

## ANALYSE NUMERIQUE DES FORMES SUB-CIRCULAIRES SUR LES IMAGES SATELLITAIRES

---

TAUD H. <sup>1</sup>, PARROT J-F <sup>2</sup>

### I.- RESUME

*La détection non supervisée de formes sub-circulaires sur les images satellitaires, repose sur une mise en évidence de contours significatifs et la recherche des centres et rayons des éléments sub-circulaires contenues dans ces contours.*

*A chaque élément sont associées des variables discriminantes. Il s'agit de la position du centre  $(x,y)$  et du rayon  $(R)$  du cercle référentiel  $(CR)$ , du nombre de pixels du contour détecté  $(npcd)$ , d'un coefficient d'intersection  $(CI)$  correspondant au rapport du nombre de pixels  $(npi)$  s'intersectant avec ceux du cercle référentiel  $(CR)$  sur le nombre de pixels que comporte le contour  $(npcd)$ , d'un coefficient de corde  $(CC)$  correspondant au rapport de la longueur de la normale à la corde passant par le centre  $(x,y)$  du cercle  $(CR)$  sur le diamètre  $(2R)$  de ce même cercle, de la direction de la normale à la corde  $(DIR)$  recoupant le contour détecté, et d'un coefficient de symétrie  $(DNC)$  dépendant du rayon  $(R)$  et de la distance séparant le milieu de la corde du point d'intersection entre la corde et la normale précédemment définie.*

*L'analyse de l'ensemble de ces données, ainsi que de celles qui proviennent des valeurs rencontrées dans la surface qu'engendrent ces formes sub-circulaires sur des plans de toute nature et origine (données SPOT, données issues de combinaisons de canaux, produits dérivés du MNT, etc...), permet de distinguer et de sélectionner des familles structurales. Il est également possible de définir ces différentes familles à l'aide d'une analyse statistique.*

*Cette méthode a été appliquée à la région d'Azrou (Moyen Atlas Marocain) qui comporte de nombreuses structures circulaires d'origine variée (structures volcaniques et dolines de relief karstique).*

---

<sup>1</sup>Université Paris VI, et Laboratoire d'Electronique et de Traitement du Signal, Université Mohammed V, rue Ibn Battouta, Rabat-Agdal (Maroc)

<sup>2</sup>Dpt de Géotectonique, Université Paris VI, 4 place Jussieu Paris (France), et ORSTOM 72 route d'Aulnay, 93143 Bondy Cedex(France)

## II.-INTRODUCTION

La détection automatique des structures sub-circulaires sur les images numériques a déjà fait l'objet de nombreuses recherches. Différentes versions de la Transformée de Hough (Hough 1962) ont été proposées et appliquées à des domaines divers en vue de détecter le centre et le rayon des structures circulaires.

Ainsi, la version définie par Kimme et al. (1975) et développée par Gerig et Klein (1986), a-t-elle été utilisée par Cross (1988) pour mettre en évidence des structures circulaires sur des images Landsat MSS, et la version d'Illingworth et Kittler (1987) a-t-elle en partie servi de base à la méthodologie que nous avons développée (Taud et Parrot 1990, Parrot et Taud 1990).

Toutefois, la recherche des centres et des rayons à l'aide de la Transformée n'étant pas suffisante pour mettre en évidence l'ensemble des structures que renferme une image complexe telle qu'une image satellitaire, les algorithmes extraient une à une les structures sub-circulaires en amont de l'utilisation de la Transformée, et précisent en aval, la position du centre et du rayon de chacune de ces structures.

Par ailleurs, pour une Reconnaissance Des Formes, la seule notion de centre et de rayon n'est pas suffisante pour caractériser la structure étudiée qui peut correspondre à des structures fermées ou non, à des arcs de cercle de longueur inférieure, égale ou supérieure à celle d'un demi-cercle, à des formes présentant des orientations variées, voire à des segments d'arcs correspondant à des éléments sub-linéaires, etc... A cet effet, des variables susceptibles de discriminer les structures détectées ont été définies. Il s'agit, pour chaque structure, de la position du centre  $(x,y)$  et du rayon  $(R)$  du cercle référentiel  $(CR)$ , du nombre de pixels du contour détecté  $(np_{cd})$ , du coefficient d'intersection  $(CI)$  correspondant au rapport  $(n_{pi}/np_{cd})$  du nombre de pixels  $(n_{pi})$  s'intersectant avec ceux du cercle référentiel  $(CR)$  sur le nombre de pixels que comporte le contour  $(np_{cd})$ , du coefficient de corde  $(CC)$  correspondant au rapport de la longueur de la normale à la corde passant par le centre  $(x,y)$  du cercle  $(CR)$  sur le diamètre  $(2R)$  de ce même cercle, de la direction  $(DIR)$  de la normale à la corde recoupant la structure circulaire détectée, et du coefficient de symétrie  $(DNC)$  dépendant du rayon  $(R)$  et de la distance séparant le milieu de la corde du point d'intersection entre la corde et la normale précédemment définie.

Outre ces "variables de contours", il est également possible de définir des "variables de surfaces" correspondant aux valeurs rencontrées dans les surfaces qu'engendrent les éléments sub-circulaires. Ces valeurs proviennent soit des données satellitaires brutes, soit de données issues de combinaison de canaux (indices de végétation, de brillance, etc...), soit de produits dérivés du Modèle Numérique de Terrain.

L'analyse de l'ensemble de ces données permet de sélectionner les différentes familles de structures recherchées, soit en fonction de choix subjectifs du thématique, soit à l'aide d'une analyse statistique.

Dans le cas présent, nous avons utilisé, en vue d'illustrer la méthode, une sous-scène SPOT de la région d'Azrou située dans le Moyen Atlas Marocain (Figure 1). L'exploitation géologique des informations provenant de cette méthode doit faire

l'objet d'un article plus spécifique, afin de ne pas mélanger les niveaux d'information (Chorowicz et al., en préparation). Seules seront analysées ici, la signification des variables discriminantes et de leurs combinaisons, et la nature des informations fournies par la méthode pour différentes familles de structures sub-circulaires.

### III.-EXTRACTION DES CONTOURS SIGNIFICATIFS

L'extraction des éléments structuraux que comporte une image satellitaire dépend étroitement de la texture rencontrée. Dans l'exemple servant à illustrer les résultats fournis par la méthode, les structures correspondent pour l'essentiel à des limites entre plages à réflectance plus ou moins homogènes, et non à la présence de traits structuraux traversant des plages à réflectance homogène.

En vue de lisser au mieux les formes rencontrées, l'image des données brutes est traitée par un filtre passe-bas de taille 3x3. Ce filtrage est réitéré jusqu'à l'obtention d'une forte stabilité. Pour ce faire, l'arrêt des itérations se produit quand le nombre de pixels modifiés au cours de la dernière itération est inférieur ou égal à 1% du nombre de pixels modifiés au cours du tout premier filtrage (Figure 2). Il convient de noter que la forme de la courbe des pourcentages de modification, au cours des itérations successives, se révèle être un bon indicateur de la texture de l'image étudiée (Figure 3).

Le seuillage des valeurs de l'histogramme de l'image lissée se fait à partir d'un seuil de réflectance variable de valeur  $N$ , tel que le nombre de pixels dont les valeurs sont inférieures ou égales à ce seuil, corresponde à un pourcentage donné du nombre total de pixels que comprend l'image entière (Figure 4). Nous avons ici fixé 9 niveaux de pourcentage, allant de dix en dix, de 10% à 90%. Dans chacune des 9 scènes ainsi obtenues, les pixels correspondant sur l'image lissée aux pixels de réflectance inférieure ou égale au seuil  $N$ , sont codés avec la valeur 1, le fond étant mis à 0.

Chacune de ces 9 images binaires est ensuite soumise à un lissage majoritaire (Goldberg et al. 1975, in Schowengerdt 1983); le pixel central d'une fenêtre 3x3 prend la valeur présentant l'occurrence maximum dans cette fenêtre. Ce lissage est réitéré jusqu'à stabilité complète de l'image (Figure 5). Appliqué à une image binaire, ce filtre se comporte comme un opérateur de Morphologie Mathématique (Serra 1982, 1988, Coster et Chermant 1985); il présente l'avantage d'ébarbuler les formes et d'en faire disparaître les pixels d'angle droit.

Enfin, les limites des différentes formes ainsi obtenues sont tracées en analysant les sauts de valeur entre deux pixels voisins, selon deux directions (NS et EW), afin d'obtenir un contour de connectivité 8 (Schweizer 1987). Afin de limiter au maximum les croisements structuraux provenant parfois de la coalescence des formes, le saut de réflectance, c'est à dire la valeur absolue de la différence entre les codes de deux pixels voisins, est placé sur la valeur maximum rencontrée dans chaque couple de valeurs pendant le balayage de l'image, le contour de ces formes étant de la sorte situé sur le bord de la forme elle-même (Figure 6).

Tous les traits structuraux (lignes droites ou courbes, sécantes ou isolées) provenant de l'ensemble des traitements d'extraction des contours, sont ensuite soumis aux traitements de détection et d'individualisation.

## IV.-DETECTION ET INDIVIDUALISATION DES ELEMENTS SUB-CIRCULAIRES

C'est sur les contours définis précédemment que s'appliquent les quatre stades de traitement que comporte la détection et l'individualisation des éléments sub-circulaires.

### IV.a.- Individualisation des contours

Les courbes sont individualisées une à une par un suivi de contour basé sur le mouvement d'une fenêtre glissante ( $W_n$ ) de  $3 \times 3$  pixels,  $n$  indiquant la position de la fenêtre sur le  $n$ ème pixel du contour. L'algorithme développé (Taud 1989, Taud et Parrot 1990, Parrot et Taud 1990) permet de prendre une décision sur la direction à suivre, qu'un croisement se présente ou non.

#### (I) suivi de contours

Les opérations de suivi de contour sont basées sur le code de Freeman (Freeman et Davis 1977). Par ailleurs, la technique de suivi de contour développée prend en compte des contours fermés ou non. Quand le contour n'est pas fermé, on est alors en présence de deux "fins de branche"; nous entendons par ce terme, l'absence de pixel connexe au pixel central de la dernière fenêtre testée.

La méthode développée est la suivante:

- soit  $P_C$  le pixel central d'une fenêtre  $W_n$  et  $P_V$  le ou les pixels connexes au pixel central de cette fenêtre. L'ensemble de l'image est balayé ligne par ligne, de gauche à droite. Quand un pixel de contour est rencontré, la fenêtre  $W_1$  centrée sur ce pixel ( $P_C$ ) est testée.

En raison du lissage majoritaire effectué sur les formes issues du seuillage en tranches de pourcentage, seules cinq configurations peuvent être observées dans la fenêtre  $W_1$  (Figure 7):

- (a) un seul pixel  $P_V$  connexe au pixel central ( $P_C$ );  $P_V$  indique la direction à suivre.
- (b) deux pixels  $P_V$  connexes au pixel central ( $P_C$ ); l'un des pixels connexes,  $P_{V1}$  est toujours situé dans le coin SW (code 7), le second ( $P_{V2}$ ) se plaçant à droite de  $P_C$  (direction E, code 4). Le premier mouvement de la fenêtre se fait toujours vers le SW (code 7) et l'on garde en mémoire le code de la deuxième direction (4) qui doit être prise en compte si la première direction choisie débouche sur une fin de branche.

Quand on observe un seul pixel connexe, ceci implique que l'on aborde par l'une de ses extrémités un contour non fermé. S'il existe deux pixels connexes, ceci signifie que l'on aborde un contour fermé ou non en un point quelconque. Dans le deuxième cas (présence de deux pixels connexes  $P_{V1}$  et  $P_{V2}$ ), quand le contour n'est pas fermé, le suivi de contour s'effectue jusqu'à la fin de la première branche et la fenêtre glissante revient à la position  $W_1$  pour traiter la deuxième branche; quand le contour est fermé, la fenêtre glissante retourne au point  $W_1$  sans solution de continuité. Dans tous les cas, le passage de la fenêtre d'un point  $n$  à un point  $n+1$ , entraîne l'élimination des pixels centraux  $P_C$  afin qu'ils ne soient

pas pris en compte dans la fenêtre suivante.

