependant utilisable pour d'autres thèmes et d'autres régions.

Si ce système donne des résultats tout à fait satisfaisants, il est cependant perfectible et cela dans deux directions en reliant plus étroitement, sans biais, les processus logiques utilisés par le système pour fabriquer les cartes d'une part et les structures logiques non seulement de la classification qu'est la taxonomie de la carte mais aussi des processus mêmes de connaissance de l'organisation des paysages cartographiés, d'autre part.

Le système CIME (cartographie intelligente des milieux montagneux) a été élaboré dans le but de piloter et d'activer des traitements en chaîne dans un cas où la télédétection rencontre des difficultés particulièrement nombreuses résultant à la fois de la complexité du paysage à cartographier — une région de montagne très escarpée, le Centre du Népal (Blamont 1981) — et de la nature des images à traiter — des variations des conditions d'éclairément des différents secteurs de l'image. Le système est fondé sur l'assimilation d'une méthode de cartographie à une méthode de classification des éléments d'image à l'aide d'attributs variés; sa première version ne simule que le savoir-faire du télédétecteur et non celui du thématique, dissociant les procédures — d'appel et de mise en œuvre des traitements — de l'objectif purement thématique — l'élaboration d'une carte spécifique; il se caractérise par la double possibilité d'introduire dans les traitements un grand nombre de variables (de nature quelconque, radiométrique ou non, pourvu qu'elles soient attachées aux objets [ici les pixels] traités par le système) et de tester toutes les chaînes possibles de traitements utilisant ces variables.

Comme souvent dans pareil cas, l'outil mis au point s'est révélé pouvoir être utilisé et développé dans des directions dépassant le projet initial. Si le système est assez général pour servir dans d'autres champs que la télédétection, ne seront cependant discutés ici que les possibles développements propres à celle-ci, et ceci dans deux directions: l'élaboration des légendes et la production de cartes apportant des connaissances sur la nature et la structure des paysages cartographiés, c'est-à-dire un système expert étendu à la thématique. La base du raisonnement est que si une variable autre que la radiométrie peut être utilisée lors d'une segmentation pour différencier des pixels représentant des objets classés dans des taxons différents par le thématique, cette relation, mise à jour et quantifiée par le système, peut être utilisée à son tour par le thématique dans sa tentative de rendre compte de la nature, de l'état, de la structuration et de la genèse des paysages qu'il cartographie.

1. LE SYSTEME ACTUEL

Dans un premier temps, nous avons constaté qu'un seul et même élément est pour une très grande part responsable de l'organisation logique des deux ordres de complexité — le paysage et l'image le représentant —, la topographie (Blamont & Méring, 88):

- l'altitude

est responsable d'une organisation étagée de la végétation, des cultures et des diverses modalités d'occupation de l'espace par l'homme; ainsi que des lents passages d'une formation végétale "pure" à une autre, ce que nous

influence la nature du signal enregistré par le biais de l'épaisseur et de la quantité de l'atmosphère traversée;

avons appelé les "marges floues" et qui peuvent aussi être des unités de paysage suivant leur taille et la résolution de l'image satellitaire ;

- la pente

— détermine l'accessibilité des milieux et donc, et selon des pentes de valeur croissante, le choix par les hommes des formes de mise en valeur comme : mise en culture, pâturage, forêts exploitables et dégradées, forêts difficilement accessibles et donc peu exploitées, parois sans végétation ;

— influence le signal émis par le biais de l'angle de la lumière incidente ;

- l'orientation

— influence la nature des formations végétales plus ou moins sensibles à l'humidité et à la quantité de lumière reçue et donc aussi les limites altitudinales des différents éléments du paysage ;

— est bien évidemment responsable de variations dans la quantité de lumière réfléchie par les différents versants lors de la prise d'image satellitaire, par le biais des variations dans les quantités et qualités de lumière incidente.

Devant ces concordances, il était naturel d'essayer non pas de supprimer les difficultés — i.e. en "corrigeant" le signal par des opérations sur les différents canaux — mais bien au contraire de les exploiter en introduisant les différents facteurs topographiques structurant les paysages¹ dans les traitements sous forme de variables, utilisées dans les segmentations, au même titre que les autres variables.

Les variables — appelées aussi *descripteurs* ou *attributs* — prises en compte par les traitements sont donc actuellement de deux ordres :

- les variables intrinsèques :

- les mesures radiométriques
- *ivgv* : l'indice de végétation verte
- *t* : la texture locale (Blamont *et al.*, 84 -1 & 2)

- les variables extrinsèques :

- *a* : l'altitude
- *p* : la pente
- *e* : la quantité d'ensoleillement lors du passage du satellite (San, 1978)
- *c* : la classe représentée par la zone test à laquelle il appartient

1. On peut définir un paysage comme le système spatial construit dans lequel une société humaine habite, produit sa subsistance, lit et exprime en partie son organisation et sa vision symbolique du monde ; alors tout discours à son sujet doit s'attacher non seulement à la caractérisation de ses divers éléments mais également à l'expression des relations qui les lient ; c'est-à-dire à ce que nous appelons ici sa structure.

La détermination du niveau pertinent d'utilisation de chaque variable est alors la source de grandes lourdeurs dans l'élaboration des traitements. Car si l'utilisation du modèle d'ensoleillement est bien évidemment première dans toute chaîne puisqu'il permet de diviser l'image en trois secteurs à l'intérieur desquels l'influence de l'orientation sur la radiométrie est considérée comme mineure par rapport à celle des variations du couvert végétal, rien ne permet actuellement de déterminer *a priori* l'ordre d'utilisation ou de réutilisation des différentes et nombreuses autres variables, qu'elles soient "intrinsèques" ou "extrinsèques".

En effet, l'utilisation de traitements permettant de mettre toutes les variables en concurrence immédiate, comme la *discrimination bayésienne non paramétrique* (Céleux, 80), n'a pas donné de résultats satisfaisants : d'une part parce que la pertinence de certaines variables est masquée par d'autres ; d'autre part, parce que la capacité de ce genre de traitement simultané limite le nombre des variables. Il convenait donc de recourir à des utilisations successives des variables et, donc, de construire et de tester toutes les chaînes de traitements possibles ; enfin, une variable utilisée avec une certaine efficacité à un stade doit pouvoir être réutilisée à un stade ultérieur plus fin. Or les expériences ont montré que les chaînes permettant les meilleures cartes — soit celles qui permettaient le plus fort pourcentage de pixels classés strictement dans une taxonomie définie *a priori* — se trouvaient être différentes d'un secteur d'éclairément à l'autre et d'une thématique (ou même d'une taxonomie) à l'autre. Si une telle démarche est envisageable pour une carte, elle ne saurait l'être si l'on souhaite répéter la cartographie, dans le temps ou dans l'espace.

La nécessité de dissocier la démarche générale — du type "essai & erreur" — du traitement de chaque cas particulier (thématique ou temporel-local) apparaît alors évidente. Il a donc été fait appel aux techniques de l'intelligence artificielle pour élaborer un *système expert* qui :

— simule cette démarche et dispose de procédures d'évaluation des résultats de chaque traitement au sein d'une chaîne — afin de décider de la continuation de la chaîne ou de son arrêt — et de comparaison des chaînes entre elles — afin de déterminer la "meilleure" ;

— permette le traitement de chaque cas particulier en n'imposant à l'utilisateur que l'introduction des données, des connaissances, des règles et de la taxonomie propres à la thématique et aux temps et lieu choisis.

