Quelques problèmes lies a l'analyse d'images numériques obtenues par un système automatique de microphotometrie a balayage

Jean-Marc Chassery

▶ **To cite this version:**

Jean-Marc Chassery. Quelques problèmes lies a l'analyse d'images numériques obtenues par un système automatique de microphotometrie a balayage. Modélisation et simulation. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG; Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1976. Français. NNT : . tel-00287123

HAL Id: tel-00287123
https://theses.hal.science/tel-00287123

Submitted on 11 Jun 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

présentée à

Université Scientifique et Médicale de Grenoble
Institut National Polytechnique de Grenoble

pour obtenir le grade de

Docteur de 3ème cycle
en MATHEMATIQUES APPLIQUEES
option : Analyse Numérique

par

Jean-Marc CHASSERY

QUELQUES PROBLEMES LIES A L'ANALYSE D'IMAGES NUMERIQUES OBTENUES PAR UN SYSTEME AUTOMATIQUE DE MICROPHOTOMETRIE A BALAYAGE

Thèse soutenue le 17 décembre 1976 devant la Commission d'Examen

Président : N. GASTINEL
P. CHIBON
Examinateurs : F. ROBERT
J. WOLF

THESE

présentée à

Université Scientifique et Médicale de Grenoble
Institut National Polytechnique de Grenoble

pour obtenir le grade de

Docteur de 3ème cycle
en MATHEMATIQUES APPLIQUEES
option : Analyse Numérique

par

Jean-Marc CHASSERY

QUELQUES PROBLEMES LIES A L'ANALYSE D'IMAGES NUMERIQUES OBTENUES PAR UN SYSTEME AUTOMATIQUE DE MICROPHOTOMETRIE A BALAYAGE

Thèse soutenue le 17 décembre 1976 devant la Commission d'Examen

Président : N. GASTINEL
P. CHIBON
Examinateurs : F. ROBERT
J. WOLF

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

Monsieur Gabriel CAU : Président
Monsieur Pierre JULLIEN : Vice-Président

MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT DE L'U.S.M.G.

PROFESSEURS TITULAIRES

MM.	ARNAUD Paul	Chimie
	AUBERT Guy	Physique
	AYANT Yves	Physique approfondie
Mme	BARBIER Marie-Jeanne	Electrochimie
MM.	BARBIER Jean-Claude	Physique Expérimentale
	BARBIER Reynold	Géologie appliquée
	BARJON Robert	Physique nucléaire
	BARNOUD Fernand	Biosynthèse de la cellulose
	BARRA Jean-René	Statistiques
	BARRIE Joseph	Clinique chirurgicale
	BEAUDOING André	Clinique de Pédiatrie et Puériculture
	BERNARD Alain	Mathématiques Pures
Mme	BERTRANDIAS Françoise	Mathématiques Pures
MM.	BERTRANDIAS Jean-Paul	Mathématiques Pures
	BEZES Henri	Pathologie chirurgicale
	BLAMBERT Maurice	Mathématiques Pures
	BOLLIET Louis	Informatique (IUT B)
	BONNET Georges	Electrotechnique
	BONNET Jean-Louis	Clinique ophtalmologique
	BONNET-EYMARD Joseph	Clinique gastro-entérologique
Mme	BONNIER Marie-Jeanne	Chimie générale
MM.	BOUCHERLE André	Chimie et toxicologie
	BOUCHEZ Robert	Physique nucléaire
	BOUSSARD Jean-Claude	Mathématiques Appliquées
	BOUTET DE MONTVEL Louis	Mathématiques Pures
	BRAVARD Yves	Géographie
	CABANEL Guy	Clinique rhumatologique et hydrologique
	CALAS François	Anatomie
	CARLIER Georges	Biologie végétale
	CARRAZ Gilbert	Biologie animale et pharmacodynamie
	CAU Gabriel	Médecine légale et toxicologie
	CAUQUIS Georges	Chimie organique
	CHABAUTY Claude	Mathématiques Pures
	CHARACHON Robert	Clinique Oto-rhino-laryngologique
	CHATEAU Robert	Clinique de neurologie
	CHIBON Pierre	Biologie animale
	COEUR André	Pharmacie chimique et chimie analytique
	CONTAMIN Robert	Clinique gynécologique
	COUDERC Pierre	Anatomie pathologique
Mme	DEBELMAS Anne-Marie	Matière médicale
MM.	DEBELMAS Jacques	Géologie générale
	DEGRANGE Charles	Zoologie
	DELORMAS Pierre	Pneumophtisiologie

MM.	DEPORTES Charles	Chimie minérale
	DESRE Pierre	Métallurgie
	DESSAUX Georges	Physiologie animale
	DODU Jacques	Mécanique appliquée (IUT A)
	DOLIQUE Jean-Michel	Physique des plasmas
	DREYFUS Bernard	Thermodynamique
	DUCROS Pierre	Cristallographie
	DUGOIS Pierre	Clinique de dermatologie et syphiligraphie
	GAGNAIRE Didier	Chimie physique
	GALLISSOT François	Mathématiques Pures
	GALVANI Octave	Mathématiques Pures
	GASTINEL Noël	Analyse numérique
	GAVEND Michel	Pharmacologie
	GEINDRE Michel	Electroradiologie
	GERBER Robert	Mathématiques Pures
	GERMAIN Jean-Pierre	Mécanique
	GIRAUD Pierre	Géologie
	JANIN Bernard	Géographie
	KAHANE André	Physique générale
	KLEIN Joseph	Mathématiques Pures
	KOSZUL Jean-Louis	Mathématiques Pures
	KRAVTCHENKO Julien	Mécanique
	KUNTZMANN Jean	Mathématiques Appliquées
	LACAZE Albert	Thermodynamique
	LACHARME Jean	Biologie végétale
Mme	LAJZEROWICZ Janine	Physique
MM.	LAJZEROWICZ Joseph	Physique
	LATREILLE René	Chirurgie générale
	LATURAZE Jean	Biochimie pharmaceutique
	LAURENT Pierre-Jean	Mathématiques Appliquées
	LEDRU Jean	Clinique médicale B
	LLIBOUTRY Louis	Géophysique
	LOISEAUX Pierre	Sciences nucléaires
	LONGEQUEUE Jean-Pierre	Physique nucléaire
	LOUP Jean	Géographie
Mlle	LUTZ Elisabeth	Mathématiques Pures
MM.	MALGRANGE Bernard	Mathématiques Pures
	MALINAS Yves	Clinique obstétricale
	MARTIN-NOEL Pierre	Clinique cardiologique
	MAZARE Yves	Clinique médicale A
	MICHEL Robert	Minéralogie et Pétrographie
	MICOUD Max	Clinique maladies infectieuses
	MOURIQUAND Claude	Histologie
	MOUSSA André	Chimie nucléaire
	MULLER Jean-Michel	Thérapeutique (Néphrologie)
	NEEL Louis	Physique du Solide
	OZENDA Paul	Botanique
	PAYAN Jean-Jacques	Mathématiques Pures
	PEBAY-PEYROULA Jean-Claude	Physique
	RASSAT André	Chimie systématique
	RENARD Michel	Thermodynamique
	REVOL Michel	Urologie
	RINALDI Renaud	Physique
	DE ROUGEMONT Jacques	Neuro-chirurgie
	SEIGNEURIN Raymond	Microbiologie et Hygiène
	SENGEL Philippe	Zoologie

MM.	SIBILLE Robert	Construction mécanique (IUT A)
	SOUTIF Michel	Physique générale
	TANCHE Maurice	Physiologie
	TRAYNARD Philippe	Chimie générale
	VAILLANT François	Zoologie
	VALENTIN Jacques	Physique nucléaire
	VAUQUOIS Bernard	Calcul électronique
Mme	VERAIN Alice	Pharmacie galénique
MM.	VERAIN André	Physique
	VEYRET Paul	Géographie
	VIGNAIS Pierre	Biochimie médicale
	YOCCOZ Jean	Physique nucléaire théorique

PROFESSEURS ASSOCIES

MM.	CLARK Gilbert	Spectrométrie physique
	CRABBE Pierre	CERMO
	ENGLMAN Robert	Spectrométrie physique
	HOLTZBERG Frédéric	Basses températures
	DEMBICKI Eugéniuz	Mécanique
	MATSUSHIMA Yozo	Mathématiques Pures

PROFESSEURS SANS CHAIRE

Mlle	AGNIUS-DELORD Claudine	Physique pharmaceutique
	ALARY Josette	Chimie analytique
MM.	AMBROISE-THOMAS Pierre	Parasitologie
	BELORIZKY Elie	Physique
	BENZAKEN Claude	Mathématiques Appliquées
	BIAREZ Jean-Pierre	Mécanique
	BILLET Jean	Géographie
	BOUCHET Yves	Anatomie
	BRUGEL Lucien	Energétique (IUT A)
	BUISSON René	Physique (IUT A)
	BUTEL Jean	Orthopédie
	COHEN ADDAD Pierre	Spectrométrie physique
	COLOMB Maurice	Biochimie
	CONTE René	Physique (IUT A)
	DEPASSEL Roger	Mécanique des fluides
	FONTAINE Jean-Marc	Mathématiques Pures
	GAUTHIER Yves	Sciences Biologiques
	GAUTRON René	Chimie
	GIDON Paul	Géologie et Minéralogie
	GLENAT René	Chimie organique
	GROULADE Joseph	Biochimie médicale
	HACQUES Gérard	Calcul numérique
	HOLLARD Daniel	Hématologie
	HUGONOT Robert	Hygiène et Médecine préventive
	IDELMAN Simon	Physiologie animale
	JOLY Jean-René	Mathématiques Pures
	JULLIEN Pierre	Mathématiques Appliquées
Mme	KAHANE Josette	Physique
MM.	KRAKOWIAK Sacha	Mathématiques Appliquées
	KUHN Gérard	Physique (IUT A)
	LE ROY Philippe	Mécanique (IUT A)
	LUU DUC Cuong	Chimie organique

MM.	MAYNARD Roger	Physique du solide
Mme	MINIER Colette	Physique (IUT A)
MM.	PELMONT Jean	Biochimie
	PERRIAUX Jean-Jacques	Géologie et Minéralogie
	PFISTER Jean-Claude	Physique du solide
Mlle	PIERY Yvette	Physiologie animale
MM.	RAYNAUD Hervé	M.I.A.G.
	REBECQ Jacques	Biologie (CUS)
	REYMOND Jean-Charles	Chirurgie générale
	RICHARD Lucien	Biologie végétale
Mme	RINAUDO Marguerite	Chimie macromoléculaire
MM.	ROBERT André	Chimie papetière
	SARRAZIN Roger	Anatomie et chirurgie
	SARROT-REYNAULD Jean	Géologie
	SIROT Louis	Chirurgie générale
Mme	SOUTIF Jeanne	Physique générale
MM.	STREGLITZ Paul	Anesthésiologie
	VIALON Pierre	Géologie
	VAN CUTSEM Bernard	Mathématiques Appliquées

MAITRES DE CONFERENCES ET MAITRES DE CONFERENCES AGREGES

MM.	AMBLARD Pierre	Dermatologie
	ARMAND Gilbert	Géographie
	ARMAND Yves	Chimie (IUT A)
	BACHELOT Yvan	Endocrinologie
	BARCE Michel	Neuro-chirurgie
	BARJOLLE Michel	M.I.A.G.
	BEGUIN Claude	Chimie organique
Mme	BERIEL Hélène	Pharmacodynamie
MM.	BOST Michel	Pédiatrie
	BOUCHARLAT Jacques	Psychiatrie adultes
Mme	BOUCHE Liane	Mathématiques (CUS)
MM.	BRODEAU François	Mathématiques (IUT B)
	CHAMBAZ Edmond	Biochimie médicale
	CHAMPETIER Jean	Anatomie et organogénèse
	CHARDON Michel	Géographie
	CHERADAME Hervé	Chimie papetière
	CHIAVERINA Jean	Biologie appliquée (EFP)
	CONTAMIN Charles	Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
	CORDONNIER Daniel	Néphrologie
	COULOMB Max	Radiologie
	CROUZET Guy	Radiologie
	CYROT Michel	Physique du solide
	DELOBEL Claude	M.I.A.G.
	DENIS Bernard	Cardiologie
	DOUCE Roland	Physiologie végétale
	DUSSAUD René	Mathématiques (CUS)
Mme	ETERRADOSSI Jacqueline	Physiologie
MM.	FAURE Jacques	Médecine légale
	FAURE Gilbert	Urologie
	GAUTIER Robert	Chirurgie générale
	GENSAC Pierre	Botanique
	GIDON Maurice	Géologie
	GROS Yves	Physique (IUT A)

MM. GUITTON Jacques	Chimie
HICTER Pierre	Chimie
IVANES Marcel	Electricité
JALBERT Pierre	Histologie
JUNIEN-LAVILLAVROY Claude	O.R.L.
KOLODIE Lucien	Hématologie
LE NOC Pierre	Bactériologie-virologie
LEROY Philippe	IUT A
MACHE Régis	Physiologie végétale
MAGNIN Robert	Hygiène et médecine préventive
MALLION Jean-Michel	Médecine du travail
MARECHAL Jean	Mécanique (IUT A)
MARTIN-BOUYER Michel	Chimie (CUS)
MICHOULIER Jean	Physique (IUT A)
NEGRE Robert	Mécanique (IUT A)
NEMOZ Alain	Thermodynamique
NOUGARET Marcel	Automatique (IUT A)
PARAMELLE Bernard	Pneumologie
PECCOUD François	Analyse (IUT B)
PEFFEN René	Métallurgie (IUT A)
PERRET Jean	Neurologie
PERRIER Guy	Géophysique - Glaciologie
PHELIP Xavier	Rhumatologie
RACHAIL Michel	Médecine interne
RACINET Claude	Gynécologie et obstétrique
RAMBAUD André	Hygiène et hydrologie
RAMBAUD Pierre	Pédiatrie
Mme RENAUDET Jacqueline	Bactériologie
MM. ROBERT Jean-Bernard	Chimie Physique
ROMIER Guy	Mathématiques (IUT B)
SHOM Jean-Claude	Chimie générale
STOEBNER Pierre	Anatomie pathologique
VROUSOS Constantin	Radiologie

MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIES

M. COLE Antony	Sciences nucléaires

Fait à SAINT MARTIN D'HERES, AVRIL 1976.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

Président : M. Philippe TRAYNARD

Vice-Président : M. Pierre-Jean LAURENT

PROFESSEURS TITULAIRES

MM. BENOIT Jean	Radioélectricité
BESSON Jean	Electrochimie
BLOCH Daniel	Physique du solide
BONNETAIN Lucien	Chimie Minérale
BONNIER Etienne	Electrochimie et Electrométallurgie
BOUDOURIS Georges	Radioélectricité
BRISSONNEAU Pierre	Physique du solide
BUYLE-BODIN Maurice	Electronique
COUMES André	Radioélectricité
DURAND Francis	Métallurgie
FELICI Noël	Electrostatique
FOULARD Claude	Automatique
LESPINARD Georges	Mécanique
MOREAU René	Mécanique
PARIAUD Jean-Charles	Chimie-Physique
PAUTHENET René	Physique du solide
PERRET René	Servomécanismes
POLOUJADOFF Michel	Electrotechnique
SILBER Robert	Mécanique des Fluides

PROFESSEUR ASSOCIE

M. ROUXEL Roland	Automatique

PROFESSEURS SANS CHAIRE

MM. BLIMAN Samuel	Electronique
BOUVARD Maurice	Génie Mécanique
COHEN Joseph	Electrotechnique
LACOUME Jean-Louis	Géophysique
LANCIA Roland	Electronique
ROBERT François	Analyse numérique
VEILLON Gérard	Informatique Fondamentale et Appliquée
ZADWORNY François	Electronique

MAITRES DE CONFERENCES

MM. ANCEAU François	Mathématiques Appliquées
CHARTIER Germain	Electronique
GUYOT Pierre	Chimie Minérale
IVANES Marcel	Electrotechnique
JOUBERT Jean-Claude	Physique du solide
MORET Roger	Electrotechnique Nucléaire
PIERRARD Jean-Marie	Mécanique
SABONNADIERE Jean-Claude	Informatique Fondamentale et Appliquée
Mme SAUCIER Gabrièle	Informatique Fondamentale et Appliquée

MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIE

M. LANDAU Ioan	Automatique

CHERCHEURS DU C.N.R.S. (Directeur et Maître de Recherche)

MM. FRUCHART Robert	Directeur de Recherche
ANSARA Ibrahim	Maître de Recherche
CARRE René	Maître de Recherche
DRIOLE Jean	Maître de Recherche
MATHIEU Jean-Claude	Maître de Recherche
MUNIER Jacques	Maître de Recherche

A ma Fille,

ma Femme,

et mes Parents.

J'exprime ma profonde reconnaissance à :

Monsieur le Professeur N. GASTINEL pour son enseignement de l'Analyse Numérique et l'intérêt qu'il a montré à la réalisation de ce travail.

Ses conseils et son dévouement pour un tel problème appliqué ont toujours été très appréciés.

Monsieur J. WOLF qui m'a introduit dans le domaine d'analyse des images et m'a permis de bénéficier de son aide active dans l'élaboration de cette thèse.

Messieurs les Professeurs F. ROBERT et P. CHIBON qui ont accepté de juger ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs G. BRUGAL, et R. BOUTTAZ qui ont contribué à l'élaboration du système d'analyse d'images décrit dans ce texte.

Je remercie aussi l'Equipe d'Analyse Numérique et particulièrement Monsieur A. EBERHARD pour son concours dans l'utilisation d'un tel système.

Je remercie le Service de Perforation et les Opérateurs pour leur compétence dans l'usage des unités de calcul.

Enfin, je remercie Mesdames F. BLANC et Cl. MEYRIEUX pour la dactylographie de ce texte ainsi que le Service de Reproduction pour la qualité de ce document.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

CHAPITRE I DESCRIPTION DU PROBLEME ET UTILISATION DU DISQUE DE NIPKOW.

1. Cycle cellulaire 1
2. Automatisation 3
3. Matériel optique à notre disposition 4
4. Estimation du temps nécessaire à l'exploration d'un champ comprenant 100 cellules. 6
5. Utilisation du disque de Nipkow 7
   5.1 Principe
   5.2 Description du disque de Nipkow
      5.2.1 Positionnement
      5.2.2 Contraintes
      5.2.3 Notations
      5.2.4 Calcul de l'angle occupé par l'exploration du diaphragme de mesure
   5.3 Erreur
   5.4 Choix de la fréquence d'échantillonnage
   5.5 Erreur due à une fréquence d'échantillonnage constante
   5.6 Dimensions du disque utilisé
6. Asservissement de la fréquence d'échantillonnage 15
7. Gain de temps 16

CHAPITRE II ACQUISITION DES DONNEES

1. Module de balayage 19
2. Module de commande 22
   2.1 Matrice de programmation
   2.2 Exemple de programme sur le module de commande
   2.3 Schéma d'acquisition des données
3. Conversion A/N du signal photométrique 27

CHAPITRE III ECHANTILLONNAGE - PRETRAITEMENT

1. Image continue et image digitale 30
   1.1 Intensité de lumière - densité optique - transmission

1.2 Fonction image objet - fonction image diaphragmée
1.3 Fonction image continue
1.4 Image digitale
2. Echantillonnage 37
3. Prétraitement des images continues et digitales 41
3.1 Opérateur sur une image continue
3.2 Opérateur linéaire invariant en position
3.2.1 Définitions
3.2.2 Exemples
3.3 Introduction de l'opérateur linéaire invariant en position comme une convolution
3.3.1 Fonctions images continues
3.3.2 Fonctions images digitales
3.3.3 Transformée en z à deux dimensions - Fonction de transfert
4. Filtre digital et opérateur linéaire invariant en position sur une image digitale 46
4.1 Définitions
4.2 Filtre digital et fonction de transfert de l'opérateur linéaire invariant en position associé
4.3 Transformation de Fourier digitale
4.4 Implantation d'un filtre digital à deux dimensions
4.5 Filtres passe-bas, passe-haut
5. Exemples de filtres digitaux 52
5.1 Exemple I : filtre de "lissage"
5.2 Exemple II : filtrage non récursif passe-bas
5.3 Exemple III : filtrage des basses fréquences

CHAPITRE IV DIFINITIONS ET PROPRIETES TOPOLOGIQUES LIEES AU TRAITEMENT DES IMAGES DIGITALES

1. Notions de métriques et de voisinages utilisées 66
1.1 Métrique
1.2 Voisinage immédiat
2. Notion d'ensemble de points consécutifs au sens d'une métrique - cellule 67
2.1 Définition
2.2 Cellule et fond

3. Exemple justifiant du choix de la d_∞ - consécutivité pour les cellules et de la d_1 - consécutivité pour le fond 68
4. Topologie digitale 69
5. Intérieur - bord 74
5.1 Définitions
5.2 Théorème

CHAPITRE V ALGORITHME "BORD"

1. Utilisation du "bord" pour le calcul des paramètres de forme 78
2. Algorithme de reconstitution des différents champs en un support rectangulaire 80
3. Algorithme de suite des bords des cellules 86
3.1 Description de l'algorithme
3.2 Codage du bord d'une cellule
4. Algorithme - Exemples d'application 92
5. Discussion 102

CHAPITRE VI ALGORITHME "CELL"

1. Introduction 102
2. Machines séquentielles finies 103
2.1 Définition
2.2 Utilisation des machines séquentielles finies pour la modélisation de notre problème
3. Algorithme 106
3.1 Analyse d'une bande de NTL champs disques
3.2 Insertion du calcul d'un paramètre
3.3 Extension au cas de plusieurs "bandes" adjacentes
4. Mise en application de cet algorithme 114
4.1 Valeurs de la fonction image digitale - Transmission - Densité optique
4.2 Paramètres évalués
5. Résultats 117
5.1 Validité de l'algorithme sur un exemple de 12 champs

5.2 Analyse d'une portion de lame par l'algorithme "cell" et la méthode des deux longueurs d'onde
5.3 Paramètres de différenciation des phases
5.3.1 Courbure et contraste
5.3.2 Diagnostic établi sur 109 cellules
5.4 Performances de l'algorithme cell
6. Discussion

INTRODUCTION

L'analyse des signaux à deux dimensions, en particulier l'analyse d'images (microscopiques), fait appel à plusieurs domaines d'exploitations des techniques nouvelles tels que :

- l'acquisition des données
- le traitement des données.

