

Un système expert pour la description et le classement automatiques de zooplanctons à partir d'images monoculaires

An Automatic System to Recognize the Biological Classes of Zooplanktons from Monocular Images



M. THONNAT

INRIA,
2004 Route des Lucioles,
Sophia Antipolis,
06560 Valbonne, France

Après son diplôme de l'École Nationale Supérieure de Physique de Marseille en 1980, Monique Thonnat a préparé une thèse au

Laboratoire d'Astronomie Spatiale du Centre National de la Recherche Scientifique de Marseille ; cette thèse en optique et traitement du signal a été soutenue à l'université de St-Jérôme de Marseille en 1982. En 1983, elle a rejoint l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique comme chargé de recherche. Directeur de recherche depuis 1990, ses domaines de recherche comprennent la compréhension d'images, le traitement d'images et l'intelligence artificielle. Elle a participé au développement de plusieurs systèmes experts de vision en astronomie, biologie et robotique.



M.-H. GANDELIN

INRIA,
2004 Route des Lucioles,
Sophia Antipolis,
06560 Valbonne, France

Après des études en Océanographie, Marie-Hélène Gandelin a préparé à l'INRIA Sophia Antipolis une thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur sur la reconnaissance automatique d'organismes marins à partir d'images monoculaires par une approche système expert. Cette thèse a été soutenue à l'université de Nice en 1989. Depuis 1990, Marie-Hélène Gandelin est Ingénieur de recherches au GEVES à Sophia Antipolis. Ses axes de recherche concernent l'étude des techniques d'analyse d'images et d'intelligence artificielle. Elle s'intéresse actuellement à la description des variétés de rose par analyse d'images et à la mise en place d'un système expert.

RÉSUMÉ

Un système automatique de reconnaissance des classes biologiques d'organismes complexes (zooplanctons), à partir d'images monoculaires, est présenté. Un ensemble d'algorithmes de vision détecte et décrit les zooplanctons contenus dans les images, puis un système expert, construit avec le noyau CLASSIC, les classe en utilisant des modèles symboliques organisés hiérarchiquement. Pendant le classement, le système expert lance l'exécution de nouveaux programmes pour compléter la description

des formes de zooplanctons afin de raffiner leur classement. Le contenu de la base de connaissances est décrit en détail. Les résultats des traitements d'image et du classement sont montrés.

MOTS CLÉS

Vision, reconnaissance d'objet, classement, systèmes experts, zooplanctons.

ABSTRACT

An automatic system to recognize the biological classes of complex organisms (zooplanktons), from monocular images, is presented. A modular set of algorithms detects and describes the zooplanktons in the images, then an expert system, built with the CLASSIC shell, classifies them according to hierarchical symbolic models. During the classification, the expert system runs other programs to complete the description of the shapes of the zooplanktons, and refine their classification. The contents of

the knowledge base is described in detail. The results of the image processing, and of the classification are shown.

KEY WORDS

Computer vision, object recognition, classification, expert system, zooplanktonology.

1. Introduction

Dans cet article, nous nous intéressons à l'utilisation de l'intelligence artificielle pour la reconnaissance d'objets complexes nécessitant une expertise. L'intérêt, pour la reconnaissance d'objets, de la coopération entre la vision par ordinateur et l'intelligence artificielle est bien présentée dans [Lux 85]. Le rôle de la vision est la description de la scène observée par des indices visuels, celui de l'intelligence artificielle est l'interprétation de cette scène, en termes d'objets du monde réel. La modélisation des objets du monde réel peut être exprimée à l'aide de primitives géométriques [Bro 81] ou de modèles CAO [Ike 88] ; dans notre cas, nous cherchons à utiliser des modèles tels que les expriment les experts (biologistes, astronomes, ...), c'est-à-dire des modèles symboliques organisés hiérarchiquement en classes et sous-classes. L'approche méthodologique choisie, présentée figure 1, est donc la suivante : un ensemble d'algorithmes de vision détecte et décrit les objets contenus dans les images, puis un système expert, construit avec le noyau CLASSIC, les classe en utilisant des modèles symboliques hiérarchiques explicites. Pendant l'interprétation des images, le système expert exécute de nouveaux programmes pour compléter la description des formes des objets et raffiner leur classement.

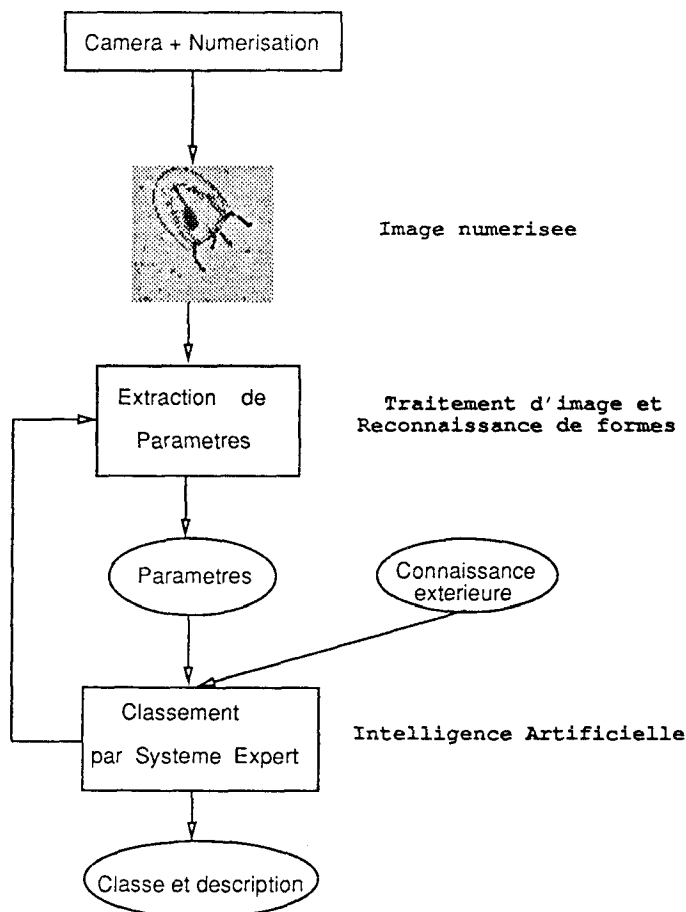


Figure 1. — Synoptique du traitement.

Nous appliquons cette approche à des objets marins vivants particulièrement complexes, des zooplanctons. Notre but est de construire un système automatique de reconnaissance des classes biologiques de zooplanctons à partir d'images monoculaires qui soit précis dans la description des formes perçues par le capteur, aisément extensible et dont le comportement soit aussi proche que possible de celui d'un expert en planctologie.

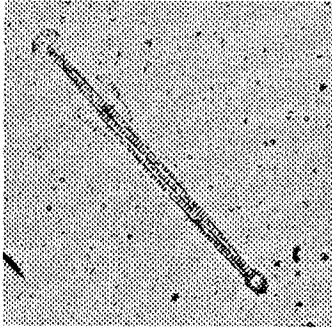
En raison du grand intérêt écologique des organismes zooplanctoniques et des difficultés que présente leur étude, différentes équipes ont développé des systèmes de reconnaissance automatique de zooplanctons basés sur des techniques d'analyse d'images et des méthodes statistiques de classification [Kat 87], [Che 86 a], [Che 86 b]. Les techniques d'analyse d'images ont facilité les mesures des organismes zooplanctoniques et augmenté leur précision. Néanmoins ces systèmes sont limités par leur manque de flexibilité et leur inaptitude à manipuler des données symboliques comme le fait un expert zooplanctologue.

Pour le moment nous limitons notre étude aux organismes zooplanctoniques méditerranéens, ce qui représente une centaine d'espèces appartenant à quatorze grands groupes. Les besoins des zooplanctologues nécessiteront pour certaines espèces une classification spécifiant l'état de maturité de l'organisme. La figure 2 présente quelques exemples d'organismes appartenant à quatre principaux groupes. Chaque image correspond à la numérisation de photogrammes [Bra 85] avec un microdensitomètre. Ce sont des images de 256×256 pixels et 256 niveaux de gris. Les photogrammes sont réalisés sur des organismes vivants en milieu aqueux, ce qui permet de conserver leurs postures caractéristiques. Les formes sont très riches et très complexes. En ce qui concerne la morphologie externe, les organismes ont des formes globales très différentes et leurs appendices sont variables tant par leur nature que par leur localisation. Leur morphologie interne présente différents degrés de transparence et leurs organes internes (s'ils sont visibles) varient tant par leur nature que par leur position.

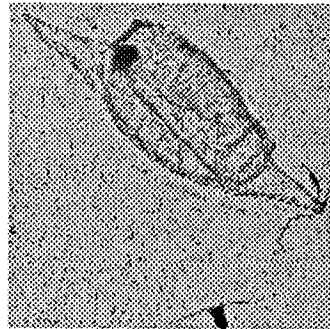
2. Les différentes étapes d'extraction de paramètres

Nous présentons très brièvement dans ce paragraphe la première phase de traitement d'image qui a pour but de constituer un jeu initial de paramètres numériques descriptifs de l'organisme (paramètres globaux et paramètres spécifiques à la morphologie interne et externe).