1.1. Les connaissances

En effet, la distinction entre les deux types de connaissances est établie :

- les connaissances factuelles sont les connaissances sur les pixels et sur les concepts thématiques généraux et constituent la base de faits.

— les pixels sont groupés en *parcelles-tests*, appelés aussi classes *a priori*, représentant les taxons de la légende terminale prédéfinis par le thématicien. Ces parcelles sont divisées en deux groupes : les *parcelles d'entraînement* sont utilisées pour déterminer les lois de *seuilage* sur les variables que les *parcelles de contrôle* servent à valider.

Chaque pixel sera représenté comme un objet décrit par des attributs ayant une ou plusieurs valeurs numériques (radiométries, indices, altitude, pente...) ou symboliques (la classe représentée par la zone-test à laquelle il appartient, la liste des classes (cl_ après) qui lui seront associées après une *étape* (phase d'analyse). — Les connaissances factuelles non associées aux pixels (ex : l'attribut *étape*, attaché à un objet nommé *contexte*) sont également représentées comme des objets dans la base de faits. Les différents ensembles d'objet sont différenciés par leurs types.

Les connaissances procédurales définissent, sous une forme propositionnelle, les moyens d'obtenir une nouvelle connaissance à partir d'un ensemble de faits déjà établis. Qu'il s'agisse des règles concernant la connaissance thématique ou algorithmique, elles sont données en vrac et insérées dans la base de règles sous une forme déclarative simple :

Si Conditions Alors Conclusions.

La partie *conclusions* ne peut comporter que des affectations (d'une valeur d'attribut pour l'objet correspondant) ou des noms d'Actions internes ou externes (les actions internes sont des procédures propres au système tandis que les actions externes sont effectuées à l'extérieur du système ; seul leur nom est connu du système ce qui lui permet de les déclencher). Une règle est déclenchable si sa partie conditions est vérifiée. Les affectations ou les actions de la partie conclusions peuvent alors être exécutées. La base de faits est modifiée en conséquence. On peut cependant distinguer deux sortes de règles : les *règles de contexte* et les *règles de contrôle*.

1.1.1. Les règles liées au contexte

Ce sont les règles dont les conditions ou les conclusions dépendent directement de la connaissance du milieu, ici la montagne, de la thématique, ici la végétation, et du traitement choisi, ici la discrimination non paramétrique. A titre d'illustration, la règle suivante est uniquement liée à l'expertise concernant l'étagement de la végétation ; elle exprime le fait qu'au dessous d'une altitude cotée 20, on ne trouve ni prairie ni forêt de chênes, de sapins ou de rhododendrons :

Si $\text{seuil_altitude} = \text{oui}$,
 $\text{altitude} < 20$
 Alors¹ $\text{classe_après} \diamond \text{prairie}$,
 $\text{classe_après} \diamond \text{chêne}$,
 $\text{classe_après} \diamond \text{sapin}$,
 $\text{classe_après} \diamond \text{rhodo}$,
 $\text{datation_obj}(2)$

La quantité de ce type de règles thématiques déclaratives introduites dépend de la représentativité des parcelles-test introduites dans le système : ainsi, par exemple, on n'a besoin d'introduire la règle ci-dessus, relative aux limites altitudinales supérieures et inférieures d'une unité de paysage, que si les parcelles introduites ne rendent pas

1. Le symbole \diamond signifie "différent de" dans la syntaxe du langage d'expression des règles. L'attribut "classe_ après" correspond au nom des classes associées à l'objet pixel à un instant donné.

exactement compte de ces limites. Si le thématicien est capable de fournir des parcelles test représentatives pour une variable, les règles de seuillage proviennent alors d'un traitement automatique. Si les règles thématiques et les parcelles test se contredisent ou ne représentent pas la totalité de la thématique, des pixels "non classés" apparaîtront sur les cartes intermédiaires et le thématicien devra alors reprendre les unes et/ou les autres.

1.1.2. Règles et coefficients de contrôle

Il s'agit des règles qui traduisent la stratégie d'ensemble du télédécteur et qui permettent de contrôler les résultats puis d'entériner des choix. Elles doivent piloter l'utilisateur de la télédétection dans les traitements et la validation des résultats. Elles sont indépendantes de la thématique et du milieu et peuvent donc être utilisées pour d'autres applications de la cartographie par télédétection. Par exemple, la règle suivante permet d'orienter l'utilisateur vers le choix de l'algorithme de discrimination non paramétrique (nommée "dnp" dans le système).

Si prototype = oui
 type_prototype = zone_entrainement,
 classification = oui,
 segmentation = oui
 Alors type_classification = dnp/

La règle suivante permet alors, dans le cas où l'on traite les pixels "à l'ombre", d'activer cette procédure à partir des variables radiométriques. Elle permet également de coder l'étape et de compter le nombre de segments obtenus :

Si masque_ombre = oui,
 type_classification = dnp
 Alors dnp_radiométrie,
 état = segradiométrie,
 étape = 1,
 compter_segments = oui/

Par ailleurs, à l'issue de chaque étape le système vérifie la pertinence de la connaissance du terrain en signalant tout pixel des parcelles de contrôle dont la classe *a priori* ne figure pas dans la liste des cl après et en interrompant alors la chaîne. Cette remise en cause de l'information initiale et le non-classement de pixels (erreur d'échantillonnage ou mauvais choix des classes) sont un apport très positif des techniques de l'Intelligence Artificielle. La distinction entre validation interne (la minimisation du risque de Bayes dans le cas de la discrimination non paramétrique du même nom) et externe (par reconnaissance des parcelles test *a posteriori*) permet d'utiliser la stratégie d'ensemble pour des procédures de classification différentes, pourvu que leurs résultats se traduisent par un seuillage.

Les coefficients servant au contrôle des traitements et au choix des chaînes sont au nombre de deux. Le coefficient d'incertitude Ci est calculé à partir des pixels de

contrôle, à chaque étape, après propagation des contraintes sur l'ensemble de ces pixels. Il est construit pour évaluer le degré d'incertitude du classement des pixels à cette étape. Il sert à contrôler l'évolution du classement au sein d'une chaîne et à orienter vers une poursuite de la chaîne ou un abandon et un retour arrière. Une fonction du système permet de le calculer à l'aide de la formule suivante :

$$C_i = 1/N \{ \sum \{ \sum \sum \partial_{jk} ; k \in K(i) ; j=1, m \} i=1, N \}$$

où :

- ∂_{jk} est le symbole de Kronecker (=1 si $j=k$; =0 si $j \neq k$) ;
- $K(i)$ la suite ordonnée des n° des classes affectées *a posteriori* au pixel i ;
- m le nombre total de classes *a priori* ;
- N le nombre de pixels analysés ;

La règle suivante illustre l'utilisation de C_i à l'issue d'une étape :

si la condition terminale est vérifiée

alors fin

sinon si le coefficient d'incertitude a augmenté

alors retour arrière

sinon alors recommencer un nouveau cycle.

