

DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES EXPERTS POUR LA CARTOGRAPHIE PAR TELEDETECTION

Catherine MERING

RESUME

Une carte thématique réalisée à partir de l'analyse des données satellitaires résulte des choix opérés par le thématicien quant à la taxonomie de référence, à la sélection des données de base (données satellitaires et données géocodées, zones-test matérialisant la réalité terrain), aux traitements numériques à appliquer aux données, et à leur séquençement. Le thématicien préside également à l'évaluation des résultats intermédiaires ou finaux. Ces décisions résultent de ses connaissances thématiques et de son expérience de l'analyse et de l'interprétation des images satellitaires. Aussi, afin de reproduire non seulement une carte mais l'ensemble de la méthode cartographique utilisée dans un cas donné, nous nous sommes fixés pour objectif de décrire le raisonnement du thématicien élaborant une carte "en laboratoire" à l'aide des méthodes numériques de traitement d'image. Il s'agit d'un problème qui ne peut être résolu à l'aide d'un algorithme général. C'est pourquoi nous avons eu recours aux méthodes de l'intelligence artificielle particulièrement adaptées à la description des processus cognitifs.

Afin de permettre la généralisation d'une approche cognitive en télédétection indépendamment de la thématique envisagée et du milieu à décrire, nous nous efforçons de concevoir un mode de représentation et d'exploitation des connaissances adapté à l'expression de l'expertise invoquée. Dans cet article, nous proposons plus précisément une représentation des entités iconiques, des traitements d'image invoqués, et des concepts utilisés pour interpréter l'image.

I. POURQUOI DES SYSTEMES EXPERTS EN TELEDETECTION ?

Lors de l'exploitation des données satellitaires permettant de produire une première carte thématique sous la forme d'une image étiquetée, les phases d'analyse et d'interprétation sont étroitement liées. Toutefois, alors que les premières peuvent être décrites formellement dans la mesure où elles correspondent à des séquences de traitement d'images, les secondes, qui font largement appel aux connaissances thématiques du spécialiste, ne sont jusqu'ici pas formalisées.

Par conséquent, on ne possède pas la trace de l'ensemble du processus qui a permis d'interpréter le contenu de la scène. Il en résulte donc une non reproductibilité relative de la méthode utilisée. On se trouve de ce fait dans l'impossibilité d'évaluer son degré de généralité.

Pour remédier à ce handicap, nous avons choisi d'explicitier au sein d'un même programme informatique l'ensemble de la méthode cartographique. En dehors de l'image satellitaire proprement dite, les données manipulées par ce programme sont constituées par les traitements d'images invoqués lors des phases d'analyse et les connaissances thématiques invoquées lors des phases d'interprétation. L'objectif d'un tel programme est de reproduire la démarche du thématicien qui analyse et interprète les images de télédétection. L'intérêt qu'il y a à réaliser de tels programmes est aussi bien d'ordre ergonomique, dans la mesure où ils permettent de guider l'utilisateur par une expertise existante, que scientifique dans la mesure où ils permettent d'explicitier l'ensemble d'une démarche et rendent de ce fait possible une confrontation avec d'autres démarches.

Pour réaliser ces systèmes à base de connaissances nous avons eu recours aux techniques de l'Intelligence Artificielle et notamment à celles des Systèmes Experts dont l'un des objectifs consiste précisément à formaliser et de programmer les processus cognitifs.

Après avoir exposé les principes que nous avons retenus pour le développement de tels systèmes appliqués à la télédétection, nous les illustrerons en décrivant les éléments et le fonctionnement de CIME, un prototype existant [MERING et al 88], et de CIME2, un système en cours d'élaboration [ETIFIER 88].

II. IMAGES SPATIALES ET CONNAISSANCES

II.1. Entités géographiques et entités iconiques

L'utilisation des images de télédétection dans le cadre d'une recherche thématique suppose une mise en relation de deux types d'objets concrets de nature hétérogène: les objets que l'on peut observer et mesurer sur le terrain, que l'on appellera *entités thématiques* et les objets que l'on peut observer et mesurer sur l'image et que l'on appellera *entités iconiques*.

