

Méthodes de décomposition

d'images binaires

appliquées à la trajectographie sous-marine

Binary image decomposition applied to a

submarine sweeping pattern problem



Annick MONTANVERT

Équipe de Reconnaissance des Formes et de Microscopie Quantitative, Laboratoire TIM3, CERMO, BP n° 68, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex.

Diplôme d'Ingénieur de l'École Nationale Supérieure en Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble obtenu en 1984. DEA d'Informatique. Thèse de Doctorat en Informatique en cours. Enseignant à l'UTIL d'Informatique de Grenoble. Travaux de recherche au sein de l'Équipe RFMQ (TIM3) sur la représentation et l'exploitation d'images binaires; plus particulièrement sur les procédés de squelettisation et de codage par axe-médian.



Jean-Marc CHASSERY

Équipe de Reconnaissance des Formes et Microscopie Quantitative, Laboratoire TIM3, CERMO, BP n° 68, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex.

J. M. Chassery est Docteur ès-sciences (1984) et chercheur CNRS au laboratoire TM3 (UA 397). Depuis 1976 il a contribué, en collaboration avec des biologistes, à la conception et à l'industrialisation de l'analyseur d'Images microscopiques SAMBA (Système d'Analyses Microscopiques à Balayage Automatique). Ses activités de recherche ont porté sur la représentation discrète des images au niveau topologie et géométrie permettant de caractériser au sens Mathématique les notions de connexité et de convexité discrètes. Son principal domaine d'intérêt concerne le rapprochement des activités Traitement du Signal et des activités Intelligence Artificielle pour l'imagerie; ce rapprochement s'effectuant tant au niveau du formalisme qu'à celui des outils algorithmique utilisés. Dans ce cadre, différentes réalisations ont été effectuées associant ces disciplines pour des problèmes de diagnostic médical ou plus généralement dans un cadre d'utilisation de postes graphiques couleur pour l'EAO en imagerie.

Christian CHARLES

GEMONOD, Centre IFREMER DE TOULON, BP n° 330, 83507 LA-SEYNE-SUR-MER CEDEX.

École Centrale des Arts et Manufactures de Paris (1968). Master of Science Electrical Engineering. Terminaux pour calculations aux USA puis au CNEXO, successivement : développement des systèmes d'exploration nodules, structures en mer, épaves. Entré à GEMONOD en 1983 en qualité d'Adjoint au Chef de Projet : développement des systèmes de ramassage nodules.

RÉSUMÉ

Cet article illustre différentes méthodes géométriques de décomposition d'images binaires d'architecture complexe. La décomposition est effectuée à l'aide de structures dans un environnement de graphe d'interprétation.

L'application concernée traite de la trajectographie d'un robot sous-marin pour lequel différentes stratégies d'exploration ont été mises en œuvre et paramétrées.

MOTS CLÉS

Géométrie, décomposition de forme, partitionnement, trajectographie.

SUMMARY

This paper describes geometrical methods of binary image decomposition. These images are characterized by a complex architecture and the proposed method uses a graph environment to connect elementary structures.

The application concerns the elaboration of the trajectory of a mining system for the industrial recovery of nodules. Different sweeping patterns are proposed in illustrations.

KEY WORDS

Geometry, partitioning, shape decomposition, trajectography.

I. Introduction

L'interprétation des images binaires se situe essentiellement sur la caractérisation morphologique des éléments à analyser. Dans le cas de l'analyse de structures dont la complexité est qualifiable de simple (figures situées sur un fond homogène) on a recours à des techniques de représentation par approximation approchée soit au niveau du contour de la figure, soit au niveau de l'ensemble des points composant la figure (par exemple enveloppe convexe). Dans le cas de l'analyse d'architectures, la complexité est liée à la présence de structures dans l'image et à l'existence d'un schéma de répartition entre ces structures. Dans

ce cas on a recours à des processus hiérarchisés de décomposition permettant d'associer à l'image initiale un ensemble de structures de moindre complexité et ceci dans un environnement de graphe.

Ce papier a pour but d'illustrer ces méthodes sur une application pratique devant déboucher sur la définition de la trajectoire d'un robot sous-marin dans un environnement accidenté.

Une première partie sera consacrée à la formulation du problème suivie de la présentation des méthodes utilisées.

Une deuxième partie illustrera les résultats obtenus pour l'application de ramassage de nodules polymétalliques.