(2) croisements

En passant de la position  $n$  à la position  $n+1$ , le code de la direction choisie en  $W_n$  est conservé en mémoire en vue d'être confronté, si nécessaire, au code que le pixel  $P_V$  détermine dans  $W_{n+1}$ . Quand il n'existe qu'un seul pixel connexe, le suivi de contour se poursuit quelque soit la direction. En revanche, s'il existe plus d'un pixel connexe, on est en présence soit d'une branche colatérale (deux pixels), soit d'un croisement (trois pixels). Le choix de la direction à prendre dépend du code précédent et des conditions suivantes:

- condition 1: la valeur absolue de la différence entre le code  $C_n$  (en  $W_n$ ) et  $C_{n+1}$  (en  $W_{n+1}$ ) ne doit pas excéder la valeur 1.

$$|C_n - C_{n+1}| \leq 1$$

- condition 2: la première condition est en effet parfois insuffisante si deux à trois pixels connexes la remplissent; le pixel choisi doit alors également remplir la condition 2.

$$|C_n - C_{n+1}| = 0$$

- condition 3: quand il existe deux pixels connexes qui remplissent la condition 1 et qu'aucun d'eux ne remplit la condition 2, c'est à dire lorsque les deux directions possibles sont situées symétriquement de part et d'autre de la direction choisie en  $W_n$ , un test est effectué entrant dans une règle générale correspondant à la condition 3:

pour chacune des deux directions possibles (A et B) rencontrées dans la fenêtre  $W_{n+1}$ , on calcule la valeur M

$$M = \left| \sum_{j=0, i-1} C_{(n-j)} - \sum_{j=0, i-1} C_{(n+j)} \right|$$

La valeur  $i$  correspond au nombre de codes qu'il faut prendre en compte pour choisir une direction. Tant que  $M_A - M_B = 0$ , la valeur de  $i$  croit jusqu'à ce que l'on rencontre un autre croisement, une fin de branche ou bien quand  $i = n$ .

Lorsque  $M_A - M_B \neq 0$ , la direction choisie est celle dont la valeur M est la plus faible (Figure 8).

$$M_A - M_B \neq 0 \implies D = A, \text{ Si } M_A < M_B$$

$$D = B, \text{ si } M_A > M_B, \text{ où } D = \text{direction choisie}$$

Si la condition 3 ne peut être remplie avant d'atteindre la limite de croissance de  $i$ , le croisement rencontré en  $W_{n+1}$  est considéré comme fin de branche.

En fin de détection du contour, les pixels de croisement, s'ils existent, sont réactivés pour assurer la continuité des contours non encore détectés.

#### IV.b.- Décomposition des courbes en éléments sub-circulaires

Les contours individualisés à la sous-étape précédente sont parfois formés par une succession d'éléments sub-circulaires qui sont alternativement convexes et concaves.

Le contour est segmenté en éléments sub-circulaires quand il présente un changement de direction de courbure.

Il convient de noter que, dans le mode discret, une courbe se décompose en une succession de lignes droites de 1 à  $n$  pixels, dont les directions sont soit horizontales, soit verticales. En raison de l'application du filtre majoritaire, quand on suit une courbe de connectivité 8, la différence entre deux codes de Freeman successifs est égale à 1, 0 ou -1. Si l'on ne tient pas compte de la valeur 0, on observe une alternance régulière des valeurs 1 et -1. Ces paires de valeurs (1,-1 ou bien -1,1) signent le passage entre deux éléments rectilignes de la courbe, et restent identiques tant que les segments conservent la même direction (horizontale ou verticale), ou bien tant que le mouvement le long de la perpendiculaire à une même direction ne change pas. L'un de ces deux changements (Figure 9), se traduit par une inversion des valeurs dans la paire, le pixel ( $P_{pc}$ ) où se produit cette inversion étant défini comme "point critique" (Taud 1989, Taud et Parrot 1990).

Cette définition est plus restrictive que celle proposée par Hung et Kasvand (1983) qui considèrent comme point critique tout pixel où la différence de code est non nulle et nécessite une série de tests supplémentaires pour montrer que l'on est en présence d'un réel changement de direction.

Un "point critique" peut correspondre soit à un point de transition d'une courbe ne présentant pas de changement de direction de courbure, soit à un changement de la direction de courbure. En vue de déterminer la nature du phénomène au point critique, il convient d'examiner la forme de la courbe en chacun de ses points critiques. Cet examen est réalisé dans une fenêtre de taille croissante centrée sur le point critique. La fenêtre est divisée en deux parties égales par une ligne droite, appelée ligne séparative, qui passe par le point critique et le centre de la fenêtre, et qui contient le nombre maximum de pixels du contour selon l'une des quatre directions suivantes: NS, EW, NESW, NWSE.

La fenêtre croît jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de pixels du contour sur les pixels extrêmes de la ligne séparative. A ce stade, les pixels du contour qui ne sont pas sur la ligne séparative se situent, soit de part et d'autre de cette ligne, soit d'un seul côté. La première localisation implique un changement de courbure directement observable dans la fenêtre. La seconde localisation permet de calculer la direction de courbure. Les directions de courbures sont codées de la même manière que le code de Freeman (Figure 10). Nous postulons qu'un contour présente un changement de direction de courbure, quand des pixels du contour sont situés de part et d'autre d'une ligne séparative, ou bien lorsque la valeur absolue de la différence entre deux codes successifs de courbure excède la valeur 1.

Il faut noter qu'il existe un troisième type de point d'inflexion, appelé PI3 (Parrot et Taud 1990). En raison de sa structure particulière et de la condition que nous avons définie pour effectuer le calcul de direction de courbure, à savoir une inversion dans la valeur des paires (1,-1 ou -1,1), celui-ci ne peut être pris en compte par

l'algorithme précédent. En effet, il s'agit d'un changement de direction qui ne se traduit par aucune inversion des paires, les segments de droite constitutifs conservant toujours la même direction. On observe seulement une croissance plus ou moins régulière du nombre de pixels que comportent les segments constitutifs, croissance ultérieurement suivie d'une décroissance (Fig. 11); on peut également observer une décroissance suivie d'une croissance.

Lorsque la valeur absolue de la différence entre les codes de courbure de deux points critiques successifs est égale à 4, ceci signifie qu'un point d'inflexion de type PI3 est situé entre ces deux points critiques. Dans ce cas, l'élément sub-circulaire est scindé à mi-parcours des deux points critiques. L'absence de test sur PI3 présente l'avantage de ne couper la courbe que si l'on enregistre une confirmation du changement de courbure (Fig. 11). Ainsi, des contours aux formes plus ou moins régulières sont-ils pris en compte dans leur intégralité.

#### IV.c.- Application de la Transformée de Hough

Quand un élément sub-circulaire est individualisé à la sous-étape précédente, on applique ensuite une version de la Transformée de Hough (Illingworth et Kittler 1987) afin de déterminer la position approximative du centre de cet élément et la valeur approchée de son rayon.

La Transformée de Hough (Hough 1962) convertit un problème complexe de détection de formes dans l'espace image en une détection de pics plus facile à résoudre dans un espace paramétrique. Cet espace est quantifié et utilisé comme accumulateur. La Transformée de Hough a été généralisée et spécialisée pour répondre aux problèmes rencontrés dans des domaines divers, notamment pour la détection des structures circulaires (Duda et Hart 1972, Kimme et al. 1975, Ballard 1981, Casasent et Krishnapuram 1987, McKenzie et Protheroe 1990, Israel 1990).

Illingworth et Kittler (1987) ont proposé une paramétrisation bi-dimensionnelle permettant de connaître la position du centre, suivie d'une paramétrisation uni-dimensionnelle pour trouver la valeur du rayon. La mise en évidence d'un cercle dépend de la contrainte suivante: tous les vecteurs normaux à la tangente en chaque point du contour doivent se recouper en un seul point, correspondant au centre du cercle. L'estimation de la direction de ces normales peut être obtenue en utilisant un opérateur local de détection de contours tel que le Sobel.

Pour Illingworth et Kittler (1987), la connaissance du triplet  $(x,y,0)$  permet de trouver le centre du cercle si  $a$  et  $b$  en sont les paramètres (Figure 12). La projection de chaque triplet  $(x,y,0)$  dans l'espace bi-dimensionnel  $(0,a,b)$  produit des lignes droites qui vérifient l'équation:

$$b = \text{tg}\theta a + (y - x.\text{tg}\theta),$$

$$\text{où } \theta(x,y) = D(x,y) - \pi/2,$$

$D(x,y)$  étant la direction du Sobel.

Le rayon peut être trouvé à partir de l'histogramme  $\delta = (x - a)^2 + (y - b)^2$   
 où  $a$  et  $b$  sont les coordonnées du centre déterminé dans la première étape.

Le rayon est identifié comme étant le pic le plus grand dans l'histogramme.

La recherche du ou des maximum enregistrés dans l'accumulateur conduit à la détection du centre du cercle. Il s'agit du lieu où se croisent le plus grand nombre de normales. Toutefois, la dérive des normales inhérente au mode discret, entraîne une dispersion des maximum autour du point central, conduisant à la notion d'incertitude, c'est à dire la distance entre le centre calculé selon les lignes (incy) et selon les colonnes (incx) et le maximum le plus éloigné de ce centre. Le centre est calculé à partir des deux maximum les plus éloignés l'un de l'autre respectivement selon l'axe x et l'axe y. Le centre est localisé à mi-distance de ces deux maximum.

L'incertitude est forte quand les structures sub-circulaires sont incomplètes. Les arcs entraînent dans l'accumulateur un déplacement du pic par rapport à la position réelle du centre.

#### IV.d.- Calcul de la position exacte du centre

Avec la méthode de Hough, la détection des structures circulaires repose essentiellement sur les pixels formant le contour. Une autre approche consiste à considérer tous les pixels qui n'appartiennent pas au contour comme autant de centres probables de ce contour. Ainsi, pour chaque centre probable, la distance de ce centre aux pixels du contour peut être calculé de la manière suivante:

$$d_i = [(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2]^{1/2}$$

$x_i, y_i$  représentent les coordonnées d'un pixel du contour

$i = 1, \dots, n$              $n$ : nombre de pixels du contour

$x_p, y_p$  les coordonnées du centre probable.

On obtient ainsi, pour chacun des centres probables testés, un histogramme comprenant sur l'axe des x les valeurs des distances et sur l'axe des y la fréquence de ces distances.

Le maximum  $Max_p$  rencontré sur l'histogramme correspond à la distance la plus fréquemment rencontrée entre un centre probable et les pixels du contour étudié. La distance  $d_p$  est alors considérée comme la valeur du rayon d'un centre donné.

Le maximum  $Max_p$  et la valeur correspondante de la distance  $d_p$  sont reportés dans les tables  $M(x_p, y_p) = Max_p$  et  $R(x_p, y_p) = d_p$ . Ainsi, quand tous les centres probables ont été testés, le maximum rencontré dans la table  $M(x_p, y_p)$  rend compte de la position exacte du centre recherché; la correspondance établie entre  $M(x_p, y_p)$  et  $R(x_p, y_p)$  fournit la valeur du rayon.

En fait, les centres putatifs ne sont testés que dans une zone qui entoure les plus fortes valeurs rencontrées dans l'accumulateur. La zone testée est une fenêtre dont la taille dépend de l'incertitude précédemment calculée et elle est centrée sur la position approximative du centre fournie par l'application de la Transformée de Hough.

Le cercle ainsi détecté que nous appellerons Cercle Référentiel (CR) et qui satisfait les conditions expérimentales retenues (par exemple, contour de 50 pixels minimum, segment de 50 pixels minimum, intersection de plus de 20%, etc...), correspond au cercle qui englobe le maximum de pixels du contour étudié. Il peut contenir l'ensemble des pixels du contour, inscrire le contour ou bien être inscrit dans ce contour.

## V.- ELEMENTS CARACTERISTIQUES DES STRUCTURES DETECTEES

Quand la position exacte du centre  $(x,y)$  et la valeur précise du rayon  $(R)$  du Cercle Référentiel (CR) sont connues, l'algorithme mis au point fournit pour chaque élément sub-circulaire détecté, outre les coordonnées du centre et la valeur du rayon de ce cercle, des informations complémentaires permettant de mieux individualiser la structure détectée.

Toutes ces variables sont reportées dans un tableau qui comprend respectivement: le numéro d'ordre de la structure détectée, la position  $x$  et  $y$  du centre du Cercle Référentiel (CR), la valeur du rayon  $(R)$  de ce cercle, l'ensemble des variables npcd, CI, DIR, CC, DNC, l'occurrence OCC, les positions  $(x,y)$  du début de la corde, les positions  $(x,y)$  de la fin de la corde et le ou les numéros d'ordre des structures correspondant à l'occurrence (OCC).

On obtient un tableau pour chacune des 9 images correspondant au seuillage en pourcentage décrit ci-dessus (cf. paragraphe III). Ces neuf tableaux sont rassemblés en un seul tableau de même type (Tableau I), qui contient ainsi toutes les données relatives à toutes les structures détectées. Parallèlement, les contours détectés pour chacune de ces 9 images sont consignés dans un tableau L qui peut être représenté comme un ensemble d'éléments  $l_i$

$$L = \{l_i = 1, \dots, n\}$$

où  $l_i$  représente l'ensemble de points d'un contour détecté.

$$l_i = \{P_j = (x_j, y_j), j = 1, \dots, m\}$$

### V.a.- Définition des variables (Fig. 13)

(a) npcd: nombre de pixels du contour détecté.

