

Quelques propositions pour la réalisation d'un système expert de segmentation d'images

Designing an expert system for image segmentation :

some proposals



Catherine GARBAY

Équipe de Reconnaissance des Formes et de Microscopie Quantitative, Laboratoire TIM3, CERMO, BP n° 68, 38402 SAINT-MARTIN-D'HÈRES CEDEX.

Ingénieur ENSIMAG (1977) Docteur Ingénieur, INPG (1979), « Modélisation de la couleur dans le cadre de l'analyse d'images et de son application à la cytologie automatique ». Docteur ès-Sciences, USMG-INPG (1986), « Images, stratégies perceptives et stratégies cognitives d'analyse ». Chargé de recherche au CNRS, Laboratoire TIM3 (UA n° 397). Travaux de recherche dans le domaine de l'analyse et l'interprétation d'images, et des systèmes experts; travaux appliqués à l'imagerie biomédicale.

RÉSUMÉ

Le point de départ de cette recherche est l'analyse d'un système de segmentation d'images cytologiques, implémenté en FORTRAN sous une forme procédurale « classique ». Ce système se caractérise par l'exploitation de connaissances sur l'image analysée et par la mise en œuvre d'activités procédurales variées, dans le cadre d'une stratégie de résolution permettant l'adaptation des efforts de segmentation à la complexité des situations rencontrées dans l'image.

Notre objectif est précisément de caractériser ces différentes sources de connaissances, en se replaçant dans le texte plus général de la segmentation d'images. Cette analyse nous conduit à expliciter le type d'expertise présidant à la modélisation d'un problème de segmentation d'images. Elle nous permet de plus d'envisager le développement de systèmes experts de segmentation d'images. Le concept de modularité de la connaissance prend dès lors tout son sens : l'enrichissement possible des facultés d'analyse de ces systèmes conditionne en effet largement la robustesse des résultats obtenus par leur mise en œuvre.

MOTS CLÉS

Segmentation d'images, connaissances, stratégies, systèmes experts.

SUMMARY

This research evolves from the analysis of a system devoted to cytologic image segmentation and implemented in FORTRAN, within a "classical" procedural form. The main features of this system are the handling of knowledge about this specific class of image and the activation of various image processing tasks, under control of a particular resolution strategy allowing to adapt the complexity of the processing to the complexity of the situations displayed by the image.

Our objective is precisely to characterize these various knowledge sources, while replacing the analysis within the general framework of image segmentation. The kind of expertise yielding to a modelling of a given image segmentation problem is thus exemplified and allows thinking about their implementation as actual expert systems. More than the afforded modelling facilities, the modular representation of knowledge allows the enrichment of the analyzing capabilities of these systems which should actually yield to processing efficacy improvement.

KEY WORDS

Image segmentation, knowledge, strategies, expert systems.

I. Introduction

De nombreux auteurs se sont penchés sur la modélisation des connaissances utiles à la compréhension des images, et ont contribué au développement de systèmes de vision dans des domaines variés :

- analyse de scènes polyédrales [1, 2];
- analyse de scènes tri-dimensionnelles [3, 4];
- analyse de scènes d'intérieur [5] et de scènes naturelles [6];
- analyse de scènes aériennes [7, 10];
- analyse tri-dimensionnelle de scènes d'intérieur [11].

La plupart de ces développements reposent sur l'acceptation commune de l'existence de deux niveaux de connaissances séparés, concernant les connaissances perceptuelles d'une part et les connaissances sémantiques d'autre part. Cette différenciation conduit à distinguer deux niveaux d'analyse différents : le bas niveau (segmentation de l'image) et le haut niveau (interprétation). Les opérateurs de bas niveau sont activés tout d'abord, de façon à obtenir une segmentation initiale de l'image, utilisée et éventuellement corrigée par les opérateurs de haut niveau. Les efforts de recherche, concernant particulièrement le développement de stratégies de contrôle [12], ont été pour cette raison déportés vers l'analyse dite de haut niveau.

Notre objectif concerne précisément la caractérisation des processus engagés dans l'analyse dite de bas niveau et des connaissances susceptibles de guider ces mêmes processus.

Le point de départ de cette recherche est l'analyse des fonctionnalités d'un système de segmentation d'images cytologiques, implémenté en FORTRAN sous une forme procédurale « classique » [13].

Cette analyse, ainsi que la prise en compte des problèmes inhérents à la segmentation d'images en général, nous conduit à dégager les différentes sources de connaissances susceptibles de guider leur modélisation : connaissances relatives à l'application envisagée (type d'image analysée, objectif poursuivi), connaissance des activités procédurales impliquées en segmentation, expertise issue de la connaissance de leurs conditions d'exploitation et de leurs modalités d'articulation [14].

Nous chercherons enfin à montrer comment la représentation de ces différentes connaissances, sous leur forme figurative et/ou propositionnelle permet d'envisager le développement de systèmes experts pour la segmentation d'images.

II. Segmentation d'images cytologiques

II.1. MODÉLISATION DU PROBLÈME

Le problème posé est celui de la segmentation d'images couleur de cellules de la moelle osseuse humaine : chaque image est de dimension 64×64 , les valeurs sont codées sur 8 bits par canal (R, V, B). Ces images (fig. 1) comportent des objets cellulaires disposés sur un fond, objets de type cellule isolée ou agrégat. Un

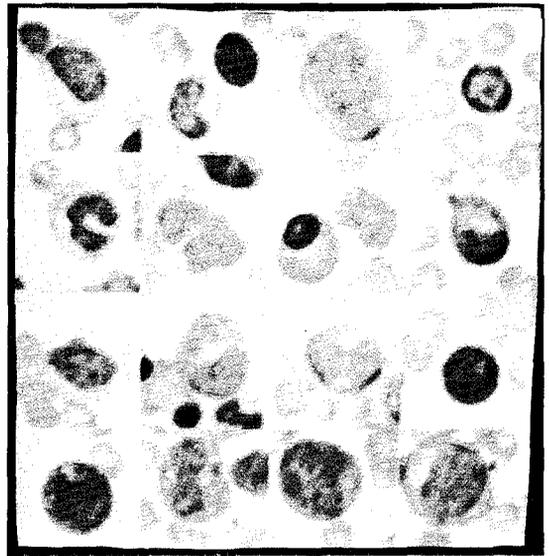


Fig. 1. — Images de cellules de la moëlle osseuse. Il s'agit d'images digitales couleur de taille 64×64 points codés sur 8 bits par canal (R, V, B).

agrégat est composé de plusieurs cellules accolées. Deux types de cellules sont distingués : les leucocytes, qui sont des cellules nucléées, et les érythrocytes, cellules anucléées. L'objectif est la délimitation du support des leucocytes, sachant que les caractères morphologiques de ces cellules sont extrêmement variables, et qu'elles peuvent apparaître insérées au sein d'agrégats cellulaires plus ou moins denses.