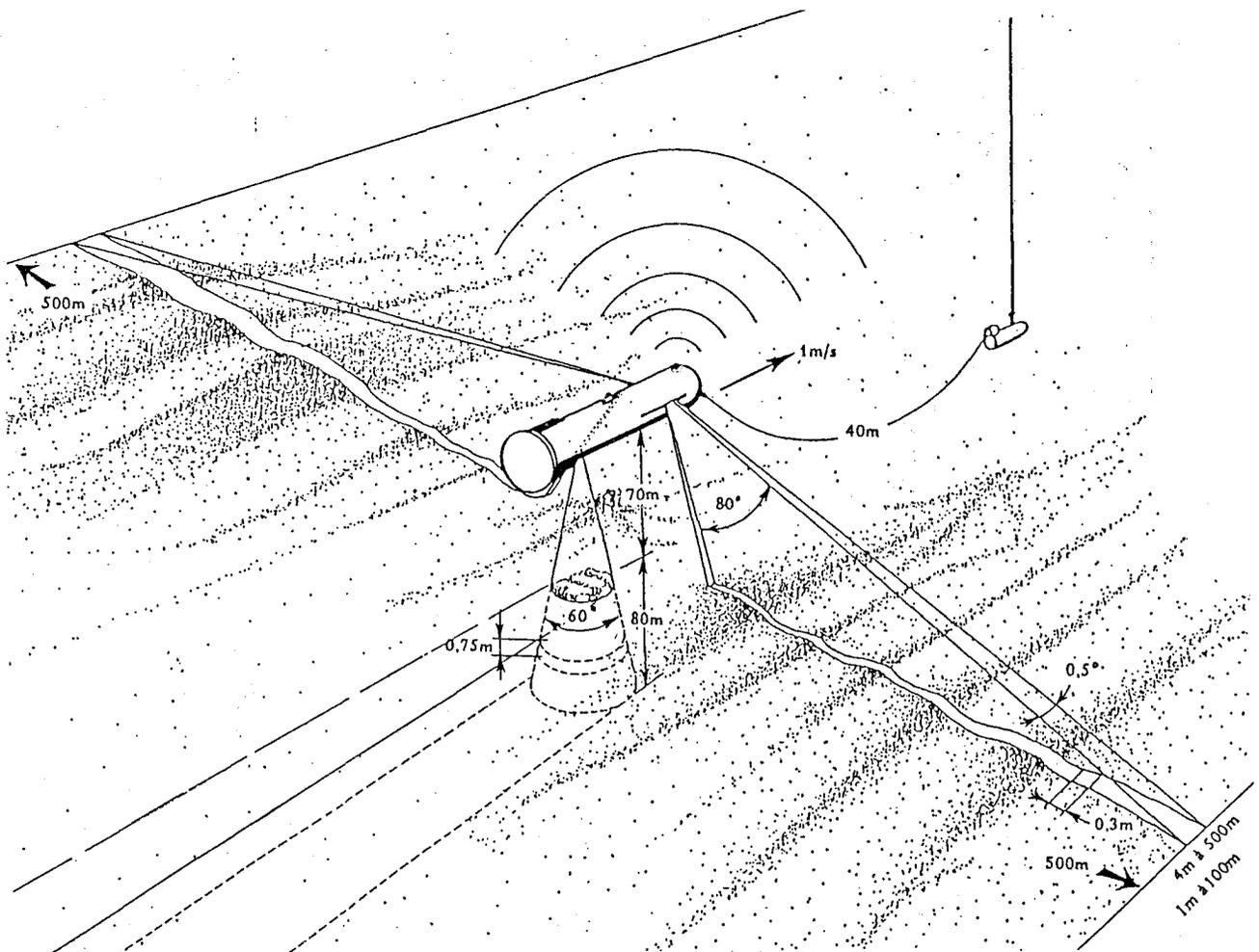


Fig. 1. — Système sonar SAR de relevé de données bathymétriques.

II. Exploitation de sites miniers de nodules polymétalliques

Une cartographie de certaines zones sous-marines a été effectuée durant diverses campagnes d'exploration à l'aide de matériels tels que *Sea-Beam*, *Raie*, *Epaulard* et plus récemment le système SAR [1] (fig. 1).

Les données bathymétriques obtenues permettent d'avoir la carte de relief du fond marin. Cette carte doit être exploitée pour définir la trajectoire d'un robot dont la fonction est de ramener des nodules polymétalliques à l'aide d'un système d'aspiration vers un bateau de surface.

L'ensemble, robot et bateau de surface, est construit de manière à réagir sans dommage à un arrêt brutal du robot, à pouvoir effectuer des demi-tours et à autoriser le robot à effectuer de légères déviations latérales sans perturber la trajectoire du bateau de surface (fig. 2).

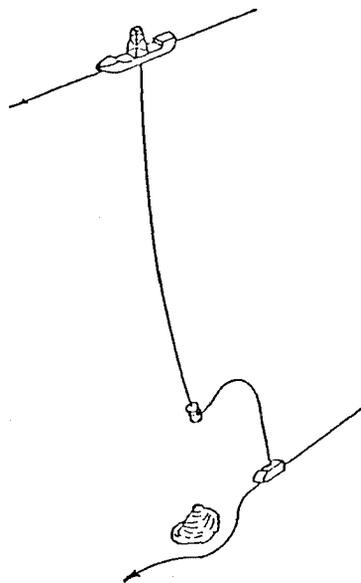


Fig. 2. — Système de ramassage : bateau de surface, flexible, buffer de stockage de nodules, robot sous-marin autopropulsé.