(b) CI: coefficient d'intersection. Il s'agit du pourcentage de pixels de CR s'intersectant (npi) avec les pixels du contour étudié (npcd);  $CI = (npi/npcd) * 100$ . Dans l'algorithme développé, le contour n'est pris en compte que pour un CI supérieur ou égal à 20. Plus ce coefficient est élevé, plus le contour décrit un cercle ou une portion de cercle parfait.

(c) DIR: direction de la normale à la corde de l'élément détecté. Cette normale à la corde passe par le centre  $(x,y)$  de CR. Les valeurs sont en degrés et sont codées dans le sens de la marche des aiguilles d'une montre, l'origine (0) étant situé au nord de l'image; il convient de noter que, pour une image satellitaire, la direction géographique réelle correspond à cette valeur plus l'angle de trajectoire du satellite. Par convention, nous avons fixé à 1000 cette

valeur pour une structure fermée pour laquelle la notion de corde et de normale à la corde est sans signification.

(d) CC: coefficient de corde.  $CC = (ln/2R)*100$ ,  $ln$  étant égal à la distance entre l'intersection de la normale avec la corde et l'intersection de la normale avec le contour. Ce coefficient permet d'appréhender la forme du contour étudié. Un coefficient inférieur à 50 rend compte d'un arc inférieur au demi-cercle, un coefficient supérieur à 100 signifiant que le cercle CR est inscrit dans le contour détecté. Par convention, le coefficient d'une structure fermée a été fixé à 100, valeur correspondant à un cercle complet, et cela, quel que soit le CI de cette forme.

(e) DNC: c'est le rapport multiplié par 100 de la distance entre l'intersection de la normale avec la corde et le milieu de cette corde, divisé par la valeur du rayon (R). Ainsi, une valeur de DNC égale ou proche de 0, indiquera-t-elle que la structure sub-circulaire est symétrique.

(f) OCC: il s'agit de l'occurrence qui sur le tableau I est, par définition, égale à 1.

### V.b.- Notion d'occurrence

L'image traitée ayant été scindée en 9 images en fonction du pourcentage, une même structure sub-circulaire peut être mise en évidence à plusieurs reprises. Ceci est dû aux phénomènes suivants:

(a) une forme mise en évidence pour un seuil de réflectance dépendant du pourcentage de segmentation retenu, peut se maintenir, avec ou sans dilatation, pour le ou les seuils de réflectance d'autres tranches de pourcentage, sans être renvoyée dans une nouvelle forme.

(b) l'un ou l'autre des niveaux de seuillage peut faire ressortir une section différente appartenant à une même structure.

De plus, la décomposition en éléments sub-circulaires effectuée sur les limites des formes peut scinder en plusieurs arcs de cercle une même structure circulaire.

Ainsi, lorsque l'on assemble les neuf tableaux, il est fréquent d'obtenir, pour des éléments structuraux différents, des centres et des rayons sensiblement identiques. A ce stade, on recherche, pour un intervalle donné valable pour  $x$ ,  $y$  et  $R$ , le nombre d'éléments structuraux dont le centre et le rayon sont compris dans cet intervalle. Ce nombre correspond à l'occurrence (OCC). A cette occurrence, reportée sur le Tableau II résultant, sont associés le ou les numéro d'ordre des structures concernées figurant sur le Tableau I.

Ceci permet, lors des traitements ultérieurs effectués à partir du Tableau II, d'aller rechercher dans le Tableau I, les caractéristiques propres de chacune des structures considérées comme formant un seul élément sur le Tableau II.

Par ailleurs, la recherche de l'occurrence pour un intervalle donné, entraîne un certain nombre de modification de variables, à savoir:  $x$ ,  $y$ ,  $R$  et DIR. Par convention, et pour conserver aux deux tableaux la même disposition (ce qui permet éventuellement de faire directement des sélections à partir du Tableau I), les autres variables, non utilisées à partir du Tableau II, sont portées à zéro.

$$x = \sum x_i / \text{occ} \quad (i = 1, \dots, \text{occ})$$

$$y = \sum y_i / \text{occ} \quad (i = 1, \dots, \text{occ})$$

$$r = \sum r_i / \text{occ} \quad (i = 1, \dots, \text{occ})$$

$$\begin{aligned} \text{dir}_{\text{occ}} &= (\text{dir}_i + \text{dir}_{i+1}) / 2 && \text{si } | \text{dir}_{i+1} - \text{dir}_i | < 180^\circ \\ &= (\text{dir}_i + \text{dir}_{i+1}) / 2 - 180^\circ && \text{si } | \text{dir}_{i+1} - \text{dir}_i | > 180^\circ \\ &= 2000 \text{ par convention,} && \text{si } | \text{dir}_{i+1} - \text{dir}_i | = 180^\circ \\ & && i = 1, \dots, \text{occ}-1 \end{aligned}$$

Par convention, si l'une des directions rencontrée est égale à 2000 (c'est à dire, structure fermée), la direction résultante ( $\text{dir}_{\text{occ}}$ ) est portée à cette même valeur. Par ailleurs, si deux directions sont opposées, la valeur de  $\text{dir}_{\text{occ}}$  consignée sur le Tableau II est de 3000, la structure étant considérée comme étant un cercle formé de traits discontinus.

### V.b.- Rapport des variables aux formes

Les variables qui caractérisent les structures détectées et/ou leur combinaison, permettent de discriminer les formes rencontrées.

Ainsi, un contour fermé dont le CC est par définition égal à 100, est régulier quand son CI est fort, et irrégulier quand son CI est faible. Une portion elliptique pourra avoir un CI et un CC faibles ou un CI moyen et un CC supérieur à 100. Un demi arc de cercle présente un CC voisin de 50, un CC supérieur à 100 indiquant que CR est inscrit dans le contour détecté. Toutes ces formes seront d'autant plus symétriques que DNC sera faible. Par ailleurs, les structures sub-rectilignes se caractérisent par un CI et un CC faibles.

De plus, les valeurs de toute nature (données SPOT, données issues de combinaisons de canaux, codes morphologiques provenant de calculs effectués sur le Modèle Numérique de Terrain de la zone étudiée, etc...) rencontrées dans la surface qu'engendre chacun de ces cercles ou portions de cercle, peuvent être considérées comme des variables pouvant être prises en compte par une analyse statistique. Ces variables supplémentaires permettent ainsi de discriminer les formes, non seulement à partir de leurs contours, mais aussi à partir de leurs surfaces.

## VI.- NATURE DES DONNEES RENCONTREES DANS LES SURFACES SUB-CIRCULAIRES

Si les variables décrites ci-dessus sont des indicateurs des contours de la forme, il est également possible de répertorier les formes par le contenu des surfaces qu'elles engendrent. L'extraction des données contenues dans ces surfaces obéit aux principes suivants:

- (a) lorsque la structure détectée n'est pas fermée, la surface prise en compte est définie par le contour et la corde joignant ses deux extrémités;
- (b) seuls sont pris en compte les pixels compris dans la surface, à l'exclusion des pixels du contour.

Dans l'exemple traité, les "variables de surface" correspondent d'une part aux valeurs radiométriques des trois canaux de l'image SPOT, et d'autre part à celles provenant des produits dérivés du Modèle Numérique de Terrain (MNT).

### **VI.a.- Les données SPOT**

L'image SPOT utilisée est une sous-scène de 512x512 pixels (lignes: 1220-1731; colonnes: 2430-2941) issue de la scène acquise le 30 avril 1986 (référence: WRS 35-283; niveau: 1B; incidence: 2,4; azimuth: 130; élévation: 66).

Les contours ont été définis à partir du canal XS3 et n'ont été retenues que les moyennes des valeurs de réflectance de chacun des trois canaux XS extraites dans les surfaces.

### **VI.b.- Le Modèle Numérique de Terrain (MNT)**

#### **(1) production du MNT**

Le MNT de la zone étudiée a été obtenu par digitalisation des courbes de niveau de la carte de la région d'Azrou (feuille NI30-VII 2d de la carte du Maroc à 1/50 000; équidistance des courbes: 20 mètres, avec parfois des courbes intercalaires tous les 10 mètres dans les zones de faible relief).

La valeur hypsométrique des points intercourbes provient d'une extrapolation linéaire obéissant au principe suivant: l'image est balayée ligne par ligne, de gauche à droite; chaque point (x,y) qui n'est pas situé sur une courbe de niveau est joint aux différentes courbes qui l'entoure par 32 segments de droite, repartis selon 16 directions; chaque segment fait avec son voisin un angle de 11°15. Seule la plus petite droite joignant deux courbes de niveau de valeur hypsométrique différente, est prise en compte pour déterminer l'altitude du point étudié, en fonction de la distance de ce point aux deux extrémités de la droite retenue et de la valeur hypsométrique de ces deux extrémités (Parrot 1990). Une autre approche a également été mise en oeuvre pour obtenir un MNT; il s'agit d'un calcul barycentrique s'appuyant sur les 32 points définis précédemment, à savoir les extrémités des 16 droites passant par le point étudié. L'un ou l'autre de ces deux programmes produit deux images, l'une codée en 8 bits, ce qui permet de visualiser directement sur écran le résultat, et l'autre codée en integer\*4 où les altitudes sont consignées en décimètres (norme IGN) et sur laquelle sont effectués les traitements fournissant des produits dérivés.

Le choix du MNT du à l'extrapolation linéaire, repose sur une étude de l'isotropie respective de ces deux produits (Polidori et al. 1990).

## (2) produits dérivés

Nous avons retenu parmi les produits dérivés obtenus à partir de l'image hypsométrique, d'une part l'image des valeurs de la pente angulaire et d'autre part celle des codes morphologiques. On entend par codes morphologiques, un codage des pixels de l'image situés dans les contextes suivants: (1) a-plat horizontal, (2) pente plane, (3) pente concave, (4) pente convexe, (5) creux faible, (6) creux fort, (7) talweg doux, (8) talweg aigu, (9) épaulement faible, (10) épaulement fort, (11) crête douce, (12) crête aiguë. Ces codes sont calculés à partir de la direction et de la variation de la pente angulaire, estimées à partir des opérateurs du Sobel et du filtre Laplacien (Veillet 1986).

Comme pour les données multispectrales, on calcule la valeur moyenne des pentes angulaire rencontrées dans les surfaces. En revanche, seul le code morphologique dominant est pris en compte, le code le plus faible étant privilégié en cas d'occurrence équivalente entre deux ou plusieurs codes.

## VII.- ANALYSE STATISTIQUE

La région d'Azrou (Moyen Atlas marocain), couverte par la sous-scène SPOT étudiée, comporte de nombreuses structures sub-circulaires d'origine volcanique et d'origine karstique.

Les traitements effectués ont fourni les résultats suivants : 119 structures sub-circulaires détectées, compte tenu des seuils fixés pour les prendre en compte (Figure 14). Ces seuils concernent d'une part le nombre minimum de pixels formant un contour (50 pixels), et d'autre part, le coefficient d'intersection CI qui doit être égal ou supérieur à 20%. La valeur volontairement faible de CI entraîne une grande variabilité des formes détectées, l'analyse des variables caractéristiques permettant ultérieurement d'effectuer des tris.

Le nombre relativement élevé de structures détectées résulte en partie du déroulement du traitement en cascade des 9 images provenant du seuilage par tranches de pourcentage.

Les caractéristiques de ces 119 structures "primaires" sont consignées dans le Tableau I. Comme nous l'avons signalé plus haut, les structures dont les centres et rayons sont équivalents ou de valeur proche, peuvent être regroupées en un seul élément dans le Tableau II où sont reportées d'une part l'occurrence, à savoir le nombre de structures formant cet élément, et d'autre part, les numéros d'ordre de ces structures (Figure 15). Ceci permet d'aller rechercher dans le Tableau I et dans le Tableau L, les caractéristiques de ces structures et l'ensemble des pixels qui les forment, afin de pouvoir si nécessaire les tracer, ainsi que la corde et la normale à la corde.

Un utilisateur peut établir des choix en fonction de ses préoccupations thématiques, par exemple, pour une recherche d'arcs de cercle dont la normale à la corde est comprise dans un intervalle donné. Dans l'exemple d'un choix de cette nature qu'illustre la Figure 16, les arcs de cercle recherchés sont réguliers (CI compris entre 33 et 100) et sont supérieurs ou légèrement inférieurs au demi-cercle sans toutefois prendre en compte les formes fermées (CC compris entre 33

et 99); de plus, les structures recherchées sont symétriques à sub-symétriques (DNC compris entre 0 et 50), et situées sur des pentes inférieures à 26 (PA de 0 à 25).

Ce tri peut également être effectué à l'aide d'une analyse statistique dont les résultats ne sont pas contradictoires avec les choix de l'utilisateur puisqu'ils lui permettent de contrôler ses choix et de tester le poids réel des variables dans la partition en classes.

L'étude statistique des variables a été menée en 3 temps. Tout d'abord sur les "variables de contours", puis sur les "variables de surface", et enfin sur l'ensemble de ces variables.