L'acquisition des données doit, pour un éventail très large d'applications, satisfaire aux notions de :

- reproductibilité,
- rapidité,
- différenciation maximale des nuances au cours de l'échantillonnage.

Le traitement de ces données peut être effectué dans plusieurs buts :

- Amélioration, suivant certains critères, du signal par l'emploi de filtres numériques [1] , [2] .
- Recherche et analyse des formes présentes dans l'image [3] , [4] .
- Compression de l'ensemble des données avec un minimum de perte du contenu de l'information [5] , [6] , [7].

Durant ces dernières années plusieurs systèmes d'analyse d'images ont été conçus utilisant comme appareil de prise de données soit une caméra [8] , soit un flying spot [9] , [10] , soit un photomultiplicateur [11].

Le travail que nous présentons a été effectué avec les principales contraintes :

- Obtenir un nombre suffisant de niveaux de différenciation permettant de traiter l'information non seulement avec des critères de forme mais également avec des critères liés au comportement du signal.
- Avoir la possibilité d'analyser des images de grande taille.
- Ne pas figer le traitement au problème posé.

Le chapitre I est consacré à la présentation du problème d'exploration d'une population cellulaire dans le but d'en extraire différents paramètres.

L'objectif avec lequel nous affrontons ce problème est celui d'une automatisation rapide et "précise" d'acquisition de données. Nous prenons soin de ne pas particulariser le mode d'acquisition au seul problème posé. On fait appel à une technique déja utilisée dans les premières années de la télévision, le disque de Nipkow.

Le chapitre II décrit le mode d'acquisition des données, par plages successives, suivant une géométrie préprogrammable. Cè schéma de balayage s'effectue à l'aide d'une matrice de programmation dépendant d'un microprocesseur ayant pour fonction la commande et l'échantillonnage d'un signal analogique photométrique.

Le problème de l'échantillonnage est examiné au chapitre III où on définit le modèle mathématique correspondant à une telle acquisition.

Dans ce chapitre on introduit les notions de fonction image continue et digitale et nous évoquons avec quelques exemples les problèmes de filtrage par l'intermédiaire des opérateurs linéaires invariants en position.

Les chapitres suivants sont plus précisément orientés vers le traitement algorithmique des images dans le but d'extraire une liste de paramètres différenciateurs pour chaque forme isolée.

Le chapitre IV introduit la notion de "cellule" et de "fond" à l'aide de "voisinages immédiats" définis à partir des métriques d_1 et d_∞ , et d'un critère de seuillage du signal numérique. On montre l'existence d'une topologie permettant de "séparer" l'intérieur d'une cellule du complémentaire de celle-ci à l'aide d'un ensemble que l'on définit préalablement comme "bord".

Cet ensemble "bord" est analysé dans le chapitre suivant (chapitre V) par un algorithme nécessitant la reconstitution du support de l'image lue, sous la forme d'une matrice.

Cet algorithme permet, en plus de l'obtention de paramètres de forme tels que surface, périmètre, "courbure", le stockage de chaque cellule sous forme condensée.

Ce travail se termine (chapitre VI) par l'utilisation de la notion algébrique de machines séquentielles finies et la description d'un algorithme permettant d'évaluer pour chaque cellule des paramètres morphologiques et photométriques, ceci sans modification de l'ordre de lecture des valeurs.

Ces algorithmes sont illustrés de résultats et nous donnons une évaluation des performances de chacun d'eux.

Cependant tous les problèmes liés au traitement d'images n'ont pas été évoqués notamment les problèmes :

- de contraction par les méthodes de squelettisation [12], [13],
- de restitution d'images analogiques à partir d'images digitales transformées [14],[15].

CHAPITRE I

DESCRIPTION DU PROBLEME ET UTILISATION DU DISQUE DE NIPKOW

Le problème auquel nous nous sommes intéressés est relatif au traitement d'images microscopiques, dans le but de discriminer divers "types cellulaires" dans une population fixée sur une lame histologique.

I - CYCLE CELLULAIRE.

Toute cellule durant son existence suit un cycle cellulaire d'une durée moyenne de 24 heures, au terme duquel elle se divise en deux "cellules filles" qui suivront éventuellement ce même cycle [1].

Ce cycle se décompose en quatre phases successives (figure 1).

Phase G1 : phase au cours de laquelle le noyau a un aspect granuleux et clair.

Phase S : augmentation du contenu du noyau en acide désoxyribonucléique (A.D.N.). Cette quantité a doublé au terme de la phase S.

Phase G2 : phase courte durant laquelle la quantité d'A.D.N. demeure constante, égale au double de celle de la phase G1.

Phase M : phase au cours de laquelle la cellule se divise en deux cellules filles identiques dont la quantité d'A.D.N. est égale à la moitié de celle de la cellule mère.

Ces cellules deviennent soit des cellules en phase G1 qui suivront le même cycle cellulaire, soit des cellules qui cessent de se diviser (phase Go)[1].

La phase M est divisée en quatre phases, comme il est précisé sur la figure 1 :

- prophase
- métaphase
- anaphase
- télophase.

Métaphase et Anaphase sont réunies en une phase dénommée "mitose".

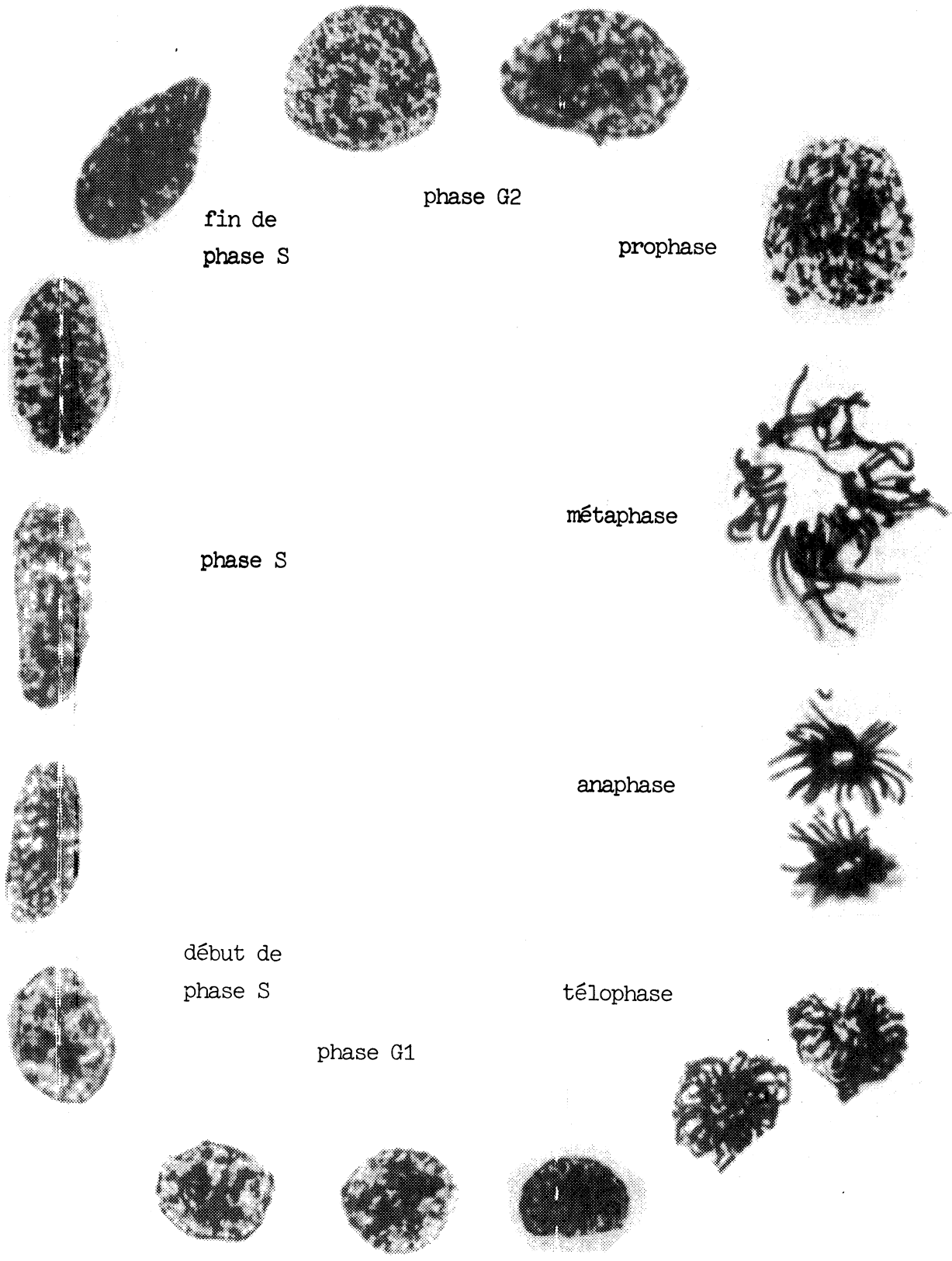


Figure 1 : Cycle cellulaire.

La question se pose donc de savoir déterminer dans une population de cellules le pourcentage de cellules en mitose, encore appelé indice mitotique.

Pour cela on introduit le terme de cellule en repos qui désigne toutes les cellules non en mitose.

Actuellement des indices mitotiques sont évalués et cela nécessite l'examen de 2000 cellules environ.
Cette opération de comptage dure approximativement 6 heures.

II - AUTOMATISATION

L'automatisation de ce problème va être séparée en deux étapes :

- acquisition des données
- traitement de ces données.

Extension de l'automatisation à d'autres résultats.

Outre la dornée de l'indice mitotique d'une population cellulaire il est intéressant d'obtenir certaines propriétés relatives à chaque cellule telles que :

- Adressage dans un système de coordonnées établi pour chaque lame histologique
- Paramètres de forme tels que "surface", "périmètre"
- Quantité d'A.D.N.

Il sera également utile de pouvoir établir certains résultats de biologie cellulaire tels que :

- la courbe de variation de la quantité d'A.D.N. durant le cycle cellulaire (figure 2),
- l'histogramme de distribution des phases, au cours du cycle cellulaire, en fonction de la quantité d'A.D.N. des cellules, le modèle étant connu [2] (figure 3).

Figure 2 : Courbe représentant la variation de la quantité d'ADN au cours du cycle cellulaire.

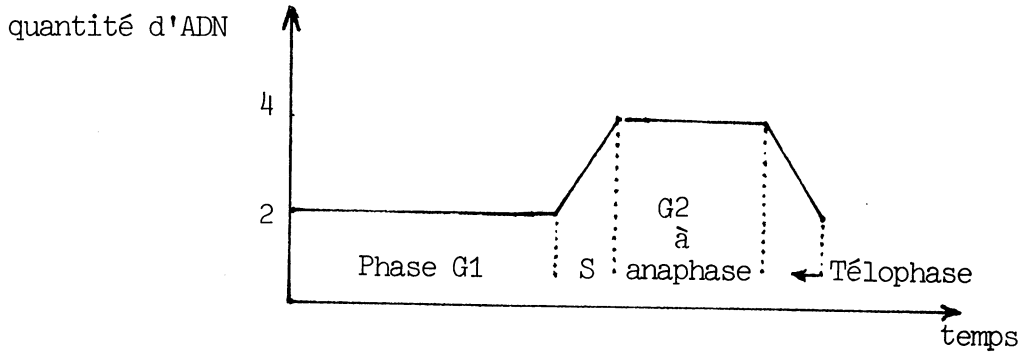
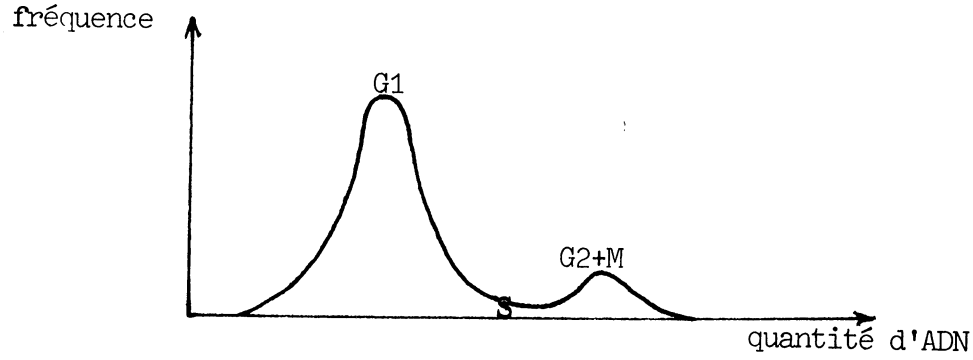


Figure 3 : Histogramme de distribution des ages des cellules en fonction de la quantité d'ADN



Ainsi il sera intéressant de définir un système d'acquisition de données ayant un éventail très ouvert de possibilités d'applications.

III - MATERIEL OPTIQUE INITIALEMENT A NOTRE DISPOSITION.

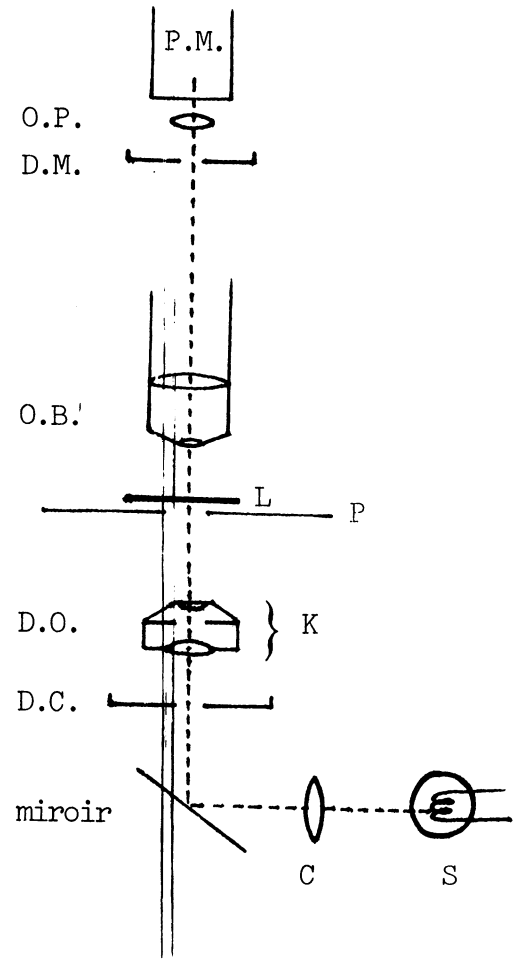
Nous disposons d'un microphotomètre LEITZ MPV1 composé de trois parties principales (figure 4) :

- Un microscope LEITZ orthoplan muni de systèmes d'éclairement permettant de travailler en lumière transmise ou en lumière réfléchie.
  Ce microscope comprend également divers objectifs afin de choisir le grossissement adéquat à la préparation.

- Deux platines motorisées supportant la préparation et permettant de déplacer celle-ci par pas élémentaire de 8µm (platine à grands pas) ou de 0,4µm (platine à petits pas) suivant deux directions orthogonales.

- Un photomultiplicateur ne recevant du faisceau de lumière ayant traversé la préparation que la partie non arrêtée par le diaphragme de mesure.

Figure 4 : Microphotomètre.



S Source lumineuse
C Collecteur
K Condenseur
D.C. Diaphragme de Champ
D.O. Diaphragme d'Ouverture
P Platines
L Lame histologique
O.B. Objectif
D.M. Diaphragme de Mesure
O.P. Oculaire Photométrique
P.M. Photomultiplicateur
Trajet Optique -·----

IV - ESTIMATION DU TEMPS NECESSAIRE A L'EXPLORATION D'UN CHAMP COMPRENANT 100 CELLULES.

Avec l'ensemble précédemment cité on peut explorer des préparations cellulaires de la manière suivante.

On suppose avoir réglé la grosseur du diaphragme de telle façon que, compte tenu de l'objectif, il corresponde à un carré de 0,4 µm de côté au niveau de la préparation.

Ayant enregistré la valeur d'intensité donnée par le photomètre on déplace la préparation, à l'aide de la platine à petits pas, d'une distance de 0,4 µm afin d'obtenir des mesures sur des éléments de surface adjacents .

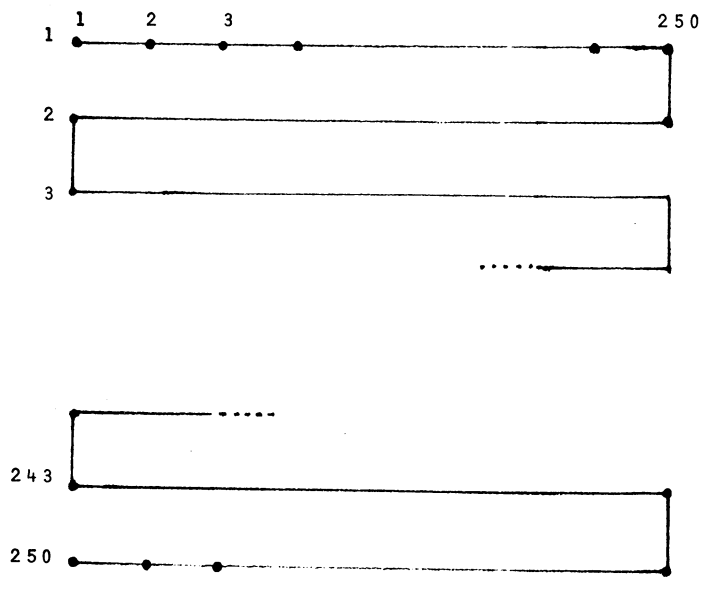
La platine à petits pas se déplace avec une fréquence égale à 100 Hz.

Supposons qu'une cellule occupe en moyenne une surface de 100µm^2. Ainsi l'examen de 100 cellules nécessitera par exemple l'exploration d'un champ carré de taille 100µm × 100µm.

Le balayage s'effectue en "lacet" (figure 5) et on obtient le temps nécessaire pour cette exploration :

$$t_{100} = \frac{100}{0,4} \times \frac{1}{100} \times \frac{100}{0,4} = 625 \text{ secondes.}$$

Figure 5 :



Nous voyons ainsi apparaître la nécessité d'accélérer l'acquisition des données photométriques en se fixant les contraintes suivantes :

- Acquérir ces données en un temps significativement inférieur au précédent.
- Avoir les mesures photométriques d'éléments de surface minimale compte tenu du pouvoir de résolution du microscope.
- Tenir compte de l'avantage du pouvoir de différenciation du photomultiplicateur.

V - UTILISATION DU DISQUE DE NIPKOW.

5.1. PRINCIPE.

Le premier disque de Nipkow a été mis au point en 1884. Il a été utilisé, durant les premières années de la télévision, comme procédé électromécanique de "balayage" de l'image.

Ainsi que le décrivent Sawyer et Bostrom [3], il consiste en un disque perforé de trous, situés sur des cercles concentriques, tels qu'entre deux trous successifs la différence des longueurs des rayons soit constante.