L'information topographique permet de définir des zones accessibles pour le robot. Une telle définition prend en compte l'information de pente et on ne conserve que les zones dont la pente ne présente pas de danger pour le déplacement du robot. On récupère, par ce procédé, une image binaire où chaque point représente une zone au sol de 50 m × 100 m.

La carte que nous présentons en illustration en figure 3 fait 200 × 200 points et code une zone de 10 × 20 km.

Sachant que le complexe, robot et bateau de surface, se déplace à la vitesse de 0,5 m/s et explore le fond sur une largeur de 15 m, une telle carte correspond alors à une campagne d'exploration d'une durée de l'ordre de 6 mois.

Au niveau du cahier des charges la réalisation d'un planning de trajectoire doit prendre en compte les



Fig. 3. — Cartographie binaire du fond marin. Les zones de fort relief sont représentées en noir. Les zones accessibles au robot sont représentées en blanc.

critères suivants :

- ramener le plus de nodules possibles; pour cela il faudra explorer le maximum de surface sans passer sur des zones déjà parcourues;

- découper en régions la carte initiale plutôt que de parcourir la zone cartographiée de part en part. Pour parfaire cet objectif nous avons introduit la notion de structure région permettant d'obtenir un partitionnement de l'image.

Ces critères sont accompagnés de contraintes dont la première est de minimiser les passages multiples sur des zones déjà parcourues. Une seconde contrainte est liée directement à la manœuvrabilité du bateau de surface.

C'est essentiellement au niveau de l'exploration des structures régions que cette contrainte sera prise en compte lorsqu'il s'agira de représenter la trajectoire au sein d'une région.

Face à ce problème et à ces contraintes nous allons utiliser des méthodes géométriques de caractérisation de forme tant au niveau analyse d'architecture (avec des outils de décomposition) qu'au niveau analyse de structure (avec des outils de représentation) [2].

Afin de passer de l'image initiale à la phase interprétation devant déboucher sur la description paramétrée d'une politique de trajectographie, nous avons conçu trois phases :

- filtrage et représentation par ligne médiane;
- partitionnement en plages d'exploration et construction d'un graphe d'adjacence;
- exploration de chaque plage.

III. Filtrage et représentation par ligne médiane

III.1. FILTRAGE

Un prétraitement est effectué sur l'image initiale afin d'éliminer les petits obstacles de la zone à fort relief. La caractérisation des petits obstacles est liée à la prise en compte de l'autonomie prévue pour le robot vis-à-vis du bateau de surface. Cette élimination est momentanée en ce sens que la présence des obstacles ainsi éliminés sera prise en compte lors de la trajectoire proprement dite par le robot sous-marin, alors que le bateau de surface n'aura pas à modifier sa trajectoire. De plus, on associe à chaque « petit obstacle » son rectangle d'encadrement qui sera utilisé pour la manœuvre de contournement du robot.

Une seconde étape du filtrage consiste à supprimer les régions non accessibles de la zone explorable du fait qu'elles sont entourées de forts reliefs. Pour cela une analyse en composantes connexes est effectuée sur l'image et on ne retient que la partie de la zone explorable correspondant à la plus grande surface.

En figure 4 on représente une illustration du résultat de cette phase de filtrage.

Au terme de cette étape de filtrage on dispose d'une image binaire dont la classe de points à explorer forme une seule composante connexe. Celle-ci n'est pas simplement connexe; de nombreux îlots de relief subsistent.

Une telle image est qualifiée d'image architecturée et la réduction de sa complexité s'effectue par l'utilisation d'un système de représentation devant permettre d'une part de réduire la quantité de points à traiter, et d'autre part de partitionner le support de l'image à l'aide de procédés de décomposition.

Lorsque l'on se trouve face à un tel problème sans information *a priori* sur le type de structures que l'on désire manipuler au niveau du partitionnement, on peut utiliser un procédé de génération de polygones de Voronoï. A partir de germes placés aléatoirement sur la zone à décomposer (en l'occurrence la zone explorable) on génère des polygones de Voronoï convexes qui sont gérés dans un environnement de graphe permettant pour tout polygone de connaître ses voisins [2, 3].

Dans notre cas, la nature physique associée au problème posé, qui est ici le relief sous-marin, se traduit par la présence d'une orientation privilégiée des structures de relief (à savoir une orientation verticale N/S qui apparaît sur les images présentées). Afin d'exploiter au mieux cette donnée, nous nous sommes intéressés à des méthodes de squelettisation [2, 4].

Un autre choix qui aurait pu être fait est d'utiliser un partitionnement en rectangles, où chaque rectangle définit une plage d'exploration et où le passage d'une phase à la suivante est conditionné par l'adjacence entre rectangles [2, 5].

Au niveau de chaque plage la méthode d'exploration est alors triviale (exploration en méandres). Mais compte tenu de la complexité des contours de la zone à explorer, cette approche a pour inconvénient de nécessiter l'introduction d'un grand nombre de rectangles, pour lesquels le graphe de passage d'un rectangle à un autre ne se serait pas avéré aussi simple à exploiter.

