

UNIVERSITE DE MONTREAL

Un algorithme pour la planification de la
cueillette automatique de champignons

par

René BASTIEN

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

ECOLE POLYTECHNIQUE

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE MAITRE ES SCIENCE APPLIQUEE (M.Sc.A.)

Août 1989

© René Bastien 1989

UNIVERSITE DE MONTREAL

ECOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

Un algorithme pour la planification de la
cueillette automatique de champignons

présenté par: M. René Bastien

en vue de l'obtention du grade de: M.Sc.A.

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. Clément Fortin, Ph.D., président

M. Luc Baron, M.Sc.A.

M. Roman Baldur, M.Sc.A.

SOMMAIRE

Un algorithme pour la planification de la cueillette automatique de champignons

Le mémoire présente les résultats sur l'expérimentation d'un algorithme pour la planification de la cueillette automatique de champignons. L'algorithme se compose de trois parties. La première partie traite l'image des champignons pour extraire les formes des champignons à cueillir. La seconde partie localise chaque champignon à cueillir. Et la troisième partie fait l'ordonnancement des champignons à cueillir pour déterminer le parcours minimum entre eux. Les résultats montrent que la performance de l'algorithme dépend principalement de la dimension de l'opérateur utilisé pour extraire de l'image les contours des champignons. La performance dépend aussi des trois paramètres suivants: l'éclairage, qui doit permettre de définir les contours entre champignons sans créer d'ombrages; la dimension de l'opérateur utilisé pour extraire les contours, plus elle est grande, plus l'algorithme est fiable; la forme de l'opérateur utilisé pour le traitement morphologique de l'image. Les temps d'exécutions obtenus nous permettent de croire qu'avec des équipements adéquats, l'algorithme pourrait être utilisé, en temps réel, pour planifier la cueillette automatique de champignons. Bien

que l'algorithme soit conçu spécifiquement pour les champignons, il pourrait être adapté pour planifier la saisie d'autres pièces.

ABSTRACT

ALGORITHM FOR THE PLANNING OF AUTOMATIC MUSHROOM HARVESTING

The thesis presents the results of experiments regarding an algorithm for the planning of automatic mushroom harvesting. The algorithm uses a picture of the mushrooms to be harvested as an input and can be subdivided into three main parts. The first part is a texture edge detection module and a region growing module. The second part locates the center of gravity of each mushroom to be picked. The final part is an approximative algorithm that solves the Traveling Salesman Problem applied to mushroom harvesting. Results show that the most important parameter is the size of the neighborhood used to compute abrupt changes in average gray level. Moreover, results show that the algorithm can be used in real time to plan the automatic mushroom harvest if sufficient processing power is available.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à mon directeur de recherche M. Roman Baldur, professeur titulaire à l'Ecole Polytechnique de Montréal, pour les conseils qu'il m'a prodigués ainsi que pour son support financier.

Je remercie aussi M. Luc Baron, chargé d'enseignement à l'Ecole Polytechnique de Montréal, pour sa collaboration et sa disponibilité sans égale tout au long du projet.

Enfin, je désire exprimer ma vive reconnaissance envers mon conjoint pour sa confiance, ses encouragements et sa collaboration à ce projet.

TABLE DES MATIERES

	Page
Sommaire.....	iv
Abstract	vi
Remerciements	vii
Liste des tableaux	xiii
Liste des figures	xiv
 CHAPITRE 1 - INTRODUCTION	 1
1.1 L'automatisation de la cueillette de champignons	2
1.2 Les technologies agricoles en développement	4
1.3 But du projet	9
1.4 Organisation du mémoire	10
 CHAPITRE 2 - REVUE DES METHODES DE CUEILLETTE DE CHAMPIGNONS	 12
2.1 Revue des méthodes de cueillette de champignons ...	12
2.1.1 Quand doit-on cueillir un champignon?	12
2.1.2 Cueillette manuelle	14
2.1.3 Cueillette mécanique	19
2.1.4 Cueillette automatique	25

2.2 Modèle pour la cueillette automatique de champignons	27
2.2.1 Méthode de production pour la cueillette automatique	28
2.2.2 Méthodes de cueillette automatique de champignons	30
2.2.2.1 Cueillette en parallèle	30
2.2.2.2 Cueillette séquentielle	33
2.3 Conclusion	35
 CHAPITRE 3 - TRAITEMENT D'IMAGE ET EVALUATION DE LA MATURITE DES CHAMPIGNONS	 36
3.1 Détection des contours	38
3.1.1 Méthode générale de détection des contours ..	39
3.1.2 Construction de contours noirs	46
3.2 Traitement morphologique de l'image	47
3.2.1 Les opérateurs morphologiques	48
3.2.1.1 La dilatation	49
3.2.2 Evaluation de la maturité des champignons ...	52
3.3 Binarisation de l'image	55
3.3.1 Description générale	55
3.4 Conclusion	56

	x
	Page
CHAPITRE 4 - LOCALISATION DES CHAMPIGNONS	57
4.1 Localisation d'un champignon	57
4.1.1 Calcul du centroïde d'une surface	58
4.2 Elimination du champignon localisé	58
4.3 Conclusion	59
CHAPITRE 5 - METHODES POUR SOLUTIONNER LE PROBLEME DE L'ORDONNANCEMENT DES DEPLACEMENTS POUR LA CUEILLETTE AUTOMATIQUE DE CHAMPIGNONS	60
5.1 Description du problème du commis voyageur	61
5.2 Formulation générale du problème du commis voyageur	61
5.3 Revue des méthodes de solution actuelles	63
5.3.1 Méthodes optimales	64
5.3.2 Heuristiques de construction de tours	65
5.3.3 Heuristiques d'amélioration de tours	69
5.3.4 Heuristiques hybrides	70
5.4 Choix d'un algorithme d'ordonnancement	71
5.5 Algorithme Farthest Insertion	72
5.6 Discussion et conclusion	74

CHAPITRE 6 - EXPERIMENTATION	76
6.1 Programme expérimental	76
6.1.1 Module de détection des contours	77
6.1.2 Module de traitement morphologique	78
6.1.3 Module d'ordonnancement des déplacements	80
6.1.4 Algorithme de planification de la cueillette de champignons	81
6.2 Description des modules de l'algorithme de planification	81
6.2.1 Modules de base	81
6.2.2 Module de calibration du système de vision ..	82
6.2.3 Algorithme de planification de la cueillette	83
6.2.4 Module de détection des contours	84
6.2.5 Module de traitement morphologique	85
6.2.6 Module de binarisation de l'image	88
6.2.7 Module de localisation des champignons	89
6.2.8 Module d'ordonnancement des déplacements	91
6.3 Banc d'essai	92

CHAPITRE 7 - RESULTATS ET DISCUSSION	94
7.1 Module de détection des contours	94
7.2 Module de traitement morphologique des régions noires	97
7.3 Module d'ordonnancement des déplacements	101
7.4 Algorithme de planification de la cueillette automatique de champignons	103
CHAPITRE 8 - CONCLUSION	108
Bibliographie	110
Annexe A - Classification des champignons cultivés	115
Annexe B - Revue des méthodes de production de champignons	124
Annexe C - Détection des contours par la méthode de Rosenfeld et Kak	137
Annexe D - Image digitale	140
Annexe E - Résultats expérimentaux qualitatifs	142

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 5.1 - Pourcentage au-delà de la solution optimale. Méthodes de construction de tours. Etude de Golden et Ass	68
Tableau 5.2 - Pourcentage au-delà de la solution optimale. Méthodes de construction de tours. Etude de Adrabinski et Syslo	69
Tableau 5.3 - Pourcentage au-delà de la solution optimale. Méthodes d'amélioration de tours	70

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1 - Cueillette manuelle - Coupe des troncs ..	18
Figure 2.2 - Machine pour la cueillette mécanique de champignons	21
Figure 2.3 - Machine pour la cueillette mécanique sur le lit de culture	22
Figure 2.4 - Machine pour la cueillette mécanique avec courroie transversale	22
Figure 2.5 - Machine pour la cueillette mécanique déposant les champignons cueillis sur un filet de nylon	23
Figure 3.1 - Masque horizontal	40
Figure 3.2 - Exemple de masque horizontal	41
Figure 3.3 - Masque incliné	42
Figure 3.4 - Différents cas de calcul de la "différence"	44
Figure 3.5 - Masques horizontaux	45
Figure 3.6 - Exemple de croissance de régions noires .	48
Figure 3.7 - Exemple d'un élément structurant (croix) et d'une image	50
Figure 3.8 - Domaine modifié de l'image de la figure 3.7	51
Figure 3.9 - Image dilatée de la figure 3.7	53
Figure 6.1 - Organigramme de l'algorithme de planification de la cueillette automatique de champignons	83
Figure 6.2 - Organigramme du module de détection des contours	84

Figure 6.3	- Organigramme du module de traitement morphologique. Elément structurant: croix	87
Figure 6.4	- Organigramme du module de traitement morphologique. Elément structurant: carré	88
Figure 6.5	- Organigramme du module de binarisation de l'image	89
Figure 6.6	- Organigramme du module de localisation des champignons	91
Figure 6.7	- Système de vision	93
Figure 7.1	- Résultats. Module de détection des contours	96
Figure 7.2	- Exemple de sur-dilatation	99
Figure 7.3	- Résultats. Module de traitement morphologique	100
Figure 7.4	- Résultats. Module d'ordonnancement des déplacements	102
Figure 7.5	- Résultats. Algorithme de planification de la cueillette automatique de champignons	105
Figure 7.6	- Proportion du temps d'exécution par module pour un masque ayant des voisinages de dimensions 3X3	106
Figure 7.7	- Proportion du temps d'exécution par module pour un masque ayant des voisinages de dimensions 5X5	107
Figure A.1	- Anatomie d'un champignon de couche	117
Figure A.2	- Champignons de couche à divers stades de croissance	118
Figure A.3	- Champignons de couche matures dans un lit de culture	119
Figure A.4	- Champignons de couche cueillis	120

Figure A.5	- Champignons de couche - Vue en coupe	120
Figure A.6	- Pleurotus	121
Figure A.7	- Lentinus	122
Figure A.8	- Volvariella	123
Figure B.1	- Poussée	126
Figure B.2	- Cycle de poussées	129
Figure B.3	- Champignonnière conventionnelle pour le système de production à une zone	130
Figure B.4	- Lits de culture	131
Figure B.5	- Aménagement d'une champignonnière pour un système de production à deux zones ...	135
Figure B.6	- Aménagement d'une chambre de production d'un système à deux zones	135
Figure B.7	- Chambre de production d'un système de production à deux zones	136
Figure B.8	- Caisse de culture	136
Figure E.1	- Série I. Image originale	145
Figure E.2	- Série I. Histogramme de la figure E.1 ...	146
Figure E.3	- Série I. Calcul des différences de la figure E.1	147
Figure E.4	- Série I. Calcul des différences accentuées, en cours	148
Figure E.5	- Série I. Calcul des différences accentuées, résultat final	149
Figure E.6	- Série I. Contours décelés (masque 3X3) ..	150
Figure E.7	- Série I. Dilatation de la figure E.6	151
Figure E.8	- Série I. Histogramme de la figure E.7 ...	152

Figure E.9 - Série I. Binarisation de la figure E.7 ..	153
Figure E.10 - Série II. Image originale	155
Figure E.11 - Série II. Contours décelés (masque 3X3) .	156
Figure E.12 - Série II. Contours décelés (masque 5X5) .	157
Figure E.13 - Série II. Dilatation de la figure E.12 ..	158
Figure E.14 - Série II. Dilatation de la figure E.11 ..	159
Figure E.15 - Série II. Binarisation de la figure E.14	160
Figure E.16 - Série III. Image originale	162
Figure E.17 - Série III. Contours décelés (masque 3X3)	163
Figure E.18 - Série III. Dilatation de la figure E.17 .	164

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Actuellement, la cueillette automatique de fruits et légumes est encore au stade de la recherche en laboratoire. Plusieurs facteurs, propres à la nature, forment des barrières à l'entrée aux technologies de pointe dans le secteur agricole.

Parmi les facteurs les plus importants, on retrouve en ordre décroissant:

- a) la position et l'orientation infiniment variables des plants dans l'espace et dans le temps,
- b) la dimension infiniment variable des plants,
- c) l'environnement peu structuré tel le champ, le climat variable propre aux installations extérieures, le vent, les précipitations,
- d) l'utilisation saisonnière de la machinerie,
- e) la faible valeur unitaire des produits agricoles,

- f) le peu d'expertise face aux technologies de pointe dans le milieu agricole,
- g) la durée des réparations, facteur crucial en période de récolte.

Suite à une telle énumération, pourquoi désirons-nous étudier l'automatisation de la cueillette des champignons?

Dans un premier temps, ce chapitre répond à cette question en décrivant les facteurs qui favorisent l'automatisation de la cueillette de champignons. Par la suite, nous présentons les technologies agricoles en développement. Nous faisons ensuite, une définition des objectifs poursuivis dans ce projet de recherche ainsi qu'une description de l'organisation de ce mémoire.

1.1 L'automatisation de la cueillette de champignons.

Les caractéristiques des champignons de couche, présentées à la section 2.1.1, leurs confèrent un potentiel élevé pour l'automatisation de leur cueillette.

Premièrement, la taille d'un champignon se maintient à l'intérieur d'un interval connu. A maturité, la taille d'un champignon varie plutôt en largeur qu'en hauteur. On peut donc négliger la position verticale des champignons pour ne considérer que leur position dans le plan horizontal. L'orientation, sauf en cas de difformité, est toujours selon l'axe vertical.

Deuxièmement, puisque sa croissance doit se faire à l'abri des intempéries et dans une atmosphère contrôlée, les champignons sont cultivés à l'intérieur d'un bâtiment. Ce bâtiment comprend plusieurs chambres de culture et est appelé champignonnière (*). L'usage d'une champignonnière permet de structurer l'environnement dans lequel s'effectue la cueillette.

Troisièmement, la durée d'un cycle de croissance jusqu'à la récolte est d'environ 91 jours permettant ainsi d'effectuer quatre récoltes par année. Pour maintenir une production mensuelle uniforme, les producteurs cultivent plusieurs chambres dont les stades de croissance sont déphasés dans le temps. Les champignons sont donc cultivés sur une base

(*) Certains producteurs cultivent les champignons à l'intérieur de sous-terrains.

annuelle. Dans cette perspective, un équipement automatique de cueillette de champignons peut servir tout au long de l'année.

Certaines modifications génétiques peuvent aussi adapter grandement la culture des champignons pour la cueillette et la manipulation mécanique. Les champignons, pouvant supporter les rigueurs des manipulations mécaniques, demeureront dans un état désirable pour les consommateurs. Ces modifications incluent la maturité rapide des champignons et la pousse des champignons selon les critères morphologiques désirés.

1.2 Les technologies agricoles en développement.

Plusieurs applications intéressantes sont présentement en opération ou au stade de développement à travers le monde. Quelques universités poursuivent aussi des travaux de recherches des plus intéressants.

a) Cueillette automatique de fruits et légumes à l'exception des champignons.

Kawamura, de l'Université de Kyoto au Japon [1,2], a présenté un prototype de laboratoire d'un robot de cueillette de fruits utilisant une caméra vidéo pour guider le bras manipulateur. Un second système utilisant deux caméras a aussi été présenté.

Toujours au Japon, Kondo et Kawamura [3,4] ont développé un robot de cueillette pour les arbres fruitiers. Ils ont utilisé une caméra vidéo, située sur le bras manipulateur, pour guider celui-ci jusqu'aux fruits. Le système était monté sur une plate-forme mobile à batterie.

En France, Grand d'Esnon, de l'Institut de Recherche en Génie Agricole de Montpellier [18], a effectué des travaux de même nature pour la cueillette de pommes

Sevila, du même institut [2,5], a étudié un robot pour la taille de vignes. Les résultats des tests ont permis le développement d'un prototype de terrain.

Yoshida [2,6] a breveté un système de cueillette pour arbres fruitiers en utilisant deux caméras pour analyser la position du fruit en trois dimensions.

Aux Etats-Unis, Tuttle, de la compagnie Martin-Marietta [2,5], a étudié un robot guidé par un système de vision pour la cueillette de citrons.

Harrel et Isaacs, de l'Université de Floride [2,7], ont conçu un équipement de laboratoire pour le développement et l'évaluation d'un logiciel de contrôle pour un système de cueillette de citrons.

b) Transplantation automatique de plants.

Hwang et Sisler [17], du département de génie-agricole de la Louisiana Agricultural Experiment Station, ont développé un modèle de laboratoire d'un robot transplanteur de plants de poivre. Il ne transplante en moyenne que six plants à la minute, ce qui est le cinquième de la vitesse d'une opération manuelle. Le prototype utilise un robot Rhino Serie II. Les travaux se poursuivent.

Kutz, Miles et Hammer, de l'Université Purdue aux Etats-Unis [8], ont simulé et expérimenté la transplantation de semis à l'aide d'un robot Puma 560. Selon les résultats expérimentaux, l'application fut un succès.

c) Tonte automatique de moutons.

Un des robots les plus sophistiqués se trouve en Australie. L'université Western Australia [1,9,10] a fait beaucoup de travaux sur un robot tondeur de moutons. En comparant le travail accompli par le robot à celui de tondeurs professionnels, on a constaté que les moutons ont été moins souvent égratignés par le robot que par les tondeurs professionnels.

d) Pulvérisation automatique de produits chimiques.

A la Japan Technology Farm [4,11], quelques chercheurs ont développé différents robots pour la pulvérisation d'engrais chimiques et d'insecticides sur les récoltes.

e) Inspection et tri automatique de fruits et légumes.

Selon Sisler [4,12], la compagnie Sunkist a développé un équipement de classification et de tri à l'aide d'un système de vision. L'appareil classe les fruits selon leurs tailles, leurs couleurs, leurs taches, leurs cicatrices et leurs engelures. Deux installations sont présentement en opération en Californie, chacune ayant une capacité de 480 fruits par minute. L'une est appliquée à l'emballage des citrons, l'autre à l'emballage des oranges.

En résumé, les applications théoriques de l'automatisation en agriculture sont vastes, mais jusqu'à maintenant, leurs impacts sont encore très limités. Aucun manufacturier n'a de véritable programme de recherche et de développement dans ce secteur.

1.3 But du projet.

Nous nous proposons de développer un algorithme permettant:

- a) de planifier la cueillette de champignons, c'est-à-dire, de déterminer les champignons matures pour la cueillette, leurs positions et l'ordre dans lequel ils doivent être cueillis.

Une attention particulière est apportée à la localisation des champignons. Ceux-ci étant distribués au hasard, il est donc nécessaire que:

- b) la méthode de localisation admette toute dispersion au hasard des champignons.

Notre attention s'est aussi portée sur l'ordre dans lequel les champignons doivent être cueillis. Celui-ci est l'un des principaux paramètres qui influence la durée de la cueillette, il est donc nécessaire que:

- c) l'ordre dans lequel les champignons doivent être cueillis minimise la durée de la cueillette.

Enfin, l'algorithme de planification devrait être:

- d) assez rapide d'exécution pour permettre la réalisation de la cueillette en temps réel.

1.4 Organisation du mémoire.

Au chapitre 2, nous présenterons une revue des méthodes de cueillette de champignons développées jusqu'à maintenant ainsi que la méthode de cueillette automatique de champignons pour laquelle nous avons développé notre algorithme.

Au chapitre 3, nous présenterons les opérations de traitement d'images et d'évaluation de la maturité des champignons. Au chapitre 4, nous présenterons les opérations de localisation des champignons. Au chapitre 5, nous présenterons une revue des méthodes d'ordonnancement des déplacements développées jusqu'à maintenant ainsi que la méthode retenue pour ce projet.

Au chapitre 6, nous présenterons le programme expérimental, les modules testés ainsi que le banc d'essai. Au chapitre 7, nous présenterons les résultats et la

discussion.

 Finalement au chapitre 8 , nous terminerons avec la conclusion du projet de recherche.

CHAPITRE 2

REVUE DES METHODES DE CUEILLETTE DE CHAMPIGNONS

Dans ce chapitre, nous présentons une revue des méthodes de cueillette de champignons. Puis, nous présentons le modèle de cueillette automatique de champignons qui sous-tend le développement de notre algorithme.

2.1 Revue des méthodes de cueillette de champignons.

Dans cette section, nous présentons certains facteurs qui influencent la cueillette. Puis nous présentons les méthodes de cueillette manuelle et mécanique ainsi qu'une méthode expérimentale de cueillette automatique.

2.1.1 Quand doit-on cueillir un champignon?

Les champignons doivent être cueillis lorsque la couronne est bien développée tout en demeurant ferme et fermée, c'est-

à-dire que la périphérie de la couronne est toujours repliée vers l'intérieur et le voile doit être intact sans qu'aucune lamelle ne soit visible (*).

Il est difficile pour une personne inexpérimentée, de décider du bon moment pour la cueillette. Quelques fois, la cueillette débute trop tôt parce que le producteur n'a pas prévu avec assez de précision la maturité de la récolte. Dans d'autres cas, la cueillette débute trop tard et des champignons ouverts sont cueillis parce que le producteur a décidé la veille que les champignons pourraient demeurer dans les lits (caisses) (**) un peu plus longtemps.

En pratique, l'évaluation de la maturité d'une récolte est l'entière responsabilité du producteur. Lorsqu'il décide que les champignons doivent être cueillis, les préposés cueillent tous les champignons présents dans les lits (caisses). Ceci inclus les petits champignons qui n'ont pas encore atteint leur pleine maturité ainsi que les champignons restés sur le lit (caisse) trop longtemps et dont les voiles sont ouverts.

(*) Annexe A, section A.1.

(**) Annexe B, sections B.2 et B.3.

Pourquoi? Parce que le coût de la main d'oeuvre est trop élevé. Cueillir les champignons en suivant leur rythme de croissance à chaque poussée (*) entraîne des coûts exorbitants. Donc, lorsqu'on mobilise un groupe de cueilleurs, on leur fait cueillir tous les champignons du lit (caisse) à l'exception des tous petits.

Le coût de la main d'oeuvre est également une des raisons pour laquelle les producteurs limitent la production totale à trois récoltes (*). La cueillette subséquente des récoltes ne serait pas rentable.

Les producteurs, qui effectuent une seule poussée optimale, minimisent ainsi leur coût de main d'oeuvre pour la cueillette.

2.1.2 Cueillette manuelle.

Partout dans le monde, on cueille les champignons presque exclusivement à la main. Nous présentons ici une description détaillée de chaque étape de la cueillette manuelle.

(*) Annexe B, section B.1.

a) Localisation et évaluation de la taille.

La toute première étape de la cueillette consiste à localiser le champignon à saisir. Le cueilleur localise visuellement un champignon, puis, de la même façon, il évalue sa taille. Si le diamètre du champignon est supérieur à 10 millimètres, le cueilleur conclura que ce champignon est à cueillir.

Bien que le cueilleur effectue ces deux étapes machinalement, il est nécessaire de bien présenter les moindres aspects de la démarche pour bien comprendre la méthode proposée pour automatiser ces étapes.

b) Déplacements - aller et poursuite.

Une fois que le cueilleur a jugé qu'un champignon est à cueillir, il déplace sa main pour saisir (*) le champignon.

Si sa main est vide, le déplacement est appelé déplacement-aller. Si sa main tient déjà un ou des champignons, le déplacement est appelé déplacement-poursuite.

(*) On distingue la saisie d'un champignon comme étant une des étapes de la cueillette.

Le type de déplacement dépend de la capacité disponible de la main. En moyenne, un cueilleur saisira environ quatre champignons d'une seule main.

c) Préhension.

Une fois la main (*) au-dessus du champignon à cueillir, le cueilleur saisit le champignon en périphérie de la couronne et soulève celui-ci tout en le tournant sur lui-même dans le plan horizontal. Cette technique a pour but de dégager le champignon en permettant une meilleure prise sur la couronne.

d) Déplacement - Retour.

Lorsque le cueilleur juge qu'il a suffisamment de champignons dans sa main, il ramène celle-ci près de lui pour la coupe des troncs.

(*) La cueillette ne s'effectue que d'une seule main. L'autre main tient un couteau en permanence.

e) Coupe.

Lorsque la main du cueilleur est située au dessus de la boîte "rebuts-rejets", il coupe le tronc des champignons saisis. La figure 2.1 présente l'opération de coupe des troncs.

f) Evaluation de la classe.

Une fois les troncs coupés, le cueilleur tourne la paume de sa main vers le haut pour voir le dessous des champignons. Il détermine alors visuellement la classe de chaque champignon. Cette évaluation s'effectue en vérifiant le voile. Si le voile est intact, le champignon est classé A. S'il est partiellement ouvert, le champignon est classé B. Notez que la valeur commerciale de la classe A est quatre fois supérieure à la classe B.

Finalement, si l'ouverture du voile est trop importante, le champignon est un rejet (*).

(*) Toutefois, il existe des exceptions à ce type de classification. Par exemple, en Angleterre, les consommateurs sont particulièrement friands de champignons dont le voile est totalement ouvert.

g) Classification.

Une fois l'évaluation de la classe terminée, le cueilleur place chaque champignon dans la petite boîte appropriée située sur son chariot.



Figure 2.1 Cueillette manuelle - Coupe des troncs.

h) En résumé.

La cueillette d'un champignon comprend beaucoup plus d'opérations que sa simple saisie. On doit donc:

- 1- Localiser le champignon,
- 2- Evaluer sa taille,

- 3- Déplacer la main vers le champignon,
- 4- Saisir ce dernier.

On répète ces opérations jusqu'à ce que la main soit pleine. Puis on doit:

- 5- Déplacer la main vers le chariot en la renversant,
- 6- Couper les troncs des champignons (*),
- 7- Evaluer la classe de chaque champignon,
- 8- Placer chaque champignon dans la boîte appropriée.

2.1.3 Cueillette mécanique.

Un groupe de producteurs et de spécialistes hollandais et l'Horticultural Engineering Institute of Wageningen [14] ont développé une machine pour la cueillette des champignons, voir figure 2.2. Avec cette machine, il est possible de couper tous les champignons lors d'une forte poussée à partir des lits, et ce, en une seule opération. Cette méthode de cueillette s'adresse particulièrement au système de production

(*) Pour les productions destinées à l'industrie de la mise en conserve, les opérations 6, 7 et 8 sont généralement effectuées à l'usine même.

à une zone (*) où les champignons sont cultivés dans des lits relativement longs (30 mètres) et uniformes.

La machine consiste en un couteau, fixé à une structure mobile, la machine au complet se déplace en roulant sur la partie supérieure des cotés du lit, tel que présenté à la figure 2.3.

Un autre type de machine fonctionne avec une courroie transversale entraînant les champignons cueillis d'un côté à l'autre du lit, voir figure 2.4.

Une autre version de cette machine recueille les champignons cueillis sur un filet de nylon. Lorsque la machine a atteint l'extrémité du lit, le filet de nylon, déroulé pendant la cueillette, est alors enroulé autour d'un arbre motorisé situé à l'extrémité opposée du lit. L'enroulement du filet fait tomber les champignons dans une boîte située directement sous l'arbre. Cette machine possède une très grande capacité de production, voir figure 2.5.

(*) Annexe B, section B.2.

Avant que ces machines puissent être utilisées, certaines conditions doivent être rencontrées.

- a) La surface des lits doit être complètement uniforme pour permettre à la machine de se déplacer au-dessus des lits sans interruption.
- b) Les côtés des lits doivent avoir un profil spécial sur lequel les machines peuvent se déplacer.
- c) Avant d'utiliser la machine, une petite portion de champignons le long des côtés du lit doit être cueillie à la main pour dégager la section balayée par les mécanismes d'entraînement de la machine.

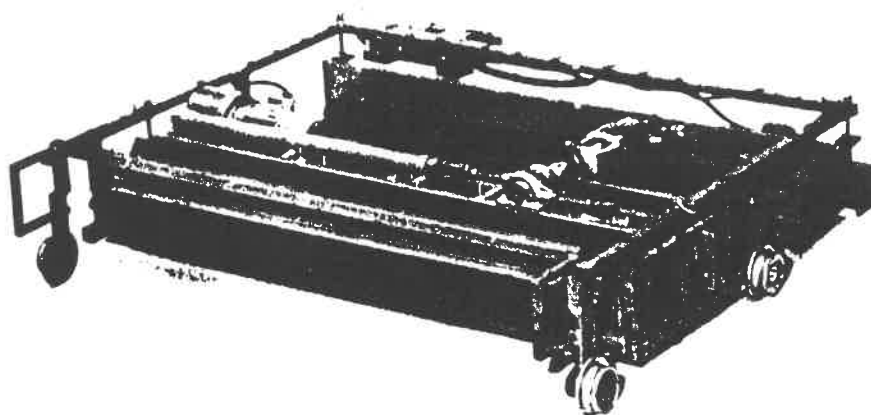


Figure 2.2 Machine pour la cueillette mécanique de champignons.



Figure 2.3 Machine pour la cueillette mécanique sur le lit de culture.

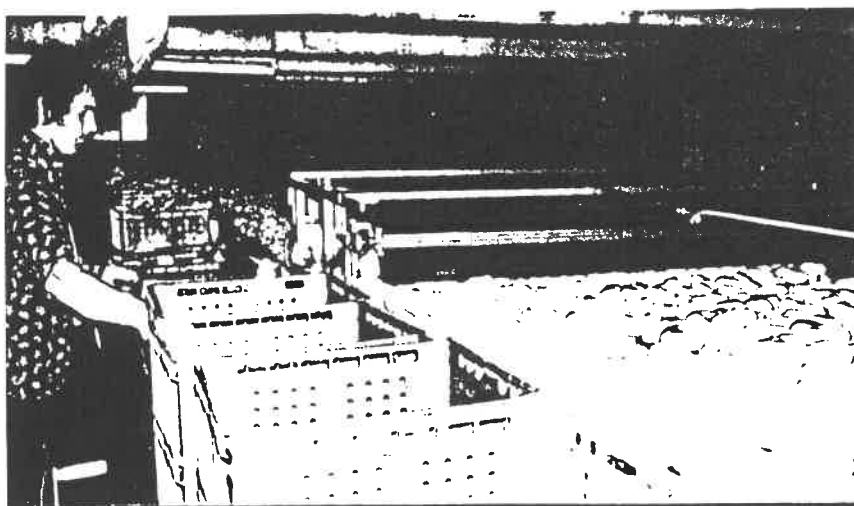


Figure 2.4 Machine pour la cueillette mécanique avec courroie transversale.

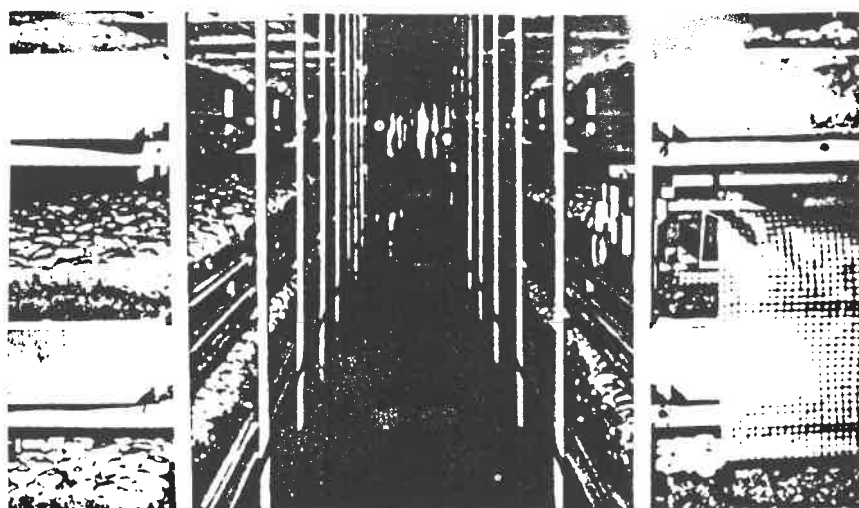


Figure 2.5 Machine pour la cueillette mécanique déposant les champignons cueillis sur un filet de nylon.