### VII.a.- Les "variables de contours"

Dix-huit individus dont les valeurs de CC et DNC sont supérieures à 999 (CC et DNC étant porté à 2000 quand la normale passant par le centre de CR ne recoupe pas la corde) ainsi que ceux présentant des anomalies de contours ne permettant pas de définir correctement la surface, ont été éliminés de l'analyse statistique.

La matrice de corrélation totale montre que, exception faite de la forte corrélation existant entre XS1 et XS2, toutes les variables des 101 structures restantes sont fortement décorréliées (cf. Table III).

Sans entrer dans le détail, notons que, pour l'ensemble de ces 101 structures

- 40% des rayons sont compris entre 15 et 22, soit 300 à 440 mètres,
- 81% des CI sont situés entre 20 et 50,
- les directions (DIR) sont isotropes,
- d'après les CC, 66% des arcs sont inférieurs ou égaux au demi-cercle, et 13% correspondent à des structures fermées,
- 53% des structures ont un DNC inférieur à 20, c'est à dire qu'elles sont sub-symétriques.

Ne cherchant pas dans cette illustration des résultats obtenus par la méthode, à discriminer les structures en fonction de la direction de la normale à la corde et de la valeur du rayon, seules ont été retenues comme variables discriminantes: CI, CC et DNC, pour effectuer l'analyse hiérarchique ascendante utilisant la distance Euclidienne et la moyenne des distances pondérées comme critère d'agrégation (Roux, 1985).

En fixant l'arrêt de la segmentation de l'arbre hiérarchique à moins de 30 individus pour la classe qui en contient le maximum, on obtient les 19 classes figurant dans le Tableau IV. A titre d'exemple, les 26 structures formant la classe 6 ont été reportées sur la Figure 17, en utilisant les minimum et maximum des variables discriminantes CI, CC et DNC.

### VII.b.- Les "variables de surfaces"

Il convient de distinguer les variables provenant des valeurs radiométriques ( $V_{XS1}$ ,  $V_{XS2}$  et  $V_{XS3}$  et celles issues des produits dérivés du MNT (CM et PA).

### (1) les variables radiométriques

Pour l'ensemble des structures étudiées,  $V_{Xs1}$  est compris entre 41 et 76,  $V_{Xs2}$  entre 33 et 67, et  $V_{Xs3}$  entre 31 et 106.

En fixant, comme dans le cas précédent, l'arrêt de la segmentation à moins de 30 individus dans la classe qui en contient le plus, on obtient 10 classes, la classe 3 contenant 27 individus ( $V_{Xs1}$  de 46 à 52,  $V_{Xs2}$  de 38 à 48, et  $V_{Xs3}$  de 77 à 97).

En raison de la forte décorrélation existant entre les "variables de contour" et les variables radiométriques, on enregistre une grande dispersion des individus de cette classe 3 dans 11 des 19 classes de l'analyse précédente, et pour sa part, le croisement des deux classifications engendre 51 sous-classes.

En fait, à l'analyse du tuilage des valeurs, il est possible de regrouper les classes 5 et 6 de la classification des "variables de contour", les classes 1,2,3 et les classes 6,7 de la classification radiométrique. Les bornes du regroupement 5,6 sont les suivantes: CI (30-70), CC (8-48) et DNC (0-35). On constate d'ailleurs, qu'exception faite de DNC, la classe 6 inclut la classe 5 (cf. Table IV). Les bornes du regroupement 1,2,3 sont comprises entre 41 et 55 pour  $V_{Xs1}$ , entre 33 et 53 pour  $V_{Xs2}$ , et entre 63 et 97 pour  $V_{Xs3}$ , et celles du regroupement 6,7 évoluent respectivement pour  $V_{Xs1}$  entre 54 et 66, pour  $V_{Xs2}$  entre 49 et 66, et pour  $V_{Xs3}$  entre 84 et 96.

Dans ce cas, le regroupement 5,6 (49 individus) se scinde en trois blocs:

- 30 individus issus du croisement avec le regroupement 1,2,3 (CI: 23-70; CC: 8-49; DNC: 0-35;  $V_{Xs1}$ : 42-55;  $V_{Xs2}$ : 34-53;  $V_{Xs3}$ : 64-97; PA: 0-59);
- 11 individus issus du croisement avec le regroupement 6,7 (CI: 32-66; CC: 14-100; DNC: 0-23;  $V_{Xs1}$  47-65;  $V_{Xs2}$ : 36-66;  $V_{Xs3}$ : 42-96; PA: 1-35);
- et un reliquat de 3 individus.

La classification hiérarchique effectuée sur l'ensemble de ces six variables rend bien compte de cette répartition. On retrouve notamment, parmi les classes obtenues, une classe de 29 individus dont les caractéristiques sont les suivantes: CI: 23-70; CC: 8-48; DNC: 0-22;  $V_{Xs1}$ : 42-65;  $V_{Xs2}$ : 34-65;  $V_{Xs3}$ : 56-97; PA: 2-59.

### (2) les données issues du MNT

Deux variables ont été étudiées; les codes morphologiques CM et la pente angulaire PA. Les codes morphologiques sont fortement dépendant de la pente angulaire et n'apportent que des informations complémentaires.

En ce qui concerne plus particulièrement PA, notons que dans l'ensemble, cette variable évolue entre 0 et 61 et qu'environ 50% des structures se situent sur des plans ne présentant pas une pente supérieure à 8. Par ailleurs, CM indique que la majorité des structures sont sur des surfaces planes (codes 1 et 2).

La classification hiérarchique portant sur CM et PA met ainsi en évidence deux classes majeures, l'une contenant 28 individus et l'autre 36. Les centres de gravité de CM et PA de ces deux classes sont respectivement égaux à 2 et 8.2 pour la première, et 2 et 2.3 pour la seconde.

### VII.c.- Classification sur l'ensemble des variables et Remarques

Sans chercher à pousser plus avant dans cet article les opérations portant sur la classification des structures détectées, opération qui entre dans des préoccupations d'ordre thématique qui valident la méthode (Chorowicz et al, en prép.), notons toutefois que dans l'exemple traité, la classification hiérarchique d'ensemble effectuée sur 8 variables (CI, CC, DNC, XS1, XS2, XS3, CM et PA) confirme le caractère discriminant de la variable PA et des "variables de contour" CC et DNC.

Ainsi, les structures sont-elles susceptibles d'être discriminées, non seulement par les "variables de contour", mais encore par les "variables de surface". Toutefois, l'utilisation de ces dernières ne peut raisonnablement se faire que dans le cadre d'une recherche thématique.

### VIII. -CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons montré qu'il est possible d'effectuer une détection non supervisée des structures sub-circulaires sur image satellitaire, et que l'on peut classer ces structures à l'aide des variables discriminantes que nous avons définies.

La détection proprement dite repose sur une mise en évidence de contours sur l'image traitée, et la recherche des centres et rayons des structures sub-circulaires contenues dans ces contours.

A chaque structure détectée sont associées des variables discriminantes décrivant la forme. Ces variables permettent de trier les formes recherchées, soit en définissant des limites à ces variables, soit en effectuant une analyse statistique qui regroupe les structures en classes (cf. organigramme).

Cette méthode de Détection Automatique des Structures sur Image Satellitaire (ADONIS: Automatic Detection Of Numerical Image Structures) dont la finalité est d'aboutir à une reconnaissance de formes, permet non seulement de détecter des courbes de forme sub-circulaire, mais encore des courbes sub-rectilignes. Le tri automatique ou non de ces formes s'appuie sur l'analyse des variables discriminantes (R, CI, CC, DNC et DIR). Il est également possible d'utiliser en vue d'une recherche thématique, des données de toute nature contenues dans les surfaces que décrivent les cercles ou les arcs de cercle et la corde associée. Il peut s'agir de variables provenant des valeurs de réflectances de différents canaux (Landsat MSS, Thematic Mapper, SPOT, etc...), de l'application d'un indice spécifique (indice de végétation, indice de brillance, etc...), ou bien de valeurs obtenues sur les produits dérivés issus d'un Modèle Numérique de Terrain (variation de pente, codes morphologiques, etc...), voire même de données digitalisées telles que des données géologiques, pédologiques ou autres.

La méthode ADONIS est applicable à de nombreux domaines couverts par les documents satellitaires: structures géologiques, structures végétales, résultat de l'activité anthropique, etc... Mais elle est également applicable sur tout document numérique: MNT, données Seabeam, etc...

## REFERENCES

- BALLARD D.H. (1981).- Generalizing the Hough Transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition*, 13 111-122.
- CASASENT D. and KRISHNAPURAM R. (1987).- Curved object location by Hough Transformations and interventions. *Pattern Recognition*, 20: 267-276.
- CHOROWICZ J., ALEM M., PARROT J.-F. et TAUD H. (en préparation).- Caractérisation des structures géologiques sub-circulaires par une méthode de détection automatique. Application à la région d'Azrou (Moyen Atlas marocain).
- COSTER M. et CHERMANT J.-L. (1985).- Précis d'Analyse d'Images. CNRS, Paris, 521 p.
- CROSS A.M. (1988).- Detection of circular geological features using the Hough Transform. *Int. J. Remote Sensing*, 9, n 9: 1519-1528.
- DUDA R.O. and HART P.E. (1972).- Use of the Hough Transform to detect lines and curves in pictures. *Comm. of the Assoc. of Comp. Machin.* 15, n 1: 204-208.
- FREEMAN H. and DAVIS L.S. (1977).- A corner-finding algorithm for chain coded curves. *IEEE Trans. Comput.*, vol C-26: 297-303.
- GERIG G. and KLEIN F. (1986).- Fast contour identification through efficient Hough Transform and simplified interpretation strategy. *8th Intern. Joint Conf. on Pattern Recognition*, Paris: 498-500.
- HOUGH P.V.C. (1962).- A method and means for recognizing complex patterns. V.S. Patent 3, 069, 654.
- HUNG S .H.Y. and KASVAND T. (1983).- Critical points on a perfectly 8- or 6-connected thin binary line. *Pattern Recognition*, 16: 297-303.
- ILLINGWORTH J. and KITTLER J. (1987).- The adaptive Hough Transform. *IEEE Trans. PAMI*, 9, n 5: 690-698.
- ISRAEL A. (1990).-Algorithm for finding the centre of circular fiducials. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 49, 398-406.
- KIMME C., BALLARD D. and SKLANSKY J. (1975).- Finding circles by an array of accumulator. *Comm. of the Assoc. of Comp. Machin.* 18, n 2: 120-122.
- MCKENZIE D.S. and PROTHEROE S.R. (1990).-Curve description using the inverse hough transform. *Pattern Recognition*, 23, n3/4, 283-290.
- PARROT J.-F. (1990).- Logiciel TAPIS (Traitement Apollo Pour Images Satellitaires). Doc. multigr. UPMC Paris VI, 100 p.

- PARROT J.-F. and TAUD H. (1990).- Detection and classification of circular structures on SPOT images. *IEEE Trans. Geosc. and Remote Sensing* (in press).
- POLIDORI L., CHOROWICZ J. and GUILLANDE R. (1990).- Description of terrain as a fractal surface and application to Digital Elevation Models quality assesment. *Photogr. Eng. and Remote Sensing* (sous presse).
- ROUX M. (1985).-Algorithmes de classification. Masson Ed. Paris,
- SCHOWENGERDT R.A. (1983).- Techniques for image processing and classification in Remote Sensing. Academic Press Ed. London/New-York, 249 p.
- SCHWEIZER P. (1987).- Infographie I. Presses polytechniques romandes, Lausanne, 418 p.
- SERRA J. ( 1982, 1988).- Image Analysis and Mathematical Morphology. Academic Press Ed. London/New-York, 1033 p. in 2 vol.
- TAUD H. (1989).- Détection des structures circulaires sur image numérique: recherche non supervisée des structures géologiques sur image satellitaire. Th. 3ème Cycle, Univ. Mohammed V, Rabat, 137 p.
- TAUD H. and PARROT J.-F. (1990).- Detection of circular structures on satellite images. *Int. J. Remote Sensing*, (in press).
- VEILLET I. (1986).- Reconnaissance de formes géomorphologiques à partir du modèle numérique de terrain. Mémoire de stage de 2ème année du cycle des Ingénieurs Géographes, (UPMC/ENSG), 44 p. multigr.

	x	y	r	nbpix	CI	DIR	C C	DNC	OCC	(x,y)	debut	(x,y)	fin	
1	41	215	22	70	32	303	31	73	1	77	181	27	214	1
2	69	55	25	54	22	338	15	44	1	58	40	42	80	2
3	123	158	26	58	31	277	19	35	1	140	141	84	148	3
4	145	155	11	51	38	69	95	18	1	140	142	161	150	4
5	221	136	20	98	34	196	95	45	1	209	156	195	108	5
6	207	132	25	55	52	177	44	24	1	212	121	210	156	6
7	371	263	22	79	26	344	22	45	1	370	216	351	282	7
8	366	146	22	51	40	155	28	5	1	372	159	380	142	8
9	461	269	14	80	36	1000	100	0	1	465	256	466	256	9
10	45	336	8	62	25	320	42	238	1	49	329	6	380	10
11	136	260	11	61	71	1000	100	0	1	125	260	125	259	11
12	209	151	28	50	41	275	23	4	1	230	133	183	137	12
13	204	148	38	56	35	220	13	3	1	240	148	209	111	13
14	221	163	17	51	42	140	23	29	1	230	168	220	180	14
15	201	285	17	63	31	23	137	35	1	198	270	215	311	15
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
118	395	180	9	52	42	1000	100	0	1	399	175	399	175	118
119	491	304	16	76	32	1000	100	0	1	480	309	480	308	119