Avec la méthode de représentation par ligne médiane, nous allons voir comment seront résolus simultanément le problème de définition de plages et le problème de construction d'un graphe de passage d'une plage à une autre.

III.2. REPRÉSENTATION PAR LIGNE MÉDIANE

Ce paragraphe constitue un résumé de présentation de la transformation ligne médiane qui présente les avantages suivants :

- conservation des propriétés topologiques de connexité;
- réversibilité de la transformation permettant de revenir à la représentation binaire.

Dans le domaine continu R^2 , Harry Blum est l'instigateur d'une telle méthode avec la transformation en axe médian, se fondant sur l'évolution d'une onde initialisée sur la frontière de l'objet et se propageant à l'intérieur de celui-ci. L'axe médian est alors défini par les points de rencontre de ce front d'onde [6].

Dans le domaine discret utilisant la métrique d_∞ définie par :

$$d_\infty(P, Q) = \text{Max}(|I_P - I_Q|, |J_P - J_Q|),$$

la construction de l'axe médian discret se fonde sur le calcul de courbes de niveau sur l'image. A chaque point de la zone à étudier, on associe sa distance minimale d_∞ au fond (en l'occurrence la zone de relief pour ce problème). L'axe médian discret est extrait par localisation des maximums locaux sur cette représentation en courbes de niveau (fig. 5).

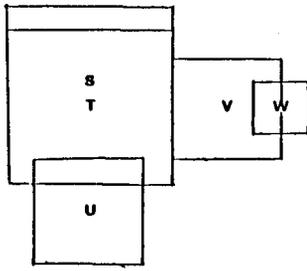
Avec cette transcription au niveau discret, il s'est avéré que, si la transformation en axe médian est réversible, elle ne satisfait pas nécessairement la condition d'homotopie (conservation des propriétés topologiques de connexion).

C'est ainsi qu'il a été nécessaire de définir l'opérateur « ligne médiane » permettant de connecter les maximums locaux de l'axe médian à l'aide de chemins discrets (ou arcs) centrés dans la forme.

Pour cela, des travaux récents ont permis d'élaborer des algorithmes performants (au niveau du nombre de passages sur l'image) [7, 8].

La méthode utilisée procède en deux phases :

- une phase de recherche de l'axe médian et d'initialisation des chemins de connexion par caractérisation de points d'initialisation;



L'objet dessiné ici peut être défini par les seuls points S, T, U, V, W avec les rayons 3, 3, 2, 2, 1.

1	1	1	1	1	1	1			
1	2	2	2	2	2	1			
1	2	3	3	3	2	1	1	1	1
1	2	3	<u>4</u>	3	2	2	2	2	1
1	2	3	<u>4</u>	3	3	3	<u>3</u>	<u>3</u>	2
1	2	3	3	3	2	2	2	2	1
1	2	2	<u>3</u>	2	2	1	1	1	1
1	1	2	<u>3</u>	2	1	1			
		1	2	2	1				
		1	1	1	1				

La construction de courbes de niveaux sur la forme suivie de l'extraction des seuls maxima locaux (soulignés ici), permet de ne conserver qu'un nombre restreint de points (associés au rayon de la boule). Cet ensemble définit l'axe médian discret et contient les points S, T, U, V, W nécessaires à la réversibilité.

Fig. 5. — Illustration de l'élaboration de l'axe médian par l'intermédiaire de la construction de courbes de niveaux.

— une phase de construction de chemins de connexion à partir des points d'initialisation et ceci orthogonalement aux courbes de niveau.

En figure 6 on présente une illustration de la ligne médiane calculée sur la zone explorable.

IV. Représentation « graphe ». Partitionnement en plages

A partir de la ligne médiane, un graphe est constitué, dont les nœuds sont associés aux points de l'axe médian (composantes connexes de maximums locaux) et dont les arcs sont associés aux chemins de connexion [9].

De plus ce graphe est orienté, permettant ainsi d'affecter les nœuds à différentes classes (composantes principales, proéminences, rétrécissements) en fonction des configurations des arcs qui leur sont incidents. Chaque nœud du graphe code une composante de surface de la forme initiale. On distingue les classes suivantes :

- Une composante principale correspond à un nœud ne possédant aucun arc sortant.
- Une composante de proéminence se caractérise par un nœud connecté à une unique composante principale à partir de son arc sortant.
- Un rétrécissement se caractérise par un nœud possédant au moins deux arcs sortant dirigés vers des composantes principales distinctes.

Un tel graphe n'est pas directement exploitable pour le problème posé et on en déduit un graphe de représentation de la zone explorable en plages d'exploration et chemins de passages entre plages.

Pour cela, à chaque passage principal du graphe précédemment décrit, on associe les nœuds de proéminence qui lui sont connectés.

On obtient alors un graphe (non orienté) dont les nœuds associés aux nœuds principaux seront appelés nœuds de plage et dont les arêtes sont définies par les nœuds de rétrécissement qui établissent des connexions entre nœuds de plage. Ce graphe permet d'avoir une vue plus synthétique de l'architecture de la zone explorable; une illustration est fournie en figure 7.