Ces modes de mise en relation peuvent être très différents. Un mode couramment utilisé consiste à effectuer l'analyse comparative des mesures

physiques effectuées in situ sur une certaine catégorie d'objets, et les données radiométriques prélevées sur les fragments d'images supposées correspondre à ces mêmes objets. Ce type d'approche, basé sur des considérations physiques et statistiques, peut permettre, par extrapolation des résultats de l'analyse, d'interpréter tout ou une partie de la scène [CERVELLE 89].

Pour notre part, nous nous intéresserons ici à l'explicitation d'un mode de relation indirect: il s'agit de l'analyse de l'image de télédétection à la lumière de *connaissances thématiques*. Nous supposons pour cela qu'il existe des règles suffisamment générales permettant l'interprétation d'une scène satellitaire indépendamment de mesures systématiques effectuées sur le terrain correspondant. Dans cette perspective, les seuls objets concrets analysés seront les entités iconiques. La connaissance thématique sera exprimée à l'aide de concepts désignant soit les entités thématiques proprement dites soit les relations entre ces entités. L'interprétation de l'image consistera alors à mettre en correspondance les entités iconiques et les concepts thématiques. C'est ce processus que nous tenterons de formaliser.

II.2. Les différents volets du savoir utilisé dans l'interprétation thématique des images satellitaires

La démarche que nous proposons suppose l'existence d'un savoir portant sur le contenu de l'image et sur les outils permettant l'extraction de ce contenu. Ce savoir précède l'analyse d'image proprement dite.

On peut considérer que l'activité d'analyse et l'interprétation des images satellitaires suppose la coopération de *sources de connaissances* variées. [HATON 87]. Nous en avons, pour notre part dénombré trois qui se rattachent à des domaines ou à des savoir-faire différents :

Nous considérons tout d'abord le savoir du *thématicien*, qui le rend apte à décrire l'espace analysé à l'aide de concepts propres à sa discipline. (nature des sols pour le pédologue, ensembles lithologiques pour le géologue, forme du relief pour le géomorphologue, couverts végétaux pour le botaniste ...). Quelle que soit la thématique envisagée, ce savoir passe toujours par la constitution d'une taxinomie ¹.

D'autre part, il existe un savoir relatif à l'interprétation thématique des images satellitaires. Par exemple, les données satellitaires contiennent une information concernant la radiométrie des objets observés liée aux propriétés de réflectivité de leurs composants (minéral, eau, végétal). La capacité à reconnaître une entité à l'aide de sa *radiométrie*, relève du savoir du *télédécteur*, habitué à interpréter la signature spectrale des objets. Par ailleurs l'image spatiale contient également une information relative à la texture à la géométrie et plus généralement à l'organisation spatiale des objets composant le paysage ². Le savoir faire du *photo-interprète* le rend précisément apte à analyser et à reconnaître ces formes et ces textures en fonction de leur contexte, qu'il s'agisse d'un paysage humanisé (quadrillage des zones urbanisées, parcellaires agricoles..) ou naturel (alignement de dunes, moucheté de la végétation des zones arides, modelé des massifs

¹ " Dans toute étude, le géographe classe les éléments composant l'espace". (Olivier Dollfus dans "l'Analyse géographique", P.U.F., Coll. "Que Sais-je", Paris, 1972).

² "Il existe donc une banalité des formes dont l'analyse offre autant d'intérêt que celle de leur singularité". (Olivier Dollfus dans "l'Analyse géographique", P.U.F., Coll. "Que Sais-je", Paris, 1972).

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 [NAGAO 80]

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.

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 2.

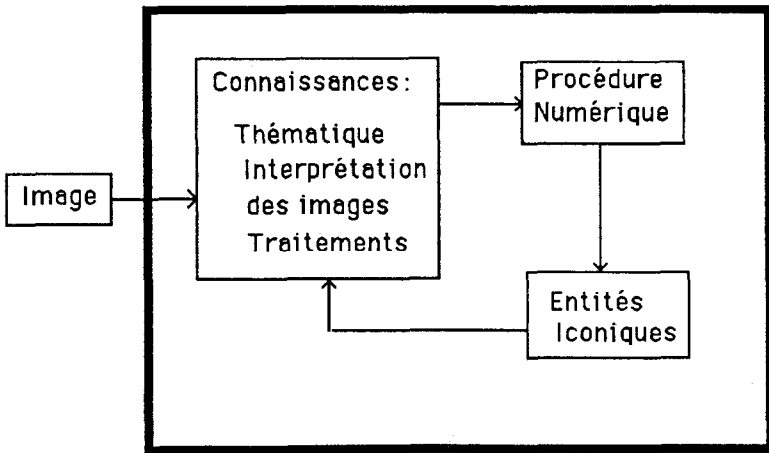


Tableau 2 : Le processus d'interprétation d'image

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.