Tableau I.- Représentation partielle des données de toutes les variables caractéristiques des 119 structures détectées sur l'image test d'Azrou.

x	y	r	nbpix	CI	DIR	CC	DNC	OCC	(x,y)	debut	(x,y)	fin	Numéros d'ordre
1	460	271	18	-	-	1000	-	-	2	-	-	-	9 77
2	136	260	12	-	-	1000	-	-	5	-	-	-	11 29 39 53 67
3	209	151	32	-	-	210	-	-	3	-	-	-	12 13 25
4	310	86	24	-	-	75	-	-	4	-	-	-	19 31 44 73
5	351	207	18	-	-	85	-	-	5	-	-	-	20 42 51 69 85
6	467	266	30	-	-	189	-	-	3	-	-	-	23 34 46
7	39	172	15	-	-	211	-	-	2	-	-	-	26 36
8	41	4	32	-	-	90	-	-	2	-	-	-	27 37
9	174	481	21	-	-	190	-	-	2	-	-	-	30 40
10	304	309	14	-	-	63	-	-	4	-	-	-	41 56 87 101
11	323	386	25	-	-	252	-	-	6	-	-	-	3 55 72 88 102 114
12	171	202	27	-	-	335	-	-	2	-	-	-	48 99
13	389	157	30	-	-	290	-	-	2	-	-	-	52 70
14	315	78	35	-	-	82	-	-	2	-	-	-	58 84
15	-6	317	33	-	-	153	-	-	2	-	-	-	61 78
16	58	464	31	-	-	170	-	-	3	-	-	-	64 79 95
17	98	63	26	-	-	96	-	-	3	-	-	-	65 66 96
18	416	390	18	-	-	177	-	-	2	-	-	-	76 92
19	189	57	32	-	-	303	-	-	2	-	-	-	83 100
20	358	53	15	-	-	329	-	-	3	-	-	-	86 105 116
21	490	304	19	-	-	1000	-	-	2	-	-	-	110 119

Tableau II.- Données des variables caractéristiques des structures à occurrence supérieures ou égales à 2, pour un intervalle de 10, et numéros d'ordre des structures "primaires" associées.

	CI	CC	DNC	XSI	XS2	XS3	CM	PA
CI	1.000							
CC	-0.120	1.000						
DNC	-0.450	0.022	1.000					
XSI	-0.238	0.129	0.017	1.000				
XS2	-0.287	0.135	0.017	0.938	1.000			
XS3	-0.392	0.006	0.158	0.554	0.536	1.000		
CM	0.144	-0.061	-0.188	0.027	0.011	0.063	1.000	
PA	0.088	-0.161	0.137	-0.373	-0.381	-0.195	-0.357	1.000

Table III. Matrice des corrélations totales des 8 variables traitées.

Classe	Nombre	CI	CC	DNC
	Individus	(moy,min,max)	(moy,min,max)	(moy,min,max)
1	7	27,22,36	18,7,31	75,68,81
2	12	28,21,37	24,10,42	43,26,58
3	8	37,32,42	98,86,100	5,0,19
4	2	29,23,34	95,94,95	39,33,45
5	18	39,30,52	35,23,47	21,4,35
6	26	48,23,70	25,8,48	5,0,19
7	1	25,25,25	42,42,42	238,238,238
8	5	65,59,71	100,100,100	0,0,0
9	3	33,31,35	137,135,138	17,7,35
10	6	39,33,48	58,53,65	11,6,17
11	1	32,32,32	100,100,100	85,85,85
12	1	27,27,27	123,123,123	64,64,64
13	1	22,22,22	600,600,600	23,23,23
14	5	33,27,39	65,57,75	35,21,46
15	1	29,29,29	50,50,50	144,144,144
16	1	30,30,30	250,250,250	33,33,33
17	1	26,26,26	138,138,138	89,89,89
18	1	30,30,30	200,200,200	44,44,44
19	1	25,25,25	100,100,100	333,333,333

Tableau IV.- Partition en 19 classes de la classification hiérarchique ascendante.

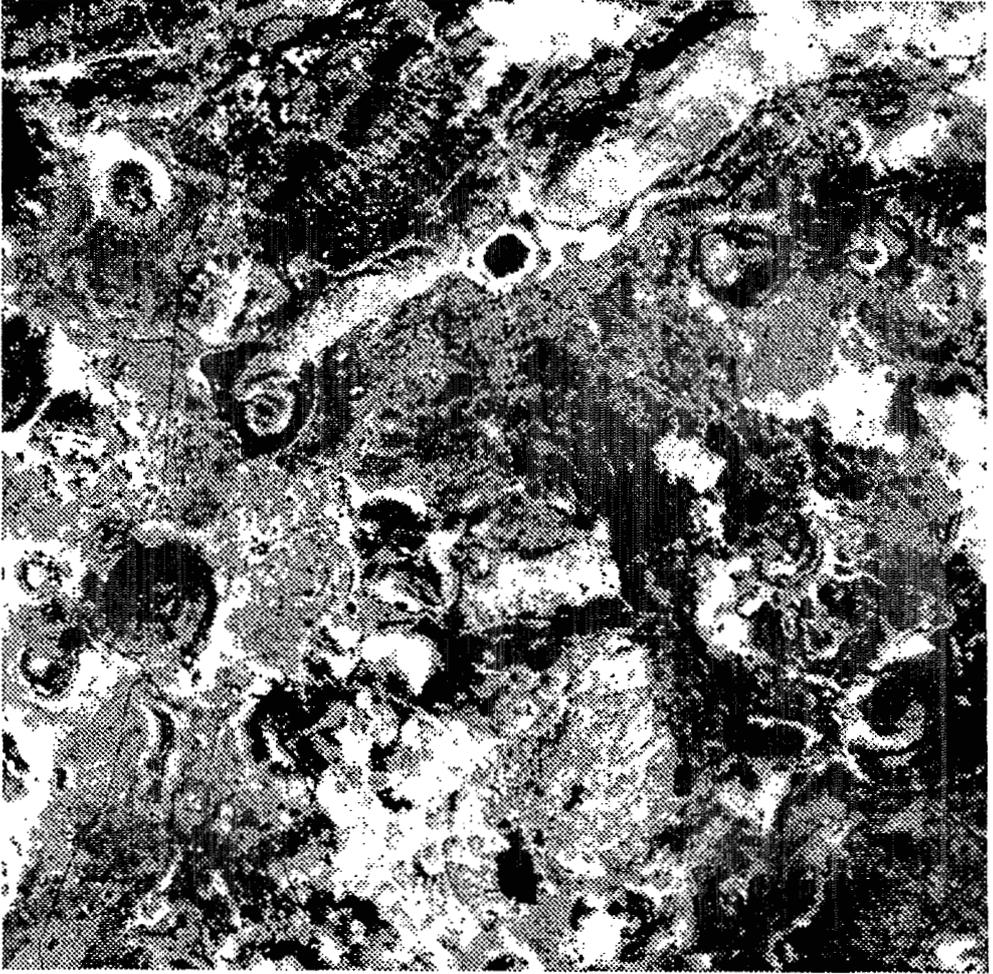


Figure 1.- Données brutes du canal XS3 de la scène traitée (région d'Azrou).

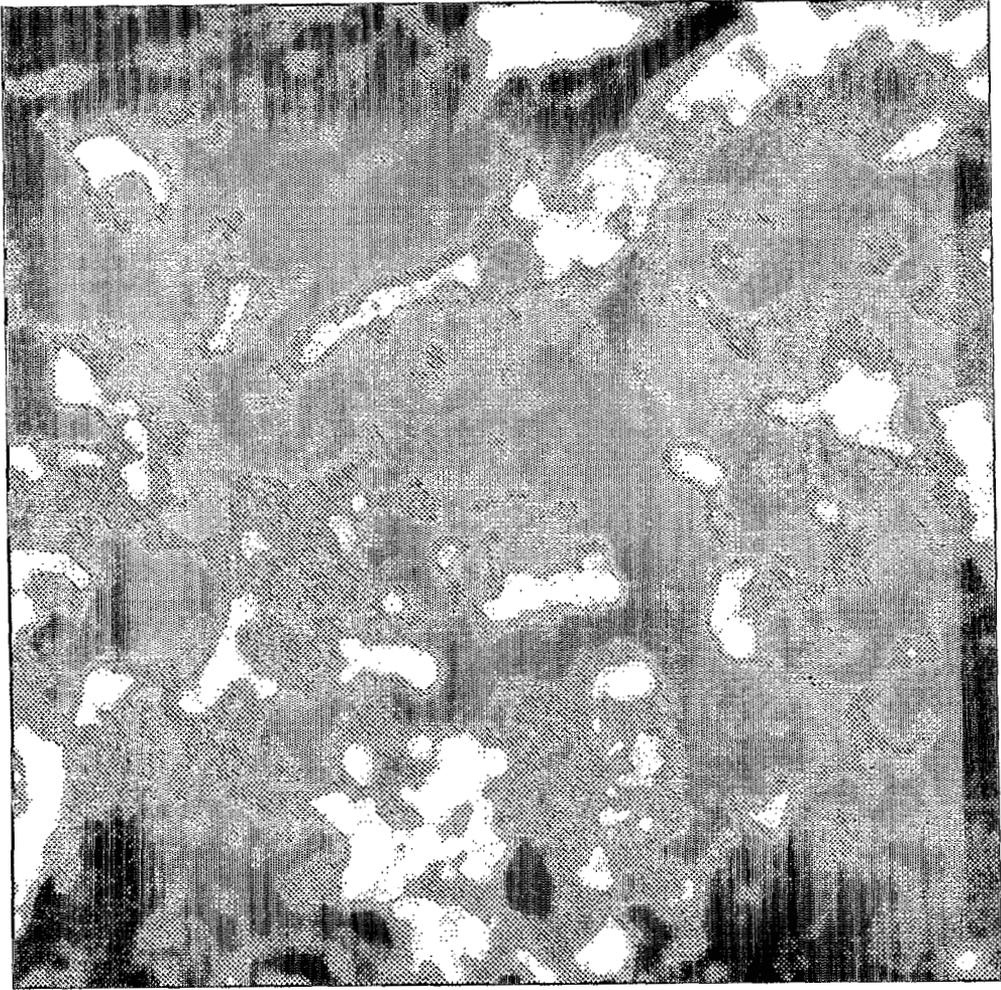


Figure 2.- Application itérative du filtre passe-bas de taille 3x3 sur le canal XS3.

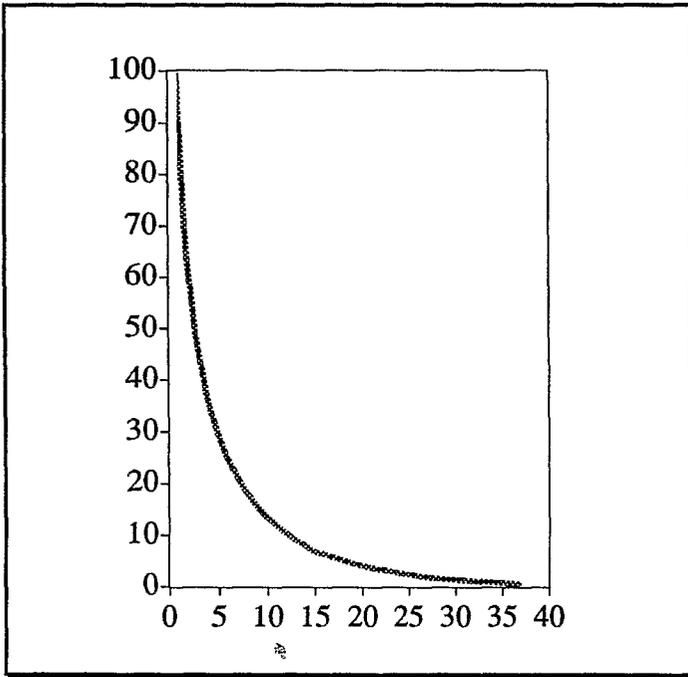


Figure 3.- Evolution du pourcentage de pixels modifiés au cours des itérations.