Nos recherches se sont portées tout d'abord vers la mise en œuvre de processus de segmentation par seuillage (fig. 2). L'échec relatif de ces tentatives nous a conduit à observer qu'une délimitation cytoplasmique correcte ne peut être obtenue dans ce cadre, alors

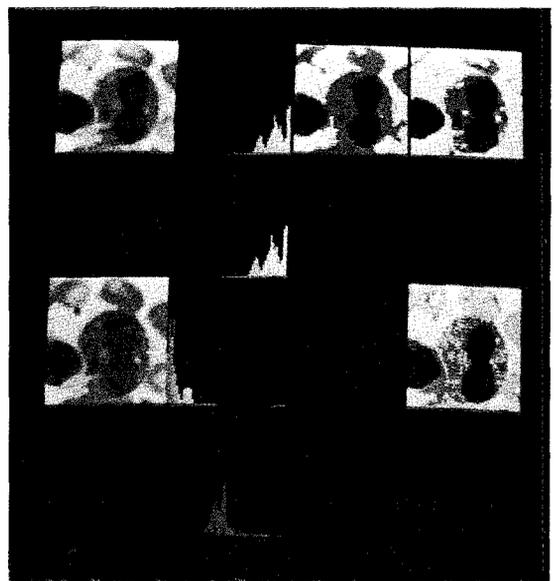


Fig. 2. — Tentatives de segmentation par seuillage. Ligne 1 : Histogramme des niveaux de gris et masques de segmentation issus du choix de différents seuils séparant Noyau, Cytoplasme et Fond. Lignes suivantes : Histogrammes de luminance, saturation et teinte et masque de segmentation issu d'une combinaison de seuils séparant Noyau, Cytoplasme, Érythrocytes et Fond.

que les entités Noyau et Fond apparaissent en général bien délimitées. Les cellules étant de forme convexe, un processus d'agréments successives a été implémenté, dont le germe est la composante nucléée de ces cellules, et dont le critère de convergence est un critère de convexité. La complexité de ce processus est néanmoins élevée, et il s'avère que sa mise en œuvre ne se justifie que lorsque les cellules sont insérées au sein d'agréments.

Il convenait dès lors de doter le système de la capacité à apprécier la nature de la situation rencontrée (cellule isolée ou agrégat), afin de permettre une activation conditionnelle du processus d'agrément. Une stratégie particulière de résolution a donc été envisagée, dont l'objectif est l'articulation correcte des différentes tâches du système.

Notre propos n'est pas de reprendre ici une description technique du système réalisé, description proposée par ailleurs [13], mais plutôt de regrouper sous une forme synthétique les éléments constitutifs du système : connaissances sur l'image, activités procédurales et condition de mise en œuvre, stratégie de résolution.

II.2. L'IMAGE CYTOLOGIQUE

Une description approfondie de l'image cytologique implique la dénomination des entités qui la composent, la description de leurs relations et de leurs morphologies.

Trois types de relations apparaissent :

- la relation « de-type » permet d'associer à la dénomination générique d'une entité un ensemble de dénominations plus spécifiques [ex. cellule « de-type » (leucocyte erythrocyte)];
- la relation « composé-de » permet d'associer à la dénomination d'une entité celle de ses composants

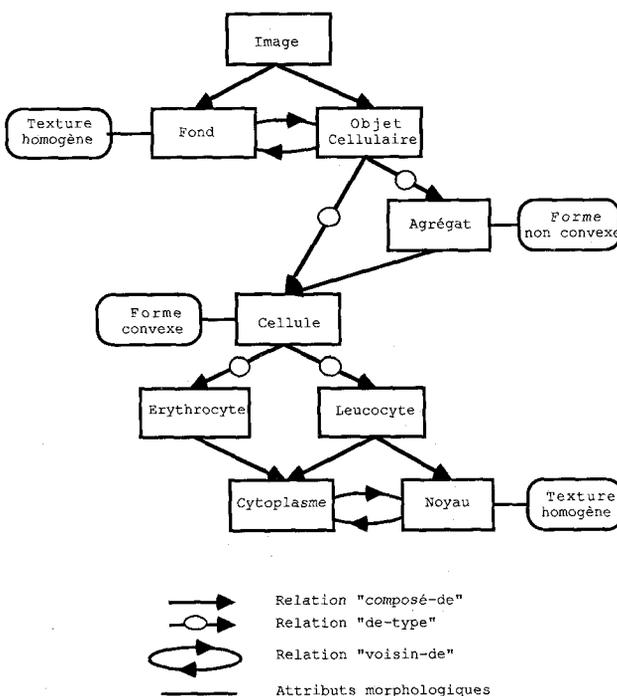


Fig. 3. - L'image cytologique : sa représentation sous la forme d'une arborescence d'entités.

structuraux [ex. leucocyte « composé-de » (noyau cytoplasme)];

- la relation « voisin-de » permet d'associer les dénominations d'entités spatialement voisines (ex. noyau « voisin-de » cytoplasme).

En ce qui concerne la description des morphologies, deux caractères essentiels apparaissent : les caractères de texture et les caractères de forme :

- les entités Noyau et Fond présentent une texture homogène dont les niveaux de gris apparaissent respectivement comme les plus faibles et les plus élevés, sur l'ensemble de l'image;
- les cellules présentent une forme circulaire convexe; la forme d'un agrégat est non convexe.

Une telle description est proposée, sous la forme d'un schéma synthétique, dans la figure 3.

II.3. ACTIVITÉS PROCÉDURALES

Différentes classes d'activités sont mises en œuvre par le système : activités de caractérisation, activités d'identification, enfin activités de délimitation (segmentation proprement dite).

II.3.1. Caractérisation

Les activités de caractérisation permettent l'instanciation des caractères morphologiques des entités précédemment décrites.

Il s'agit, pour une image donnée, d'évaluer le niveau de gris des entités Noyau et Fond. Ceci est obtenu par une analyse de l'histogramme des niveaux de gris : détection des modes concernés et évaluation des seuils qui les délimitent.

Il s'agit également, pour un objet cellulaire donné, d'évaluer son degré de convexité. Celui-ci est proportionnel à l'écart observé entre la surface de cet objet et la surface de son enveloppe convexe.

II.3.2. Identification

Les activités d'identification permettent la spécification du type d'une instance d'entité.

Il s'agit, pour un objet cellulaire donné, de spécifier s'il s'agit d'une cellule isolée ou d'un agrégat. Ce type de décision est conditionné par le résultat d'un test visant à comparer le degré de convexité effectif de cet objet à un seuil connu *a priori*.