III.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 le définition de primitives, éléments de base de la représentation .

Une primitive notée Pi 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 sont attachés. Il peut s'agir de la radiométrie, de sa

montagneux)¹.

Enfin, nous supposons qu'il existe un savoir relatif aux *traitements d'image* permettant d'extraire à partir d'une image numérique, des informations nécessaires à son interprétation. Ce savoir est de nature à orienter les choix des traitements en fonction des caractéristiques intrinsèques de l'image analysée et des objectifs définis en amont par les deux autres sources de connaissances. Il permet également de définir les conditions pratiques d'activation des traitements en fonction d'un contexte donné.

Ces différentes sources de connaissances ne sont pas forcément organisées de façon hiérarchique mais peuvent coopérer de façon plus ou moins complexe comme le montre le Tableau 1.

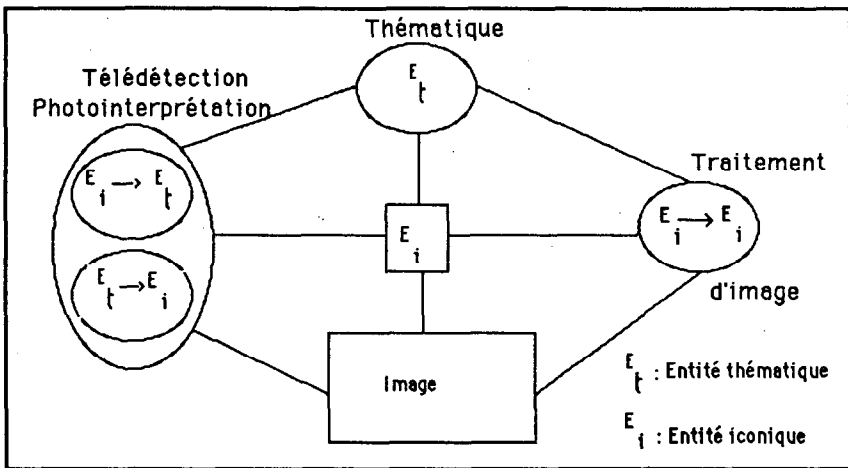


Tableau 1 : Les connaissances utilisées en interprétation d'images satellitaires

III. ELEMENTS D'UN SYSTEME A BASE DE CONNAISSANCES DANS LE DOMAINE DE LA TELEDETECTION

III.1. Le processus d'interprétation

Nous suivons la définition du processus d'interprétation du signal qu'a donnée Jean Paul Haton, à savoir : "l'interprétation d'un signal peut être schématisée comme le processus de transformation progressive de données physiques issues du monde extérieur en une description mettant en oeuvre des traitements, des informations, et des connaissances variées, d'autant plus complexe que le signal traité est plus encodé". [HATON 87]. Pour notre part, nous envisageons le développement de systèmes qui, en partant de concepts thématiques et de la donnée d'une ou plusieurs images, permettront de transformer dynamiquement les données iconiques de départ afin de produire une image étiquetée, c'est à dire composée d'entités interprétées thématiquement.

¹On trouvera un exemple de ce type d'expertise aux pages 45-50 de l'ouvrage de Pierre Gondard "Des cartes Discours pour une méthode", Editions de l'ORSTOM, coll Etudes et Thèses, 1988, 176p.

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.¹

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).

Il faut remarquer que dans le cas général, la forme de entités dépend de l'ordre de prise en compte des données initiales (primitives et attributs).

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 de l'image comme c'est le cas de l'*histogramme* et de l'*histogramme bivarié*.

Les descripteurs du deuxième ordre sont ceux qui supposent l'analyse des caractéristiques jointes de paires ou groupes de primitives définis par une relation (par exemple, la proximité) comme c'est le cas des *matrices de cooccurrences*.

