

# Reconstruction de cylindres généralisés circulaires par modèle déformable

## Deformable Model to Recover Circular Generalized Cylinders

par Patrick SAYD, Michel DHOME, Jean-Marc LAVEST, Jean-Thierry LAPRESTÉ

Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Electronique, et d'Automatique (LASMEA)  
UMR 6602 du CNRS, Université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand  
63177 Aubière Cedex, France  
sayd@lasmea.univ-bpclermont.fr

### *résumé et mots clés*

Dans cet article, nous proposons une méthode de reconstruction des cylindres généralisés à section circulaire par modèle déformable. Tout d'abord, nous formulons l'hypothèse que les sections de l'objet sont de rayon constant. Nous parlons alors de Cylindres Généralisés Circulaires Uniformes (CGCU). Si le rayon est connu *a priori*, cette hypothèse permet de retrouver l'axe 3D de l'objet, paramétré par une fonction B-Spline, à partir d'une seule vue, sinon la reconstruction est faite à un facteur d'échelle près. Après une initialisation grossière, le modèle est déformé itérativement jusqu'à ce que sa forme devienne cohérente avec les contours extraits de l'image.

Nous montrerons ensuite que l'exploitation de différentes vues d'un même objet permet d'adapter notre approche à la reconstruction de Cylindres Généralisés Circulaires (CGC), objets constitués de sections circulaires à rayon non-constant. Aucune hypothèse *a priori* n'est faite sur la géométrie de l'axe ou sur la façon dont varie le rayon des sections. Afin de pouvoir s'adapter au plus grand nombre d'objets appartenant à cette classe, deux fonctions B-Spline indépendantes sont utilisées pour paramétrer l'axe et la fonction de variation du rayon.

**Cylindres généralisés, reconstruction 3D, modèle déformable, B-Spline, projection perspective.**

### *abstract and key words*

This paper describes a new approach to recover Circular Generalized Cylinders (CGC) using deformable models. This class includes many objects present on industrial site (pipes) or on the natural environment (human leg, tree trunk).

First, we propose a modeling algorithm of objects with constant cross-section radius, called Uniform Circular Generalized Cylinders (UCGC). With this assumption, reconstruction is possible from a single view of the object. In the case of a single image, the cross-section radius cannot be estimated. If this radius is unknown, reconstruction is achieved up to a scale factor. The model 3D axis is parametrized by a B-spline curve. After a coarse initialization, the model changes shape to fit the object contour detected in the studied image.

Using different views of the object, the previous approach is adapted to Circular Generalized Cylinders (cross-section radius variations are now permitted). No assumption is made on the axis geometry nor on the way the radius varies. In order to be sufficiently adaptative to the large range of object shape belonging to this class, we propose using two independent B-spline functions to model respectively axis and cross-section radii variations.

These algorithms use the geometrical properties of the occluding contours given by the perspective projection of the objects. It is the first attempt to solve this problem by taking into account this accurate projective model.

Generalized Cylinder, 3D Reconstruction, Deformable Model, B-Spline, Perspective Projection.

# 1. état de l'art

Le terme Cylindre Généralisé (CG) a été introduit par Binford en 1971 [3]. La terminologie descriptive des cylindres généralisés s'appuie sur la définition de sous-classes et varie selon l'auteur. Pour notre part, nous utilisons la taxinomie de Shaffer [22] qui permet une description exhaustive des sous-classes des cylindres généralisés.

Un cylindre généralisé est défini par son axe (une courbe gauche) et un ensemble de sections. Un adjectif peut être associé au terme de Cylindre Généralisé pour préciser la forme de l'axe ou la forme des sections. Par exemple on parlera de CG *droit* si l'axe est une droite, de CG *circulaire* si les sections sont des cercles.

Ensuite, une règle de transformation est associée à l'objet pour spécifier la façon dont varient la forme et la taille des sections le long de l'axe. Par exemple, on parlera de CG *homogène* si toutes les sections ont la même forme (un CG circulaire est homogène), ou de CG *uniforme* si les sections sont toutes de même taille.

Enfin, l'angle que forme le plan de la section avec le vecteur tangent à l'axe est supposé constant. Les auteurs français supposent que cet angle est droit. Si ce n'est pas le cas, il convient de le préciser en ajoutant l'adjectif *oblique* à la description de l'objet. Les auteurs anglo-saxons précisent que les sections sont orthogonales en utilisant l'adjectif *right*.

Ponce *et al.* [19][11] se sont intéressés à l'aspect des contours apparents de la projection de cylindres généralisés dans une image. Ils étudient les variations de la topologie de ces contours en fonction du point de vue. En considérant que la topologie des contours est conservée lors de faibles modifications du point de vue, la localisation de la caméra peut être estimée à partir des caractéristiques topologiques des contours.

Ulupinar et Nevatia [24] proposent une méthode de reconstruction des cylindres droits généralisés homogènes (CDGH) à partir d'une seule image. Les primitives utilisées sont les contours occultants et les surfaces de base de l'objet. Tout d'abord, la projection de l'axe est extraite de l'image en utilisant la pseudo-symétrie des contours [16]. La forme des sections est déterminée à partir de la vue de l'extrémité de l'objet. Ce modèle de section est translaté le long de l'axe et le facteur d'échelle, relatif à une section, est alors fixé de façon à ce que la projection de cette section soit tangente aux contours. Cette méthode est étendue aux cylindres généralisés homogènes à axe courbe [23][25]. La méthode suppose que l'axe est plan et que ce plan est estimable à partir de l'orientation des sections de base.

Ponce [18] a montré que les contours d'un CDGH étaient insuffisants pour localiser l'objet à partir d'une seule vue. Pour lever cette indétermination, Chung et Nevatia [5] proposent l'utilisation d'images stéréoscopiques; la méthode de reconstruction proposée est une extension de la méthode précédemment décrite.

Pillow *et al.* [17] s'intéressent à la reconnaissance des cylindres généralisés circulaires dans les images de luminance. Une librairie de modèles est construite à partir de plusieurs images de chaque objet. Dans chaque image, la projection de l'axe est détectée en exploitant la symétrie des contours de l'objet. Cette recherche

s'appuie sur le fait qu'un cylindre généralisé circulaire est obtenu par le déplacement d'une sphère de rayon variable sur l'axe de l'objet. Les points caractéristiques de l'axe définissent un repère canonique. A partir de l'expression de l'axe dans ce repère, des paramètres invariants selon le point de vue sont calculés. A partir de plusieurs vues, la combinaison de ces invariants permet de construire une base de référence relative à l'objet.

Naudet *et al.* [15] proposent une méthode paramétrique de reconstruction de la surface d'objets toriques. Le suivi d'un seul contour de l'objet dans une séquence d'images permet de retrouver les paramètres 3D de la surface du tore.

Ces méthodes s'appuient sur le choix simplificateur de la projection orthographique à l'échelle comme modèle de formation d'image, qui permet la définition d'invariants et de quasi-invariants.

En revanche, Glachet *et al.* [9][12] ont fait le choix d'utiliser la projection perspective comme modèle de formation d'image. La méthode de reconstruction de CDGH proposée consiste à rechercher la projection de l'axe et la mise en correspondance de points de contour issus d'une même section. Les propriétés de ces objets, vus en projection perspective, permettent alors de remonter à l'information 3D relative à la section considérée.

De même, Dhome *et al.* [7][20] ont montré que l'utilisation de la projection perspective permettait de localiser des CDGH par l'analyse de points caractéristiques du contour tels que les points d'inflexion.

# 2. notre problématique

Cet article propose des outils de modélisation de Cylindres Généralisés Circulaires (CGC), dont le volume est engendré par le déplacement d'une section circulaire le long d'un axe quelconque. Si le rayon des sections est constant, nous parlerons de Cylindre Généralisé Circulaire Uniforme (CGCU). Implicitement, nous supposons que les centres des sections sont portés par l'axe et que les plans support des sections sont orthogonaux à la tangente à l'axe.

Dans une première partie, nous décrivons l'algorithme de reconstruction de cylindres généralisés circulaires uniformes à partir

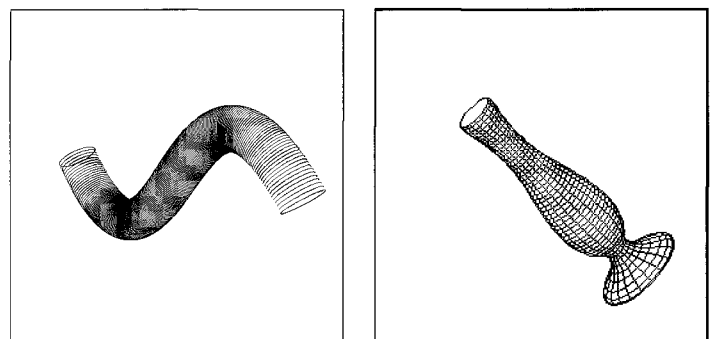


Figure 1. – Un CGCU et un CGC.

de l'analyse d'une seule image. Le rayon des sections est supposé connu *a priori*, sans quoi la reconstruction est faite à un facteur d'échelle près. Dans notre approche, l'axe du modèle est paramétré par une courbe B-Spline. Ces fonctions sont décrites en détail dans [2]. Après une initialisation grossière, l'axe du modèle est déformé itérativement jusqu'à ce que la projection du modèle soit cohérente avec les contours extraits de l'image. Nous décrirons :

- comment fixer la position initiale des points de contrôle 3D de la fonction B-Spline.
- comment associer les points de contour extraits de l'image aux points de l'axe du modèle.
- comment exploiter les propriétés géométriques de cette classe d'objet afin de corriger la position des points de contrôle de la fonction B-Spline.

Afin de s'affranchir de la connaissance *a priori* du rayon des sections et également de son uniformité, nous avons développé une approche multi-oculaire que nous décrivons dans une seconde partie. Nous supposons disposer d'au moins deux images de l'objet dont le déplacement relatif des repères caméra est connu. La reconstruction va consister à retrouver, d'une part, la courbe gauche correspondant à l'axe des objets et, d'autre part, la fonction de variation du rayon des sections circulaires. Deux fonctions B-Spline sont utilisées pour paramétrer notre modèle.

### 3. reconstruction de CGCU

Dans cette partie, après avoir explicité les propriétés des contours des CGCU, vus en projection perspective, nous décrivons l'algorithme de reconstruction.

Dans une phase initiale, la fonction B-Spline paramétrant l'axe du modèle est grossièrement estimée. Puis, le modèle est déformé itérativement. Les contours de l'objet sont mis en correspondance avec les points de l'axe afin d'appliquer aux points de contrôle de la fonction B-Spline les contraintes géométriques induites par les contours.