Il s'agit par ailleurs de décider si une cellule est de type Leucocyte ou Erythrocyte. La décision se fonde ici non pas sur l'analyse d'un caractère morphologique global propre à ces objets mais plutôt sur celle d'un caractère structurel : présence ou non d'une composante nucléée (c'est-à-dire présence de niveaux de gris de type Noyau).

II.3.3. Délimitation

Les activités de délimitation permettent la délimitation du support d'une entité donnée, le support étant défini comme l'ensemble des points qui la décrivent, au sein de l'image analysée.

Deux types d'activités interviennent :

- une activité de délimitation par seuillage, selon laquelle le support d'une entité est défini comme un

ensemble connexe de points présentant un niveau de gris donné; ce type d'activité apparaît bien adapté à la délimitation du support d'entités de texture homogène : dans notre cas Noyau et Fond;

— une activité de délimitation par agrégations successives selon laquelle le support d'une entité est progressivement délimité, à partir d'un germe initial, par agrégation de points vérifiant certaines contraintes relationnelles (similarité par exemple); ce type d'activité apparaît bien adapté à la délimitation du support d'entités de texture variable : dans notre cas entité Leucocyte. Le germe est la composante nucléée de ces cellules, les contraintes utilisées sont une contrainte locale de similarité chromatique et une contrainte globale de convexité [13].

II.4. STRATÉGIE DE RÉOLUTION

L'objectif est d'aboutir à une articulation optimale des différentes activités du système, dans le double souci de réduire les temps de calcul tout en préservant son efficacité (qualité des résultats).

Plus précisément, il s'agit d'éviter lorsque cela s'avère possible la mise en œuvre du processus d'agrégations successives, celle-ci ne se justifiant que dans le cas de cellules regroupées en agrégat.

Ceci implique de percevoir préalablement la nature des situations présentées par l'image à analyser.

Deux phases d'analyse sont successivement mises en œuvre, à cette fin : une phase de préstructuration, et une phase de complétion.

II.4.1. Phase de préstructuration

L'objectif est de parvenir à une préstructuration du problème à résoudre (perception de l'organisation des entités images).

Du fait de l'incapacité du système à obtenir, à ce niveau, une délimitation « directe » du support des entités objet cellulaire, une délimitation « indirecte » est envisagée, qui s'appuie sur des connaissances attachées à l'entité Fond (entité non directement concernée par l'analyse).

Il apparaît en effet que cette entité est de délimitation simple (texture homogène) et que son support est le complémentaire du support des objets cellulaires dans l'image. Le support OC d'un objet cellulaire est donc défini comme un ensemble connexe de points n'appartenant pas au Fond; il est délimité par activation d'un processus de seuillage.

Il convient ensuite de focaliser l'analyse sur un objet cellulaire comportant un Leucocyte (stratégie dirigée vers le but) et d'identifier son type : cellule isolée ou agrégat.

Des activités d'identification sont mises en œuvre à cet effet, qui impliquent la recherche d'une composante nucléée éventuelle, et l'évaluation du degré de convexité.

Deux cas se présentent alors :

- si l'objet cellulaire est de type cellule isolée, le problème est résolu; le masque de segmentation proposé est l'enveloppe convexe de cet objet;
- si l'objet cellulaire est de type Agrégat, par contre, il convient de mettre en œuvre la phase de complétion.

II.4.2. Phase de complétion

Cette phase n'est activée que dans le cas d'un objet de type Agrégat. Elle consiste en l'activation d'une stratégie directe d'agrégations successives, connaissance *directement* attachée aux entités de type Leucocyte.

Le support du noyau est délimité tout d'abord, puis des points cytoplasmiques sont progressivement agrégés. L'enveloppe convexe de la région ainsi obtenue est calculée à chaque étape. Le processus s'arrête dès lors que l'on détecte la présence de points du fond au sein de cette enveloppe : ceci se produit en effet lors d'une tentative d'agrégation de points appartenant à d'autres cellules, au sein de l'agrégat.

Le masque de segmentation finalement proposé est le support de la région délimitée à l'itération précédente.

II.5. ÉVALUATION-DISCUSSION

Ce système de segmentation a été implémenté en FORTRAN sur un miniordinateur de la série NORD 10/S (Matra Data Systems). Les temps de calcul varient selon la complexité des situations rencontrées dans l'image : environ 7 secondes pour une cellule isolée, 21 secondes pour le traitement d'un agrégat.

Les masques de segmentation obtenus sur les images de la figure 1 sont présentés dans la figure 4.

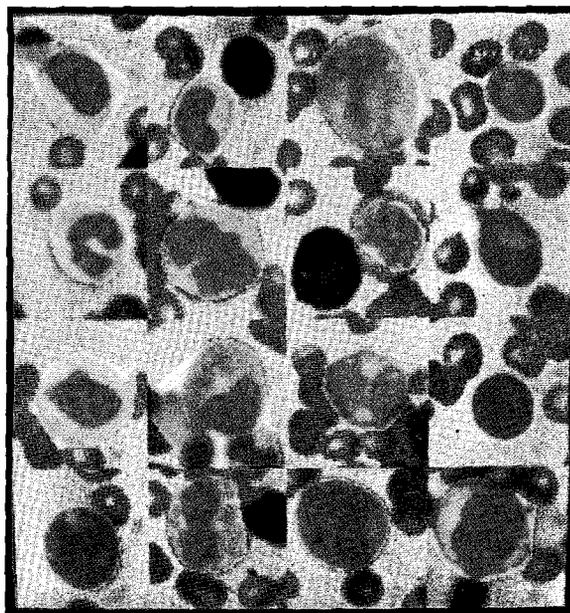


Fig. 4. — Masques de segmentation obtenus après analyse des images présentées dans la figure 1.

Des erreurs subsistent lorsque les agrégats cellulaires sont très denses, ou lorsque des dépressions cytoplasmiques d'aspect très pâle sont rencontrées.

Un test a été effectué sur un lot de 700 cellules de la moëlle osseuse humaine, indiquant une adéquation correcte du masque de segmentation proposé dans 94 % des cas, adéquation appréciée par un cytopathologue.

ensemble connexe de points présentant un niveau de gris donné; ce type d'activité apparaît bien adapté à la délimitation du support d'entités de texture homogène : dans notre cas Noyau et Fond;

— une activité de délimitation par agrégations successives selon laquelle le support d'une entité est progressivement délimité, à partir d'un germe initial, par agrégation de points vérifiant certaines contraintes relationnelles (similarité par exemple); ce type d'activité apparaît bien adapté à la délimitation du support d'entités de texture variable : dans notre cas entité Leucocyte. Le germe est la composante nucléée de ces cellules, les contraintes utilisées sont une contrainte locale de similarité chromatique et une contrainte globale de convexité [13].