Le coefficient de vraisemblance C_v est calculé à partir des pixels de contrôle à la fin de chaque chaîne. Il est construit pour évaluer la vraisemblance du classement résultant de cette chaîne. Il permet de comparer deux chaînes, la meilleure chaîne étant celle dont le coefficient de vraisemblance est le plus élevé. Il est égal à la somme des pixels de contrôle exactement classés à l'issue d'une chaîne. Une fonction du système permet de la calculer à l'aide de la formule suivante :

$$C_v = 1/N \{ \sum \{ \sum \{ \sum \partial_{1l}^{n(i)} * (1 - \partial_{1l}^{k'}) ; k' \in K(i) ; 1=1, m, 1 \neq j ; \} j=1, m ; \} i=1, N \}$$

où :

- $\partial_{1l}^{k'}$ est le symbole de Kronecker (=1 si $1=k'$; =0 si $1 \neq k'$) ;
- $K(i)$ la suite ordonnée des n° des classes affectées *a posteriori* au pixel i ;
- $n(i)$ le numéro de la classe *a priori* du pixel i ;
- m le nombre total de classes *a priori* ;
- N le nombre de pixels analysés ;

Après le déclenchement du calcul de C_v , la règle suivante décrit la vraisemblance du résultat en fonction de l'objectif et du critère retenu :

Si critère = pixels_bien_classés,

carte_prête = oui,

somme_des_pixels_bien_classés \geq seuil_admis

Alors vraisemblance = oui/

Les règles activant les traitements, contrôlant les résultats puis entretenant les choix sont donc indépendantes de la thématique et aussi des traitements ou opérations sur les variables, et peuvent être utilisées pour d'autres applications puisque la possibilité est offerte au thématicien d'introduire des règles propres à la thématique mais aussi aux traitements sans altérer le fonctionnement général du système

1.2. Le fonctionnement du système.

1.2.1. Supervision du symbolique sur le numérique

Lors d'une procédure de seuillage (*étape*), le système choisit de manière stochastique une variable et le traitement qui lui est associé et étiquette chaque pixel en lui associant un ensemble de classes potentielles composé d'un certain nombre des classes *a priori* : l'étape est validée si cet ensemble comporte la classe *a priori* du pixel. Chaque segment est alors considéré comme une contrainte propagée sur les pixels des parcelles de contrôle : un seuillage préalable n'est en effet pas remis en cause et les classes associées aux segments sont définies par une formulation symbolique négative (ex. : non sapin, non chêne, etc...). Le but d'une étape est donc d'éliminer certaines des classes potentielles associées à chaque pixel lors des seuillages précédents.

1.2.2. Constitution d'une chaîne

Une chaîne se caractérise par l'ordre des traitements des variables quantitatives (par exemple *ensoleillement, radiométrie, altitude, texture, pente...*) : l'objectif final est de trouver une chaîne qui classe correctement chaque pixel des parcelles de contrôle. Comme il peut exister plusieurs chaînes toutes imparfaites, la meilleure (celle contenant le plus grand nombre de pixels classés correctement ou avec la moins grande incertitude) sera appliquée à l'ensemble de l'image, mais le système conserve la trace de toutes les chaînes dont on trouvera un exemple dans Mering *et al.*, 88.

2. TÉLÉDÉTECTION, SYSTÈME EXPERT, CARTOGRAPHIE ET CONNAISSANCE DU PAYSAGE

Le système construit donc une carte thématique à partir de parcelles-test élaborées et regroupées selon les taxons définis *a priori* par le thématicien. Jusqu'à présent, ces taxons étaient autant de classes équivalentes toutes également distinctes, présentées comme des objectifs séparés de classement. Mais une carte n'est pas un document à deux dimensions ni même seulement à trois. En effet les phénomènes représentés ne sont pas seulement ordonnés dans les trois dimensions de l'espace mais également suivant la logique d'une classification. Rares en effet sont les légendes qui ne sont hiérarchisées, ne serait-ce qu'implicitement, par l'utilisation et le choix des figurés et des couleurs, en camaïeu ou en opposition.

Une hiérarchisation possible, dans les cartes de la végétation et de l'occupation des sols, est celle qui fait des distinctions entre types de couverture (cultures, forêts, prairie) puis, à un degré inférieur de hiérarchisation dans chacun de ces types, entre types de cultures et de rotations, essences d'arbres, types de prairie... : il s'agit de taxonomies emboîtées selon l'axe de la nature biologique des unités cartographiées. Pour les forêts, le choix des classes, du regroupement de certaines espèces entre elles, ou au contraire de leur séparation, peut être guidé par l'utilisation de ces espèces par l'homme.

Cette nature biologique peut aussi être reliée, dans des séries d'emboîtements hiérarchisés, à des facteurs naturels : les altitudes déterminant des étages à l'intérieur desquels les variations d'expositions, de situations, de sols, de pentes, sont de nouveaux facteurs de différenciation et de répartition. À une étape ultérieure, si on ne se contente pas d'une carte des formations climaciques, on peut introduire un nouvel axe de classification : celui des densités du couvert végétal ou des cultures, ou même de l'état des formations cartographiées : forêts primaires, secondaires, dégradées..., et même faire alterner les différents axes de classification.

L'axe dominant de ces taxonomies, suivant qu'on choisit la nature biologique ou l'état, indique l'optique du cartographe. Dans notre cas, c'est-à-dire dans celui d'un milieu montagnard connaissant une augmentation de la population devenu catastrophique parce que beaucoup plus rapide que le rythme d'introduction des innovations techniques, sociales, culturelles... permettant d'y faire face, il nous apparaît fondamental d'organiser nos taxonomies en fonction de deux types de questions : d'une part, quel est et comment se traduit le déterminisme physique sur la répartition des unités de végétation et les différentes formes d'occupation des sols. D'autre part, quelle utilité les hommes ont-ils trouvée à ces différents types et quelles sont les conséquences de leur utilisation non seulement sur ces unités de paysage (destruction ou maintien) mais aussi sur les sociétés elles-mêmes.

De manière générale, les légendes doivent donc permettre de lire sur les cartes les axes déterminant la répartition et l'état des éléments cartographiés (ici la couverture végétale). Ainsi la légende de la carte du versant de Salmé (Centre du Népal) élaborée par J. Wiart donne-t-elle des indications sur la nature de la couverture végétale (dont l'action humaine est aussi très responsable ne serait-ce que par la destruction de forêts "utiles" alors remplacées par des espèces "inutiles") mais aussi sur son état et sa densité :

- l'étagement est exprimé par le choix des couleurs ;

- le camaïeu et les figurés sont utilisés pour exprimer les différenciations à l'intérieur des différents étages :

- camaïeu pour les essences ;

- figuré pour exprimer, dans les formations arborées, l'influence de l'exposition ou de la situation et, dans les formations non arborées, à la fois la nature et l'état de développement en relation direct avec l'utilisation par l'homme ;

- buissons-fourrés-arbustes-herbacées/haut-bas/ouvert-fermé/très abondant-abondant-développé-faible.

Une étude des différentes étapes d'une même chaîne permet de constater que les seuillages successifs des variables regroupent, dans le nom d'une classe, après, très souvent des noms de classes de même nature taxonomique : sapin-chêne ou forêt-claire-prairie par exemple. Il est évident cependant qu'on n'a pas affaire ici au même axe de classification : dans le premier cas il s'agit d'un apparentement par la nature du couvert

végétal, dans le second cas par la densité. Mais il n'en reste pas moins qu'il opère des regroupements dont les axes sont les mêmes que ceux qui ont guidé l'élaboration de la légende. On peut tirer de ce fait deux séries de conséquences :

2.1. Élaborer des cartes de structures : vers un système d'apprentissage.