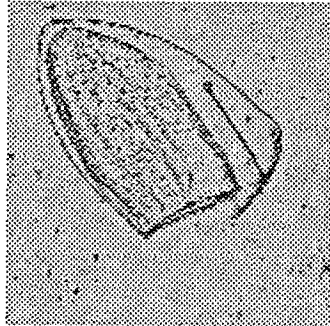
Les images ne contiennent qu'un organisme d'intérêt. Le traitement de chaque image s'effectue selon les étapes suivantes : tout d'abord l'isolation de l'objet, la détermination d'un repère propre à l'organisme (voir fig. 3), puis l'acquisition de données concernant la morphologie interne et enfin la construction et l'exploitation de représentations monodimensionnelles. Ces représentations monodimensionnelles sont toutes définies à partir des axes du repère propre de l'organisme. Pour étudier plus précisément la morphologie interne, deux coupes sont réalisées, l'une le long du grand axe, l'autre le long du petit axe. Pour



CHETOGNATHES: *S.setosa*

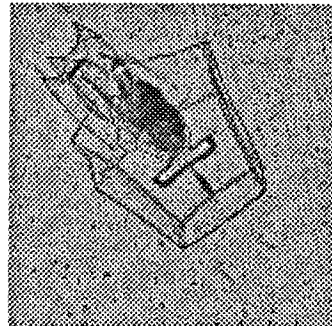


SALPES: *Salpa*

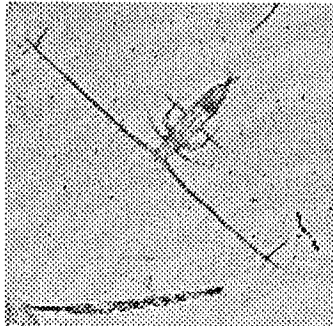


SIPHONOPHOIRES:

Lensia

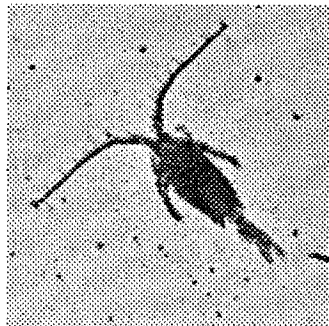


Abylopsis

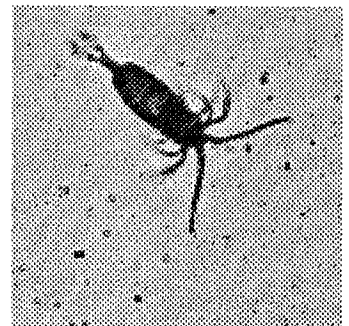


COPEPODES:

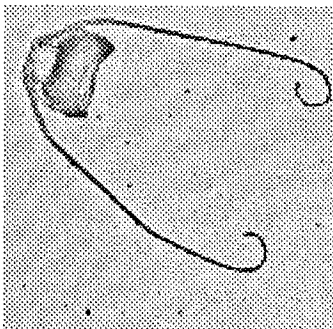
Eucalanus



Candacia

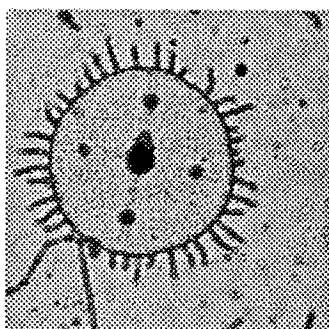


Pontella

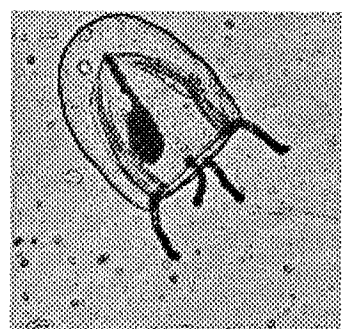


MEDUSES:

Solmundella



Obelia



Anthoméduse

Figure 2. — Exemples de zooplanctons.

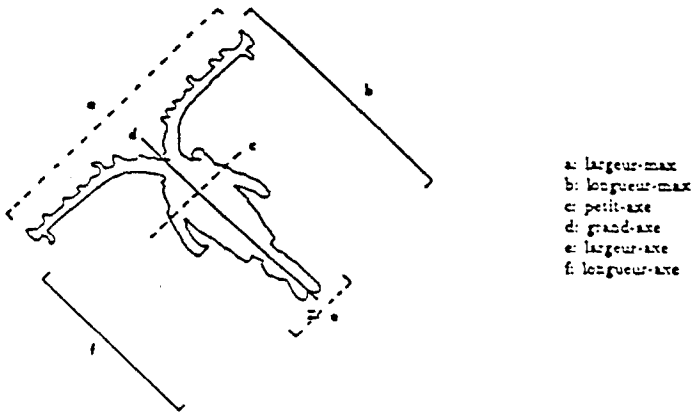


Figure 3. — Construction d'un repère propre à l'organisme et paramètres associés (cas du copépode *Candacia* de la figure 2).

étudier la morphologie externe, on construit pour chaque axe, les courbes représentant les variations de la distance du contour externe à cet axe. Ces courbes sont appelées profil de distance contour-axe (voir fig. 4).

Nous voulons mettre en évidence sur les profils de distance contour-axe des structures caractéristiques, comme des appendices (antennes, tentacules...) ou les différentes parties du corps d'un organisme. Ceci est réalisé en isolant puis en caractérisant les pics significatifs sur les profils (voir fig. 4).

Enfin nous effectuons le calcul des paramètres caractéristiques de chaque pic validé : surface, hauteur absolue et hauteur relative du maximum, largeur de base... A un niveau global, la courbe est caractérisée par sa surface, son nombre de pics, la position du pic encadrant son maximum et la description de celui-ci.

La figure 5 présente la succession des images intermédiaires et des courbes créées au cours du traitement effectué sur chaque image d'organisme et met en évidence les paramètres extraits à chaque étape. Pour plus de précision sur ces traitements voir [Gan 89]. Il faut noter que l'enchaînement des algorithmes est figé. Les paramètres d'appel des différentes procédures sont calculés automati-

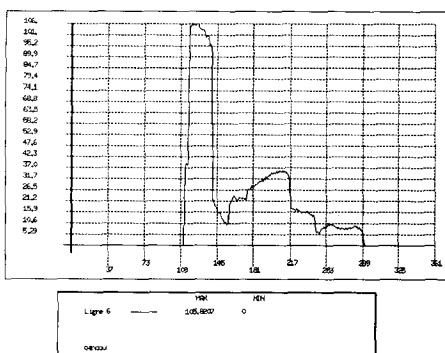


Figure 4. — Profil des distances maximales contour-grand-axe et pics isolés (cas du copépode *Candacia* de la figure 2).

```

Courbe 6
  xmax 124   ymax 105,32
  xdeb 113   ydeb 26,94
  xfin 289   yfin 4,11
  surface 5304
  nombre-pics 3

Pic 1
  xdeb 113   ydeb 26,94
  xmax 124   ymax 105,32
  xfin 153   yfin 11,39
  surface 2703,89

Pic 2
  xdeb 153   ydeb 11,39
  xmax 208   ymax 35,45
  xfin 245   yfin 6,93
  surface 2211,47

Pic 3
  xdeb 245   ydeb 6,93
  xmax 256   ymax 10,17
  xfin 289   yfin 4,11
  surface 378,66
    
```

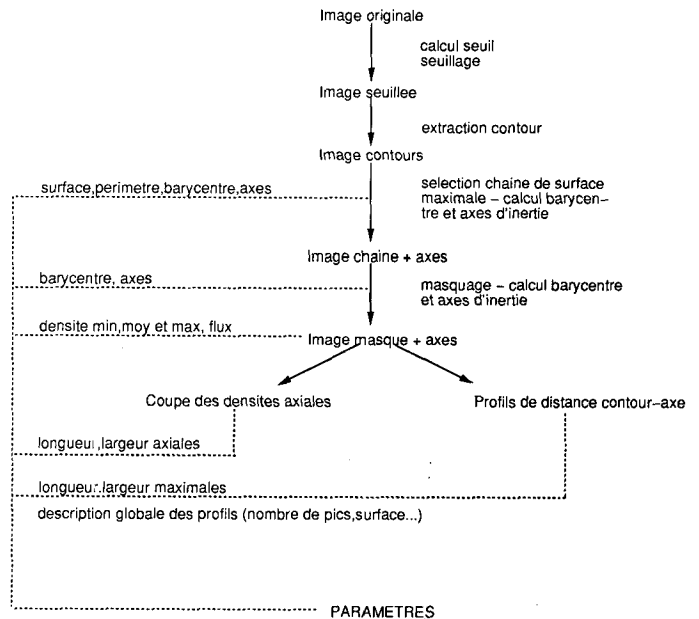


Figure 5. — Synoptique des images créées et de l'extraction des paramètres au cours du traitement.

quement et l'enchaînement des tâches est séquentiel. Aucune part de raisonnement n'intervient au niveau du traitement des images par les algorithmes de vision. Il n'y a notamment aucune évaluation permettant une éventuelle remise en cause des résultats d'un algorithme comme cela peut être le cas dans des systèmes intelligents de vision [Cle 89]. Ceci est lié au fait que la variété des formes et des propriétés des organismes, donc des données les caractérisant, ne permet pas, à ce stade, c'est-à-dire avant le classement, une évaluation fiable et globale des résultats obtenus.