Avec la cueillette mécanisée, tous les champignons d'une récolte demeurent en place jusqu'à ce qu'ils atteignent leur dimension maximum au risque d'avoir des champignons de classe B. Puis la récolte est coupée au complet par la machine en une seule opération. Cette méthode de cueillette est satisfaisante seulement lorsque les champignons sont côte-à-côte sur le lit. Lorsqu'ils sont un peu espacés, les champignons peuvent être poussés par en avant par le couteau de la machine et coupés sur la longueur. Pour cette raison une brosse est fixée en avant de la machine, voir figure 2.3, pour maintenir les champignons contre la lame du couteau.

En pratique, le problème dû aux troncs et aux racines laissés sur les lits après la coupe mécanisée est moins important qu'il peut paraître. La plupart des producteurs font deux passes, une pour les champignons et une seconde fois pour les troncs laissés sur le lit. Les racines semblent sécher complètement et après quelques jours la récolte suivante apparaît.

Il est clair qu'en mécanisant la cueillette, on peut en réduire grandement les coûts. Toutefois, la mécanisation peut susciter certains problèmes à court terme. Entre autre, quels sont les types de maladies qui pourraient être développés en laissant les champignons sur les lits plus longtemps pour ensuite couper l'entière récolte en une seule opération? Il est bien connu [14] que les champignons ouverts favorisent le développement de maladies virales.

De plus, à cause de la coupe imprécise des champignons, c'est-à-dire au niveau de la couronne, du voile ou du tronc, les récoltes effectuées à l'aide de ces machines sont presque exclusivement dédiées à l'industrie de la mise en conserve.

A ce moment, il semble difficile, voire impossible, de cueillir des champignons frais de première classe avec une machine.

2.1.4 Cueillette automatique.

La culture des champignons est un domaine où l'utilisation des nouvelles technologies est toute récente. Le champ d'application de ces nouvelles technologies est strictement limité au contrôle d'environnement (température, humidité, changements d'air, concentration en gaz carbonique).

Toutefois, en Hollande, Devlaeminck de Terpa [2,16], une division agricole de la multi-nationale Thyssen-Bornemisza, a rapporté qu'un robot utilisant un système de vision pour la cueillette de champignons était à l'étude. Les champignons sont situés sur des lits de 2 mètres par 6 mètres.

Deux caméras sont utilisées pour guider le manipulateur jusqu'aux champignons situés dans les lits. Un capteur de pression situé à l'intérieur de la pince, à la base des deux doigts, signale la prise du champignon.

Les caméras sont fixées sur le robot que l'on déplace lentement au-dessus du lit. Le système de vision utilise le

diamètre de la couronne comme critère pour déterminer si un champignon est à cueillir. L'usage de deux caméras permet de déterminer la hauteur des champignons.

Lorsqu'un champignon est repéré, la pince à deux doigts saisie fermement le champignon sur la périphérie de la couronne et effectue une rotation dans le plan horizontal pour couper les racines. La méthode utilisée pour saisir le champignon comporte les mêmes mouvements que la méthode manuelle.

Les travaux portent maintenant sur un algorithme qui permettrait de déterminer les parties de la périphérie de la couronne qui ne sont pas en contact avec des champignons adjacents. Ces résultats pourraient alors être utilisés pour développer un second algorithme qui permettrait de décider quelle partie de la périphérie de la couronne peut être utilisée pour saisir le champignon sans endommager les champignons adjacents.

Au moment de la publication, un seul prototype avait été testé, mais d'autres études étaient projetées pour augmenter la vitesse d'exécution de la saisie des champignons. L'emphasis sera mise tant sur la mécanique que sur le système de vision.

La méthode de recherche de champignons et les méthodes de localisation et d'ordonnancement ne sont pas présentées dans cette publication. Toutefois, la formulation utilisée dans la description des déplacements du robot laisse sous-entendre que la recherche de champignons et l'ordonnancement s'effectuent de façon locale; c'est-à-dire que ces opérations s'effectuent à partir d'une image représentant la partition du lit situé sous les caméras au moment où l'image est saisie.

2.2 Modèle pour la cueillette automatique de champignons.

A partir des informations présentées à l'annexe B, nous proposons un modèle pour la cueillette des champignons qui s'inspire de la méthode de production à deux zones, où les champignons sont: cultivés dans des caisses et cueillis dans une chambre de cueillette.

2.2.1 Méthode de production pour la cueillette automatique.

a) Méthode de production.

La méthode de production nécessiterait plusieurs chambres dédiées aux différentes étapes de la production. La croissance des champignons s'effectuerait dans des caisses à parois minces dont la dimension reste à déterminer.

b) Déplacement des caisses.

Au lieu de déplacer les caisses à l'aide de chariots élévateurs, les caisses seraient déplacées automatiquement sur un réseau de convoyeurs joignant les différentes chambres, la machinerie, les aires de croissance et le poste de cueillette automatique.

c) Champignonnière.

Ce type de champignonnière automatique intégré s'inspire du modèle de production à deux zones et de modèles de fermes intérieures intégrées dont un excellent exemple est présenté par D.E. Mulcahy [19].

d) Nombre de poussées.

La croissance des champignons serait optimisée pour produire une seule poussée. Après la récolte de cette forte poussée, les caisses seraient nettoyées pour un nouveau cycle de croissance. L'avantage d'effectuer une seule poussée consiste à garantir une densité maximale de champignons dans les caisses à chaque récolte.

e) Classe des champignons.

De plus, pour assurer la cueillette de champignons de classe A, lorsque les premiers champignons seraient prêts pour être cueillis, les caisses pourraient être assignées à la chambre de cueillette pendant une période déterminée de quelques jours. Pendant cette période, les caisses seraient présentées au poste de cueillette à intervalle régulier (par exemple: 1 ou 2 fois par jour) pour cueillir seulement les champignons lorsqu'ils ont complètement terminé leur croissance. Cette cueillette sélective améliorerait la performance de la récolte car on obtiendrait que des champignons de classe A de la taille désirée.

Après cette présentation de la méthode de production proposée, nous présentons deux méthodes de cueillette automatique.

2.2.2 Méthodes de cueillette automatique de champignons.

2.2.2.1 Cueillette en parallèle.

Cette méthode de cueillette nécessite deux postes de travail: un poste d'inspection et un poste de préhension. L'expression "en parallèle" indique que la planification de la cueillette d'une caisse de champignons s'effectue en même temps que la préhension des champignons d'une caisse précédente.

a) Le poste d'inspection.

Au poste d'inspection, un système de vision assisté par ordinateur est utilisé pour saisir l'image des champignons situés dans la caisse. Si le champ de vision de la caméra ne réussit pas à englober l'ensemble des champignons de la caisse, la caméra est déplacée selon un ou deux axes de façon à saisir le nombre de sous-images suffisant pour obtenir l'image de tous les champignons de la caisse.

Une fois l'image numérisée, l'ordinateur en fait le traitement pour :

- 1- évaluer la taille des champignons - un champignon de 18 à 50 ou même 50 à 75 millimètres de diamètre étant satisfaisant selon les producteurs et selon les espèces de champignons,
- 2- localiser la position des champignons à cueillir et
- 3- déterminer l'ordre des déplacements pour saisir ces champignons.

b) Le poste de préhension.

Le poste de préhension consisterait en un dispositif de cueillette actionné selon deux axes orthogonaux dans le plan horizontal. Un point de référence de ce dispositif serait déplacé d'un champignon à cueillir à l'autre.

Ce dispositif de cueillette consisterait en une tourelle sur laquelle est fixée des ventouses actionnées individuellement. Pendant les déplacements du système vers le prochain champignon à saisir, la tourelle pivoterait afin de présenter une nouvelle ventouse libre au point de référence. La rotation de la tourelle s'effectuerait séquentiellement de

façon à permettre l'exécution des autres opérations de la cueillette (coupe, évaluation et classification) en parallèle à partir d'équipements périphériques (couteau, caméra, chutes) montés sur le dispositif de cueillette. Tous les équipements périphériques se déplaceraient donc avec la tourelle.

Les ventouses utilisées pourraient absorber les légères variations de hauteur des champignons. L'usage d'une ventouse permettrait d'éliminer le risque d'endommagement de la couronne et des couronnes adjacentes en appliquant une dépression uniforme sur la partie supérieure de la couronne. De plus, une simple traction verticale serait suffisante pour saisir le champignon, éliminant de cette façon le mouvement de torsion qui peut endommager le voile du champignon. En conservant le voile intact, on préserve la classe du champignon saisi.

Puis, les champignons, triés dans des chutes, seraient acheminés par convoyeurs vers un poste d'emballage automatique.

c) Avantages - Désavantages.

Puisque les opérations du poste d'inspection et du poste de préhension sont indépendantes, ces deux postes pourraient opérer en parallèle afin d'optimiser le temps de cueillette unitaire moyen d'un champignon. Ceci s'avérera d'autant plus vrai si la durée du temps de calcul de la planification de la cueillette est longue.

Toutefois, cette méthode de cueillette nécessite deux postes de travail. Ceci entraîne une redondance d'équipements mécaniques comme les convoyeurs, les dispositifs de positionnement des caisses, le ou les axe(s) pour le déplacement de la caméra du poste d'inspection, si nécessaire.

2.2.2.2 Cueillette séquentielle.

Cette méthode est une variante de la méthode de cueillette en parallèle. Elle n'a pas le désavantage de la première car elle s'effectue à partir d'un seul poste de travail appelé poste de cueillette. L'expression "séquentielle" indique que la planification de la cueillette des champignons d'une caisse s'effectue complètement avant que ne débute la saisie des champignons.

Le poste de cueillette est une combinaison du poste d'inspection et du poste de préhension de la méthode de cueillette en parallèle.

La caméra du système de vision est fixée sur le dispositif de cueillette au point de référence. Avant de débiter la préhension, le dispositif de cueillette est déplacé au-dessus de la caisse pour permettre la saisie de l'image de tous les champignons de la caisse. Puis, l'image est traitée par l'ordinateur pour poursuivre la planification de la cueillette en tenant compte de la distance relative entre tous les champignons à saisir. Lorsque la planification est terminée, alors débute la saisie de tous les champignons à cueillir.

a) Avantages- désavantages.

Cette méthode a l'avantage de nécessiter un seul poste de travail, éliminant la redondance des équipements mécaniques présentés à la section 2.2.2.1.

Le désavantage de cette méthode par rapport à la méthode en parallèle sera d'autant plus important si la durée de la planification s'apparente à la durée de la préhension des

champignons à saisir.

2.3 Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle de cueillette automatique qui sous-tend le développement de notre algorithme. Il s'inspire du système de production à deux zones, où les champignons sont: cultivés dans des caisses et cueillis dans une chambre de cueillette.

Puisque le champignon de couche est l'espèce la plus cultivée à travers le monde et que ses caractéristiques physiques le prêtent bien à la manipulation, l'algorithme de planification de la cueillette de champignons a donc été développé pour qu'il soit applicable à cette espèce.

Indépendamment de la méthode de cueillette automatique envisagée (en parallèle ou séquentielle), en observant le résumé de la section 2.1.2, on constate que le développement de notre algorithme consiste à automatiser les trois étapes suivantes: évaluer les tailles des champignons, localiser les champignons et déterminer les déplacements requis pour les atteindre. Nous avons donc étudié plus particulièrement ces opérations aux chapitres 3, 4 et 5 respectivement.

CHAPITRE 3

TRAITEMENT D'IMAGE ET EVALUATION DE LA MATURITE DES CHAMPIGNONS

L'algorithme de planification de la cueillette de champignons utilise comme donnée l'image des champignons à cueillir. Dans cette image, les champignons apparaissent gris pâles et le compost (*) gris foncé. Présenté de cette façon, il semble trivial d'extraire les formes des champignons. En binarisant l'image à partir d'un seuil de luminosité, les champignons deviennent blancs et le compost devient noir. Mais en pratique, on constate qu'avec cette méthode, il est très difficile d'extraire la forme exacte d'un champignon parce que la périphérie de la couronne apparaît dans l'image comme un dégradé de gris. Le dégradé passe du gris pâle au gris foncé lorsque le champignon est entouré de compost et du gris pâle à un gris intermédiaire lorsque le champignon est entouré d'autres champignons adjacents. Nous avons donc traité le

(*) Engrais formé par le mélange fermenté de débris organiques avec des matières minérales.

contour des champignons à cueillir comme une région dont la teinte de gris est non-uniforme.

Afin d'extraire la forme des champignons, nous avons débuté par l'extraction des contours des champignons. Cette opération consiste à mettre les contours en évidence afin de produire une image qui peut servir au traitement morphologique. Ce sujet est présenté à la section 3.1.

Par la suite, nous avons traité morphologiquement les contours des formes des champignons. L'avantage de ce traitement est qu'il produit plusieurs résultats à la fois. Il permet de faciliter la binarisation de l'image en éliminant les zones grises intermédiaires. Et surtout, il permet de réaliser le premier objectif du projet soit, d'évaluer la maturité des champignons de l'image. Le traitement morphologique est présenté à la section 3.2.

Finalement, nous avons binarisé l'image à partir d'un seuil de luminosité. Le résultat de cette opération est une image qui se compose seulement de deux luminosités. Le noir et le blanc, où le blanc représente les champignons à cueillir. La binarisation est présentée à la section 3.3.

3.1 Détection des contours.

La détection d'un contour consiste à mettre en évidence la position d'un contour dont la luminosité varie graduellement. Pour ce type de problème, les méthodes conventionnelles de détection de contours, tel que le gradient et le Sobel, sont inefficaces. Elles interprètent chaque dégradé comme un contour.

Rosenfeld et Kak [20] ont proposé une méthode pour déceler les changements abrupts de luminosité moyenne (*)(**). Toutefois, la méthode présentée s'applique seulement à des objets pâles sur un fond foncé ou vice versa.

Dans notre cas, nous faisons face à deux situations. Premièrement, un champignon peut être entouré de compost où les contours à déceler se situent entre des régions pâles et foncées. Deuxièmement, un champignon peut être entouré d'autres champignons, adjacents ou superposés, où les contours à déceler se situent alors entre deux régions pâles.

(*) Annexe C.

(**) Pour les fins de ce projet, nous considérons les contours des champignons comme étant des zones où il se produit un changement abrupt de luminosité moyenne.

Pour tenir compte du second cas, nous avons développé une méthode plus générale qui s'inspire des concepts présentés par Rosenfeld.

3.1.1 Méthode générale de détection des contours.

La méthode que nous présentons est une généralisation de la méthode de Rosenfeld et Kak. La généralisation provient du fait qu'elle permet de déceler des contours d'objets dont la luminosité moyenne est similaire à celle de l'arrière-plan.

La méthode consiste à déceler les changements abrupts de luminosité moyenne en calculant la "différence" entre la luminosité moyenne de voisinages adjacents disjoints. Un voisinage est une région composée de pixels (*) adjacents. Trois voisinages sont nécessaires. Les deux premiers sont appelés voisinages extérieurs. Ils sont situés de part et d'autre du troisième voisinage, appelé voisinage intérieur. L'ensemble de ces trois voisinages est appelé un masque. La figure 3.1 présente un masque horizontal, situé à (x,y) , composé de 3 voisinages carrés de dimension $(2r-1)$ par $(2r-1)$, où r égale 2.

(*) Annexe D.

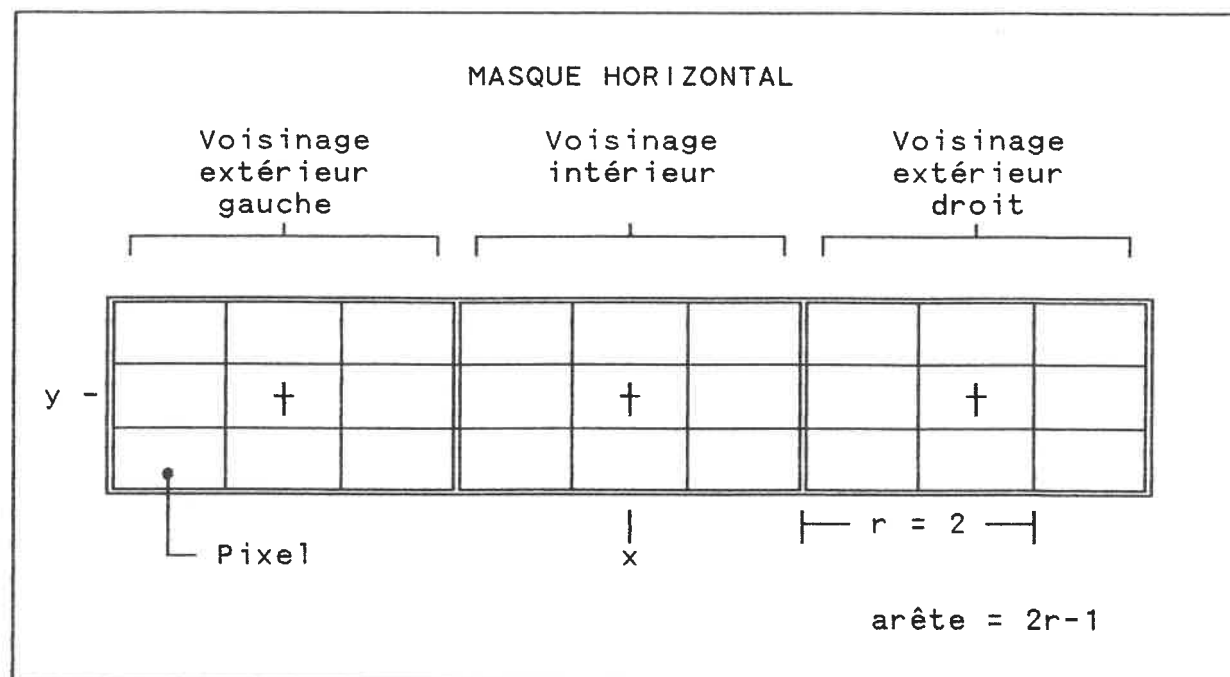


Figure 3.1 Masque horizontal, situé à (x,y) , composé de 3 voisinages carrés d'arête $2r-1$, où $r = 2$.

La détection du changement abrupt de luminosité moyenne d'objets pâles sur fond plus foncé consiste à calculer la "différence" de luminosité moyenne entre les voisinages du masque. Ce calcul consiste à évaluer la luminosité moyenne de chaque voisinage, puis, à faire la somme des résultats des soustractions de la valeur du voisinage intérieur des voisinages extérieurs.

Donc, si $f^{(r)}(u,v)$ représente la luminosité moyenne d'un voisinage carré d'arête $2r-1$ centré à (u,v) alors, pour des voisinages situés sur une droite horizontale, la "différence" $e^{(r)}$ de luminosité moyenne pour un voisinage intérieur centré

à (x,y) est:

$$e^{(r)} = f^{(r)}(x-2r+1,y) + f^{(r)}(x+2r-1,y) - 2*f^{(r)}(x,y) \quad (3.1)$$

La figure 3.2 présente l'exemple d'un masque horizontal, situé à $(10,5)$, composé de 3 voisinages carrés d'arêtes $2r-1$, où r égale 2.

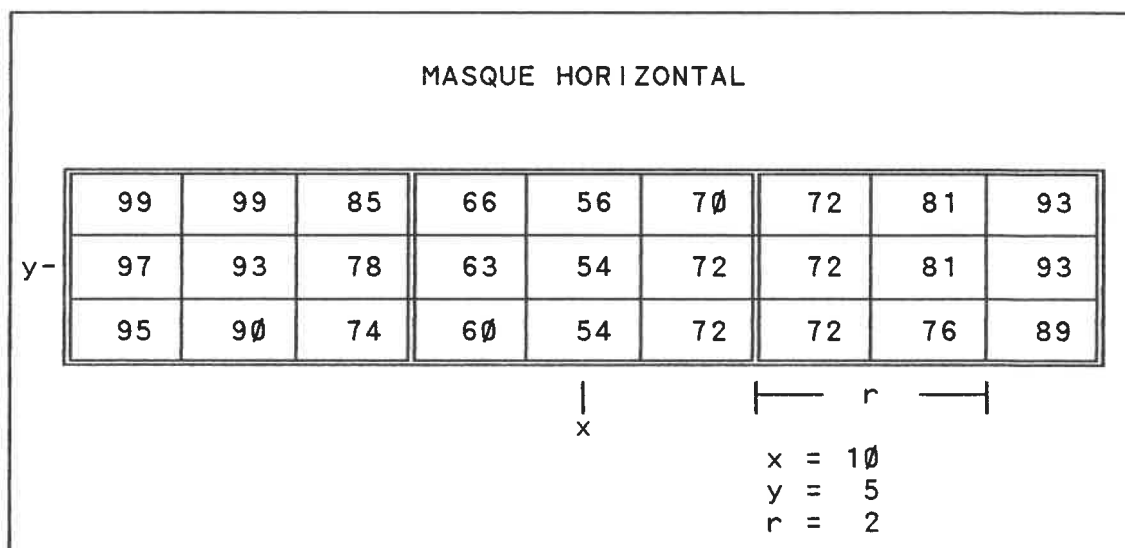


Figure 3.2 Exemple de masque horizontal.

$$f^{(2)}(7,5) = (99+99+85+97+93+78+95+90+74) / 9 = 90$$

$$f^{(2)}(10,5) = (66+56+70+63+54+72+60+54+72) / 9 = 63$$

$$f^{(2)}(13,5) = (72+81+93+72+81+93+72+76+89) / 9 = 81$$

$$e^{(r)}(10,5) = 90 + 81 - 2 * 63 = 35$$

De façon générale, si les centres des trois voisinages sont situés sur une droite de pente θ , notre formule de la "différence" $e^{(r)}$ doit être modifiée pour tenir compte de l'orientation du masque. La figure 3.3 présente le cas en question.

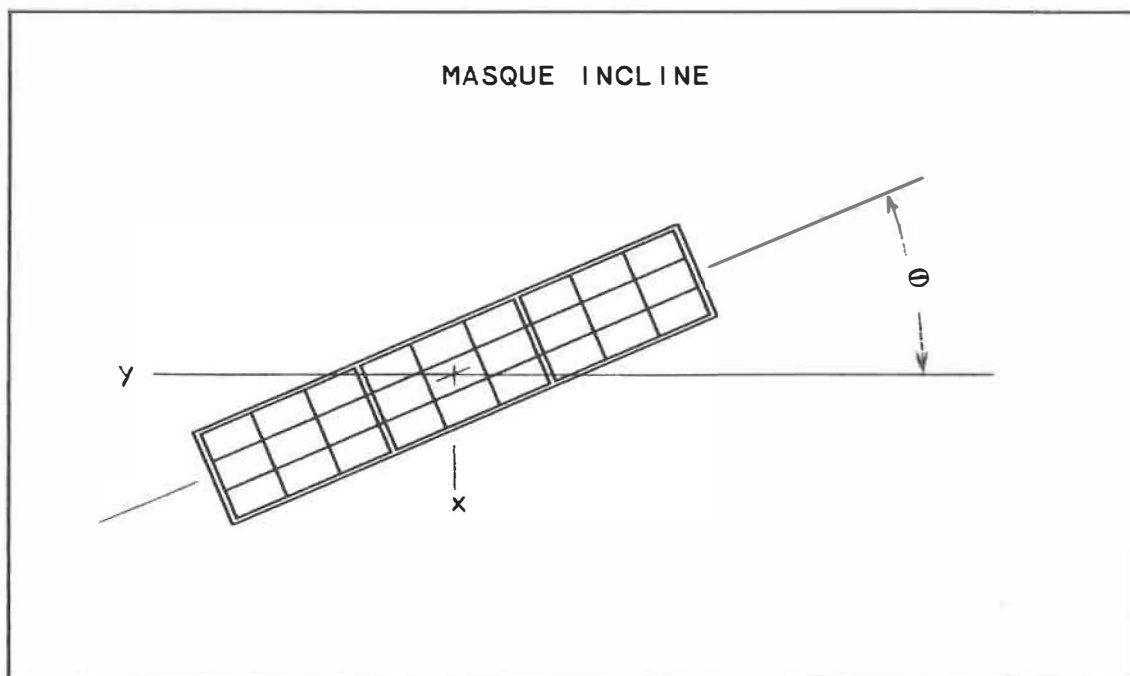


Figure 3.3 Masque incliné d'un angle de θ , situé à (x,y) et composé de 3 voisinages carrés.

L'expression de la différence $e^{(r)}$ est donc remplacée par l'expression $e^{(r,\theta)}$ indiquant que la différence est fonction de la dimension des voisinages et de l'orientation du masque.

La formule générale de la différence $e^{(r,\theta)}$ pour un masque situé à (x,y) est:

$$e^{(r,\theta)}(x,y) = f^{(r)}(x-(2r+1)\cos\theta, y-(2r+1)\sin\theta) + f^{(r)}(x+(2r-1)\cos\theta, y+(2r-1)\sin\theta) - 2 * f^{(r)}(x,y) \quad (3.2)$$

Cette différence $e^{(r,\theta)}$ sera grande et positive dans deux cas, voir figure 3.4a. Lorsque le voisinage intérieur est plus sombre que les voisinages extérieurs, c'est le cas du contour entre les champignons. Et lorsque le voisinage intérieur est de même teinte que l'un des voisinages extérieurs et très différent de l'autre voisinage extérieur, c'est le cas du contour entre le champignon et le compost.

La différence sera nulle dans deux cas, voir figure 3.4b. Lorsque les différences entre le voisinage intérieur et les voisinages extérieurs sont de même valeur mais de signes différents, c'est le cas où le masque est sur une pente. Et lorsque les différences entre les voisinages sont nulles, c'est le cas où le masque est sur une surface uniforme.

Finalement, la différence sera négative lorsque le voisinage intérieur est plus clair que les voisinages extérieurs, c'est le cas du dessus du champignon, voir figure 3.4c. Dans ce cas, la valeur est posée à zéro.

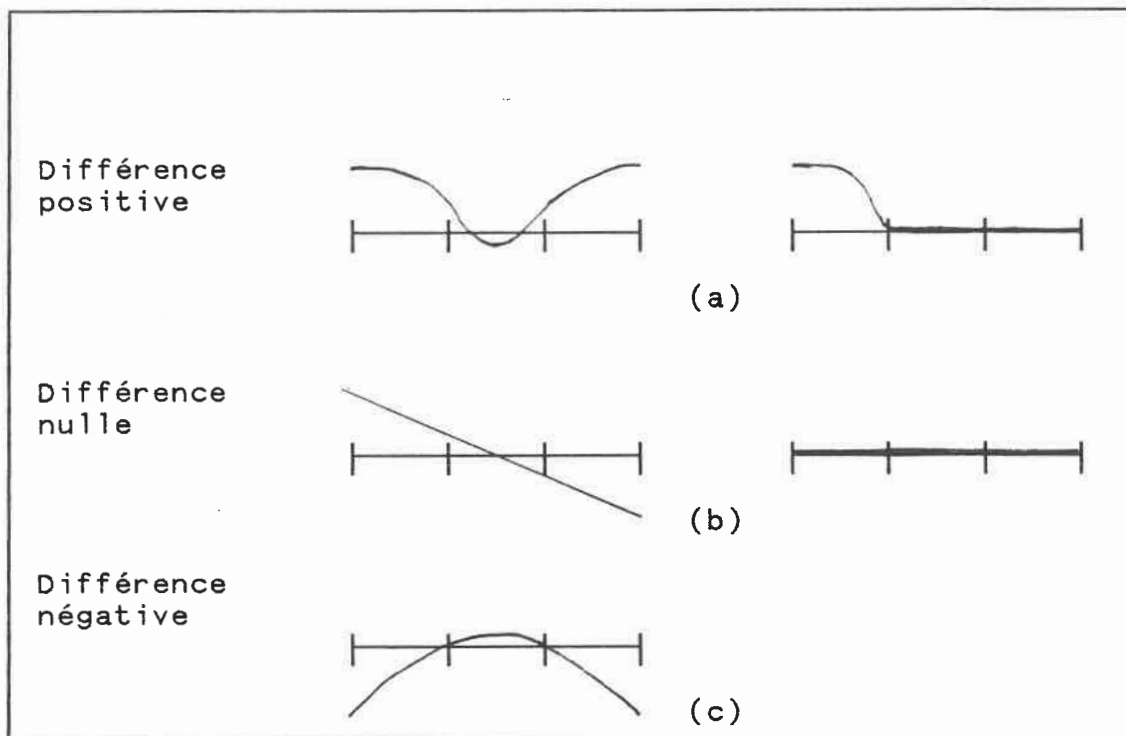


Figure 3.4 Différents cas de calcul de la différence $e^{(r, \theta)}$.

Remarques.

Puisque nous avons à déceler des contours de toutes orientations, nous avons utilisé la somme des différences $e^{(r, \theta)}$ et $e^{(r, \theta + \pi/2)}$.

$$e^{(r)} = e^{(r, \theta)} + e^{(r, \theta + \pi/2)} \quad (3.3)$$

Dans notre cas, nous avons utilisé des voisinages de forme carrée dont l'orientation θ a été fixée à π parce que l'on a fait un balayage orthogonal de l'image. Deux masques ayant des voisinages carrés de dimensions $r=2$ et $r=3$, respectivement, ont été testés, voir figure 3.5. Par la suite, les masques composés de voisinages de dimensions $r=2$ et $r=3$ seront simplement appelés voisinages et masques 3X3 et 5X5, respectivement.

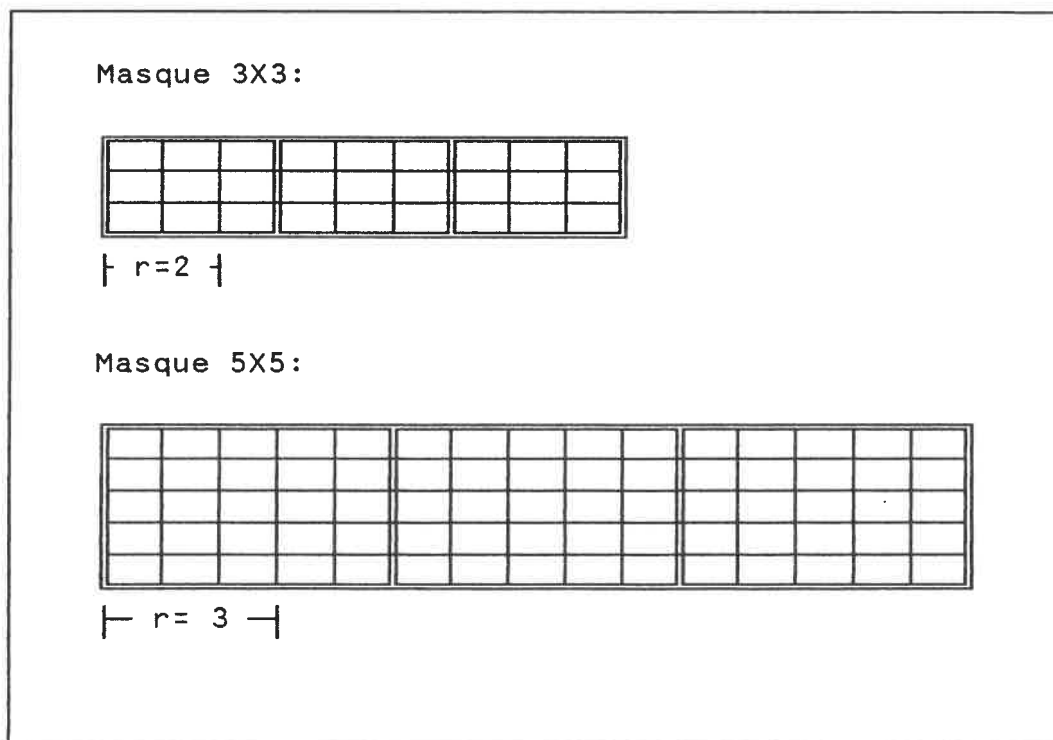


Figure 3.5 Masques horizontaux composés de voisinages de dimensions $r=2$ et $r=3$, respectivement.