L'image satellitaire brute est un moyen de perception du paysage et non encore d'expression : les traitements de classification et de regroupement des pixels en taxons introduisent de l'ordre dans cette perception transformant le "bruit" en information, l'image en carte ; il ne s'agit pas d'un appauvrissement de l'image mais bien d'un enrichissement. Pour les géographes, le discours sur un paysage n'est plus seulement la description d'éléments connexes ou emboîtés mais aussi et surtout l'expression de leurs relations fonctionnelles. Il s'agit là d'une autre forme de hiérarchisation qui consiste à classer ensemble des éléments hétérogènes liés par ces relations fonctionnelles : on définit et différencie un paysage de champs ouverts ou de bocage à partir de l'organisation des espaces agricoles et de leur utilisation, d'une structure de l'habitat...

Or, si une variable exogène a été utilisée par le système c'est qu'une telle relation existe et suffisamment univoque entre elle et les phénomènes cartographiés pour que leurs répartition ou état en soient modifiés ; parfois déterminés, souvent différenciés les uns des autres. Pourquoi alors ne pas utiliser ce fait comme outil non plus seulement de cartographie mais également de compréhension des paysages étudiés. Jusqu'à aujourd'hui en effet, on a introduit des variables dont on avait déjà constaté la pertinence ; il s'agit maintenant, par le biais d'un plus grand nombre de variables attachées au pixel, de laisser au système le soin d'identifier et d'évaluer cette pertinence. Et les différents éléments de la topographie ne sont pas, bien évidemment, les seuls des éléments structurant le paysage à avoir une expression spatiale. En effet par exemple, les positions respectives des différents éléments des paysages humanisés et les distances qui les séparent mais aussi leurs structures propres exercent une influence déterminante sur leurs différents états.

Dans le cas particulier qui nous occupe, le centre du Népal, sur un même finage, les dénivellations peuvent atteindre 3500 m sur une quinzaine de kilomètres. Le transport animal n'est connu que dans des secteurs très restreints, la majeure partie des biens est transportée à dos d'homme et les temps de transport affectent fortement les productivités des travaux et les contraintes imposées sur les systèmes de production par ces distances et la durée des déplacements sont extrêmement fortes ; en d'autres termes, les populations doivent essayer de minimiser les temps des déplacements et, par exemple, quand il s'agit de l'exploitation de la forêt, ce sont toujours les marges forestières, où les portions de forêts les plus proches des secteurs habités et/or cultivés ou pâturés qui sont exploitées tout d'abord. Il s'ensuit qu'il existe une relation directe entre l'état des forêts et non seulement leur distance aux villages, mais aussi la

1: Et les cartes font partie de ce discours.

structure de l'habitat : un habitat dispersé le long des marges forestières permet de diversifier les points de prélèvements en forêt et donc une moindre dégradation d'un secteur particulier, au contraire de l'habitat groupé.

Ces relations sont non moins évidentes à l'intérieur du territoire cultivé, l'intensification à l'intérieur d'une frange altitudinale diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne des lieux habités : selon le cas on a affaire à une seule série d'auroles concentriques autour du village, ou à un ensemble d'"îles" de cultures intensives autour des fermes isolées ou de hameaux dispersés sur le versant. Par ailleurs, on peut mettre en évidence des relations entre pression démographique, valeur des pentes ou/et types de sol mis en culture ; mais aussi des relations plus complexes où intervient la structure de l'habitat. (Blamont, 1983) : en cas d'augmentation de la population, la concentration de l'habitat pousse à une intensification des cultures autour du village plutôt qu'à une mise en culture des fortes pentes en bordure de territoire cultivé, à l'inverse de l'habitat dispersé.

Tous ces phénomènes ont pu être observés mais, d'une part les observations les concernant ne sont encore que d'un ordre qualitatif, d'autre part de nombreuses autres relations peuvent avoir échappé au chercheur de terrain. Le système, gardant en mémoire toutes les chaînes testées et les cartes produites, offre la possibilité de détecter des corrélations qui lui auraient échappé, même si elles ne sont pas totales, c'est-à-dire même si un facteur donné, représenté par une variable, n'est pas à lui seul responsable des localisations ou états des éléments de paysage, ce qui est rarement le cas. Par le biais des différents coefficients de contrôle, il devrait aussi permettre de quantifier les poids respectifs des différents facteurs.

Par ailleurs, il est peu probable que le thématicien n'ayant pas détecté de telles corrélations introduise des parcelles test représentatives pour toutes les variables ; *a fortiori*, il ne pourra introduire de règles déclaratives. Une des possibilités du système sera de poursuivre sa démarche après l'élaboration d'une carte terminale en rassemblant dans des parcelles test l'ensemble des pixels classés par les traitements et en construisant les règles propres à chaque variable en relation toujours avec la taxonomie première.

2.2. Les divers chemins vers une légende hiérarchisée : les nomenclatures.

Pour ce qui concerne la fonctionnalité du système il importe donc d'y introduire la possibilité :

— de suivre pendant un traitement l'un quelconque des axes de la taxonomie hiérarchisée pour opérer des regroupements de taxons (méta-classes) qu'il pourra traiter ensuite séparément donc par des chaînes différentes, utilisant des variables significatives spécifiques dans des ordres spécifiques ;

— d'élaborer des cartes de paysage en regroupant les unités de paysage en taxons exprimant leurs relations fonctionnelles (§.2.2).

Ceci ne peut se faire que si les noms des taxons — ou classes terminales — sont construits de telle manière qu'une analyse syntaxique par le système permette les regroupements ; par exemple :

["forêt de chênes" "dense"], ["forêt de chênes" "claire"]...

["forêt de sapins" "dense"], ["forêt de sapins" "claire"]...

["champs cultivés" "blé"], ["champs cultivés" "jachère"], ["pelouse" "jachère"]...

3. DE NOUVEAUX OUTILS : DE CIME A CIME2

Dans la première représentation de CIME, les outils syntaxiques pour la représentation des connaissances, ainsi que les mécanismes d'exploitation des connaissances de CIME ne permettent pas d'utiliser le modèle de manière optimale. En particulier, on ne peut y décrire qu'un seul type d'entités iconiques, les *pixels*. Les autres connaissances factuelles sont décrites à l'aide d'un seul type nommé *type général*. La pauvreté de cette représentation rendait difficile la prise en compte de la transformation dynamique de l'image. De même, les traitements étaient décrits de façon figée comme des procédures directement exécutables, ce qui rendait impossible la distinction entre choix raisonné d'une méthode et exécution d'un programme. Enfin CIME ne connaissant qu'un seul niveau de description de la taxonomie thématique, ne permettait pas la représentation d'une connaissance approfondie du contenu de la scène. C'est pourquoi nous avons envisagé de développer CIME2, qui n'est pas un système expert mais plutôt un ensemble cohérent d'outils logiciels (langage pour la représentation des connaissances et mécanisme d'exploitation) pour le développement de systèmes experts dans le domaine de l'interprétation thématique des images de télédétection. On décrira brièvement ici les outils qui permettent de représenter les hiérarchies conceptuelles et structurelles, dont il a été question dans les paragraphes précédents, et également de faire appel par l'intermédiaire des règles à un enchaînement raisonné de traitements d'image.

3.1. Simuler le processus d'interprétation.

Pour produire une cartographie, il faut envisager un système qui, en partant de concepts thématiques et d'une ou plusieurs images, permettra de transformer dynamiquement les données iconiques de départ afin de produire une image étiquetée, c'est-à-dire composée d'entités interprétées thématiquement. De façon schématique nous avons considéré qu'à chaque étape de l'analyse une transformation avait pour résultat une partition de l'image, chaque partie pouvant être interprétée de façon plus ou moins précise en termes thématiques, le but final étant de réduire autant que possible l'ambiguïté et l'imprécision de cette interprétation. Pour atteindre ce but on peut utiliser deux sortes de stratégies :

- une stratégie dite *ascendante* où la transformation de l'image, en partant des données iconiques initiales, a pour effet de regrouper de façon dynamique des entités iconiques pouvant être interprétées à l'aide de concepts de plus en plus abstraits ;

une stratégie dite descendante où la transformation de l'image, en partant des concepts thématiques, a pour effet de décomposer l'image en entités iconiques interprétables d'après ces concepts.