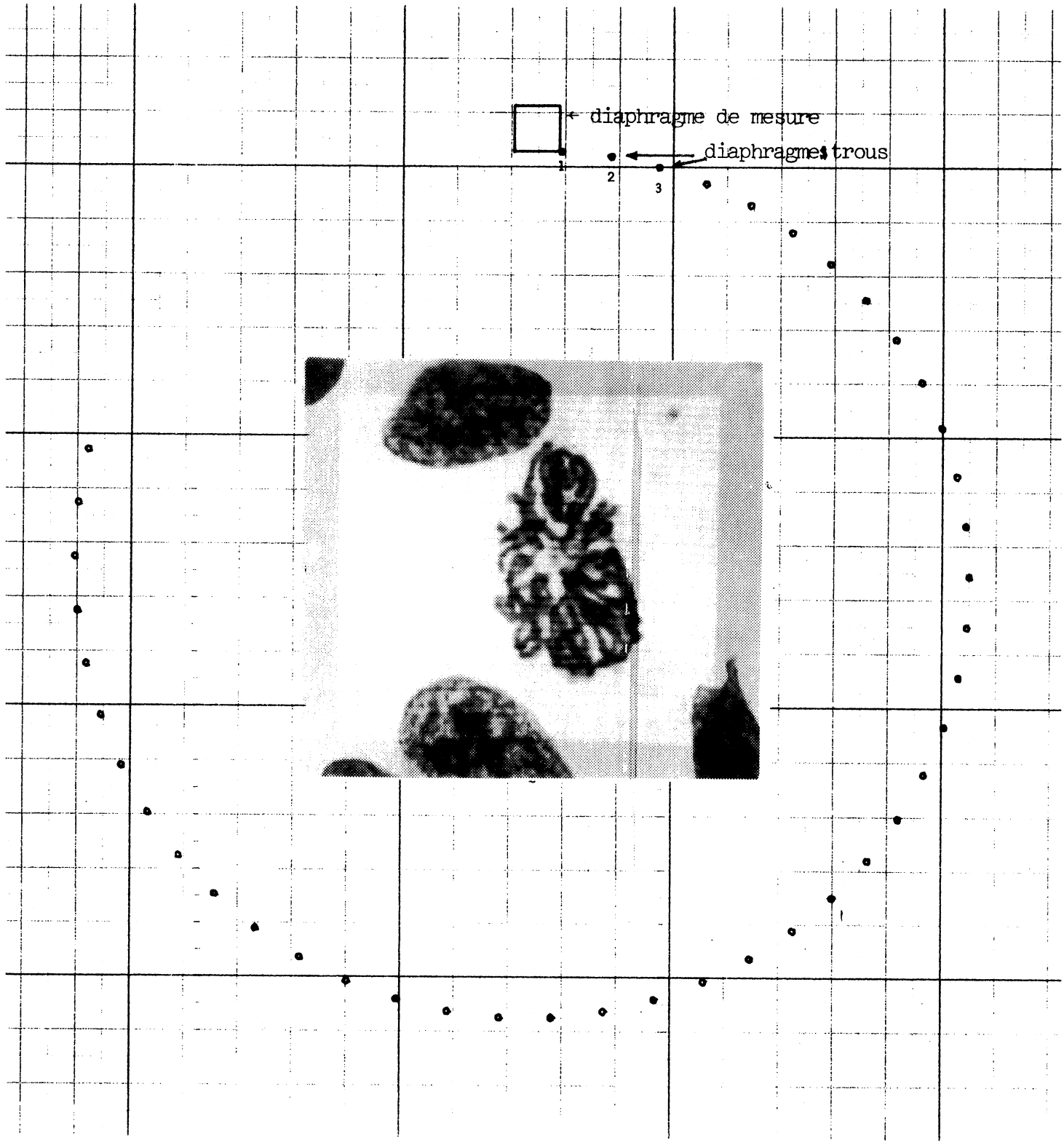
Au cours de la rotation du disque, chaque trou parcourt une portion d'un diaphragme rectangulaire sous la forme d'une section de couronne que nous associerons à une bande rectiligne de ce diaphragme.

Le diaphragme rectangulaire, dénommé aussi diaphragme de mesure, est positionné de manière à ce que le centre du disque soit sur la médiatrice d'un de ses côtés comme il est précisé en figure 6.

Il convient de remarquer que :

- A tout instant un seul trou doit être présent dans le diaphragme de mesure ; il joue ainsi le rôle de diaphragme de mesure mobile.
- Les trous seront choisis de forme carrée afin que lors de l'"échantillonnage" du signal photométrique, les positions des diaphragmes mobiles (ou trous) correspondent à un "pavage" du diaphragme de mesure par des éléments adjacents.

Figure 6 : Disque de Nipkow et représentation du "balayage" au niveau de la préparation.

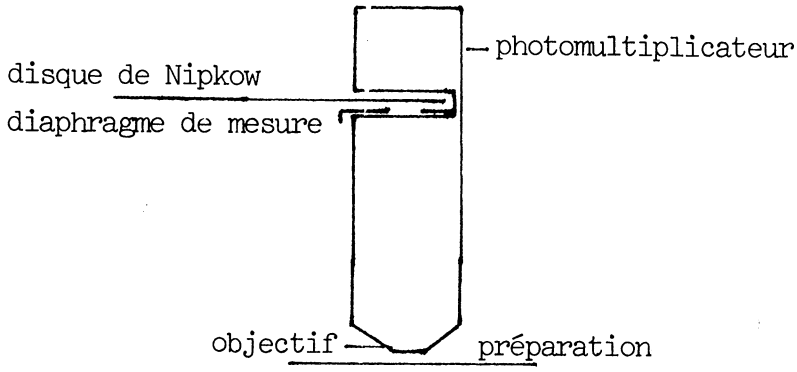


5.2. DESCRIPTION DU DISQUE DE NIPKOW.

5.2.1. Positionnement.

Le disque de nipkow est positionné au-dessus du diaphragme de mesure (figure 7) ; à ce niveau nous avons un grossissement G.

Figure 7 : Positionnement du disque de Nipkow

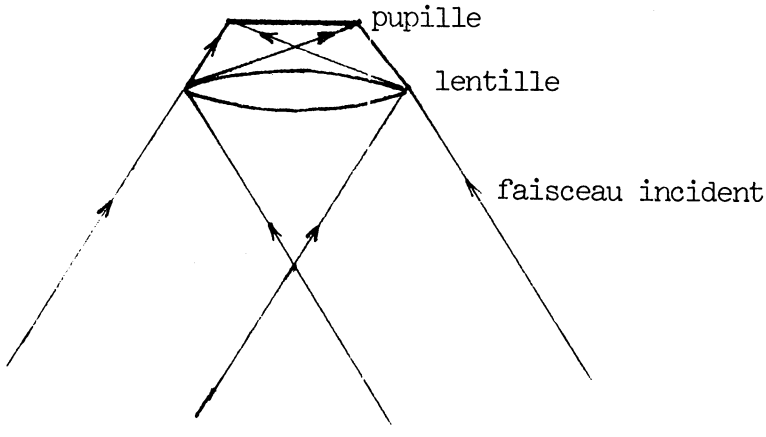


5.2.2. Contraintes.

Du fait de l'insertion du disque dans le tube photométrique son rayon a la valeur maximale de 120mm.

Le diaphragme de mesure est de forme carrée et a une taille également maximale de 11,5mm de côté en raison de la taille de l'image de pupille de sortie sur la plaque sensible du photomultiplicateur (figure 8).

Figure 8 : Formation de l'image sur la plaque sensible du photomultiplicateur.



5.2.3. Notation.

ℓ = longueur du côté du diaphragme de mesure.

G = grossissement entre le plan de la préparation et celui du disque.

N = nombre de trous carrés identiques.

C = longueur du côté d'un trou.

R_i = distance du centre du disque au côté extérieur du $i^{ème}$ trou.

V = vitesse de rotation du disque en nombre de tours par minute.

Nous numérotons les trous comme il est indiquée en figure 6, le passage des trous à travers le diaphragme de mesure étant effectué dans cet ordre.

5.2.4. Calcul de l'angle occupé par l'exploration du diaphragme de mesure.

Soit θ_b cet angle.

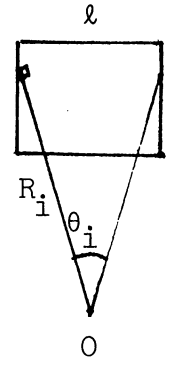
Si on désigne par θ_i l'angle occupé par le passage du $i^{ème}$ trou dans le diaphragme de mesure on a :

$$\theta_i = 2 \times \text{Arc sin} \frac{\ell}{2R_i} =$$

$$= 2 \times \text{Arc sin} \frac{\ell}{2(R_1+(i-1)C)}$$

D'où :

$$\theta_b = 2 \sum_{1}^{N} \text{Arc sin} \frac{\ell}{2(R_1+(i-1)C)}$$



Cet angle θ_b devant être inférieur à 2π, pour éviter la présence simultanée de deux trous dans le diaphragme de mesure nous définissons "secteur noir", le secteur d'angle $2\pi - \theta_b$.

L'intérêt de ce "secteur noir" est dans le changement du champ image à explorer à l'aide des platines de déplacement de la préparation.

Calcul du "secteur noir"

Soit θ_d l'angle de ce secteur.

On désigne par F_G la fréquence de déplacement des platines à l'aide des moteurs à grands pas (8µm dans les deux directions).

Le nombre maximal de pas de la platine dans chacune des directions est donné par les relations :

$$npas = E\left(\frac{\ell}{G \times 8}\right)$$

où E(x) désigne la partie entière de x.
On introduit cette fonction E(x) car on admet la possibilité d'un recouvrement partiel de l'image d'un champ à l'autre.
Le temps nécessaire pour effectuer ce déplacement est donc :

$$t_d = \frac{npas}{F_G} \qquad \text{(en secondes)}$$

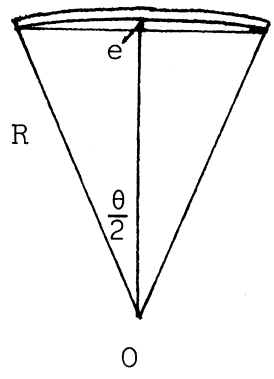
Le secteur θ_d sera donné par :

$$\theta_d = \frac{V \times 2\pi}{60} \times t_d = \frac{V \times \pi}{30 \times F_G} \times npas$$

Ainsi connaissant la vitesse de rotation du disque (V), la fréquence de déplacement des platines (F_G) et la taille du diaphragme de mesure (ℓ) on détermine npas puis θ_d et enfin $\theta_b = 2\pi - \theta_d$.
La connaissance de θ_b permettra de définir la taille minimale des trous.

5.3. ERREUR .

Mesure de l'écart entre la portion de couronne balayée par un trou et la bande correspondante du diaphragme de mesure.



$$e = R - R\cos\frac{\theta}{2} = R \times \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2\frac{\theta}{2}}\right)$$

$$= R \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\ell^2}{4R^2}}\right)$$

$$= \frac{\ell}{2} \times \frac{R \times 2}{\ell} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\ell^2}{4R^2}}\right)$$

Si on pose $x = \frac{2R}{\ell}$ on a :

$$e = \frac{\ell}{2} \quad x \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{x^2}}\right) = \frac{\ell}{2} \left(x - \sqrt{x^2 - 1}\right)$$

$$\frac{de}{dx} = \frac{\ell}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{x}}}\right) < 0$$

e est une fonction décroissante de x donc de R.

L'écart e est donc maximum pour le premier trou.

5.4. CHOIX DE LA FREQUENCE D'ECHANTILLONNAGE.

Le signal analogique sortant du photomultiplicateur qui, comme nous le verrons ultérieurement représente la quantité de lumière traversant un trou, est échantillonné lors d'une conversion analogique numérique afin de subir les traitements décrits par la suite.

L'échantillonnage numérique à fréquence constante F consiste à ne retenir du signal analogique que des valeurs espacées dans le temps de $\frac{1}{F}$ seconde.

Afin que les valeurs photométriques échantillonnées correspondent à des éléments de surface de l'objet adjacents, la fréquence d'échantillonnage a été calculée de façon à ce que deux valeurs successives correspondent à un déplacement du diaphragme (trou) égal à sa propre dimension.

Si p_i et t_i représentent respectivement la distance et le temps relatifs au $i^{ème}$ trou pour traverser le diaphragme de mesure on a les relations :

$$p_i = R_i \times 2 \times \text{Arc sin} \frac{\ell}{2 R_i}$$

$$t_i = \frac{p_i}{2 \times \pi \times V \times R_i} \times 60$$

Pour le trou n° i la fréquence d'échantillonnage sera donnée par :

$$F_i = \frac{p_i}{C \times t_i} = \frac{2 \pi v R_i}{C} \times \frac{1}{60}$$

Cette relation montre que la fréquence d'échantillonnage n'est pas constante pour tous les trous. Elle est croissante du trou 1 au trou N.

5.5. ERREUR DUE A UNE FREQUENCE D'ECHANTILLONNAGE CONSTANTE.

Le nombre de valeurs échantillonnées pour le $i^{ème}$ trou, lorsque l'on prend pour fréquence d'échantillonnage une fréquence donnée F, est donné par la relation :

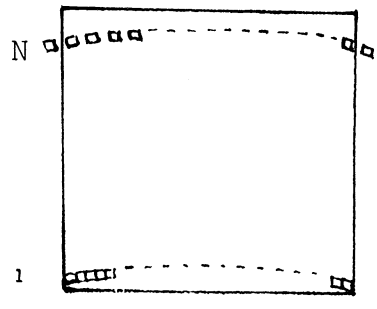
$$n_i = \frac{\ell \times F}{2 \pi \times V \times R_i} \times 60$$

Si on choisit comme fréquence F la fréquence F_1 on a pour le trou numéro N

$$n_N = \frac{\ell \times F_1 \times 60}{2 \pi \times V \times R_N} < \frac{\ell \times F_N \times 60}{2 \pi \times V \times R_N}$$

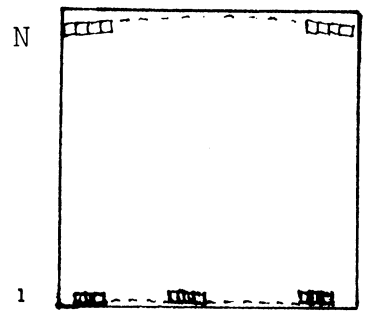
Ceci signifie que pour le $N^{ème}$ trou la durée de l'échantillonnage excède le temps mis par le $N^{ème}$ trou pour traverser le diaphragme de mesure (figure 9)

Figure 9 : Position des trous lors de l'échantillonnage selon la fréquence F_1.



De même si nous prenons pour fréquence d'échantillonnage la valeur F_N correspondant à un échantillonnage correct du $N^{ème}$ trou nous observons des recouvrements pour les autres trous comme il est indiqué sur la figure 10.

Figure 10 : Position des trous lors de l'échantillonnage selon la fréquence F_N.



$$n_N = \frac{\ell \times F_N}{2\pi \times V \times R_N} \times 60$$

$$n_i = \frac{\ell \times F_N}{2\pi \times V \times R_i} \times 60$$

$$\frac{n_i}{n_N} = \frac{R_N}{R_i} > 1 .$$

Il nous a fallu étudier le problème d'asservissement de la fréquence d'échantillonnage du signal photométrique analogique à la rotation du disque.

C'est un point de différenciation de notre système d'acquisition de données avec celui de Mendelsohn [4] qui a également utilisé le procédé d'acquisition d'une image à l'aide du disque de Nipkow.

5.6. DIMENSIONS DU DISQUE UTILISE

Le disque a un Rayon de 120 mm.
Le diaphragme de mesure est un carré de 11,25 mm de côté avec une tolérance de 5×10^{-3} mm . Les trous diaphragmes sont des carrés de côté 0,250 mm avec une tolérance de 5×10^{-3} mm.
Le trou n° 1 est situé à 103,75 mm du centre du disque et le $45^{ème}$ à 115 mm du centre. Par la suite nous négligerons les trous 1 et 45 et n'échantillonnerons que les 43 trous demeurant qui effectueront l'exploration du diaphragme de mesure suivant 43 lignes chacune discrétisée en 45 valeurs.

On calcule ainsi l'écart maximal entre la portion de couronne balayée par le premier trou et la bande rectiligne correspondante :

$$e_{max} = R_1 \times (1 - \sqrt{1 - \frac{\ell^2}{4 R_1^2}})$$

$$= 0,152 \text{ mm.}$$

Ceci nous permet d'affirmer que chaque trou demeure en partie dans la bande du diaphragme de mesure correspondante.

VI. ASSERVISSEMENT DE LA FREQUENCE D'ECHANTILLONNAGE.

Nous utiliserons un procédé optique pour asservir la fréquence. Pour cela, un film sur lequel sont imprimées des barrettes de bandes noires, est placé sur le disque.

Ces barrettes sont au nombre de 43 et chaque barrette comporte 45 bandes.

Ainsi, une bande correspond à une position précise de l'un des 43 trous parmi les 45 possibilités dans le diaphragme de mesure.

Ces bandes, au cours de la rotation du film solidaire du disque, passent entre une source lumineuse et une photodiode.

Le signal de la photodiode est modulé selon la fréquence de passage des bandes et converti en un signal créneau par une électronique appropriée.

Chaque créneau est un ordre de discrétisation du signal photométrique.

Nous verrons au chapitre suivant, traitant de
des données, une explication plus détaillée de la conversion du signal photométrique.

VII. GAIN DE TEMPS.

Calculons le temps nécessaire à l'exploration d'un champ de taille 100 µm × 100 µm qui comme nous l'avons supposé en IV comprend 100 cellules.

Le grossissement G est égal à 383.

La vitesse de rotation du disque est égale à 1 tour/seconde.
Donc l'exploration d'une surface objet de :

$$\left(\frac{45 \times 0{,}25}{0{,}383} \times \frac{43 \quad 0{,}25}{0{,}383}\right) = 29{,}6\ \mu m \times 28{,}3\ \mu m$$

nécessité 1 seconde.
La taille des trous rapportée au plan objet est de 0,66 µm × 0,66 µm.
Pour passer au champ suivant on effectue trois pas de la grande platine (8 µ) dans un sens ou dans l'autre. Comme il est indiqué sur la figure 11, un champ carré de 100 µm × 100 µm nécessité la juxtaposition de 16 champs disques.

Figure 11 : Schéma d'exploration d'un champ objet de 100 µm × 100 µm à l'aide du disque de Nipkow.

24µm + 24µm + 24µm + 29,6µm = 101,6µm

24µm	1	8	9	16
24µm	2	7	10	15
24µm	3	6	11	14
28,3µm	4	5	12	13

100,3µm

Le champ de taille 100 µm × 100 µm est exploré en lacets comme il est indiqué sur la figure 11. La fréquence de déplacement de la platine à grands pas étant de 50 Hz nous avons donc pour le temps d'exploration

$$t_d = 16 \times 1 + 15 \times \frac{1}{50} \times 3 \simeq 17 \text{ secondes.}$$

Malgré l'augmentation de la taille du diaphragme de mesure trou rapportée au plan objet qui est égale à 0,66 µm × 0,66 µm avec le disque au lieu de 0,4 µm × 0,4 µm avec la platine à petits pas, on constate un gain de temps fort appréciable : 17 secondes avec le disque et 625 secondes avec la platine soit 36 fois plus rapidement.

CHAPITRE II

ACQUISITION DES DONNEES

Nous décrivons dans ce chapitre la phase actuelle d'acquisition des données, processus situé entre l'instant où la lame supportant la préparation à analyser est placée sous l'objectif du microscope (tous réglages optiques effectués) et celui où les valeurs d'intensité sont stockées sur bande magnétique pouvant être lue par un lecteur de bande couplé à un calculateur.

Nous nous référerons à la figure 1, schématisant le système d'acquisition [1], [2].

L'ensemble d'acquisition des données comporte :

- un microphotomètre LEITZ MPV1 muni de platines motorisées permettant de déplacer le support de la préparation sous l'objectif du microscope suivant deux directions orthogonales soit par pas de 8 µm soit par pas de 0,4 µm.
- Un module de balayage de l'image composé du disque de Nipkow et de l'ensemble de conversion analogique-numérique permettant de conserver la géométrie du pavage du diaphragme de mesure à l'aide des diaphragmes-trous.
- Un module de commande programmable permettant de piloter les platines et de controler la commande de conversion analogique-numérique.

I. MODULE DE BALAYAGE DE L'IMAGE.

Le disque de Nipkow est composé de 43 trous carrés de 0,25 mm de côté explorant le diaphragme de mesure sous la forme de 43 bandes adjacentes.

Le signal analogique relatif à chaque trou doit être échantillonné en 45 valeurs numériques qui correspondent aux 45 positions adjacentes du trou dans sa bande.

Pour cela nous avons monté sur un film optique solidaire du disque 43 groupes de 45 bandes noires.

L'écart entre deux bande successives d'un même groupe est constant du fait qu'elles correspondent à la conversion du signal obtenu par le même diaphragme-trou. Mais cet écart décroît lorsque l'on passe du premier groupe, relatif au diaphragme-trou le plus proche du centre, au 43ème groupe.

Ce film durant l'évolution au disque défile entre une source lumineuse et un système optique projetant l'image des bandes noires sur une photodiode notée φs (figure 1).