II.4. STRATÉGIE DE RÉOLUTION

L'objectif est d'aboutir à une articulation optimale des différentes activités du système, dans le double souci de réduire les temps de calcul tout en préservant son efficacité (qualité des résultats).

Plus précisément, il s'agit d'éviter lorsque cela s'avère possible la mise en œuvre du processus d'agrégations successives, celle-ci ne se justifiant que dans le cas de cellules regroupées en agrégat.

Ceci implique de percevoir préalablement la nature des situations présentées par l'image à analyser.

Deux phases d'analyse sont successivement mises en œuvre, à cette fin : une phase de préstructuration, et une phase de complétion.

II.4.1. Phase de préstructuration

L'objectif est de parvenir à une préstructuration du problème à résoudre (perception de l'organisation des entités images).

Du fait de l'incapacité du système à obtenir, à ce niveau, une délimitation « directe » du support des entités objet cellulaire, une délimitation « indirecte » est envisagée, qui s'appuie sur des connaissances attachées à l'entité Fond (entité non directement concernée par l'analyse).

Il apparaît en effet que cette entité est de délimitation simple (texture homogène) et que son support est le complémentaire du support des objets cellulaires dans l'image. Le support OC d'un objet cellulaire est donc défini comme un ensemble connexe de points n'appartenant pas au Fond; il est délimité par activation d'un processus de seuillage.

Il convient ensuite de focaliser l'analyse sur un objet cellulaire comportant un Leucocyte (stratégie dirigée vers le but) et d'identifier son type : cellule isolée ou agrégat.

Des activités d'identification sont mises en œuvre à cet effet, qui impliquent la recherche d'une composante nucléée éventuelle, et l'évaluation du degré de convexité.

Deux cas se présentent alors :

- si l'objet cellulaire est de type cellule isolée, le problème est résolu; le masque de segmentation proposé est l'enveloppe convexe de cet objet;
- si l'objet cellulaire est de type Agrégat, par contre, il convient de mettre en œuvre la phase de complétion.

II.4.2. Phase de complétion

Cette phase n'est activée que dans le cas d'un objet de type Agrégat. Elle consiste en l'activation d'une stratégie directe d'agrégations successives, connaissance *directement* attachée aux entités de type Leucocyte.

Le support du noyau est délimité tout d'abord, puis des points cytoplasmiques sont progressivement agrégés. L'enveloppe convexe de la région ainsi obtenue est calculée à chaque étape. Le processus s'arrête dès lors que l'on détecte la présence de points du fond au sein de cette enveloppe : ceci se produit en effet lors d'une tentative d'agrégation de points appartenant à d'autres cellules, au sein de l'agrégat.

Le masque de segmentation finalement proposé est le support de la région délimitée à l'itération précédente.

II.5. ÉVALUATION-DISCUSSION

Ce système de segmentation a été implémenté en FORTRAN sur un miniordinateur de la série NORD 10/S (Matra Data Systems). Les temps de calcul varient selon la complexité des situations rencontrées dans l'image : environ 7 secondes pour une cellule isolée, 21 secondes pour le traitement d'un agrégat.

Les masques de segmentation obtenus sur les images de la figure 1 sont présentés dans la figure 4.

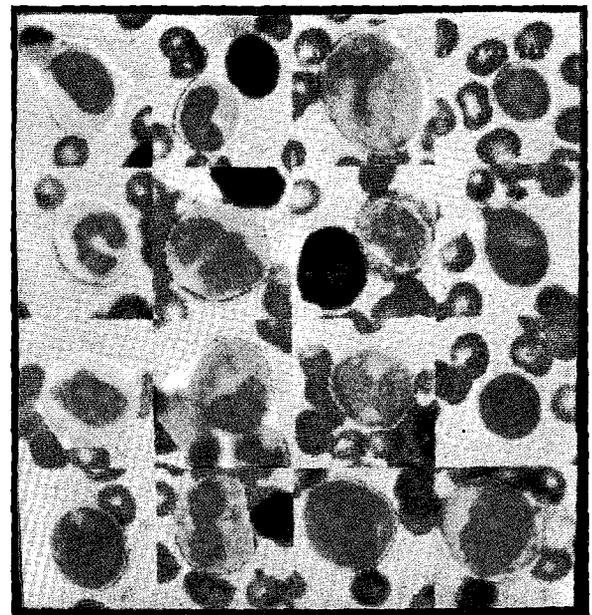


Fig. 4. — Masques de segmentation obtenus après analyse des images présentées dans la figure 1.

Des erreurs subsistent lorsque les agrégats cellulaires sont très denses, ou lorsque des dépressions cytoplasmiques d'aspect très pâle sont rencontrées.

Un test a été effectué sur un lot de 700 cellules de la moëlle osseuse humaine, indiquant une adéquation correcte du masque de segmentation proposé dans 94 % des cas, adéquation appréciée par un cytopathologue.

La qualité des résultats obtenus nous paraît découler de la variété des connaissances introduites, de la variété des activités engagées, et également de la stratégie de résolution envisagée.

Nous avons présenté ici les prémisses d'une caractérisation « experte » d'un problème de segmentation d'image. Notre propos est dès lors d'approfondir ces éléments en les généralisant et en les replaçant dans le contexte des systèmes experts.

III. Segmentation et systèmes experts

Les recherches dans le domaine de la Vision par Ordinateur se développent depuis de nombreuses années : leur foisonnement est tel qu'il apparaît extrêmement difficile d'appréhender de façon synthétique les démarches et les méthodologies propres à ce domaine scientifique.

Leur diversification, voire leur disparité apparente, provient de l'extrême variété des applications touchées par ce domaine (robotique, imagerie aérienne ou satellite, imagerie biomédicale, par exemple). Les efforts d'analyse se concentrent ainsi sur des images de nature et de complexité extrêmement différentes (images de pièces mécaniques, images « naturelles », images radiologiques ou cytologiques), images dont l'appréhension est plus ou moins délicate, selon le mode particulier de représentation du monde qu'elles offrent (recouvrements d'objets, ambiguïtés des apparences des régions, possibles déviations morphologiques).

De nombreux systèmes se sont ainsi développés, chacun d'eux issu d'un compromis entre le cahier des charges propre au domaine d'application visé et le savoir-faire apporté à sa réalisation, savoir-faire dont la délimitation apparaît nécessaire à l'émergence d'un possible *transfert d'expertise* [15].

Certains auteurs se sont penchés sur ce problème, en élaborant des systèmes dotés d'une certaine « expertise » en traitement d'images, systèmes dont le rôle est de guider le développement d'applications (génération de l'enchaînement des fonctions élémentaires nécessaires à la résolution du problème) [16, 17].