Le plus souvent, le spécialiste alterne les deux stratégies et les transformations d'image s'effectuent à l'aide de procédures numériques sélectionnées et activées par le système comme l'indique le schéma du Tableau 1. Il nous faut donc décrire les éléments que manipulera effectivement le système, c'est-à-dire les données image, les connaissances thématiques et enfin les traitements.

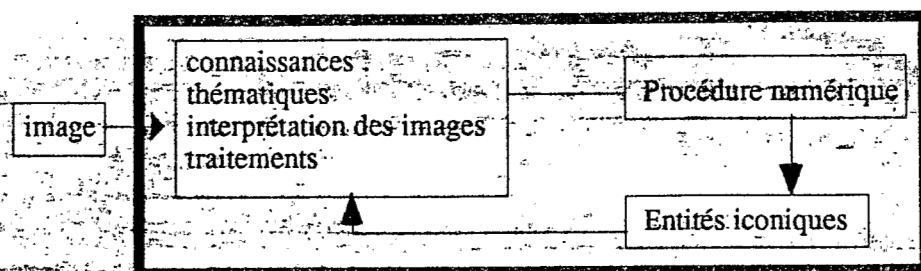


Tableau 1. Le processus d'interprétation d'image

3.2. Image et entités iconiques.

Toute opération d'analyse d'image est liée à la définition des éléments d'image sur lesquels va porter l'analyse. L'élaboration d'un système formel de représentation des images implique la définition de primitives, éléments de base de la représentation. Une primitive notée P_i est une parcelle d'image constituée d'un ensemble de points, la primitive la plus élémentaire étant le point de l'image ou pixel. Un ensemble d'attributs lui est attaché. Il peut s'agir de la radiométrie, de sa position exprimée en fonction d'un repère donné, mais aussi de données exogènes provenant d'autres sources que la donnée de télédétection, telles que l'altitude, la pente, etc.

Une entité est définie comme un fragment d'image regroupant un ensemble de primitives vérifiant certaines contraintes (telle que par exemple la définition de bornes numériques pour un attribut). Dans le cas général, la forme des entités dépend de l'ordre de prise en compte des données initiales (primitives et attributs). On appellera régions ces entités qui ont la propriété d'être des ensembles connexes. Les objets sont des ensembles composés de plusieurs régions. La description d'une entité implique la description de la distribution spatiale des primitives qui la composent. On appelle descripteurs du premier ordre ceux qui mettent en jeu les caractéristiques intrinsèques comme c'est le cas de l'histogramme et de l'histogramme bivarié. Les descripteurs du deuxième ordre sont ceux qui supposent l'analyse de caractéristiques jointes de paires ou groupes de primitives définis par une relation (par exemple, la proximité) comme c'est le cas des matrices de co-occurrences.

Par ailleurs, il est nécessaire de disposer de descripteurs de haut niveau tels que les descripteurs topographiques permettant l'évaluation de la *proximité*, l'*adjacence*, l'*imbrication*. On traitera de façon particulière le cas de l'*inclusion* de deux entités. En effet, la transformation dynamique de l'image (§ 3.1.) suppose l'agrégation ou la séparation des entités iconiques d'une étape à une autre du processus. Pour mémoriser cette transformation, il est nécessaire de pouvoir parcourir la *hiérarchie structurelle* des entités iconiques (passage d'un ensemble à ses composants). L'interprétation thématique doit en particulier impliquer la capacité de déduire le contenu thématique d'une entité du contenu de ses composants. Par exemple, si les pixels d'une région ont déjà été interprétés comme des pixels appartenant exclusivement à la catégorie "végétation", il faut pouvoir déduire que cette même interprétation vaut pour la région. Par ailleurs pour calculer les descripteurs du premier et du deuxième niveau d'une entité quelconque, il faut également pouvoir accéder aux entités d'un niveau inférieur. Compte tenu des différents modes de transformation de l'image (séparation et regroupement), on ne pourra parcourir cette hiérarchie qu'à travers deux niveaux consécutifs.

3.3. Les connaissances thématiques

3.3.1. La taxonomie des entités thématiques

Comme nous l'avons vu, les concepts thématiques permettant d'interpréter la scène sont organisés comme une taxonomie. Lorsqu'il s'agit de mettre en place une taxonomie à plusieurs niveaux, il faut exprimer de façon formelle le type de relation hiérarchique implicite. Classiquement on utilisera le passage d'un niveau de la taxonomie au niveau supérieur selon l'axe de spécialisation-généralisation, que l'on peut qualifier de *hiérarchie conceptuelle* qui ne doit évidemment pas être confondue avec la *hiérarchie structurelle* dont il a été question au paragraphe précédent. On utilisera pour exprimer cette hiérarchie le mot-clé *sorte de* couramment employé dans les bases de connaissances. On dira par exemple qu'une forêt dense est une *sorte de* forêt. Nous voyons ici que pour exprimer des taxonomies plus élaborées et construire un système pouvant produire des légendes intelligentes (§ 2.1.), il sera nécessaire d'y intégrer une analyse syntaxique et sémantique (Coulon, 86) des termes utilisés par le thématicien pour décrire le paysage à cartographier.

3.3.2. La description des entités thématiques

Nous venons de voir que le thématicien énumère et classe les entités composant, selon sa problématique, la scène. Il peut les décrire

par leurs caractéristiques intrinsèques. Ces caractéristiques (iconiques ou radiométriques) doivent alors être associées aux entités iconiques connues à l'état courant. Dans le cas contraire, elles supposent la recherche de nouvelles entités iconiques satisfaisant aux contraintes impliquées par les caractéristiques iconiques. Ainsi le Tableau 2 décrit l'entité thématique *forêt claire* à l'aide de ses caractéristiques iconiques et radiométriques.

entité thématique :	forêt claire	
entités iconiques :	régions	
taille	grande	valeur > 400
texture	hétérogène	variance > 50
bande rouge	basse	valeur moyenne < 20

Tableau 2 : caractérisation iconique et radiométrique d'une entité thématique

— par l'intermédiaire de leurs relations mutuelles, qui peuvent être d'inclusion ou spatiales. Les relations *d'inclusion* (permettant de passer des parties au tout et inversement) s'appliquent à la fois aux entités thématiques et aux entités iconiques. Cependant la décomposition structurelle d'une entité thématique ne permet pas de déduire l'entité iconique correspondante autrement que par la composition d'entités iconiques déjà interprétées, comme dans l'exemple suivant :

entité thématique : habitat composée de : maisons
voirie
jardins

Les relations spatiales entre deux entités thématiques font, elles, directement référence à l'organisation spatiale des entités iconiques correspondantes. Il peut s'agir de relation de *proximité*, *d'adjacence* ou *d'imbrication*, comme dans l'exemple suivant :

entité thématique : routes forestières
en relation spatiale avec forêt
type de relation : imbrication

3.4. Les traitements d'image

La transformation dynamique de l'image s'effectue au moyen d'outils d'analyse que l'on considère comme des données du système. Il s'agit de procédures numériques du traitement d'image. On considère ici que ces procédures sont connues et vont être utilisées en fonction du but poursuivi, c'est-à-dire l'interprétation des fragments d'image en fonction du modèle fourni par le thématicien. Il existe plusieurs types de traitements possibles d'une image que l'on peut classer suivant différents critères. Si l'on choisit comme critère la nature de l'action exercée sur l'image, on distinguera par exemple les opérations suivantes :

- rectification géométrique,
- amélioration d'image (modification de la dynamique, lissage et convolution, transformée de Fourier),
- opérations à plusieurs images (classifications multispectrales, combinaisons linéaires ou non, de plusieurs images),
- détection de lignes et de contours.