Le signal de la photodiode est formaté en un signal créneau où chaque créneau correspond à l'ordre de conversion analogique numérique du signal photométrique (figure 2).

Ayant autorisé un espace temporel entre la sortie d'un diaphragme-trou du diaphragme de mesure et l'entrée du suivant on constate une chute du signal photométrique durant cet instant.

Le disque comporte également une détection du secteur noir qui s'effectue par l'intermédiaire d'une photodiode notée φN (figure 1).

Elle détecte sur une seconde piste optique disposée sur le film, le début et la fin du secteur noir (figure 2).

Le signal de cette photodiode est également formaté en un signal créneau qui sera interprêté par le module de commande.

Figure 1 : Système d'Acquisition des données.

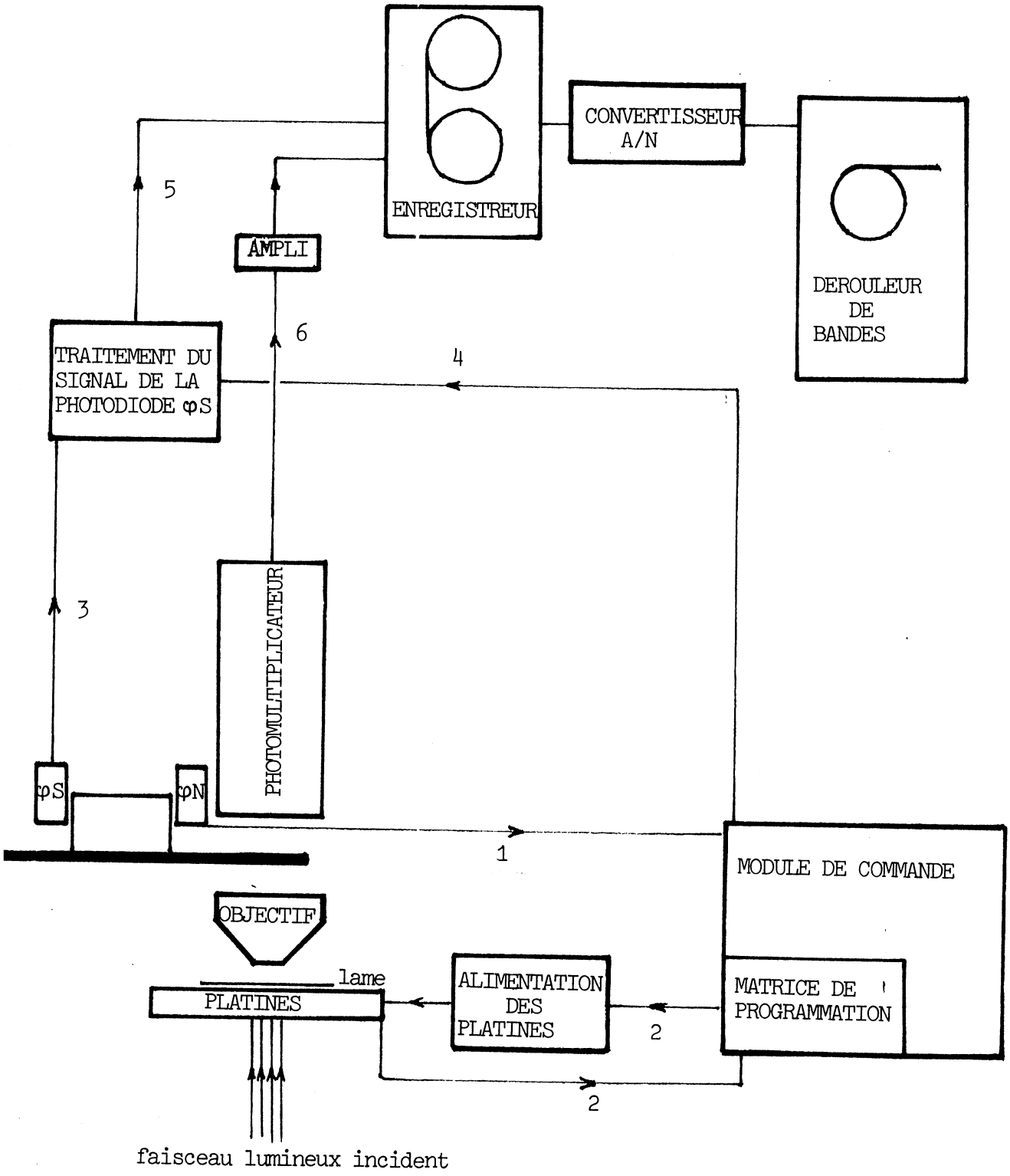
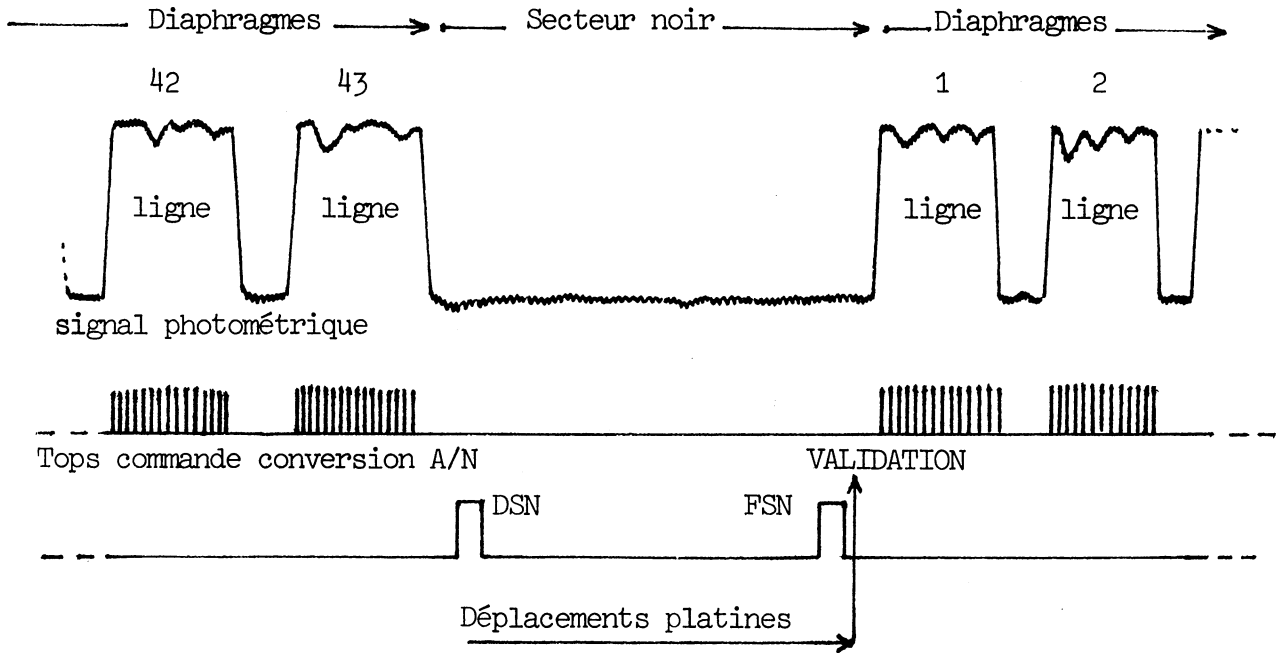


Figure 2 : Schéma de conversion A/N du signal photométrique.



II. MODULE DE COMMANDE.

Le but du module de commande est de deux types :

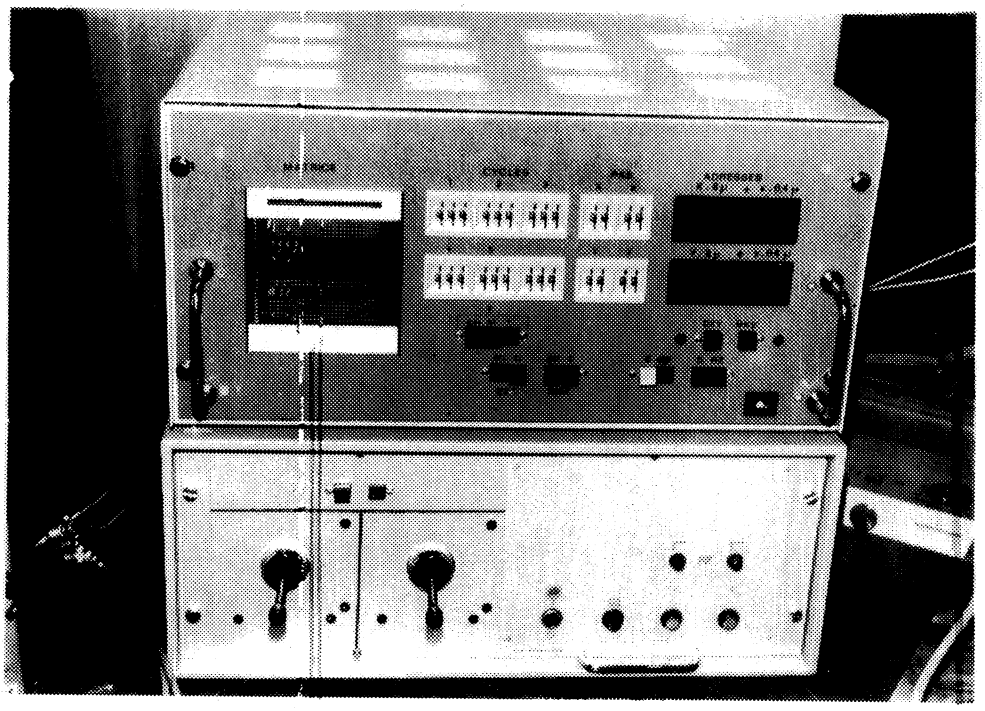
- permettre une programmation de l'exploration de la préparation par déplacement des platines,
- récupérer le signal photométrique et le signal d'ordre de conversion donné par la photodiode φs correspondant à chacun des champs disques élémentaires.

Il est composé d'une unité programmable (figure 3) comportant :

- une matrice de 30 lignes et 30 colonnes permettant d'afficher un programme,

- des roues codeuses numériques à l'aide desquelles on affiche les nombres de pas devant être effectués par les platines lorsqu'elles sont sollicitées,
- des afficheurs numériques indiquant à tout moment les nombres de pas effectués par chaque platine dans les deux directions.

Figure 3 : Matrice de programmation



2.1. MATRICE DE PROGRAMMATION.

Elle est composée de 30 lignes et 30 colonnes. Chaque ligne correspond à une instruction (figure 4) et cet ensemble est lu de la première colonne à la dernière, chaque colonne étant lue de la ligne 1 à la ligne 30 séquentiellement.

En tout point (I,J) de la matrice on peut enficher une diode qui permettra d'exécuter l'instruction numéro I au cours de la lecture de la $J^{ème}$ colonne.

Figure 4 : Instructions portées par les lignes de la matrice de programmation.

1	Début de cycle 1
2	Début de cycle 2
3	Début de cycle 3
4	Début de cycle 4
5	Début de cycle 5
6	Attente signal DSN
7	
8	Avance platine GP en X
9	Recul platine GP en X
10	Avance platine GP en Y
11	Recul platine GP en Y
12	Avance platine PP en X
13	Recul platine PP en X
14	Avance platine PP en Y
15	Recul platine PP en Y
16	
17	
18	Attente temporaire
19	Attente signal FSN
20	Emission signal validation
21	
22	
23	Fin de cycle 5
24	Fin de cycle 4
25	Fin de cycle 3
26	Fin de cycle 2
27	Fin de cycle 1
28	Retour début programme
29	
30	Stop

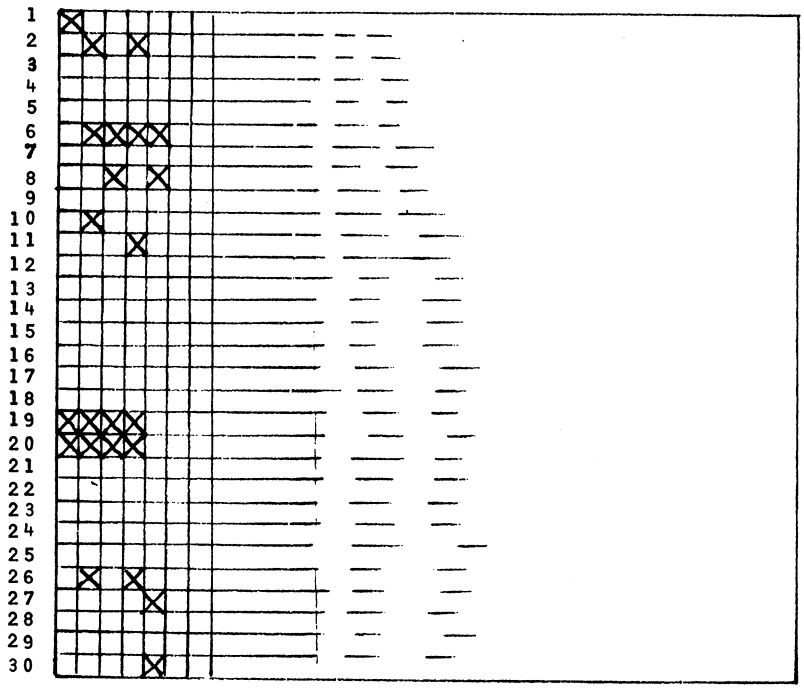
Les instructions 1 à 5 et 23 à 27 sont des ouvertures et fermetures de cycles permettant à l'aide des roues codeuses de répéter un ensemble d'instructions.

Les instructions 8 à 15 sont relatives aux ordres de déplacement des platines.

Les instructions 6 et 19 sont liées au signal émis par la photodiode φN détectant le secteur noir dont nous verrons ultérieurement les fonctions détaillées.

L'instruction 20 permet de valider le signal de la photodiode φs , les mouvements des platines étant effectués.

2.2. EXEMPLE DE PROGRAMME SUR LE MODULE DE COMMANDE.



cycle 1 | cycle 2

0 0 1 | 0 0 2

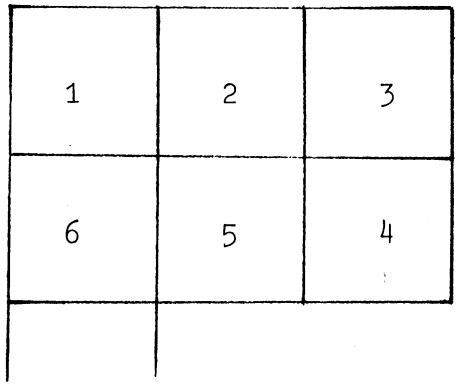
Nombre de déplacements

en X | en Y

0 0 3 | 0 0 3

L'exemple de programme précité permet l'exploration de six "champs" et la récupération des signaux de la photodiode φs et du photomètre. Chaque champ est exploré par le disque et le passage d'un champ au suivant s'effectue en déplaçant de trois pas la platine à grands pas selon l'une des deux directions (figure 5).

Figure 5 : Disposition des champs balayés par le disque et explorés par le programme précité en exemple.



2.3. SCHEMA D'ACQUISITION DES DONNEES.

Nous allons donner un bref descriptif du schéma d'acquisition nous référant à la figure 1.

Le signal de la photodiode φN est analysé par le module de commande par l'intermédiaire de la liaison 1.

Lorsque le programme de la matrice a atteint l'instruction 6 le module de commande permet l'exécution des instructions affichées par la suite sur la matrice (instructions 8 à 15), ceci par la liaison 2.

Deux cas peuvent alors se produire :

- Le module de commande reçoit par la liaison 1, de la part de la photodiode φN , l'annonce de fin de secteur noir, les déplacements des platines ordonnés par les instructions 8 à 15 étant achevés ; en ce cas l'instruction programmée n° 20 permet par la liaison 4 de valider les

signaux de la photodiode φs , provenant de la liaison 3.
Ces signaux ou tops de conversion atteignent l'enregistreur par la liaison 5.

- Le module de commande reçoit de la photodiode φN l'annonce de fin de secteur noir alors que les déplacements ne sont pas achevés.
En ce cas le module de commande attendra la fin du secteur noir d'un tour suivant pour valider les signaux de la photodiode φs .
Ainsi l'instruction 20 est exécutée à condition que l'instruction 19 soit exécutée après réception par la liaison 1 de l'annonce de la fin du secteur noir détectée par la photodiode φN .

La validation étant autorisée le signal provenant du photomètre par la liaison 6 est amplifié et atteint sous forme analogique par la liaison 7 l'enregistreur.

Un enregistreur Ampex permet de stocker les signaux du photomètre, de la photodiode φs avant la conversion.

En sortie du convertisseur Analogique Numérique on obtient les valeurs numériques qui seront stockées sur bande magnétique.

III. CONVERSION A/N DU SIGNAL PHOTOMETRIQUE.

Le signal analogique provenant du photomultiplicateur correspond à la valeur d'intensité de lumière de la portion du faisceau incident qui a traversé le diaphragme-trou.

Un problème peut se poser sur le fait que l'on prenne des mesures avec des diaphragmes-trou en déplacement.

Si nous estimons à 10^{-6} seconde le temps nécessaire au photomultiplicateur pour atteindre sa valeur d'équilibre on peut calculer la distance parcourue par le diaphragme-trou durant cet intervalle de temps.

Sachant que le secteur noir occupe un secteur égal au 1/4 du disque, on calcule approximativement le temps mis par un trou pour se déplacer de sa propre largeur.

$$t = \frac{t - \frac{1}{4}}{43 \times 45} \simeq 4.10^{-4} \text{ seconde.}$$

Ceci correspond pour le temps de 10^{-6} seconde à un déplacement de 0,2 % du diaphragme-trou.

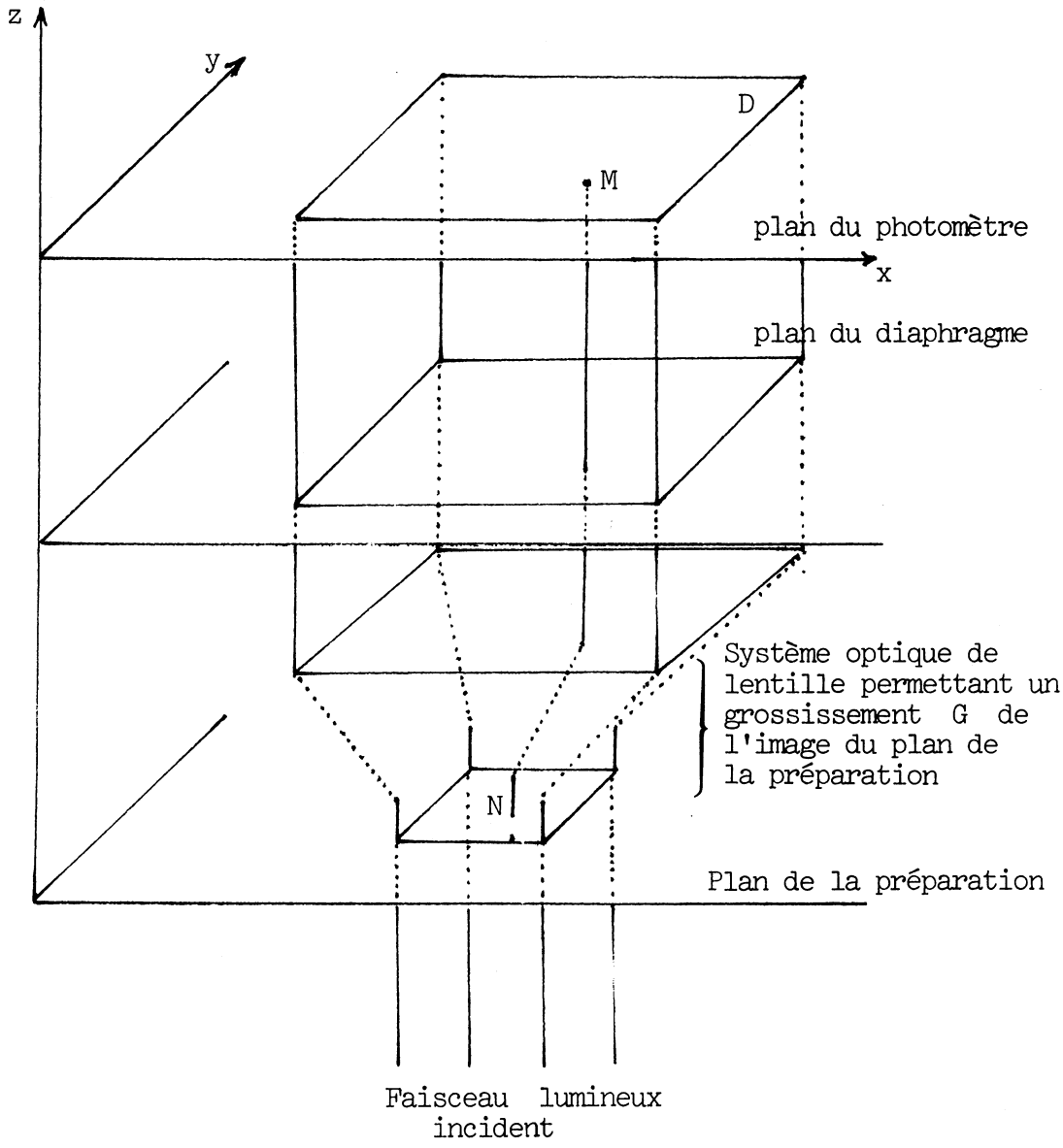
Nous pouvons donc supposer l'immobilité du diaphragme-trou durant la prise de mesure et envisager une augmentation de la vitesse de rotation du disque.