De plus, pour accentuer les différences $e^{(r)}$, nous les avons multipliées par un facteur d'amplification fa . De cette façon, les faibles différences demeurent faibles et les différences moyennes deviennent élevées. Les différences accentuées $e^{(r)+}$ permettent d'obtenir un meilleur contraste.

$$e^{(r)+} = fa * e^{(r)} \quad (3.4)$$

3.1.2 Construction de contours noirs.

Pour préciser la position des contours décelés avec les différences accentuées $e^{(r)+}$, on doit supprimer les valeurs non-maximales obtenues. Pour ce faire, nous avons utilisé un histogramme du nombre de pixels en fonction des différences accentuées.

A partir de cet histogramme, nous avons choisi un seuil de différence sd . Tout pixel, ayant une différence maximale à l'intérieur d'un voisinage 3X3 qui est plus grande ou égale au seuil sd , est considéré comme faisant parti d'un contour. La luminosité de ce pixel, dans l'image originale, est alors portée à "0" - Noir. Ceci a pour effet de bien faire ressortir les contours des champignons pour le traitement morphologique subséquent.

Le risque de cette méthode est évidemment de choisir un seuil trop élevé résultant en un contour noir discontinu, ou

encore, de choisir un seuil trop faible résultant en un contour trop large.

3.2 Traitement morphologique de l'image.

Le traitement morphologique de l'image consiste à faire croître les régions (contours) noires des champignons présents dans l'image pour produire une image contenant uniquement des formes correspondant aux champignons à cueillir.

Pour produire une image contenant seulement les formes des champignons à cueillir, il faut éliminer de l'image les champignons trop petits pour la cueillette. L'opération précédente a mis en valeur le contour de ces petits champignons. En effectuant une croissance des régions noires (contours), calculée en fonction du plus petit champignon à cueillir, on élimine totalement de l'image tous les petits champignons à ne pas cueillir. La figure 3.6 présente un exemple de croissance de régions (contours) noires. La figure 3.6a présente deux champignons de tailles différentes et la figure 3.6b présente le résultat obtenu suite à la croissance contrôlée des régions (contours) noires de façon à éliminer le plus petit champignon.

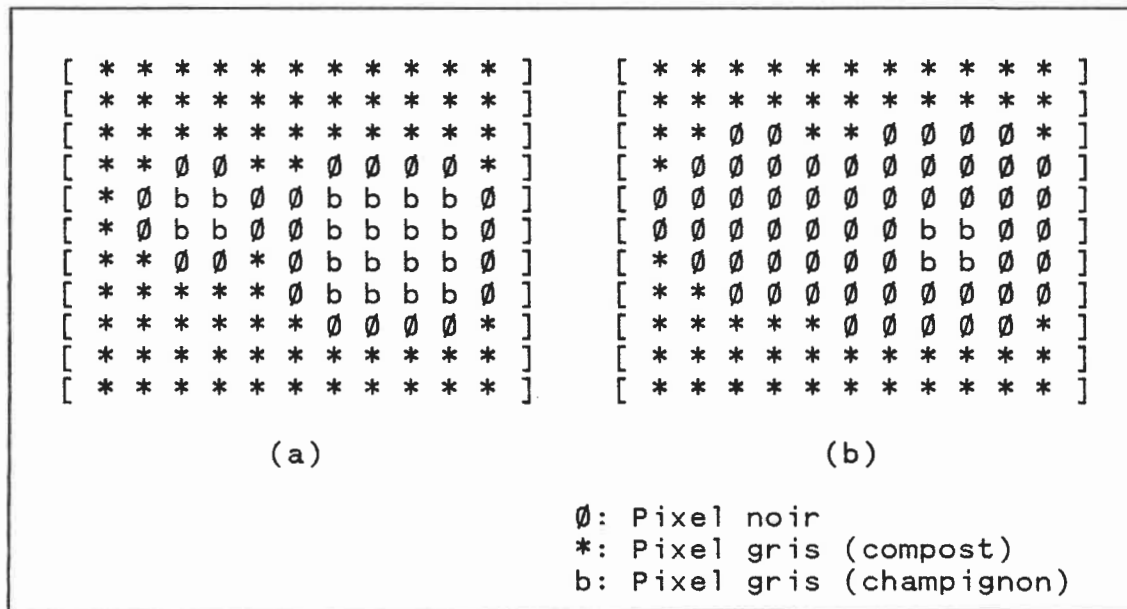


Figure 3.6 Exemple de croissance de régions (contours) noires.

L'évaluation de la maturité des champignons est donc réalisée par cette opération, car, suite à la croissance des régions (contours) noires, toutes les formes des champignons présentes dans l'image correspondent à des champignons à cueillir.

3.2.1 Les opérateurs morphologiques.

Les deux opérateurs qu'on utilise en morphologie sont l'érosion et la dilatation. Ce sont des opérateurs qui sont appliqués localement.

Nous nous sommes inspirés de l'opérateur dilatation (addition de Minkowski) présenté par Dougherty et Giardina [21] pour développer notre opérateur dilatation. A noter que le développement présenté dans la référence précédente utilise la valeur 1 pour le noir et 0 pour le blanc. Dans ce mémoire, nous considérons l'inverse pour être cohérent avec le système de vision utilisé.

3.2.1.1 La dilatation.

Un opérateur en morphologie nécessite deux entrées: une image à traiter et un élément structurant utilisé pour modifier la configuration des objets de l'image. Un élément structurant peut être associé à un masque.

Par exemple, considérons l'élément structurant E, en forme de croix, et l'image I (*) de la figure 3.7.

Un pixel particulier est localisé avec ses coordonnées (i,j) où i correspond à la rangée (rangée supérieure: $i=0$) et j correspond à la colonne (colonne de gauche: $j=0$).

(*) Annexe D.

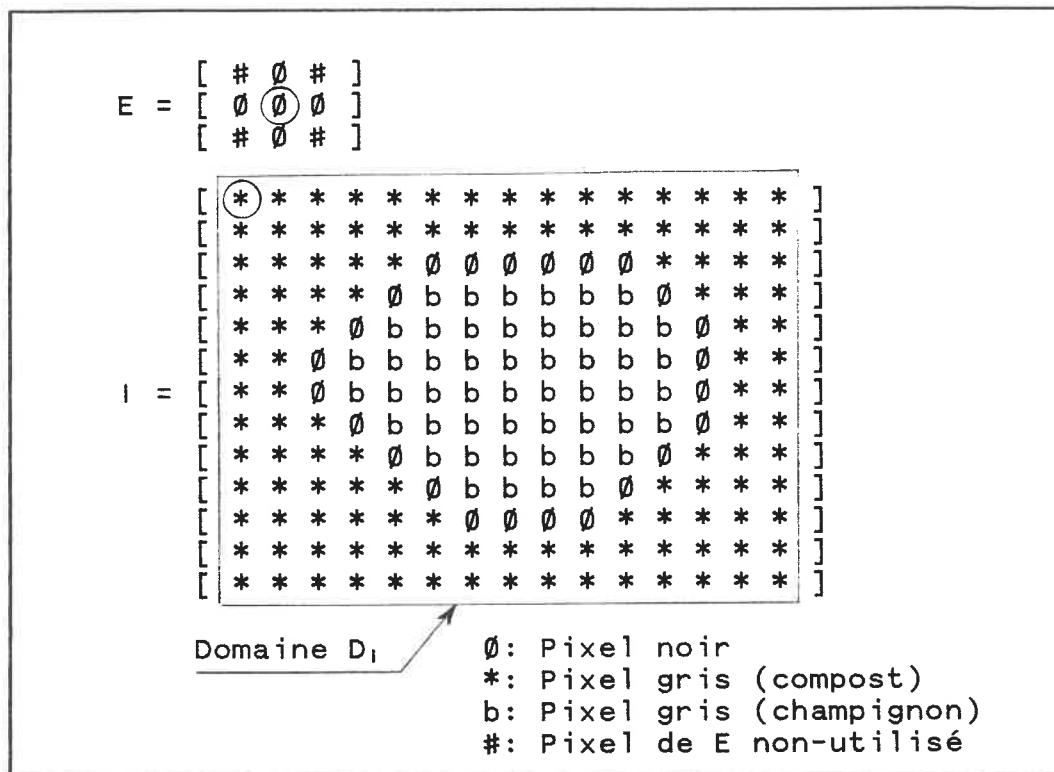


Figure 3.7 Exemple d'un élément structurant E (croix) et d'une image I , où les cercles indiquent le point de référence de l'élément structurant et l'origine de l'image.

Avant d'effectuer la dilatation de l'image I , on doit modifier le domaine D_I ($0 \leq i \leq 12$ et $0 \leq j \leq 14$) de l'image, en fonction de l'élément structurant E . Le domaine modifié $D_{I,E}$ est obtenu en tenant compte que l'élément structurant doit balayer l'image tout en demeurant entièrement à l'intérieur de l'image. Le parcours effectué par le point de référence de l'élément structurant en périphérie de l'image détermine les limites du domaine $D_{I,E}$ ($1 \leq i \leq 11$ et $1 \leq j \leq 13$). La figure 3.8 présente le domaine $D_{I,E}$ pour l'image et l'élément structurant de la figure 3.7.

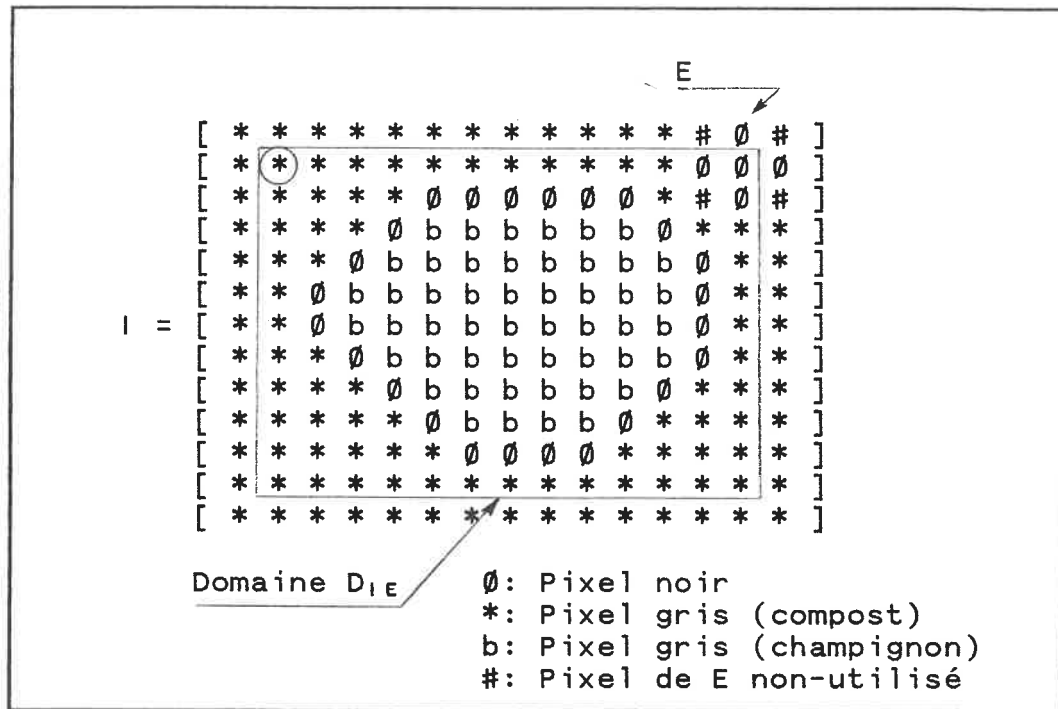


Figure 3.8 Domaine modifié $D_{I,E}$ pour l'image I et l'élément structurant E de la figure 3.7.

Nous définissons l'opérateur DILATATION comme suit:

$$\begin{aligned}
 \text{DILATATION}[I, E] = \{ [E \wedge I](i, j) \text{ tel que le pixel } (i, j) \\
 \text{fait parti de } D_{I,E} \text{ et } I(i, j) = \emptyset \} \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

où

- I : est l'image traitée,
- E : est l'élément structurant,
- $\wedge$: est l'opérateur logique ET,
- $D_{I,E}$: est le domaine de l'image I sur lequel E est appliqué,
- $I(i, j)$: est la luminosité du pixel (i, j) .

La dilatation s'effectue comme suit. L'origine de l'élément structurant E est déplacé vis-à-vis chaque pixel noir de D_{1E} . Pour chaque pixel noir de I situé vis-à-vis l'origine de E , on effectue l'opération ET logique entre E et I . La luminosité des pixels (i,j) de I situés sous la projection de E sur I correspondra au résultat de l'opération ET.

L'opération DILATATION utilise une image I avec une ou des régions noires, un élément structurant E , deux entiers i et j , et produit une image $I^{(-1)}$ dont les régions noires ont été dilatées.

$$I^{(-1)} = \text{DILATATION}[I, E] \quad (3.6)$$

A titre d'exemple, pour l'image et l'élément structurant de la figure 3.7, l'image dilatée $I^{(-1)}$, obtenue suite à une itération, est présentée à la figure 3.9.

3.2.2 Evaluation de la maturité des champignons.

Pour évaluer la maturité des champignons, nous avons utilisé, comme critère, la taille apparente des champignons. Plutôt que d'évaluer la taille de chaque champignon de l'image, nous avons dilaté les contours noirs des champignons suffisamment pour éliminer de l'image les champignons trop petits pour être cueillis. Le nombre de dilatations à

effectuer n est calculé en fonction de la taille du plus petit champignon à cueillir. Les champignons restants, dans l'image $I^{(-n)}$ produite, sont alors tous à cueillir.

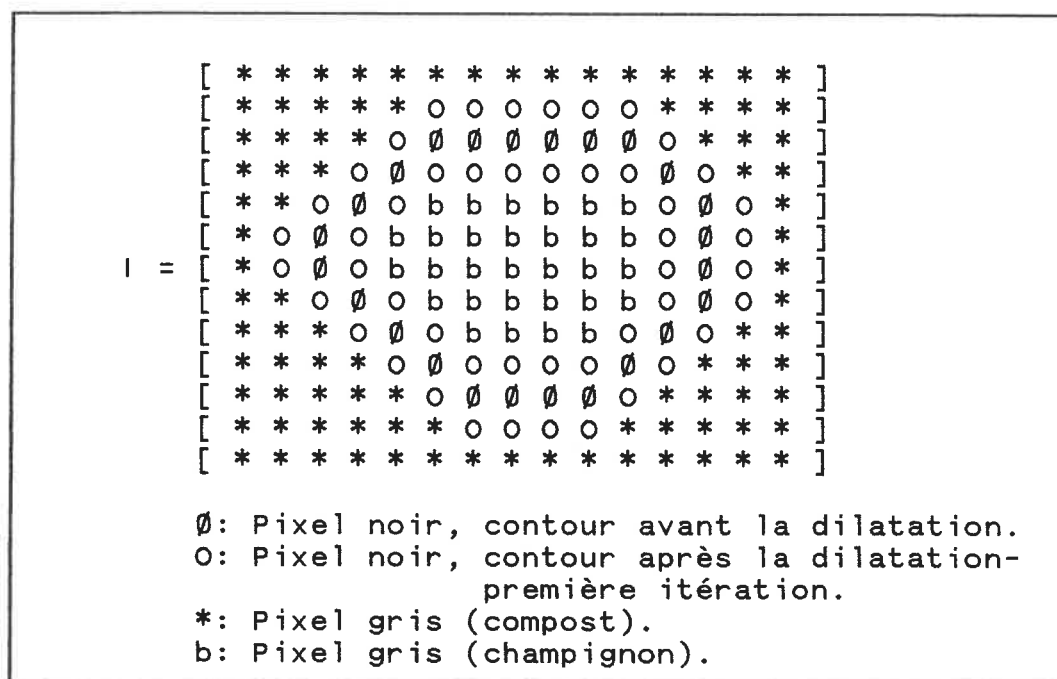


Figure 3.9 Image dilatée de la figure 3.7 après une itération.

Le traitement morphologique se résume alors à trois étapes:

- a) déterminer la taille du plus petit champignon à cueillir,
- b) calculer le nombre de dilatations n nécessaires,

c) et effectuer les n dilatations.

L'image produite, voir figure E.7 page 151, est une image où le noir ($l(i,j)=0$) représente les contours des champignons dilatés, le gris foncé ($l(i,j)=40$) représente le compost et le gris pâle ($l(i,j)=100$) représente les champignons. Le traitement morphologique fait disparaître de l'image les teintes grises intermédiaires qui correspondaient à la périphérie des couronnes des champignons.

Devons-nous restituer les contours à leurs positions initiales?

Non. Car ce qui nous intéresse n'est pas d'obtenir la dimension exacte ou la dimension maximale des champignons à cueillir. Tout ce qui nous intéresse, c'est de les localiser. Puisque les dilatations sont effectuées de façon uniforme sur toute la périphérie des champignons, la forme résultante après les n dilatations peut servir aussi bien à localiser le champignon que la forme initiale.

3.3 Binarisation de l'image.

La binarisation de l'image est définie comme une opération qui consiste à rendre chaque pixel de l'image, soit blanc, soit noir, selon un seuil de luminosité déterminé. Lorsque l'image traitée comprend des objets qui sont nettement plus pâles que l'arrière-plan, alors la binarisation avec seuil de luminosité est une méthode naturelle pour extraire ces objets.

3.3.1 Description générale.

A partir d'une image composée de plusieurs teintes de gris, la binarisation produit, dans notre cas, une image noire et blanche dans laquelle l'objet d'intérêt est blanc et l'arrière-plan noir.

L'opération de binarisation utilise une image I et une valeur de seuil de luminosité s_l . Le résultat est une image uniquement noire et blanche sans aucun gris. L'opération binarisation est définie comme suit:

$$\text{BIN}[I, s_l](i, j) = \begin{cases} 1, & \text{si } I(i, j) \geq s_l \\ \emptyset, & \text{si } I(i, j) < s_l \end{cases} \quad (3.7)$$

Par exemple, la binarisation d'une image selon un seuil de luminosité s_l s'effectuera comme suit: toutes les valeurs de luminosités plus grandes ou égales à s_l seront remplacées par 1 (blanc) et les valeurs restantes seront remplacées par 0 (noir).

L'histogramme de l'image obtenue par le traitement morphologique correspond à une distribution bimodale, voir figure E.8 page 152. Le premier mode (gris foncé) correspond aux contours dilatés et au compost. Le second mode (gris pâle) correspond aux champignons. La vallée entre les deux modes correspond aux teintes de gris intermédiaire éliminées par la dilatation. En choisissant le seuil de luminosité comme étant au centre de la vallée, on minimise la probabilité de confondre les champignons avec le compost.

3.4 Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode pour déceler les contours des champignons ainsi qu'une méthode, le traitement morphologique, pour détecter les champignons à cueillir.

CHAPITRE 4

LOCALISATION DES CHAMPIGNONS

Dans ce chapitre, nous présentons la méthode utilisée pour localiser les champignons présents dans l'image binarisée. Plus particulièrement, nous présentons une méthode pour déterminer le centroïde d'un champignon. Finalement, nous présentons une opération d'élimination de champignons. Cette opération assure le bon fonctionnement de la méthode de localisation des champignons.

4.1 Localisation d'un champignon.

La localisation débute par la recherche des formes des champignons dans l'image binarisée. Cette recherche consiste à balayer l'image, du haut vers le bas, afin de trouver un pixel blanc. Lorsqu'un pixel blanc est trouvé, on a alors trouvé les coordonnées d'un point, situé dans la partie supérieure, d'un champignon. Une fois cette étape complétée, la localisation se poursuit par le calcul du centroïde du

champignon.

4.1.1 Calcul du centroïde d'une surface.

Considérons une surface divisée en n petits éléments où x_1, y_1 ; x_2, y_2 ; etc; sont les coordonnées de ces n éléments. Nous pouvons écrire les équations du moment statique de la surface A par rapport aux axes x et y comme suit:

$$x_c = \frac{\sum x \, dA}{A} \qquad y_c = \frac{\sum y \, dA}{A} \qquad (4.1)$$

où A est l'aire de la surface,
 dA est l'aire d'un élément de surface (pixel),
 (x_c, y_c) est le centroïde de la surface.

Ces équations nous donnent les coordonnées x_c et y_c du centroïde de la surface.

4.2 Elimination du champignon localisé.

L'opération "élimination du champignon localisé" est une opération complémentaire à la recherche de champignons.

Une fois qu'un champignon est localisé, la recherche de champignons se poursuit. Comment allons-nous éviter de trouver un second point du champignon venant d'être localisé?

Pour ne pas trouver un second point du champignon localisé, nous éliminons le champignon de l'image.

A l'aide du centroïde et des dimensions de la forme du champignon, obtenues à partir du calcul du centroïde, on remplit de noir la région de l'image correspondant au champignon localisé.

La région remplie de noir doit être suffisamment grande pour couvrir le champignon localisé mais assez petite pour ne pas couvrir les champignons voisins. Pour simplifier l'algorithme, nous avons utilisé une région rectangulaire pour couvrir les champignons localisés. Par rapport à la forme d'un champignon, l'utilisation d'une région circulaire serait plus adaptée mais rendrait l'algorithme plus complexe.

4.3 Conclusion.

Nous avons présenté une méthode pour déterminer le centroïde de chaque champignon à cueillir indépendamment de leurs dispersions.

CHAPITRE 5

METHODES POUR SOLUTIONNER LE PROBLEME DE L'ORDONNANCEMENT DES DEPLACEMENTS POUR LA CUEILLETTE AUTOMATIQUE DE CHAMPIGNONS

Ce chapitre porte sur la troisième partie de l'algorithme de planification de la cueillette de champignons, l'ordonnancement des déplacements. A partir des coordonnées des champignons localisés, l'opération ordonnancement produit une liste des champignons à cueillir dans l'ordre afin de minimiser le parcours total. Cette optimisation correspond en fait à solutionner un problème mieux connu sous le nom de "Problème du commis voyageur" (PCV).

Ce chapitre débute par une description et une formulation générale du PCV. Puis, nous présentons différentes méthodes exactes et approximatives pour solutionner le PCV. Finalement, nous présentons la méthode utilisée dans l'algorithme de planification de la cueillette de champignons.

5.1. Description du problème du commis voyageur.

Le PCV se présente comme suit: Si un commis voyageur, partant de sa résidence, doit visiter chacune des villes de sa liste exactement une fois et retourner dans sa ville, il est possible pour lui de choisir l'ordre dans lequel il visitera les villes de façon à minimiser le trajet à parcourir. En supposant qu'il connaît les distances entre chaque ville, alors, il peut déterminer cet ordre.

Dans notre cas, le commis voyageur est l'outil utilisé pour saisir les champignons, les villes sont les champignons, la distance entre deux villes est la distance entre deux champignons et l'ordre de visites des villes est l'ordre de saisies des champignons que l'on appellera "tour".

Présenté de cette façon, le choix du parcours à effectuer pour saisir tous les champignons d'une caisse est une application pratique du PCV.

5.2. Formulation générale du problème du commis voyageur.

La formulation du PCV présentée est inspirée de Bellmore et Nemhausser [23] et de Hardgrave et Nemhausser [24]. Dans

le PCV, on a un nombre de villes à visiter n et une matrice carrée $C = [c_{ij}]$ de dimension n , où c_{ij} est la distance entre la ville i et j et c_{ij} satisfait:

- a) $c(i,j) = c(j,i)$ pour tout i et j , aussi appelé "PCV symétrique",
- b) $c(i,j) \geq 0$ pour tout i et j ,
- c) $c(i,j) + c(j,k) \geq c(i,k)$ pour tout i, j, k ,
aussi appelé inégalité triangulaire.

Toute séquence de $n+1$ entiers pris de $(1, 2, \dots, n)$, dans laquelle chacun des n entiers apparaît exactement une fois et que le premier et le dernier entier sont identiques, est appelée un tour. Un tour t peut s'exprimer comme suit:

$$t = (i_1, i_2, i_3, \dots, i_{n-1}, i_n, i_1). \quad (5.1)$$

Un tour est une solution possible au PCV.

Une solution optimale au PCV est un tour t' tel que la somme des distances $z(t)$ pour chaque couple (i,j) soit minimale

$$\text{où } t' = [(i_1, i_2), (i_2, i_3), \dots, (i_{n-1}, i_n), (i_n, i_1)] \quad (5.2)$$

$$z(t) = \sum_{(i,j) \in t'} c_{ij} \quad (5.3)$$

5.3 Revue des méthodes de solution actuelles.

A la fin des années 60, on observa qu'il semblait y avoir une différence significative entre les "Hard Problems" à croissance exponentielle comme le PCV pour lequel les algorithmes d'optimisation étaient de nature énumérative et les "Easy Problems" tel que les problèmes d'assignation et de transport pour lesquels de bons algorithmes existaient. Un bon algorithme est décrit comme un algorithme dont le temps d'exécution augmentait au plus de façon polynomiale avec la dimension du problème.

D'autres travaux en informatique pendant les années 70, portant sur la complexité des algorithmes ont renforcé l'idée que l'existence d'un algorithme de nature polynomiale pour solutionner le PCV serait fort peu probable. Le PCV fut alors qualifié de "NP-Hard (Non-Polynomial)".

En conséquence, deux types de stratégies peuvent être appliquées à ce type de problème. La première porte sur la recherche de la solution optimale, au risque de prendre énormément de temps, alors que la seconde porte sur la recherche d'une solution quasi-optimale dans un temps raisonnable. Nous présentons les principales méthodes suivant

l'une et l'autre des deux stratégies.

5.3.1 Méthodes optimales.

La publication fondamentale de Dantzig, Fulkerson et Johnson [25] a été la source d'inspiration de nombreux chercheurs. Cette publication présenta la programmation linéaire comme outil pour solutionner le PCV. La méthode utilisée est appelée, aujourd'hui, "Branch and Bound".

Une autre méthode énumérative d'optimisation, la technique de programmation dynamique, peut aussi être utilisée. Toutefois, l'énorme quantité de mémoire nécessaire fait que la programmation dynamique ne peut solutionner que des problèmes de dimension relativement petite.

En pratique, la recherche d'une solution approximative est beaucoup plus utilisée. Suite à leur performance intéressante, plusieurs méthodes approximatives ont été développées dans les années 60.

Les méthodes heuristiques utilisées peuvent être divisées selon qu'elles construisent une solution possible, section 5.3.2, ou selon qu'elles tentent systématiquement d'améliorer

une solution existante, section 5.3.3.

5.3.2 Heuristiques de construction de tours.

Ici, on présente les résultats de trois études tirées de la littérature. La première de Rosenkrantz et ass. [26] analyse quelques heuristiques d'un point de vue "pire cas". La seconde de Golden et ass. [27] analyse plusieurs heuristiques d'un point de vue empirique. La troisième de Adrabinski et Syslo [27] analyse aussi quelques heuristiques d'un point de vue empirique.

a) Etude de Rosenkrantz et ass.

L'algorithme Nearest Neighbor permet d'obtenir dans le pire cas un ratio solution/optimale plus petit ou égale à $\lceil \ln(n) \rceil + 0.5$ où n est le nombre de villes et $\lceil x \rceil$ signifie le plus petit entier plus grand ou égale à x .

Pour les algorithmes Nearest Insertion et Cheapest Insertion le ratio solution/optimale, dans le pire cas, est plus petit ou égale à 2 .

Pour l'algorithme Farthest Insertion, les résultats empiriques, suite à une série d'expériences, ont démontrés que cet algorithme construisait des tours d'une petite longueur que les algorithmes d'insertion et l'algorithme Nearest Neighbor.

Toujours dans le pire cas, c'est la méthode de Christofides [28] qui donne le meilleur résultat avec un ratio solution/optimal plus petit ou égale à 1.5 . Cette limite supérieure est le meilleur résultat obtenu jusqu'à aujourd'hui. Toutefois, le temps de calcul est de l'ordre n^3 , ce qui est plus lent que les algorithmes Nearest Neighbor et Nearest Insertion qui sont d'ordre n^2 .

Bien que, dans le pire cas, l'algorithme Nearest Neighbor devient progressivement pire que les algorithmes d'insertion, aucune indication de cette tendance n'a été observée lors des expériences. A titre d'exemple, pour un problème de 2000 points, l'algorithme Nearest Neighbor a mieux fait que l'algorithme Nearest Insertion.

En conclusion, les auteurs ont constaté que la performance des algorithmes n'est pas vraiment liée à leur comportement dans le pire cas.

b) Etude de Golden et ass.

Dans cette étude, 5 problèmes de 100 villes chacun sont solutionnés par une pléiade d'heuristiques de construction et/ou d'amélioration de tours. Les résultats représentent, en pourcentage, le dépassement au-delà de la solution optimale. Le tableau 5.1 résume les résultats des algorithmes de construction de tours.

Golden et ass. concluent, premièrement, que plusieurs des procédures de construction de tours trouvent une solution en dedans de 5 à 7% de l'optimale.

Deuxièmement, la plupart des algorithmes étudiés sont performants par rapport au temps de calcul.

Troisièmement, ils suggèrent l'utilisation de ces algorithmes lorsqu'une solution performante et raisonnable est désirée.

Algorithmes	Meilleur (%)	Pire (%)
	Résultat	Résultat
Farthest Insertion	1.99	7.42
Christofides Algo.	3.93	14.44
Nearest Neighbor	13.27	16.88
Cheapest Insertion	11.67	20.83
Nearest Insertion	14.44	22.96

Tableau 5.1 Pourcentage au-delà de la solution optimale.
Méthodes de construction de tours. Etude
de Golden et Ass.

c) Etude de Adrabinski et Syslo.

Cette étude porte sur une douzaine de problèmes de dimensions variant entre 10 et 120 villes. Les résultats représentent, en pourcentage, le dépassement au-delà de la solution optimale. Le tableau 5.2 présente les résultats du plus gros problème, le numéro 12 avec 120 villes.

Les auteurs concluent que la méthode Farthest Insertion est supérieure aux trois autres heuristiques, soit, dans 11 cas sur 12.

Algorithmes

Problème No. 12 / Dimension: 120

Farthest Insertion	3.06
Nearest Insertion	17.27
Nearest Neighbor	18.77
Nearest Addition	21.78

Tableau 5.2 Pourcentage au-delà de la solution optimale
Méthodes de construction de tours. Etude de
Adrabinski et Syslo.

5.3.3 Heuristiques d'amélioration de tours.

Dans cette catégorie, on retrouve le fameux algorithme "Edge Exchange Procedure" ou "r-opt" de Lin [29] et Lin et Kernighan [22].

L'étude de Golden et ass. rapporte les résultats de tests avec les algorithmes 2-opt (meilleur résultat de 25 essais) et 3-opt (essai unique). Les résultats représentent, en pourcentage, le dépassement au-delà de la solution optimale. Le tableau 5.3 résume les résultats.

Les auteurs concluent que ces algorithmes avec des solutions de départ aléatoires permettent d'obtenir des

résultats se comparant aux résultats des meilleures méthodes de construction de tours.