Nous présentons ici la description numérique d'un zooplancton (88 paramètres) :

Zooplancton

- compacite
- x-l barycentre position en x du barycentre des densités
- y-l barycentre position en y du barycentre des densités
- m densité densité moyenne
- flux densité totale
- d sigma écart type de densité
- validité-axe vaut 0 ou 1 suivant que le calcul des axes a été effectué sur une image érodée ou non
- dist-barycentre distance entre le barycentre des points de contour et celui du masque
- x-barycentre position en x du barycentre du masque
- y-barycentre position en y du barycentre du masque
- theta orientation du grand axe d'inertie en radians
- psi orientation du petit axe d'inertie en radians
- den-fon-obj différence de densité entre le fond et l'objet

var-orientation	variation de l'orientation des axes calculés sur le contour et sur le masque en degrés
surface	
perimetre	
longueur-axe	
largeur-axe	
elongation-axe	
longueur-max	
largeur-max	
elongation-max	
perim-long	périmètre/longueur
perim-larg	périmètre/largeur
surf-long	racine de la surface/longueur
surf-larg	racine de la surface/largeur
lonm-lona	longueur-max/longueur-axe
larm-lara	largeur-max/largeur-axe
<i>Courbe</i>	
nbr-pics	nombre de pics
surface	
largeur	
larright	largeur de la courbe à droite du maximum
larleft	largeur de la courbe à gauche du maximum
nummax	numéro du pic encadrant le maximum
surmax	surface du pic encadrant le maximum
larmax	largeur du pic encadrant le maximum
larpicright	largeur du pic à droite du maximum
larpicleft	largeur du pic à gauche du maximum
hmaxabs	hauteur absolue du maximum
hmaxcor	hauteur relative du maximum
haular	hauteur du pic/largeur du pic
surlar	racine de la surface du pic/largeur du pic
hausur	hauteur du pic/racine de la surface du pic

L'ensemble des 88 descripteurs numériques calculés sur les images va s'intégrer dans la base de faits donnée en entrée au système expert chargé du classement des organismes.

3. Présentation succincte de CLASSIC

Le moteur d'inférence CLASSIC a été conçu en 1985 [Gra 85 a], [Gra 85 b]. Sa philosophie repose sur les concepts suivants :

— l'utilisation simultanée d'objets structurés, les prototypes, contenant la connaissance descriptive des objets à classer, et de règles de production décrivant une connaissance heuristique,

— l'utilisation d'un mécanisme de comparaison floue dérivant de la théorie des possibilités et des ensembles flous, permettant la manipulation de données bruitées, incomplètes ou imprécises.

Il a été mis au point pour le développement d'un système expert de classification de galaxies à partir d'images monoculaires, SYGAL [Tho 89]. Au fil des années, sans remise en cause de sa philosophie initiale, CLASSIC a

évolué dans un esprit d'élargissement des concepts manipulés, notamment l'introduction des possibilités d'appel à des procédures externes de calcul en cours de raisonnement [Cle 90] et le développement d'une interface graphique multifenêtres [Ilo 88].

3.1. L'ORGANISATION DE LA CONNAISSANCE

Nous présentons ici les différents éléments permettant d'exprimer la connaissance dans CLASSIC : les prototypes, les règles et les procédures externes.

Les modèles des différentes classes d'objets connus sont décrits sous la forme de prototypes, objets structurés comprenant un ou plusieurs champs, organisés selon un réseau arborescent pour modéliser les relations existant entre les différents objets. Lorsqu'un prototype a des sous-parties, chacune est décrite par une arborescence.

Les règles d'inférence sont utilisées pour compléter la description d'un objet en cours de classement en déduisant la valeur de certains champs à partir de celle(s) d'autre(s) champ(s). Elles sont automatiquement regroupées en de petites bases de règles et attachées aux différents prototypes de l'arbre des prototypes.

CLASSIC étant lui-même écrit en Le_Lisp, il est possible de faire appel à des fonctions Lisp dans les règles et dans les facettes *valeur à calculer* des champs de prototypes. Néanmoins Lisp apparaissant inadapté dans de nombreux cas de calcul, et plus particulièrement en traitement d'images, une interface a été réalisée [Cle 90], [Ilo 88], pour appeler des procédures C ou Fortran.

3.2. LA BASE DE FAITS

La base de faits donnée en entrée au système expert correspond à l'objet à classer.

Un objet est une instance particulière de prototype décrite par son nom, sa classe, la totalité des champs de l'ensemble des prototypes de la classe principale.

L'objet à classer correspond dans notre cas à l'ensemble des paramètres issus de la phase systématique de vision, et à des paramètres reflétant le contexte local de l'objet. Par exemple, le lieu de pêche, la profondeur, la maille du filet sont des paramètres utiles pour restreindre la liste des classes possibles dans le cas des zooplanctons.

3.3. LE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR

Classer un objet, c'est ici rechercher le(s) type(s) qui lui correspond(ent) le mieux dans l'arbre des prototypes, donner une mesure de cette correspondance, compléter la description de l'objet.

Pour cela on explore l'arbre en partant du prototype le plus général (racine) et en allant jusqu'aux instances les plus particulières (feuilles). Une étape très importante est celle de la mise en correspondance des données d'entrée avec les valeurs définies comme admissibles pour un type d'objet donné au niveau de la racine de l'arbre principal. Le parcours de l'arborescence ne sera en effet déclenché que dans la mesure où les caractéristiques de l'objet

inconnu seront compatibles avec les valeurs descriptives admissibles pour un type d'organisme donné.

Le fonctionnement du moteur sera influencé par les valeurs de contrôle affectées, d'une part globalement à un système donné, d'autre part localement par la redéfinition des paramètres de contrôle associés à chaque prototype :

— comparaison objet-prototype : pour chaque champ du prototype le système calcule la compatibilité du champ de l'objet (sa ressemblance) et son incompatibilité (différence entre le champ du prototype et de l'objet) ; au niveau du prototype les compatibilité-incompatibilité sont évaluées en considérant l'ensemble des champs ;

— établissement de la liste des prototypes à parcourir : l'ordonnement s'effectue par défaut selon la chronologie d'apparition des prototypes, mais il est fonction de la priorité (comprise entre 0 et 1) attribuée à chaque prototype ;

— modification du traitement standard : de façon standard, si un prototype est validé, le système sélectionne ses fils (on descend le plus loin possible dans l'arbre), sinon il y a retour vers un prototype précédemment sélectionné et laissé en suspens et ce jusqu'à ce que l'ensemble des branches ait été parcouru ; le contrôle peut être redéfini de façon à ce que le raisonnement s'arrête dès qu'une solution est trouvée (validation d'une feuille) ou dès qu'une branche a été explorée.

Il est à noter que si les propriétés descriptives sont héritées au sein d'une arborescence (la description ne fait que s'enrichir de la racine aux feuilles) ce n'est pas le cas des paramètres assurant la gestion de contrôle.

4. Le système de classement d'organismes zooplanctoniques marins

Ce système a été réalisé en collaboration avec les experts de la station zoologique de Villefranche-sur-Mer. Nous présentons successivement les différents éléments du système réalisé : la base de faits, l'arborescence des prototypes, la base de règles et les procédures externes. Puis nous présentons les résultats obtenus ainsi qu'une évaluation de la méthodologie choisie.

4.1 LA BASE DE FAITS

Comme nous l'avons vu précédemment, elle est majoritairement constituée des 88 paramètres extraits par les algorithmes généraux de vision :

— les données concernant l'ensemble de l'organisme, c'est-à-dire, les données descriptives de l'organisme (surface, compacité, ...) ; et les données techniques décrivant le repère propre de l'organisme par rapport au référentiel de l'image (angle des axes d'inertie, position du barycentre...);

— les données caractérisant les profils de distance contour-axe de part et d'autre de ceux-ci : elles sont limitées aux caractéristiques globales de la courbe et à celle du pic principal de celle-ci.

A ces paramètres vont s'ajouter des données contextuelles qui concernent :

— les conditions d'acquisition des images : organisme : vivant ; support : photogramme ; numériseur : microdensitomètre et numpas : pas de numérisation. Le fait que l'image soit celle d'un organisme vivant influe sur ces caractéristiques potentiellement exploitables ; le type de support et les méthodes employées pour sa numérisation influe sur la qualité des données acquises ;

— des paramètres permettant l'exploitation des résultats (nom du fichier image, ...).

4.2 L'ARBORESCENCE DES PROTOTYPES

Il est acquis, dans les cas traités ou envisagés, qu'un expert du domaine est à même de reconnaître un zooplancton sur un cliché de bonne qualité. La littérature zooplanctologique présente de nombreuses caractéristiques de classement des organismes, mais celles-ci nécessitent des manipulations voire des dissections, bien sûr inaccessibles dans notre cas. L'apprentissage et la formation en biologie restent principalement liées à l'observation avec tuteur, qui permet la mise en évidence des caractéristiques essentielles d'un groupe d'organismes donné. C'est ce type de connaissance, fournie par les experts de la station marine de Villefranche-sur-Mer, que nous nous efforçons d'utiliser ici. L'arborescence mise en place reflète donc ce contexte : la terminologie des classes respecte au niveau des feuilles les appellations zoologiques, celle utilisée pour les nœuds intermédiaires est liée soit à une pratique courante en planctologie, soit à une évidence morphologique (interne ou externe). L'arborescence et la description introduite au niveau des champs de prototypes représentent la connaissance statique de l'expert. L'arborescence ainsi établie est présentée figure 6. La représentation iconique des classes est présentée figure 7. Les organismes ont été divisés en trois grands groupes : les très-allongés, les gélatineux et les copépodes. Il est à noter que la dichotomie de l'arborescence n'est pas la conséquence d'une limitation de CLASSIC mais simplement celle de l'état intermédiaire de développement du système : l'intégration de nouveaux groupes d'organismes à identifier nécessitera le développement de nouvelles branches aux propriétés intermédiaires à celles actuellement définies et l'arborescence en se complétant perdra sa dichotomie actuelle.