#### 3.1. propriétés géométriques des limbes d'un CGCU

**Définition :** Nous appelons *limbes* d'un cylindre généralisé, le lieu des points de la surface de l'objet où le plan tangent à la surface contient le centre optique de la caméra. Le contour occultant dans l'image résulte de la projection des limbes de l'objet.

Cette définition des limbes englobe les points de la surface appartenant aux sections terminales de l'objet. Cependant, ces points de contour ne vérifient pas les propriétés géométriques exploitées dans notre méthode de reconstruction et ne seront donc pas pris en compte.

Dans cet article, l'information 2D sera notée en minuscule et l'information 3D en majuscule. Soit :

- $P$  un point des limbes et  $\vec{N}$  le vecteur normal à la surface en  $P$ .
- $p$  la projection dans l'image du point  $P$  et  $\vec{t}$  le vecteur tangent au contour en  $p$ .
- $C$  le centre de la section et  $R$  le rayon de la section.

A partir des contours extraits de l'image, nous inférons une information 3D sur la localisation de l'axe de l'objet.

##### 3.1.1. un plan d'interprétation associé à la tangente au contour

A chaque point  $p$  du contour occultant, issu de la projection des limbes, nous pouvons associer un plan d'interprétation, noté  $(I)$ . Ce plan est défini à partir des données images et des paramètres intrinsèques de la caméra. Ce plan contient le centre optique de la caméra, le point de contour  $p$  et  $\vec{t}$  la tangente au contour en  $p$ .

Ce plan d'interprétation, correspondant au point image  $p$  et passant par le point des limbes  $P$  est tangent à la surface de l'objet. Le vecteur normal au point  $P$  du plan d'interprétation, noté  $\vec{N}$ , est donc normal à la surface de l'objet et est donné par :

$$\vec{N} = \frac{\vec{Op} \wedge \vec{t}}{\|\vec{Op} \wedge \vec{t}\|} \quad (1)$$

Le vecteur  $\vec{N}$  est orienté vers l'extérieur de l'objet (Fig. 2).

Les sections étant circulaires, la droite support du vecteur normal à la surface de l'objet contient le centre  $C$  de la section. La distance orthogonale de  $C$  au plan  $(I)$  est égale au rayon  $R$  de la section.

Si  $(N_x, N_y, N_z)$  sont les coordonnées du vecteur normal unitaire au plan d'interprétation, orienté vers l'extérieur de l'objet, alors les coordonnées  $(X, Y, Z)$  du centre  $C$  de la section vérifient l'équation :

$$N_x \cdot X + N_y \cdot Y + N_z \cdot Z + R = 0 \quad (2)$$

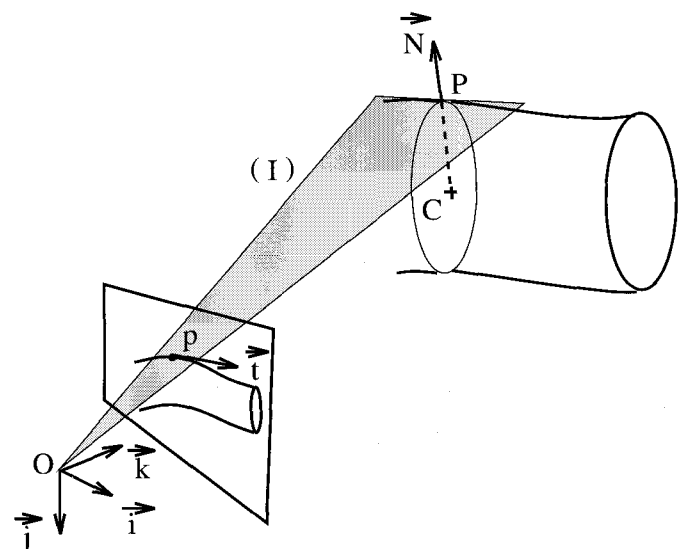


Figure 2. - Définition du plan d'interprétation associé à un point de contour.

### 3.1.2. un plan normal au plan d'interprétation

A chaque point  $p$  du contour occultant, nous pouvons associer un plan normal au plan d'interprétation précédemment défini. Nous appelons plan normal, le plan noté  $(\pi)$  contenant le centre optique de la caméra, le point de contour  $p$  et le vecteur normal au plan d'interprétation qui lui est associé.

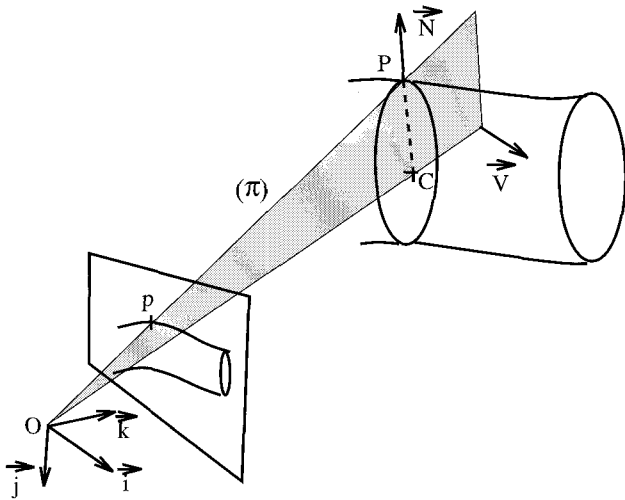


Figure 3. – Définition du plan normal associé à un point du contour.

Le vecteur normal au plan  $(\pi)$ , noté  $\vec{V}$ , est donné par :

$$\vec{V} = \frac{\vec{Op} \wedge \vec{N}}{\|\vec{Op} \wedge \vec{N}\|} \quad (3)$$

La section étant circulaire, les normales à la surface rayonnent au centre  $C$  de la section. Le plan  $(\pi)$  contient le vecteur normal à la surface en  $P$ ; il contient donc le centre  $C$  de la section.

Soient  $(V_x, V_y, V_z)$  les coordonnées de  $\vec{V}$ , les coordonnées  $(X, Y, Z)$  du centre  $C$  de la section vérifient l'équation du plan normal  $(\pi)$  :

$$V_x \cdot X + V_y \cdot Y + V_z \cdot Z = 0 \quad (4)$$

## 3.2. extraction des contours utiles à la reconstruction

Disposant des contours occultants de l'objet dans l'image, nous cherchons à éliminer les points de contour résultant de la projection des sections terminales de l'objet, qui n'interviennent pas dans le processus de reconstruction.

Pour cela, nous nous appuyons sur la symétrie existant entre les contours, en utilisant un critère défini par Brady [4].

Pour cela, nous appliquons un découpage récursif de Duda et Hart [8] sur le contour, préalablement chaîné.

A chaque sommet  $p_1$  du polygone obtenu (voir Fig. 4), nous cherchons le point de contour  $p_2$  qui vérifie au mieux la condition suivante :

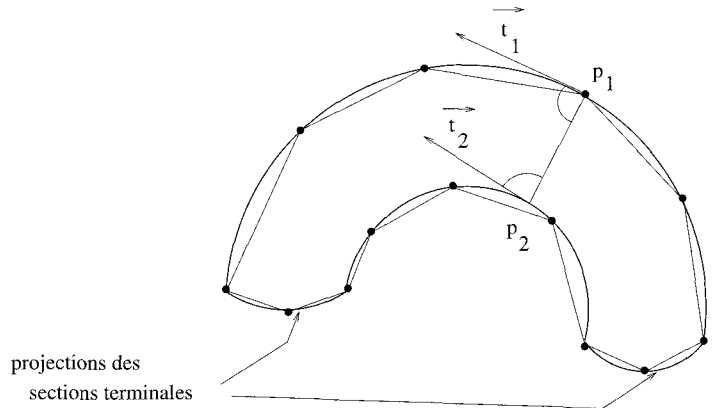


Figure 4. – Recherche d'appariement entre points projetés des limbes.

Les tangentes au contour  $\vec{t}_1$  en  $p_1$  et  $\vec{t}_2$  en  $p_2$  forment avec le vecteur  $\vec{p_1p_2}$  deux angles égaux à  $90^\circ \pm \epsilon$ .

La valeur de  $\epsilon$ , fixée arbitrairement, est de l'ordre d'une dizaine de degrés.

Dans le cas général, il n'est pas trouvé de correspondants aux sommets appartenant à la projection des sections terminales de l'objet. Les points de contour appartenant aux intervalles dont les extrémités ont été mises en correspondance sont conservés. Il est toutefois nécessaire de filtrer le résultats de ce processus afin d'obtenir deux ensembles de points de contour continus correspondant aux limbes de l'objet et excluant la projection des sections terminales. Ce processus de filtrage utilisant la continuité spatiale des appariements est détaillé dans [21].

## 3.3. initialisation de l'axe 3D du modèle

L'axe de notre modèle est paramétré par une fonction B-Spline. La première étape du processus consiste à fixer la position initiale des points de contrôle de la B-Spline, qui seront ensuite corrigés. Nous recherchons la projection de l'axe de l'objet dans l'image. Les points de contrôle seront alors donnés par un découpage récursif de cet axe 2D.

Pour trouver la projection de l'axe de l'objet à partir des deux listes de points de contour chaînés correspondant à la projection des limbes, nous utilisons l'algorithme de Nevatia et Binford [16]. Chaque limbe est segmenté par un découpage récursif de Duda et Hart [8] qui donne deux ensembles de sommets  $\{p_0, \dots, p_i\}$  et  $\{q_0, \dots, q_m\}$ .

Nous appliquons l'algorithme récursif suivant :

- Le point milieu du segment  $[p_0q_0]$ , formé par les deux premiers points de chaque limbe, donne  $w_0$  la projection du premier point de contrôle  $W_0$ .

- Puis, le point  $w_{i+1}$  est calculé à partir du point  $w_i$ . La figure 5 présente un exemple de ce calcul.

L'intersection de la droite orthogonale à  $[w_{i-1}w_i]$ , en  $w_i$ , avec les contours donne les points  $a_i$  et  $b_i$ . Dans notre exemple, le point  $a_i$  est compris entre les points  $p_j$  et  $p_{j+1}$  et le point  $b_i$  est compris entre les points  $q_k$  et  $q_{k+1}$ .