A la conversion chaque valeur est convertie sur 8 bits et nous disposons ainsi de 1935 valeurs par champ disque soit 1935 × 8 = 15 480 bits.

CHAPITRE III

- ECHANTILLONNAGE - PRETRAITEMENT -

I. IMAGE CONTINUE ET IMAGE DIGITALE



Soit D le domaine déterminé par l'intersection du plan du photomètre et du faisceau lumineux incident ayant traversé la préparation.

Remarque

Par l'intermédiaire de systèmes optiques tels que lentilles, on obtient une valeur G de grossissement (G > 1) entre le plan de la préparation et celui du photomètre.

Aussi en réalité on ne doit pas utiliser l'expression de faisceau parallèle, mais la gécmétrie n'intervenant pas dans les définitions qui essentiellement s'effectueront dans le plan du photomètre, avec parfois références aux éléments correspondants du plan de la préparation, nous supposerons avoir un faisceau de lumière parallèle.

1.1. INTENSITE DE LUMIERE - DENSITE OPTIQUE - TRANSMISSION.

Soit D le domaine rectangulaire maximal du plan du photomètre recevant des rayons lumineux d'un faisceau de lumière monochromatique perpendiculaire au plan du photomètre sans perte d'intensité lumineuse.

Si on définit par I_o l'intensité lumineuse avant passage à travers la préparation absorbante et par I l'intensité lumineuse mesurée par le photomètre après passage pour une même section du faisceau lumineux, on a d'après la loi de Beer-Lambert [1] :

$$k\,m = S \times DO = -S \log_{10} T = S(\log_{10} I_o - \log_{10} I)$$

où k est le coefficient d'absorption de la préparation.

m est l'épaisseur de la préparation à l'endroit de traversée du faisceau

S est la surface du champ de la préparation traversée par le faisceau

DO est la densité optique

T est la transmission.

On a donc la relation

$$DO = \log_{10} I_o - \log_{10} I = \log_{10} \frac{1}{T}$$

1.2. FONCTION IMAGE OBJET — FONCTION IMAGE DIAPHRAGMEE

Nous définissons, dans le plan de la préparation, la fonction image objet $\tilde{\varphi}$: $R^2 \to R$ telle qu'à chaque point M du plan de la préparation on associe la valeur de l'intensité lumineuse d'un rayon ayant traversé le plan en ce point.

Soit H l'application bijective et continue entre le plan de la préparation et celui du photomètre, traduisant le système optique (lentille de grossissement).

On définit dans le plan du photomètre la fonction image diaphragmée φ_D nulle en dehors de D par :

$$\varphi_D(x,y) = \tilde{\varphi}(H^{-1}(x,y)) \quad \text{si} \quad (x,y) \in D$$
$$= 0 \quad \text{sinon}$$

H a le rôle d'un opérateur d'homothétie entre le plan de la préparation et celui du photomètre.

Par définition φ_D est une fonction continue par morceaux, bornée et à support compact D .

On ne peut, en pratique, obtenir une telle fonction ponctuelle φ_D . Par contre, on peut disposer d'une autre fonction que nous définissons comme fonction image continue dont les valeurs seront données par le signal analogique provenant du photomultiplicateur.

I.3. FONCTION IMAGE CONTINUE

Nous associons au plan du photomètre un système de coordonnées polaires (ρ,θ) tel que $\rho = 0$ corresponde au centre du disque de Nipkow et $\theta = 0$ corresponde à la médiatrice du côté du diaphragme de mesure, passant par le centre du disque (figure 1).

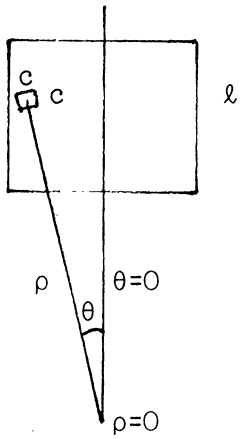


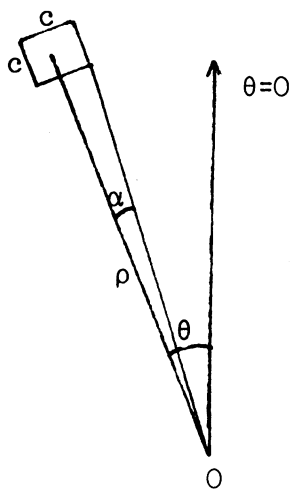
Figure 1 : Adjonction d'un système de coordonnées polaires.

Ayant désigné par $\varphi_D(\rho,\theta)$ la valeur de la fonction image diaphragmée au point (ρ,θ) on définit la fonction image continue g comme une fonction de contribution des valeurs de φ_D dans un voisinage de (ρ,θ) .

Ce voisinage de (ρ,θ) correspond au diaphragme trou centré en (ρ,θ) et la fonction de contribution est la moyenne des valeurs de φ_D sur la surface correspondant au diaphragme trou.
Cette valeur $g(\rho,\theta)$ est donnée par le photomultiplicateur et peut s'écrire [2]

$$g(\rho,\theta) = \frac{1}{c^2} \int_{\rho - \frac{c}{2}}^{\rho + \frac{c}{2}} \int_{\theta - \alpha}^{\theta + \alpha} \varphi_D(\rho',\theta')\, d\rho'\, d\theta' \quad ,$$

où α est l'angle donné par



$$\operatorname{tg}\ \alpha = \frac{c}{2\times\rho}$$

Compte tenu des grandeurs de c et de ρ on peut associer la valeur de α à $\frac{c}{2\times\rho}$.

D'où :

$$g(\rho,\theta) = \frac{1}{c^2}\int_{\rho-\frac{c}{2}}^{\rho+\frac{c}{2}}\int_{\theta-\frac{c}{2\times\rho}}^{\theta+\frac{c}{2\times\rho}} \varphi_D(\rho',\theta')\,d\rho'\,d\theta'$$

La variable ρ décrit un ensemble fini $R_1,R_2,\ldots,R_N$ où $R_{i+1} = R_i + c$ et pour un ρ fixé égal à R_i la variable θ appartient à l'intervalle $[-\frac{22\ c}{R_i}\ ,\ \frac{22\ c}{R_i}]$. En dehors de cet ensemble nous prendrons $g(\rho,\theta) = 0$.

On peut écrire g sous la forme suivante :

$$g(R_i,\theta) = \frac{1}{c^2}\int_{R_i-\frac{c}{2}}^{R_i+\frac{c}{2}}\int_{\theta-\frac{c}{2\times R_i}}^{\theta+\frac{c}{2\times R_i}} \varphi_D(\rho',\theta')\,d\rho'\,d\theta'$$

Si on introduit la fonction caractéristique $k_{c,i}$ du carré de côté c centré en $(R_i,0)$ définie par :

$$k_{c,i}(\rho,\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } -\frac{c}{2} < \rho < \frac{c}{2} \\ & \quad -\frac{c}{2\times R_i} < \theta < \frac{c}{2\times R_i} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

nous avons :

$$g(R_i,\theta) = \frac{1}{c^2}\,(\varphi_D * k_{c,i})(R_i,\theta)$$

$$= \frac{1}{c^2}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_D(\rho',\theta')k_{c,i}(R_i-\rho',\theta-\theta')d\rho'\,d\theta'$$

φ_D étant une fonction continue par morceaux et

$k_{c,i}$ étant une fonction bornée de $L_1(R^2)$, alors

$g = \varphi_D * k_{c,i}$ est une fonction continue [3].

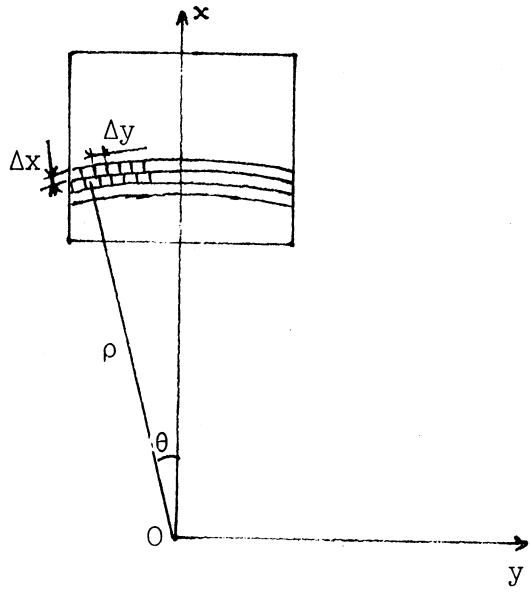
g est une fonction à support bornée en raison de la définition de φ_D .

Ainsi que nous le préciserons ultérieurement l'introduction du disque de Nipkow a un effet de lissage sur l'image initiale φ_D .

1.4. IMAGE DIGITALE

Nous disposons de l'image continue g définie en coordonnées polaires.

Du fait de l'assimilation d'une portion de couronne balayée par un diaphragme trou à une bande rectiligne du diaphragme de mesure nous allons définir dans un repère cartésien une fonction image continue f par :



$$f(x,y) = g(x, \frac{y}{x})$$

Les traitements que nous effectuerons par la suite font intervenir des signaux discrétisés par le procédé décrit au chapitre précédent; aussi nous définissons une fonction image digitale A obtenue par discrétisation de l'image continue g suivant la variable θ .

A sera définie comme une application de $Z \times Z$ dans R par la relation

$$A(i,j) = g(R_{i+1}, (j \times \Delta y - \frac{\ell}{2} + \frac{c}{2}) / R_{i+1}) \quad \text{où} \quad \Delta y = c \qquad \ell = c \times M$$

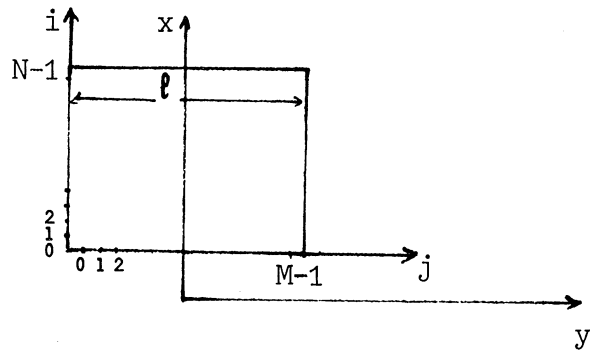
pour $i=0,\ldots,N-1$

et pour $j=0,\ldots,M-1$ (dans notre application $N = 43$ et $M = 45$)

$= 0$ sinon

A est une application à support borné.

Son support est obtenu par discrétisation d'une partie de D .



Nous avons :

$$A(i,j) = f(R_1 + i\Delta x \ , \ j\Delta y - \frac{\ell}{2} + \frac{c}{2})$$

en effet :

$$A(i,j) = g(R_{i+1}, (j \times \Delta y - \frac{\ell}{2} + \frac{c}{2}) / R_{i+1})$$

$$= f(R_{i+1}, j \times \Delta y - \frac{\ell}{2} + \frac{c}{2})$$

$$= f(R_1 + i\Delta x, \ j \times \Delta y - \frac{\ell}{2} + \frac{c}{2})$$

En translatant le point origine du repère cartésien associé à f au point $(i=0,j=0)$ on obtient :

$$A(i,j) = f(i\Delta x, j\Delta y)$$

Ainsi à l'aide de la fonction image continue g fournie par le photo-multiplicateur nous avons défini une nouvelle fonction image continue f dans un repère cartésien. A cette fonction on peut associer la fonction image digitale A .

Dorénavant nous utiliserons essentiellement la fonction f lorsque nous nous référerons aux fonctions images continues.

II. ECHANTILLONNAGE

Nous allons nous intéresser au problème posé par un tel échantillonnage notamment sur le domaine des fréquences utilisables en accord avec le théorème d'échantillonnage de Shannon indiquant que si on veut "récupérer" un signal de fréquence maximale F_M on doit échantillonner avec une fréquence minimale égale à $2 \times F_M$. [4] .

Considérons l'échantillonnage de la ligne numéro i $(x = R_i)$.

Soit F_i la fréquence d'échantillonnage, déjà citée au chapitre relatif au disque de Nipkow, telle que deux valeurs échantillonnées successives correspondent à des positions adjacentes du diaphragme-trou numéro i

Echantillonner $f(R_i,y)$ à la fréquence F_i revient à multiplier $f(R_i,y)$ par la distribution

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(y - k \frac{V_i}{F_i})$$

où δ est la distribution de Dirac et V_i est la vitesse de balayage du $i^{ème}$ trou en millimètres/seconde.

On peut représenter la fonction échantillonnée $\hat{f}$ par [5] :

$$\hat{f}(R_i,y) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(R_i, k\frac{V_i}{F_i}) \times \delta\,(y - k \times \frac{V_i}{F_i})$$

On a $\hat{f}(R_i, j\Delta y) = A(i,j)$

$$\hat{f}(R_i,y) = f(R_i,y) \times \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(y - k \times \frac{V_i}{F_i})$$

Si on effectue la transformation de Fourier $\mathcal{F}$ des deux membres suivant la seconde variable on obtient :

$$\hat{F}(R_i,\mu) = F(R_i,\mu) * \mathcal{F}\,(\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(y - \frac{k\,V_i}{F_i}))$$

$$= F(R_i,\mu) * \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \mathcal{F}\,(\delta(y - \frac{k\,V_i}{F_i}))$$

calcul de $\mathcal{F}\,(\delta(y - k \times \frac{V_i}{F_i})$

On a la propriété

$$\mathcal{F}\,(\delta(t)) = 1$$

$$\mathcal{F}\,(f(t-t_o)) = e^{-2\pi j\mu t_o}\,\mathcal{F}(f(t)) \quad \text{avec} \quad j^2=-1$$

Donc
$$\mathcal{F}(\delta(y-k \times \frac{V_i}{F_i})) = e^{-2\pi j\mu \times \frac{V_i}{F_i} \times k}$$

Ceci permet d'écrire $\hat{F}$ sous la forme :

$$\hat{F}(R_i,\mu) = F(R_i,\mu) * \sum_{k=-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi j\mu \times \frac{V_i}{F_i} \times k}$$

Or d'après la formule de Poisson, si $x(t)$ a pour transformée de Fourier $X(\mu)$ on a :

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(t+nT) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X(k \times \frac{2\pi}{T}) e^{jk \frac{2\pi}{T} t}$$

Nous avons donc :

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi j \mu \frac{V_i}{F_i} k} = \frac{F_i}{V_i} \frac{V_i}{F_i} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi j \frac{V_i}{F_i} k \mu}$$

$$= \frac{F_i}{V_i} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(\mu - \frac{nF_i}{V_i})$$

$$\hat{F}(R_i,\mu) = \frac{F_i}{V_i} F(R_i,\mu) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(\mu - \frac{nF_i}{V_i})$$

$$\hat{F}(R_i,\mu) = \frac{F_i}{V_i} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F(R_i,\mu - \frac{nF_i}{V_i})$$

On remarque que le spectre de $\hat{f}(R_i,.)$ est obtenu à partir de celui de $f(R_i,.)$ par reproduction périodique sur l'axe des fréquences avec une période $\frac{V_i}{F_i}$.

Si $f(R_i,y)$ a une transformée de Fourier $F(R_i,\mu)$ nulle pour $|\mu| \geq \frac{F_M}{V_i}$ le spectre de $f(R_i,.)$ va s'étendre sur une largeur égale à $2 \times \frac{F_M}{V_i}$.

Ainsi que le précise Oppenheim [6], afin que la reproduction périodique du spectre de f ne soit pas altérée il faut et il suffit que la fréquence d'échantillonnage vérifie

$$F_i \geq 2 F_M$$

Sous ces conditions on peut obtenir à partir des valeurs échantillonnées une formule d'interpolation de la fonction f donnée par :

$$f(R_i,y) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{F_i}{V_i} f(R_i, \frac{kV_i}{F_i}) \times \frac{\sin \pi \frac{F_i}{V_i} (y - k \frac{V_i}{F_i})}{\pi \frac{F_i}{V_i} (y - k \frac{V_i}{F_i})}$$

En effet, on avait obtenu le spectre de $\hat{f}(R_i,.)$ par périodicité à partir de celui de $f(R_i,.)$, l'amplitude de la période étant $2 \times \frac{F_M}{V_i}$.

Aussi si on considère la fonction caractéristique de l'intervalle $[-\frac{F_i}{2V_i}, \frac{F_i}{2V_i}]$ où F_i est la fréquence d'échantillonnage supérieure ou égale à $2F_M$ on aura :

$$F(R_i,\mu) = \hat{F}(R_i,\mu) \times \chi_{[-\frac{F_i}{2V_i}, \frac{F_i}{2V_i}]}(\mu)$$

En prenant la transformée de Fourier des deux membres suivant la seconde variable, on obtient :

$$f(R_i,y) = \hat{f}(R_i,y) * \frac{F_i}{V_i} \frac{\sin \pi \frac{F_i}{V_i} y}{\pi \frac{F_i}{V_i} y}$$

Or

$$\hat{f}(R_i,y) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(R_i,k \frac{V_i}{F_i}) \times \delta(y - k \frac{V_i}{F_i})$$

D'où

$$f(R_i,y) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(R_i,k \frac{V_i}{F_i}) \times \delta(y - k \frac{V_i}{F_i}) * \frac{\sin \pi \frac{F_i}{V_i} y}{\pi y}$$

$$= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(R_i,k \frac{V_i}{F_i}) \times \frac{\sin \pi \frac{F_i}{V_i} (y - k \frac{V_i}{F_i})}{\pi (y - k \frac{V_i}{F_i})}$$

On peut donc reconstituer une fonction image continue de spectre fini à partir de ses échantillons, c'est-à-dire de la fonction image digitale,

pourvu que la fréquence d'échantillonnage soit supérieure à deux fois la fréquence maximale rencontrée dans le spectre de la fonction image continue.

Ce résultat est essentiellement théorique car on ne peut échantillonner avec un temps infiniment court pour avoir les hautes fréquences.

Dans notre exemple d'application nous nous imposons la fréquence d'échantillonnage avec la vitesse de rotation du disque et la dimension des diaphragmes trous. Aussi, la fréquence F_1 étant la plus petite fréquence d'échantillonnage pour les différents diaphragmes trous nous ne devons pas espérer rencontrer de fréquence supérieure à $\frac{F_1}{2}$ c'est-à-dire 1300 Hz compte tenu des dimensions du disque utilisé.

III - PRETRAITEMENT DES IMAGES CONTINUES ET DIGITALES

Il est parfois intéressant d'effectuer un prétraitement sur une image avant de l'analyser soit pour en faire ressortir certains éléments par une augmentation de contraste, soit pour atténuer voir même éliminer certains détails qui augmenteraient le temps d'analyse.

Nous montrerons que si nous désirons atténuer le bruit de fond nous utiliserons un procédé de moyenne sur un voisinage prédéfini de chaque point du support de l'image.

Si par contre nous voulons mettre en valeur les variations du niveau d'intensité lumineuse on aura recours à des procédés de dérivation.

Nous allons introduire la notion d'opérateur sur une image continue ou digitale, telle que Rosenfeld l'a introduite [7], et nous donnerons quelques exemples en établissant l'analogie avec la notion de filtre digital à deux dimensions [8].

3.1. OPERATEUR SUR UNE IMAGE CONTINUE.

Un opérateur ϕ sur une image continue f sera défini comme une application de l'ensemble C des fonctions images continues dans lui-même. Notre but est l'étude d'opérateurs agissant sur les fonctions images (continues ou digitales) indépendamment de la position du point considéré et possédant la propriété de linéarité.

3.2. OPERATEUR LINEAIRE INVARIANT EN POSITION

3.2.1. Définition

ϕ est un opérateur invariant en position sur l'ensemble des fonctions images continues si pour tout $f \in C$

$$\phi[T_{u,v}(f)] = T_{u,v}[\phi(f)]$$

où $T_{u,v}$ est l'opérateur de translation défini par

$$[T_{u,v}(f)](x,y) = f(x-u,y-v)$$

ϕ est un opérateur linéaire invariant en position si

- ϕ est un opérateur invariant en position
- $\forall f \in C \quad \forall g \in C \quad \forall a \in R \quad \forall b \in R$

$$\phi(af+bg) = a\,\phi(f) + b\,\phi(g) .$$

Nous avons des définitions analogues pour l'ensemble des fonctions images digitales.