Par ailleurs il est nécessaire de disposer de descripteurs de haut niveau tels que les descripteurs topographiques permettant l'évaluation de la *proximité* ou l'*adjacence*. On traitera de façon particulière le cas de l'*inclusion* de deux entités. En effet, comme il a été dit plus haut, à propos du processus d'interprétation (cf §3.1), l'image est transformée de façon dynamique, ce qui 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 à 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 transformations de l'image (séparation et regroupement), on ne pourra parcourir cette hiérarchie qu'à travers deux niveaux consécutifs.

III.3. Les connaissances thématiques

III.3.1. La taxinomie des entités thématiques

Nous supposons qu'en amont de toute analyse d'image, on dispose de concepts thématiques permettant d'interpréter la scène. Comme nous l'avons vu, ces concepts sont organisés comme une taxinomie:

La représentation symbolique d'une taxinomie monodimensionnelle nécessite seulement la définition symbolique des entités considérées. On énumère alors une liste de noms symboliques sans décrire de relations entre les entités. On définit par exemple la liste suivante: *forêt, zones cultivées,*

¹ Ces données proviennent souvent d'informations géocodées redéfinies à partir des pixels de l'image satellitaire.

prairie.

Lorsqu'il s'agit de mettre en place une taxinomie à plusieurs niveaux, il convient de choisir un mot clé approprié pour exprimer le type de relation hiérarchique implicite dans une taxinomie. Classiquement on utilisera le passage d'un niveau de la taxinomie au niveau supérieur selon l'axe de spécialisation-généralisation.[VOGEL 88]. On dira par exemple qu'une forêt dense est une *sorte de* forêt. Pour illustrer ce propos, nous avons représenté sur le Tableau 3 une taxinomie à trois niveaux :

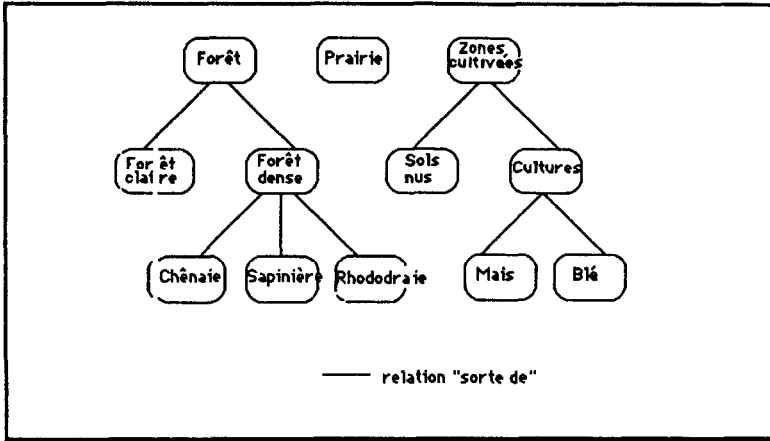


Tableau 3 : taxinomie d'entités thématiques

III.3.2. La description des entités thématiques

Nous venons de voir que le thématicien énumère et classe les entités composant la scène. Il peut également les décrire par leurs caractéristiques intrinsèques. Il peut s'agir des caractéristiques iconiques ou radiométriques. Elles 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. On peut ainsi décrire l'entité thématique *forêt claire* à l'aide de ses caractéristiques iconiques et radiométriques comme dans l'exemple du Tableau 4.

entité thématique: forêt_claire

entités iconiques : régions			
surface	grande	valleur	>400
texture	hétérogène	variance	>50
bande_rouge	basse	valleur_moyenne	<20

Tableau 4: caractérisation iconique et radiométrique d'une entité thématique

La description des entités thématiques peut également se faire par l'intermédiaire des relations existant entre ces entités, ces relations pouvant être structurelles ou spatiales.

On appelle relations *structurelles* celles qui permettent de passer des parties au tout dans l'organisation structurelle des entités, par composition ou décomposition. Elles 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 voierie 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	<i>en relation spatiale avec</i>	forêt
	<i>type de relation</i>	imbrication

III.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 de traitement d'image. On considère ici que ces procédures sont connues et vont être utilisées en fonction du but poursuivi, c'est à dire de 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 les 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

Comme on le voit, plusieurs principes peuvent être appliqués et aucun d'entre eux n'a pu servir de référence universelle pour les systèmes de traitement d'image. [AMAT 87].