Ce concept d'expertise a présidé à l'élaboration d'un système à règles de production pour la segmentation d'images [18]. Ces règles permettent d'associer une situation élémentaire perçue dans l'image à la fonction élémentaire dont elle conditionne l'activation (ex. histogramme bimodal et seuillage).

Des revues bibliographiques plus approfondies peuvent être trouvées par ailleurs [19, 20].

Le problème que nous nous proposons d'aborder, dans ce cadre, concerne l'analyse des fonctionnalités et des possibles méthodologies d'implémentation d'un système de segmentation d'images répondant aux spécifications suivantes :

- distinction entre *cahier des charges* (description du problème à résoudre et moyens disponibles) et *méthodologie de résolution* (expertise);
- distinction entre stratégie *globale* de résolution (décomposition du problème à résoudre en sous-

problèmes) et stratégie *locale* d'analyse (résolution d'un sous-problème par sélection et séquençement de processus).

Le rôle d'un tel système est de fournir une réponse adaptée à un cahier des charges donné, par la génération dynamique et l'activation de la séquence de traitements qu'il implique.

Avant d'aborder plus en détail ces différentes notions, nous proposons un bref rappel sur les *Représentations Centrées Objet*, qui nous paraissent offrir un cadre bien adapté à l'implémentation d'un tel système, du fait de la modularité descriptive offerte [21].

III.1. LES REPRÉSENTATIONS CENTRÉES OBJET [22]

Les Représentations Centrées Objet définissent une méthodologie puissante de modélisation et d'exploitation des connaissances, dont le germe est le concept d'*objet*, conçu comme une entité complexe regroupant à la fois les traits et propriétés de la connaissance (représentation figurative) et les mécanismes de traitement de cette connaissance (représentation propositionnelle).

Une *classe* est définie comme un objet générique regroupant les traits prototypiques qui caractérisent la connaissance, à un niveau d'abstraction donné. Elle est identifiée par un nom et décrite par un ensemble d'attributs.

Les classes sont réunies en une hiérarchie (attribut sous-classe-de), de façon à permettre l'*héritage* des connaissances, des classes les plus génériques vers les classes les plus spécifiques.

Un *objet* est défini comme l'instance d'une classe (attribut instance-de), c'est-à-dire comme la réalisation concrète d'une situation prototypique définie par une classe, dont il hérite du schéma de représentation.

Un *attribut* est défini comme le représentant d'un trait particulier de la connaissance dont il spécifie les propriétés, ainsi que les mécanismes d'évaluation et de propagation. Il est identifié par un nom et décrit par une liste de couples (facette valeur).

L'ensemble des *facettes* définit la sémantique de la représentation utilisée; les plus représentatives sont les suivantes :

- facette \$valeur : elle spécifie la valeur effective de l'attribut; elle peut également comporter un ensemble de filtres explicitant les contraintes sous lesquelles un objet est susceptible d'être considéré comme valeur de cet attribut;
- facette \$si-besoin : elle permet l'attachement des mécanismes d'évaluation de l'attribut; elle n'est prise en compte qu'en cas d'échec des processus d'héritage et de filtrage;
- facette \$si-ajout : elle permet l'attachement des mécanismes de propagation; ces mécanismes sont déclenchés lors d'une mise à jour de la valeur de l'attribut, mise à jour observée pour l'une quelconque des instances de la classe considérée;
- facette \$défaut : elle spécifie la valeur par défaut de l'attribut; cette valeur n'est prise en compte qu'en cas d'échec des processus « normaux » d'évaluation (héritage, filtrage, calcul);
- facette \$domaine : elle permet de restreindre le domaine de valeurs d'un attribut.

D'un point de vue dynamique, le comportement d'un tel système est centré sur l'instanciation (instanciation d'objets et évaluation d'attributs), il est régi par les règles, traitements et contraintes attachés aux attributs par l'intermédiaire de leurs facettes.

III.2. SPÉCIFICATION DES CONNAISSANCES ICONIQUES

Les connaissances iconiques permettent la description de la morphologie, de la topographie et de la structure des entités présentes dans une image. La généralité que nous cherchons à atteindre conduit à doter le système d'un mode « standard » de représentation d'une entité, sa portée dépendant de la richesse des attributs associés. Ce mode « standard » de représentation est obtenu par la spécification des attributs attachés à la classe *Entité*. Les connaissances figuratives et propositionnelles associées à ces attributs sont introduites par l'intermédiaire des facettes, qui définissent les modalités de leur mémorisation et de leur enrichissement.

III.2.1. Attributs et connaissances figuratives

Différents types de caractères iconiques peuvent être distingués : les caractères morphologiques, topographiques, structurels et génériques [23].

- les caractères morphologiques sont introduits sous la forme des attributs *Texture*, *Forme*, *Surface*, et *Support*;
- les caractères topographiques sont introduits sous la forme de l'attribut *Voisin-de*;
- les caractères structurels sont introduits sous la forme des attributs *Composé-de* et *Partie-de*;
- les caractères génériques sont introduits sous la forme des attributs *De-type* et *Sorte-de*. Lorsque deux objets sont associés par une relation générique (X

de-type Y, par exemple), l'objet le plus spécifique (ici l'objet Y) hérite de l'ensemble des connaissances attachées à l'objet le plus générique (ici l'objet X).

Des valeurs sont attachées à ces attributs par le biais des facettes *\$valeur* et *\$défaut*. Des exemples de description sont fournis dans la figure 5.

III.2.2. Attributs et connaissances propositionnelles

La définition de la classe *Entité*, telle que nous venons de l'introduire, permet de décrire une image donnée sous une forme *figurative* comme une arborescence d'objets (instances d'entités) décrits à leur tour par les valeurs de leurs attributs. Cette forme figurative est essentielle à la perception des contextes, des situations, ainsi qu'à l'appréhension globale du problème à résoudre.

Des connaissances propositionnelles sont nécessaires, qui définissent les modalités d'instanciation d'une telle représentation : ces connaissances sont introduites par l'intermédiaire des facettes *\$-besoin* et *\$si-ajout*.

- *facette \$si-besoin* : elle permet d'attacher à un attribut les traitements qui permettent de calculer sa valeur, traitements qui modélisent les activités de *délimitation* (attribut *Support*) et les activités de *caractérisation* (autres attributs). Ces traitements sont décrits eux-mêmes comme des objets dont les attributs sont les paramètres d'entrée et de sortie. Des restrictions sur le type ou la forme de ces attributs sont introduites, le cas échéant [22].

Deux types d'activités de caractérisation sont distinguées :

- les activités *interactives*, selon lesquelles la valeur est obtenue au terme d'un dialogue avec l'utilisateur (connaissances *a priori* sur la classe d'images à analyser);
- les activités *analytiques*, selon lesquelles la valeur est obtenue par analyse de l'image (connaissances *a posteriori* sur une image particulière). La mise en œuvre de ces activités suppose que la valeur de l'attribut *Support* est connue.