Lorsque l'on applique la réversibilité à un nœud de plage, on reconstitue une région connexe de la zone explorable sous la forme d'un polygone dont les côtés sont de directions verticale ou horizontale (fig. 7).

C'est sur la base d'une telle décomposition en plages complétée du graphe de passage inter plages que s'appuie la phase d'interprétation de la zone explorable en structures plus simples, à l'intérieur de chacune desquelles il faut définir une trajectoire du robot sachant que l'on dispose de points d'entrée et de sortie pour chaque plage.

Au niveau réalisation, l'outil fourni à l'utilisateur est intégré à un poste de travail graphique lui permettant de sélectionner une suite de plages à explorer, ceci sous contrôle du graphe d'adjacence entre les plages et moyennant des informations de rentabilité du balayage de chaque plage. La rentabilité peut être vue comme dérivant de paramètres tels la surface de la plage, sa forme (son élongation), ou la concentration locale de nodules (la mesure de cette donnée est encore mal maîtrisée).

V. Exploration des plages. Trajectoires

Le problème posé à ce niveau concerne l'analyse des structures définies sous le terme de plage.

Il faut aboutir à la définition de la trajectoire du robot au sein d'une plage avec les contraintes relatives au système de ramassage.

Prenant en compte la contrainte principale, à savoir la manœuvrabilité du système, deux stratégies extrêmes ont été définies :

- stratégie d'exploration selon des trajectoires rectilignes entrecoupées de manœuvres de demi-tours;
- stratégie d'exploration « en spirale » avec la prise en compte d'un rayon de giration minimal.

Chacune de ces stratégies utilise des méthodes géométriques d'analyse des plages et leur choix est surtout conditionné par les performances qu'elles procurent au niveau des temps d'exploration, des surfaces non explorées, du temps passé en manœuvres...

Nous donnerons des résultats sur ces évaluations de performances après avoir décrit pour chacune des stratégies l'environnement des méthodes géométriques où elle se situe.

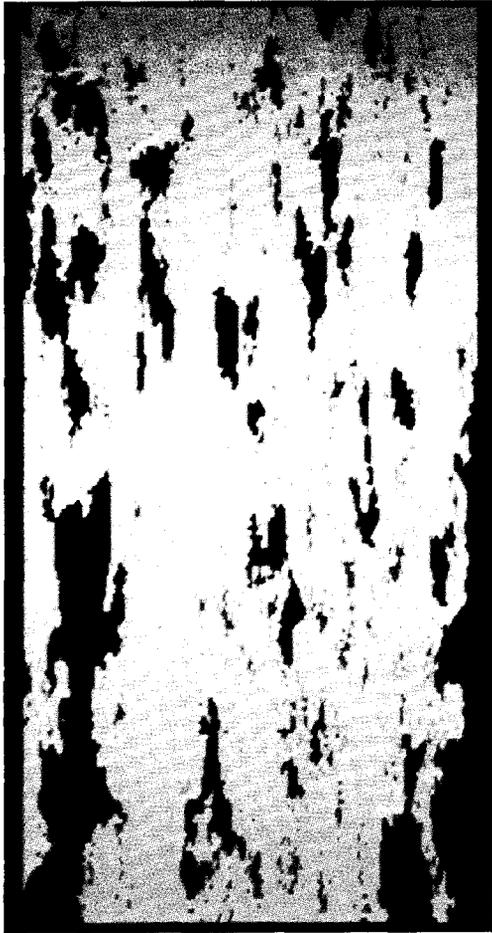
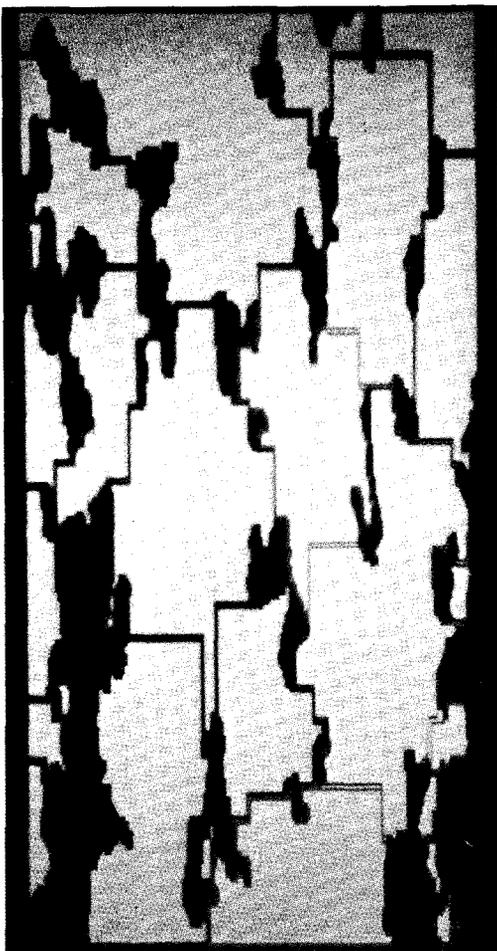