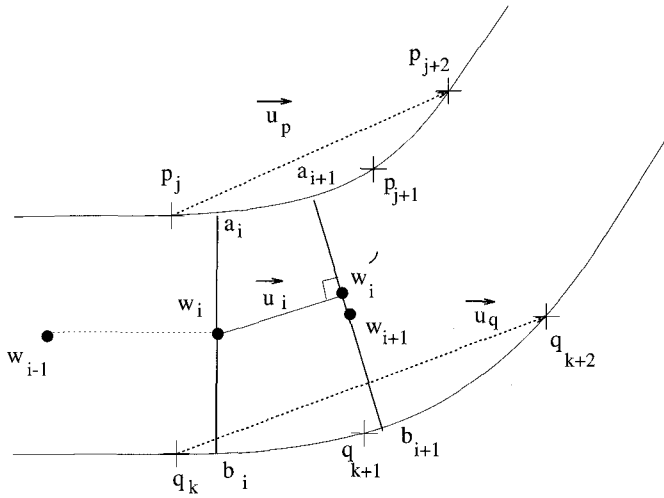


Figure 5. – Recherche des points de la projection de l'axe.

Soit  $\delta = \frac{\|\vec{p_j p_{j+1}}\| + \|\vec{q_k q_{k+1}}\|}{2}$ ,

Soit  $\vec{u_p} = \frac{\vec{p_j p_{j+2}}}{\|\vec{p_j p_{j+2}}\|}$  et  $\vec{u_q} = \frac{\vec{q_k q_{k+2}}}{\|\vec{q_k q_{k+2}}\|}$

Définissons le vecteur  $\vec{u_i} = \delta \cdot \frac{\vec{u_p} + \vec{u_q}}{\|\vec{u_p} + \vec{u_q}\|}$

Soit  $w'_i$  le point tel que  $\vec{u_i} = \vec{w_i w'_i}$ . Le choix de la norme du vecteur  $\vec{w_i w'_i}$ , égale à  $\delta$ , permet d'obtenir un point de contrôle aux environs de chaque sommet du polygone. Le nombre de points de contrôle est fixé par le seuil du découpage récursif appliqué au contour.

Soient les points  $a_{j+1}$  et  $b_{j+1}$  les points d'intersection de la droite orthogonale à  $\vec{u_i}$ , passant par  $w'_i$ , avec les contours.

Le point milieu de  $[a_{j+1} b_{j+1}]$  est retenu comme étant le point  $w_{i+1}$ . La position des points  $a_{i+1}$  et  $b_{i+1}$  est affinée en calculant l'intersection de la droite orthogonale au segment  $[w_i w_{i+1}]$  avec les contours.

Nous itérons ce processus en recherchant le milieu du nouveau segment  $[a_{i+1} b_{i+1}]$  ainsi obtenu, puis de recalculer les points  $a_{i+1}$  et  $b_{i+1}$  jusqu'à ce que la position du point  $w_{i+1}$  se stabilise. Le processus converge rapidement,  $w_{i+1}$  est en général obtenu après une dizaine d'itérations.

Nous disposons en sortie de ce processus d'un ensemble de  $M + 1$  points de contrôle  $\{w_0, \dots, w_M\}$  localisés dans l'image, correspondant à la projection des points de contrôle de l'axe initial.

Pour obtenir une B-Spline tridimensionnelle, nous appliquons à ces points une projection perspective inverse à partir du centre optique de la caméra, dans un plan  $Q$ , situé devant la caméra et parallèle au plan image (Fig. 6). L'axe 3D obtenu est donc plan et parallèle au plan image.

La distance entre le plan image et ce plan  $Q$  est fixée arbitrairement. La qualité finale de la reconstruction n'est pas affectée par le choix de cette position initiale de l'axe. Elle permet simplement de visualiser la projection du modèle initial dans l'image.

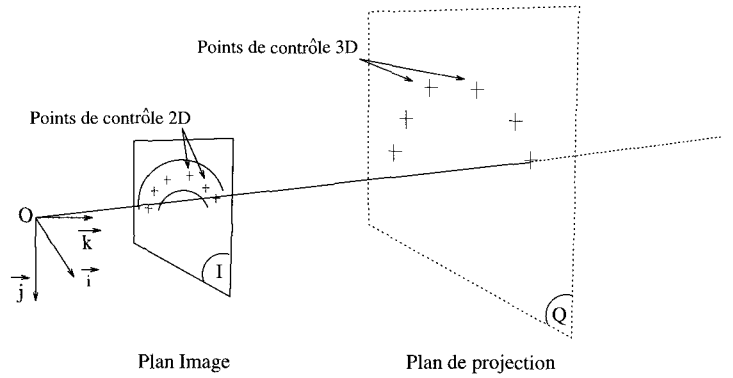


Figure 6. – Initialisation des points de contrôle dans un plan parallèle au plan image

### 3.4. mise en correspondance contour-axe

À la suite de la phase d'initialisation, nous disposons d'un modèle grossier de notre objet. Dans le paragraphe 3.1, nous avons établi les relations géométriques liant un point de contour au centre de la section dont il est issu. Pour appliquer à l'axe de notre modèle ces contraintes, induites par le contour occultant extrait de l'image, nous mettons en correspondance chaque point de contour avec un point de l'axe 3D correspondant au mieux au centre de la section. Celui-ci appartenant au plan normal associé au point de contour, nous cherchons l'intersection de la B-Spline, modélisant l'axe, avec le plan normal associé au point de contour. Ce point de la B-Spline doit donc vérifier l'équation du plan normal associé au point de contour :

$$V_x \cdot X + V_y \cdot Y + V_z \cdot Z = 0 \tag{5}$$

Les coordonnées d'un point  $P_s$  d'une fonction B-Spline 3D s'expriment en fonction des paramètres suivants :

- les coordonnées  $(X_i, Y_i, Z_i)$  des  $M + 1$  points de contrôle
- la base des polynômes cubiques  $B_{i,4}$
- le paramètre de parcours  $u$  associé à  $P_s$ .

Les coordonnées  $(X_s, Y_s, Z_s)$  d'un point de la B-Spline sont obtenues par :

$$\begin{cases} X_s(u) = \sum_{i=0}^M X_i \cdot B_{i,4}(u) \\ Y_s(u) = \sum_{i=0}^M Y_i \cdot B_{i,4}(u) \\ Z_s(u) = \sum_{i=0}^M Z_i \cdot B_{i,4}(u) \end{cases} \tag{6}$$

Nous cherchons la valeur du paramètre  $u$  qui annule la distance signée du point de la B-Spline au plan normal, représentée par l'expression :

$$E(u) = V_x \cdot X_s(u) + V_y \cdot Y_s(u) + V_z \cdot Z_s(u) \tag{7}$$

Dans cette équation, le paramètre  $u$  apparaît dans les polynômes cubiques de la B-Spline. Le calcul du zéro de  $E(u)$  n'étant pas linéaire, nous utilisons un processus itératif dit de Newton-Raphson.

A chaque étape  $k$  de ce processus, le développement de Taylor au premier ordre de  $E(u)$  s'écrit :

$$E(u) = (E(u))_k + \left( \frac{dE(u)}{du} \right)_k \Delta u \quad (8)$$

Cherchant  $u$  tel que  $E(u) = 0$ , le paramètre  $u$  est corrigé, à chaque itération, par le facteur :

$$\Delta u = - \frac{(E(u))_k}{\left( \frac{dE(u)}{du} \right)_k} \quad (9)$$

Dans nos expériences, le processus de mise en correspondance converge en moins de 10 itérations, pour chaque point de contour.

Cette étape de mise en correspondance est répétée après chaque déformation de l'axe 3D du modèle induite par la correction de la position des points de contrôle.

### 3.5. déformation du modèle

Le processus de mise en correspondance permet d'associer chaque point de contour à un point de la courbe B-Spline. Ce point de l'axe est supposé être le centre de la section, dont est issu le point de contour. Le point 3D de l'axe doit donc respecter les contraintes suivantes liées au point de contour qui lui est associé :

- le centre de la section est à une distance orthogonale du plan d'interprétation ( $I$ ) égale au rayon  $R$  de la section.

- le centre de la section appartient au plan normal ( $\pi$ ) associé au point de contour.

De plus, il est à noter que la première contrainte nécessite la connaissance *a priori* du rayon  $R$  des sections. Si ce rayon n'est pas connu, il conviendra de le fixer arbitrairement et la reconstruction sera faite à un facteur d'échelle près.

En utilisant les notations précédemment établies, les contraintes relatives au plan d'interprétation et au plan normal, appliquées à un point de la B-Spline  $P_s(X_s(u), Y_s(u), Z_s(u))$  s'écrivent :

$$\begin{cases} N_x \cdot X_s(u) + N_y \cdot Y_s(u) + N_z \cdot Z_s(u) = -R \\ V_x \cdot X_s(u) + V_y \cdot Y_s(u) + V_z \cdot Z_s(u) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Nous ajoutons à ces contraintes géométriques, une contrainte de régularisation de la B-Spline. En effet, Guéziac et Ayache [10] soulignent que de petites oscillations apparaissent sur les courbes B-Splines. Comme le propose Arbogast [1], nous minimisons la dérivée troisième de la B-Spline. Cela revient à limiter les variations de la torsion de la courbe.

La dérivée troisième pour un point de la B-Spline, s'écrit, en fonction des points de contrôle  $W_i$  :

$$\frac{\partial^3 \overrightarrow{OP_s}}{\partial u^3} = \sum_{i=0}^M \frac{\partial^3 B_{i,4}(u)}{\partial u^3} \cdot \overrightarrow{OW_i} \quad (11)$$

Pour chaque point de contour  $p_n$ , nous cherchons à minimiser la distance du point  $P_n$  de l'axe aux plans de contrainte, ainsi que la dérivée troisième de la B-Spline. Pour l'ensemble des  $N$  points de contour, l'expression à minimiser s'écrit :

$$C = \sum_{n=1}^N \left[ \left( \overrightarrow{N_n} \cdot \overrightarrow{OP_n} + R \right)^2 + \left( \overrightarrow{V_n} \cdot \overrightarrow{OP_n} \right)^2 + \lambda \left( \frac{\partial^3 \overrightarrow{OP_n}}{\partial u^3} \right)^2 \right] \quad (12)$$

L'influence de la contrainte de régularisation devant les contraintes de déformation est pondérée par le choix du coefficient  $\lambda$ . Ce coefficient, fixé empiriquement, permet un lissage adaptable en fonction du niveau de bruit affectant l'image où en fonction de connaissances *a priori* sur les objets étudiés.

Nous avons montré dans [21] que le choix  $\lambda = 10^{-3}$  donne, dans le cas général un bon équilibre entre régularisation et déformation.