On peut aussi classer les traitements en se référant au type de résultat obtenu : on pourrait distinguer ainsi les traitements suivants :

- prétraitements (compression, corrections géométriques et radiométriques)
- segmentation
- classification

Ainsi, plusieurs principes peuvent être appliqués et aucun d'entre eux n'a pu servir de référence universelle pour les systèmes de traitement d'images. En réalité cette représentation hiérarchique des traitements est guidée par l'application. Dans notre cas, on utilisera une hiérarchie qui correspond à la fois aux deux critères de classement précités (Tableau 3).

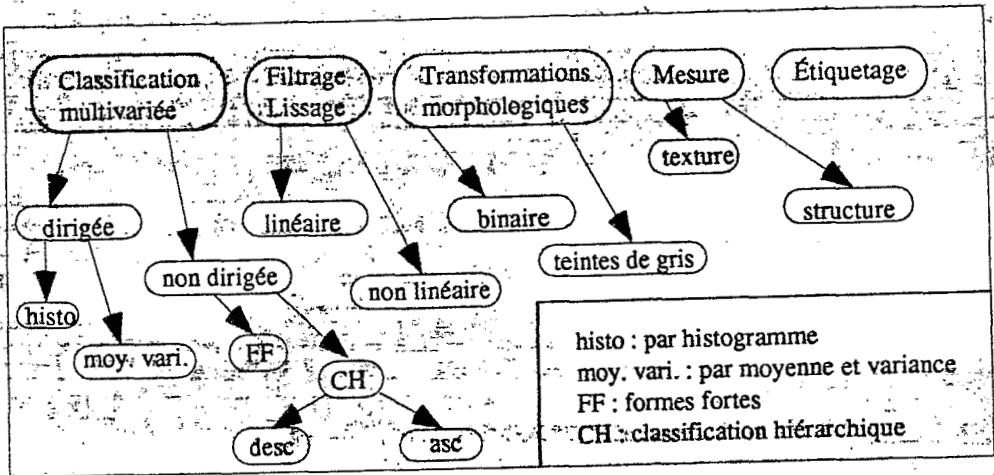


Tableau 3 — Classification hiérarchique des traitements d'image

Le spécialiste classe un traitement donné à l'intérieur de cette hiérarchie. L'avantage de cette représentation hiérarchique est de permettre l'utilisation des mécanismes d'héritage : une méthode particulière héritera des propriétés (en termes d'attributs) de la classe à laquelle elle appartient. Par exemple toute méthode de classification dirigée impliquant la donnée de parcelles d'entraînement, les méthodes particulières DNP et SEBEST (méthode de SEBESTYEN) hériteront de cette caractéristique. En construisant cette hiérarchie le spécialiste peut guider l'utilisateur vers une ou des méthodes particulières tout en l'aidant à formuler ses requêtes. On peut par exemple imaginer le dialogue suivant entre le système et l'utilisateur :

- S : voulez-vous effectuer une classification multivariée ?
 U : oui.
 S : Voulez-vous diriger la classification ?
 U : oui.

U : P1.

S : voulez-vous sélectionner le mode de discrimination ?

U : non.

S : deux méthodes peuvent être utilisées : DNP et SEBEST, etc...

Les méthodes sélectionnées par le système seront prêtes à être mises en œuvre par des procédures informatiques dès que l'ensemble des paramètres nécessaires à leur exécution aura été spécifié. Il s'agit, dans le cas d'une classification multivariée, du nombre des images, de leur nature, du nombre de classes en sortie, du nom de l'image de sortie. Ces paramètres seront en partie fournis par l'utilisateur et en partie imposés par le système à l'aide du contexte courant. En effet pour atteindre le but fixé, une chaîne (ou séquence) de traitements devra être construite, dans laquelle le traitement

n
à relation

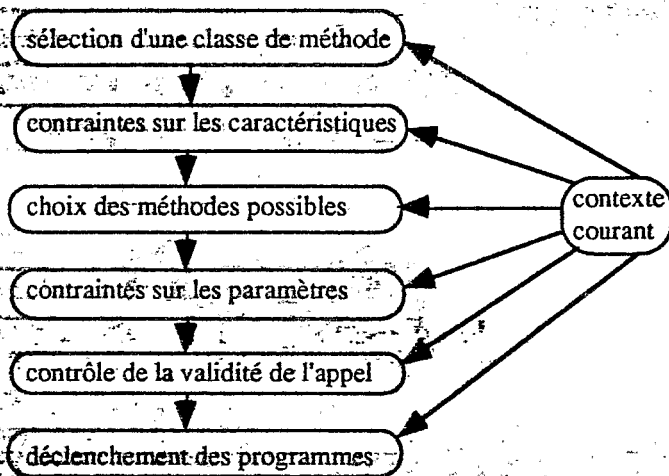


Tableau 4 — Déclenchement d'une procédure de traitement.

Il s'agit là d'une condition nécessaire mais non suffisante. Par exemple, si le traitement de l'étape (n-1), a produit une image classée, il n'est pas cohérent d'effectuer un filtrage ou une transformation morphologique en teintes de gris à l'étape n. Le contrôle de la validité et de la cohérence doit donc être effectué par le système en fonction du contexte courant (base de faits à l'instant t). Le déclenchement d'une procédure informatique peut être représenté par le schéma du Tableau 4.

L'application d'un tel principe permet à l'utilisateur d'énoncer, s'il le désire, des éléments conduisant au choix d'une méthode ou d'une famille de méthodes sans avoir à connaître les programmes qui permettent sa mise en œuvre. En revanche, plus les contraintes qu'il énonce quant à la méthode seront faibles, plus nombreuses seront les méthodes concurrentes. L'expert doit donc, à travers des règles, prédire et contrôler la mise en œuvre de plusieurs méthodes concurrentes, quelle que soit l'étape. Pour l'aider à gérer les choix de méthodes, sans avoir à énoncer toutes les combinaisons possibles des méthodes et des paramètres, on a choisi d'utiliser un algorithme de gestion d'hypothèses nommé C.H. (pour "Choix Hypothèses") (Etifier, 1989) qui permet d'effectuer automatiquement les choix de méthodes et d'arguments en fonction de données contenues dans une base spécifique, la base de connaissances de contrôle, décrivant les méthodes et les arguments associés, et des règles de contrôle présentes dans la base de règles. L'expert, par l'intermédiaire des règles, fait appel à cet algorithme pour essayer les différentes méthodes et les différents arguments permettant d'atteindre un même but. La sélection de la méthode m_1 devant être appliquée aux données à l'étape n de la chaîne sera effectuée conformément au schéma du Tableau 5.