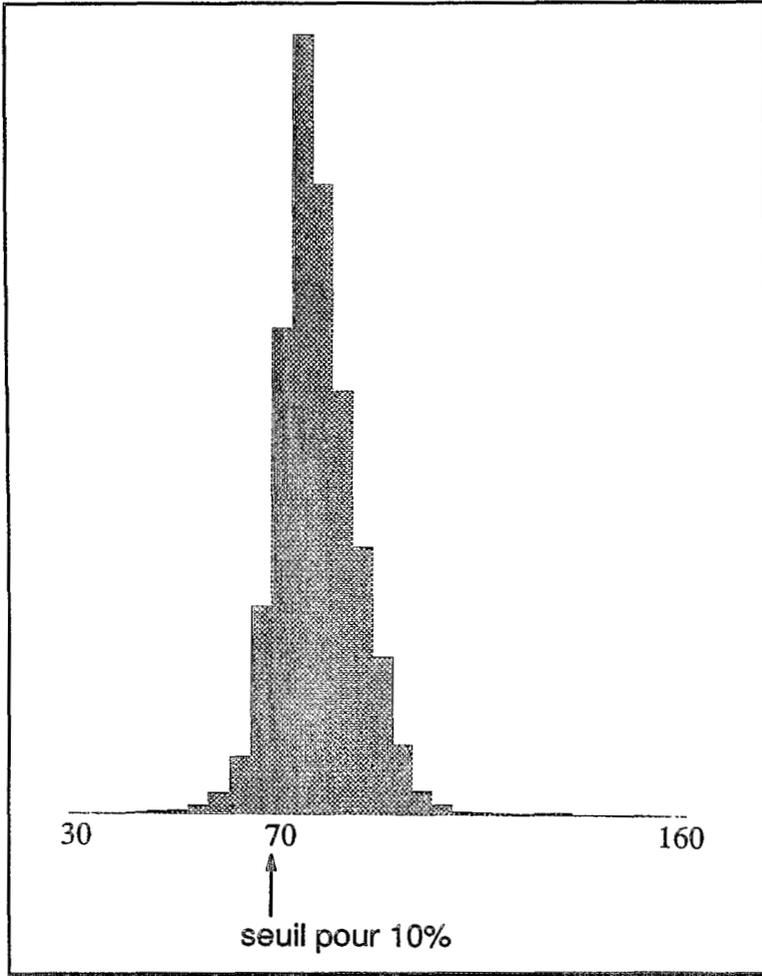


Figure 4.- Seuillage des réflectances pour un pourcentage de 10.

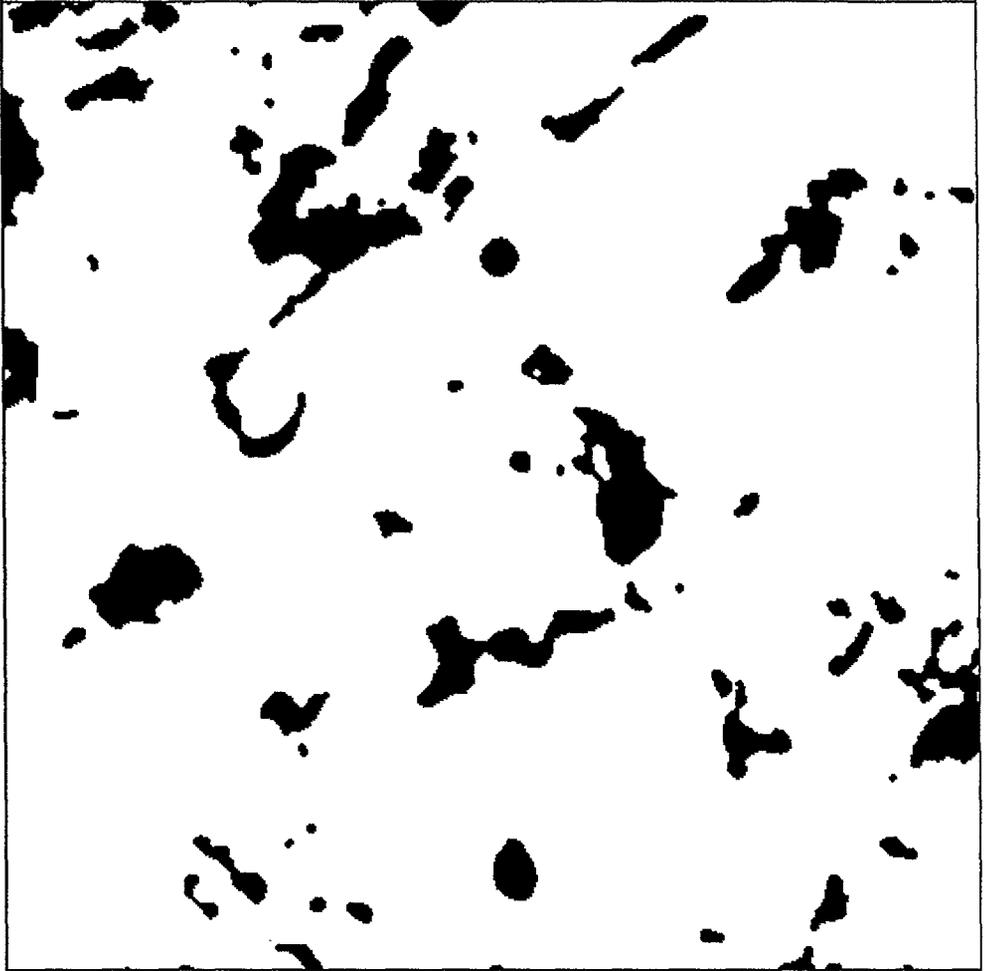


Figure 5.- Seuillage de l'image 2 pour une tranche de pourcentage égale à 10%, suivi d'un lissage majoritaire itératif.

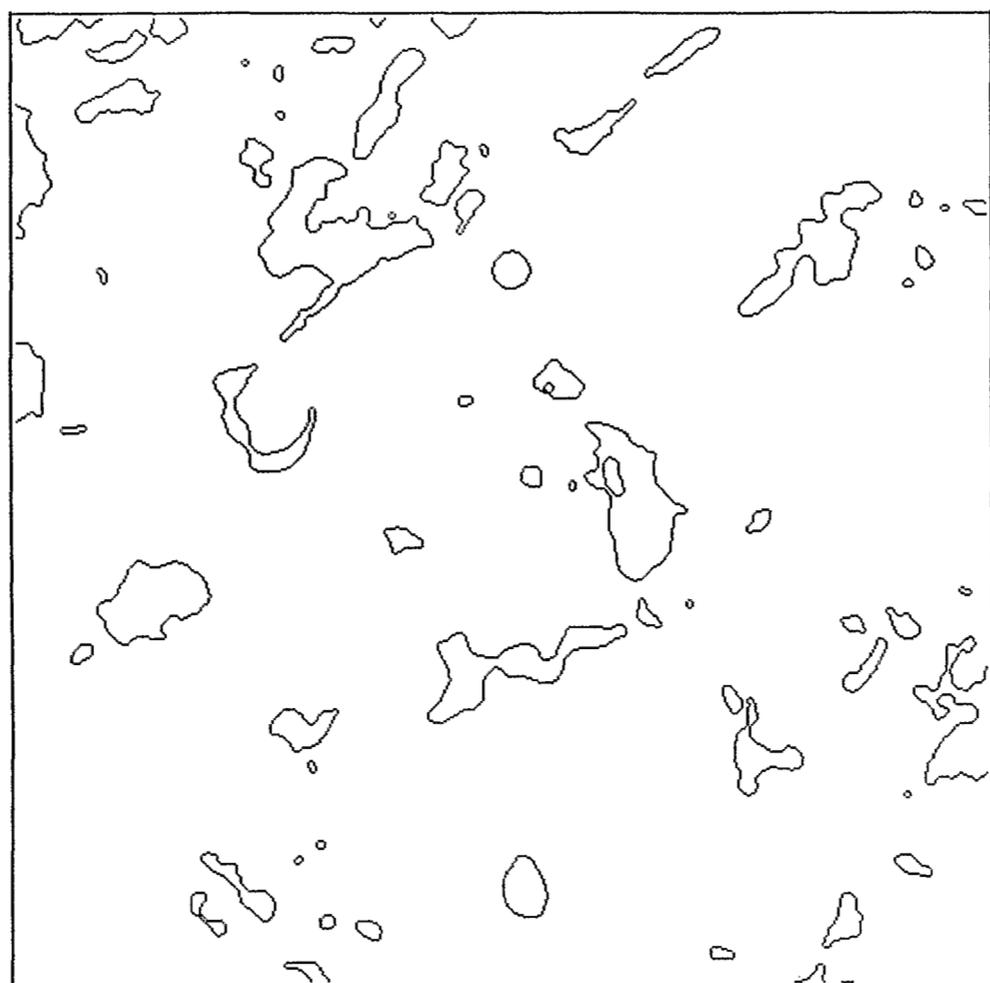


Figure 6.- Limites obtenues à partir de l'image 5.

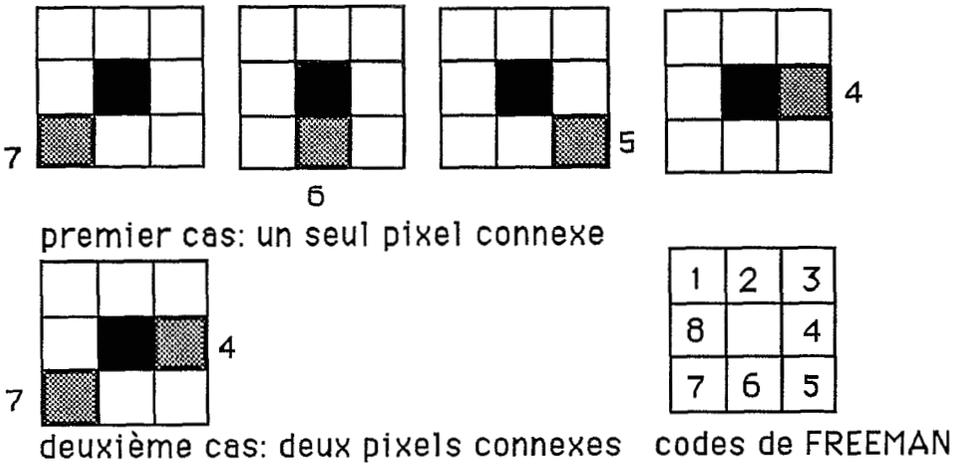


Figure 7.- Code de Freeman et configurations possibles des pixels rencontrés dans la fenêtre W1.

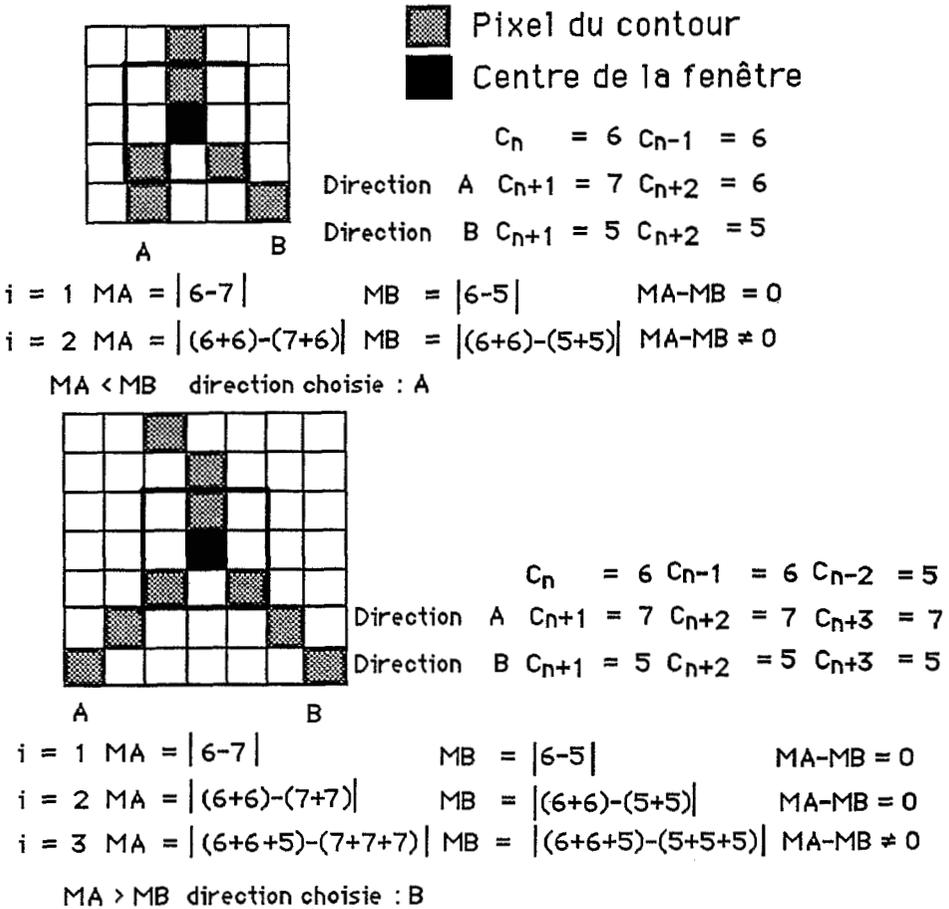


Figure 8.- Exemple d'application de la condition 3.