En réalité cette représentation hiérarchique des traitements est guidée par l'application. Dans notre cas, comme le montre le Tableau 5, on utilisera une hiérarchie qui correspond à la fois aux deux critères de classement précités.

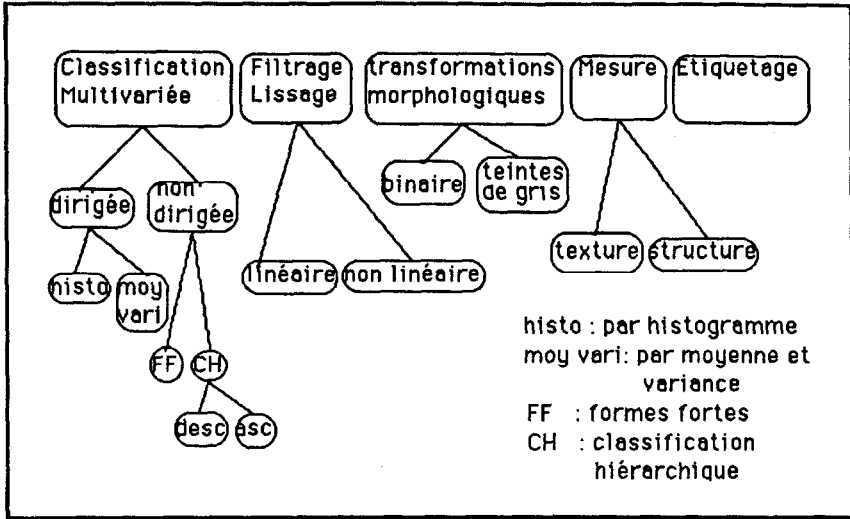


Tableau 5 : classification hiérarchique des traitements d'image

Le spécialiste classe un traitement donné à l'intérieur de cette hiérarchie. L'avantage d'une représentation hiérarchique, dans ce cas, est qu'elle permet d'utiliser les mécanismes d'héritage : une méthode particulière héritera des propriétés (en termes d'attributs) de la classe à laquelle elle appartient .

Par exemple une méthode de classification dirigée implique la donnée de parcelles d'entraînement. C'est ainsi que la méthode particulière appelée DNP (discrimination non paramétrique) héritera de cette caractéristique, ainsi que la méthode SEBEST (méthode de SEBESTYEN). En construisant cette hiérarchie le spécialiste peut guider l'utilisateur vers une ou des méthode 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.
 S : indiquer le nom de votre ensemble d'apprentissage :
 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 oeuvre par des procédures informatiques dès que l'ensemble des paramètres nécessaires à leur exécution aura été spécifié.

Il s'agit par exemple, dans le cas d'une classification multivariée, du nombre des images, de leur nature, du nombre de classes en sortie, du nom du support 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 à choisir à un instant donné ne constitue qu'une étape du processus de traitement [MERING et al 88]. Or la place relative du traitement dans la chaîne impose des contraintes en particulier celles qui sont dictées par la nature des sorties du résultat précédent. En particulier, on retiendra que la cohérence entre deux traitements successifs est définie par la relation suivante:

$T2$ peut succéder à $T1$ si $E(T2) < S(T1)$, E et S représentant la description de l'ensemble des entrées et sorties 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 6:

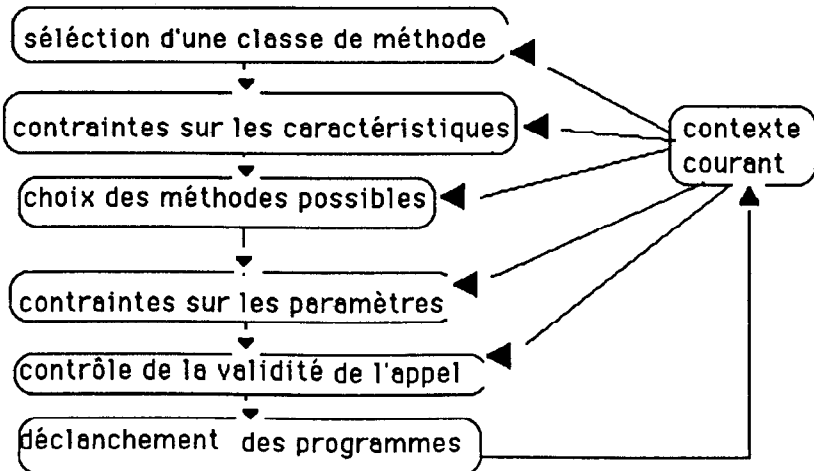


Tableau 6 : Déclenchement d'une procédure de traitement.