La recherche du minimum du critère (12) est obtenu en annulant les dérivées partielles de  $C$  par rapport aux coordonnées  $X_0 \dots X_M, Y_0 \dots Y_M, Z_0 \dots Z_M$  des points de contrôle.

Les phases de mise en correspondance contour-axe et d'optimisation de la position des points de contrôle sont répétées jusqu'à ce que la correction sur ces points de contrôle devienne négligeable.

### 3.6. résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux que nous présentons sont obtenus sur des images de tuyaux souples, dont le diamètre des sections est de 8 cm.

Nous détaillons les différentes étapes du processus. A partir des images de luminance, les contours sont extraits par l'algorithme de Deriche [6].

Pour chaque objet, nous présentons la projection du modèle initial dont l'axe est contenu dans un plan parallèle au plan image de la caméra placé arbitrairement à  $z = 3m$ . La distance réelle des objets au centre optique de la caméra est d'environ 1 m.

Cette initialisation est grossière, mais dès la première itération, l'erreur de localisation est corrigée et l'axe commence à se déformer. L'axe du modèle se stabilise autour de 100 itérations et sa projection est alors cohérente avec l'image de l'objet.

Il apparaît que la modélisation des extrémités est imparfaite. Pour contraindre suffisamment la position des points de contrôle extrémités, nous envisageons d'utiliser l'information apportée par les contours générés par les sections terminales de l'objet. Le modèle est également présenté dans une attitude différente.

Il est à noter que le troisième objet présente une auto-occultation de ces contours. La rigidité de la B-spline modélisant l'axe permet, toutefois, de compenser localement le manque d'information.

## Reconstruction de cylindres généralisés circulaires

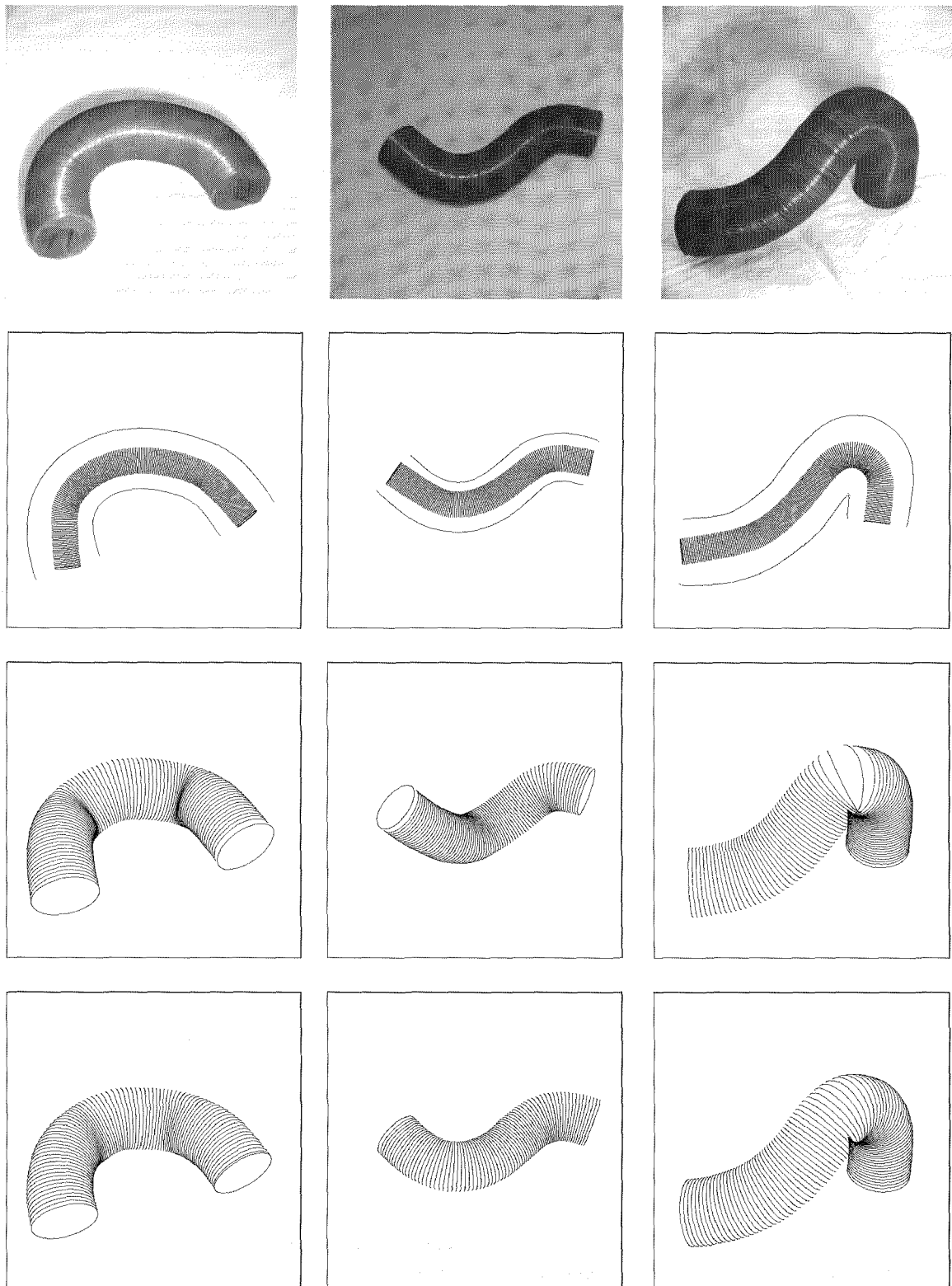


Figure 7. – Images de luminance - Contours extraits et projection des modèles initiaux dans le plan  $z = 3$  m - Projection des modèles après 1 itération - Projection des modèles après 10 itérations.

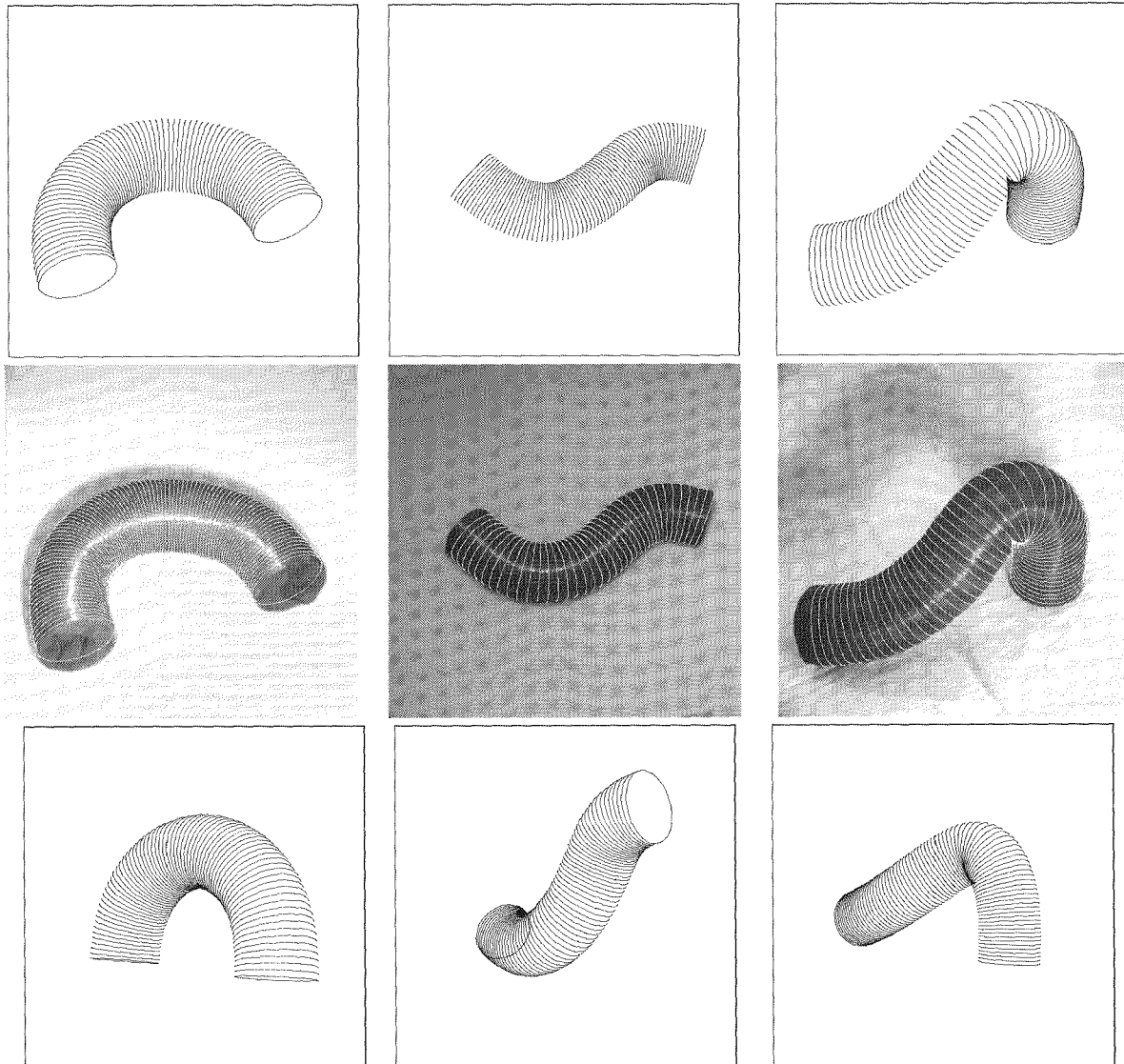


Figure 8. – Projection des modèles après 100 itérations - Superposition des modèles sur les images initiales - Visualisation des modèles pour une autre attitude

## 4. reconstruction de CGC

La reconstruction est faite sans hypothèse sur la forme de l'axe ou sur la façon dont varie le rayon des sections. L'utilisation de plusieurs vues de l'objet permet de retrouver la localisation et la taille des sections qui le composent. L'analyse des contours, en considérant la projection perspective comme modèle de formation d'image est, à notre connaissance, une approche originale pour aborder la reconstruction de ce type d'objet.

En supposant que le plan support de la section est orthogonal à la tangente à l'axe, une section  $s$  sera complètement définie par la localisation de son centre  $C_s$ , par son orientation donnée par la direction de la tangente à l'axe  $\vec{T}_s$  et la valeur de son rayon  $r_s$ .