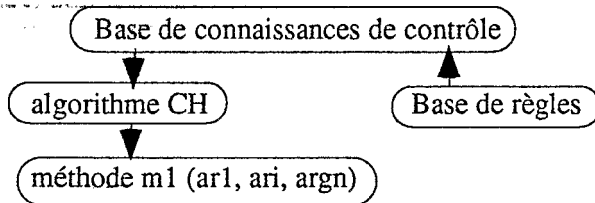


Tableau 5 — Choix d'une méthode

Le spécialiste pourra construire autant de bases de connaissances de contrôle qu'il devra effectuer de choix de traitement; chacune de ces bases étant spécialisée dans la résolution d'un problème particulier de traitement d'image (classer les pixels, évaluer la texture d'une région, etc...).

4. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU FORMALISME ADOPTÉ

D'après ce que nous venons de voir, des éléments très divers doivent entrer dans la composition du système que nous envisageons : pour représenter ces éléments il faut adopter un formalisme satisfaisant à la fois l'exigence de clarté permettant aux thématiciens de les manipuler directement sans avoir recours à un langage de programmation, et l'exigence de robustesse et d'opérationnalité de tout programme informatique. Rappelons qu'un système expert est l'association d'un logiciel informatique, le *moteur d'inférence* et d'une expertise, la *base de connaissances*. Le moteur d'inférence est un programme très général, indépendant des connaissances. Il est

dirigé à la fois par les règles et les faits. Ceux que nous avons utilisés (Monjanel, 1987), (Etifier, 1988) ont été conçus pour pouvoir interpréter les bases de connaissances que nous développons. Nous ne nous intéresserons ici qu'à la partie du système relative aux bases de connaissances.

4.1. La syntaxe des faits

Dans CIME les faits étaient représentés par le triplet classique :

(*objet, attribut, valeur*) (I)

où : *objet* correspond au nom de l'objet
attribut correspond au nom de l'un des attributs qui caractérise l'objet
valeur correspond à la valeur ou à un intervalle de valeurs possibles de l'attribut pour l'objet décrit

Dans CIME2 (Etifier, 88), on a enrichi la syntaxe en exprimant chaque fait sous la forme d'un quadruplet :

(*type, objet, attribut, liste*) (II)

où : *type* désigne la nature de l'objet décrit
liste désigne soit les valeurs de l'attribut, soit les autres objets avec lesquels l'objet désigné possède un lien hiérarchique

4.2. La syntaxe des règles

Comme nous l'avons déjà vu, il s'agit de *règles de production* de la forme :

Si *conditions* Alors *conclusions*

Dans la partie *conditions*, on pourra exprimer des relations concernant des faits tels qu'ils sont décrits plus haut :

Si *type, attribut, objet, comparateur, valeur* (III)

où : *comparateur* est un comparateur logique : "=", "<"
 ou arithmétique : "<", ">", "≤", "≥",

Il est également prévu de :

— comparer la valeur d'un attribut à celle d'un attribut d'un autre objet (ou du même) en écrivant :

Si *attribut1(objet1), comparateur, attribut2(objet2)*

— paramétrer les objets par des *variables* de la façon suivante :

Si *type ?x = pixel*
altitude ?x < a

Si l'on utilise plusieurs variables la comparaison entre attributs peut s'écrire

Si *attribut ?x, comparateur, attribut ?y*

5. REPRÉSENTATION DES CONNAISSANCES

La syntaxe utilisée pour représenter les différentes catégories de connaissances est similaire à toutes celles qui sont classiquement utilisées dans l'écriture des systèmes de production. Il a cependant été nécessaire d'y ajouter des éléments afin d'enrichir l'expression des connaissances mises en œuvre dans l'interprétation des images de télédétection.

5.1. Représentation des entités iconiques

Pour représenter les entités iconiques comme des données factuelles du système, on utilisera le formalisme tel qu'il est mentionné en (II) comme le montrent les exemples du Tableau 6.

type : pixel	nom : P_i	attributs : radiométrie :	r_1, r_2, r_3, r_4
type : région	nom : R_i	attributs : texture :	hétérogène
		moyenne :	50
		variance :	20
		surface :	100

Tableau 6 — Représentation des entités iconiques

Les attributs permettent ici de caractériser l'entité de façon intrinsèque par des descripteurs de premier ou de deuxième niveau. Mais (§ 3.2) ce type de caractérisation ne suffit pas. Il faut pouvoir décrire les relations *topographiques* entre les entités iconiques par l'intermédiaire de relations du type : *proximité*, ou *adjacence*. Ces relations seront évaluées par des fonctions propres au système (il s'agit de fonctions booléennes [i.e. dont le résultat est vrai ou faux]) introduites par des mots-clés répertoriés dans un lexique. Ces fonctions correspondent la plupart du temps à l'application d'un algorithme de calcul permettant d'évaluer les relations correspondantes et sur lequel nous ne nous étendrons pas ici puisqu'il s'agit d'outils d'analyse d'image dits de "bas niveau". On pourra ainsi utiliser ces mots-clés comme des comparateurs en condition de règle de la façon suivante :

Si *adjacent?*x ?y

La prémisse sera vraie ou fausse suivant le résultat retourné par la fonction.

Les relations d'inclusion entre les entités iconiques sont décrites à l'aide d'une liste attachée à un objet suivant le formalisme décrit en (II). La liste correspond soit à une *liste de propriétés* P_i , soit à une *liste de liens hiérarchiques* H_i . Dans la liste ($P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$), les P_i sont les propriétés que doivent vérifier les éléments *constituant* l'objet décrit. Chaque P_i a alors la structure suivante : (*type, attribut, comparateur, valeur*).

Par exemple le fait suivant :

(région, 22 constituants, ((pixel, altitude, <, 3000), (pixel, pente, >, 0.4)))

doit se lire : "La région 22 est constituée de pixels dont l'altitude est inférieure à 3000 mètres et la pente supérieure à 40%".

Dans la liste (H_1, H_2, \dots, H_p) les H_i ont la structure particulière suivante :

(T_p, N_p)

où T_p est le type du père hiérarchique c'est-à-dire de l'élément dont l'objet est un constituant

N_p est le nom du père

Par exemple le fait suivant : (pixel, 4, père, région, 1)

doit se lire : "le pixel numéro 4 est un constituant de la région numéro 1".

5.2. La représentation des connaissances thématiques.

Contrairement aux entités iconiques, les entités thématiques seront désignées comme les valeurs d'un attribut particulier que nous avons appelé *classes*, dans la mesure où les concepts utilisés servent dans notre système, à classer des entités iconiques. Les entités thématiques sont ainsi représentées sous la forme d'un attribut décrivant les entités iconiques. On a utilisé le pluriel du mot *classe* car il s'agit d'un attribut *multivalué* dans la mesure où, à une étape quelconque du processus, plusieurs entités thématiques possibles peuvent être retenues pour interpréter une même entité iconique. Dans le Tableau 7, on a repris l'exemple du Tableau 6, auquel on a adjoint la représentation du contenu thématique d'une entité iconique particulière à l'aide du formalisme décrit en (II).

type : région	nom : R_i	attributs :	texture :	hétérogène
			moyenne :	50
			variance :	20
			surface :	100
			classes :	forêt, habitat

Tableau 7—Description thématique d'une entité iconique

L'interprétation peut s'effectuer à l'aide de règles : on utilisera le formalisme des règles de production décrit en (III) pour exprimer la caractérisation iconique et radiométrique d'une entité géographique. Ainsi, dans l'exemple du Tableau 8, on représente les connaissances à l'aide d'une règle de production où l'attribut *classes* apparaît en partie *conclusions* et où les entités iconiques associées apparaissent en partie *conditions*.