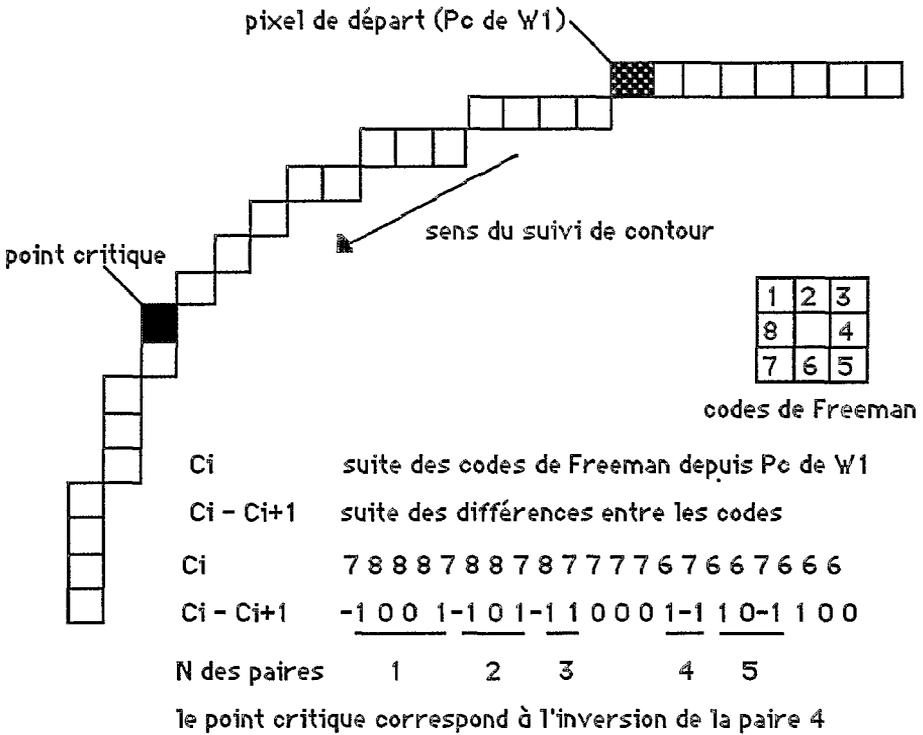


Figure 9.- Recherche des points critiques (inversion des paires)

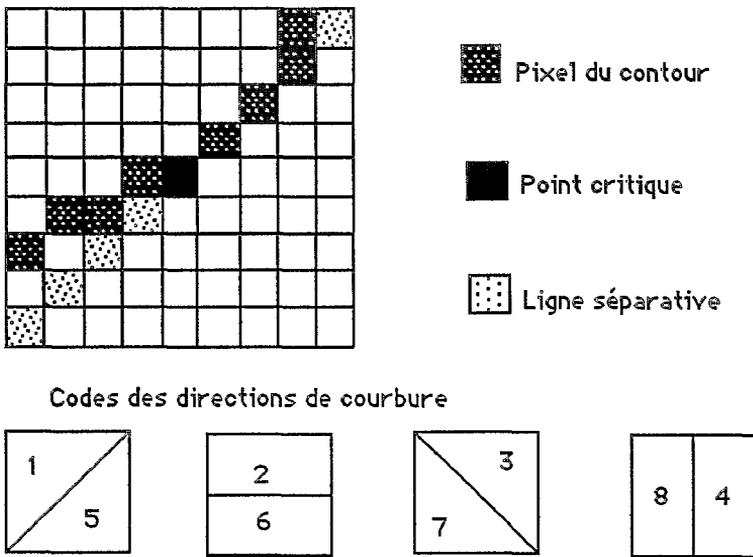


Figure 10.- Détermination des codes de direction de courbure.

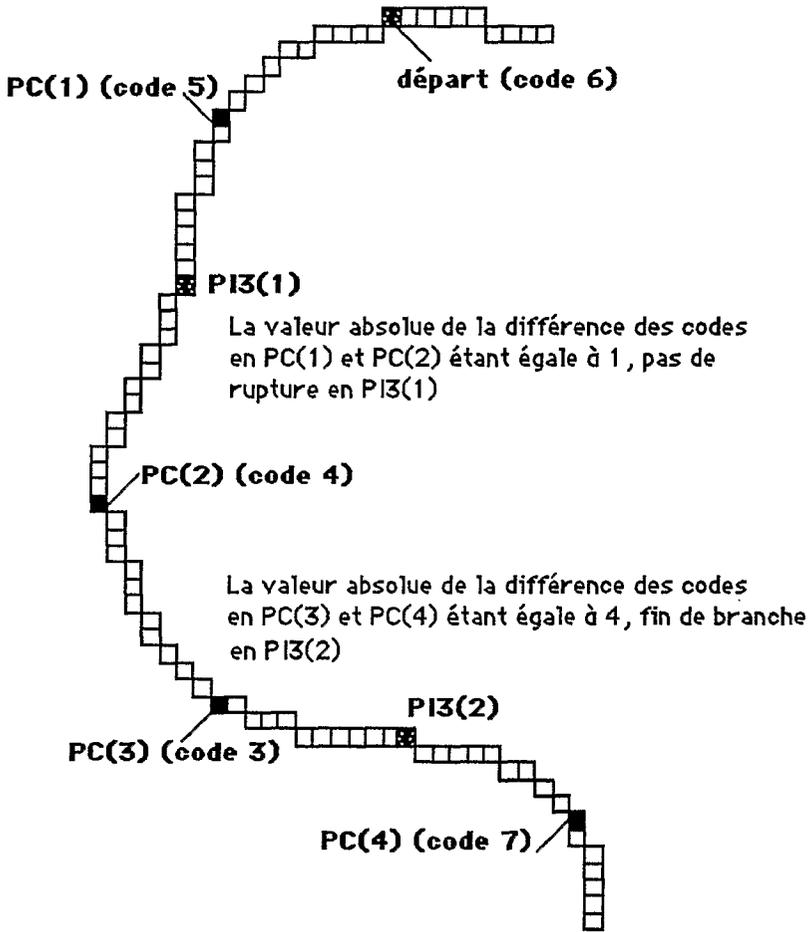
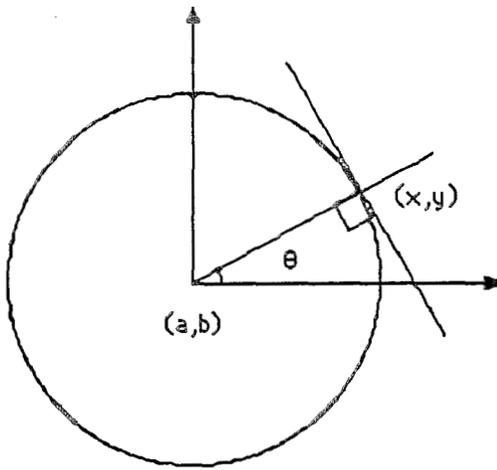


Figure 11.- Points d'inflexion transitoires.



$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = R^2$$

$$\text{tg } \theta = y-b / x-a \iff b = \text{tg } \theta \cdot a + (y-x \cdot \text{tg } \theta)$$

Figure 12.- Relation entre (x,y,θ) et les paramètres du centre (a,b).

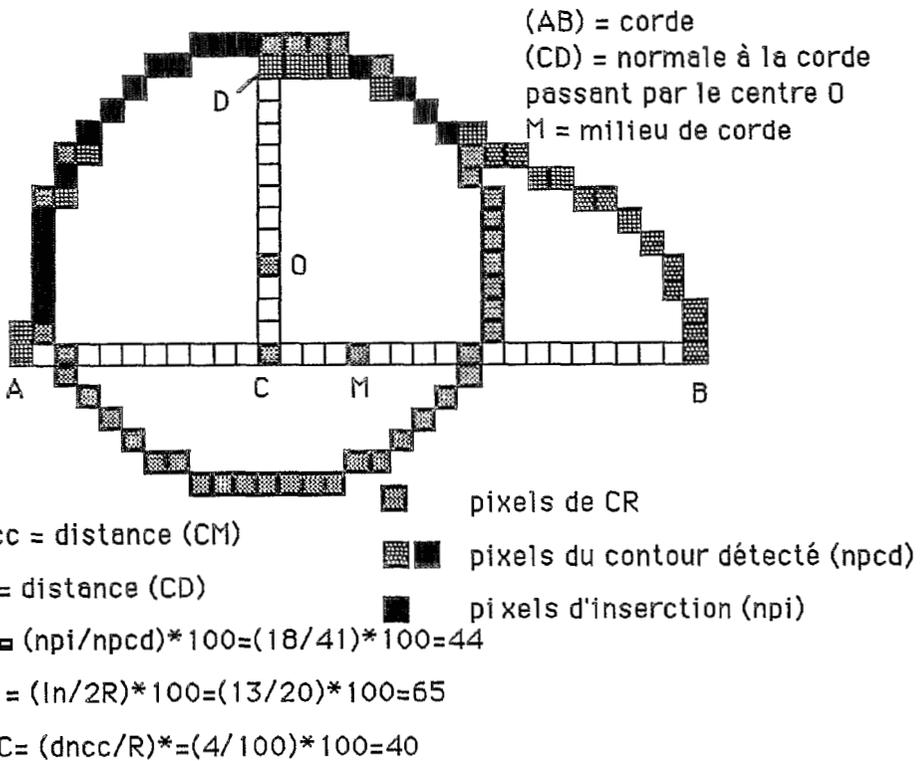
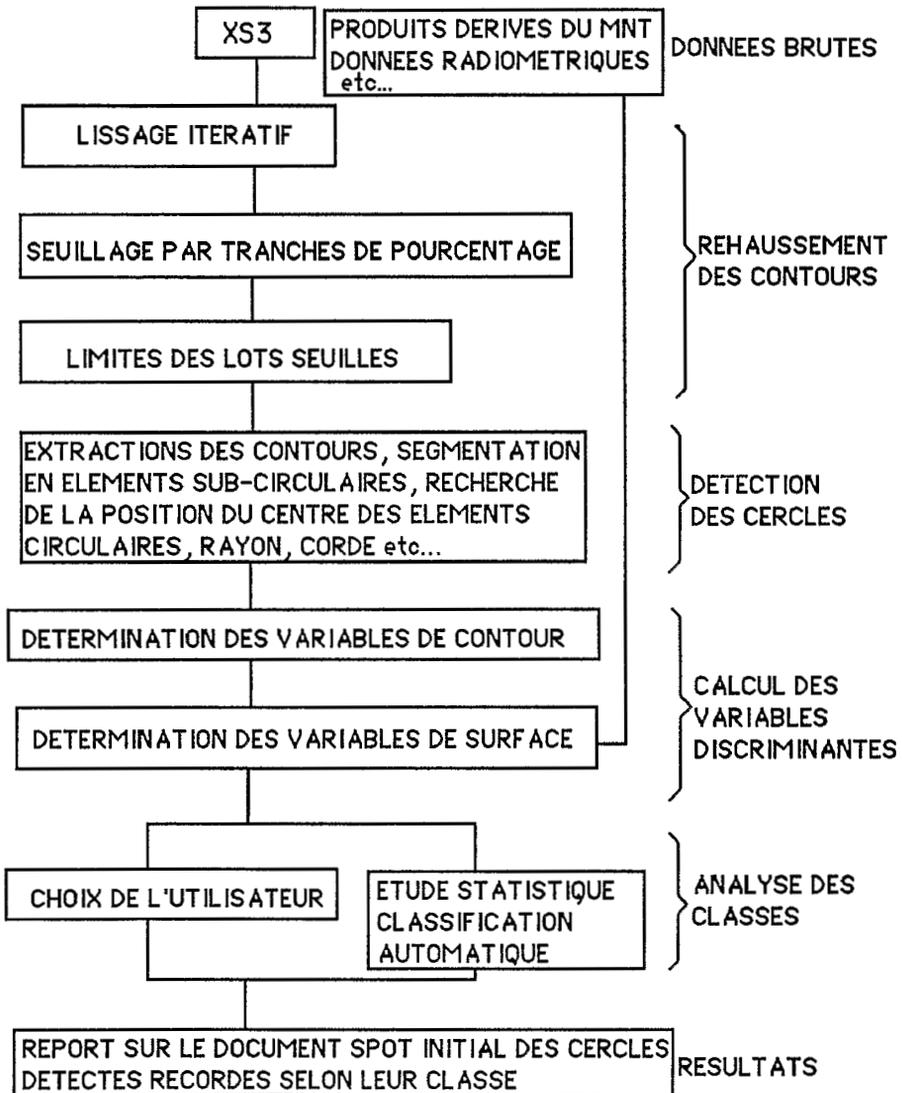


Figure 13.- Définition des variables CI, CC et DNC.