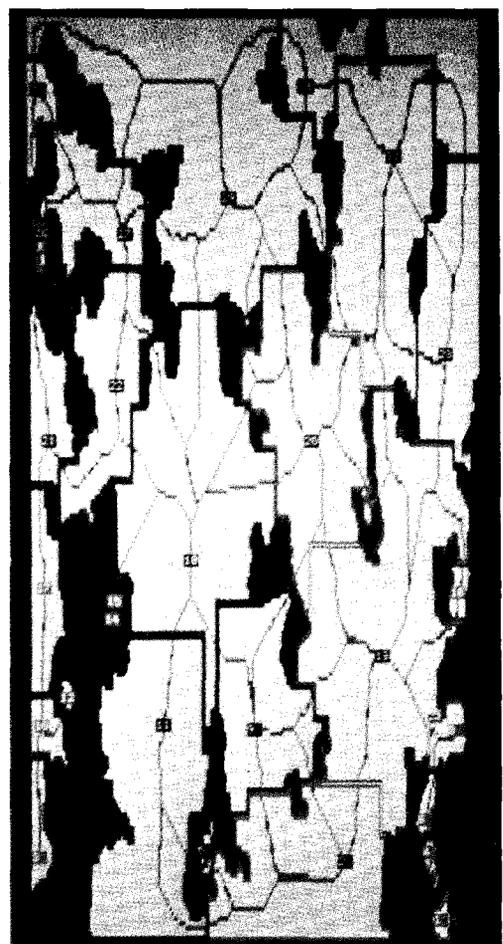
Fig. 4. — Image après filtrage d'élimination des petits obstacles (représentés en rouge) et de suppression des régions non accessibles pour le robot.



Fig. 6. — Superposition de l'image filtrée et de la représentation par ligne médiane de la zone explorable. Chaque couleur correspond à un codage de la valeur numérique du rayon affecté aux boules centrées en chaque point de la ligne médiane.



plages d'exploration



graphe de passage

Fig. 7. — Graphe de passage superposé à la zone explorable. A chaque nœud du graphe est associée une région appelé plage. Les plages forment une partition de la zone explorable.

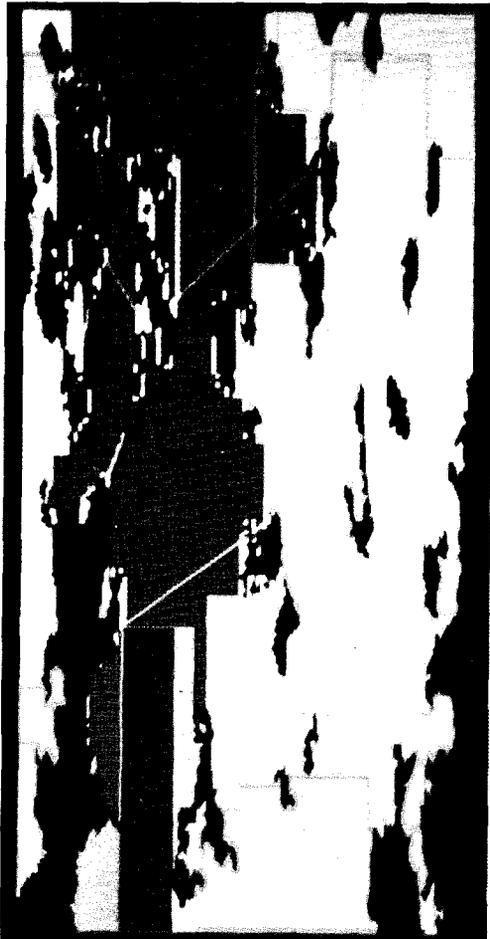


Fig. 9. — Illustration du balayage N/S. La décomposition N/S convexe de la plage en cours de traitement est affichée. Le balayage N/S des plages traitées est visualisé en alterné vert clair et vert foncé. Les plages non sélectionnées à l'aide du graphe de passage sont visualisées en blanc. Les régions des plages non explorées sont visualisées en jaune (la décision de non exploration est associée à un seuil de rentabilité).