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 oeuvre. Par contre, plus les contraintes qu'il énonce quant à la méthode seront faibles, plus nombreuses seront les méthodes concurrentes. L'expert doit donc, à travers les règles prédire et contrôler la mise en oeuvre 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") 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 [ETIFIER 89].

La sélection de la méthode *m1* devant être appliquée aux données à l'étape *n* de la chaîne sera effectuée conformément au schéma du Tableau 7.

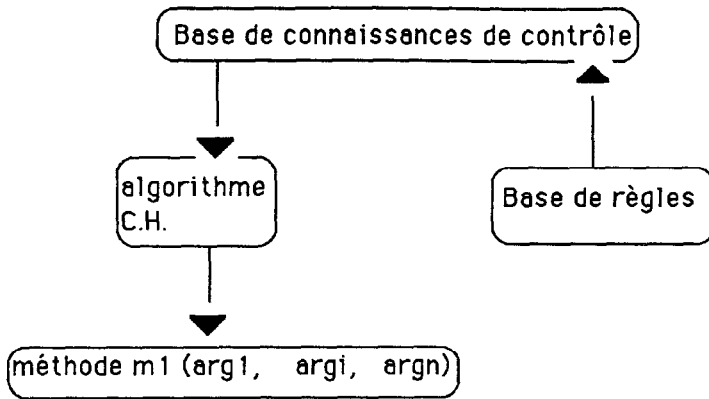


Tableau 7: Choix d'une méthode

Le spécialiste pourra construire autant de *bases de connaissances de contrôle* qu'il devra effectuer de choix de traitement pour résoudre un problème donné (classer les pixels, évaluer la texture d'une région, etc...)

V. CARACTERISTIQUES GENERALES DU FORMALISME ADOPTE

D'après ce que nous venons de voir, des éléments très divers doivent entrer dans la composition des Systèmes tels que nous les 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 ¹, et l'exigence de robustesse et d'opérationalité de tout programme informatique.

Rappelons qu'un système expert est l'association d'un logiciel informatique, le *moteur d'inférences* 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 87], [ETIFIER 88] ont été conçus pour pouvoir interpréter les bases de connaissances que nous développons. Nous ne nous

¹ "Les Systèmes experts ont pour premier objectif d'éliminer toute forme de programmation" (J.L. Laurière in "Intelligence Artificielle Tome 2, la Représentation des connaissances" Editions Eyrolles, Paris, 1988.)

intéresserons ici qu'à la partie du système relative aux bases de connaissances.

Pour représenter les connaissances nous avons adopté le formalisme maintenant classique mais simple et efficace des systèmes de production. Les connaissances du domaine qu'elles soient factuelles et propres au domaine ou générales et indépendantes du domaine sont représentées par des règles, c'est à dire des clauses composées d'une partie condition en membre gauche et d'une partie action en membre droit.

Les réalités observées, qui correspondent à la partie "données" des programmes classiques, et qui sont relatives à une situation particulière, constituent la mémoire de travail encore appelée Base de Faits.

Base de Règles et Base de faits constituent la Base de Connaissances proprement dite.

On verra que malgré la définition rassurante que l'on donne à chacune des composantes de la base, le choix du statut de fait ou de règle pour représenter une connaissance particulière n'est pas toujours trivial¹. Ainsi un même type d'assertion telle que l'expression "un chien est un mammifère" peut être représenté suivant les systèmes sous forme de fait [LAURIERE 88] ou de règle [KODRATOFF 86]

IV.1.. La syntaxe des faits

Dans CIME [MERING et al 88] 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

¹ Il s'agit là d'un problème épistémologique d'envergure que nous nous contenterons d'évoquer en citant W.M.O'Neil : " Bien qu'une distinction entre fait et théorie puisse être établie sur un plan général, les éléments précis de notre savoir sont des mélanges, en proportion variable, de faits et de théories" (in W.M.O'Neil, "Faits et théories", Colin, 1972, pp26-27).