Comme les variations du rayon des sections sont indépendantes de la forme de l'axe (voir Fig. 1), nous utilisons deux fonctions B-Spline pour contrôler la forme de notre modèle.

D'une part, l'axe du modèle est paramétré par une fonction B-Spline cubique 3D, définie par  $M$  points de contrôle  $P_m(X_m, Y_m, Z_m)$ , et, d'autre part, les variations du rayon sont paramétrées par une fonction B-Spline cubique 1D, définie par  $L$  points de contrôle  $R_l$ . Si le nombre de points de contrôle propre à chaque B-Spline est indépendant de l'autre, les nœuds extrémités des deux B-Splines sont fixés à une même valeur.

Ainsi, à une abscisse de parcours  $u$ , correspond une section définie d'une part par la localisation de son centre  $C_s(u)$  et par son orientation  $T_s(u)$  et d'autre part par son rayon  $r_s(u)$  :

$$r_s(u) = \sum_{l=1}^L B_l(u) R_l \quad (13)$$



$$C_s(u) = \begin{pmatrix} \sum_{m=1}^M B_m(u) X_m \\ \sum_{m=1}^M B_m(u) Y_m \\ \sum_{m=1}^M B_m(u) Z_m \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\overrightarrow{T_s(u)} = \begin{pmatrix} \sum_{m=1}^M \frac{dB_m(u)}{du} X_m \\ \sum_{m=1}^M \frac{dB_m(u)}{du} Y_m \\ \sum_{m=1}^M \frac{dB_m(u)}{du} Z_m \end{pmatrix} \quad (15)$$

Si cette approche présente des analogies conceptuelles avec la reconstruction des CGCU, les propriétés géométriques utilisées précédemment ne sont plus valables ici. En effet, dans le cas général, la droite support de la normale en un point de la surface de l'objet ne contient plus le centre de la section qui le porte. Pour appliquer le même type de contraintes, la section est localement considérée comme un cylindre de faible épaisseur, dont l'orientation est donnée par la tangente à l'axe. La normale à la surface de ce cylindre respecte les propriétés valables pour les CGCU.

Cette approximation est illustrée par l'exemple du cône représenté sur la figure 9. La normale  $\vec{N}'$  à la surface en  $P$  coupe l'axe en un point  $C'$ . En revanche, la normale  $\vec{N}$  à la surface du cylindre, représenté en pointillé, coupe l'axe au point  $C$ , centre de la section portant  $P$ .

L'algorithme de reconstruction se décompose en deux phases : tout d'abord, nous initialisons la forme du modèle. En utilisant les contraintes épipolaires et la pseudo-symétrie des contours dans une image, les points de l'axe 3D sont obtenus par triangulation.

Puis, cette estimation de l'axe est exploitée dans un processus d'initialisation de la fonction de variation du rayon.

Après cette étape, les coordonnées des points de contrôle des deux B-Splines, exprimées dans un même critère, sont corrigées afin de rendre la forme du modèle cohérente avec le contenu des images.

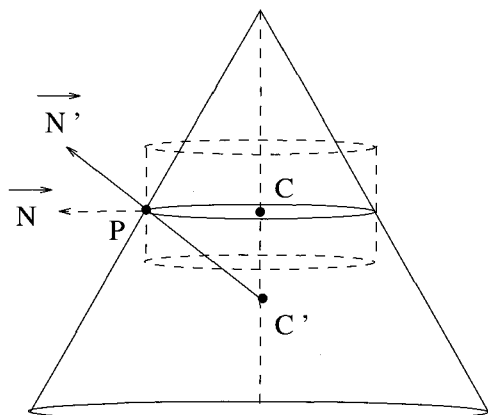


Figure 9. – Approximation de la section d'un CGC par un CGCU.

#### 4.1. initialisation de l'axe du modèle

Les contours occultants de l'objet sont supposés être extraits de l'image.

Nous recherchons une estimation de la projection de l'axe de l'objet dans deux images. A partir des contours (voir Fig. 10), la projection de l'axe est estimée en appliquant l'algorithme de Nevatia et Binford [16]. En utilisant les contraintes épipolaires, les points de l'axe 2D obtenus dans la première image sont appariés aux points de l'axe détectés dans la seconde image.

La figure 10 représente les contours de l'objet et les axes 2D extraits dans chaque image, ainsi qu'un exemple d'appariements entre un point de l'axe  $p_1$  de la première image et un point de l'axe  $p_2$  détecté dans la seconde. Le point  $p_2$  correspond à l'intersection entre la droite épipolaire associée à  $p_1$  dans la seconde image et l'axe détecté dans cette image.

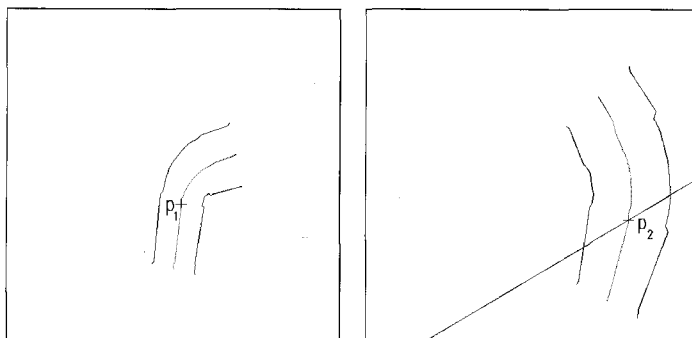


Figure 10. – Axes 2D extraits dans chaque image à partir des contours et mise en correspondance entre les points  $p_1$  and  $p_2$ .

Cette mise en correspondance, appliquée à l'ensemble des points de l'axe détectés dans la première image, permet par triangulation de retrouver un ensemble de points 3D. Ces points 3D sont approximés par une B-Spline cubique tridimensionnelle, qui représente l'axe 3D initial de notre modèle.

Les coordonnées des points de contrôle sont exprimées dans un repère global  $\mathcal{R}(O, X, Y, Z)$  (par exemple le repère lié à une caméra).

#### 4.2. initialisation des variations du rayon du modèle

Les variations de rayon du modèle étant paramétrées par une B-Spline cubique monodimensionnelle, la valeur initiale des points de contrôle est fixée à partir d'une mise en correspondance entre chaque point de contour  $p_k$  avec un point de l'axe du modèle précédemment initialisé. Comme pour les CGCU, nous cherchons le point de l'axe correspondant au mieux au centre de la section dont est issu  $p_k$ .

Considérons l'image  $j$  et  $\mathcal{R}_j(O_j, X_j, Y_j, Z_j)$  son repère associé. L'axe du modèle est échantillonné. Pour chaque abscisse de parcours  $u$ , nous exprimons  $C_s(u)$  et  $\overrightarrow{T_s(u)}$ , qui définissent le

## Reconstruction de cylindres généralisés circulaires

plan support de la section, dans le repère  $\mathcal{R}_j$ , en utilisant la transformation rigide reliant  $\mathcal{R}_j$  et  $\mathcal{R}$ , supposée connue.

Considérons le rayon optique  $\overrightarrow{O_j p_k}$  passant par le centre optique de la caméra et le point de contour  $p_k$  (voir Fig. 11).

Nous calculons l'intersection  $P_k(u)$  du rayon optique  $\overrightarrow{O_j p_k}$  avec chaque plan support défini par un couple  $(C_s(u), \overrightarrow{T_s}(u))$ . Le point de la surface de l'objet ayant généré le point de contour  $p_k$  appartient aux limbes de l'objet et donc la normale à la surface en ce point est orthogonale au rayon optique.

Nous associons, donc, au point de contour  $p_k$  le point  $C_k(u)$  de l'axe tel que la normale à la surface  $\overrightarrow{C_k(u)P_k(u)}$  soit orthogonale à  $\overrightarrow{O_j p_k}$ . Pour un point de contour  $p_k$  nous cherchons le point de l'axe  $C_k$  qui minimise l'expression  $H$  :

$$H = |\overrightarrow{C_k(u)P_k(u)} \cdot \overrightarrow{O_j p_k}| \quad (16)$$

Ayant associé le point de contour  $p_k$  à un point de l'axe  $C_k$ , nous construisons le cylindre droit représentant la section de l'objet (voir Fig. 12). L'orientation de ce cylindre est donnée par le vecteur  $\overrightarrow{T_k}$ , obtenu par la dérivation de la fonction B-Spline au point  $C_k$ .

Le vecteur normal au plan tangent à la surface du cylindre en  $P_k$ , appelé plan d'interprétation, est donné par :

$$\overrightarrow{N_k} = \frac{\overrightarrow{O_j p_k} \wedge \overrightarrow{T_k}}{\|\overrightarrow{O_j p_k} \wedge \overrightarrow{T_k}\|} \quad (17)$$

Comme la section est circulaire,  $\overrightarrow{C_k P_k}$  est colinéaire à  $\overrightarrow{N_k}$ . Le rayon de la section  $r_k$  représente donc la distance orthogonale de  $C_k$  au plan d'interprétation. Cette propriété peut s'écrire :

$$\overrightarrow{N_k} \cdot \overrightarrow{O_j C_k} + r_k = 0 \quad (18)$$

Soit  $L$  le nombre de points de contrôle décrivant les variations du rayon le long de l'axe du modèle et  $K_j$  le nombre de points de

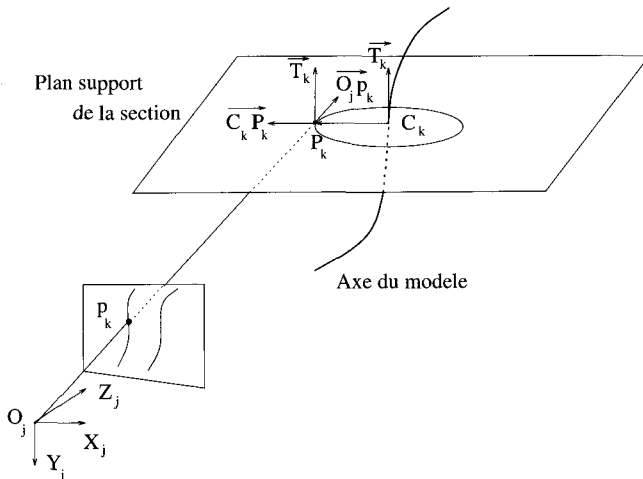


Figure 11. – Mise en correspondance entre le contour de l'objet et l'axe du modèle.