3.2.2. Exemples de tels opérateurs

. Opérateur ponctuel sur une image continue. C'est un opérateur ϕ tel que $(\phi(f))(x,y)$ ne dépende linéairement que de $f(x,y)$ c'est-à-dire il existe une application linéaire $g : R \to R$ telle que

$$(\phi(f))(x,y) = g(f(x,y)) \quad \forall (x,y)$$

. Opérateur local sur une image digitale. C'est un opérateur ϕ tel que $(\phi(A))(I,J)$ ne dépende linéairement que des valeurs de A dans un voisinage $V_{I,J}$ de (I,J) , ce voisinage étant obtenu par translation d'un voisinage $V_{o,o}$. On peut introduire une applicatinn linéaire H : $R^n \rightarrow R$, n étant le nombre de points du voisinage $V_{o,o}$.

$$(\phi(A))(I,J) = H(A(K,L)) \quad (K,L) \in V_{I,J}$$

On a un opérateur invariant en position car :

$$[\phi(T_{U,V}(A))](I,J) = H([T_{U,V}(A)](K,L)) = H(A(K-U,L-V))$$

Or pour tout (U,V) $V_{I-U,J-V}$ est l'ensemble des points $(K-U,L-V)$ tels que (K,L) soit dans $V_{I,J}$. Donc on a :

$$[\phi(T_{U,V}(A))](I,J) = T_{U,V}[H(A(K,L))]$$

$$= T_{U,V}[\phi(A)](I,J)$$

On a d'autre part un opérateur linéaire en raison de la linéarité de H.

Nous nous intéresserons aux opérateurs agissant sur les fonctions images digitales en se référant au cas des fonctions images continues.

3.3. INTRODUCTION DE L'OPERATEUR LINEAIRE INVARIANT EN POSITION COMME UNE CONVOLUTION

3.3.1. Fonctions images continues

Soit f une fonction image continue et δ la distribution de Dirac à deux dimensions

Nous avons $f(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(u,v)\ \delta(x-u,y-v)dudv$

Soit ϕ un opérateur linéaire invariant en position et h la transformée de δ par ϕ .

$$(\phi(f))(x,y) = \phi\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} f(u,v)\ \ \delta(x-u,y-v)dudv$$

par linéarité nous avons :

$$(\phi f)(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} f(u,v)\ \phi(\delta(x-u,y-v)_{dudv}$$

étant invariant en position on a

$$(\phi f)(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} f(u,v)\ (\phi\delta)\ (x-u,y-v)\ dudv$$

$$(\phi f)(x,y) = (f * h)(x,y)$$

On en déduit que tout opérateur ϕ linéaire invariant en position est déterminé lorsque l'on connait la fonction $h= \phi(\delta)$ que l'on définit comme réponse impulsionnelle.

D'autre part, l'application d'un tel opérateur à une fonction image continue f est équivalente à la convolution de f avec la fonction réponse impulsionnelle associée à l'opérateur.

3.3.2. Fonctions images digitales

Si on définit g_o par $\begin{cases} g_o(0,0) = 1 \\ g_o(I,J) = 0 \quad \forall\ (I,J) \neq (0,0) \end{cases}$

alors pour toute fonction image digitale définie par une application A dont le support est un rectangle de taille $N \times M$ on a :

$$A(I,J) = \sum_{\substack{0 \leq K \leq N-1 \\ 0 \leq L \leq M-1}} A(K,L)\ g_o(I-K,J-L)$$

$$A(I,J) = \sum_{\substack{0 \leq K \leq N-1 \\ 0 \leq L \leq M-1}} A(K,L)(T_{K,L}(g_o))(I,J)$$

Si ϕ désigne un opérateur linéaire invariant en position sur l'ensemble des fonctions images digitales on a :

$$(\phi(A))(I,J) = \phi\Big(\sum_{K=0}^{N-1}\sum_{L=0}^{M-1} A(K,L)(T_{K,L}(g_o))(I,J)\Big)$$

par linéarité et invariance en translation de ϕ on obtient

$$(\phi(A))(I,J) = \sum_{K=-\infty}^{+\infty}\sum_{L=-\infty}^{+\infty} A(K,L)(T_{K,L}(\phi(g_o)))(I,J)$$

Comme dans le cas continu, l'effet de ϕ est entièrement déterminé par son effet sur g_o et l'application de ϕ sur une image digitale est ramenée à une convolution

$$\phi(A) = A * (\phi(g_o))$$

Comme dans le cas continu on désigne par h (qui dans ce cas est une application de $Z \times Z \to R$) la fonction réponse impulsionnelle $\phi(g_o)$.

Avant d'étudier des exemples de tels opérateurs sur des images digitales nous allons regarder l'analogie avec la notion de filtre digital à deux dimensions.

3.3.3. Transformée en z à deux dimensions. Fonction de transfert

On définit la transformée en z à deux dimensions [6] d'une fonction image digitale a par :

$$A(w,z) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty}\sum_{n=-\infty}^{+\infty} a(m,n)\, w^{-m}\, z^{-n}$$

On a des propriétés analogues à celles de la transformée en z à une dimension [9] telle que la transformée d'un produit de convolution :

$$a * b \xrightarrow{\text{transformée en z}} A(w,z) \times B(w,z)$$

On définit la <u>fonction de transfert</u> H(w,z), associée à un opérateur linéair invariant en position, comme la transformée en z de la fonction réponse impulsionnelle h(I,J).

On remarque que la fonction de transfert est valeur propre de l'opérateur auquel elle est associée, avec pour fonction propre $x(m,n) = w^m z^n$; en effet :

$$(\phi(x))(i,j) = (x * h)(i,j)$$

$$= \sum_m \sum_n h(m,n)\, x(i-m,j-n)$$

$$= w^i z^j \sum_m \sum_n h(m,n)\, w^{-m} z^{-n}$$

$$= H(w,z) \times x(i,j)$$

IV - FILTRE DIGITAL ET OPERATEUR LINEAIRE INVARIANT EN POSITION SUR UNE IMAGE DIGITALE

Nous rappellerons quelques définitions concernant le problème du filtrage digital [10].

Filtrer un signal d'entrée digital a pour obtenir un signal de sortie b c'est se donner deux ensembles de coefficients

$$(\alpha(i,j) \; ; \; i \in \{0,\ldots,p\} \quad \text{et} \quad j \in \{0,\ldots,q\})$$

$$(\beta(i,j) \; ; \; i \in \{0,\ldots,p\} \quad \text{et} \quad j \in \{0,\ldots,q\})$$

de telle manière que les signaux soient liés par la relation

$$\sum_{n=0}^{p} \sum_{m=0}^{q} \beta(n,m)\, b(I-n,J-m) = \sum_{n=-r_1}^{r} \sum_{m=-s_1}^{s} \alpha(n,m)\, a(I-n,J-m)$$

avec $b(k,\ell)$ connu pour $\ell = 0,\ldots,q-1$

$k = 0,\ldots,p-1$.

Lorsque r_1 ou s_1 sont différents de 0 et positifs ceci signifie que l'on filtre le signal a au point (I,J) connaissant les valeurs a(K,L) pour

$$K = I,\ldots,I+r_1$$
$$L = J,\ldots,J+s_1$$

Dans ce cas on parlera de filtre à retard.

4.1. Définitions :

Un filtre sera non récursif si $\beta(n,m) = 0 \quad \forall\ (n,m) \neq (0,0)$. Dans le cas contraire on introduit la notion de filtre récursif.

Un filtre sera stable si toute entrée bornée donne une sortie bornée.

4.2. FILTRE DIGITAL ET FONCTION DE TRANSFERT DE L'OPERATEUR LINEAIRE INVARIANT EN POSITION ASSOCIE

Nous allons montrer l'analogie entre la notion d'opérateur digital à deux dimensions en reconstituant la fonction de transfert associé à l'opérateur à l'aide des coefficients définissant le filtre digital.

L'opérateur est déterminé par sa fonction réponse impulsionnelle h.

$$b(I,J) = \sum_{K,L=-\infty}^{+\infty} a(I-K,J-L)\ h(K,L)$$

où les valeurs a(I-K,J-L) peuvent être soit les valeurs du signal d'entrée a, soit celles du signal de sortie b déja calculées.

Le filtre est donné par ses coefficients qui satisfont à l'équation

$$(1) \qquad \sum_{n=0}^{p}\sum_{m=0}^{q} \beta(n,m)b(N-n,M-m) = \sum_{n=0}^{r}\sum_{m=0}^{s} \alpha(n,m)a(N-n,M-m)$$

En appliquant la transformation z à deux dimensions aux deux membres de l'équation (1) nous obtenons :

$$\sum_{N=-\infty}^{+\infty} \sum_{M=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=0}^{p} \sum_{m=0}^{q} \beta(n,m)\, b(N-n,M-m) w^{-N} z^{-M} =$$

$$= \sum_{N=-\infty}^{+\infty} \sum_{M=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=0}^{r} \sum_{m=0}^{s} \alpha(n,m) a(N-n,M-m) w^{-N} z^{-M}$$

$$\sum_{n=0}^{p} \sum_{m=0}^{q} \alpha(n,m) w^{-n} z^{-m} \times \left(\sum_{N=-\infty}^{+\infty} \sum_{M=-\infty}^{+\infty} b(N-n,M-m) w^{-(N-n)} z^{-(M-m)} \right) =$$

$$= \sum_{n=0}^{r} \sum_{m=0}^{s} \alpha(n,m) w^{-n} z^{-m} \times \left(\sum_{N=-\infty}^{+\infty} \sum_{M=-\infty}^{+\infty} a(N-n,M-m) w^{-(N-n)} z^{-(M-m)} \right)$$

$$B(w,z) \times \sum_{n=0}^{p} \sum_{m=0}^{q} \beta(n,m) w^{-n} z^{-m} = A(w,z) \sum_{n=0}^{r} \sum_{m=0}^{s} \alpha(n,m) w^{-n} z^{-m}$$

Donc

$$\frac{B(w,z)}{A(w,z)} = \frac{\sum_{n=0}^{r} \sum_{m=0}^{s} \alpha(n,m) w^{-n} z^{-m}}{\sum_{n=0}^{p} \sum_{m=0}^{q} \beta(n,m) w^{-n} z^{-m}}$$

Ce qui montre que si on a un filtre digital donné par ses coefficients $\alpha(i,j)$, $\beta(i,j)$ on obtient la fonction de transfert de l'opérateur associé linéaire invariant en position donnée par :

$$H(w,z) = \frac{\sum_{n=0}^{r} \sum_{m=0}^{s} \alpha(n,m)\, w^{-n} z^{-m}}{\sum_{n=0}^{p} \sum_{m=0}^{q} \beta(n,m) w^{-n} z^{-m}}$$

4.3. TRANSFORMATION DE FOURIER DIGITALE

Afin de justifier la notion de filtrage digital nous nous plaçons dans le plan de Fourier.

Disposant d'images digitales nous utilisons la notion de transformation de Fourier digitale à deux dimensions [6].

Soit une fonction image digitale a nulle en dehors de l'intervalle $[0,\ldots,N-1] \times [0,\ldots,M-1]$, on définit la Transformée de Fourier Digitale à deux dimensions par :

$$A(\mu,\nu) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} a(n,m) \exp\left[-j\left[\frac{2\pi\mu n}{N} + \frac{2\pi\nu m}{M}\right]\right]$$

On a la Transformée inverse donnée par :

$$a(n,m) = \frac{1}{NM} \sum_{\mu=0}^{N-1} \sum_{\nu=0}^{M-1} A(\mu,\nu) \exp\left[j\left(\frac{2\pi\nu n}{N} + \frac{2\pi\nu m}{M}\right)\right]$$

On remarque que la Transformée de Fourier Digitale est égale à la Transformée de Fourier aux points

$$\mu = \frac{2\pi n}{N} \qquad \nu = \frac{2\pi m}{M} \quad .$$

L'objectif du filtrage digital est de modifier le spectre des fréquences $A(e^{j\mu},e^{j\nu})$ d'un signal en le multipliant par une fonction de transfert $H(e^{j\mu},e^{j\nu})$.

Le problème réside dans la détermination de la réponse impulsionnelle convenable $h(n,m)$ selon certains critères relatifs à la fonction de transfert associée.

Aussi est-il intéressant d'avoir des approximations de $H(w,z)$ soit par des polynomes en w, z, w^{-1}, z^{-1}, soit par un quotient de deux polynomes de degré fini $A(w,z)$ et $B(w,z)$.

Ce problème a été examiné par Monsieur J. WOLF [11] et pour ce qui concerne ce chapitre nous nous contenterons de décrire quelques filtres ainsi que leur action sur diverses images.

On donnera la représentation graphique des transformées de Fourier $H(e^{j\mu},e^{j\nu})$ pour chaque filtre utilisé.

4.4. IMPLANTATION D'UN FILTRE DIGITAL A DEUX DIMENSIONS

Une première méthode consiste à multiplier la transformée de Fourier digitale par la fonction de trarsfert et à déterminer la fonctinn de sortie par transformation de Fourier inverse.

Ce procédé a donner naissance à de nombreux algorithmes de transformation de Fourier rapide [12] [13] [14].

La méthode que nous utilisons est l'application directe de la convolution de la fonction image d'entrée avec la fonction réponse impulsionnelle.

Le filtre est donné par une équation aux différences à deux dimensions qui relie les sommes pondérées des valeurs translatées de l'entrée et de la sortie.

$$\sum_{n=0}^{p}\sum_{m=0}^{q} \beta(n,m)\, b(I-n,J-m) = \sum_{n=0}^{r}\sum_{m=0}^{s} \alpha(n,m)\, a(I-n,J-m))$$

On peut calculer par récurrence la sortie b à partir de a et d'un ensemble de valeurs initiales :

$$b(I,J) = \sum_{n=0}^{r}\sum_{m=0}^{s} \frac{\alpha(n,m)}{\beta(0,0)}\, a(I-n,J-m) - \sum_{\substack{n=0 \\ (n,m)\neq(0,0)}}^{p}\sum_{m=0}^{q} \frac{\beta(n,m)}{\beta(0,0)} b(I-n,J-m)$$

L'implantation du filtre sur l'image digitale a s'effectuera en parcourant son support de la ligne 1 à la ligne N, chaque ligne étant

parcourue de la colonne 1 à la colonne M (figure 2) :

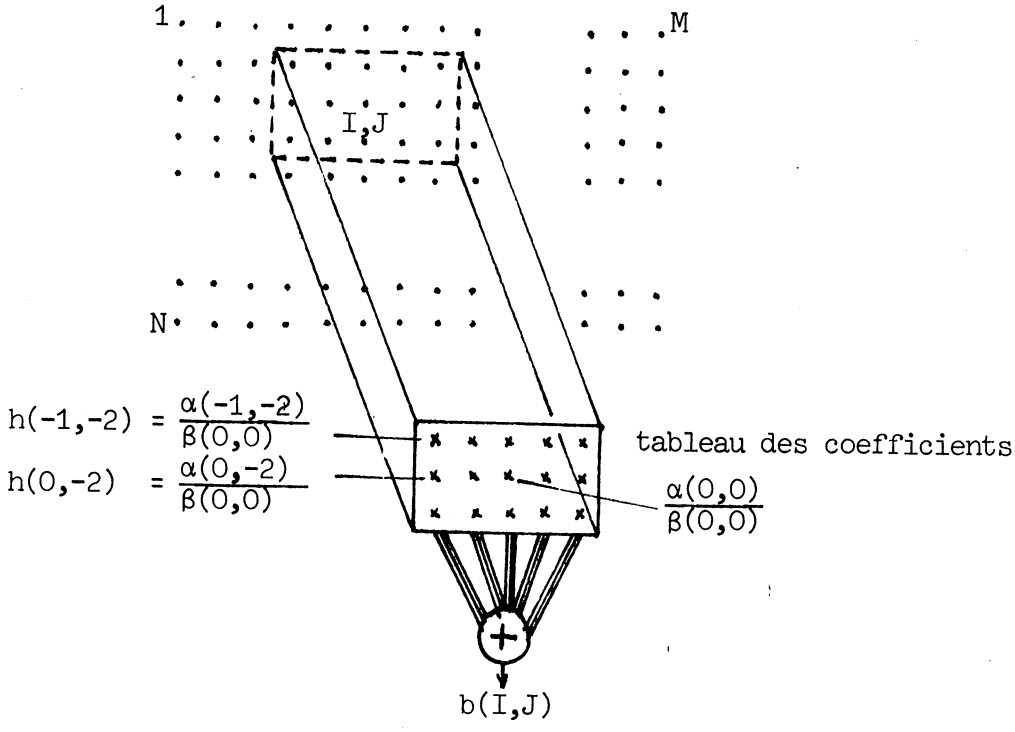


Figure 2,a : Représentation d'un filtre non récursif à retard.

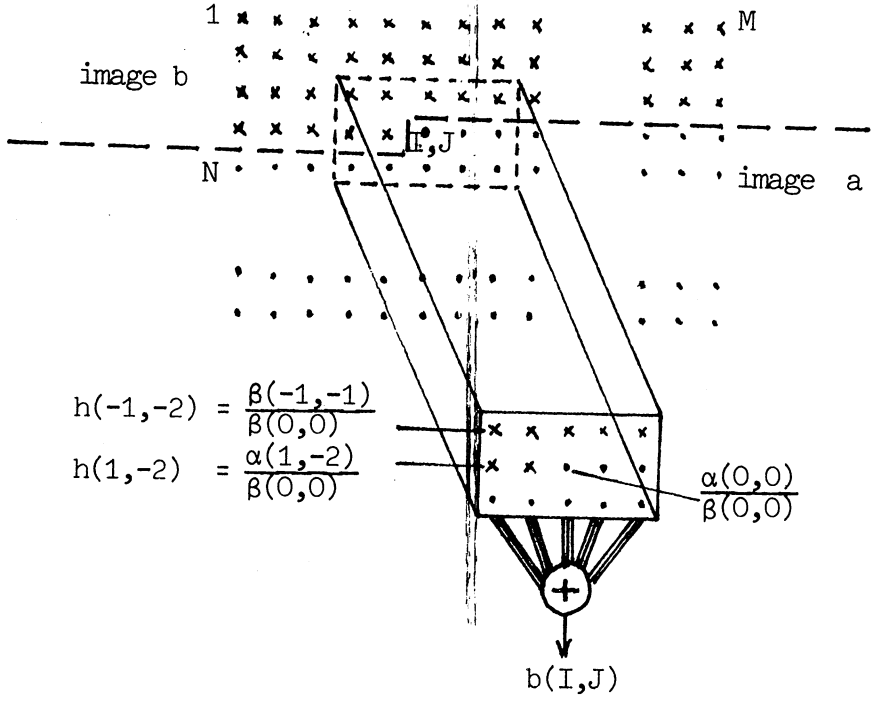


Figure 2,b : Représentation d'un filtre récursif.

4.5. FILTRES PASSE BAS - PASSE HAUT

La transformée de Fourier est une mesure du contenu de la fréquence du signal.

- Si le signal varie lentement, on a une transformée de Fourier, dans le plan de Fourier, concentrée vers l'origine
- Si le signal varie rapidement (notamment avec la présence de bruit de fond) on a une transformée de Fourier concentrée vers le point (π,π).

Ainsi avec l'instauration de $H(e^{j\mu},e^{j\nu})$ dont nous avons une représentation graphique nous pourrons éliminer

- les hautes fréquences en prenant H concentrée vers l'origine, c'est le cas des filtres passe bas,
- les basses fréquences en prenant H nulle à l'origine, c'est le cas des filtres passe haut.

V - EXEMPLES DE FILTRES DIGITAUX.

Nous allons donner quelques exemples de filtres étudiés sur l'ensemble $\mathcal{A}$ des fonctions images digitales.

Chaque exemple sera illustré d'une représentation graphique de la fonction de transfert dans l'intervalle $[-\pi,\pi] \times [-\pi,\pi]$ ainsi que du résultat de l'application du filtre sur une image digitale, dont les valeurs seront traduites par des symboles répartis dans une échelle de niveaux de gris.

5.1. EXEMPLE I : FILTRE DE "LISSAGE"

On définit un opérateur de "lissage" ϕ_L par :

$A \in \mathcal{A}$

$$(\phi_L(A))(I,J) = \frac{1}{4}\,(A(I-1,J)+A(I+1,J)+A(I,J+1)+A(I,J-1))$$

pour $I=1,\ldots,N-2$; $J=1,\ldots,M-2$

$$= 0 \text{ sinon}$$

On a un opérateur linéaire invariant en position sur $\mathcal{A}$.

COEFFICIENT DE LISSAGE

Soit $A \in \mathcal{A}$

On définit la quantité N(A) par :

$$N(A) = \sum_{(I,J)\in Z \times Z} [(A(I,J)-A(I-1,J))^2+(A(I+1,J)-A(I,J))^2+ (A(I,J)- -A(I,J-1))^2+(A(I,J+1)-A(I,J))^2].$$

CRITERE DE LISSAGE

Soient $A \in \mathcal{A}$ et $B \in \mathcal{A}$.