IV.2. La syntaxe des règles

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

Si

conditions

Alors

conclusions

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

Si

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

où

comparateur est un comparateur logique: "=" et "<"
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*, attribut 2 (objet 2)

On peut également 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 ?x ,*comparateur*, attribut_y ?y

La partie *conclusions* ne peut comporter que des *affectations* (affectation d'une valeur d'attribut pour l'objet correspondant) ou des noms d'**Actions** internes ou externes ¹.

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.

¹ 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.

V. REPRESENTATION DES CONNAISSANCES

Il convient d'examiner plus précisément la façon dont les différentes catégories de connaissances que nous avons évoquées vont pouvoir être représentées à l'aide de la syntaxe choisie. Cette syntaxe est similaire à toutes celles qui sont classiquement utilisées dans l'écriture des systèmes de production [VIGNARD 87]. Nous verrons cependant dans ce paragraphe, qu'il a été nécessaire d'y ajouter des éléments afin d'enrichir l'expression des connaissances mises en oeuvre dans l'interprétation des images de télédétection.

V.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 8.

type : pixel

nom : P_i

attributs :

radiométrie: r_1, r_2, r_3, r_4

type : région

nom: R_k

attributs :

texture : hétérogène

moyenne : 50

variance : 20

surface 100

Tableau 8 : 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 d'après ce que nous avons vu au paragraphe 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 ¹ 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 correspondantes². 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 *structurelles* 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_n) 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".

V.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

¹ Il s'agit de fonctions booléennes (ie dont le résultat est vrai ou faux)

² Le statut de ces fonctions au sein du système est différent de celui des traitements d'image puisqu'elles fonctionnent comme des boîtes noires dont la description n'est pas accessible à l'utilisateur.

utilisé le pluriel du mot *classe* car il s'agit d'un attribut *multivalué*¹ 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 9, 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 _x
attributs :	
texture :	hétérogène
	moyenne : 50
	variance : 20
surface	100
classes	forêt, habitat

Tableau 9 : description thématique d'une entité iconique

L'interprétation peut s'effectuer à l'aide de règles. Ainsi, 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 10, on représente les connaissances telles qu'elles ont été décrites dans l'exemple du Tableau 4 bis, 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 10 : 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 taxinomie 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 structurelles. 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

¹On dira qu'un attribut est multivalué si un même objet peut être décrit par plusieurs valeurs différentes de cet attribut, sans que le fait ainsi défini ne génère de contradiction.

type *valeur*). On peut de cette façon décrire les relations entre ces objets , et en particulier la taxinomie 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 peut être illustré par l'exemple suivant:

Si

```
type ?x = région
taille ?x = grande
texture ?x = hétérogène
classes ?x = sorte_de forêt
```

Alors

```
classes ?x = forêt_claire
```

Les relations spatiales et structurelles entre entités thématiques seront représentées de la même façon que les relations entre entités iconiques.

V.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* (cf § 5.2) va permettre de décrire la hiérarchie des traitements évoquée au Tableau 5, 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 multivaluée**. Il héritera donc de toutes les propriétés des traitements appartenant 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_entrainement

Dans l'exemple du Tableau 11, on trouvera la description générale du traitement DNP. Comme tous les autres traitements, il ne pourra être exécuté que lorsque l'ensemble des attributs valables (ie différents de ()) seront valués.

type :	traitement	
nom:	dnp	
attributs :		
	catégorie :	segmentation dirigée
	Entrées	pixels_entrainement
	Sorties	()
	Paramètres_Entrées	()
	Paramètres sortie	segments
	Contrôle	nombre_de_segments