Algorithmes	Meilleur (%)	Pire (%)
	Résultat	Résultat
2-opt (meilleur de 25 essais)	0.51	3.27
3-opt (un seul essai)	1.15	7.82

Tableau 5.3 Pourcentage au-delà de la solution optimale.
Méthodes d'amélioration de tours.

5.3.4 Heuristiques hybrides.

En complément à l'étude des méthodes de construction et d'amélioration de tours, Golden et ass. ont présenté les résultats de méthodes combinées. Une combinaison est formée par l'application d'une méthode de construction de tour pour obtenir une solution initiale, suivie d'une méthode d'amélioration de tours, puis d'une seconde méthode d'amélioration de tours différente dans certains cas.

Ils en concluent que la combinaison de trois méthodes permet de trouver très fréquemment une solution entre 2 et 3% de l'optimale. Toutefois, ces méthodes combinées sont moins

performantes par rapport au temps de calcul.

Finalement, pour trouver une solution entre 1 et 2% de l'optimale, ils suggèrent d'appliquer à nouveau les méthodes combinées plusieurs fois.

5.4 Choix d'un algorithme d'ordonnement.

A partir des résultats des études précédentes, nous constatons que:

- 1- L'utilisation d'une méthode de solution optimale semble fort inappropriée pour la cueillette de champignons étant donné la grande dimension du problème résultant ainsi qu'au temps de calcul disponible limité.
- 2- A la lumière de la section 5.3.4, l'usage d'une méthode hybride semble inappropriée quant à la trop grande précision des solutions et des temps de calculs en résultant.
- 3- A la lumière de la section 5.3.3, l'algorithme 2-opt semble beaucoup moins performant que l'algorithme

3-opt. Toutefois, le 3-opt n'est pas vraiment plus performant que les meilleures méthodes de construction de tours et il est plus complexe à implanter. Pour ces deux raisons, nous avons préféré une méthode de construction de tour à une méthode d'amélioration de tour.

- 4- Finalement, suite aux conclusions des études de Rosenkrantz et ass. et de Adrabinski et Syslo, la performance de l'algorithme Farthest Insertion face aux algorithmes Nearest Neighbor, Nearest Insertion, Cheapest Insertion et Nearest Addition semble supérieure.

Nous avons donc retenu l'algorithme Farthest Insertion pour solutionner les PCV résultant de la planification de la cueillette de champignons parce qu'il permet d'obtenir une solution quasi-optimale avec un temps de calcul performant.

5.5 Algorithme Farthest Insertion.

Comme pour la plupart des algorithmes de construction de tours, l'algorithme Farthest Insertion comprend les trois parties suivantes:

- 1- le choix d'un tour partiel initial (ou point de départ),
- 2- un critère de sélection,
- 3- un critère d'insertion.

Dans plusieurs algorithmes de construction de tours, le tour partiel initial est seulement une ville choisie au hasard.

De plus, l'algorithme Farthest Insertion fait une distinction entre la sélection de la ville à insérer dans le tour partiel courant et la sélection de l'endroit où la ville choisie sera insérée.

Algorithme Farthest Insertion.

Etape 1. Débuter avec un tour partiel initial consistant en un point de départ i , par exemple $(0,0)$.

Etape 2. Trouver le champignon k tel que le déplacement c_{ik} soit maximal et former le tour partiel (i,k) .

Etape 3. Critère de sélection:

A partir du tour partiel, trouver le champignon k , à l'extérieur du tour partiel, étant le plus éloigné de chacun des champignons inclus dans le tour partiel.

Etape 4. Critère d'insertion:

Trouver l'arête (i,j) dans le tour partiel minimisant $c_{ik}+c_{kj}-c_{ij}$. Insérer le champignon k entre i et j .

Etape 5. Retourner à l'étape 3. jusqu'à l'obtention d'un circuit Hamiltonien.

5.6 Discussion et conclusion.

Le fait que le PCV est "NP-Hard" implique qu'il est peu probable de trouver un algorithme performant pouvant garantir de trouver la solution optimale lorsque le nombre de villes est grand. Dès lors, un compromis s'impose: trouver une solution rapidement ou trouver la solution optimale, mais non les deux.

Les applications du PCV sont nombreuses. Pour des applications de routes de livraison, entre plusieurs villes

éloignées, les efforts sont normalement portés sur l'obtention de la solution optimale qui servirait pendant de nombreuses années.

La cueillette de champignons fait partie d'une classe d'applications devant être solutionnées en temps réel. On doit souligner qu'à notre connaissance, cette classe n'a pas été discutée dans la littérature jusqu'à présent. Ceci peut s'expliquer par le fait que cette classe d'applications est diamétralement opposée aux applications conventionnelles du PCV.

Etant donné la classe d'applications auquel appartient la cueillette de champignons, un temps de calcul rapide a été préféré à l'obtention de la solution optimale. Pour notre projet, une solution de l'ordre de 5 à 10% de l'optimale s'avère raisonnable étant donné que le temps de déplacement lors de la cueillette correspondra, approximativement, à 25% du temps total d'opération. La solution obtenue est donc de l'ordre de 1.25 à 2.5% du temps total d'opération optimal.

Donc, pour les raisons présentées à la section 5.4, nous avons donc retenu l'algorithme Farthest Insertion pour résoudre le PCV appliqué à la planification de la cueillette de champignons.

CHAPITRE 6

EXPERIMENTATION

Dans ce chapitre, nous présentons le programme expérimental de vérification des performances de l'algorithme de planification de la cueillette de champignons. Puis, nous présentons une description des modules qui composent l'algorithme de planification. Finalement, nous présentons les équipements utilisés.

6.1 Programme expérimental.

Le programme expérimental est conçu pour vérifier la fiabilité des méthodes de traitement d'images et pour déterminer la performance de l'algorithme de planification de la cueillette de champignons.

6.1.1 Module de détection des contours.

La performance de la méthode de détection de contours, présentée au chapitre 3, dépend de plusieurs paramètres qui sont présentés ci-dessous et qui sont l'objet d'une évaluation expérimentale, soit:

- a) Le facteur d'amplification f_a .
- b) Le seuil de différence de luminosité moyenne s_d .
- c) La dimension des voisinages du masque.

Les valeurs de facteur d'amplification et de seuil de différence influencent très peu le temps d'exécution du module de détection des contours, mais la précision des contours obtenus est directement dépendante de ces deux paramètres. Les valeurs de ces paramètres sont liées à la qualité de l'éclairage des champignons. A partir de l'éclairage disponible pour nos essais, nous avons fait une série de tests pour déterminer les valeurs de f_a et s_d . La valeur du facteur d'amplification f_a a été fixée à 4 et la valeur du seuil de luminosité s_d a été fixée à 50, où 0 correspond à noir et 127 correspond à blanc.

La dimension r des voisinages du masque est le principal paramètre qui influence les résultats car la quantité de

calculs pour déterminer la luminosité moyenne d'un voisinage est de l'ordre r^2 . Nous avons testé la détection de contours pour deux masques. L'un avec des voisinages 3X3 ($r=2$) et le second avec des voisinages 5X5 ($r=3$).

Le but de ces essais est de comparer la fiabilité des masques par rapport aux résultats empiriques de la détection des contours. La fiabilité est définie comme la capacité de détecter les contours de tous les champignons.

6.1.2 Module de traitement morphologique.

La performance de la méthode de dilatation des contours noirs, présentée au chapitre 3, dépend de trois paramètres qui sont présentés ci-dessous, soit:

- a) La densité (horizontale et verticale) en pixels par millimètre.
- b) La taille du plus petit champignon à cueillir en millimètres.
- c) L'élément structurant utilisé.

Avec le système de vision utilisé, les pixels ont une forme rectangulaire. La densité horizontale est donc différente de la densité verticale.

Pour nos essais, nous avons testé un premier élément structurant en forme de croix et un second en forme de carré.

$$E_{\text{croix}} = \begin{bmatrix} \# & \emptyset & \# \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \# & \emptyset & \# \end{bmatrix} \quad E_{\text{carré}} = \begin{bmatrix} \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{bmatrix}$$

Le diamètre du plus petit champignon à cueillir intervient aussi dans les résultats empiriques car il détermine, avec la densité, le nombre d'itérations à effectuer. Nous avons testé deux valeurs, 12 et 37 mm. La première valeur correspond au standard commercial alors que la seconde sert à évaluer la précision des éléments structurants car les balles de tennis sur table (*), utilisées pour simuler les champignons, ont un diamètre de 37.7 mm.

Le but de ces essais est de comparer la fiabilité des éléments structurants. Dans ce cas-ci, la fiabilité est définie comme la capacité d'éliminer de l'image seulement les champignons ayant un diamètre inférieur au diamètre des plus petits champignons à cueillir.

(*) Ces balles ont été utilisées parce qu'elles permettent d'obtenir une image semblable à celle obtenue avec de réels champignons frais (dimensions et aspect de surface).

6.1.3 Module d'ordonnement des déplacements.

La performance de la méthode d'ordonnement des déplacements, présentée au chapitre 5, dépend des deux paramètres suivants:

- a) La méthode de calcul des distances.
- b) Le nombre de champignons à ordonner.

Nous avons défini la distance d_{ij} entre deux points, x_i, y_i et x_j, y_j , comme étant la valeur absolue maximale du déplacement selon l'axe horizontal ou vertical

$$d_{ij} = \text{MAX}[\text{ABS}(x_i - x_j), \text{ABS}(y_i - y_j)] \quad (6.1)$$

où $\text{ABS}(u)$: est la valeur absolue de "u".

Cette définition suppose que les déplacements de l'outil s'effectue dans le plan horizontal selon deux axes orthogonaux motorisés de même puissance. Les distances sont calculées en mm. Nous avons testé ce module avec une série de points à ordonner en calculant les distances entre eux selon la définition présentée.

Le but de ces essais est d'obtenir des résultats empiriques pour évaluer la performance de l'algorithme Farthest Insertion.

6.1.4 Algorithme de planification de la cueillette de champignons.

Finalement, nous avons testé l'ensemble des modules qui composent l'algorithme de planification. Le but de ces essais est d'obtenir des résultats empiriques pour évaluer la performance de l'algorithme dans des applications en temps réel.

6.2 Description des modules de l'algorithme de planification.

6.2.1 Modules de base.

Les modules de base permettent aux autres modules de communiquer avec le système de vision. Voici les fonctions des quatres modules utilisés:

- 1 - Initialiser le processus de numérisation de l'image,
- 2 - Numériser l'image,

- 3 - Obtenir la valeur de la luminosité d'un pixel de l'image,
- 4 - Attribuer une valeur de luminosité à un pixel de l'image.

6.2.2 Module de calibration du système de vision.

Le module de calibration contient une procédure de calibration du système de vision. C'est une opération importante pour le bon fonctionnement des modules suivants.

L'opération de calibration consiste à calculer la densité horizontale d_h et la densité verticale d_v de pixels comme suit:

$$d_h = \frac{\text{ARETE HORIZONTALE DU CARRE EN PIXELS}}{\text{ARETE DU CARRE EN MM.}} \quad (6.2)$$

$$d_v = \frac{\text{ARETE VERTICALE DU CARRE EN PIXELS}}{\text{ARETE DU CARRE EN MM.}} \quad (6.3)$$

6.2.3 Algorithme de planification de la cueillette.

L'algorithme de planification de la cueillette automatique des champignons se compose des modules présentés dans l'organigramme de la figure 6.1.

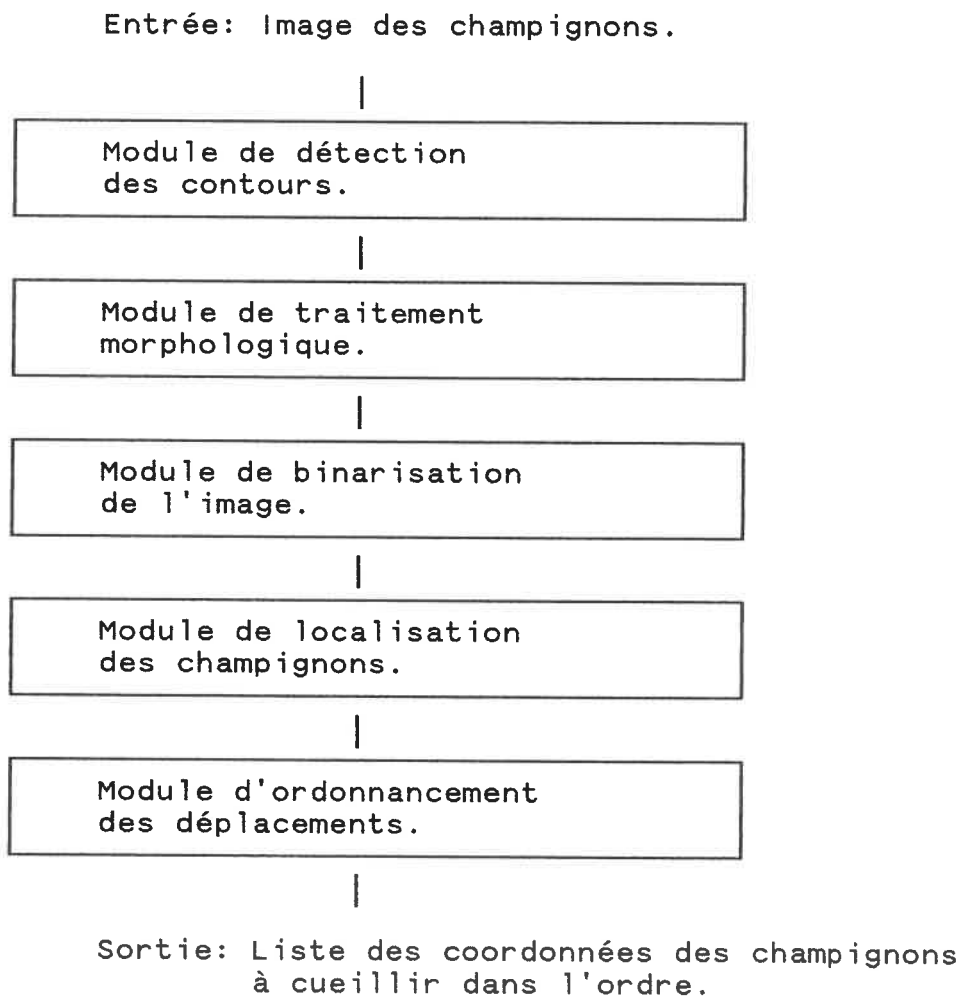


Figure 6.1 Organigramme de l'algorithme de planification de la cueillette automatique de champignons.

6.2.4 Module de détection des contours.

Nous avons testé deux masques. L'un ayant un voisinage de dimension 3X3 et le second 5X5. Suite à l'extraction des contours, nous avons utilisé un masque 3X3 pour effectuer l'amincissement des contours. La figure 6.2 présente l'organigramme du module de détection des contours.

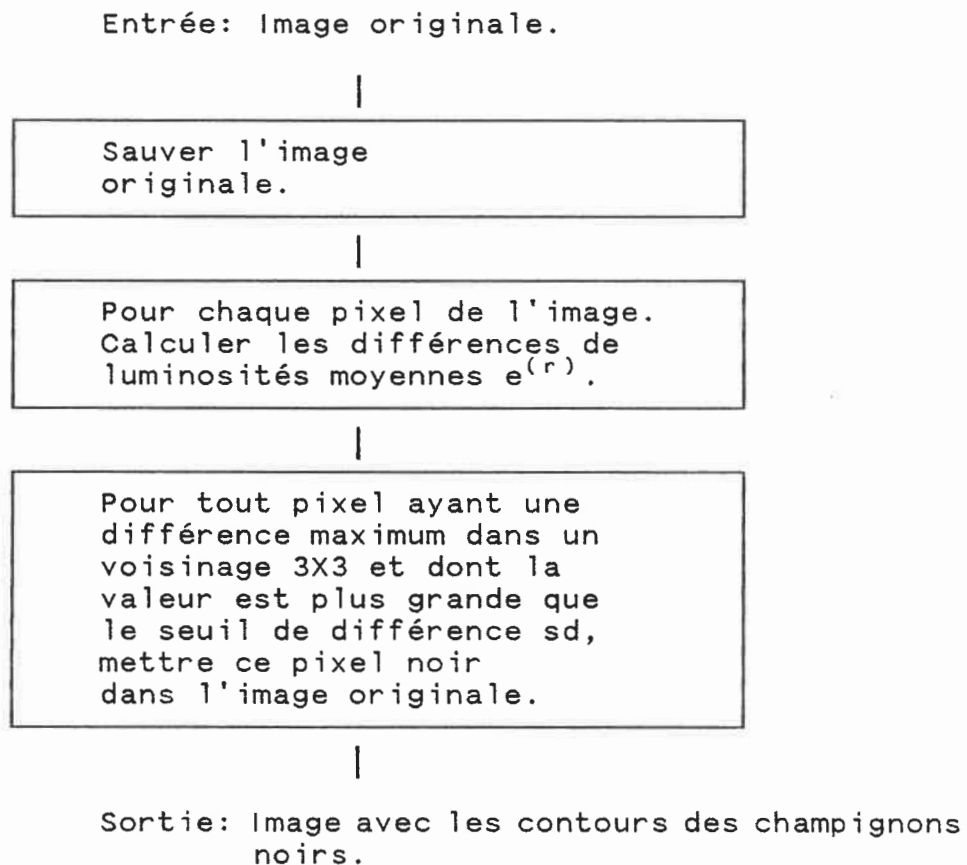


Figure 6.2 Organigramme du module de détection des contours.

6.2.5 Module de traitement morphologique.

La dilatation est effectuée à l'aide de deux éléments structurants, la croix et le carré.

La dilatation s'effectue en deux étapes. La première étape consiste en une dilatation horizontale et la seconde étape consiste en une dilatation verticale. La dilatation des contours s'effectue en alternant entre les dilatations horizontales et verticales.

Pour l'élément structurant "croix", les nombres d'itérations horizontales $iter_h$ et verticales $iter_v$ sont obtenus à partir du diamètre du plus petit champignon à cueillir d , soit

$$iter_h = \frac{d * d_h}{2} \quad (6.4)$$

$$iter_v = \frac{d * d_v}{2} \quad (6.5)$$

Tout champignon de diamètre plus petit ou égale à d sera éliminé de l'image. Dans notre cas, la densité horizontale est plus faible que la densité verticale. Nous avons compensé cette différence par une série de $(iter_v - iter_h)$ dilatations

uniquement verticales.

Cette flexibilité n'est pas possible avec un élément structurant carré car on dilate aussi les régions noires selon les diagonales du carré. Pour ne pas favoriser ou défavoriser les régions noires, nous avons fixé le nombre d'itérations à effectuer à la valeur moyenne des itérations horizontales et verticales, soit

$$\text{iterm} = \frac{\text{iterh} + \text{iterv}}{2} \quad (6.6)$$

La figure 6.3 présente l'organigramme du module de traitement morphologique avec la croix et la figure 6.4 présente l'organigramme du module de traitement morphologique avec le carré.

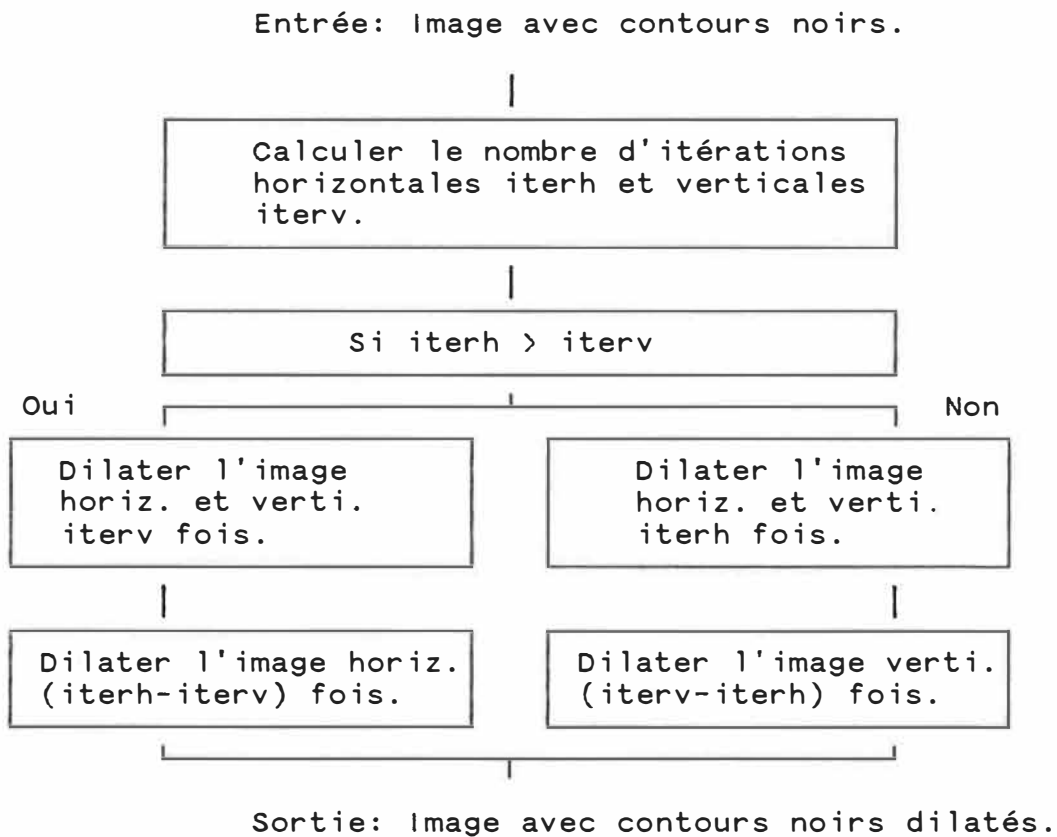


Figure 6.3 Organigramme du module de traitement morphologique.
Element structurant: croix.

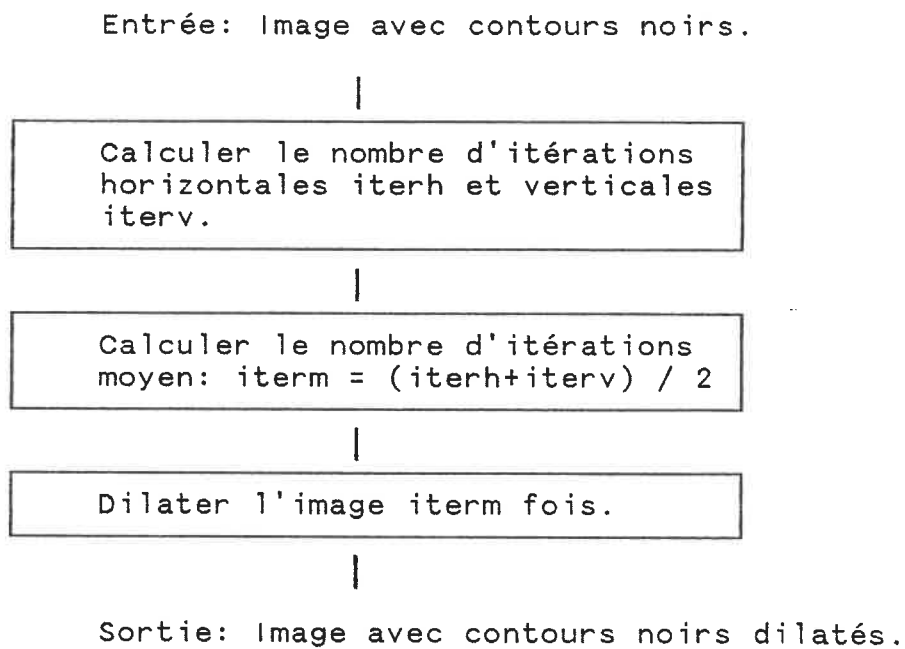


Figure 6.4 Organigramme du module de traitement morphologique.
Element structurant: carré.

6.2.6 Module de binarisation de l'image.

Le module précédant produit une image dont les teintes de gris intermédiaire, situées de part et d'autre des contours, ont été éliminées. L'histogramme bimodale de cette image permet de déterminer le seuil de luminosité s_l pour binariser l'image. La figure 6.5 présente l'organigramme du module de binarisation de l'image.

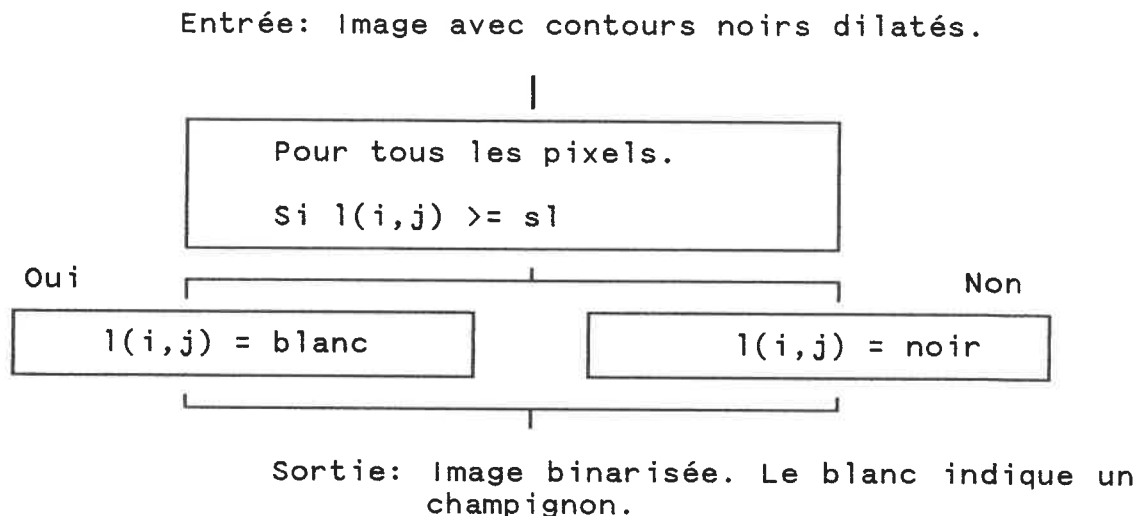


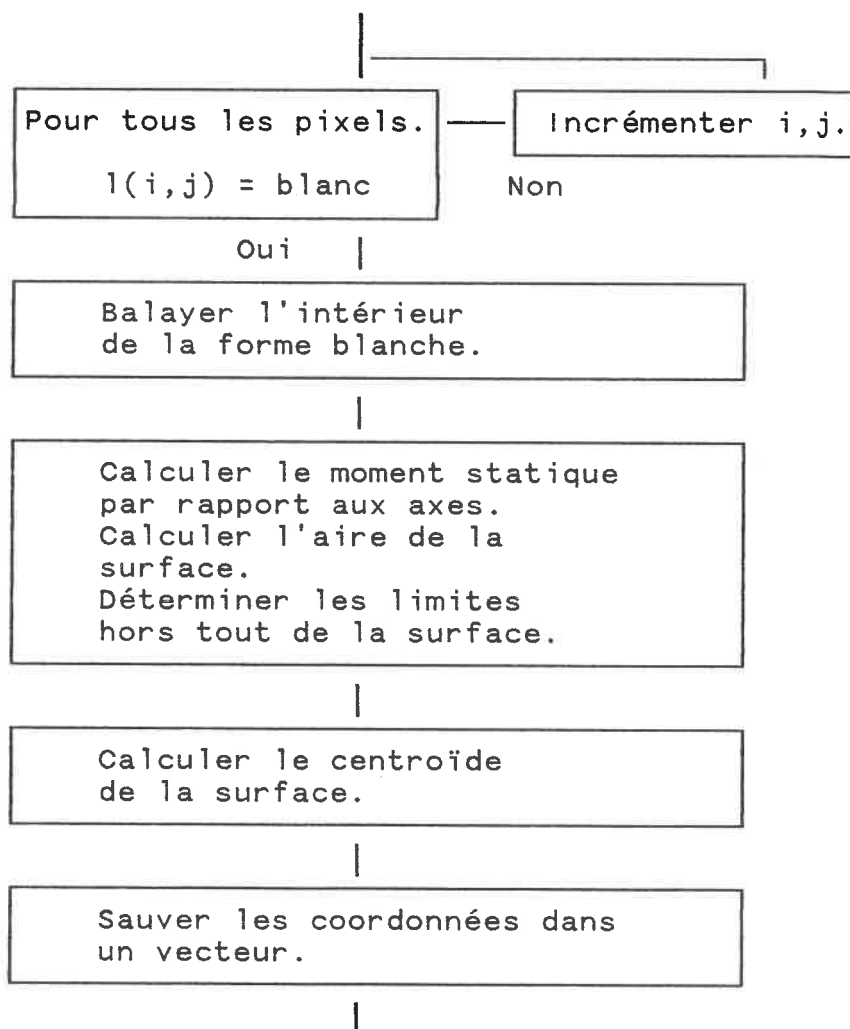
Figure 6.5 Organigramme du module de binarisation de l'image.

6.2.7 Module de localisation des champignons.

La localisation s'effectue en balayant l'image, rangée par rangée, pour trouver un pixel blanc. Lorsqu'un pixel blanc est trouvé, on poursuit le balayage à l'intérieur de la forme blanche pour déterminer le nombre et la position des pixels blancs. Ces valeurs servent au calcul du centroïde du champignon. Nous déterminons aussi le pixel le plus à gauche, le plus à droite et le plus bas pour calculer la dimension du rectangle à remplir de noir, et ce, pour éliminer de l'image le champignon localisé. Suite à une série d'essais, nous avons constaté qu'il fallait ajouter une marge de sécurité aux

dimensions du rectangle pour s'assurer que le champignon soit éliminé de l'image. Nous avons fixé la marge égale au tiers de la taille du plus petit champignon à cueillir. Cette bordure de sécurité, extérieure au rectangle, est également rendue noire. La figure 6.6 présente l'organigramme du module de localisation des champignons.

Entrée: Image binarisée. Le blanc indique un champignon.



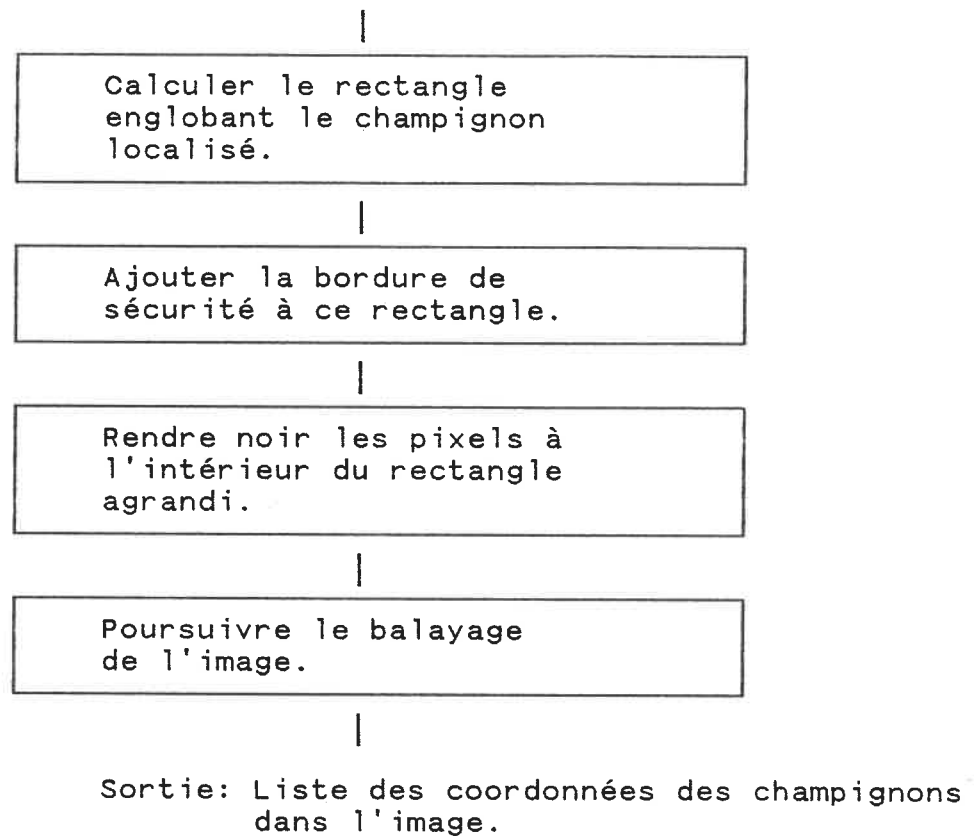


Figure 6.6 Organigramme du module de localisation des champignons.