Nous dirons que l'image digitale B est plus lisse que l'image digitale A si son coefficient de lissage est inférieur à celui de A.

$$N(B) \leq N(A)$$

THEOREME

$$N(\phi_L(A)) \leq N(A).$$

Démonstration

Soit $C \in \mathcal{A}$ et $\theta \in \mathbb{R}$

On a :

$$N(A+\theta C) = N(A) + \theta^2 N(C) + 2\theta \times Q$$

avec

$$Q = \sum_{I,J\in Z \times Z} (A(I+1,J)-A(I,J))(C(I+1,J)-C(I,J)) +(A(I-1,J)-A(I,J))(C(I-1,J)-C(I,J)) +(A(I,J-1)-A(I,J))(C(I,J-1)-C(I,J)) +(A(I,J+1)-A(I,J))(C(I,J+1)-C(I,J))$$

Cette quantité ordonnée en C(I,J) peut s'écrire par changement de variables

$$Q = \sum_{(I,J)\in Z \times Z} 2 \times C(I,J) \quad [4A(I,J)-A(I+1,J)-A(I-1,J) -A(I,J+1)-A(I,J-1)]$$

Si on prend :

$$C(I,J) = (A(I+1,J)+A(I-1,J)+A(I,J+1)+A(I,J-1)-4A(I,J))$$

et $\theta = \frac{1}{4}$

on a :

$$(A+\theta C)(I,J) = \frac{1}{4}\,(A(I+1,J)+A(I-1,J)+A(I,J+1)+A(I,J-1))$$

$$= (\phi_L(A))(I,J)$$

Donc :

$$N(\phi_L(A)) = N(A) + \frac{1}{16}\,N(C) - \sum_{(I,J)\in Z\times Z} C^2(I,J)$$

Or :

$$0 \leq N(C) = \sum_{(I,J)\in Z\times Z} [(C(I+1,J)-C(I,J))^2+(C(I,J)-C(I-1,J))^2$$

$$+(C(I,J+1)-C(I,J))^2+(C(I,J)-C(I,J-1))^2]$$

$$\leq 2 \times \sum_{(I,J)\in Z\times Z} (C(I+1,J)^2+C(I-1,J)^2+C(I,J+1)^2$$

$$+C(I,J-1)^2+4C(I,J)\ )^2$$

$$\leq 16 \sum_{(I,J)\in Z\times Z} C^2(I,J)\ .$$

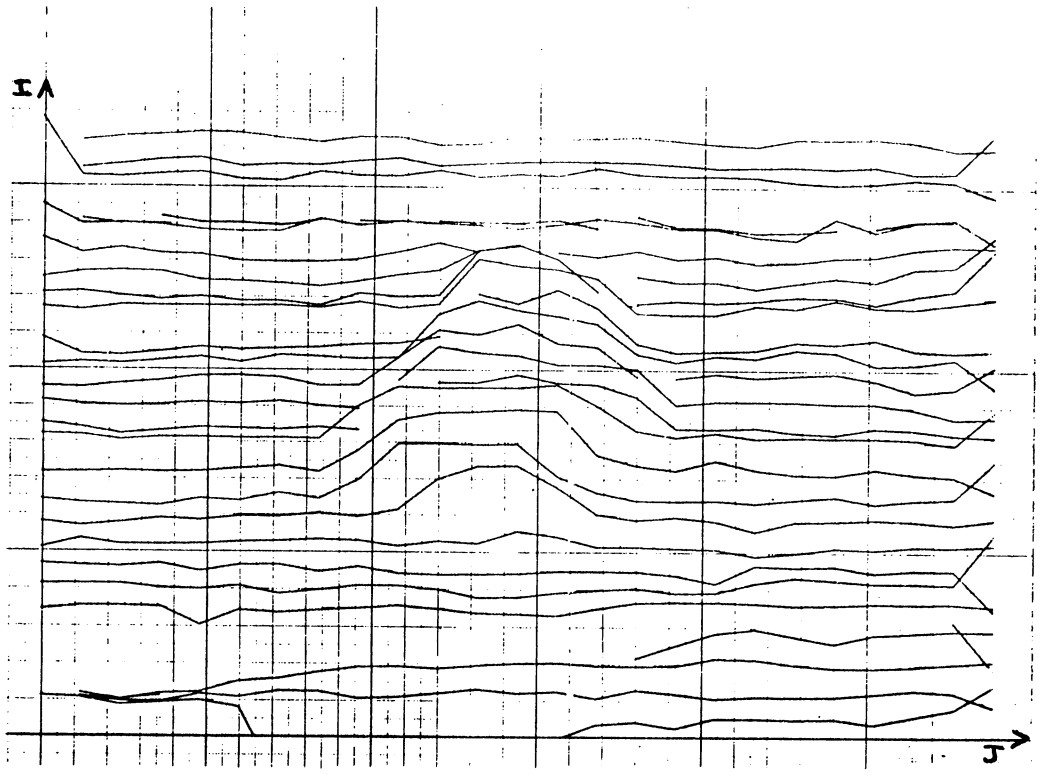
Donc :

$$N(\phi_L(A)) = N(A) + \frac{1}{16}\,N(C) - \sum_{I,J} C^2(I,J)$$

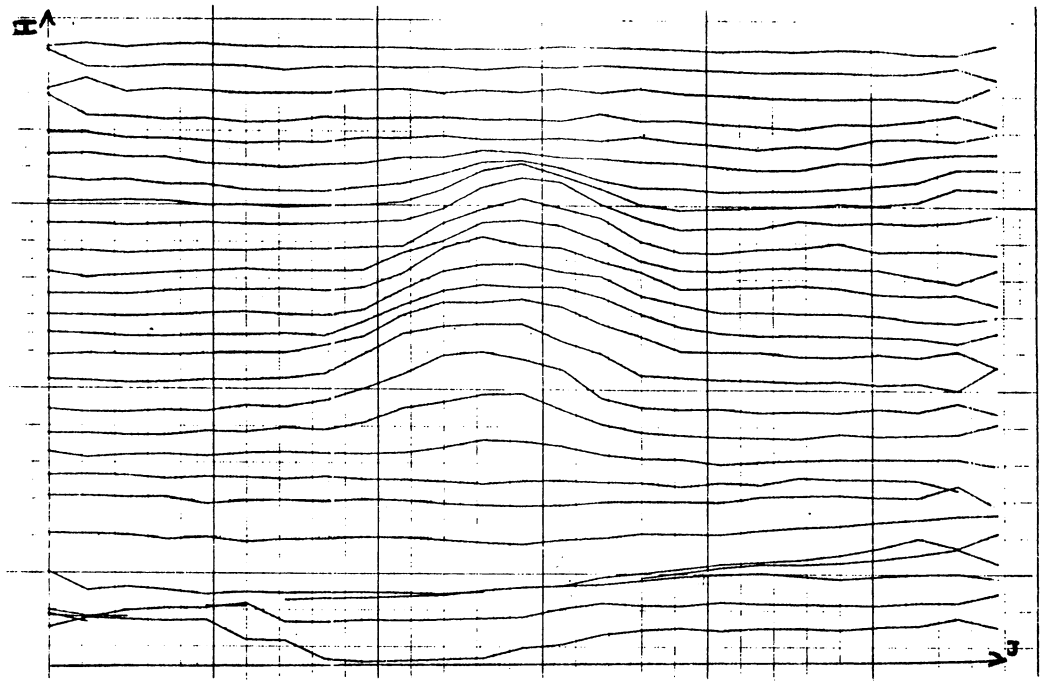
$$\leq N(A) + \frac{1}{16} \times 16 \times \sum_{I,J} C^2(I,J) - \sum_{I,J} C^2(I,J)$$

$$N(\phi_L(A)) \leq N(A)\ .$$

Un exemple de prétraitement de lissage est donné en figure 3 où chaque courbe des graphes 1 et 2 est obtenue par interpolation linéaire des valeurs digitales A(I,J).
On remarque que sur le graphe n° 2 on a diminué les variations du signal digital.



Graphe 1 : Représentation de l'image digitale avant lissage.



Graphe 2 : Représentation de l'image digitale après lissage.

Figure 3 : Prétraitement de lissage. (Graphe 1 et 2).

La fonction de transfert de ce filtre est donnée par

$$H_{\phi_L}(w,z) = \frac{1}{4}\,(w^{-1}+z+w+z^{-1})$$

D'où $$H_{\phi_L}(e^{j\mu},e^{j\nu}) = \frac{\cos\mu + \cos\nu}{2}$$

On a la représentation de cette fonction périodique, dans le domaine $[-\pi,\pi] \times [-\pi,\pi]$ en figure 4.

On voit que la fonction présente un maximum à l'origine et décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'origine. On a donc bien élimination des hautes fréquences lorsque l'on effectue le produit de la transformée de Fourier de l'image digitale par la fonction H_{ϕ_L} .

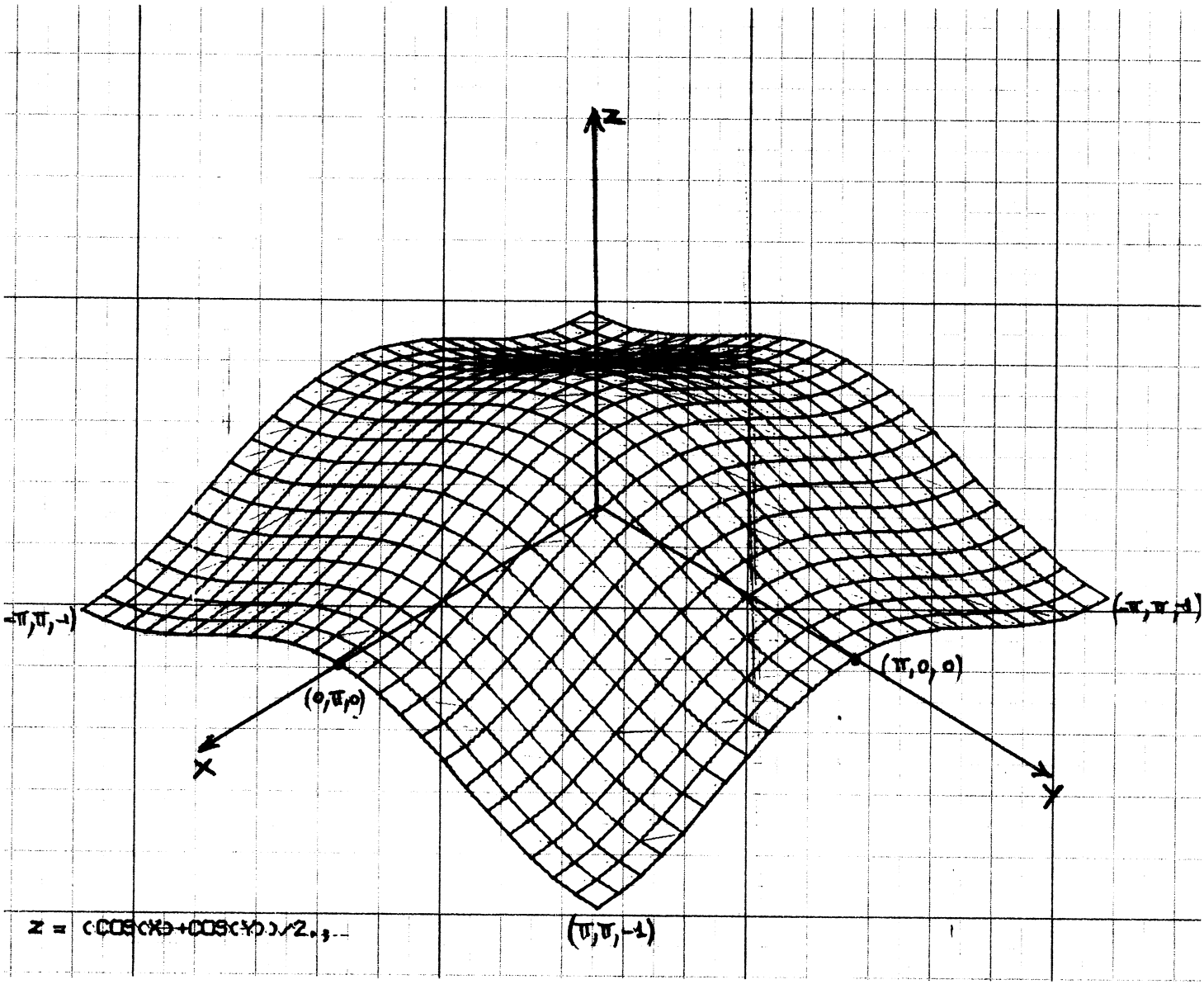


Figure 4 : Fonction de transfert du filtre de "lissage".

5.2. EXEMPLE II : FILTRAGE NON RECURSIF PASSE BAS.

On construit à l'aide de l'image digitale A une image digitale B définie par :

$$B(I,J) = \frac{1}{10}\,(2 * A(I,J)+A(I-1,J-1)+A(I-1,J)+A(I-1,J+1)$$
$$+A(I,J-1)+A(I,J+1)+A(I+1,J-1)+A(I+1,J)+A(I-1,J+1))$$

La fonction de transfert associée à cet opérateur est donnée par :

$$H(e^{jx},e^{jy}) = (1 + \cos x + \cos y + 2 \cos x * \cos y)/5$$

Nous avons effectivement un filtre passe bas (figure 5). et ainsi que nous pouvons le remarquer sur la représentation (figure 6) de la digitalisation d'une partie d'un tissu cellulaire nous avons éliminé les hautes fréquences représentéesnotamment par la présence d'un bruit de fond.

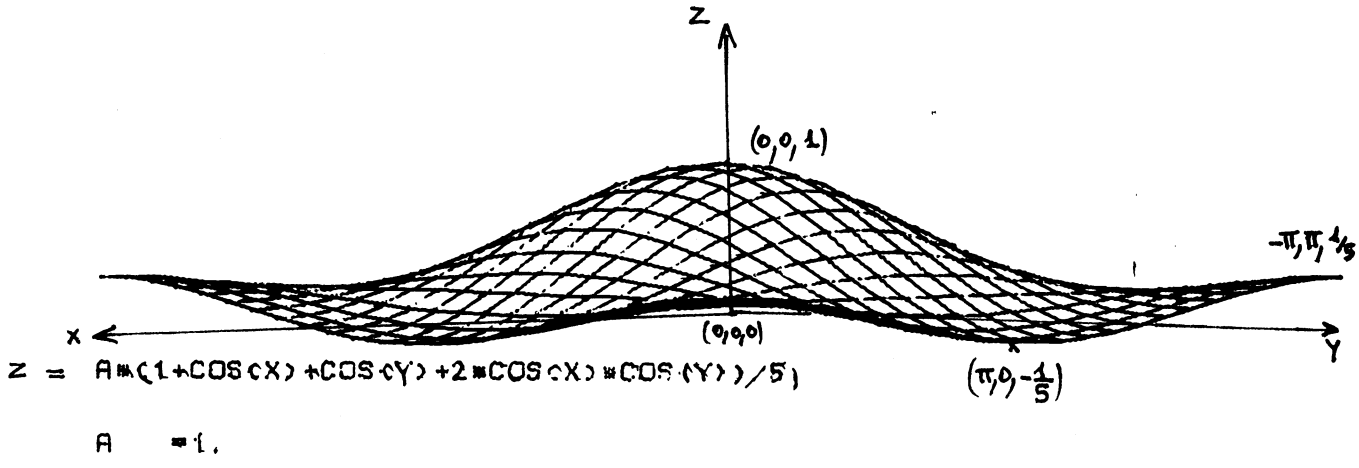
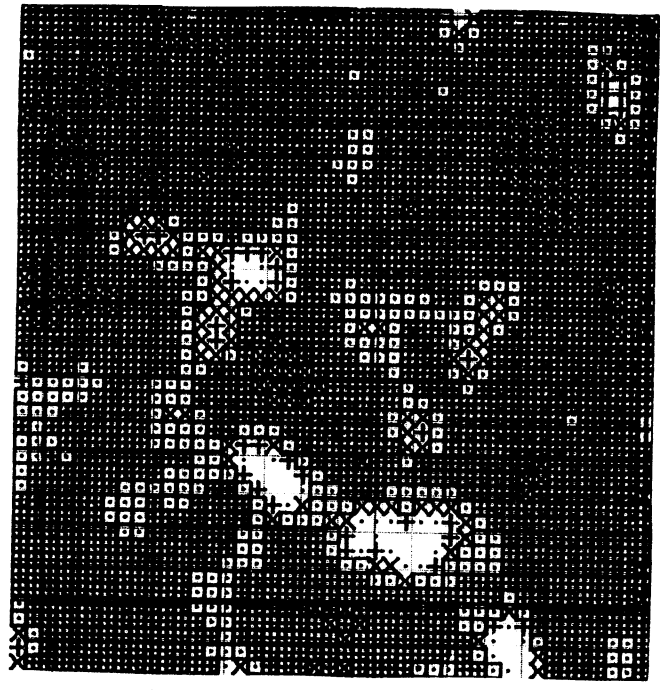
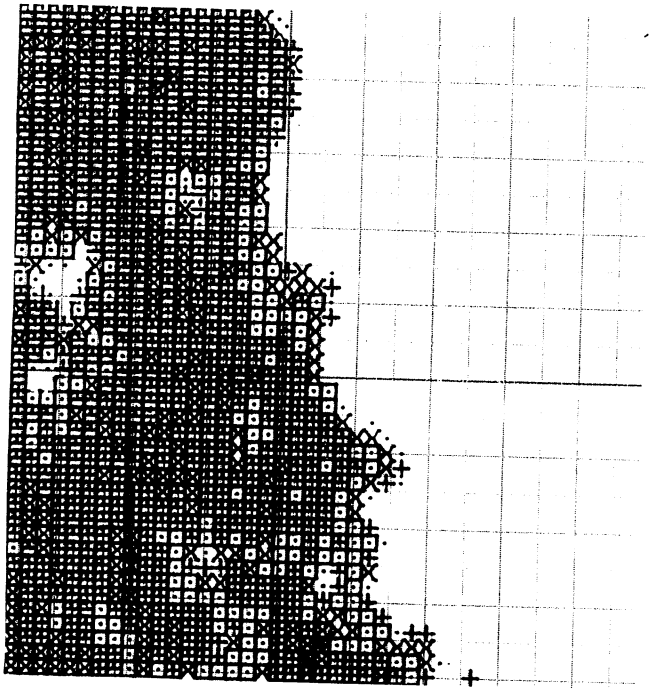


Figure 5 : Fonction de transfert.

Avant filtrage



Après filtrage



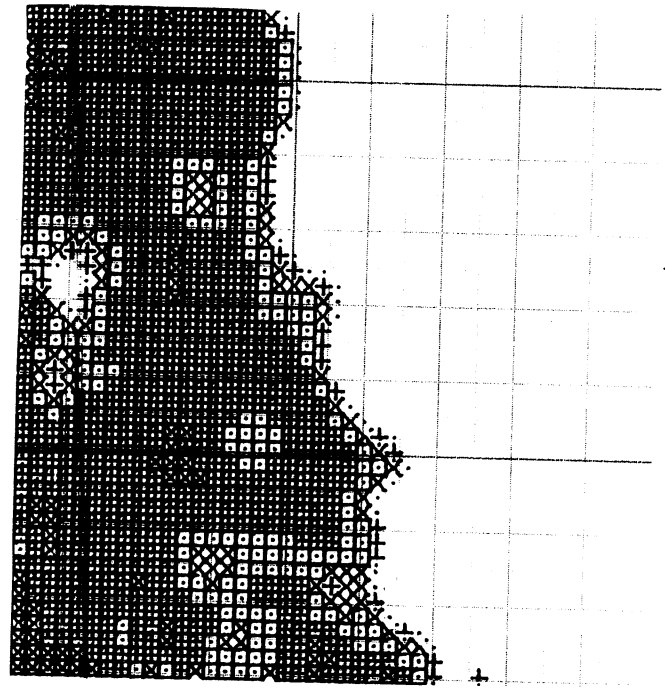


Figure 6 : Effet du filtrage passe bas sur des échantillons de tissu cellulaire.

5.3. EXEMPLE III : FILTRAGE DES BASSES FREQUENCES

Le but de cet opérateur est de mettre en évidence les contrastes. Un tel traitement sur les signaux analogiques a fait l'objet de l'élaboration d'un système optique [15].

Pour cela nous devons oter du signal les basses fréquences et les hautes fréquences liées au "bruit".

Or avec notre système d'acquisition la fréquence maximale que l'on obtient, compte tenu du théorème d'échantillonnage est liée à la fréquence d'échantillonnage qui est elle-même inversement proportionnelle à la taille c des diaphragmes trous.

Ainsi si nous utilisons des diaphragmes trous de côté de longueur $2c$ nous aurons une fréquence maximale divisée par 2.