Les activités de délimitation regroupent l'ensemble des processus de segmentation dont est doté le système. Ces processus sont d'applicabilité différentielle selon la forme effective de l'entité à analyser : leurs conditions respectives d'application sont formulées par le biais des contraintes attachées à leurs paramètres d'entrée.

- *facette \$si-ajout* : elle est attachée aux attributs *Composé-de* et *De-type*; elle associe les traitements de création de nouveaux objets, objets perçus comme composants structurels ou spécialisation d'objets existants.

III.2.3. Processus d'instanciation

L'objectif premier est de structurer l'ensemble des connaissances *a priori* sur une classe d'images particulière par l'instanciation de la hiérarchie d'objets correspondante. Le processus d'instanciation est de type *descendant* et est initialisé par l'appel de la fonction (créer 'image), qui instancie l'objet racine de l'arborescence (activités interactives de caractérisation). L'évaluation des attributs *Composé-de* ou *De-type* implique l'activation des traitements attachés à la facette *\$si-ajout*, c'est-à-dire de nouveaux appels de la fonction

(Entité	
(Nom	...)
(Support	(\$si-besoin (delimit ...)))
(Texture	(\$si-besoin (anal ...)
	(demande ...)))
...	
(Composé-de	(\$si-besoin ...)
	(\$si-ajout ...))
(De-type	...))
(Entité-1	
(Instance-de	(\$valeur Entité))
(Nom	(\$valeur Cellule))
...	
(Composé-de	(\$défaut (Entité-2 Entité-3)))
(De-type	(\$valeur (Entité-4 Entité-5)))
(Entité-2	
(Instance-de	(\$valeur Entité))
(Nom	(\$valeur Noyau))
(Texture	(\$valeur foncé))
(Voisin-de	(\$valeur (Entité-3)))
...	
(Entité-3	
(Instance-de	(\$valeur Entité))
(Nom	(\$valeur Cytoplasme))
...	
(Entité-4	
(Instance-de	(\$valeur Entité))
(Nom	(\$valeur Erythrocyte))
(Composé-de	(\$valeur (Entité-3)))
...	
(Entité-5	
(Instance-de	(\$valeur Entité))
(Nom	(\$valeur Leucocyte))
...	

Fig. 5. - La classe Entité : vue partielle et exemples d'objets.

créer. Le processus s'arrête dès lors que tous les objets atteints apparaissent comme des feuilles de l'arborescence.

L'objectif second est d'évaluer l'attribut Support d'un objet particulier au sein de cette hiérarchie, selon une requête exprimée par l'utilisateur : ceci implique la génération d'un plan d'action définissant l'articulation des activités de caractérisation, identification et délimitation nécessaires à la réalisation de cet objectif.

III.3. SPÉCIFICATION DES MÉTA-CONNAISSANCES

La base des connaissances *iconiques* regroupe l'ensemble des connaissances attachées à la classe Entité et aux objets instanciés par le système, au terme d'un dialogue avec l'utilisateur. La hiérarchie d'objets ainsi obtenue constitue une représentation figurative du problème à résoudre; les traitements attachés aux différents attributs offrent une représentation propositionnelle des ressources analytiques disponibles (processus de segmentation et conditions d'application en particulier).

Les *méta-connaissances* constituent l'expertise apportée au système : elles permettent le développement de stratégies de résolution adaptées, et en définissent les modalités d'instanciation. Une telle stratégie peut être perçue comme la recherche d'un chemin entre les données initiales disponibles et le but à atteindre (entité à segmenter) : elle est définie par le choix d'un mode particulier de développement de l'espace de recherche [24], développement selon lequel le problème, décomposé en une séquence de sous-problèmes, sera progressivement résolu [25].

Nous proposons un développement en deux temps : développement d'un *plan d'action global*, associé à une perception « primaire » du problème à résoudre, puis développement pour chaque action d'un *plan local* de mise en œuvre impliquant l'examen approfondi des ressources disponibles.

III.3.1. Méta-connaissances globales : la classe Action

III.3.1.1. La classe Action

Cette classe de méta-connaissances définit les modalités de génération des plans d'action globaux qui décrivent des stratégies particulières d'exploration de l'arborescence des entités : elle est décrite par les attributs Type, Source, Cible, Pred et Suc.

Les attributs *Source* et *Cible* impliquent des instances d'Entité associées par des relations structurelles ou génériques.

La valeur de l'attribut *Type* (respectivement Spécifier, Généraliser, Décomposer, Composer) dépend de la nature effective de cette relation (respectivement De-type, Sorte-de, Composé-de, Partie-de). Le domaine de valeurs de cet attribut (facette \$domaine) est établi lors de la phase d'initialisation : il est affecté à (Spécifier Décomposer) ou (Généraliser Composer). L'attribut *Source* définit ainsi la base potentielle d'application d'une action, l'attribut *Cible* en définit le résultat potentiel.

Les attributs *Pred* et *Suc* permettent l'enchaînement des actions : des exemples sont présentés dans la figure 6.

```
(Action
  (Type
    ($si-besoin (def-type ...))
    ($domaine (Spécifier Décomposer)))
  (Source
    ($si-besoin (def-source ...))
    ($si-ajout (init ...)))
  (Cible
    ...)
  (Pred
    ...)
  (Suc
    ...))

(Action-1
  (Instance-de
    ($valeur Action))
  (Type
    ($valeur Spécifier))
  (Source
    ($valeur (Entité-1)))
  (Cible
    ($valeur (Entité-4 Entité-5)))
  (Suc
    ($valeur (Action-2 Action-3))))

(Action-2
  (Instance-de
    ($valeur Action))
  (Type
    ($valeur Décomposer))
  (Source
    ($valeur (Entité-4)))
  (Cible
    ($valeur (Entité-3)))
  (Pred
    ($valeur (Action-1))))

(Action-3
  (Instance-de
    ($valeur Action))
  (Type
    ($valeur Décomposer))
  (Source
    ($valeur (Entité-5)))
  (Cible
    ($valeur (Entité-3)))
  (Pred
    ($valeur (Action-1))))
```

Fig. 6. — La classe Action, spécifications et instances (vue partielle d'un plan d'action) : — objectif : « segmenter cytoplasme » ; — stratégie : indirecte.

III.3.1.2. Plan d'action : stratégies de développement

L'objectif est de développer le plan d'action en *marche arrière*, à partir du but à atteindre. Deux types de stratégies sont distinguées dans ce cadre : les stratégies *directes* (actions de type Composer Généraliser), dont le développement implique un parcours descendant de l'arborescence (de l'objectif vers les feuilles), les stratégies *indirectes* (actions de type Décomposer Généraliser), dont le développement implique un parcours ascendant de l'arborescence (de l'objectif vers la racine). Toute nouvelle action est chaînée par l'attribut Pred à l'action courante.