6.2.8 Module d'ordonnancement des déplacements.

A partir de la liste des coordonnées des champignons et de la densité, nous calculons la matrice des distances entre tous les champignons. Une fois la matrice des distances calculée, nous utilisons l'algorithme "Farthest Insertion" pour calculer un parcours minimum entre un point de départ,

les champignons à cueillir et le retour au point de départ. La section 5.5 présente l'algorithme "Farthest Insertion".

6.3 Banc d'essai.

Une vue d'ensemble des composantes du système de vision est présentée à la figure 6.7. Le système est constitué des éléments suivants:

- a) un micro-ordinateur IBM-AT 6Mhz.
- b) une carte pour numériser l'image vidéo OCULUS-200.
- c) une caméra vidéo PANASONIC WV-1410.
- d) un moniteur vidéo PANASONIC WV-5360.

Pour limiter le temps de traitement d'image, nous avons écrit nos programmes pour qu'ils ne traitent que le quart supérieur gauche de l'image fournie par le système de vision.

Pour simuler la teinte et la forme des champignons dans les lits de culture, nous avons utilisé des balles de tennis sur table de 37.7 mm. de diamètre. Ces balles ont été placées dans une caisse remplie de compost à jardin.

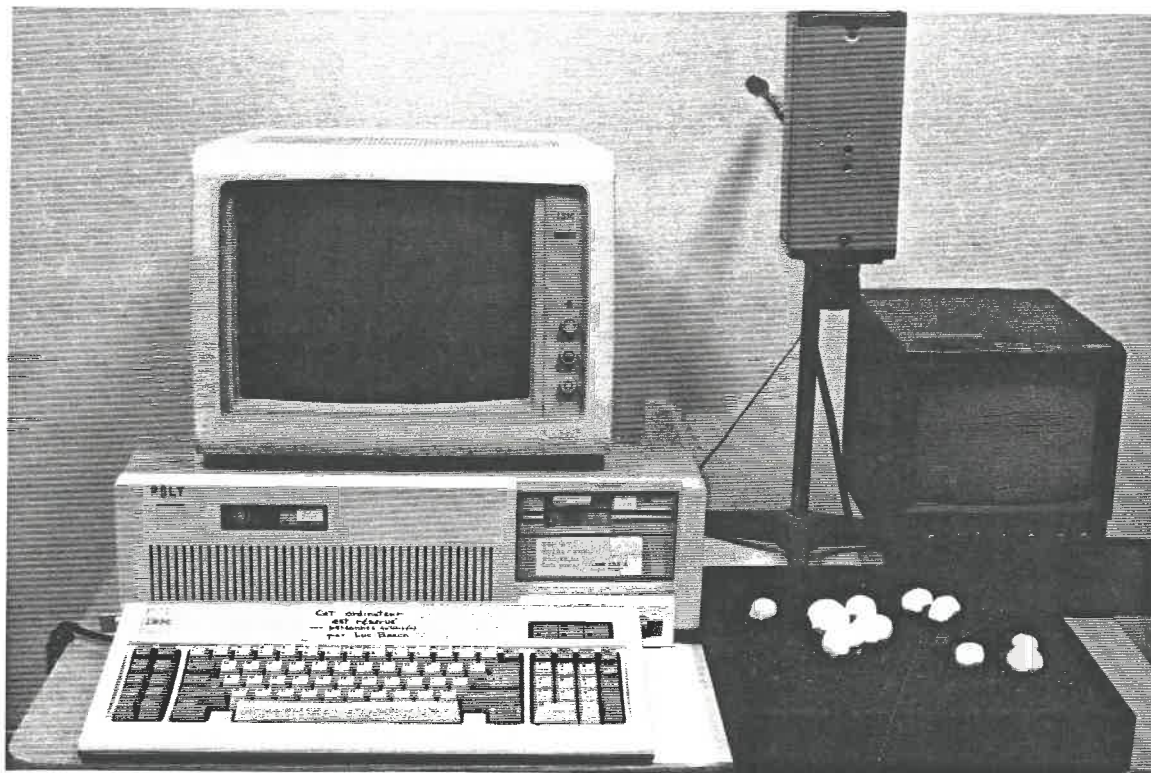


Figure 6.7 Système de vision.

Finalement, les programmes des modules de base ont été compilés avec le compilateur Macro-Assembleur version 5.1 de MICROSOFT et les autres modules ont été compilés avec le compilateur Quick-C version 1.0 de MICROSOFT.

CHAPITRE 7

RESULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, nous présentons et discutons des résultats expérimentaux. Ceux-ci sont présentés de façon à faire ressortir l'effet des différents paramètres sur les performances de l'algorithme. Les résultats sont présentés, sous forme de photos, à l'annexe E.

7.1 Module de détection des contours.

Le but de ces essais est de comparer la fiabilité des masques, tel que définie à la section 6.1.1, par rapport aux résultats de la détection de contours. La figure 7.1 présente les résultats des masques 3X3 et 5X5 pour une image ayant une densité horizontale dh_1 de 1.44 pixel/mm. et une densité verticale dv_1 de 1.84 pixel/mm.

Premièrement, on remarque que le temps d'exécution du module est peu dépendant du nombre de champignons dans

l'image. Ceci est dû au fait que le module calcule la luminosité moyenne de chaque pixel indépendamment du contenu de l'image. Toutefois, l'étape de construction des contours noirs, section 3.1.2, est dépendante du nombre de pixels identifiés comme membres d'un contour. Ceci explique la légère pente positive des courbes.

Deuxièmement, ce graphe n'indique en rien la qualité des contours extraits de l'image. La capacité à produire des contours de qualité est certainement le critère d'évaluation des masques le plus important car les traitements d'images subséquents sont totalement dépendants de la qualité de l'image produite par le module de détection des contours. Un contour de qualité est caractérisé par une suite fermée de pixels noirs, voir figure E.6 page 150. Même si le contour est légèrement discontinu, cela ne cause pas de problèmes parce que la dilatation des contours éliminera les discontinuités. Par contre, si le module de détection de contours ne peut extraire une partie complète d'un contour, voir figure E.12 page 157, les résultats du module de localisation seront erronés, voir figure E.14 page 159, pour les champignons situés dans cette région de l'image.

MODULE DE DETECTION DE CONTOURS

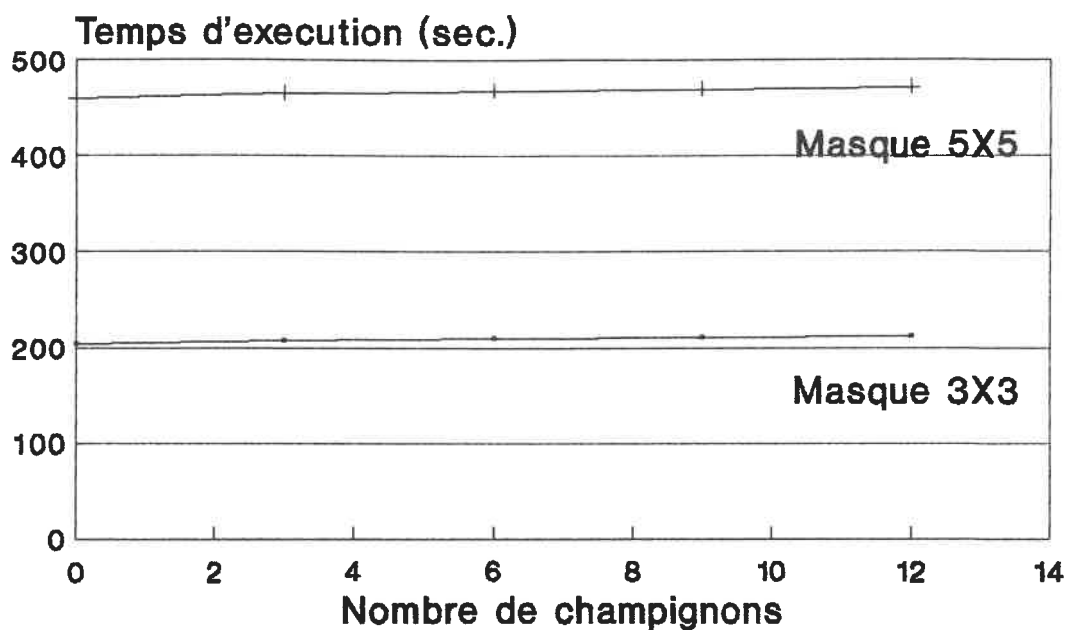


Figure 7.1 Résultats. Module de détection des contours où $dh_1 = 1.44$ pixel/mm., $dv_1 = 1.84$ pixel/mm., $fa = 4$ et $sd = 5\emptyset$.

On constate ici le rôle fondamental de l'éclairage dans un tel système. Toutefois, les résultats ont démontré que dans des conditions d'éclairage permettant de visualiser les

contours sans créer d'ombrage sur les champignons, le masque 5X5, voir figures E.12 page 157 et E.13 page 158, s'est montré plus fiable que le masque 3X3, voir figures E.11 page 156 et E.14 page 159. Evidemment, si les conditions d'éclairage ne permettent d'obtenir aucun contraste entre les champignons, alors, même le masque 5X5 ne peut être fiable. On ne peut extraire que ce que l'on voit!

Finalement, on a noté que la détection précise d'un contour est obtenue lorsque la densité horizontale et la densité verticale sont choisies de façon à ce que l'épaisseur d'un contour corresponde à la taille d'un pixel.

7.2 Module de traitement morphologique des régions noires.

Ces tests ont pour but de déterminer l'élément structurant le plus performant pour effectuer une dilatation précise des contours noirs pour un système de vision ayant des densités horizontale et verticale différentes.

La figure 7.3 présente les résultats empiriques pour les deux éléments structurants testés et pour les deux diamètres minimums de champignons à cueillir. Les résultats ont été obtenus à partir d'images ayant les mêmes densités dh_1 et dv_1 .

de la section précédente.

Premièrement, on constate que le temps d'exécution du module est principalement dépendant de la taille du plus petit champignon à cueillir. Plus la taille est petite, moins grand doit être le nombre d'itérations pour traiter l'image.

Deuxièmement, le temps d'exécution varie linéairement avec le nombre de champignons présents dans l'image. Cela est dû au fait que pour des champignons de taille semblable, le nombre de pixels noirs à dilater est proportionnel au nombre de champignons.

Toutefois, s'il n'y a aucun champignon présent dans l'image, le temps d'exécution correspond seulement aux itérations (balayages) effectuées plutôt qu'aux itérations et aux opérations ET logique entre l'élément structurant et l'image. C'est pourquoi, à la figure 7.3 - pour une image sans champignon, le temps d'exécution avec l'élément structurant carré est inférieur au temps d'exécution avec l'élément croix nécessitant un plus grand nombre d'itérations, section 6.2.5.

Troisièmement, ni l'un ni l'autre des éléments structurants ne semble vraiment plus performant par rapport au temps d'exécution du module.

Quatrièmement, c'est encore les résultats qualitatifs qui nous indiquent l'élément structurant le plus performant. A partir des images où nous avons extrait les contours précis de balles de tennis sur table ayant 37.7 mm., figure 7.2a, nous avons fait des essais de dilatation pour un diamètre de champignons à cueillir de 37 mm.. L'élément structurant "carré" a toujours sur-dilaté les régions noires, figure 7.2b, alors que l'élément structurant "croix" a conservé des formes blanches de quelques millimètres de diamètre, figure 7.2c, pour toutes les balles de tennis sur table qui étaient complètement visibles.

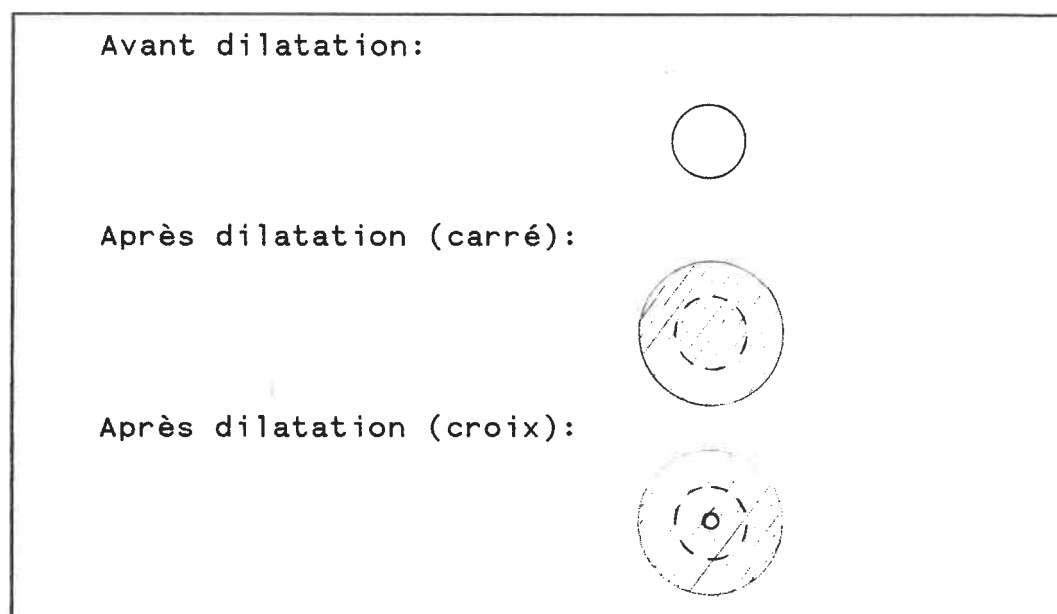


Figure 7.2 Exemple de sur-dilatation.

MODULE DE TRAITEMENT MORPHOLOGIQUE

Dilatation des contours noirs

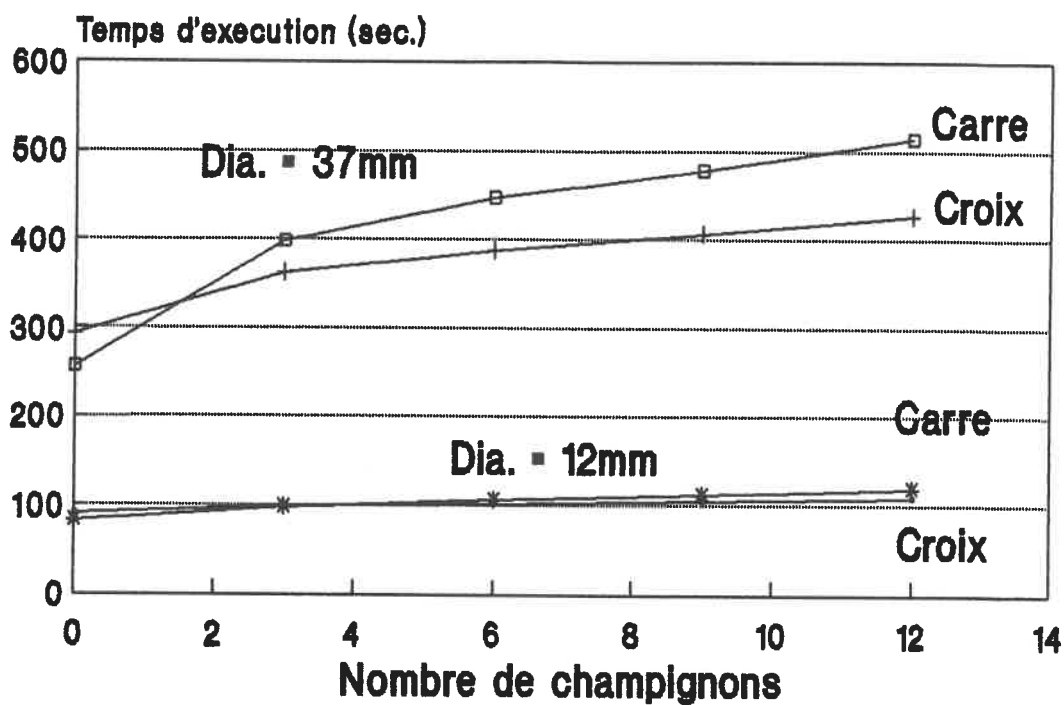


Figure 7.3 Résultats. Module de traitement morphologique, où $dh_1 = 1.44$ pixel/mm., $dv_1 = 1.84$ pixel/mm. et où la détection de contours a été effectuée avec un masque 3X3.

7.3 Module d'ordonnancement des déplacements.

Ces tests ont pour but de déterminer le temps d'exécution du module en fonction du nombre de champignons à ordonnancer. La figure 7.4 présente la courbe du temps d'exécution du module en fonction du nombre de champignons à ordonnancer.

Premièrement, on remarque que le temps d'exécution n'est pas linéaire à cause du nombre de comparaisons lors de l'étape "sélection". Le nombre de comparaisons est donné par

$$\sum_{i=1}^{n-1} i(n-i) .$$

Deuxièmement, le module d'ordonnancement est le module le plus sensible en fonction du nombre de champignons à traiter.

MODULE D'ORDONNANCEMENT DES DEPLACEMENTS

Algorithme Farthest Insertion

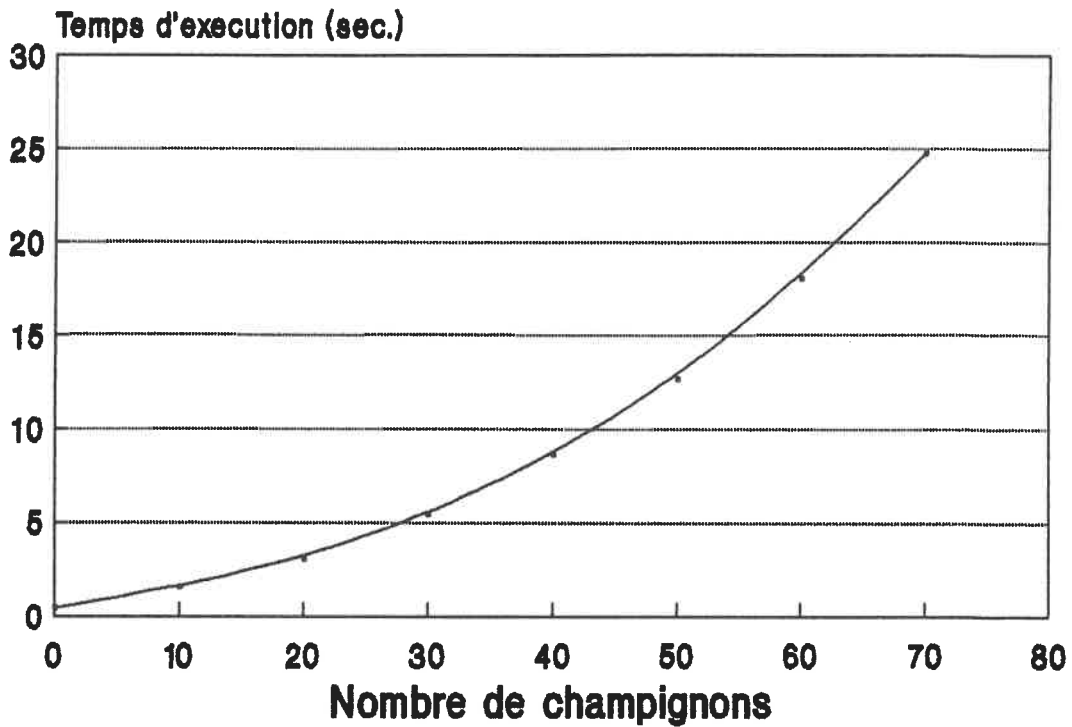


Figure 7.4 Résultats. Module d'ordonnancement des déplacements.

7.4 Algorithme de planification de la cueillette automatique de champignons.

Les tests ont pour but de déterminer le temps d'exécution unitaire, c'est-à-dire par champignon, de l'algorithme de planification en fonction du nombre de champignons à cueillir. La figure 7.5 présente la courbe du temps d'exécution de l'algorithme en fonction du nombre de champignons à cueillir pour les mêmes densités dh_1 et dv_1 de la section 7.1.

Premièrement, la décroissance de la courbe est principalement due à l'amortissement du temps de détection des contours sur un plus grand nombre de champignons.

Deuxièmement, on remarque que le temps d'exécution unitaire atteint une valeur minimale de 21.6 secondes lorsque l'image est remplie de champignons à cueillir (*).

Troisièmement, si les densités dh et dv de l'image étaient plus petites que dh_1 et dv_1 , la courbe correspondante serait située sous la courbe de la figure 7.5. Ceci parce que la dilatation des régions noires nécessiterait moins d'itérations.

(*) Une image de 480×512 pixels, à une densité dh_1 et dv_1 , peut donc contenir environ 65 champignons (dia.=37.7mm).

Quatrièmement, les résultats obtenus sont aussi fonction des équipements utilisés (IBM AT 6MHz). En augmentant la puissance des équipements utilisés, il serait possible de diminuer le temps d'exécution unitaire sous les quatre secondes afin d'envisager une opération en temps réel. Par exemple, on peut envisager l'utilisation d'un micro-ordinateur plus puissant (32 bits, 25MHz) ou on peut envisager d'effectuer la détection des contours et la dilatation des régions noires par "hardware".

La figure 7.6 présente la proportion du temps d'exécution par module pour un masque ayant des voisinages de dimensions 3X3 pour la détection de contours.

ALGORITHME DE PLANIFICATION DE LA CUEILLETTE AUTOMATIQUE DE CHAMPIGNONS

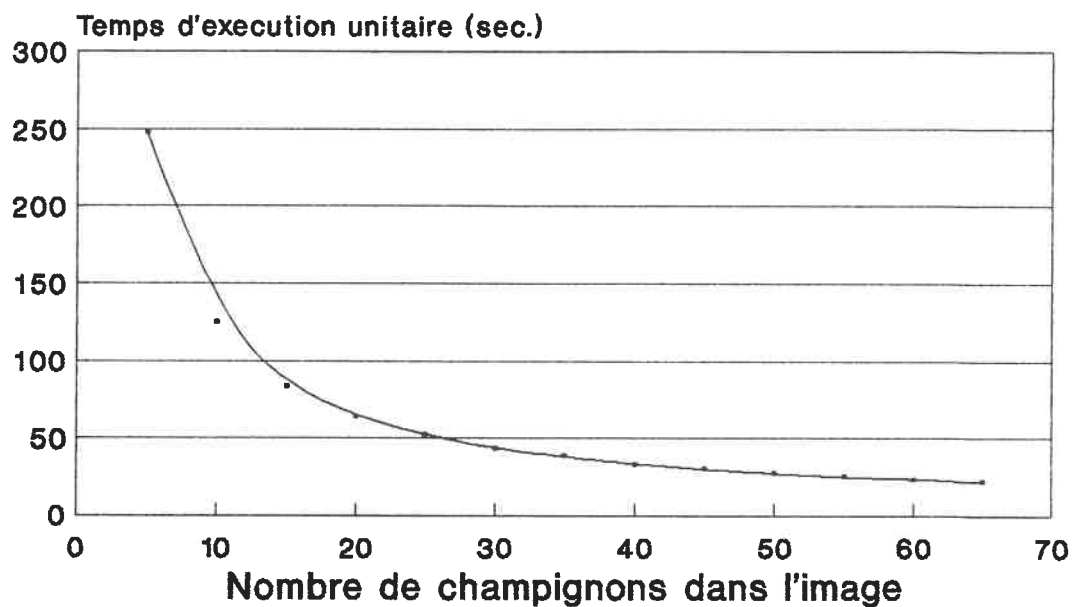


Figure 7.5 Résultats. Algorithme de planification de la cueillette automatique de champignons, où $dh_1 = 1.44$ pixel/mm., $dv_1 = 1.84$ pixel/mm. et où la détection de contours a été effectuée avec un masque 3X3, et la dilatation, avec l'élément structurant "croix" pour un diamètre minimum de 12mm (plus petit champignon à cueillir).

PROPORTION DU TEMPS D'EXECUTION PAR MODULE

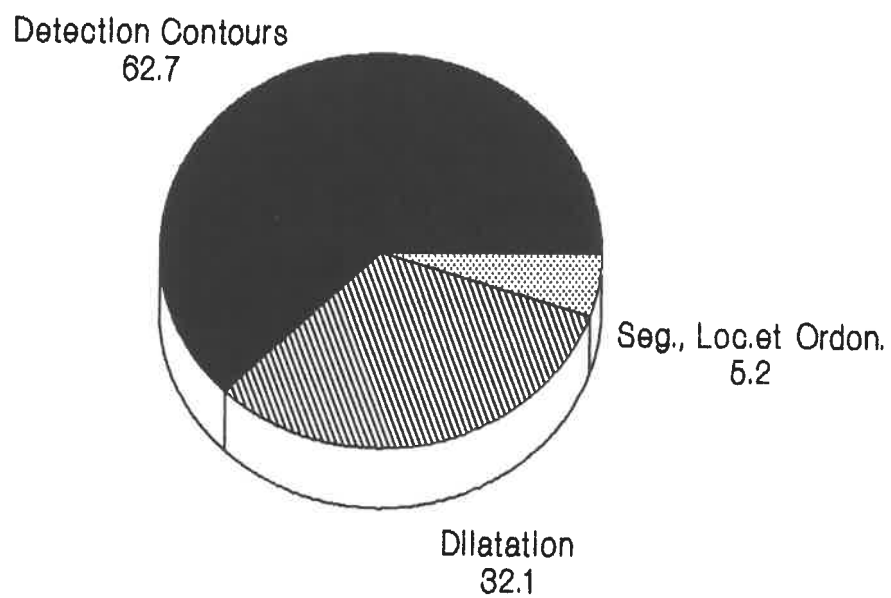


Figure 7.6 Proportion du temps d'exécution par module pour un masque ayant des voisinages de dimensions 3X3 et une image contenant 12 champignons.

La figure 7.7 présente la proportion du temps d'exécution par module pour un masque ayant des voisinages de dimensions 5X5 pour la détection de contours.

PROPORTION DU TEMPS D'EXECUTION PAR MODULE

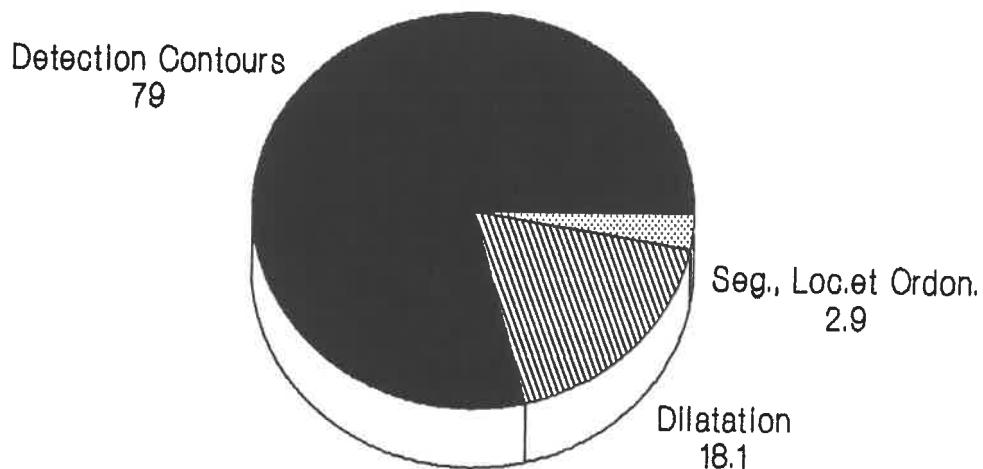


Figure 7.7 Proportion du temps d'exécution par module pour un masque ayant des voisinages de dimensions 5X5 et une image contenant 12 champignons.

A partir des figures, on remarque que le paramètre influençant le plus le temps d'exécution de l'algorithme de planification est la dimension des voisinages du masque utilisé pour la détection des contours.

CHAPITRE 8

CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce mémoire un algorithme pour la planification de la cueillette automatique de champignons.

Au chapitre 3, nous avons présenté une méthode pour extraire les contours des champignons. Nous avons aussi présenté une méthode de traitement morphologique qui permet d'évaluer la maturité des champignons. Au chapitre 4, nous avons présenté une méthode pour localiser et calculer le centroïde de chaque champignon à cueillir. Et au chapitre 5, nous avons présenté une méthode pour calculer un parcours minimum approximatif pour cueillir les champignons.

Les essais expérimentaux ont montré que la performance de l'algorithme dépend principalement de la dimension des voisinages du masque utilisé pour déceler les contours. Par contre, il a été observé que plus la dimension des voisinages

est grande, plus l'algorithme est fiable. Un compromis s'impose.

Les conditions d'éclairage et la forme de l'élément structurant utilisé pour la dilatation des régions noires sont aussi des paramètres influençant la performance de l'algorithme.

Les temps d'exécutions unitaires (par champignon) obtenus nous permettent de croire qu'avec un ordinateur et un système de vision plus puissants et qu'en travaillant à de faibles densités d'images, soit moins de 1.44 pixel par mm., l'algorithme présenté pourrait être utilisé en temps réel, c'est-à-dire, qu'il pourrait planifier la cueillette automatique de champignons avec un temps d'exécution unitaire d'environ 1 seconde par champignon.

Ce projet ouvre une avenue de recherche sur l'automatisation de la cueillette de champignons. De plus, les résultats obtenus nous permettent de croire que l'algorithme pourrait être également utilisé dans d'autres applications industrielles.

B I B L I O G R A P H I E

- 1 - Proceedings of the First International Conference on Robotics and Intelligent Machines in Agriculture. October, 1983, Tampa, Florida, USA.
- 2 - G. W. Isaacs, Robotics Applications in Agriculture, Acta Horticulturae, p123-128, 1986.
- 3 - N. Kondo, N. Kawamura, Methods of Detecting Fruit by Visual Sensor attached to Manipulator, Laboratory of Agricultural Machinery, Kyoto University, Kyoto, Japan, p31-43.
- 4 - F.E. Sistler, Robotics and Intelligent Machines in Agriculture, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-3, No. 1, February 1987.
- 5 - Proceedings of the Agri-Mation 1 Conference and Exposition, February, 1985, Chicago, USA.
- 6 - J Yoshida, Apparatus for Fruit Harvesting, French Patent No. FR 2 531 604, Institut National de la Propriété Industrielle.
- 7 - R.C. Harrell, G.W. Isaacs, Robotic Citrus Harvesting Research Progress Report to the Florida Department of Citrus, April, 1984, University of Florida, USA.