Si	type ?x = région
	taille ?x = grande
	texture ?x = hétérogène
	bande rouge ?x = basse
Alors	classes ?x = forêt claire

Tableau 8—Caractérisation iconique et radiométrique d'une entité thématique à l'aide d'une règle

Nous avons vu (§3.3) que l'expression des connaissances thématiques supposait la donnée d'une taxonomie d'entités thématiques qui peut être décrite comme une relation hiérarchique entre entités selon l'axe de spécialisation-généralisation. Elle implique également la description de relations spatiales et d'inclusion. Pour représenter ces relations comme des relations entre objets, nous avons choisi de considérer que l'attribut *classes* est un objet de type *attribut* et que les valeurs prises par cet attribut sont des objets de type *valeur* (par exemple *forêt* est un objet de type *valeur*). On peut de cette façon décrire les relations entre ces objets, et en particulier la taxonomie des entités thématiques à l'aide du mot-clé *sorte de*. On exprimera par exemple que *forêt_claire* est une sorte de *forêt* de la façon suivante :

```

type :      valeur
nom :      forêt_claire
attributs : sorte_de : forêt

```

L'intérêt d'une représentation du lien hiérarchique entre entités thématiques pour décrire le processus d'interprétation est que les relations spatiales et d'inclusion entre entités thématiques seront représentées de la même façon que les relations entre entités iconiques :

```

Si type ?x = région
   taille ?x = grande
   texture ?x = hétérogène
   classes ?x = sorte_de forêt
Alors classes ?x = forêt_claire

```

5.3: La représentation des traitements

Les différents traitements sont représentés comme des objets de type *traitement*. Ils sont décrits par une suite d'attributs permettant de définir les conditions nécessaires à leur application aux données iconiques. Ces attributs peuvent être :

```

Les Entrées
Les Paramètres d'entrée
Les Sorties
Les Paramètres de sortie
Le Contrôle

```

Les Entrées et les Sorties sont obligatoirement des données iconiques, contrairement aux Paramètres d'entrée qui représentent des informations numériques ou symboliques permettant d'exécuter les traitements, ou aux Paramètres de sortie qui correspondent aux résultats des traitements qui ne sont pas des entités iconiques. Le Contrôle représente les contraintes permettant de valider la cohérence des résultats. On indiquera également la *catégorie* du traitement décrit. Cet attribut, par analogie à l'attribut *classes* (§ 5.2) va permettre de décrire la hiérarchie des traitements évoquée au Tableau 3, à l'aide du mot-clé *sorte de*. Ainsi, un traitement qui appartient à la catégorie *classification dirigée*, appartiendra de ce fait à la catégorie *sorte_de classification multivaluee*. Il héritera donc de toutes les propriétés des traitements apparte-

nant à cette dernière catégorie, et en particulier des valeurs de leurs attributs. Cela permet de spécifier certains descripteurs d'un traitement en fonction de sa catégorie, comme l'indique la règle suivante :

Si type ?x = traitement
 catégorie ?x = sorte de classification dirigée
 Alors Entrées ?x = pixels_entraînement

Dans l'exemple du Tableau 9, on trouvera la description générale du traitement DNP. Comme tous les autres traitements, il ne pourra être exécuté que lorsque l'ensemble des attributs valuables (*i. e.* différents de ()) seront valués.

type :	traitement
nom :	dnp
attributs :	Catégorie : segmentation dirigée
	Entrées : pixels_entraînement
	Sorties : ()
	Paramètres_Entrées : ()
	Paramètres_sortie : segments
	Contrôle : nombre_de_segments

Tableau 9 — Description d'un traitement

CONCLUSION

La corrélation entre les taxons d'un thématique et la réflectance de la surface du sol n'est pas évidente et rarement immédiate. Il ne revient pas alors au thématique de changer ses taxons pour s'adapter à cette réflectance mais bien plutôt d'introduire dans les traitements des données exogènes dont la corrélation avec les unités de paysage qu'on souhaite cartographier sera plus évidente et aidera à lever les incertitudes liées à la radiométrie. Bien plus, les moyens numériques de traitement et les possibilités offertes par les recherches menées en intelligence artificielle sur les systèmes experts permettent maintenant d'utiliser la télédétection non pas seulement pour acquérir des connaissances mais aussi pour construire des discours explicatifs des réalités observées, c'est-à-dire produire de véritables cartes comportant, certes, tous les éléments visuels nécessaires à la lecture des informations qu'elles contiennent mais également, et surtout, des taxonomies hiérarchisées permettant la lecture de l'organisation des réalités cartographiées...

BIBLIOGRAPHIE

- BLAMONT D. (1987) - Cartographie de la végétation et de l'occupation des sols au Népal Central à partir d'images Landsat acquises en mars 1977. in *La cartographie thématique des résultats de la télédétection*. Actes du 4^e Colloque internat. du G.D.T.A. p. 222-229.
- BLAMONT D. (1983) - Un village de la zone sous-himalayenne : Kimtang (Népal). in *Annales de Géographie* n° 513. Paris, p. 531-547.
- BLAMONT D., MERING C., PARROT J.-F. (1984) - Essai de classification des unités de paysage en région montagneuse. *Espace Géographique* n° 3, p. 224-232.
- BLAMONT D., MERING C., PARROT J.-F. (1984) - Numerical processes for identification of landscape units in mountainous areas. *Actes du XV^e Congrès de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection*. Rio de Janeiro.
- BLAMONT D., MERING C. (1987) - Use of remote sensing for vegetation and landuse mapping in mountainous areas : the case of Central Nepal. *Adv. Space. Res.* vol. 7 n° 3, pp. 41, 46 (COSPAR).
- CELEUX G., LECHEVALIER Y. (1980) - Méthode de discrimination non paramétrique asymptotiquement efficace au sens de Bayes. *Rapport de recherche* n° 52. INRIA.
- COULON D., KAYSER D. (1986) - Informatique et langage naturel. *Revue Technique et Sciences Informatiques*, 86 02, p. 103-128.
- ETIFIER A. (1988) - Application des systèmes experts à la cartographie par télédétection. Document multigraphié, ORSTOM, Paris. Rapport de stage de DESS.
- ETIFIER A. - Les algorithmes particuliers de CIME2. *Actes des Journées de Télédétection de Bondy*, collection Colloques et Séminaires, Ed. ORSTOM, Paris. (à paraître).
- KODRATOFF Y. (1986) - *Leçons d'Apprentissage Symbolique Automatique*, Ed. Cepadues, Toulouse, 189 p.
- LAURIÈRE J.-L. (1988) - *Intelligence Artificielle, Tome 2, représentation des connaissances*, Ed. Masson, Paris, 196 p.
- MERING C., BLAMONT D., GANASCIA J.-G., MONJANEL F. (1988) - CIME, une application des systèmes experts à la télédétection. *Actes des 8^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications*, Vol. 3, Avignon, pp. 427, 448.
- MERING C., BLAMONT D. (1989) - Application des Systèmes Experts à la Cartographie par Télédétection. Actes du Colloque : *La recherche et les satellites à haute résolution SPOT et LANDSAT TM* (Orléans 17-18-19/1/1989). Bul. n° 114 de la Revue de la S.F.P.T. 3 pages.
- MONJANEL F. (1988) - Système expert appliqué à la télédétection. Document multigraphié, ORSTOM, Rapport de stage de DESS.
- Equipe SAN I.G.N. FRANCE (1978) - Modèle d'ensoleillement calculé à partir du M.N.T. de MASSON D'AUTUME. I.G.N.