Ainsi, dès lors que l'attribut Source d'une action est évalué, de nouvelles actions sont instanciées, toute entité source devenant entité cible d'une nouvelle action (traitement attaché à l'attribut Source par le biais de la facette \$si-ajout). Les attributs Type et Source de ces nouvelles actions sont évalués par l'intermédiaire des traitements qui leur sont attachés (facette \$si-besoin). La valeur de l'attribut Type dépend du domaine de valeur autorisé; elle conditionne la valeur de l'attribut Source (fig. 6).

Seules les fonctionnalités essentielles sont décrites ici : des traitements plus complexes interviennent, qui garantissent la cohérence de la hiérarchie d'actions ainsi générée.

III.3.1.3. Plan d'action : processus d'instanciation

Le *processus d'instanciation* est initialisé par l'appel de la fonction (init entité-cible). Son rôle est de proposer le choix d'une stratégie, c'est-à-dire de restreindre le domaine des actions possibles, et d'instancier l'action initiale. Le choix d'une stratégie implique l'analyse de la complexité de l'entité cible à délimiter :

— les stratégies *directes* sont dédiées à la segmentation d'entités de forme simple (entités composées de régions de texture uniforme, par exemple) : les processus impliqués dans ce cadre sont en effet de type ascendants et leur adéquation suppose l'existence de contraintes fortes sur les composants structurels et génériques de l'entité cible;

– les stratégies *indirectes*, au contraire, permettent une *préstructuration* du problème à résoudre, lorsque celui-ci est complexe : les processus impliqués dans ce cadre sont de type descendants, ils se fondent sur la prise en compte des informations contextuelles les plus globales et en permettent en retour l'émergence [26].

En cas d'échec d'un plan généré selon une stratégie indirecte, une reprise est tentée, sous la forme d'une stratégie directe dont le développement bénéficie des connaissances acquises en phase de préstructuration : il s'agit de la phase de *complétion*.

III.3.1.4. Plan d'action : mise en œuvre

Le plan d'action est exécuté de façon descendante, de l'action racine (Action-0) vers les feuilles, selon le chaînage induit par l'attribut Suc : sa valeur détermine l'ensemble des actions possibles, à un instant donné. Elles sont développées et exécutées selon leur ordre d'apparition dans le système.

Il y a en cas d'échec reprise sur une autre action possible; les effets induits par leur activation sont dans le cas contraire propagés (élimination et mise à jour d'actions).

III.3.2. Méta-connaissances locales : la classe Règle

Une stratégie définit le plan global de résolution d'un problème. La mise en œuvre de chacune des actions invoquées dans ce cadre nécessite le développement d'un plan local de résolution, de façon à attacher à une action la séquence d'*activités* permettant sa mise en œuvre : ces activités sont les activités de caractérisation et délimitation attachées aux attributs de la classe Entité.

Des méta-connaissances locales sont impliquées lors de cette phase, qui permettent de développer chaque action sous la forme de règles : ces règles explicitent les conditions d'évaluation des attributs iconiques concernés; les heuristiques qui président à leur génération permettent de réduire la complexité des efforts d'identification et de délimitation.

III.3.2.1. La classe Règle

La classe Règle est décrite par les attributs Prémisse et Conclusion. La valeur de ces attributs est de la forme (Objet Attribut Valeur) :

– la valeur de l'attribut Prémisse spécifie une ou plusieurs contraintes d'ordre iconique : ces contraintes adressent des objets instances de la classe Entité;

– la valeur de l'attribut Conclusion est interprétée comme une action de mise à jour de la base des connaissances iconiques (affecter la valeur Valeur à l'attribut Attribut de l'objet Objet).

Selon que l'attribut impliqué est l'attribut Support ou tout autre attribut, des activités de délimitation ou de caractérisation seront invoquées : celles-ci ne sont pas formellement distinguées par le système.

III.3.2.2. Processus d'instanciation

Les traitements qui conditionnent l'instanciation de la classe Règle sont attachés à l'attribut *Liste-règles* de la classe Action (facette \$si-besoin); toute instance de Règle est chaînée à l'instance d'Action concernée par le biais de ce même attribut (facette \$valeur). Ces traitements sont complexes et nous n'en exposerons

ici que la problématique essentielle; ils diffèrent selon que l'action analysée est de type générique ou structurelle :

– action de type *générique* : le problème est la recherche des caractères iconiques *suffisant* à la détermination du type spécifique ou générique d'une entité : la recherche s'effectue en mode direct ou indirect. Selon le mode direct, des caractères discriminants, propres à l'entité, sont recherchés; selon le mode indirect, au contraire, une entité sera identifiée parce qu'elle ne partage pas les caractères propres aux autres entités, dans le contexte de l'action analysée (un erythrocyte, par exemple, s'identifie par l'absence d'une composante nucléée).

– action de type *structurelle* : le problème est de générer un plan « optimal » de segmentation, à un niveau local : le mode direct est utilisé lorsque l'entité est de forme simple (requête directe de délimitation), le mode indirect est invoqué dans les autres cas. Ce dernier mode suppose la capacité à inférer le support d'un objet à partir d'autres supports dont la délimitation est plus simple, ou d'ores et déjà acquise (si le support leucocytaire est connu, par exemple, le support cytoplasmique peut être obtenu simplement comme le complémentaire du support nucléaire). Il devient possible, dans ce cadre, de requérir la délimitation d'entités *a priori* non concernées par cette phase de l'analyse.

III.3.2.3. Mise en œuvre

L'exécution d'une action implique la mise en œuvre de cycles successifs de génération/activation de règles. Ces cycles sont repris en cas d'échec, par basculement du mode direct vers le mode indirect. Un échec est susceptible d'être observé en phase de génération (constat d'insuffisance des ressources figuratives) ou en phase d'activation (constat d'insuffisance des ressources propositionnelles).

III.3.3. Perspectives

Ce système est actuellement en cours de développement : il est implémenté en Common Lisp sur une station graphique APOLLO (DN3000). Nos efforts se sont surtout portés sur la spécification des principaux éléments du système, de leur rôle et de leurs fonctionnalités essentielles : la conception de certaines d'entre elles demeure encore très rudimentaire.

Les tâches essentielles qui demeurent concernent l'évaluation de l'applicabilité effective d'un tel système aux problèmes de la segmentation des images; elles concernent également l'approfondissement de la méthodologie d'implémentation employée, par la recherche d'une unification des formalismes utilisés.