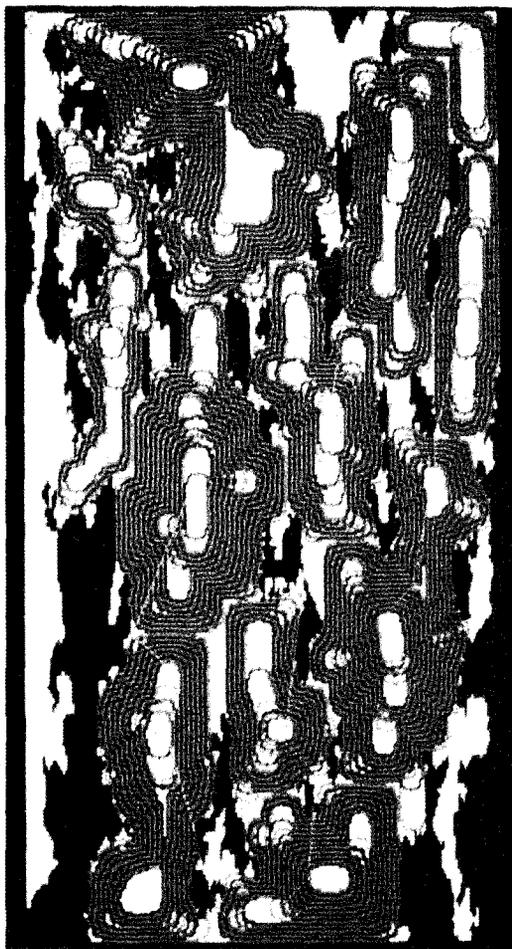


Fig. 11. — Illustration du balayage en spirales avec différents rayons de giration (200 et 500 m). Les traces sont visualisées en alterné vert clair et vert foncé. Les plages non sélectionnées à l'aide du graphe de passage sont visualisées en blanc. Les régions des plages non explorées sont visualisées en jaune. Les passages entre les plages adjacentes sont visualisés en rouge.

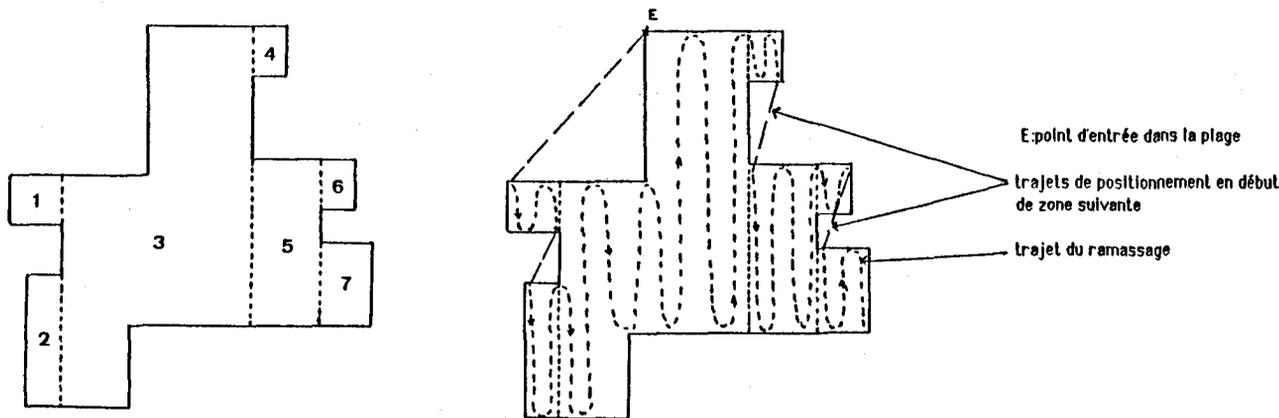


Fig. 8. - Décomposition en zones N/S convexes.

V. 1. STRATÉGIE PAR TRAJECTOIRES RECTILIGNES

Cette stratégie, en accord avec la notion d'orientation privilégiée N/S, consiste à réaliser un balayage systématique par trajectoires N/S et S/N adjacentes. Le passage entre deux trajectoires s'effectue par un demi-tour.

Cette stratégie s'applique trivialement dans le cas d'un rectangle. Par contre, dans le cas ici présent il est nécessaire de mettre en œuvre un procédé d'interprétation de la géométrie de la plage. Du fait que cette stratégie est facilement applicable à une région verticalement (N/S) convexe, on réalise la décomposition des plages sous cette contrainte géométrique.

Une plage est alors représentée par la juxtaposition d'éléments verticalement convexes (fig. 8). Les éléments de décomposition qu'il n'est pas rentable d'explorer sont supprimés (trop de demi-tours par rapport à la surface). La stratégie de balayage globale de la plage est déduite de la structure inter-éléments résultante.

A ce niveau, des paramètres contraignant la trajectoire peuvent être introduits, tel la longueur minimale d'une trajectoire rectiligne.

En figure 9, on illustre la trace des trajectoires obtenues selon cette stratégie sur les plages sélectionnées de la zone exploitable.

V. 2. STRATÉGIE PAR TRAJECTOIRES « SPIRALE »

L'inconvénient majeur de la précédente stratégie concerne les manœuvres de demi-tours. Aussi avec la stratégie par trajectoires « spirale » un rayon de giration est fixé en dessus duquel il n'est pas nécessaire de ralentir le système de ramassage.

La méthode consiste à « peler » progressivement le bord de la plage en décrivant une « spirale ».

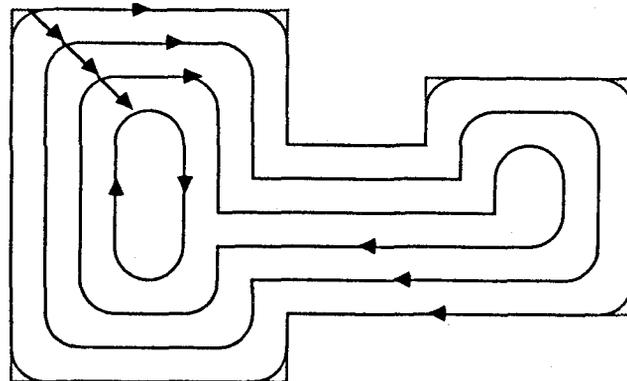


Fig. 10. - Illustration de la décomposition par utilisation d'un élément structurant circulaire pour la stratégie d'exploration en spirales.