4.2.1. Les champs discriminants

Ce sont les champs descriptifs intégrés dans les différents prototypes. Il y a 29 paramètres symboliques et numériques permettant à l'expert de décrire la morphologie des classes biologiques.

On distingue :

— des champs descriptifs symboliques :

- allongement : allongement axial {faible, important, très-important}
- transparence : degré de transparence de l'organisme {faible, moyenne, importante}

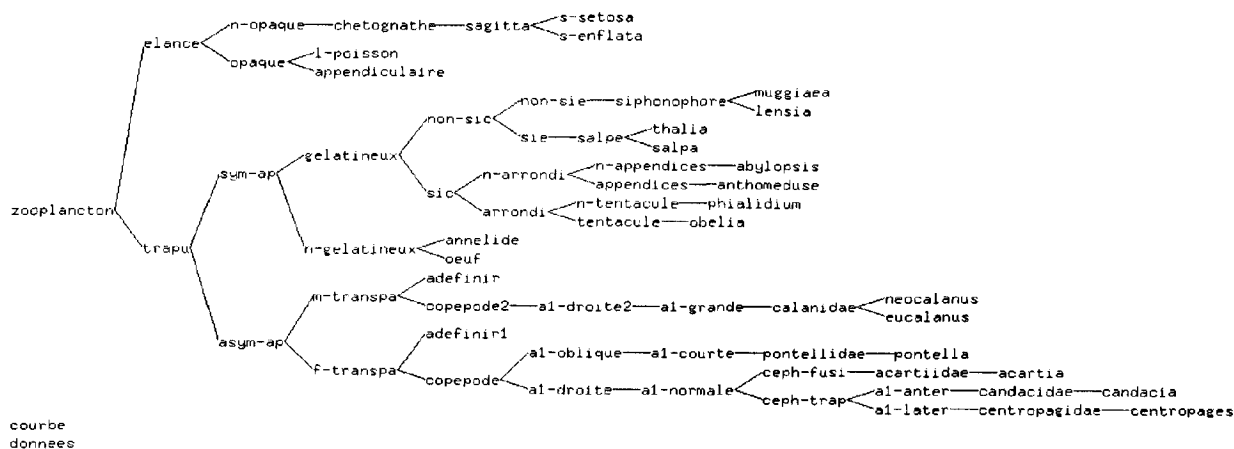


Figure 6. — L'arborescence des prototypes.

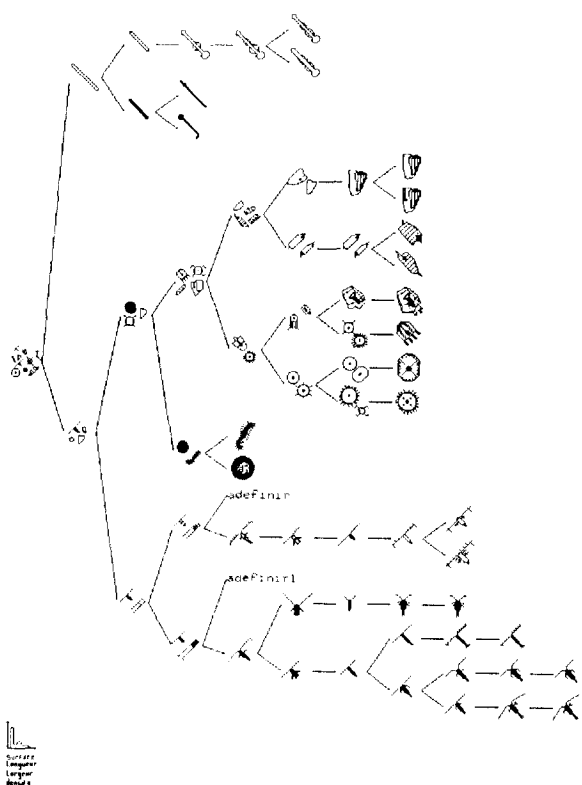


Figure 7. — La représentation iconique de l'arborescence des prototypes.

- ombrelle : représente le corps dans le cas d'une méduse {lisse, tourmentée}
- periph : périphérie, terminologie générale employée pour qualifier le bord d'un organisme {très-lisse, lisse, tourmentée, très-tourmentée}
- avant : pour les organismes chez lesquels cette notion a un sens, position de l'avant par rapport au petit axe {gauche, droite}
- antennes : appendices antérieurs dans le cas des crustacés {absentes, présentes}
- sp-terminologie générale pour qualifier la taille des structures périphériques {importante, normale, faible}
- sp-local : localisation des structures périphériques {extrémité, intermédiaire}
- a1-orien : orientation des antennes (pour les copépodes) {intermédiaire, perpendiculaire}
- a1-tail : taille des antennes {importante, normale, faible}
- a1-position : position des antennes par rapport à l'avant du céphalothorax {antérieure, latérale}
- pmx : petites pattes latérales des copépodes, plus ou moins développées selon le régime alimentaire (herbivore ou carnivore) {peu-développés, très-développés}
- des champs descriptifs numériques :
 - ecargd : écart en surface des moitiés droite et gauche d'un organisme (exprimé en pourcentage)
 - écarts : écarts en surface des moitiés antérieure et postérieure d'un organisme (exprimé en pourcentage).
 - gain : différence entre l'allongement maximal et l'allongement axial au niveau de l'avant de l'organisme (exprimé en microns)
 - ecar : différence de hauteur des maxima des moitiés droite et gauche d'un organisme (exprimée en pourcentage)
 - des champs numériques résultants d'appels externes ou utilisés comme paramètres d'appel :
 - scp : si égal à zéro, il n'y a pas de structure interne centrale détectable sur le petit axe, sinon, numéro du pic correspondant à celle-ci

- c-largeur : largeur du corps au niveau du barycentre {faible, importante}
- s-centrale : structure interne en position centrale {présente, absente}
- s-extrême : structure interne en position extrême vis-à-vis de l'axe d'allongement principal {absente, présente}
- circularité : notion d'arrondissement de la forme {faible, importante}
- tentacules : appendices dans le cas des méduses {absentes, présentes}

- scg : identique à scp mais en considérant le grand axe
- seg : si égal à zéro, il n'y a pas de structure interne extrémale vis-à-vis du grand axe d'allongement, sinon, numéro du pic correspondant à celle-ci
- num : numéro du profil de distance contour-axe utilisé pour déterminer les coordonnées d'extraction d'une sous-image
- x, x, y1, y : coordonnées déterminées pour l'extraction d'une sous-image

L'ensemble de ces champs reflète la nature de notre démarche :

— séparation des grands groupes d'organismes sur des critères généraux et globaux

— adaptation ponctuelle de la description pour discriminer les organismes d'un groupe donné à l'aide des caractéristiques qui leur sont propres.

4.2.2. La base de prototypes

La base de prototypes comprend une cinquantaine de prototypes permettant le classement d'une vingtaine de groupes d'organismes. On entend ici par groupe soit de véritables groupes, *siphonophore* par exemple, soit des genres d'organismes, *Candacia* par exemple.

Nous présentons ici trois exemples de prototype décrivant un gélatineux en général, une sous-classe spécifique de gélatineux, il s'agit d'un siphonophore du genre *Abylopsis*, et un copépode du genre *Candacia*. Ces prototypes seront repris dans les exemples de sessions :

prototype gélatineux

superclasse : sym-ap
allongement : faible
ecarts : [0., 25]
transparence : importante

prototype abylopsis

superclasse : n-appendices
allongement : faible
ecarts : [0., 25]
transparence : importante
scp : [0, 100]
scg : [0, 100]
s-centrale : presente
circularite : faible
tentacules : absentes

prototype candacia

superclasse : candacidae
allongement : faible
ecarts : [25, 100]
ecara : [0., 100.]
transparence : faible
avant : gauche, droite
sp-tail : importante
sp-local : extremite
antennes : presentes
a1-position : anterieure
gain : [0, 10000]
a1-orien : perpendiculaire
a1-tail : normale

x1 : [0, 10000]

x2 : [0, 1000]

y1 : [0, 1000]

y2 : [0, 1000].

A partir de ces exemples, on peut remarquer que tous les prototypes ne sont pas décrits avec les mêmes informations ; la notion de tentacules n'existe pas pour un copépode *Candacia*. Par contre certains descripteurs, tels que l'allongement ou la transparence sont communs à plusieurs prototypes.

4.3. LA BASE DE RÈGLES

Les règles représentent la connaissance dynamique de l'expert. Dans notre cas, cette connaissance correspondra à celle du planctonologue, mais aussi à celle de l'expert en vision. En effet, c'est au niveau du système expert que l'on peut, en fonction du type d'organisme en cours de classement juger de la validité des paramètres mesurés lors de la phase d'extraction et adapter les traitements à effectuer sur l'image, notamment l'isolation de structures particulières, selon les besoins.