IV. Conclusion

A partir d'un problème précis de segmentation d'images et d'une implémentation effective dans ce domaine, nous avons tenté de dégager les principes présidant à la réalisation d'un système robuste de segmentation d'images. Deux principes essentiels ont retenu notre attention : spécifier les connaissances sur l'image et sur les ressources procédurales du système,

spécifier les stratégies guidant leur exploitation et leur articulation, selon l'objectif fixé.

A partir de ce constat nos efforts se sont portés sur la spécification possible d'un système « expert » de segmentation d'images, capable d'acquérir une connaissance sur la nature d'un problème (forme de l'image à analyser) et une expertise sur la façon de le résoudre (articulation globale des activités d'analyse, heuristiques locales de sélection et de séquençement). Nous avons été conduits de ce fait à nous rapprocher du domaine des Systèmes Experts et à proposer l'emploi des Représentations Centrées Objets.

Plusieurs classes d'objets apparaissent en effet : la classe Entité (description du problème à résoudre), la classe Action (méthodologie globale de résolution), et la classe Règle (heuristiques locales); à chacune d'elles sont attachées des connaissances figuratives et propositionnelles qui leur confèrent un rôle et une activité propre.

Nous avons distingué deux types de stratégies : les stratégies indirectes qui permettent une préstructuration du problème à résoudre, les stratégies directes, qui en permettent la complétion, en cas d'échec des précédentes. La capacité du système, enfin, à générer localement ses propres heuristiques, est le garant de sa souplesse : elle permet l'adaptation dynamique des efforts de traitements par la recherche d'une exploitation optimale des ressources du système, au niveau tant figuratif que propositionnel.

Bien des problèmes demeurent encore, et certains d'entre eux n'ont pu être que soulevés : nous sommes persuadés néanmoins de la pertinence de cette approche, par la richesse et la complexité des connaissances qu'elle permet de prendre en compte, approche qui devrait conduire à une approfondissement de l'expertise en segmentation d'images.

Manuscrit reçu le 19 décembre 1986.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. G. ROBERTS, Machine perception of three-dimensional solids. In *Optical and Electro-optical Information Processing*, J. T. TIPPET éd., MIT Press, 1965, p. 159-197.
- [2] A. GUTZMAN, Computer recognition of three-dimensional objects in a visual scene, *MAC-tr-59*, MIT, 1968.
- [3] O. T. BINFORD, Visual perception by computer, *Proc. of the IEEE conf. on Systems and Control*, 1971.
- [4] D. MARR et H. K. NISHIHARA, Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes, *Proc. Roy. Soc. B.*, 200, 1977, p. 269-294.
- [5] H. G. BARROW et J. M. TENENBAUM, Recovering intrinsic scene characteristics from images. In *Computer Vision Systems*, A. R. HANSON et E. M. RISEMAN éd., Academic Press, 1978, p. 3-26.
- [6] A. R. HANSON et E. M. RISEMAN, Visions: A computer system for interpreting scenes. In *Computer Vision Systems*, A. R. HANSON et E. M. RISEMAN éd., Academic Press, 1978, p. 303-333.
- [7] R. A. BROOKS, Symbolic reasoning among 3-D models and 2-D images, *Artificial intelligence*, 17, 1981, p. 285-348.
- [8] M. NAGAO, T. MATSUYAMA et Y. IKEDA, Region extraction and shape analysis in aerial photographs, *Comp. Graph. Im. Proc.*, 10, 1979, p. 195-225.
- [9] D. A. ROSENTHAL et R. BAJCSY, Visual and conceptual hierarchy: a paradigm for studies of automated generation of recognition strategies, *IEEE Trans. on PAMI*, 6, 1984, p. 319-325.
- [10] T. MATSUYAMA et V. IIWANG, Sigma : A framework for image understanding; integration of bottom-up and top-down analysis, *Proc. IJCAI*, 85, 1985, p. 908-915.
- [11] L. G. SHAPIRO, Computer vision systems: past, present and future. In *Pictorial Data Analysis*, R. M. HARALICK éd., Springer Verlag, 1983, p. 201-237.
- [12] M. NAGAO, Control strategies in pattern analysis, *Pattern Recog.*, 17, 1984, p. 45-46.
- [13] J. M. CHASSERY et C. GARBAY, An iterative segmentation method based on a contextual color and shape criterion, *IEEE Trans. on PAMI*, 6, 1984, p. 794-800.
- [14] C. GARBAY, Images, stratégies perceptives et stratégies cognitives d'analyse, *Thèse d'État*, USMG, INPG, Grenoble, juin 1986.
- [15] E. M. RISEMAN et A. R. HANSEN, A methodology for the development of a general knowledge-based vision system. *Workshop on principles of knowledge-based systems*, IEEE, 1984.
- [16] M. J. DIXON et P. J. GREGORY, Hybrid expert systems in image analysis. In *Applications of AIIV*, SPIE, 657, 1986, p. 9-12.
- [17] E. GALLESIO, V. SERFATY, L. BOL et B. ZAVIDOVIQUE, An object to capture some fuzzy expertise. In *Applications of AIIV*, SPIE, 657, 1986, p. 26-33.
- [18] A. M. NAZIF et M. D. LEVINE, Low level image segmentation : an expert system, *IEEE Trans. on PAMI*, 6, 1984, p. 555-577.
- [19] C. PORQUET, Contribution à la conception d'un système de vision : le méta-langage Airelle comme outil de développement de maquettes d'interpréteurs d'images, *Thèse de Doctorat*, Université de Caen, 1986.
- [20] A. LUX, Algorithmique et contrôle en vision par ordinateur, *Thèse d'État*, USMG, INPG, Grenoble, 1985.
- [21] J. FERBER, Les langages objets : de la programmation à la représentation des connaissances, *Proc. COGNITIVA 85*, CESTA, 1985, p. 40-48.
- [22] F. RECHENMANN, Shirka : mécanismes d'inférence sur une base de connaissances centrée-objet, *Proc. 5^e congrès « Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, AFCET/ADI/INRIA, 1985, p. 1243-1254.
- [23] J. K. TSOTSOS, Knowledge of the visual process: content, form and use, *Proc. IVth ICPR*, IEEE Computer Society Press, 1982, p. 654-669.
- [24] J. P. LAURENT La structure de contrôle dans les systèmes experts, *TSI*, 3, 1984, p. 161-177.
- [25] M. C. CORDIER et M. C. ROUSSET, Le contrôle dans les moteurs d'inférence, *Proc. of the Vth Int. Workshop. « Expert Systems and their Applications »*, ADI, 1985, p. 227-259.
- [26] C. GARBAY, Knowledge and strategies for image segmentation, *Proc. 8th ICPR*, IEEE Computer Society Press, 1986, p. 669-671.