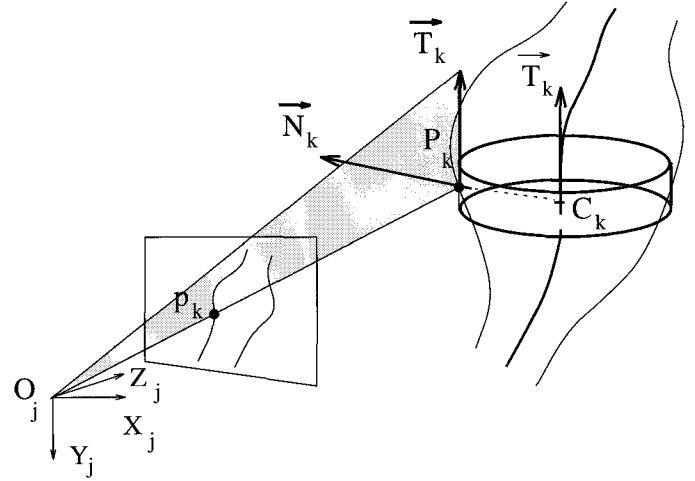


Figure 12. – Définition du plan d'interprétation.

contour de la  $j$ <sup>ième</sup> image, on peut écrire :

$$\begin{aligned} E_j &= \sum_{k=1}^{K_j} (\overrightarrow{N_k} \cdot \overrightarrow{O_j C_k} + r_k)^2 \\ &= \sum_{k=1}^{K_j} (\overrightarrow{N_k} \cdot \overrightarrow{O_j C_k} + \sum_{l=1}^L B_l(u_k) R_l)^2 \end{aligned} \quad (19)$$

En posant  $G_k = \overrightarrow{N_k} \cdot \overrightarrow{O_j C_k}$ ,  $E_j$  peut s'écrire :

$$E_j = \sum_{k=1}^{K_j} (G_k + \sum_{l=1}^L B_l(u_k) R_l)^2 \quad (20)$$

Pour les  $I_m$  images considérées, le respect de ces contraintes s'exprime sous la forme d'un critère  $E$  à minimiser :

$$E = \sum_{j=1}^{I_m} E_j = \sum_{j=1}^{I_m} \sum_{k=1}^{K_j} (G_k + \sum_{l=1}^L B_l(u_k) R_l)^2 \quad (21)$$

La minimisation de cette expression en fonction des points de contrôle  $R_l$  permet d'initialiser la fonction de variation du rayon.

Nous avons alors un modèle initial complet bien que grossier. Les figures 13 présentent le résultat de cette phase d'initialisation obtenu à partir de deux images des contours d'un vase.

### 4.3. optimisation du modèle

#### 4.3.1. contraintes monoculaires

Pour corriger les points de contrôle (axe + rayon), nous apparions les points de contour de l'image avec les points de contour donnés par la projection du modèle.

Considérons l'image  $j$ . L'axe 3D du modèle est exprimé dans le repère image  $\mathcal{R}_j$ . L'axe du modèle est échantillonné et pour

chaque point nous calculons les points de contour générés par la projection de la section correspondante.

Pour chaque point  $q_k$  du contour du modèle ainsi généré, nous calculons l'intersection entre la droite orthogonale au contour en  $q_k$  et le contour de l'objet (voir Fig. 14). Le point de contour de l'objet  $p_k$  est associé au centre de la section  $C_k$  ayant généré le point de contour  $q_k$ .

Pour chaque paire  $(p_k, C_k)$ , nous construisons les deux plans de contraintes suivants :

- un plan d'interprétation (voir Fig. 12) dont la normale est donnée par l'expression (17). Le centre de la section est à une distance orthogonale égale au rayon  $r_k$  de la section (cf. expression 18).
- un plan dit normal, orthogonal au plan d'interprétation (voir Fig.15).

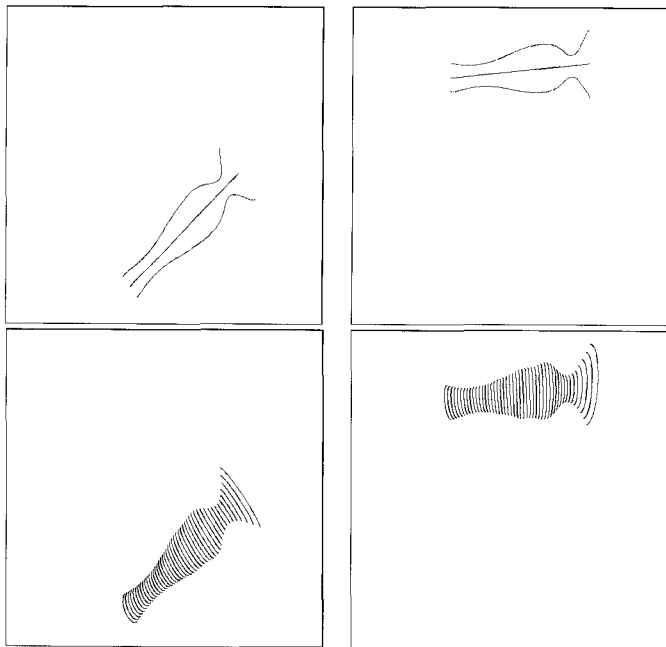


Figure 13. - Contours et axe 2D détectés - projection du modèle initial dans chaque repère image.

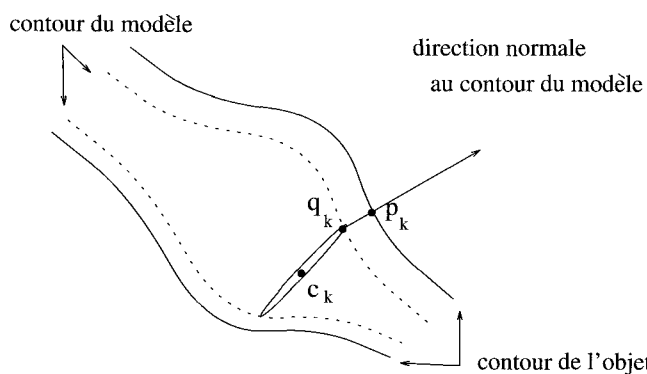


Figure 14. - Mise en correspondance entre les contours du modèle et les contours de l'objet.

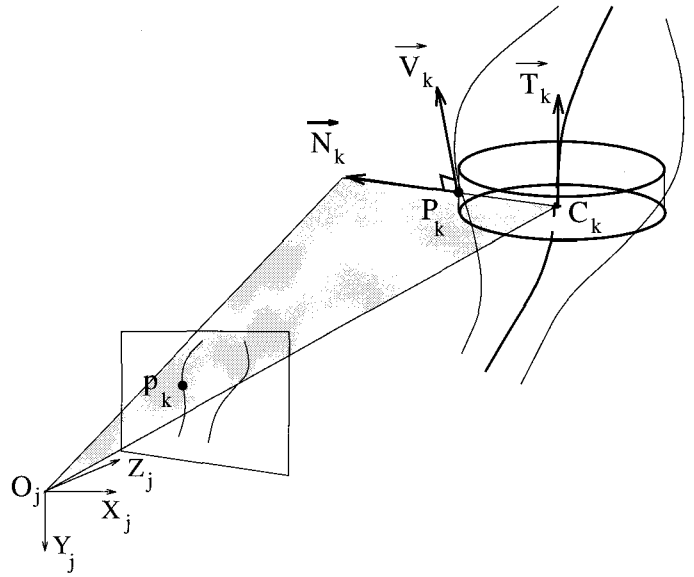


Figure 15. - Définition du plan normal.

Ce plan contient le centre de la section et son vecteur normal unitaire est donné par :

$$\vec{V}_k = \frac{\vec{O}_j p_k \wedge \vec{N}_k}{\|\vec{O}_j p_k \wedge \vec{N}_k\|} \quad (22)$$

Pour respecter ces deux contraintes, le point  $C_k$  de l'axe doit donc vérifier les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \vec{N}_k \cdot \vec{O}_j C_k + r_k = 0 \\ \vec{V}_k \cdot \vec{O}_j C_k = 0 \end{cases} \quad (23)$$

#### 4.3.2. contraintes multi-oculaires

Les équations 23 des plans associés aux points de contour de chaque image, sont exprimées dans le repère global  $\mathcal{R}(O, X, Y, Z)$ . Chaque point  $C_s$ , apparié à un point de contour d'une image,

$$\begin{cases} \vec{N}_s \cdot \vec{O} C_s + r_s + d_s = 0 \\ \vec{V}_s \cdot \vec{O} C_s + e_s = 0 \end{cases} \quad (24)$$

- Le point de l'axe  $C_s(X_s, Y_s, Z_s)$ , associé au point de contour, est exprimé dans le repère global.
  - $\vec{N}_s = (n_{1s}, n_{2s}, n_{3s})$  est le vecteur normal au plan d'interprétation et  $\vec{V}_s = (v_{1s}, v_{2s}, v_{3s})$  le vecteur normal au plan normal. Ces coordonnées sont exprimés dans le repère global.
  - $d_s$  est la distance entre le plan d'interprétation et le centre du repère global  $O$  et  $e_s$  est la distance entre le plan normal et  $O$ .
- Si  $A$  est l'index énumérant les couples  $(p_s, C_s)$  formés dans l'ensemble des images, les contraintes induites sont exprimées dans une même expression  $F$  sous la forme :

$$F = \sum_{s \in A} [n_{1s} \cdot X_s + n_{2s} \cdot Y_s + n_{3s} \cdot Z_s + r_s + d_s]^2 + [v_{1s} \cdot X_s + v_{2s} \cdot Y_s + v_{3s} \cdot Z_s + e_s]^2 \quad (25)$$

En reprenant les expressions données dans l'équation (13), l'expression  $F$  peut s'écrire en fonction des coordonnées des  $M$  points de contrôle paramétrant l'axe du modèle et des  $L$  points de contrôle paramétrant les variations de rayon du modèle sous la forme :

$$F = \sum_{s \in A} \left[ n_{1s} \cdot \sum_{m=1}^M B_m(u_s) X_m + n_{2s} \cdot \sum_{m=1}^M B_m(u_s) Y_m + n_{3s} \cdot \sum_{m=1}^M B_m(u_s) Z_m + \sum_{l=1}^L B_l(u_s) R_l + d_s \right]^2 + \left[ v_{1s} \cdot \sum_{m=1}^M B_m(u_s) X_m + v_{2s} \cdot \sum_{m=1}^M B_m(u_s) Y_m + v_{3s} \cdot \sum_{m=1}^M B_m(u_s) Z_m + e_s \right]^2 \quad (26)$$

Les nouvelles coordonnées des points de contrôle sont obtenues en minimisant l'expression  $F$ . Il est à noter que contrairement à la minimisation effectuée pour les CGCU dans le cas monoculaire (paragraphe 3.4), il n'est pas nécessaire d'introduire un facteur de lissage. L'information donnée par les contours extraits de deux images est suffisante pour contraindre convenablement notre modèle. Toutefois, un facteur de lissage pourrait être utilisé pour traiter des images fortement bruitées.