Les règles peuvent être considérées comme faisant partie de six groupes :

- Les règles augmentant le niveau d'abstraction des données incluses dans la base de faits :

Règle alona1

si image.elongation-axe < 5. alors allongement = faible

Comme l'élongation sur l'axe est inférieure à 5, le corps n'est que faiblement allongé.

Règle den1

si image.den-fon-obj < .2 alors transparence = importante

Comme la densité de l'objet est très proche de celle, du fond la transparence est importante.

Règle compl

si image.compacite < 15 alors periph = tres-lisse

Comme le périmètre est petit par rapport à la surface, la périphérie du corps est très lisse.

- Les règles calculant de nouvelles valeurs globalement descriptives de la forme de l'individu :

Règle syms1

si courbe-13.surface > courbe-14.surface

alors ecarts = ((courbe-13.surface — courbe-14.surface) * 100) / courbe-13.surface

Calcul en pourcentage de l'écart en surface des moitiés antérieure et postérieure de l'organisme.

- Les règles inférant à partir des données initiales et des données déduites ou calculées :

Règle sic1

si scg > 0 et scp > 0 alors s-centrale = presente

Comme il existe une zone sombre en position centrale sur le petit axe et sur le grand axe une structure interne centrale est présente.

Règle siel

si seg > 0 alors s-extreme = presente

Comme il existe une zone sombre en position extrême sur le grand axe, une structure extrémale axiale est présente.

Règle *circul*

si *image.elongation-max* < 1.3
image.elongation-axe < 1.3
ecargd ~ < 15
ecarts ~ < 15
alors *circularite* = importante

Comme les élongations et les écarts de surface entre les différentes moitiés de l'organisme sont faibles la circularité est importante.

• Les règles augmentant le niveau d'abstraction des résultats ou données dans des cadres éminemment dépendants du contexte de la classe d'individu à décrire :

Règle *tenta1*

si *courbe-13.nbr-pics* = 1 et *courbe-14.nbr-pics* = 1
alors *tentacules* = absentes

Comme il n'existe pas de pics sur les courbes représentant les moitiés postérieure ou antérieure de la méduse, celle-ci n'a pas de tentacules visibles.

Règle *omb1*

si pour-tout *c *courbe*
*c.*nbr-pics* = 1
image.compacite ~ < 20
alors *ombrelle* = lisse

Comme aucun pic n'est discernable sur les profils de la méduse et que la compacité est faible, l'ombrelle est lisse.

Règle *laral*

si *image.largeur-axe* ~ > 1000. alors *c-largeur* = importante

Comme la largeur axiale du chétognathe est élevée, la largeur du corps est importante.

Règle *antpr1*

si *image.validite-axe* = 1.
avant = droite
courbe-7.larleft ~ > *courbe-7.larright* * 6
courbe-8.larleft ~ > *courbe-8.larright* * 6
alors *antennes* = presentes

Comme les axes d'inertie calculés ne présentent pas d'ambiguïtés et qu'il existe de part et d'autre du grand axe des pics présentant les caractéristiques requises, les antennes sont présentes.

Règle *ant1*

si *courbe-7.nummax* = 1 et *courbe-7.hmaxabs* > = 600
alors *sp-tail* = importante et *sp-local* = extremite

Comme le maxima du profil correspondant à la moitié droite de l'organisme est inclu dans le premier pic et que sa hauteur est importante, il existe une structure périphérique de grande taille dont la position est extrémale.

Règle *antor1*

si *image.elongation-max* < 1 alors *a1-orien* = perpendiculaire

Comme l'élongation maximale est inférieure à 1, les antennes sont orientées perpendiculairement à l'axe d'allongement.

Règle *antta1*

si *a1-orien* = perpendiculaire et *image.largeur-max* > *image.longueur-max* * 2
alors *a1-tail* = importante

Comme les antennes sont perpendiculaires au corps et que la largeur maximale est supérieure à deux fois la longueur maximale, la taille des antennes est importante.

Règle *antpos1*

si *image.longueur-max* > *image.longueur-axe* + 200
alors *a1-position* = antérieure

Comme la longueur maximale est sensiblement supérieure à la longueur axiale, la position des antennes est antérieure vis-à-vis de l'extrémité du céphalothorax.

Règle *pmx1*

si *image.largeur-axe* < = 500 alors *pmx* = peu développées

Comme la largeur axiale est faible, les pattes latérales sont peu développées.

• Les règles évaluant les paramètres et les modalités d'appel à des procédures externes :

Règle *preant1*

si *sourbe-7.hmaxabs* > *courbe-8.hmaxabs*
alors *num* = 7 et *ecara* = ((*courbe-7.hmaxabs* - *courbe-8.hmaxabs*) * 100) / *courbe-7.hmaxabs*

Comme le maxima le plus important est situé sur le profil droit des distances contour-axe, le numéro de profil de travail est le 7 et le pourcentage de différence des hauteurs est calculé vis-à-vis de celui-ci.

Règle *antext1*

si *ecara* > 10 et *num* = 7

alors $y1 = ((\text{courbe-7.hmaxabs} - \text{courbe-8.hmaxabs}) / 2) / \text{image.numpas}$
 $y2 = (\text{courbe-7.hmaxabs} / \text{image.numpas}) + 5$
 $x2 = \text{courbe-7.larmax} / \text{image.numpas}$

Comme la différence de hauteur des maxima de part et d'autre du grand axe est supérieure à 10 % et que le profil de travail est le numéro 7, les coordonnées d'extraction de la sous-image sont évaluées vis-à-vis de ses caractéristiques et l'origine des ordonnées n'est pas considérée directement sur l'axe.

Règle *posav1*

si *image.psi* < 0. et *courbe-13.surface* > *courbe-14.surface*
alors *avant* = droite

Comme l'angle du petit axe est négatif et que la surface de la moitié située à sa droite est supérieure à la surface de la moitié située à sa gauche, l'avant est à droite.

• Les règles réalisant les appels externes proprement dits (les paramètres en argument seront explicités lors de la présentation des procédures externes) :

Règle *app1*

si *image.appel* = 1
alors

scp = \$(structint (recc 'image 'nom) '12 15. 2. .3)
scg = \$(structint (recc 'image 'nom) '11 15. 2. .3)

Recherche d'organes internes centraux.

Regle app2

si image.appel=1

alors seg=\$(structint (recc 'image 'nom) '11 30. 3. .3)

Recherche d'organes internes extrémaux.

Regle app3

si image.longueur-max>image.longueur-axe

alors gain=\$(gainthe (recc 'image 'nom) (recc 'avant))*image.numpas

Calcul de l'implantation des antennes.

La base de règles comprend une soixantaine de règles. On peut remarquer que l'ensemble des paramètres de la base de faits n'est pas utilisé à ce stade de développement du système, et que la quarantaine de paramètres exploitée l'est bien souvent à des niveaux très ponctuels.

4.4. LES PROCÉDURES EXTERNES

Appelées en cours de classement, soit au niveau de règles, soit au niveau de champs calculables de prototypes, les procédures externes permettent d'acquies contextuellement de nouvelles informations sur l'individu en cours de classement. Ces informations sont des descriptions de structures spécifiques à un groupe d'organisme ; ces informations sont indispensables pour affiner le classement (par exemple l'information sur les antennes, qui n'existent que chez les crustacés, est nécessaire pour classer les copépodes).

Les appels de procédure dans les règles correspondent à la prise de décision de l'exécution d'un programme spécialisé précis et non à la demande de résolution d'une requête à un but abstrait de traitement d'image.

Quatre procédures ont été développées dans le cadre de ce système :

— deux effectuant des calculs ponctuels à partir des profils de distance contour-axe : « gainthe » et « caltailant » ;

— une recherchant la présence de structures internes sur les coupes axiales de densité : « structint » ;

— une procédure permettant l'extraction d'une sous-image, constituant une zone d'intérêt privilégiée, dans l'image d'origine : « sousima ».

4.4.1. Les procédures de calcul ponctuel

Les fonctions « gainthe » et « caltailant » sont utilisées dans le cadre de la caractérisation des antennes de copépodes. En effet les antennes par leur position, leur orientation, leur longueur par rapport à celle de l'organisme, vont permettre d'identifier différents genres de copépodes.

On cherche à mettre en évidence trois types d'implantation des antennes vis-à-vis de l'extrémité du céphalothorax : (a) antennes brisées, (b) antennes horizontales et (c) antennes vers l'avant. Les cas (a) et (c) vont se traduire par une longueur maximale supérieure à la longueur axiale des organismes considérés. Pour se distinguer ces deux cas, il est nécessaire d'évaluer cette variation de longueur

au niveau de l'avant de l'organisme, c'est le rôle de la fonction « gainthe ». Le calcul est réalisé à partir des profils de distance contour-axe de part et d'autre du grand axe de l'organisme et de la coupe axiale des densités.

La fonction « caltailant » est utilisée dans le cas (c) pour mesurer la longueur des antennes. En effet dans les cas (a) et (b) on considère que la rectitude des antennes et leur position orthogonale vis-à-vis de l'axe d'allongement du corps nous permettent d'assimiler la longueur des antennes à la hauteur absolue du maximum détecté sur le profil de distance contour-axe. On prend plus exactement la moyenne des hauteurs maximales mesurées de part et d'autre de l'axe.