TABLEAU I

Exemples de résultats paramétriques évalués pour chaque stratégie d'exploration en fonction de différents seuils d'entrée (rentabilité de surface ou rayon de giration).

Stratégie de balayage	Nord-Sud (200,80,20)	Nord-Sud (200,80,50)	Pelage (200,100)	Pelage (200,200)	Pelage (200,500)
Nombre de demi tours ou spirales . .	1 941	1 146	723	636	384
Ig moy. sans demi tour ou spirale . . .	3	5	10	10	10
Nombre de jours de ramassage	182	140	173	155	98
Surface ramassée/surface totale	62%	48%	62%	55%	35%
Surface ramassée/surface exploitable .	82%	63%	81%	73%	46%
Surface ramassée/surface indiquée . . .	91%	70%	90%	81%	51%
Surface de petits obstacles parcourue	3 020	2 058	3 033	2 808	1 873
Nombre total de kilomètres parcourus .	7 592	5 901	7 497	6 721	4 254

Pour cela, après chaque tour d'exploration, le contour de la portion de plage restant à explorer est lissé en fonction du rayon de giration.

Une telle opération est effectuée à l'aide de méthodes géométriques de morphologie utilisant un élément structurant circulaire (fig. 10).

L'exécution de cette stratégie nécessite une modification permanente de la trajectoire et se traduit par la perte importante de surface explorable.

En figure 11 on présente une illustration de la trace des trajectoires obtenues suivant cette stratégie sur les plages sélectionnées de la zone explorable.

V. 3. ÉVALUATION PARAMÉTRIQUE DES STRATÉGIES PRÉSENTÉES

Différents paramètres ont été évalués permettant de quantifier la rentabilité d'une stratégie d'exploration. Un exemple d'évaluation de ces paramètres est présenté au tableau I. Les paramètres sont associés à des critères de surface explorée, vitesse de ramassage et complexité de manœuvrabilité. C'est à partir de tels résultats qu'un choix de stratégie peut être effectué.

VI. Conclusion

Ce domaine d'application illustre comment, face à un problème d'analyse d'architecture d'une image binaire, une approche par décomposition hiérarchique à deux niveaux permet d'avoir une interprétation de l'image et de ses constituants.

Les méthodes géométriques employées sont spécifiques du niveau auquel on se trouve et nous avons pu constater que l'apport d'un support graphe est essentiel pour manipuler les structures à un même niveau.

Les différentes méthodes utilisées ont été empruntées à différents domaines de la géométrie discrète avec par exemple la morphologie, le changement de représentation ainsi que l'analyse en éléments convexes.

L'outil développé est actuellement opérationnel et une étude paramétrique a été effectuée, permettant d'évaluer la performance de la trajectoire (surface ramassée, temps de ramassage...) en fonction de la variation des paramètres d'entrée (seuil de pente, seuil de surface des petits obstacles, seuil de rentabilité de surface d'une zone explorable).

Manuscrit reçu le 19 décembre 1986.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. CHARLES, J. M. CHASSERY, A. MONTANVERT et J. F. DESNOS, Application of image analysis to the determination of the possible sweeping patterns of manganese recovery system, *Offshore Technology Conference*, Houston, May 1987.
- [2] A. MONTANVERT et J. M. CHASSERY, Architecture d'images discrètes binaires : outils géométriques, *Revue Traitement du Signal*, numéro spécial Vision par ordinateur.
- [3] N. AHUJA, B. AH et B. SCHACHTER, Image representation using Voronoï Tesselation, *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 29, 1985, p. 286-295.
- [4] A. ROSENFELD et J. L. PFALTZ, Computer representation of planar regions by their skeletons, *Com. of ACM*, 10, n° 2, 1967, p. 119-125.
- [5] L. FERRARI, P. V. SANKAR et J. SKANSKY, Minimal rectangular partitions of digitized blobs, *5th International Conference on Pattern Recognition*, p. 1040-1043. Miami, 1980.
- [6] H. BLUM, A transformation for extracting new descriptors of shape, *Symp. on models for perception of speech and visual form*, MIT Press, 1967.
- [7] A. MONTANVERT, Obtention d'une ligne médiane par connexion de l'axe médian, *5^e congrès Recon. des Formes et Intelligence Artificielle*, Grenoble, 1985, p. 777-785.
- [8] C. ARCELLI et G. SANNITI DI BAJA, Medial line and figure analysis, *5th International Conference on Pattern Recognition*, Miami, 1980, p. 1016-1018.
- [9] A. MONTANVERT, Medial line: graph representation and shape description, *8th ICPR*, Paris, 1986, p. 430-432.