- 8 - L.J. Kutz, E.M. Gaines, P.A. Hammer, Robotic Transplanting of Bedding Plants, Proceedings of the Agri-Mation 2 Conference and Exposition.
- 9 - J.P. Trevelyan, J.K. Stewart, R.A. Owens, Techniques for Surface Representation and Adaptation in Automated Sheep Shearing, Proceedings of the 12th International Symposium on Industrial Robots.
- 10 - S.J. Key, Productivity Modelling and Forecasting for Automated Shearing Machinery, Proceedings of the Agri-Mation 1 Conference and Exposition, p200-209, February, 1985, Chicago, USA.
- 11 - N. Kawamura, Japan's Technology Farm, Robotics and Intelligent Machine in Agriculture, p52-62, 1983.
- 12 - M. Johnson, Automation in Citrus Sorting and Packing, Proceedings of the Agri-Mation 1 Conference and Exposition, p63-68, February, 1985, Chicago, USA.
- 13 - F.J. Ingratta, T.J. Blom, W.W. Brown, Commercial Mushroom Growing, Ontario Ministry of Agriculture and Food, Publication 350, Vineland Station, Ontario.

- 14 - P.J.C. Vedder, Modern Mushroom Growing, Educabock Ed., Culenburg, Netherlands, 1978.
- 15 - Champignonnière en blocs de béton, Ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Alimentation, Plan 60601.
- 16 - R.M. Devlaeminck, Vision Systems and Robotics in Food Processing, Proceedings of the Agri-Mation 1 Conference and Exposition, p32-35, February, 1985, Chicago, USA.
- 17 - H. Hwang, F.E. Sisler, The Implentation of a Robotic Manipulator on a Mechanical Transplanting Machine, Proceedings of the Agri-Mation 1 Conference and Exposition, p173-182, February, 1985, Chicago, USA.
- 18 - A.G. D'Esnon, Robotic Harvesting of Apples, Proceedings of the Agri-Mation 1 Conference and Exposition, p210-214, February, 1985, Chicago, USA.
- 19 - D.E. Mulcahy, High Rise Farm and Fishery, Proceedings of the Agri-Mation 2 Conference and Exposition, p99-110.
- 20 - Rosenfeld A., Avinash C.K., Digital Picture Processing, Academic Press, New York, 1976.

- 21 - Dougherty E.R., Giardina C.R., Matrix Structured Image Processing, Prentice-Hall, New Jersey, 1987.
- 22 - Lin S., Kernighan B.W., An effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem, Operations Research, 21(1973), p. 498-516.
- 23 - Bellmore M., Nemhauser G.L., The Traveling Salesman Problem: A survey, Journal of Operations Research Society of America, May-June, 1968, p. 538-558.
- 24 - Hardgrave W.W., Nemhauser G.L., On the relation between the Traveling Salesman and the Longest Path Problem, Operations Research, 10(1962), p.166-176.
- 25 - Dantzig G.B., Fulkerson D.R., Johnson S.M., Solution of a Large Scale Traveling Salesman Problem, Operations Research, 2(1954), p. 393-410.
- 26 - Rosenkrantz D.J., Stearns R.E., Lewis P.M., An analysis of Several Heuristics for the Traveling Salesman Problem, SIAM, September, 1977, p. 563-581.
- 27 - Golden B.L., Stewart W.R., Empirical Analysis of Heuristics, The Traveling Salesman Problem, John Wiley & Sons, 1985, p. 222-226.

- 28 - Christofides N., Worst-Case Analysis of a New Heuristic for the Traveling Salesman Problem, Symposium on New Directions and Recent Results in Algorithms and Complexity, April, 1976, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh.
- 29 - Lin S., Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem, Bell System Technical Journal, December, 1965, p. 2245-2269.

ANNEXE A

CLASSIFICATION DES CHAMPIGNONS CULTIVES

Au terme de sa croissance, un champignon contient environ 90% d'eau. Il est hétérotrophique car il n'a pas de chlorophylle et, de ce fait, ne requière pas de lumière. Comme tout être vivant, il absorbe l'oxygène de l'air et rejette du gaz carbonique, ainsi que d'autres produits.

Il existe plus de 10 000 espèces de champignons dont une cinquantaine sont comestibles. Jusqu'à maintenant, la culture des champignons s'est avérée rentable seulement pour un nombre limité d'espèces.

A.1 Les champignons de couche.

Parmi les espèces cultivées, le champignon de couche - *Agarius bisporus* - est certainement le plus cultivé dans le monde [14]. On distingue deux variétés, l'*Albidus* et l'*Avellaneus*, soit le champignon blanc et le champignon brun-

crème. La figure A.1 présente l'anatomie d'un champignon de couche.

La figure A.2 présente des champignons de couche à divers stades de croissance, la figure A.3 présente des champignons de couche matures pour la cueillette et la figure A.4 présente des champignons de couche cueillis.

On constate que le champignon de couche se prête bien à la manipulation mécanique parce que:

- a) Le grand contraste entre la couleur du champignon et le compost favorise sa localisation à l'aide d'un système de vision.
- b) Les champignons de couche matures pour la cueillette sont généralement situés à une même hauteur. En utilisant un organe de préhension qui peut absorber la légère variation de position verticale des champignons, on simplifie les mécanismes nécessaires à la cueillette automatique.
- c) Un champignon de couche est léger, petit et quasi symétrique.

d) La continuité du tronc avec la partie centrale de la couronne confère une grande résistance à une traction purement verticale, voir figure A.5. L'utilisation d'une ventouse serait donc appropriée comme organe de préhension.

e) La surface caoutchouteuse d'un champignon frais assure une bonne adhésion.

A ces raisons s'ajoutent celles présentées à la section 1.1.

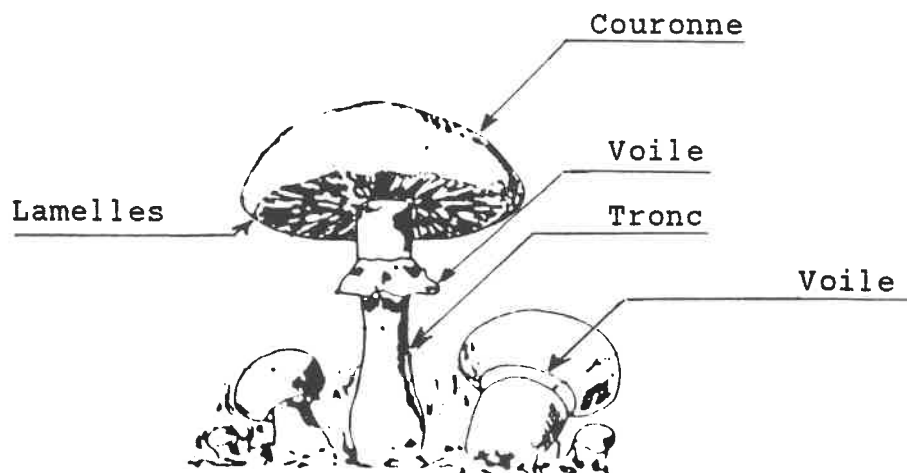
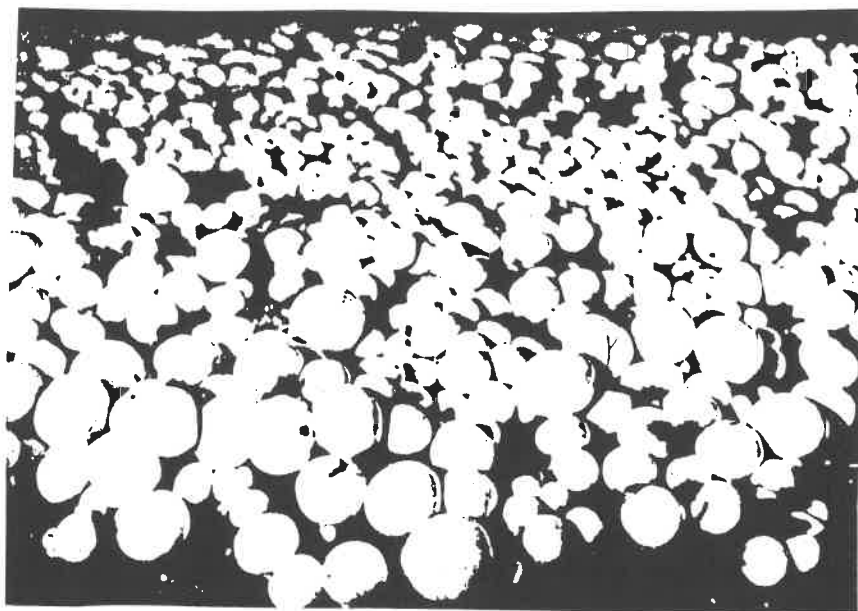


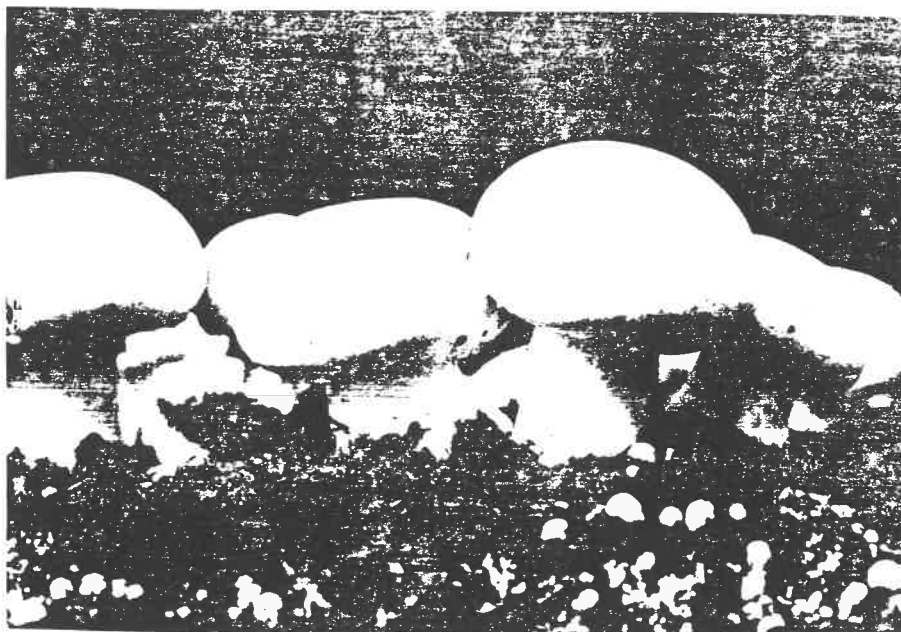
Figure A.1 Anatomie d'un champignon de couche.



Figure A.2 Champignons de couche à divers stades de croissance. Le voile du champignon de gauche est brisé.



(a)



(b)

Figure A.3 Champignons de couche matures dans un lit de culture.



Figure A.4 Champignons de couche cueillis.

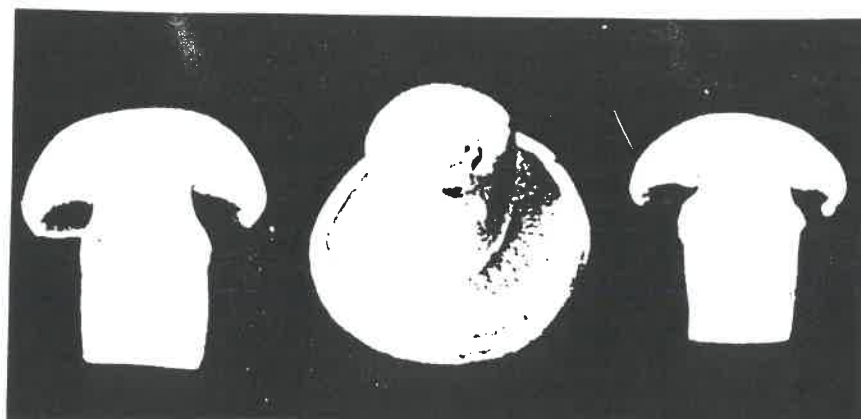


Figure A.5 Champignons de couche - Vue en coupe.

A.2 Autres espèces.

En Asie, on cultive aussi d'autres espèces tel: le Pleurotus présenté à la figure A.6, le Lentinus présenté à la figure A.7 et le Volvariella présenté à la figure A.8 . Dans le sud de l'Europe, on cultive aussi des Truffles.



Figure A.6 Pleurotus.

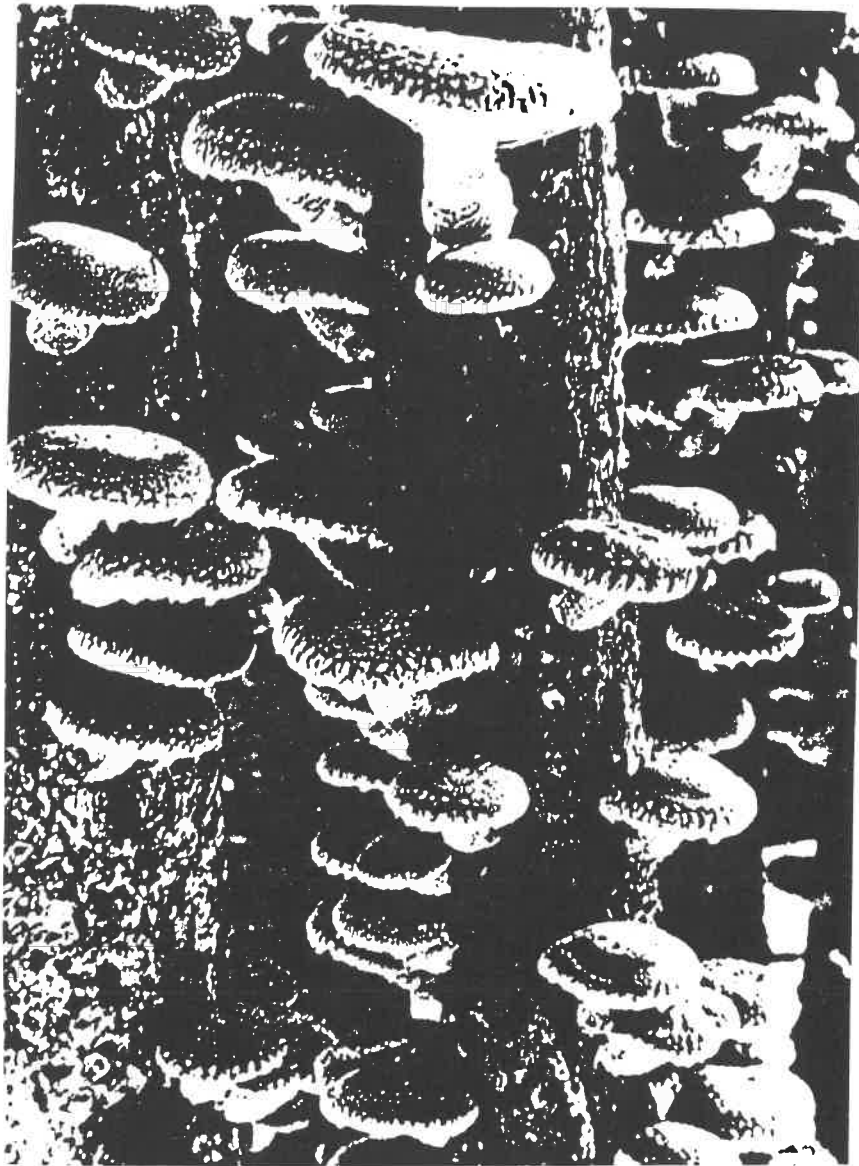


Figure A.7 Lentinus.



Figure A.8 Volvariella.

ANNEXE B

REVUE DES METHODES DE PRODUCTION DE CHAMPIGNONS

Dans cette annexe, nous débutons en définissant ce qu'est une poussée. Puis, nous présentons les deux systèmes de production les plus reconnus pour la culture des champignons: le système à une zone et le système à deux zones [13][14].

B.1 Les poussées.

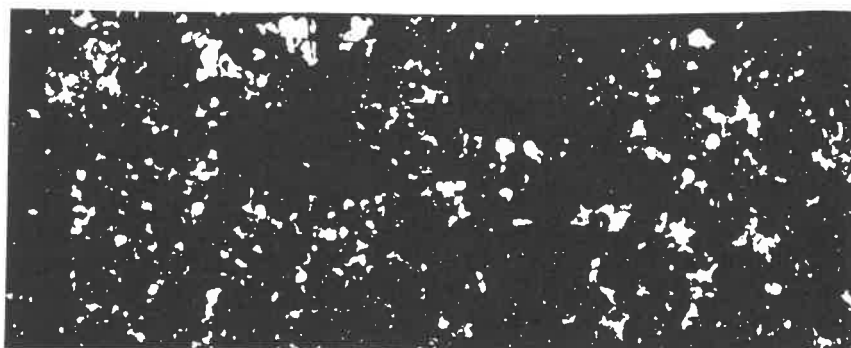
Lorsque les champignons apparaissent sur les lits de culture, leur croissance se poursuit jusqu'à la maturité. Suite à la cueillette, la croissance des champignons de la poussée suivante débute et se poursuit de façon continue. Après quelques jours, il y a un autre lot de champignons matures. Ce phénomène est appelé poussée. La figure B.1 présente une série de six photos d'une poussée, prises à une journée d'intervalle.

L'intervalle entre deux poussées successives est

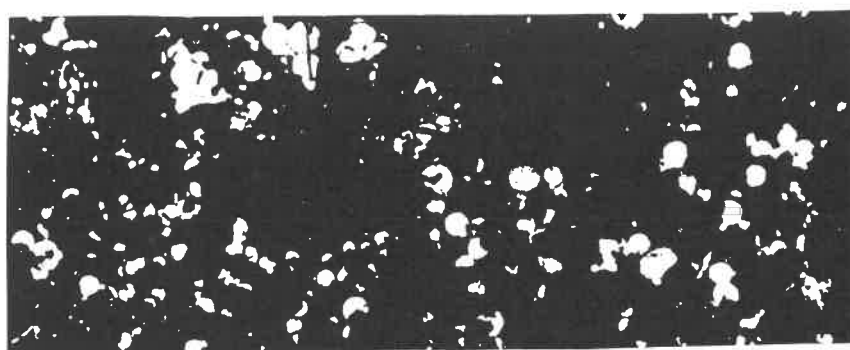
habituellement d'une semaine pour le champignon de couche. La figure B.2 présente un cycle de poussées.

Avec un lit (caisse) de culture suffisamment profond pour contenir la quantité de compost nécessaire, on peut obtenir jusqu'à six poussées consécutives. Généralement, les trois premières poussées sont les plus abondantes. Indépendamment de la production, 70 à 75% de la production totale est presque toujours cueilli pendant les trois premières récoltes, car l'importance des poussées décroît graduellement d'une poussée à l'autre.

D'ailleurs, certains producteurs préfèrent optimiser la première poussée et ne récolter que celle-ci. Ils optimisent leur poussée en contrôlant mieux la maturité moyenne des champignons de la poussée. Ils s'assurent d'un maximum de densité et que les champignons soient aux dimensions désirées. Le type de lit (caisse) utilisé est moins profond car on a moins besoin de compost. En augmentant le nombre de lits (caisses), les producteurs peuvent ainsi augmenter leur production totale.

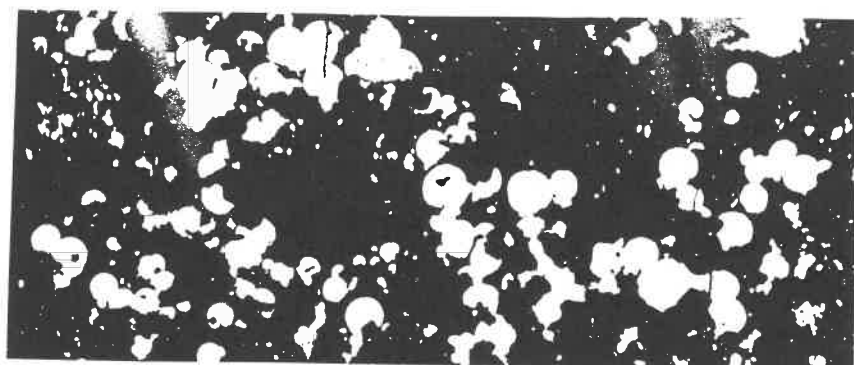


(a)

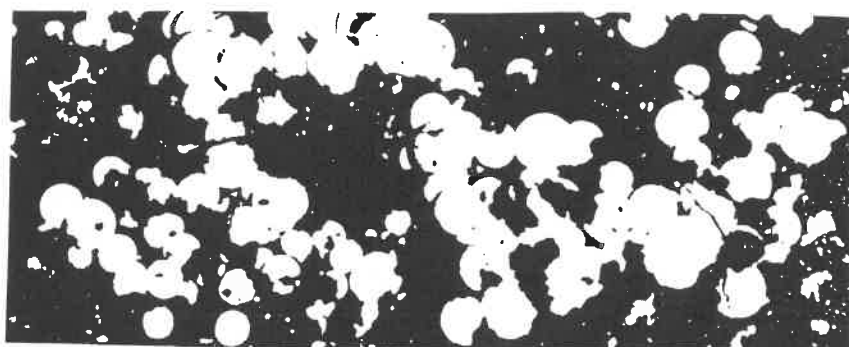


(b)

Figure B.1 Poussée. Ces deux photos, d'une série de six, présentent une première poussée. Les photos sont prises à une journée d'intervalle. a) jour 1
b) jour 2.

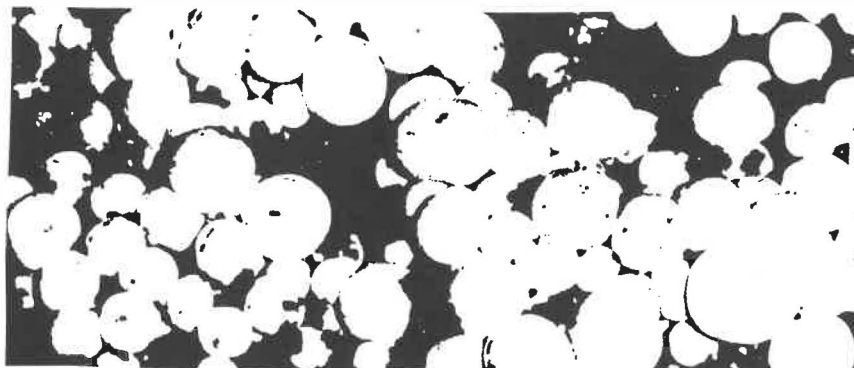


(c)

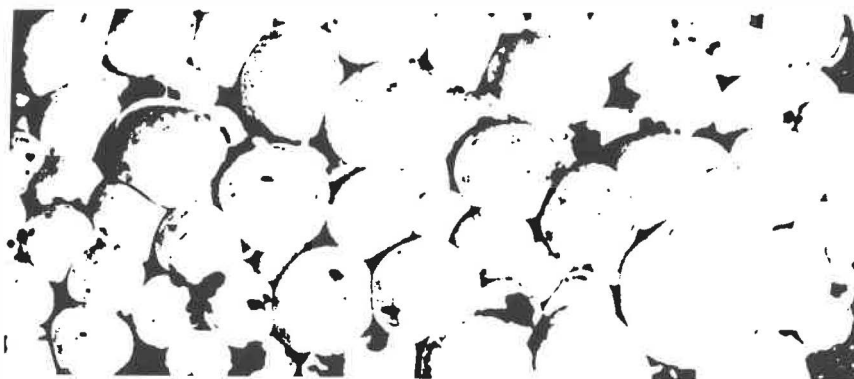


(d)

Figure B.1 Poussée. Ces deux photos, d'une série de six, présentent une première poussée. Les photos sont prises à une journée d'intervalle. c) jour 3
d) jour 4.



(e)



(f)

Figure B.1 Poussée. Ces deux photos, d'une série de six, présentent une première poussée. Les photos sont prises à une journée d'intervalle. e) jour 5 f) jour 6.

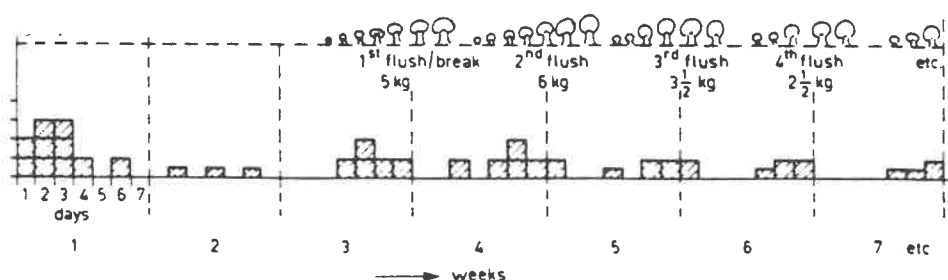


Figure B.2 Cycle de poussées.

B.2 Méthode de production à une zone.

Avec le système à une zone, les étapes de culture tel: la pasteurisation, le lardage, l'incubation, le gobetage et la cueillette sont faites dans une seule et même chambre. Ceci implique que chaque chambre doit être isolée et équipée de façon à atteindre les températures élevées désirées. La figure B.3 présente une champignonnière conventionnelle pour le système à une zone composée de sept chambres de production.

Avec ce système, on utilise presque toujours des lits fixes pour la croissance des champignons, voir la figure B.4.

Sur les fermes utilisant le système à une zone, les lits peuvent être vidés avec un filet en nylon placé au fond du lit avant le remplissage. Au nettoyage, ces filets sont tirés en s'enroulant autour de l'arbre d'un treuil et au même moment le compost tombe sur un convoyeur à courroie.

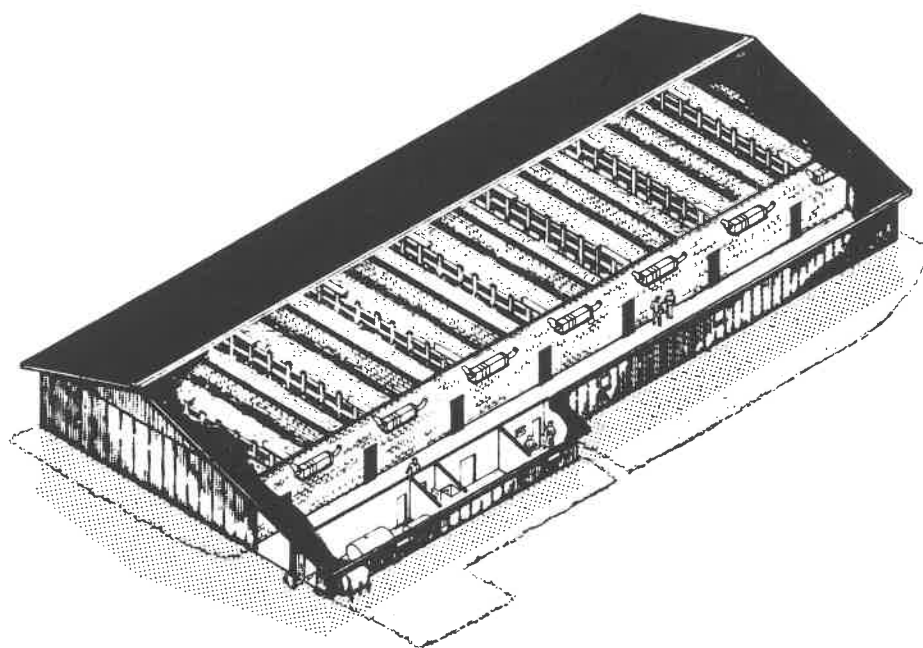


Figure B.3 Champignonnière conventionnelle pour le système de production à une zone [15].



Figure B.4 Lits de culture.

B.3 Méthode de production à deux zones.

Dans un système de production à deux zones, il y a des chambres séparées pour la pasteurisation, pour le lardage-incubation et pour la cueillette, voir la figure B.5. Les figures B.6 et B.7 présentent une chambre de production type.

Le milieu de croissance est constamment déplacé d'une chambre à l'autre, selon le stade de développement. Pour faciliter les déplacements, la culture des champignons s'effectue dans des caisses, voir figure B.8.

Le déplacement des caisses peut être perçu comme un avantage car plusieurs étapes fondamentales tel que le lardage et le gobetage, peuvent être effectuées pendant le transfert des caisses d'une chambre à l'autre.

A l'exception des coûts de déplacement des caisses, le principal désavantage est l'augmentation des probabilités d'infection. Quand une récolte est contaminée, on doit prévenir la dispersion de cette infection dans le reste de la champignonnière.

Ligne de cueillette.

Un autre avantage lié au déplacement des caisses est la possibilité d'amener les caisses de la chambre de récolte à une chambre spéciale appelée "ligne de cueillette". En général, la quantité totale de champignons cueillis manuellement sur une ligne de cueillette est beaucoup plus élevée que dans les chambres de récolte; des augmentations de 20 à 30% ont été réalisées. Ceci s'applique toutefois seulement aux fortes poussées, car lors de faibles poussées le déplacement des caisses est plus long que la cueillette elle-même.

Les lignes de cueillette ont eu plus ou moins de popularité auprès des champignonnières qui les ont utilisées afin de réduire les coûts de la cueillette. Les objections face à ce type de cueillette étaient les suivantes:

Premièrement, ces installations requièrent un investissement substantiel en capital.

Deuxièmement, pour limiter l'investissement, la vitesse des convoyeurs est souvent accélérée. Ceci provoque une fatigue anormale des cueilleurs qui n'arrivent pas à soutenir le rythme, entraînant des pertes énormes. De plus, une chambre d'attente pour les caisses était nécessaire.

Finalement, la séquence de cueillette ne favorisait pas la qualité de la récolte, car la première caisse récoltée était la dernière récoltée à la poussée suivante.

A l'exception des lignes de cueillette, d'autres équipements mécanisés ont été développés pour les opérations du système à deux zones.

- a) Sur des "lignes de remplissage", des caisses sont remplies de façon continue avec une couche uniforme

de compost au fur et à mesure que les caisses se déplacent à vitesse constante à travers la machine.

- b) Pour la compaction du compost, on utilise une presse hydraulique pressant fermement le compost à la suite du lardage. Au Pays-Bas, une machine électrique, utilisant des plaques vibrantes situées sur les côtés du lit est utilisée pour cette opération.
- c) A la fin du cycle, des caisses sont quelquefois passées à la vapeur, remplies ou vides, dans une chambre spécialement prévue à cette fin.

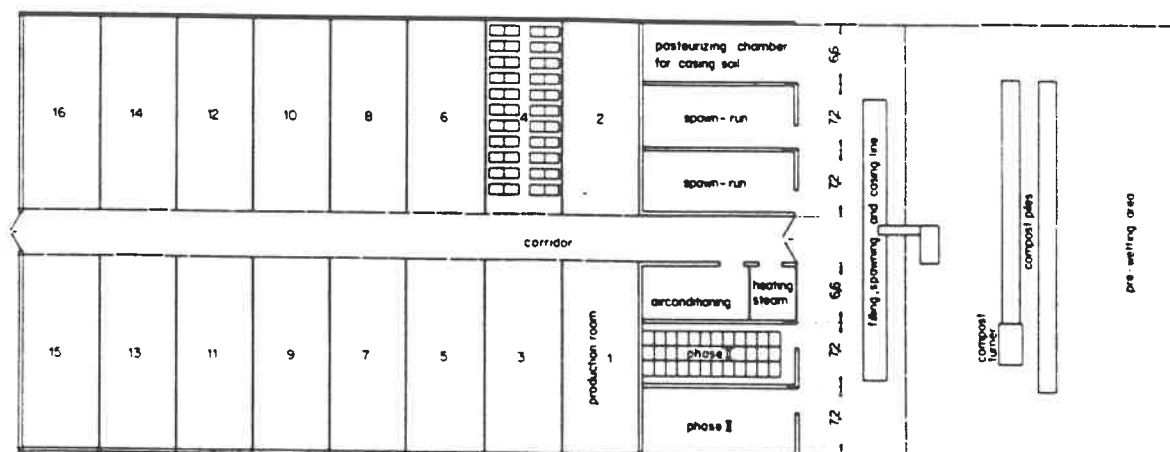


Figure B.5 Aménagement d'une champignonnière pour le système de production à deux zones.