4.4.2. La recherche de structures internes

La fonction « structint » est utilisée pour détecter la présence internes en position axiale vis-à-vis de l'organisme. Cette approche est indispensable dans le cas du plancton gélatineux pour identifier les méduses, les salpes et certains siphonophores.

On distingue ici deux cadres d'utilisation :

— la recherche d'organes centraux (manubrium des méduses et oléocyste des siphonophores du genre *abylopsis*, figure 8) ;

— la recherche d'organes extrémaux vis-à-vis du grand axe (nucléole des salpes fig. 8).

Cette fonction travaille sur les coupes de densité réalisées sur chacun des axes. L'algorithme comprend deux étapes successives :

— recherche des minima sur les coupes de densité ;

— détection de la présence proprement dite d'un minimum possédant les propriétés de positionnement et les caractéristiques densitométriques souhaitées.

4.4.3. Extraction de sous-images

Comme nous l'avons vu précédemment, l'utilisation des profils de distance maximale de part et d'autre de chacun des axes et les coupes axiales de densité permettent une caractérisation globale, ou contextuellement affinée, des groupes d'organismes.

Néanmoins ces données ne permettent pas, en raison de leur degré d'abstraction, d'accéder à l'ensemble des informations fines contenues dans l'image de l'organisme en cours de classement. Contextuellement, il est important de caractériser un appendice ou une partie du corps, en prenant en compte l'ensemble des données qui existent dans l'image originale.

La notion de contexte de classement pouvant être définie au niveau de CLASSIC, il paraissait indispensable d'avoir un algorithme permettant d'isoler dans l'image d'origine une sous-image de l'organisme, correspondant à une sous-structure qui lui soit propre. En conséquence nous avons implémenté un algorithme, la fonction « sousima », permettant l'extraction d'une zone d'intérêt dans une image, compte tenu des données accessibles (données incluses dans la base de faits et données inférées au cours du traitement).

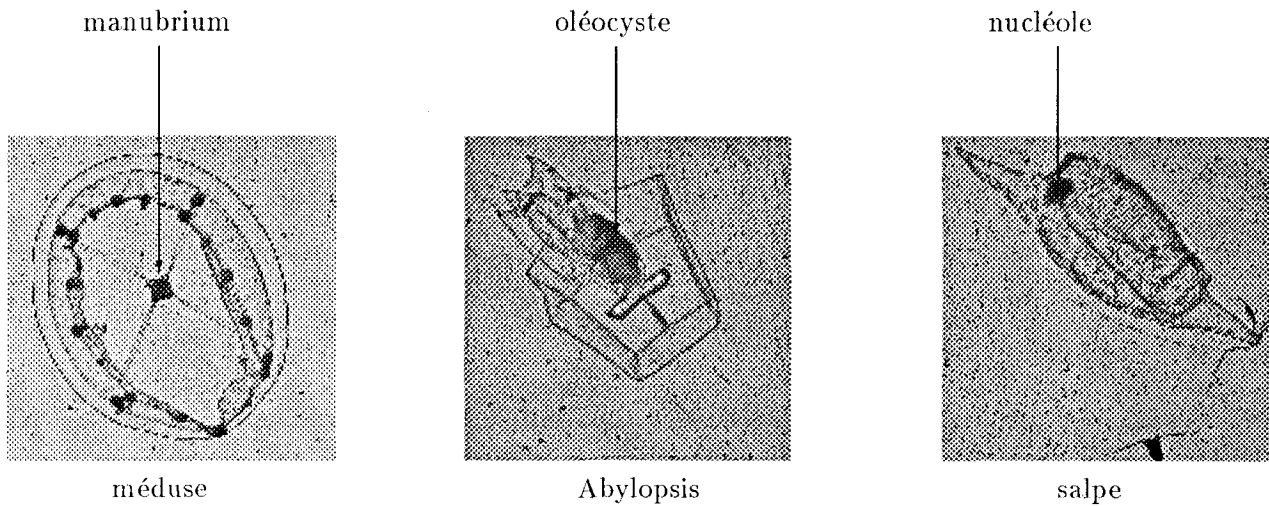


Figure 8. — Organes à mettre en évidence.

Les coordonnées de la fenêtre d'extraction sont exprimées dans le repère propre à l'organisme, préalablement défini, dont l'origine est située au barycentre de l'organisme et dont les axes sont représentés par ses axes d'inertie (cf. § 2).

Dans le cas implémenté dans la base de connaissance, correspondant à l'extraction de la sous-image d'une antenne de copépode, ces coordonnées sont directement disponibles dans la base de faits puisqu'elles caractérisent le pic principal d'un profil de distance contour-axe.

Nous présentons ici deux exemples d'extraction de sous-images :

— l'un concernant l'isolation des antennes, de façon globale ou individuelle, du céphalothorax et de l'abdomen d'un copépode à partir des données automatiquement acquises sur les profils de distance contour-axe (fig. 9) ;

— l'autre concernant l'isolation de la zone du manubrium d'une méduse à partir des données acquises sur les coupes axiales de densité (fig. 10).

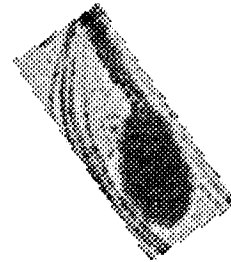


Figure 10. — Isolation de la sous-image du manubrium d'une méduse.

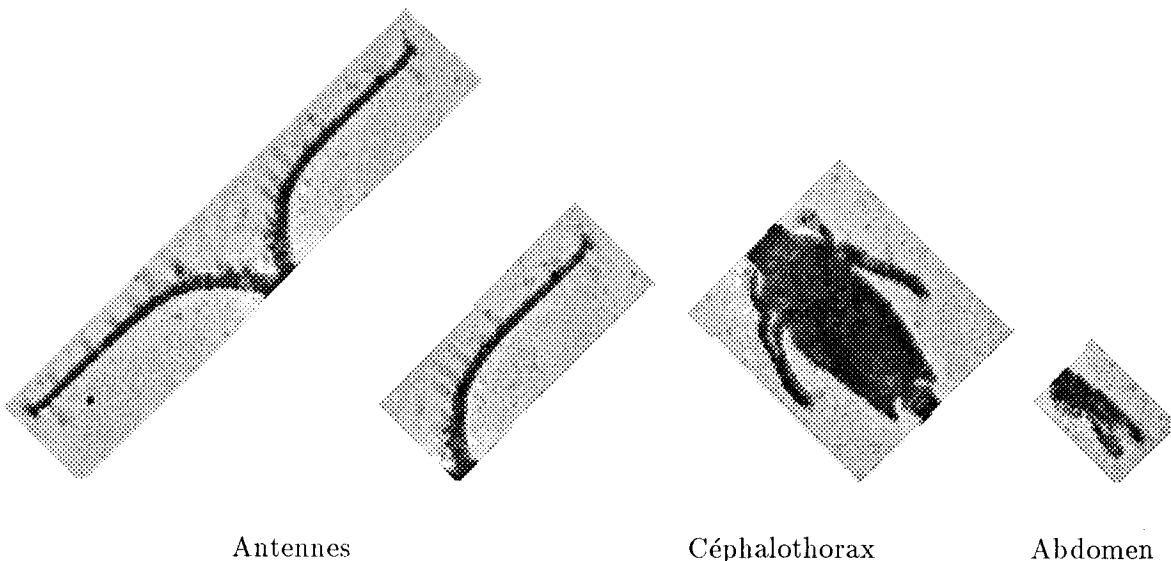


Figure 9. — Les sous-images des différentes parties du corps d'un copépode.

Sur ces sous-images, les données à extraire sont, dans le cas des antennes, leur longueur, leur forme précise (rectiligne, brisée, courbée), l'information décrivant leurs appendices (soies): nombre, taille et répartition; de même les données à extraire sur les sous-images du céphalothorax et de l'abdomen sont des paramètres de taille et de forme.

4.5. RÉSULTATS

Nous présentons deux exemples de sessions correspondant au classement d'un copépode et d'un siphonophore, puis de façon plus globale les résultats obtenus avec le prototype de système réalisé.

4.5.1. Exemples de session

Les différentes étapes du raisonnement sont présentées sous forme d'un fichier retraçant les étapes de mise en correspondance entre les classes définies (prototypes) et l'objet à identifier, et les étapes d'inférence. Lorsque la mise en correspondance est correcte, le prototype est validé et les règles d'inférence associées à ce prototype sont activées. Dans les sessions présentées, seules sont montrées, pour plus de lisibilité, les noms des règles (par exemple : alonal) et leur commentaire.