Les phases de mise en correspondance entre les contours et l'axe d'une part et de déformation d'autre part sont répétées tant que la correction sur les points de contrôle est significative. En général, le processus converge en une dizaine d'itérations.

#### 4.4. résultats expérimentaux

Dans ce paragraphe, nous présentons les résultats d'expérimentations effectuées sur divers CGC.

Pour la première expérience, les images sont obtenues à l'aide d'un objectif grand angle (fish eye), dont la distance focale est de 3,5 mm. Une phase de calibrage permet d'estimer les paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra [14]. Ce processus de calibrage intègre l'estimation de l'importante distorsion radiale affectant ce type d'image. Cette estimation permet de rectifier les images.

Les deux CGC présents devant la caméra sont un vase dont l'axe est droit et un tuyau en PVC à axe courbe présentant de faibles mais brusques variations de rayon. Nous montrons successivement sur la figure 17 les images originales distordues et les images corrigées. Puis, nous présentons l'image des contours utilisés, la projection des modèles obtenus ainsi que la superposition de ces modèles sur les images de luminance.

Si le résultat de la reconstruction est globalement satisfaisant, cette expérience permet néanmoins de présenter quelques améliorations à apporter à notre méthode.

La reconstruction du tuyau en PVC rend compte de la forme de l'objet. Toutefois, les variations du rayon sont lissées par la B-Spline modélisant le rayon. Pour modéliser plus finement ces transitions, outre une très bonne détection des discontinuités du contour (zoom), il serait intéressant d'introduire automatiquement sur ces zones des noeuds multiples à la B-Spline modélisant le rayon.

Afin de quantifier l'erreur commise sur la reconstruction du vase, nous présentons sur la figure 16 une comparaison des rayons des sections du modèle reconstruit avec les mesures du rayon des sections effectuées sur l'objet. Sur la figure, les profils du vase et du modèle reconstruit sont représentés. Le tableau 1 présente la comparaison section par section des rayons. Nous avons effectué cette comparaison sur l'objet entier, puis nous avons dissocié les résultats obtenus sur la partie supérieure de l'objet ( $L > 5$  cm) et sur la partie inférieure ( $L < 5$  cm).

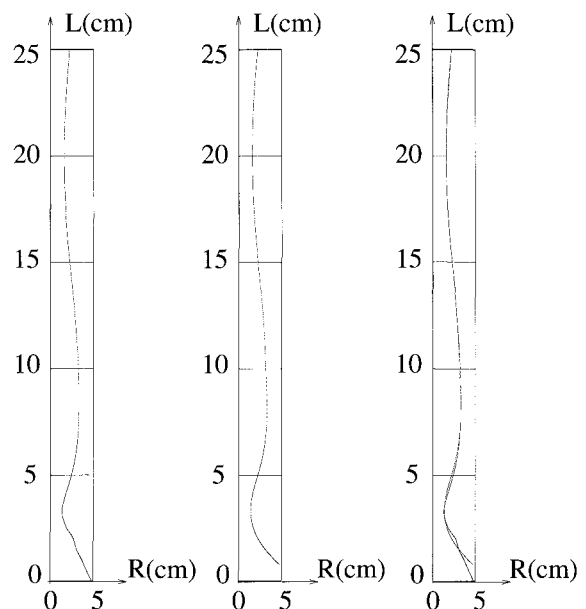


Figure 16. – Profils de l'objet - profil du modèle - superposition des 2 profils.

Tableau 1. – Erreurs mesurées entre les rayons des sections du modèle et ceux de l'objet

Erreurs (mm)	Axe total	Axe $L > 5$	Axe $L < 5$
Moyennes	0,6	0,35	1,6
Médianes	0,4	0,3	0,8
Maximales	4,9	0,8	4,9

La modélisation du pied du vase est imparfaite. A l'image de la reconstruction des CGCU, il faudrait exploiter l'information donnée par la projection de la section terminale de l'objet pour contraindre suffisamment les points de contrôle extrémités de la B-spline.

Les expériences suivantes ont été effectuées sur une jambe humaine en considérant que les sections sont circulaires. La jambe est reconstruite dans la position tendue puis fléchie (Fig. 18). Compte tenu des approximations faites, les résultats obtenus attestent de la robustesse de l'algorithme.

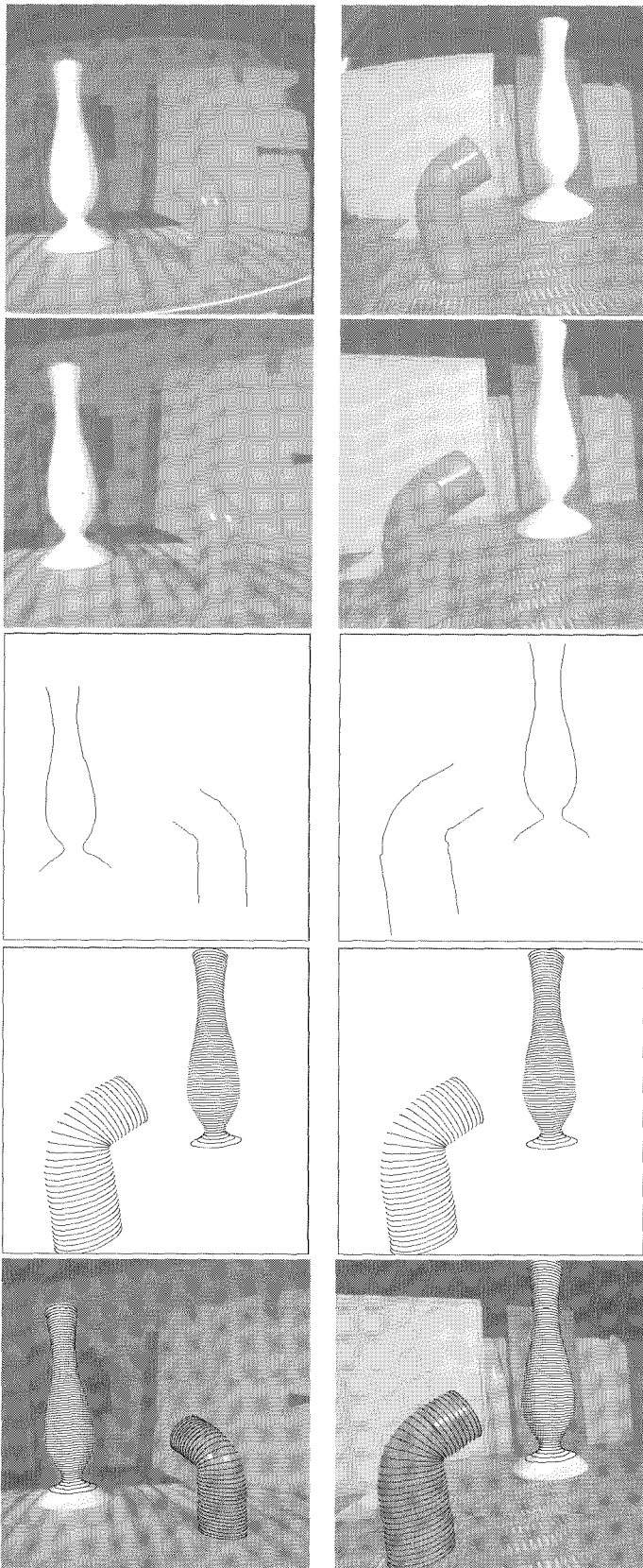


Figure 17. – Images de luminance originales - Images corrigées - Contour - Projection des modèles - Superposition des modèles sur les images initiales.

Le modèle de la jambe, donné par notre algorithme, pourrait être utilisé dans des algorithmes de suivi du mouvement humain. Citons par exemple, les travaux de Lerasle *et al.* [13] portant sur le suivi automatique d'une jambe lors une séquence de pédalage. Leur algorithme utilise un modèle 3D articulé de la jambe construit à partir d'images I.R.M. Dans chaque image de la séquence, il faut localiser les différentes parties de ce modèle (cuisse, mollet). La texture du collant du sportif est utilisée pour mettre en correspondance les points 2D de l'image et des points de la surface du modèle 3D. Notre algorithme permettrait d'alléger la phase de construction du modèle 3D qui pour l'instant reste lourde et coûteuse.

## 5. conclusion

Dans cet article, nous avons décrit une approche originale de modélisation de Cylindres Généralisés Circulaires. La connaissance de la nature des objets observés et l'utilisation de la projection perspective comme modèle de formation d'image ont permis d'établir des contraintes géométriques fortes permettant d'estimer les paramètres inconnus du modèle.

Une première méthode de reconstruction des cylindres généralisés circulaires uniformes à partir d'une seule vue de l'objet a été décrite. L'axe du modèle déformable est paramétré par une fonction B-Spline tri-dimensionnelle, le rayon est lui fixé *a priori*.

L'extension de cette approche a permis la reconstruction de cylindres généralisés circulaires à rayon variable, à partir de plusieurs vues de l'objet. Afin de s'adapter à tout objet de cette classe, l'axe et les variations de rayon du modèle sont paramétrés par deux fonctions B-Splines indépendantes.

Exprimées dans un même critère, les coordonnées des points de contrôle de chaque B-Spline sont corrigées de façon à rendre cohérente la forme du modèle avec les contours extraits de chaque image. Les résultats de reconstruction, en particulier ceux obtenus sur la jambe humaine, montrent la robustesse de l'algorithme vis-à-vis de données imparfaites et ouvrent de larges perspectives applicatives.

L'utilisation d'un modèle déformable global permet de s'affranchir d'une occultation partielle d'un des contours de l'objet. Il est toutefois évident que cette occultation ne doit pas masquer totalement une zone complexe de l'objet qu'un simple prolongement par continuité des parties visibles ne permettrait pas de reconstruire.

Dans cet article, nous n'avons pas abordé le problème de la détection des contours des cylindres généralisés circulaires, la définition même des contours d'un objet cylindrique ou sphérique étant déjà une question délicate. Notre algorithme n'utilisant que l'information contour, il est évident qu'un biais sur la détection de ces contours fausse la reconstruction (localisation en profondeur de l'axe dans le cas monoculaire, estimation du rayon dans le cas multi-oculaire). Cependant une détection automatique et précise des contours dans des scènes complexes est nécessaire pour envisager une exploitation de nos algorithmes sur des sites industriels.