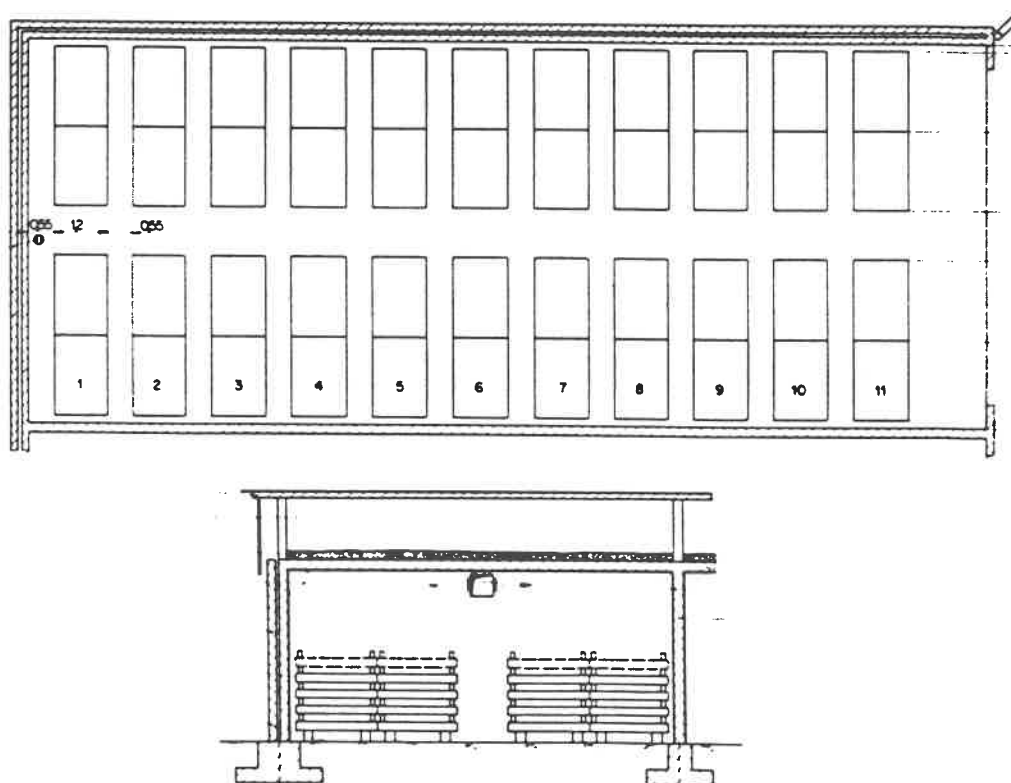


Figure B.6 Aménagement d'une chambre de production d'un système à deux zones.

ANNEXE C

DETECTION DE CONTOURS PAR LA METHODE DE ROSENFELD ET KAK

La détection des contours consiste à trouver la position d'une frontière dont la luminosité varie graduellement. Dans ce type de cas, les méthodes conventionnelles de détection de contours, tel que le gradient et le Sobel, vont considérer chaque dégradé comme étant un contour. Rosenfeld et Kak [20] ont proposé une méthode pour déceler les changements abrupts de luminosité moyenne; la luminosité moyenne d'un groupe de pixels (*) est définie comme le rapport de la somme des luminosités au nombre de pixels. Voici cette méthode.

La méthode consiste à déceler les changements abrupts de luminosité moyenne en calculant la différence entre la luminosité moyenne de deux voisinages adjacents disjoints; nous définissons un voisinage comme étant une région composée de pixels adjacents.

(*) Annexe D.

Par exemple, si $f^{(r)}(u,v)$ représente la luminosité moyenne d'un voisinage circulaire de rayon r centré à (u,v) , alors la différence absolue de luminosité moyenne de deux voisinages horizontalement adjacents, se touchant à (x,y) , est $ABS[f^{(r)}(x-r,y) - f^{(r)}(x+r,y)]$. (*)

De façon générale, si les centres des deux voisinages sont situés sur une droite de pente θ , et que les voisinages se touchent à (x,y) , la différence absolue est

$$e^{(r,\theta)}(x,y) = ABS[f^{(r)}(x-r\cos\theta, y-r\sin\theta) - f^{(r)}(x+r\cos\theta, y+r\sin\theta)]$$

(C.1)

Cette différence sera grande si les deux voisinages sont très différents, c'est-à-dire si les voisinages sont situés de part et d'autre d'un contour.

C.1 Remarques.

Pour notre cas, la méthode est limitée. Si les voisinages sont situés de part et d'autre d'un contour entre deux

(*) $ABS[u]$: Valeur absolue de " u ".

champignons, la différence calculée sera faible. Le point (x,y) ne sera pas considéré comme un point du contour.

Si r est large, $e^{(r,\theta)}$ ne sera pas seulement élevé sur le contour mais de part et d'autre du contour.

Pour déterminer la position du contour en utilisant $e^{(r,\theta)}$, on doit donc considérer seulement les différences les plus élevées.

La différence $e^{(r,\theta)}$ est sensible aux contours perpendiculaires à θ seulement. Pour déceler les contours, indépendamment de leurs orientations, les auteurs suggèrent l'utilisation des différences $e^{(r,\theta)}$ et $e^{(r,\theta+\pi/2)}$ et de combiner ces résultats sous une forme de "gradient".

$$e^{(r)} = \sqrt{[(e^{(r,\theta)})^2 + (e^{(r,\theta+\pi/2)})^2]} \quad (C.2)$$

On assume que les moyennes $f^{(r)}$ sont non-pondérées.

Comment choisir la valeur r ? Si elle est trop petite, on va déceler des contours qui n'en sont pas. Au contraire, si la valeur r est trop grande, on risque de ne pas déceler les contours. Les auteurs suggèrent de choisir la plus grande valeur possible en autant que les contours des objets les plus petits soient décelés.

ANNEXE D

IMAGE DIGITALE

Une image digitale est similaire à une matrice de nombres, habituellement entiers. Chaque nombre correspond à un élément de l'image qu'on appelle pixel. Un élément peut être carré ou rectangulaire. La quantité de lumière représenté par un pixel, appelée luminosité, est un nombre situé entre 0 et $2^k - 1$ où k est le nombre de bits disponibles pour mémoriser la luminosité.

$$0 \leq \iint \delta(x,y) \, dx \, dy \leq 2^k - 1 \quad (D.1)$$

où $\delta(x,y)$ est la fonction densité de lumière,
 $dx * dy$ est la surface d'un pixel.

Une image digitale est obtenue en assignant une valeur de luminosité à chaque pixel. Dans notre cas, la luminosité 0 correspond au noir et la luminosité $2^k - 1$ correspond au blanc. Les valeurs intermédiaires correspondent aux

différentes teintes de gris.

Puisque l'image à représenter comprend un nombre fini d'éléments, nous utilisons une matrice pour représenter cette image [21]. Chaque élément de la matrice, spécifié par une rangée i et une colonne j , correspond à un pixel. L'équation D.2 définit une image I .

$$I : g \Rightarrow I \quad (D.2)$$

où

$g = \{(i,j) \text{ tel que } i \text{ et } j \text{ sont entiers, } 0 \leq i \leq m \text{ et } 0 \leq j \leq n\},$

$I = \{ I(i,j) \text{ tel que } 0 \leq I(i,j) \leq 2^k - 1 \}.$

En posant $a_{ij} = I(i,j)$, on obtient la représentation matricielle de l'image I suivante

$$I = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{0n} \\ a_{10} & a_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{m0} & a_{m1} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (D.3)$$

ANNEXE E

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les résultats sont présentés, ici sous forme de photos. La première série de photos correspond aux résultats obtenus à partir d'un éclairage bien dosé. La seconde série correspond aux résultats obtenus à partir d'un éclairage trop intense. La dernière série correspond aux résultats obtenus à partir d'un éclairage produisant des ombrages sur les "champignons".

Pour simuler l'apparence de champignons matures, nous avons utilisé des balles de tennis sur table.

E.1 Série 1: Image de "champignons" bien éclairés.

La figure E.1 présente l'image originale de trois "champignons" bien éclairés. La densité horizontale dh_1 et la densité verticale dv_1 sont 1.44 pixel/mm. et 1.84 pixel/mm., respectivement.

La figure E.2 présente l'histogramme de la figure E.1. On remarque la présence du gris foncé (8-16) représentant le compost, du gris pâle (76-110) représentant les "champignons" et le gris intermédiaire (16-76) représentant les contours des "champignons".

La figure E.3 présente le résultat du calcul des différences $e^{(r)}$ obtenu à partir d'un masque 3X3 sans facteur d'amplification.

La figure E.4 présente le résultat "en cours" du calcul des différences accentuées $e^{(r)+}$ obtenu à partir d'un masque 3X3 et d'un facteur d'amplification $fa = 4$.

La figure E.5 présente le résultat "final" du calcul des différences accentuées $e^{(r)+}$ de la figure E.4.

La figure E.6 présente le résultat final du module de détection de contours. Les contours ont été amincis et rendus noirs "0". Le seuil de différences sd était de 40.

La figure E.7 présente le résultat final du module de traitement morphologique. Les contours noirs ont été dilatés, avec l'élément structurant "croix", en fonction de

"champignons" à cueillir d'au moins 12 mm. de diamètre.

La figure E.8 présente l'histogramme de la figure E.7. On remarque l'absence de gris intermédiaire (24-64) éliminé par le traitement morphologique.

La figure E.9 présente le résultat du module de binarisation pour un seuil de luminosité s_l de 40.

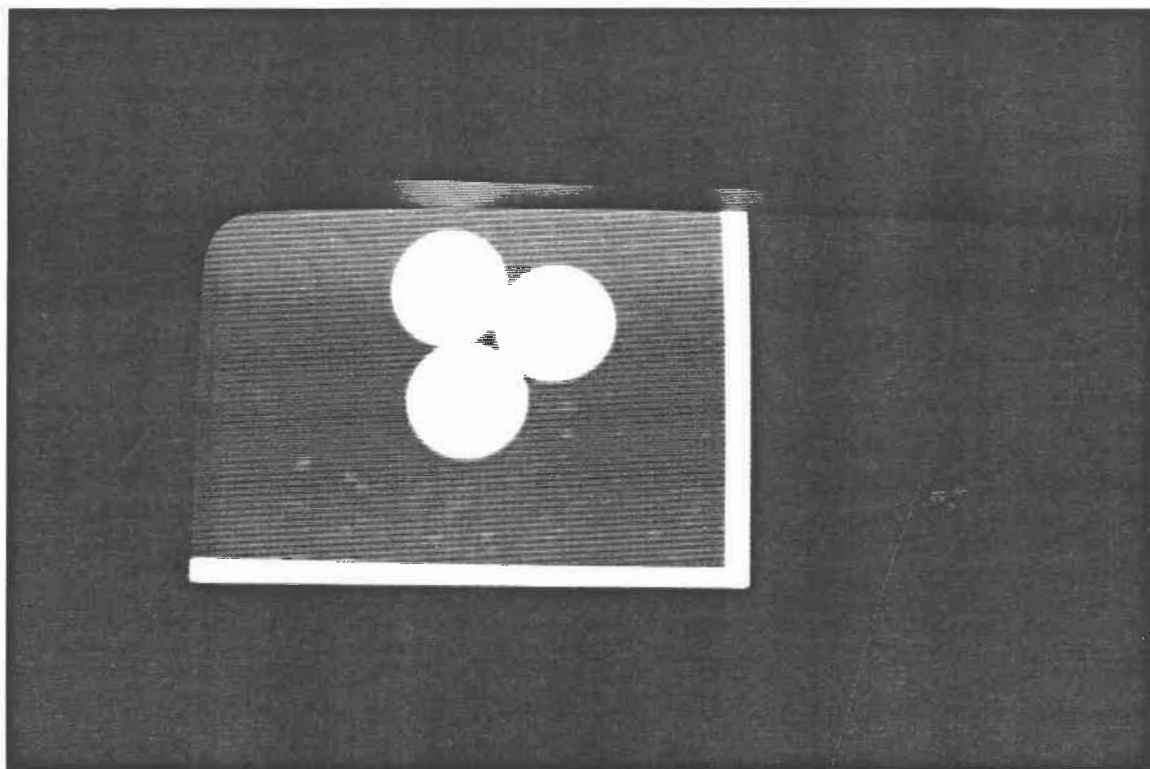


Figure E.1 Série 1. Image originale.

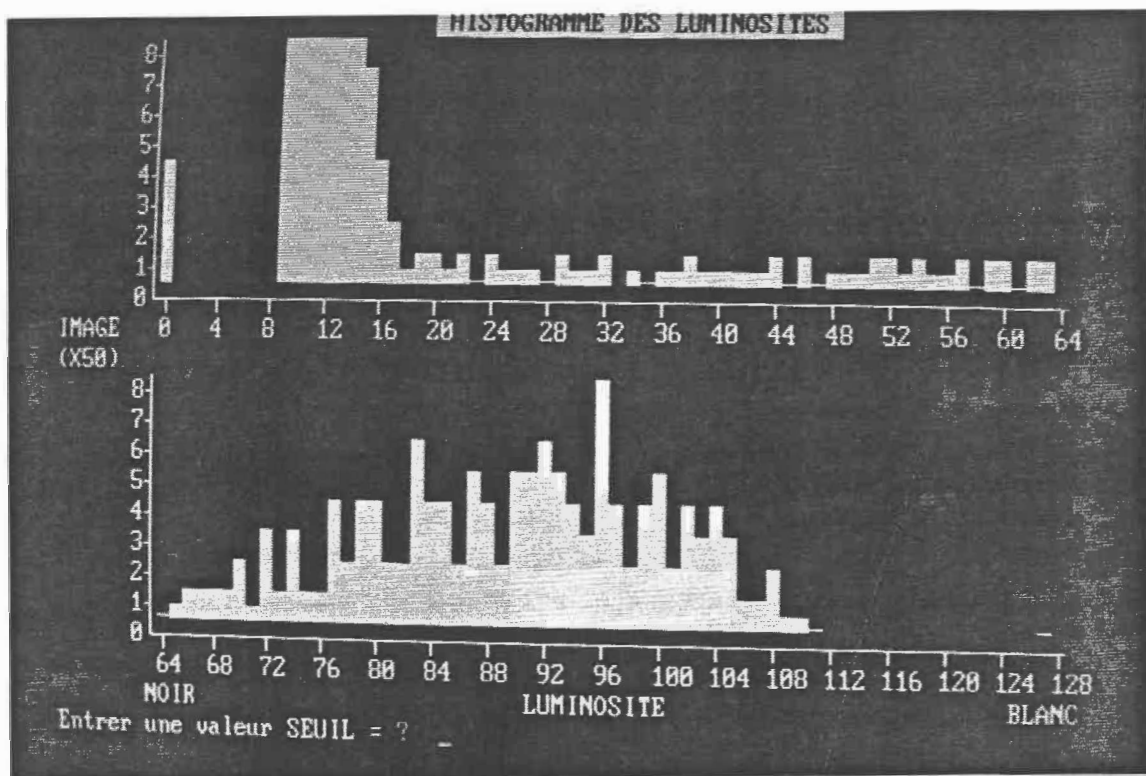


Figure E.2 Série I. Histogramme de la figure E.1.

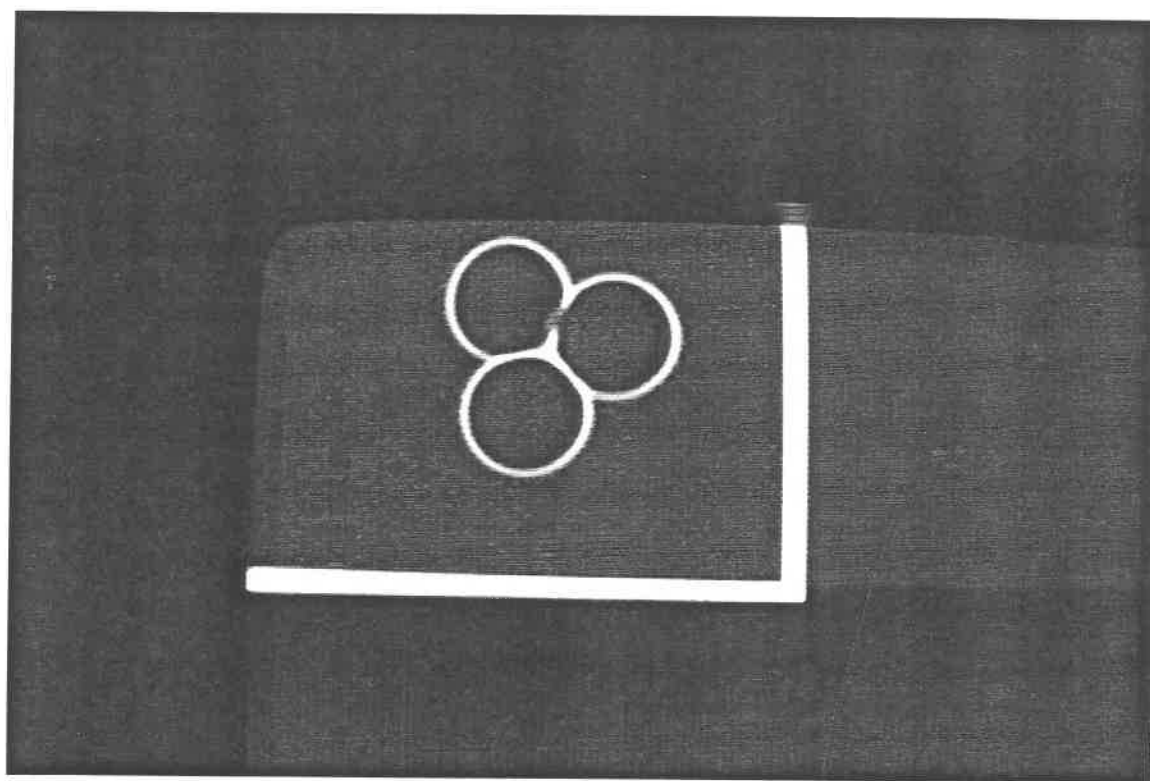


Figure E.3 Série I. Calcul des différences de la figure E.1.

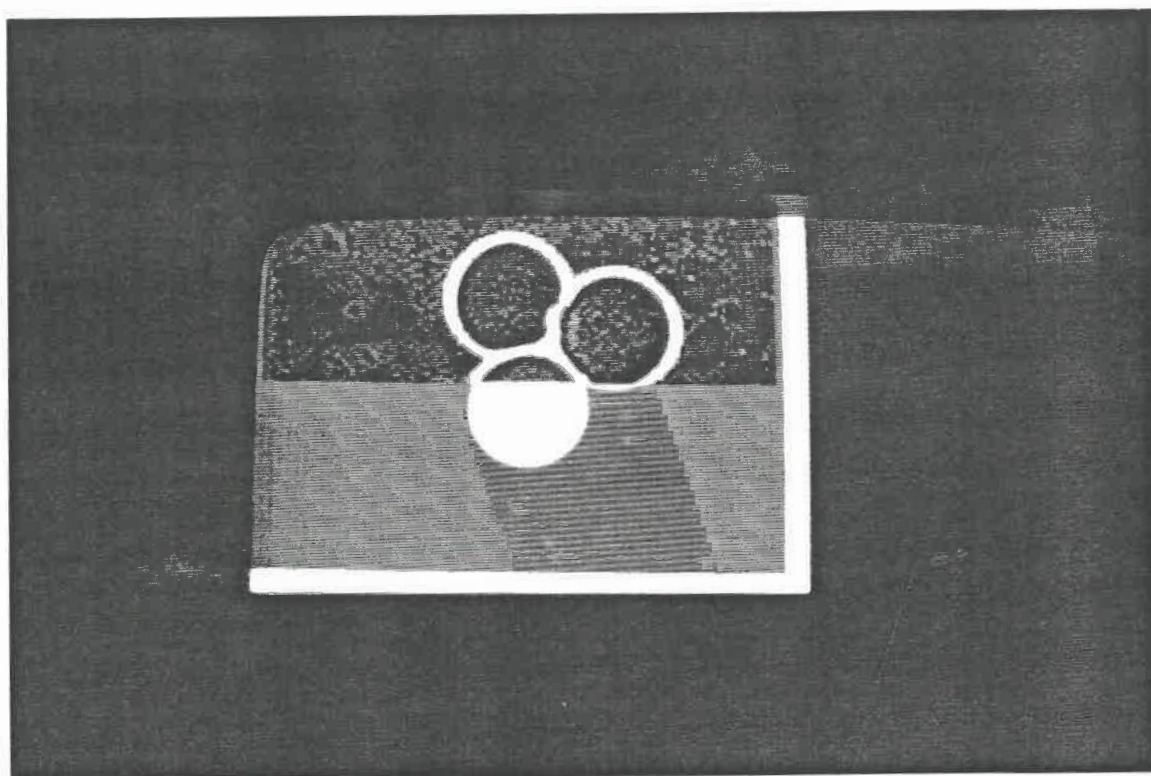


Figure E.4 Série 1. Calcul des différences accentuées,
en cours.

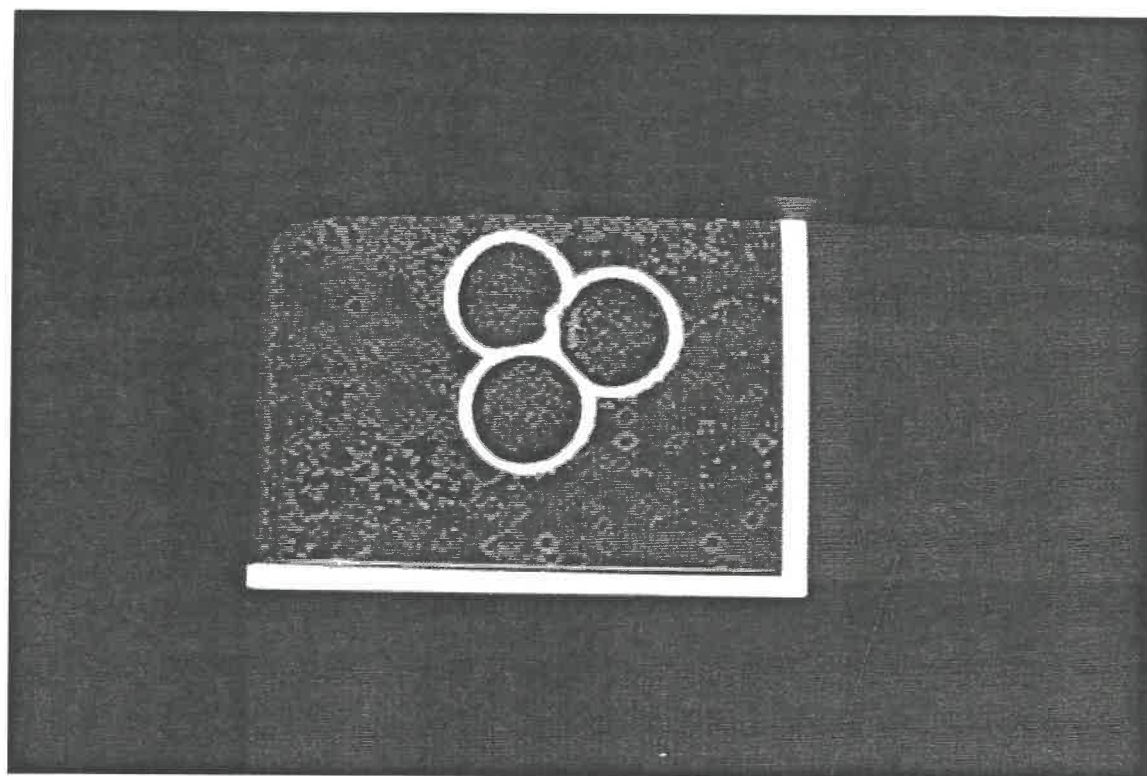


Figure E.5 Série 1. Calcul des différences accentuées, résultat final.

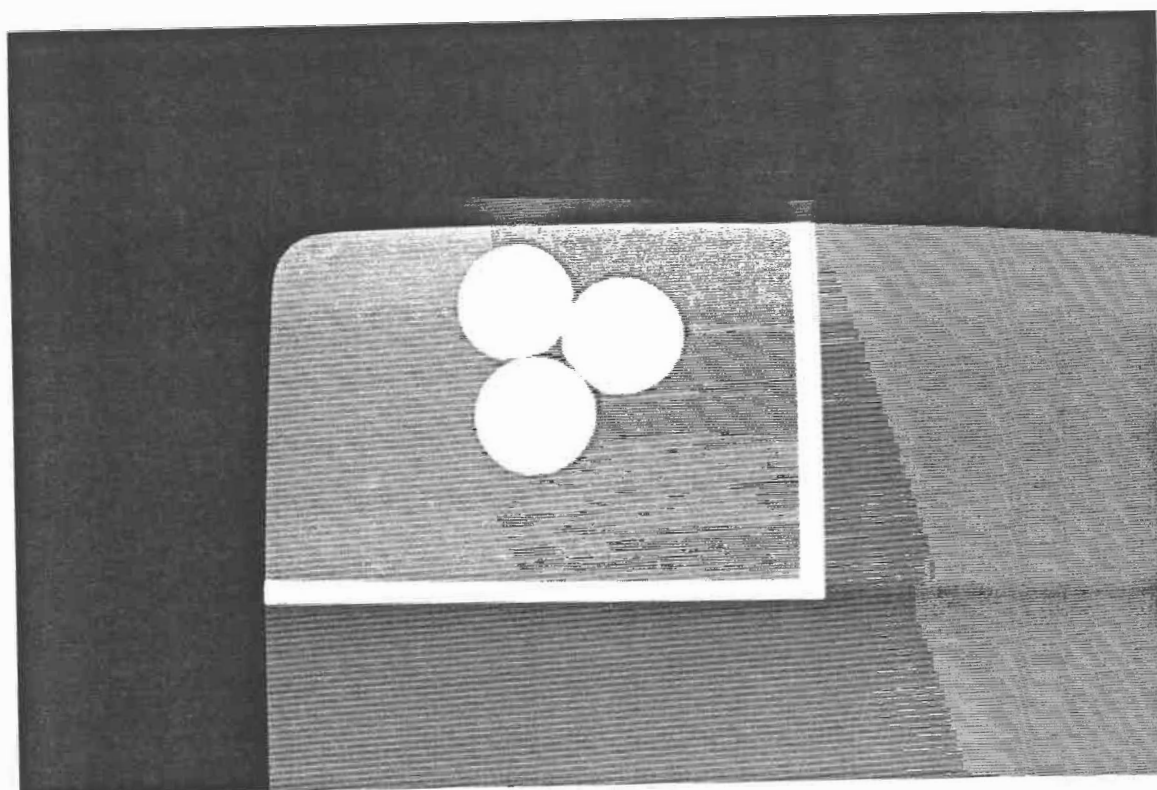


Figure E.6 Série 1. Contours décelés (masque 3X3).

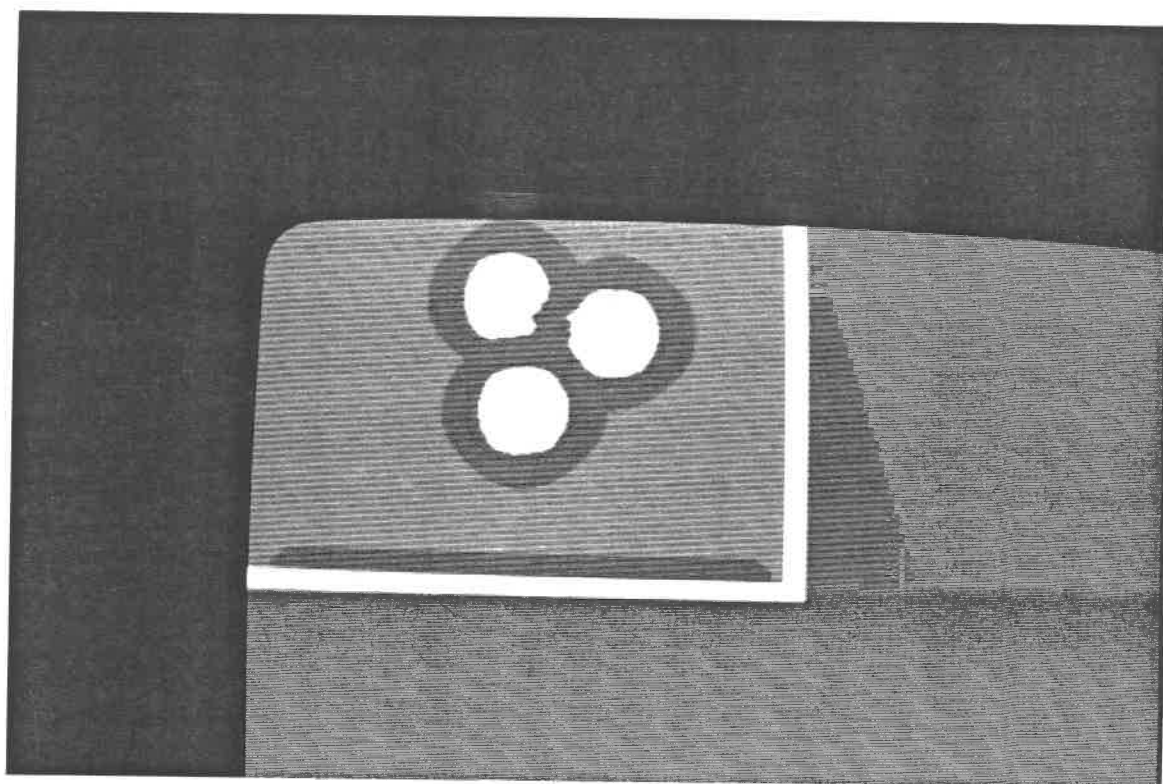


Figure E.7 Série I. Dilatation de la figure E.6.

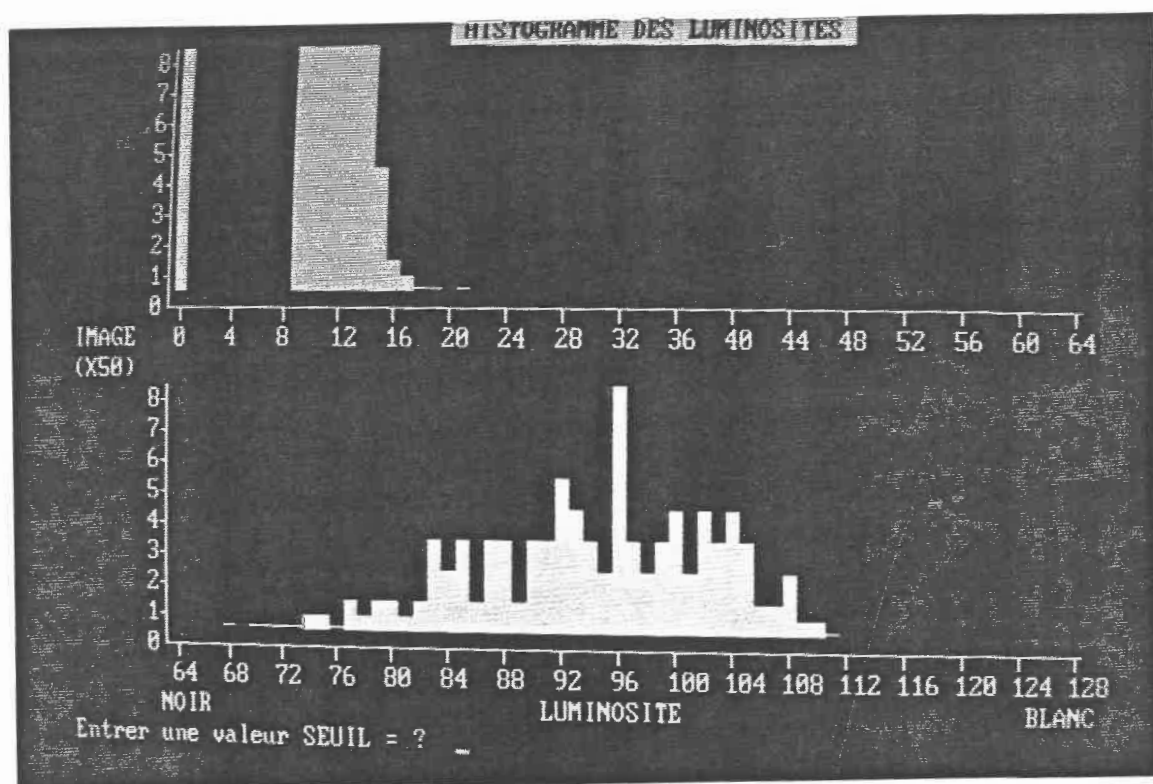


Figure E.8 Série I. Histogramme de la figure E.7.