Premier exemple de session : La figure 11 met en évidence le chemin parcouru dans l'arborescence des prototypes lors du classement d'un copépode du genre *Candacia*. Il s'agit du copépode *candacia* de la figure 2.

validation du prototype zooplancton ;
alonal : Comme l'élongation sur l'axe est inférieure à 5, le corps n'est que faiblement allongé ;

syms3 : Calcul en pourcentage de l'écart en surface des moitiés droite et gauche de l'organisme ;
validation du prototype trapu ;
syms2 : calcul en pourcentage de l'écart en surface des moitiés antérieure et postérieure de l'organisme ;
validation du prototype asym-ap ;
den3 : Comme la densité de l'objet est très loin de celle du fond la transparence est faible ;
posav2 : Comme l'angle du petit axe est négatif et que la surface de la moitié située à sa gauche est supérieure à la surface de la moitié située à sa droite, l'avant est à gauche ;
validation du prototype f-transpa ;
ant4 : Comme le maximum du profil correspondant à la moitié droite de l'organisme est inclus dans le premier pic et que sa hauteur est importante, il existe une structure périphérique de grande taille à droite dont la position est extrême ;
ant3 : Comme le maximum du profil correspondant à la moitié gauche de l'organisme est inclus dans le premier pic et que sa hauteur est importante, il existe une structure périphérique de grande taille à gauche dont la position est extrême ;
antpr4 : Comme les axes d'inertie calculés ne présentent pas d'ambiguïté et qu'il existe de part et d'autre du grand axe des pics présentant les caractéristiques requises, les antennes sont présentes ;
preant1 : Comme le maximum le plus important est situé sur le profil droit des distances contour-axe, le numéro du profil de travail est le 7 et le pourcentage de différence des hauteurs est calculé vis-à-vis de celui-ci ;
validation du prototype copepode ;
antor1 : Comme l'élongation maximale est inférieure à 1 ; les antennes sont orientées perpendiculairement à l'axe d'allongement a1-orien=perpendiculaire ;

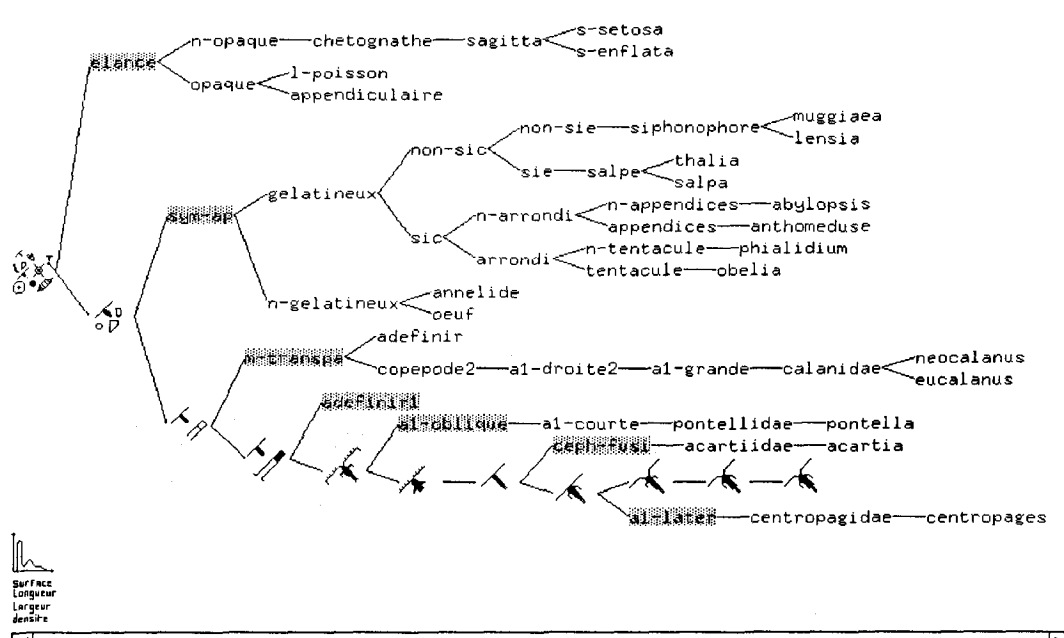


Figure 11. — L'arbre des prototypes à l'issue du classement d'un copépode du genre *Candacia*. Les nœuds iconiques correspondent aux nœuds validés, les nœuds grisés aux nœuds incompatibles, les autres correspondent aux nœuds qui n'ont pas été explorés.

```

app4 : gain=$(gainthe (recc 'image 'nom) (recc
'avant))*image.numpas
validation du prototype a1-droite ;
antta2 : Comme les antennes perpendiculaires au corps
et que la longueur maximale est supérieure à trois quart de
la largeur maximale, la taille des antennes est faible ;
antext2 :
y1=0
y2=(courbe-7.hmaxabs/image.numpas)+5
x2=courbe-7.larmax/image.numpas ;
validation du prototype a1-normale ;
pmx2 : Comme la largeur axiale est importante, le
pattes latérales sont très développées ;
validation du prototype ceph-trap ;
antpos1 : Comme la longueur maximale est supérieure à
la longueur axiale, la position des antennes est antérieure ;
validation du prototype a1-anter ;
validation du prototype candacidae ;
validation du prototype candacia ;

```

Description finale de can

```

classe : candacia
allongement: faible
ecargd : 2.548418
transparence: faible
ecarts : 68.43434
avant : gauche
antennes : presentes
appel2 : 1
sp-tail : importance
sp-local : extremite
a1-orien : perpendiculaire
gain : 522.
a1-tail : faible
ecara : 1.36308
cephav : 0.
y2 : 110.1582
x2 : 43
y1 : 0
num : 7

```

```

antenne : 1.
orien : 1
pmx : tres-developpees
a1-position : anterieure

```

Deuxième exemple de session

La figure 12 met en évidence le chemin parcouru dans l'arborescence des prototypes lors du classement d'un siphonophore du genre *Abylopsis*. Il s'agit du siphonophore *abylopsis* de la figure 2.

La session correspondante est la suivante :

```

validation du prototype zooplancton ;
alonal : Comme l'élongation sur l'axe est inférieure à 5,
le corps n'est que faiblement allongé ;
syms3 : Calcul en pourcentage de l'écart en surface des
moitiés droite et gauche de l'organisme ;
validation du prototype trapu ;
syms2 : Calcul en pourcentage de l'écart en surface des
moitiés antérieure et postérieure de l'organisme ;
validation du prototype sym-ap ;
den1 : Comme la densité de l'objet est très proche de
celle du fond la transparence est importante ;
validation du prototype gélatineux ;
appl : scp=$(structint (recc 'image 'nom) '12 15. 2.
.2999988) ;
scg=$(structint (recc 'image 'nom) '11 15. 2. .2999988)

```

Recherche des organes internes centraux ;

```

sic1 : Comme il existe une zone sombre en position
centrale sur le petit axe et sur le grand axe une structure
interne centrale est présente ;
validation du prototype sic ;
circu2 : Comme les élongations axiale et maximale sont
importantes la circularité est faible ;
validation du prototype n-arrondi ;
tentat1 : Comme il n'existe pas de pics sur les courbes
représentant les moitiés postérieure ou antérieure de
l'organisme, celui-ci n'a pas de tentacules visibles ;
validation du prototype n-appendices ;
validation du prototype abylopsis ;

```

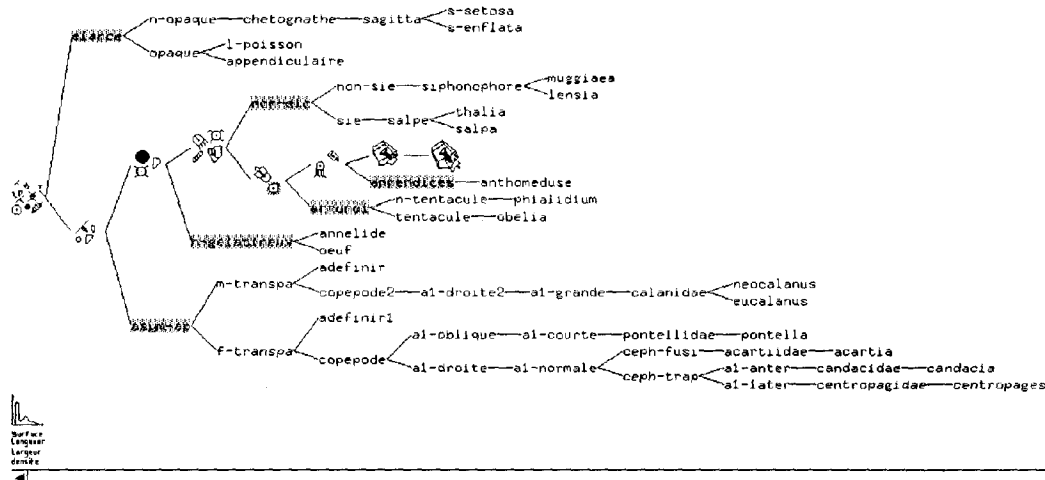


Figure 12. — L'arbre des prototypes à l'issue du classement d'un siphonophore du genre *Abylopsis*. Les nœuds iconiques correspondent aux nœuds validés, les nœuds grisés aux nœuds incompatibles, les autres correspondent aux nœuds qui n'ont pas été explorés.

Description finale de *b42*

classe	: abylopsis
allongement	: faible
ecargd	: 4.268426
transparence	: importante
ecarts	: .05542218
scp	: 3.
scg	: 4.
s-centrale	: presente
circularite	: faible
tentacules	: absentes

Ces deux exemples de classement d'organismes très différents mettent bien en évidence les avantages de l'approche système expert utilisée, tant au niveau de l'adaptabilité du traitement effectué, dans le sens gestion des algorithmes de vision, qu'au niveau de la latitude dans la description biologique. Ces avantages sont bien entendu liés à la structure du système, c'est-à-dire une arborescence des classes descriptives et une base de règles scindée en plusieurs petites bases contextuellement adaptées.