Tableau 11: Description d'un traitement

VI. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES: DE CIME A CIME2

Le système CIME, qui est destiné à produire une carte de la végétation en zone montagneuse, à l'aide des données de télédétection [MERING et al 88] a constitué notre première expérience de développement d'un système expert. Le développement et l'utilisation de ce système à propos d'une application thématique précise (cartographie de la végétation de la région de Salmé au Népal Central, à l'aide des images du capteur Landsat MSS et d'un modèle numérique de terrain) a permis de démontrer les possibilités de ce type de système pour décrire et reproduire une méthode de cartographie thématique [BLAMONT et al 88]. Cependant, CIME a été conçu à partir de l'assimilation d'une méthode de cartographie à une méthode de classification des éléments d'image à l'aide d'attributs variés. En fait, comme on l'a montré ici, le processus d'interprétation peut être modélisé de façon plus riche et plus complète. Les outils syntaxiques de CIME pour la représentation des connaissances, ainsi que les mécanismes d'exploitation des connaissances mis en place ne permettaient pas d'utiliser ce modèle. En particulier, CIME, ne permet de 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 prise en compte des raisonnements consistant à choisir un traitement puis à exécuter un programme. Enfin CIME ne connaissant qu'un seul niveau de description de la taxinomie 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 a décrit plus particulièrement dans cet article des outils pour la représentation des connaissances dans un domaine considéré. La question des stratégies ou des heuristiques employées en télédétection n'a pas encore pu être abordée sous l'angle général, ni celle de la conception d'une architecture générale pour les systèmes experts en télédétection. Or, pour développer des systèmes flexibles et modulaires dans le domaine de la télédétection, il nous apparaît désormais nécessaire de concevoir des architectures spécialisées reposant sur la modélisation de l'interprétation des images spatiales, c'est à dire des connaissances thématiques, ainsi que des stratégies et des contrôles devant être mis en oeuvre pour résoudre cette famille particulière de problèmes.

BIBLIOGRAPHIE

- AMAT J.L. "Automatisation de Traitements d'images". Thèse d'Université, Nice, 1987. [AMAT 87]
- BLAMONT D., MERING C. : "CIME an Expert system for Landuse and Vegetation Mapping by Remote Sensing : The Example of a mountainous area , Proceedings of Ninth Asian Conference on Remote Sensing, Bangkok, 1988, pp A-2-2-1, A-2-2-8 [BLAMONT et al 88]
- CERVELLE B.: "Réflexion de la lumière solaire par les matériaux minéraux: quelques éléments" Actes des Journées de Télédétection de Bondy, collection *Colloques et Séminaires*, Ed. ORSTOM, Paris.. [CERVELLE 89]
- ETIFIER A. : Application des systèmes experts à la cartographie par télédétection. Rapport de stage de Dess, Document multigraphié, ORSTOM, 1988. [ETIFIER 88]
- ETIFIER A. : "Les algorithmes particuliers de CIME2". Actes des Journées de Télédétection de Bondy, collection *Colloques et Séminaires*, Ed. ORSTOM, Paris. [ETIFIER 89]
- HATON J.P.: Techniques d'intelligence artificielle pour l'analyse et l'interprétation des signaux. Actes du 11^{ème} Colloque du GRETSI, 1987. [HATON 87]
- KODRATOFF Y. : "Leçons d'Apprentissage Symbolique Automatique", Ed Cepadues, Toulouse, 1986, 189p. [KODRATOFF 86]
- LAURIERE J.L. : "Intelligence Artificielle, Tome 2, représentation des connaissances", Ed Masson, Paris 1988, 196p. [LAURIERE 88]
- MERING C., BLAMONT D., GANASCIA J.G., MONJANEL F.: CIME, une application des systèmes experts à la télédétection. Actes des 8^{èmes} journées intern. sur Les systèmes experts et leurs applications, Vol 3, Avignon, 1988, pp427,448. [MERING et al 88]
- MONJANEL F.: "Système expert appliqué à la télédétection". Rapport de stage de Dess, Document multigraphié, ORSTOM, 1988. [MONJANEL 87]
- NAGAO M. and MATSUYAMA T.: "A structural analysis of complex aerial photographs", Plenum, New York, 1980. [NAGAO 80]
- VIGNARD P.: "Représentation de connaissances, mécanismes d'exploitation et d'apprentissage", Ed INRIA, Rocquencourt, 1987, 206p. [VIGNARD 87]
- C. VOGEL: "Génie Cognitif", Ed Masson, Paris, 1988, 196p. [VOGEL 88]