## Reconstruction de cylindres généralisés circulaires

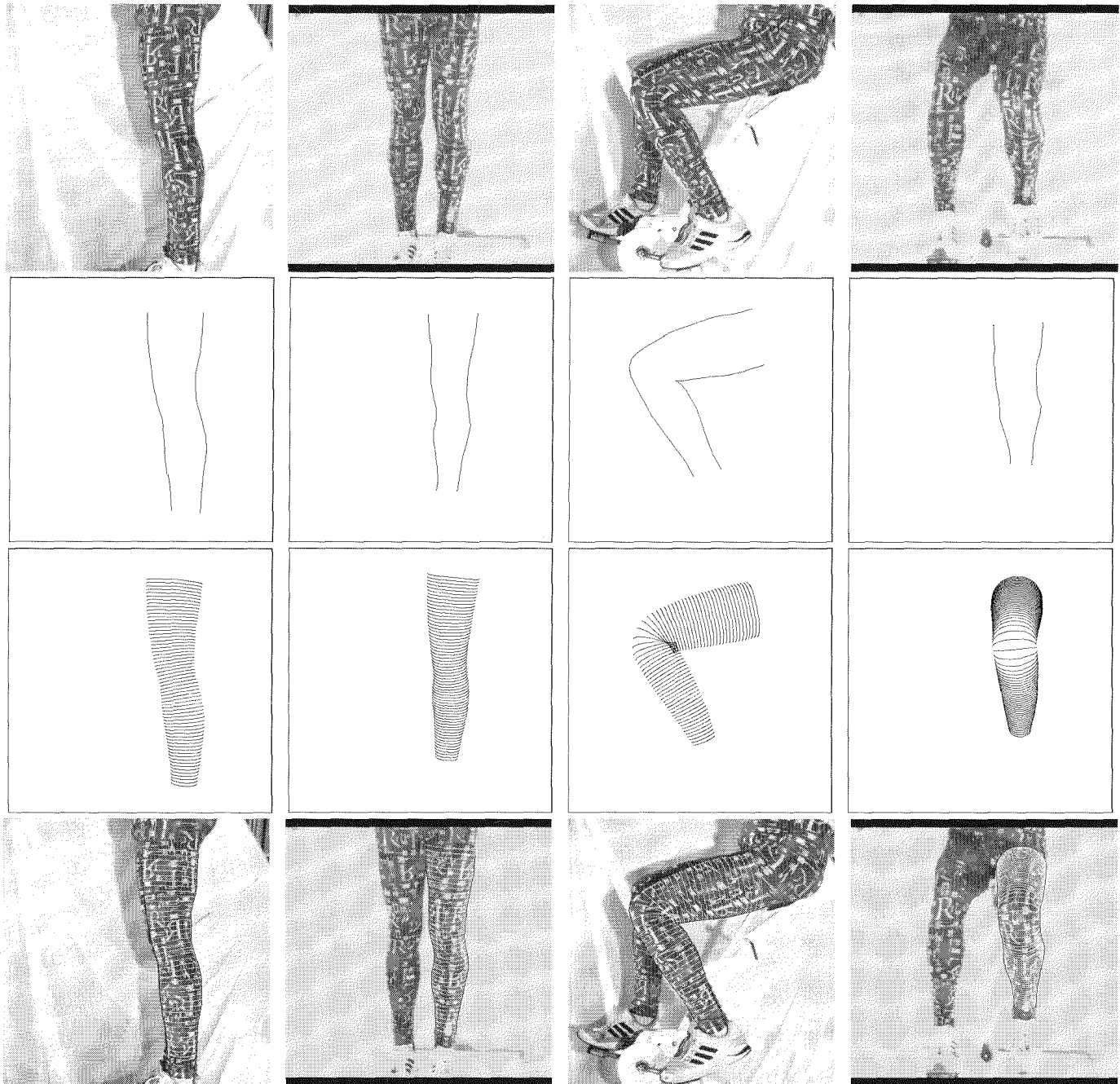


Figure 18. – Images de luminance - contour - projection du modèle - superposition du modèle sur les images initiales.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. Arbogast. Representation of Contours and Their Segmentation. In *Technical Report RR 115*, LIFIA, Grenoble, France, July 1990.
- [2] R. Bartels, J. Beatty, and B. Barsky. *Mathématiques et CAO : B-splines, vol. 6*. Hermès, Paris, 1987.
- [3] T.O. Binford. Visual Perception by Computer. In *Proc. of IEEE Conf. on Systems and Control*, Miami, 1971.
- [4] M. Brady and H. Asada. Smoothed Local Symmetries and Their Implementation. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 3 (3) : pages 36–61, 1984.
- [5] R.C.K. Chung and R. Nevatia. Recovering LSHGCs and SHGCs From Stereo. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 20 (1/2) : pages 43–58, October 1996.
- [6] R. Deriche. Optimal Edge Detection Using Recursive Filtering. In *Proc. of International Conference on Computer Vision*, pages 501–505, London, June 1987.

- [7] M. Dhome, J.T. Lapreste, M. Richetin, and G. Rives. *Three Dimensionnal Object Recognition Systems*. A.K. Jain and P.J. Flynn, Elsevier Science Publishers, 1993.
- [8] R.O. Duda and P.E. Hart. *Pattern Classification and Scene Analysis*. Wiley New-York, 1973.
- [9] R. Glachet. *Modélisation Géométrique par apprentissage de Cylindres Droits Généralisés Homogènes en Vision Monoculaire*. Thèse de Doctorat de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, n. 414, Avril 1992.
- [10] A. Gueziec and N. Ayache. Smoothing and Matching of 3D Space Curves. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 12 (1) : pages 79–104, February 1994.
- [11] D.J. Kriegman and J. Ponce. Computing Aspect Graph of Curved Object : Solids of Revolution. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 5 (2) : pages 119–135, November 1990.
- [12] J.M. Lavest, R. Glachet, M. Dhome, and J.T. Lapresté. Modelling solids of revolution by monocular vision. In *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 690–691, Hawaii, June 1991.
- [13] F. Lerasle, G. Rives, M. Dhome, and A. Yassine. Suivi du corps humain par vision monoculaire. *Traitement du Signal*, Vol. 13 (6) : pages 675–685, 1996.
- [14] M. Li and J.M. Lavest. Some Aspects of Zoom Lens Camera Calibration. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18 (10), October 1996.
- [15] S. Naudet, L. Nicolas, C. Faye, and M. Viala. Tracking Objects in a Long Monocular Image Sequence with Occlusion Managing. In *Proc. of Symposium on Robotics and Cybernetics, IEEE-SMC CESA IMACS Multiconference*, pages 581–586, Lille, July 1996.
- [16] R. Nevatia and T.O. Binford. Description and Recognition of Curved Objects. *Artificial Intelligence*, Vol. 8 : pages 77–98, 1977.
- [17] N. Pillow, S. Utcke, and A. Zisserman. Viewpoint-Invariant Representation of Generalized Cylinders Using the Symmetry Set. *Image and Vision Computing*, Vol. 13 (5) : pages 355–365, June 1995.
- [18] J. Ponce. Straight Homogeneous Generalized Cylinders : Differential Geometry and Uniqueness Results. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 4 (1) : pages 79–100, January 1990.
- [19] J. Ponce and D. Chelberg. Finding the Limbs and Cusps of Generalized Cylinders. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1 (3) : pages 195–209, October 1987.
- [20] M. Richetin, M. Dhome, J.T. Lapreste, and G. Rives. Inverse Perspective Transform Using Zero-Curvature Contour Points : Application to the Localization of Some Generalized Cylinders From a Single View. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.13(2) : pages 185–191, February 1991.
- [21] P. Sayd. *Modélisation de cylindres généralisés en vision artificielle*. Thèse de Doctorat de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, n. 817, Décembre 1996.
- [22] S.A. Shaffer. *Shadows and Silhouette in Computer Vision*. Kluwer Boston, 1985.
- [23] F. Ulupinar and R. Nevatia. Recovering Shape From Contour for Constant Cross Sections Generalized Cylinders. In *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 674–676, Hawaii, June 1991.
- [24] F. Ulupinar and R. Nevatia. Shape From Contour : Straight Homogeneous Generalized Cones. In *Proc. of Int. Conf. on Computer Vision*, pages 582–586, Osaka, Japan, December 1990.
- [25] M. Zerroug and R. Nevatia. Three-Dimensional Description Based on the Analysis of the Invariant and Quasi-Invariant Properties of Some Curved-Axis Generalized Cylinders. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18 (3) : 237–253, March 1996.

Manuscrit reçu le 18 novembre 1997.

## LES AUTEURS

Patrick SAYD



Patrick SAYD est titulaire d'une thèse en Vision pour la Robotique de l'Université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand, soutenue en 1996. Il poursuit actuellement ses travaux de recherche en vision artificielle au sein du groupe GRAVIR du LASMEA, UMR 6602 du CNRS, de Clermont-Ferrand. Ils portent essentiellement sur la reconstruction et la localisation d'objets 3D.

Jean-Marc LAVEST



Jean-Marc LAVEST est Maître de Conférences à l'Institut des Sciences pour l'Ingénieur CUST de Clermont-Ferrand. Après un séjour post-doctoral au Royal Institut of Technology de Stockholm chez le professeur Jan-Olof Eklundh, il rejoint le groupe GRAVIR du LASMEA. Ses activités de recherche concernent l'utilisation de zoom en vision artificielle et les problèmes liés au calibrage précis des systèmes de vision.

Michel DHOME



Michel DHOME est Directeur de Recherche au Centre National de la Recherche Scientifique et exerce au sein du LASMEA de Clermont-Ferrand. Il a obtenu une thèse de l'Université Blaise-pascal en 1984 avant de séjourner un an comme boursier post-doctoral au Centre National de Recherche d'Ottawa. Ses activités de recherche concernent le domaine de la vision artificielle et plus particulièrement la localisation, la modélisation et la reconnaissance d'objets volumiques.

Jean-Thierry LAPRESTÉ



Jean-Thierry LAPRESTÉ est professeur de Mathématique et d'Informatique à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Clermont-Ferrand. Mathématicien de formation, il effectue des recherches en vision artificielle au sein du groupe GRAVIR du laboratoire LASMEA de l'Université Blaise Pascal. Ses intérêts spécifiques sont liés à la métrologie à l'aide d'un ou plusieurs capteurs de vision.