4.5.2. Résultats d'ensemble

Le prototype de système réalisé permet l'identification d'une vingtaine de groupes taxonomiques correspondants à des entités zoologiques plus ou moins fines (groupe, genre, espèce). Testé sur une soixantaine d'individus, ce système ne permet pas une évaluation numérique de ses capacités. Il est en effet très difficile d'estimer un pourcentage de réussite dans la mesure où les critères de celle-ci ne peuvent pas être établis sur un ensemble aussi restreint. A ce stade du développement on peut simplement dire que nous n'avons pas eu de mauvais classement. Néanmoins l'estimation des qualités du système nécessiterait d'approfondir l'arborescence, au moins jusqu'au niveau générique (au niveau du genre), dans l'ensemble des groupes, et sa validation ne peut se faire que sur un nombre beaucoup plus important d'individus à identifier. En outre, seuls ont été mis en place les critères descriptifs a priori indispensables. Pour augmenter la fiabilité du système il serait nécessaire de compléter la description utilisée. En ce qui concerne les temps d'identification des individus, la phase d'extraction des paramètres par les algorithmes généraux de vision prend entre 80 et 90 secondes (sur SUN 3-60) sur les images actuelles (256 lignes, 256 colonnes). Ce temps devrait pouvoir être réduit :

— nous construisons actuellement physiquement toutes les images intermédiaires correspondant aux différentes phases du traitement,

— nous utilisons des algorithmes satisfaisants en ce qui concerne la qualité des résultats obtenus mais dont les performances en temps de calcul pourraient être optimisées,

— si la qualité des images peut être maintenue avec des systèmes de numérisation moins contraignants que le microdensitomètre, il serait envisageable de travailler sur des images de moindre résolution.

La phase d'identification des organismes par le système expert est extrêmement rapide. Pour des organismes

traités actuellement (chétopognathes, gélatineux) l'identification prend une fraction de seconde, mais tendra à se ralentir après l'extension de la base de connaissance concernant ces individus. On peut estimer un temps moyen d'identification de deux secondes (sur SUN 3-60), en se référant à l'identification de copépode pour lesquels on effectue l'extraction d'une sous-image de taille importante.

Il est important de noter que ce temps d'identification est indépendant du nombre de classes d'organismes si celles-ci sont bien décrites et bien hiérarchisées.

5. Conclusion

Le système qui a été réalisé a pour objectif de montrer la faisabilité du classement automatique d'organismes naturels complexes en se basant sur la connaissance des experts du domaine.

Le système réalisé, malgré ses limites actuelles, apparaît tout à fait satisfaisant quant aux choix méthodologiques :

— la connaissance descriptive des zooplanctonologues peut être exprimée et utilisée de façon naturelle,

— la notion de contexte d'appel d'algorithme de vision au cours du raisonnement du système permet une gestion et une paramétrisation optimales des algorithmes de vision,

— la complémentation progressive du système ne pose aucun problème.

Les mensurations introduites dans la base de faits ne sont encore que très rarement utilisées en tant que telles au cours du raisonnement. En effet ces données (longueur, largeur, surface...) étaient difficiles, voire impossibles, à acquérir pour le biologiste (mesures visuelles au micromètre) et n'étaient donc utilisées que dans des contextes très restreints. Désormais, leur facilité d'acquisition numérique permet donc une extension de la connaissance descriptive existante.

La qualité des résultats de cette étude de faisabilité permet d'envisager maintenant le développement complet du système par des biologistes ; en fonction de leurs objectifs scientifiques (étude de certaines populations dans des zones géographiques particulières) certaines branches de l'arbre des prototypes devront être étendues, car nous nous sommes plus spécialement intéressés ici au cas des copépodes.

En ce qui concerne le problème général de la reconnaissance d'objets à partir d'informations fournies par des capteurs, on constate que cette méthode s'appuie sur la disponibilité d'une expertise consciente sur la description des formes recherchées et sur la notion de reconnaissance progressive de classes organisées hiérarchiquement. Les domaines pour lesquels les objets à reconnaître sont complexes (car possédant de nombreuses caractéristiques et pour lesquels il existe une variabilité importante entre les apparences des individus) sont particulièrement bien adaptés à ce type de méthode ; en effet pour de tels domaines (par exemple en agriculture, en biologie, en astronomie, où l'on s'intéresse à des objets naturels ou à

des organismes vivants), il n'est pas possible de générer systématiquement toutes les images de référence correspondant aux classes recherchées. Par contre, on dispose d'une connaissance stable sur la description symbolique (abstraite) des objets. Le problème de la description numérique (concrète) des objets est un problème de traitement du signal ou de traitement d'images. Dans la méthode proposée la connaissance sur la manière de traiter ce problème est implicite (enchaînement prédéterminé de programmes précis puis en cours de classement appel éventuel à certains programmes spécialisés); les travaux que nous avons en cours ont pour but de gérer de manière explicite la connaissance sur les traitements d'image à l'aide d'outil tel que OCAPAPI [Cle 89]; il s'agit d'une coopération entre un système expert construit avec OCAPAPI manipulant la connaissance sur les programmes de traitement d'image; cette coopération est envisageable via l'émission de requêtes à des buts abstraits de traitement d'image au lieu des actuels appels de programmes spécialisés.

Manuscrit reçu le 25 juillet 1991.

BIBLIOGRAPHIE

- [Bal 82] D. D. BALLARD, C. BROWN, « Computer Vision », Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
- [Bra 85] J. C. BRACONNOT, « Confection et utilisation de photogrammes pour les études de croissance, de développement et d'abondance de populations d'espèces pélagiques marines gélatineuses », C.R. Acad. Sc. Paris, t. 300, série III, N° 15, 563-566, 1985.
- [Bro 85] R. A. BROOKS, Symbolic Reasoning Among 3-D Models and 2-D Images, *Artificial Intelligence Journal* 17, 1981, 285-348.
- [Che 86a] K. CHEHDI, « Reconnaissance de formes par analyse d'images. Applications à la biologie marine », Thèse docteur-ingénieur, Univ. de Rebbes, 1986.
- [Che 86b] K. CHEHDI, J. BOUCHER, A. HILLION, « Automatic classification of zooplankton by image analysis », *ICASSP*, Vol. 2, 1477-1480, 1986.
- [Cle 89] V. CLÉMENT, M. THONNAT, « Handling knowledge in image processing libraries to build automatic systems », *International Workshop on Machine Intelligence and Vision MIV89*, Tokyo, avril 1989.
- [Cle 90] V. CLÉMENT, « Raisonnements cognitifs appliqués au pilotage d'algorithmes de traitement d'image », Thèse de doctorat, Université de Nice, 1990.
- [Gan 89] M. H. GANDELIN, « Une approche système expert pour la reconnaissance automatique d'organismes marins à partir d'images monoculaires », Thèse de doctorat, Université de Nice, décembre 1989.
- [Gra 85a] C. GRANGER, « Reconnaissance d'objets par mise en correspondance en vision par ordinateur », Thèse de doctorat, Univ. de Nice, juin 1985.
- [Gra 85b] C. GRANGER, M. THONNAT, « Un système de vision fondé sur une méthode structurelle de classification », *Cognitiva*, 137-142, Paris, juin 1985.
- [Ike 88] K. IKEUCHI and T. LANADE, Automatic Generation of Object Recognition Programs, in *Proceedings of the IEEE* 78.8, 1988, pp. 1016-1035.
- [Ilo 88] « CLASSIC générateur de systèmes experts de classification et de diagnostic. Manuel de l'utilisateur », ILOG, Paris 1988.
- [Jef 84] H. P. JEFFRIES, M. S. BERMAN, R. D. POULARIKAS, C. KATSINIS, I. MELAS, K. SHERMAN, L. BIVINS, « Automated sizing, counting and identification of zooplankton by pattern recognition », *Marine biology*, 78, 329-334, 1984.
- [Kat 87] C. KATSINIS, A. D. POULARIKAS, « Analysis of a sampling technique applied to biological images », *IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence* Vol. PAMI-9, N° 6, 832-835, novembre 1987.
- [Luc 77] M. LUCAS, « Contribution à l'étude des techniques de communication graphique avec un ordinateur. Eléments de base des logiciels graphiques interactif », Thèse d'état, IMAG, Grenoble, 1977.
- [Lux 85] A. LUX, « Algorithmique et contrôle en vision par ordinateur », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, septembre 1985.
- [New 79] W. NEUMANN, R. F. SPROULL, « Principles of interactive computer graphics », Mc Graw Hill, New York, Second edition, 1979.
- [Pav 79] T. PAVLIDIS, « Filling algorithms for raster graphics », *Comp. Graphics and Image Proc.*, Vol. 10, 126-141, 1979.
- [Smi 79] A. R. SMITH, « Tint fill », *SIGGRAPH proceedings*, 276-283, 1979.
- [Tho 88] M. THONNAT, M. H. GANDELIN, « An expert system for the automatic classification and description of zooplanktons from monocular images », *9th International Conference on Pattern Recognition, ICPR*, Roma, Italy, November 1988.
- [Tho 89] M. THONNAT, A. BJAOU, « Knowledge based galaxy classification systems », in *Knowledge-based systems in astronomy*, A. Heck, F. Murtagh Eds., *Lecture Notes in Physics*, 329 Springer verlag, 1989.