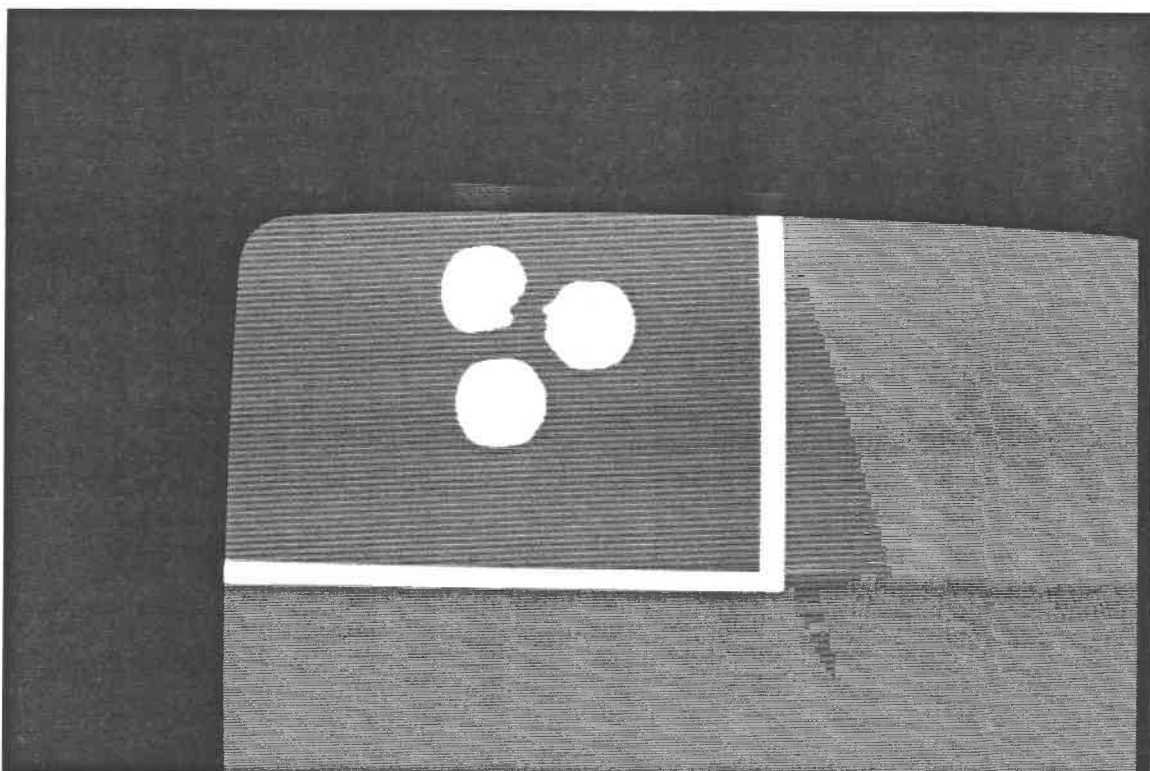


Figure E.9 Série I. Binarisation de la figure E.7.

E.2 Série II: Image de "champignons" trop éclairés.

La figure E.10 présente l'image originale de six "champignons" trop éclairés. La densité horizontale et la densité verticale sont les mêmes qu'à la section précédente.

La figure E.11 présente le résultat du module de détection de contours pour un masque 3X3. On remarque que la frontière entre le "champignon" du haut et le "champignon" du centre n'a pas été décelée.

La figure E.12 présente le résultat du module de détection de contours pour un masque 5X5. La frontière ignorée par le masque 3X3 a été décelée par le masque 5X5.

La figure E.13 présente le résultat du module de traitement morphologique de la figure E.12. Le résultat obtenu permettra de bien localiser tous les "champignons".

La figure E.14 présente le résultat du module de traitement morphologique de la figure E.11. Le module de localisation produira des résultats erronés dans la région de la frontière manquante.

La figure E.15 présente le résultat du module de binarisation de la figure E.14.

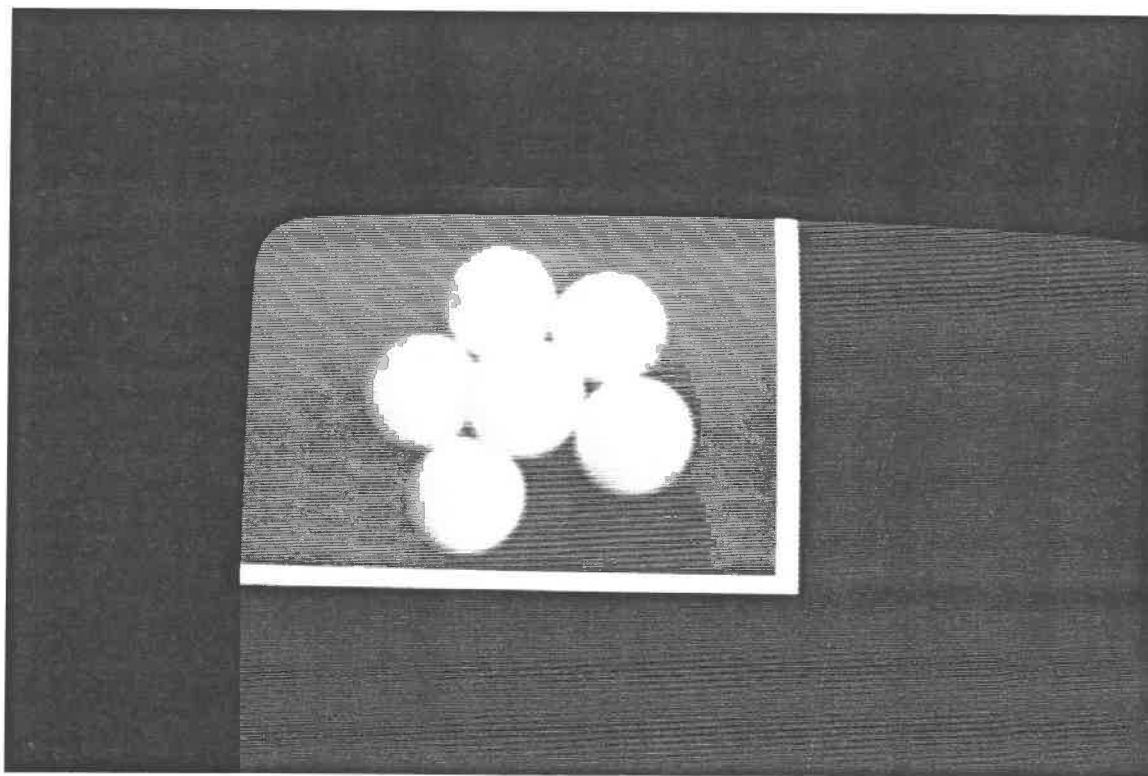


Figure E.10 Série II. Image originale.

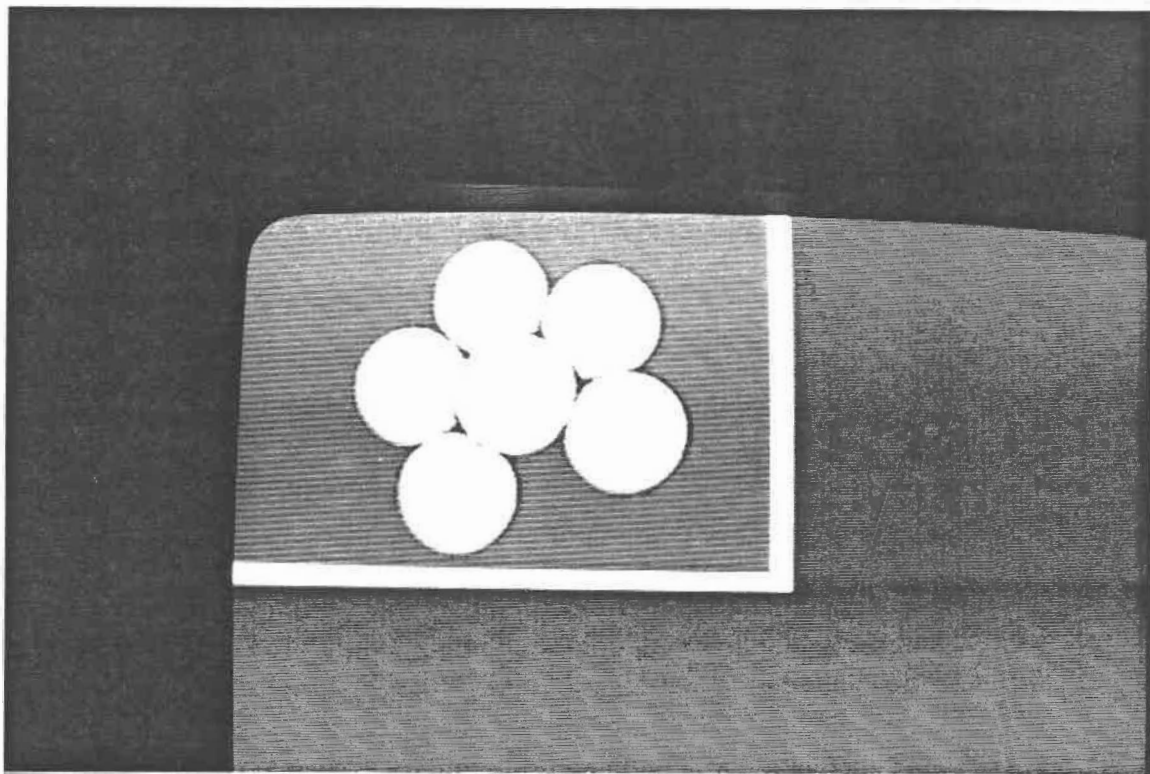


Figure E.11 Série II. Contours décelés (masque 3X3).

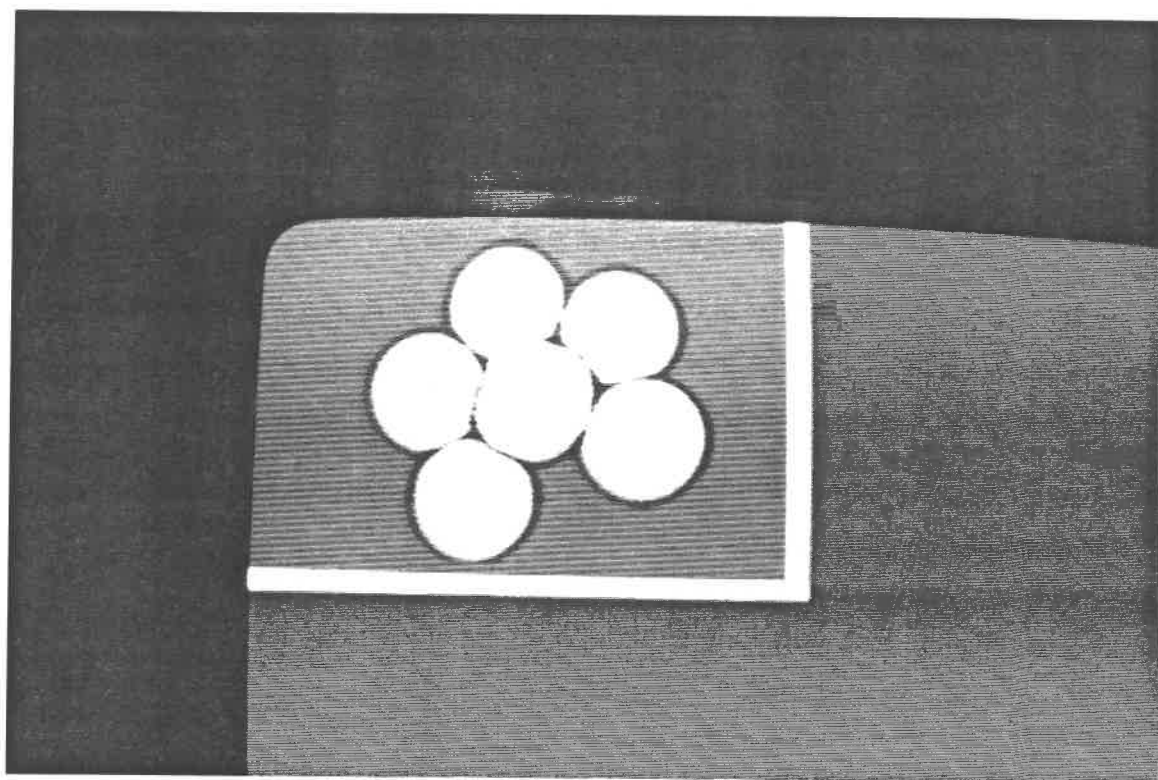


Figure E.12 Série II. Contours décelés (masque 5X5).

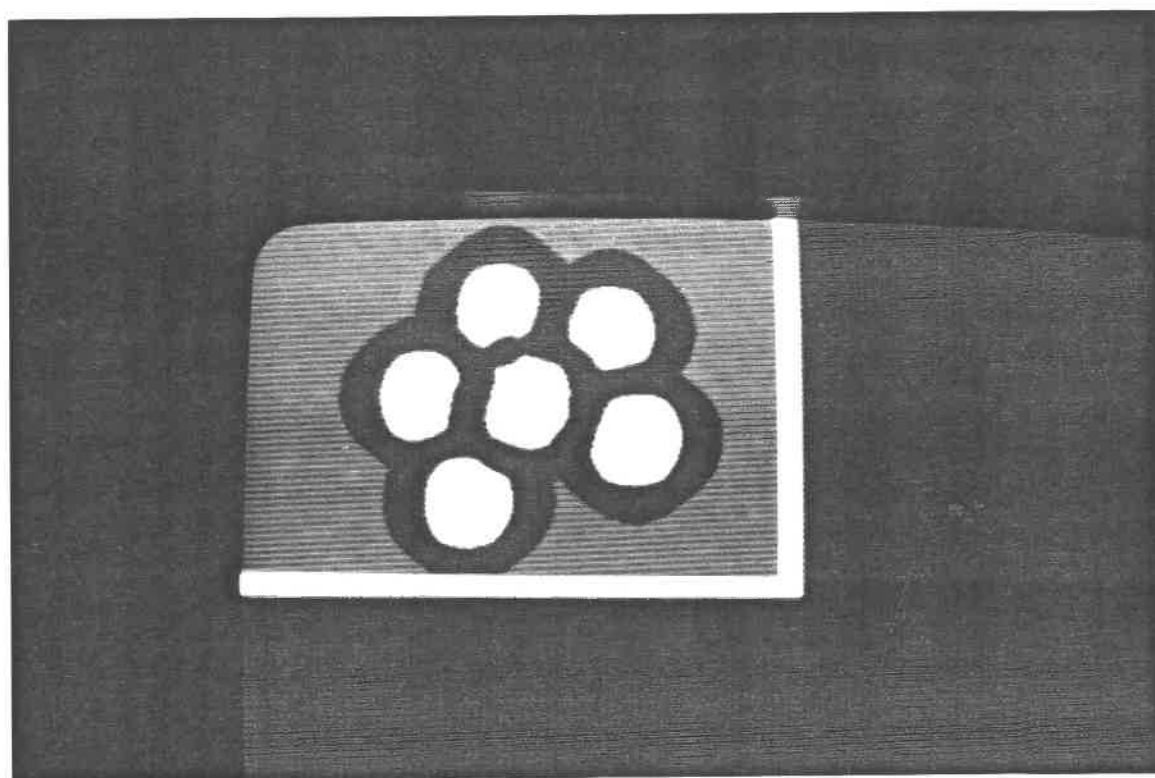


Figure E.13 Série II. Dilatation de la figure E.12
(masque 5X5).

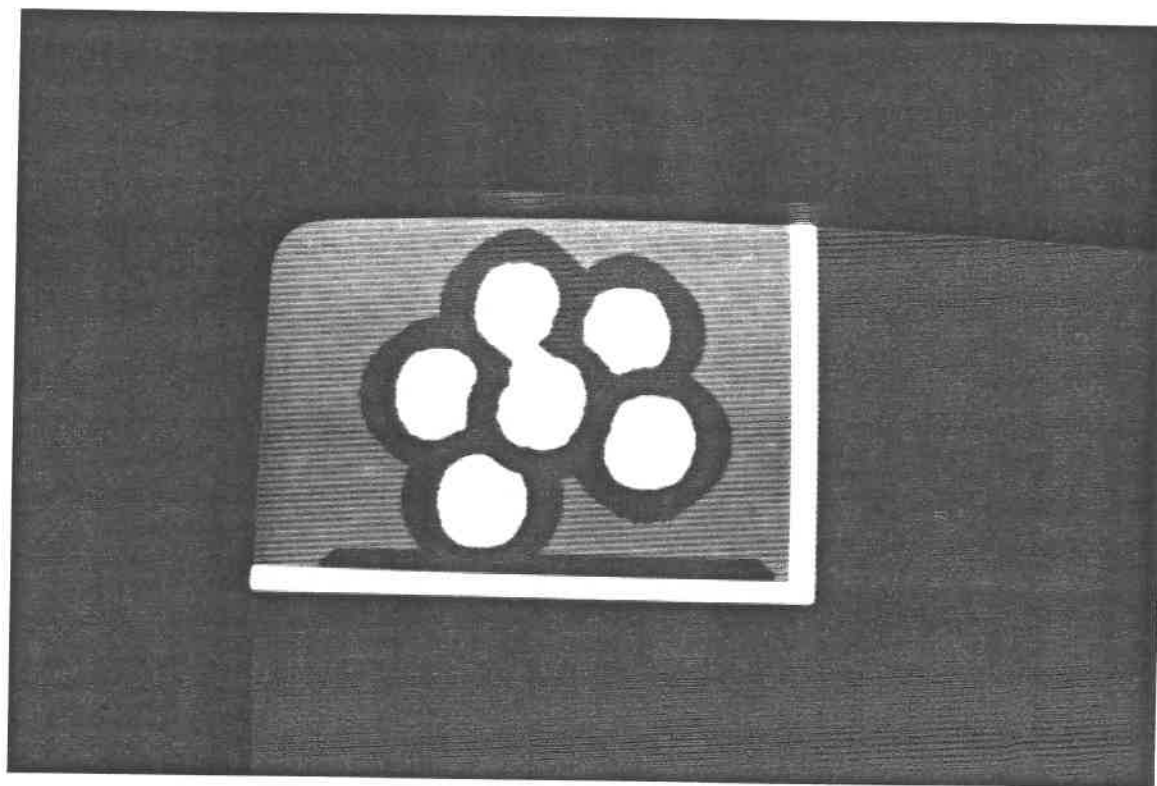


Figure E.14 Série II. Dilatation de la figure E.11
(masque 3X3).

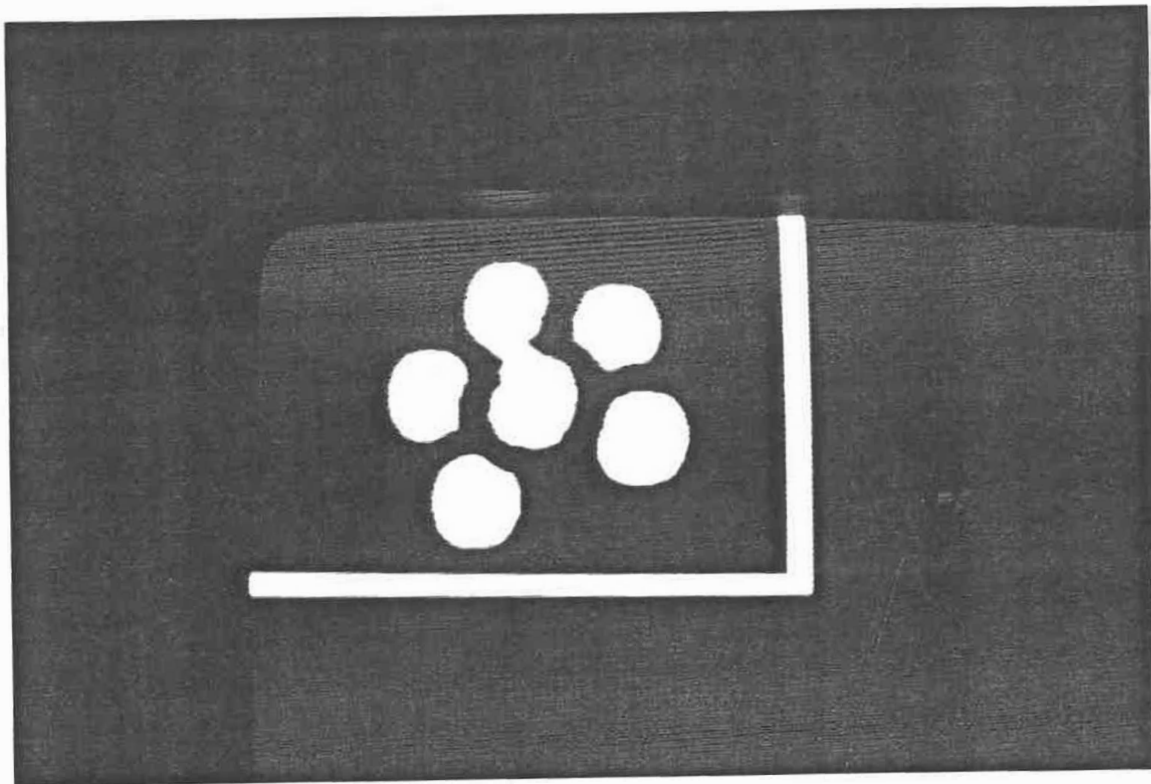


Figure E.15 Série II. Binarisation de la figure E.14.

E.3 Série III: Image de "champignons" où l'éclairage produit des ombrages sur ceux-ci.

La figure E.16 présente l'image originale de douze "champignons" avec des ombres. La densité horizontale et la densité verticale sont les mêmes qu'à la section E.1.

La figure E.17 présente le résultat du module de détection de contours pour un masque 3X3. On remarque que les ombres ont été considérées comme des contours.

La figure E.18 présente le résultat du module de traitement morphologique de la figure E.17. On remarque que les contours ombragés sont sur-dilatés.

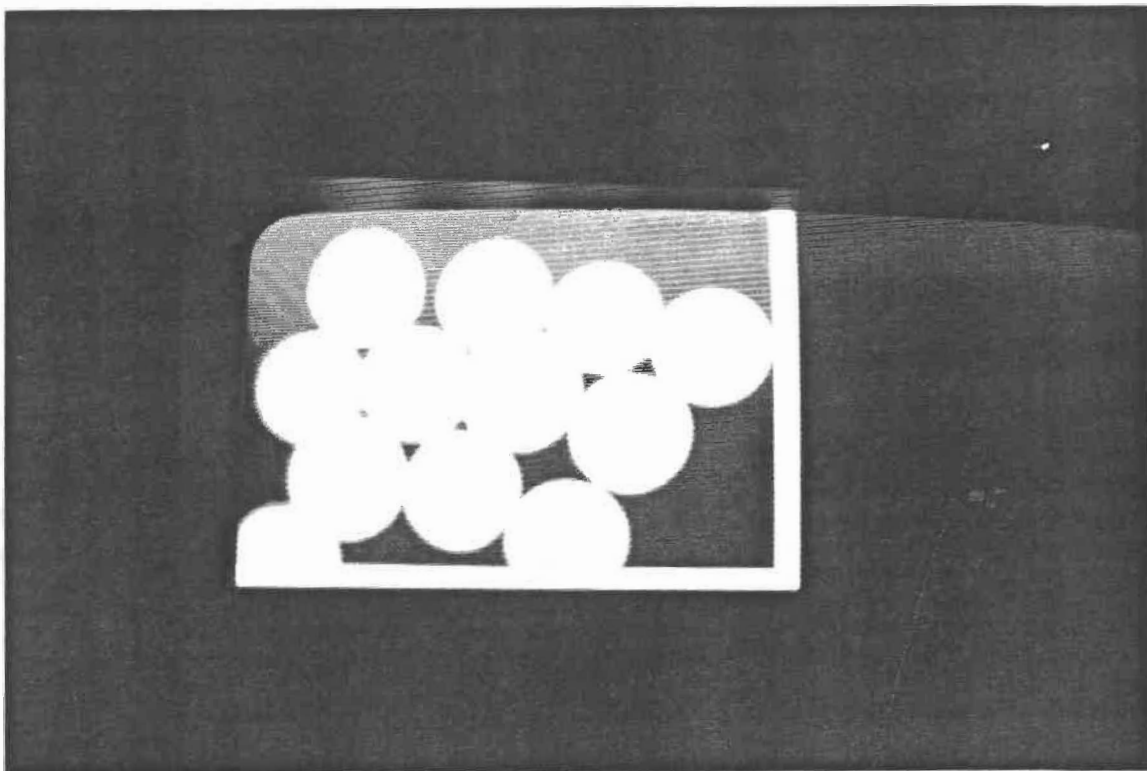


Figure E.16 Série III. Image originale.

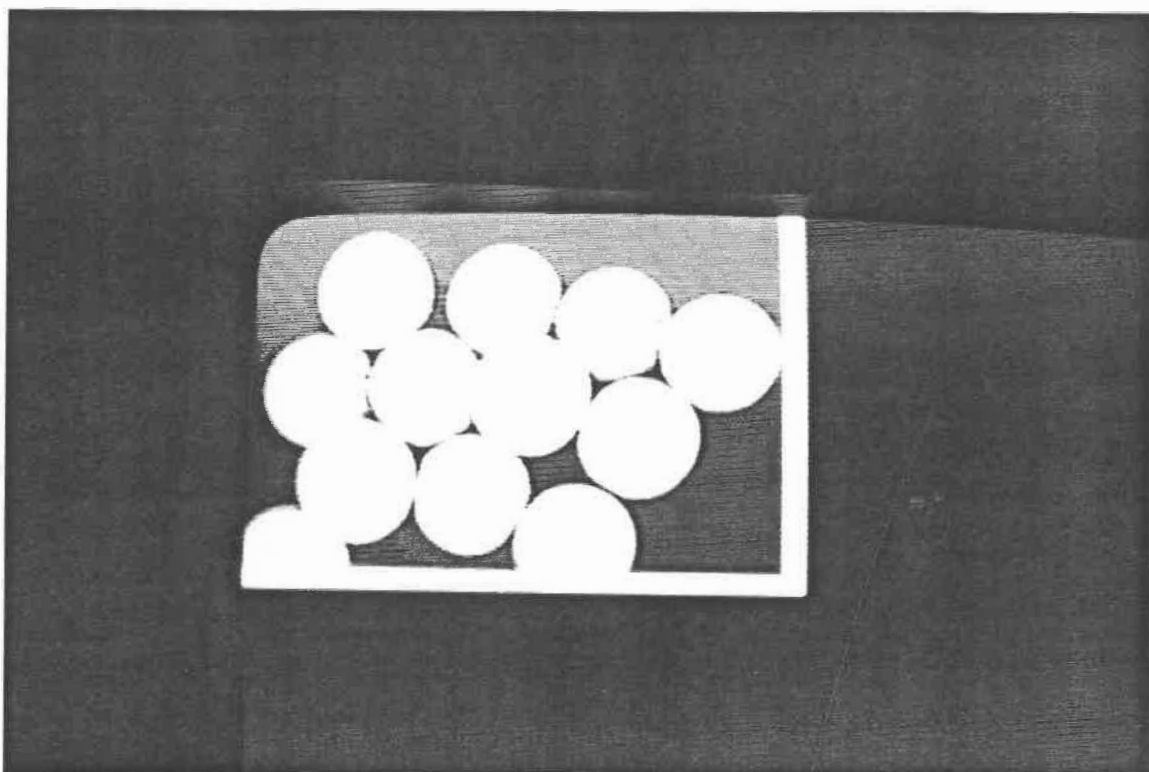


Figure E.17 Série III. Contours décelés (masque 3X3).

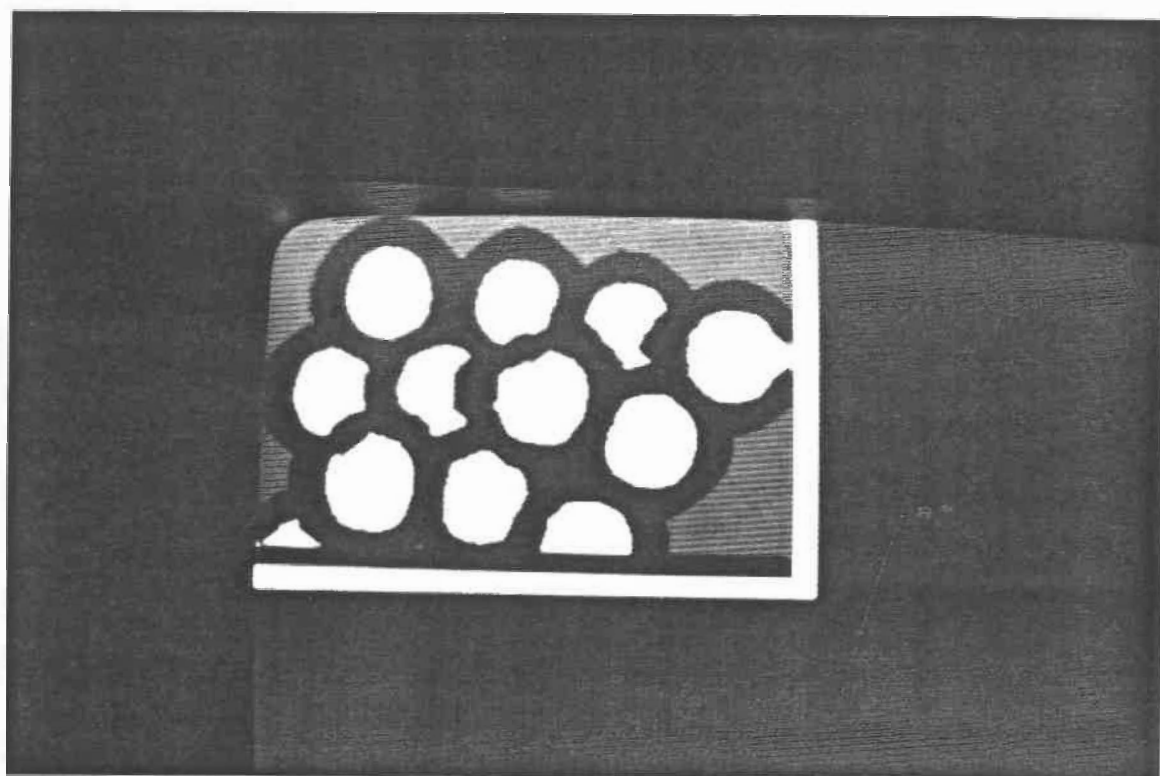


Figure E.18 Série III. Dilatation de la figure E.17
(masque 3X3).

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00290819 0