Organigramme des différents traitements

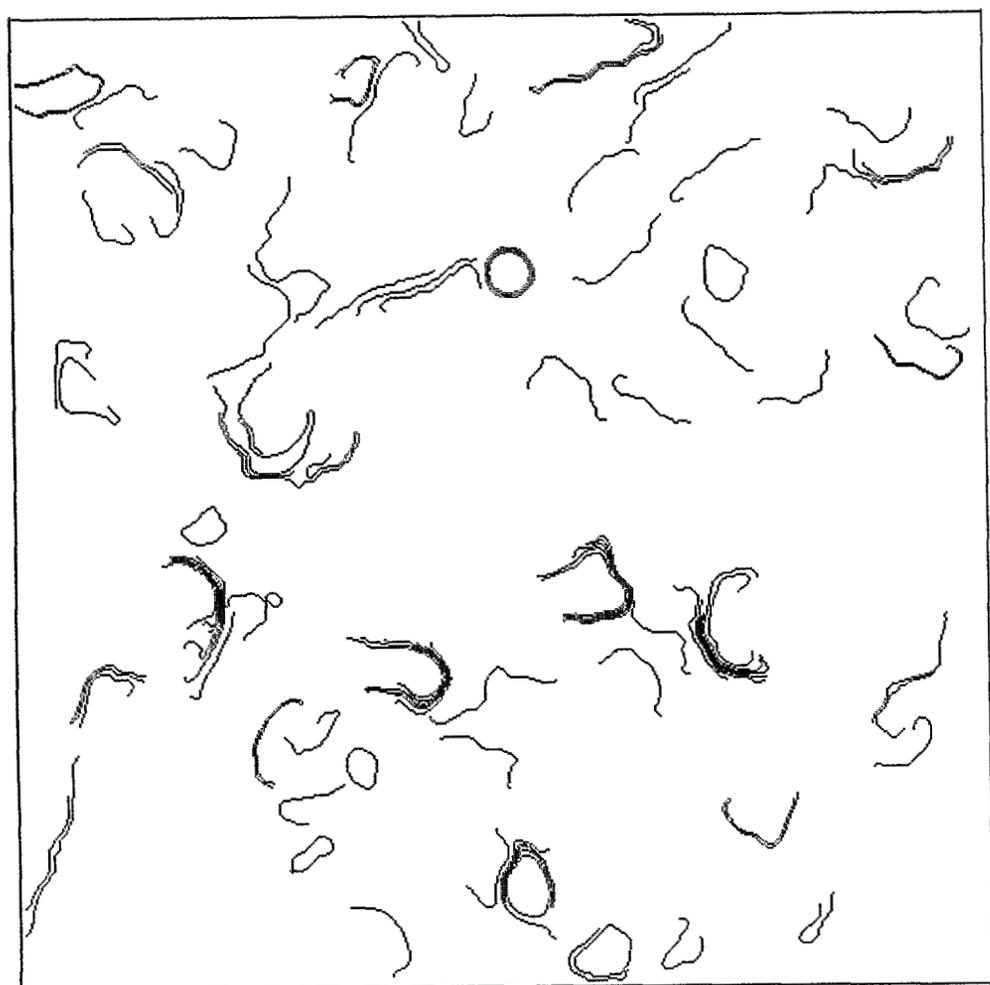


Figure 14.- Ensemble des structures détectées dans la région d'Azrou.

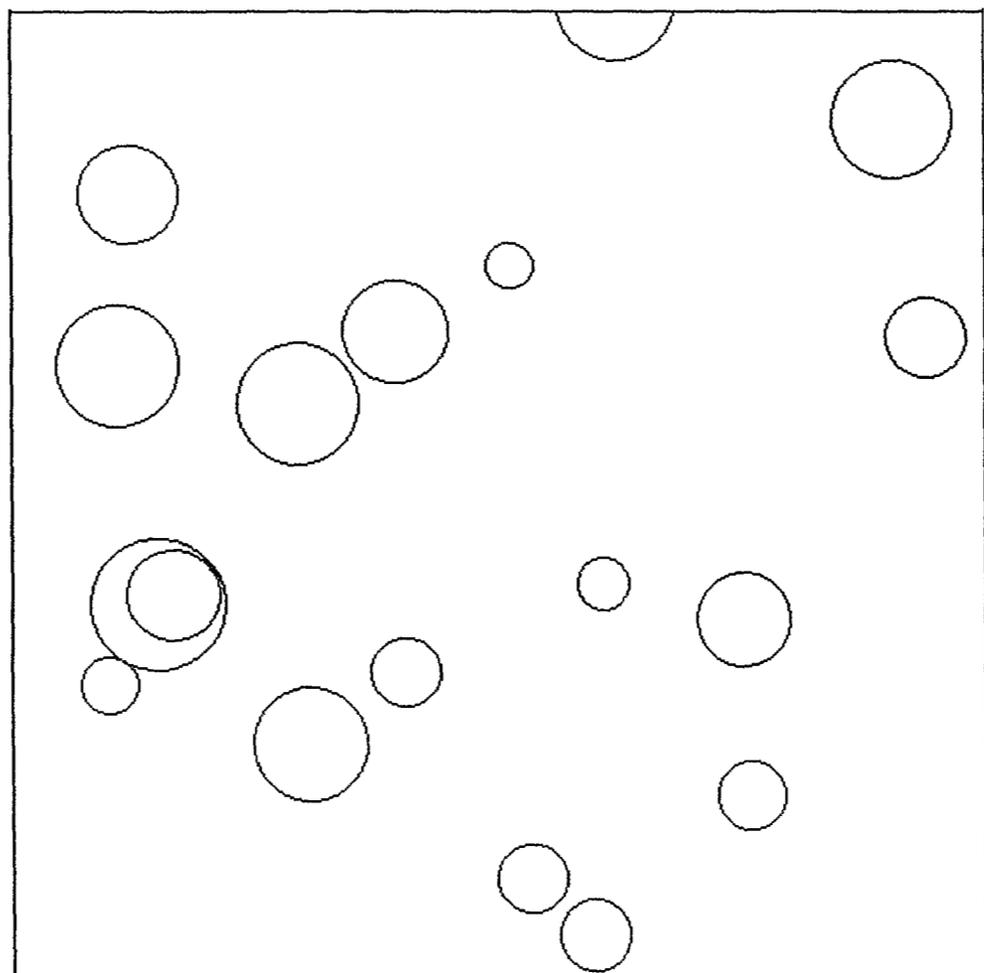


Figure 15.- Représentation par des cercles des structures détectées pour une occurrence égale ou supérieure à 2. (cf. Tableau II).

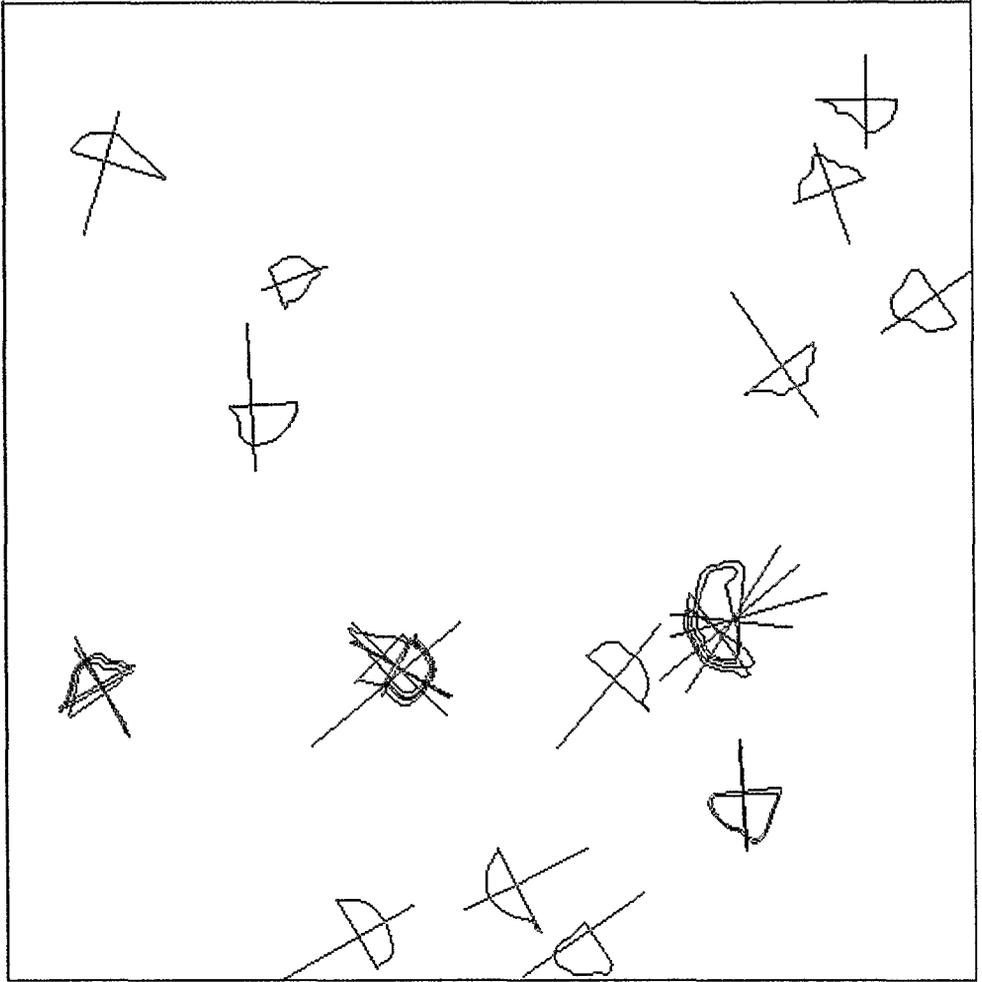


Figure 16.- Exemple d'un choix de l'utilisateur (CI: 33-100; CC: 33-99; DNC: 0-50; PA: 0-25).

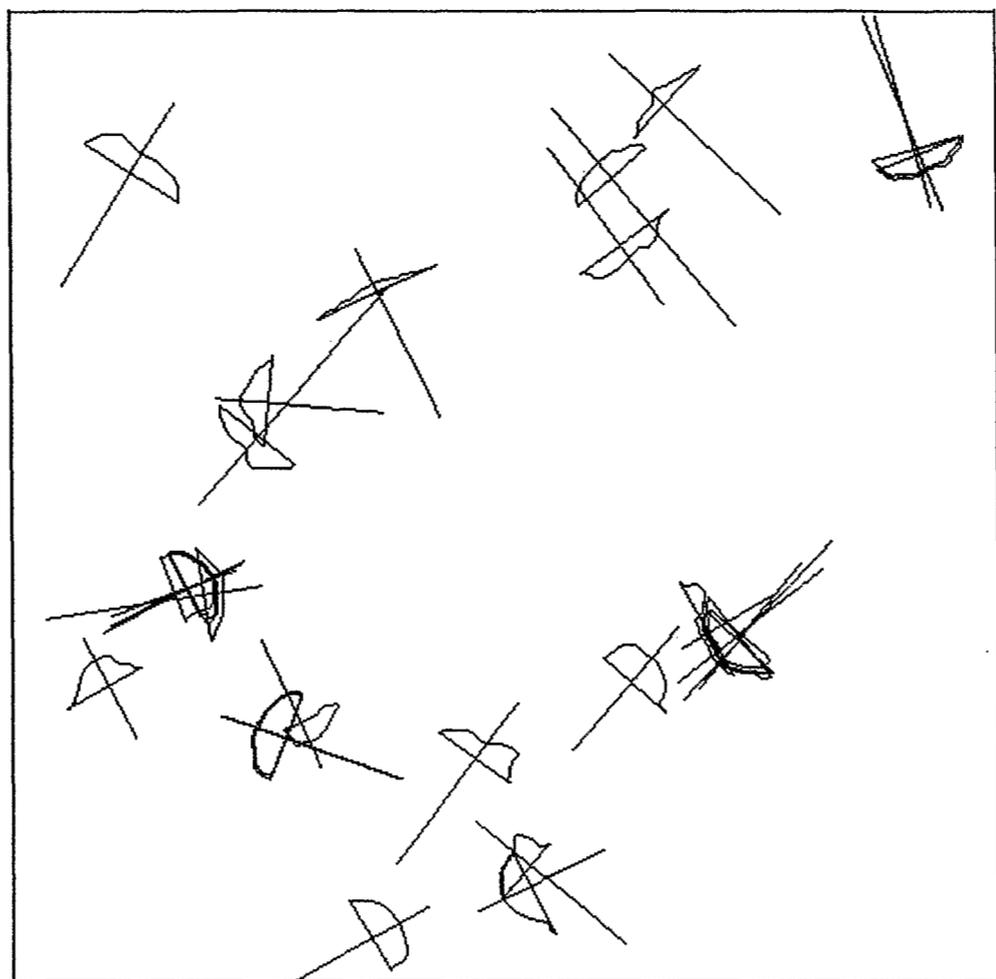


Figure 17.- Classe 6 de l'analyse statistique (CI: 23-70; CC: 8-48; DNC: 0-19).