Dans unepremière étape nous allons évaluer la fonction image continue g correspondant à un diaphragme de côté $2c$ connaissant la fonction g' relative à un diaphragme de côté c.

On a :

$$g(x,y) = \frac{1}{4c^2}\,\varphi_D(x,y) * k_c(x,y) \qquad k_c(x,y) = \begin{cases} 1 \text{ si } |x| < c \\ \quad \text{et } |y| < c \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

$$g'(x,y) = \frac{1}{c^2}\,\varphi_D(x,y) * k'_c(x,y) \qquad k'_c(x,y) = k_c(2x,2y)$$

Pour déterminer g en fonction de g' nous passons par l'intermédiaire de la transformation de Fourier.

$$G(u,v) = \frac{1}{4c^2}\,\phi_D(u,v) \times K_c(u,v)$$

Or $\quad k_c(x,y) \xrightarrow{\text{Transformée de Fourier}} K_c(u,v)$

$$k'_c(x,y) = k_c(2x,2y) \xrightarrow{\text{Transformée de Fourier}} \frac{1}{4} K_c\left(\frac{u}{2}, \frac{v}{2}\right)$$

Donc :

$$G'(u,v) = \frac{1}{c^2}\,\phi_D(u,v) \times K'_c(u,v)$$

$$G'(u,v) = \frac{1}{4c^2}\,\phi_D(u,v) \times K_c\left(\frac{u}{2}\,,\,\frac{v}{2}\right)$$

Calcul de $K_c(u,v)$:

$$K_c(u,v) = 4c^2\,\frac{\sin 2\pi c u}{2\pi c u} \times \frac{\sin 2\pi c v}{2\pi c v}$$

Donc

$$G(u,v) = \phi_D(u,v) \times \frac{\sin 2\pi c u}{2\pi c u} \times \frac{\sin 2\pi c v}{2\pi c v}$$

$$= \phi_D(u,v) \times \frac{\sin \pi c u}{\pi c u} \times \cos \pi c u \times \frac{\sin \pi c v}{\pi c v} \times \cos \pi c v$$

$$= \phi_D(u,v) \times \frac{\sin \pi c u}{\pi c u} \times \frac{\sin \pi c v}{\pi c v} \times (\cos \pi c u \times \cos \pi c v)$$

$$= G'(u,v) \times \cos \pi c u \times \cos \pi c v$$

$$G(u,v) = G'(u,v) \times \left(\frac{e^{j\pi c u} + e^{-j\pi c u}}{2}\right)\left(\frac{e^{j\pi c v} + e^{-j\pi c v}}{2}\right)$$

$$4G(u,v) = G'(u,v)\, e^{j\pi cu} e^{j\pi cv} + G'(u,v) e^{j\pi cu}\, e^{-j\pi cv}$$

$$+G'(u,v) e^{-j\pi cu} e^{j\pi cv} + G'(u,v) e^{-j\pi cu} e^{-j\pi cv}$$

Or si $f(x,y)$ a pour transformée de Fourier $F(u,v)$,

$f(x-a,y-b)$ a pour transformée de Fourier $F(u,v)\, e^{-2\pi jua}\, e^{-2\pi jvb}$

En appliquant la transformation de Fourier inverse on obtient :

$$4\, g(x,y) = g'(x + \frac{c}{2},\, y + \frac{c}{2}) + g'(x + \frac{c}{2},\, y - \frac{c}{2})$$

$$+ g'(x - \frac{c}{2},\, y + \frac{c}{2}) + g'(x - \frac{c}{2},\, y - \frac{c}{2})$$

Ceci nous montre comme il est indiqué en figure 7 que si on connait la fonction image digitale A' associée à g' sur un maillage de pas de longueur c on obtient la fonction image digitale A associée à g sur un maillage de pas de longueur 2c.

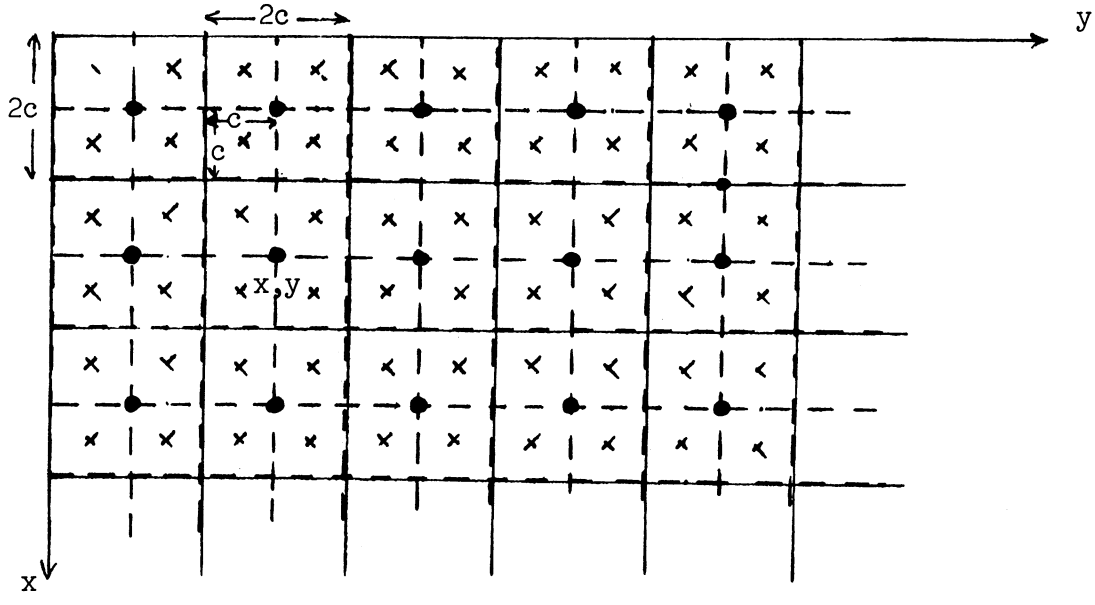


Figure 7

Application au filtrage des basses fréquences et hautes fréquences

La fonction g'-g a pour transformée de Fourier la fonction définie par:
$G'(u,v) - G(u,v) = G'(u,v)(1 - \cos \pi c\, u \cos \pi c v)$.
Cette transformée de Fourier est nulle pour (u=0, v=0) et ($u = v = k\pi$)
Elle est inférieure $G'(u,v)$ dans un voisinage de ces points

On a donc une atténuation des basses fréquences et des hautes fréquences.

La fonction de transfert d'un tel filtre est donnée par

$$H(w,z) = 1 - \frac{1}{4}(wz + wz^{-1} + w^{-1}z + w^{-1}z^{-1})$$

$$= 1 - \frac{1}{4}(w + w^{-1})(z + z^{-1})$$

Comme pour les exemples précédents nous avons une représentation de $H(w,z)$ pour $w = e^{jw_1}$, $z = e^{jw_2}$ (figure 8).

$$H(w_1,w_2) = 1 - \cos w_1 \cos w_2$$

REMARQUE

Un autre opérateur couramment employé dans le filtrage passe bas est l'opérateur "LAPLACIEN" défini par

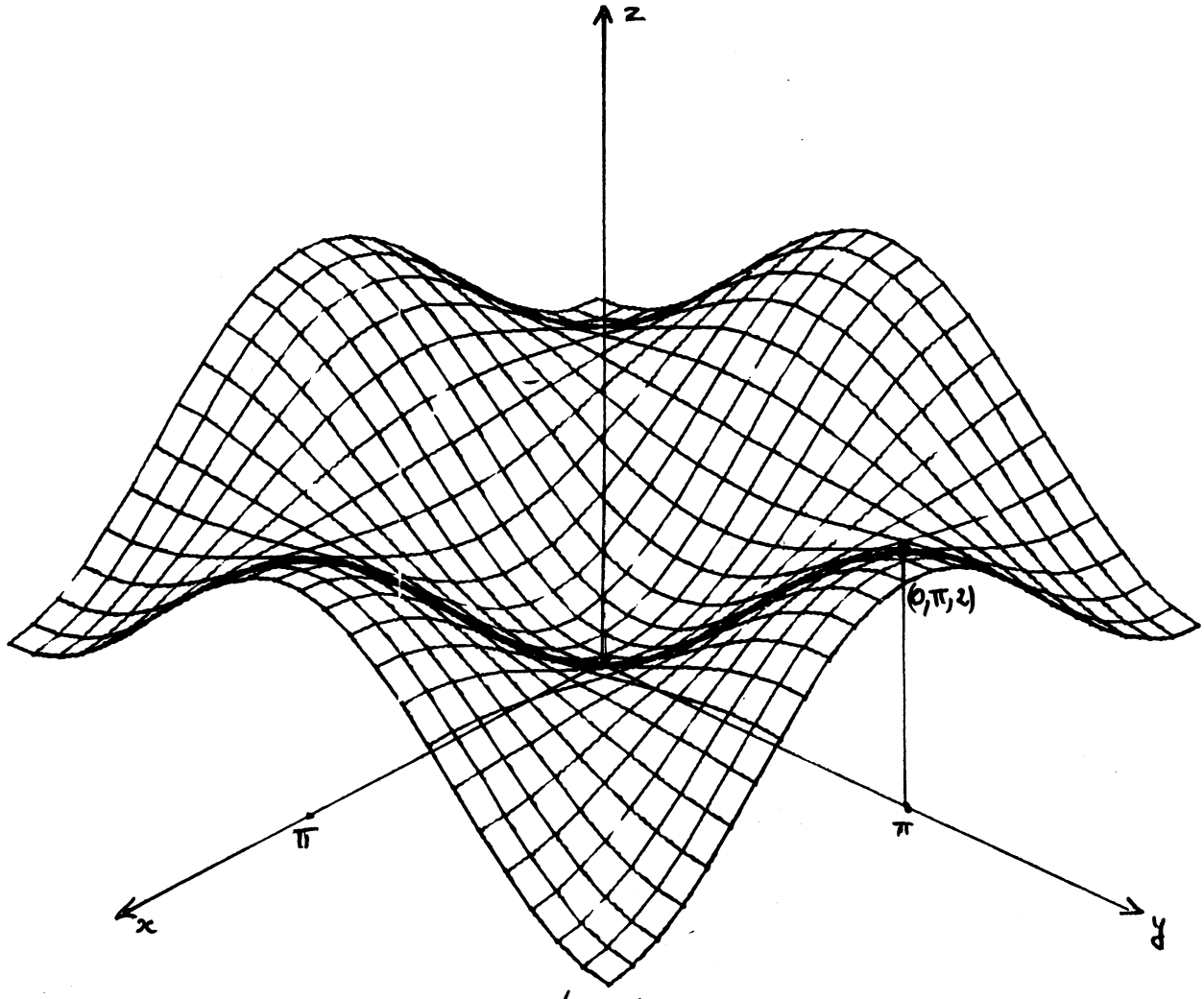
$$(L(A))(I,J) = 4A(I,J)-(A(I-1,J)+A(I+1,J)+A(I,J-1)+A(I,J+1))$$

[7],[16] . Sa fonction de transfert est donnée par

$$H_L(w,w_2) = 4-2(\cos w_1 + \cos w_2).$$

Nous avons

$$H_L(w_1,w_2) \geq H(w_1,w_2) \geq 0 .$$



Z = A*(1-COS(X)*COS(Y)),

A =1.

Figure 8 : Représentation de la fonction de transfert.

CHAPITRE IV

DEFINITIONS ET PROPRIETES TOPOLOGIQUES LIEES AU TRAITEMENT DES IMAGES DIGITALES

INTRODUCTION

La notion de consécutivité dans les espaces "discrets" à deux dimensions est très utilisée dans les problèmes de traitement d'images [1, 2, 3].

Après avoir introduit les définitions utiles à la consécutivité on montre sur un exemple la nécessité de prendre des définitions duales pour les "cellules", c'est-à-dire les formes que l'on veut isoler et les points n'appartenant pas à ces formes.

Ensuite nous justifierons cette différenciation en introduisant une "topologie digitale".

I. NOTIONS DE METRIQUES ET DE VOISINAGES UTILISEES.

1.1 METRIQUE.

Sur l'espace $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$, contenant le support de la fonction image digitale A tel qu'il a été défini au chapitre précédent, nous introduisons deux métriques d_∞ et d_1 définies par :

$$d_\infty(P, Q) = \text{Max}\ (|I-K|, |J-L|)$$
$$d_1(P, Q) = |I-K| + |J-L|$$

où P et Q sont deux points de Z × Z de coordonnées respectives (I, J) et (K, L).

Nous avons effectivement des métriques car elles vérifient les critères :

$$d(P, Q) = 0 \iff P = Q$$
$$d(P, Q) = d(Q, P)$$
$$d(P, Q) \leq d(P, R) + d(R, Q)$$

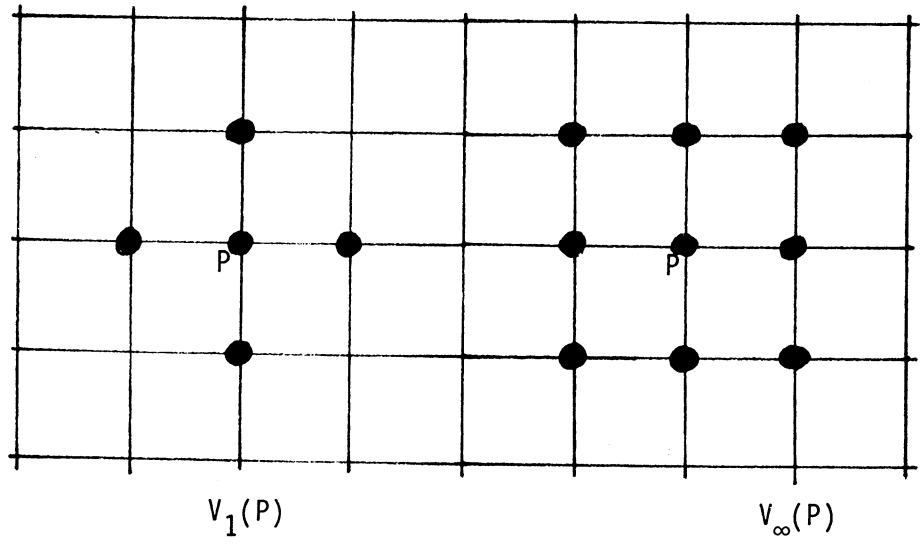
1.2 VOISINAGE (immédiat)

On définit à l'aide des métriques d_∞ et d_1 les notions de voisinage (immédiat) $V_\infty(P)$ et $V_1(P)$ d'un point P par :

$$V_\infty(P) = \{Q;\ d_\infty(P, Q) \leq 1\}$$

$$V_1(P) = \{Q;\ d_1(P, Q) \leq 1\}$$

Nous donnons en figure 1 une représentation de $V_\infty(P)$ et de $V_1(P)$.



- Figure 1 -

II. NOTION D'ENSEMBLE DE POINTS CONSECUTIFS AU SENS D'UNE METRIQUE - CELLULE -

2.1 DEFINITION

Une partie S de Z × Z forme un ensemble de points consécutifs au sens de la métrique d_∞ si pour tout couple de points P et Q appartenant à cette partie, il existe une suite $P_0, P_1, \ldots, P_n$ vérifiant :

$$P_0 = P$$

$$P_n = Q$$

$$P_i \in S \quad \text{et} \quad P_{i+1} \in V_\infty(P_i)$$

On dit que $P_0, P_1, \ldots, P_n$ forment un chemin de points consécutifs au sens de la métrique d_∞.

On définit également les notions de chemin et d'ensemble de points consécutifs au sens de la métrique d_1.

Nous utiliserons l'expression "d_∞-consécutifs" pour désigner la notion de "consécutifs au sens de la métrique d_∞". Même remarque pour la métrique d_1.

2.2 "CELLULE" ET "FOND".

Une cellule sera définie comme une partie maximale du support de la fonction image digitale telle que :

- cette partie soit un ensemble de points d_∞-consécutifs
- les valeurs de la fonction image digitale en ses points soient inférieures à un seuil préfixé. On rappelle que la valeur de la fonction image digitale représente soit une valeur d'intensité de lumière, soit une transmission.

Le "fond" est défini comme l'ensemble des points de Z × Z tel que les valeurs de la fonction image digitale en ses points soient supérieures ou égales au seuil.

III. EXEMPLE JUSTIFIANT DU CHOIX DE LA d_∞-CONSECUTIVITE POUR LES CELLULES ET DE LA d_1-CONSECUTIVITE POUR LE FOND.

Nous représentons en figure 2 la digitalisation d'un fil traversant le support E × F de la fonction image digitale.

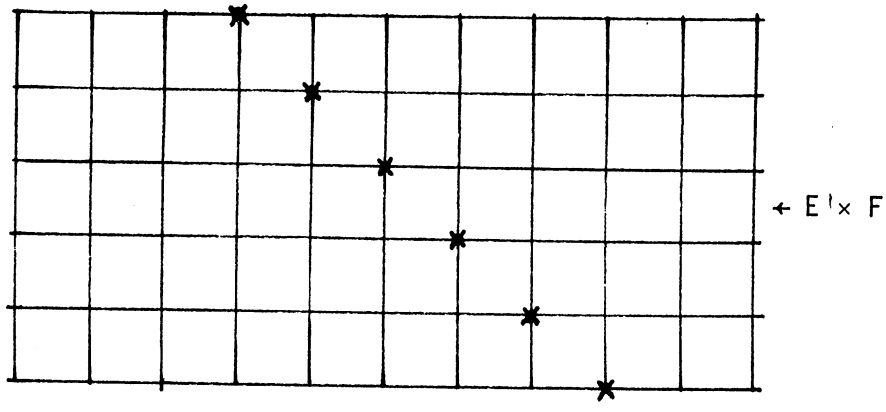


Figure 2 - L'ensemble C des points marqués d'une croix représente la digitalisation d'un fil traversant le support.

Cet ensemble C doit intuitivement "séparer" le support E × F en deux ensembles de points consécutifs quelle que soit la métrique utilisée.

Si nous utilisons d_1 comme métrique commune à C et $\complement_{E\times F}C$ nous avons :

- les points de C ne forment pas un ensemble de points d_1-consécutifs.
- les points de $\complement_{E\times F}C$ forment deux ensembles de points d_1-consécutifs.

Si nous utilisons la métrique d_∞ comme métrique commune à C et $\complement_{E\times F}C$ nous avons :

- les points de $\complement_{E\times F}C$ forment un ensemble de points d_∞-consécutifs.
- les points de $\complement_{E\times F}C$ forment un seul ensemble de points d_∞-consécutifs.

Si nous utilisons la métrique d_∞ pour C et la métrique d_1 pour $\complement_{E\times F}C$ nous avons :

- C est un ensemble de points d_∞-consécutifs
- $\complement_{E\times F}C$ est séparé en deux ensembles de points d_1-consécutifs.

Afin de démontrer cette nécessité de différenciation, nous introduisons une topologie appelée "topologie digitale associée à un système de coordonnées".

Nous montrerons alors que si nous prenons la d_∞-consécutivité pour les cellules et la d_1-consécutivité pour le fond, tout chemin de points d_1-consécutifs reliant un point intérieur d'une cellule à un point du fond coupe le "bord" de la cellule. La notion de "bord" introduite ici, est, comme nous le verrons, différente de celle de frontière utilisée en topologie.

IV. TOPOLOGIE DIGITALE.

On définit une topologie par l'introduction d'un ensemble $\mathcal{U}$ formant une base topologique.

Puis on démontre que la classe τ des sous-ensembles de $Z \times Z$ formés d'unions dénombrables d'éléments de $\mathcal{U}$ vérifie les axiomes O_1, O_2, O_3 d'une topologie sur $Z \times Z$:

O_1 : $Z \times Z$ et $\emptyset$ appartiennent à τ.

O_2 : Toute union dénombrable d'éléments de τ est un élément de τ.

O_3 : L'intersection de deux éléments de τ est un élément de τ.

BASE TOPOLOGIQUE.

A tout point P de $Z \times Z$, de coordonnées (I, J) on associe l'ensemble :

$$U(P)=\begin{cases} U_1(P) & \text{si I et J sont pairs} \\ U_2(P) & \text{si I et J sont impairs} \\ U_3(P) & \text{si I est pair et J impair} \\ U_4(P) & \text{si I est impair et J pair} \end{cases}$$

avec :

$$U_1(P) = \{P\} \cup \{Q \ ; \ d_\infty(P, Q) = 1 \text{ et } d_1(P, Q) > 1\}$$

$$U_2(P) = \{P\}$$

$$U_3(P) = \{J_Q = J_P \quad \text{et} \quad d_1(P,Q) = 1\}$$

$$U_4(P) = \{I_Q = I_P \quad \text{et} \quad d_1(P,Q) = 1\}$$

On a une représentation graphique de U(P) dans un système d'axes orientés selon la figure 3.

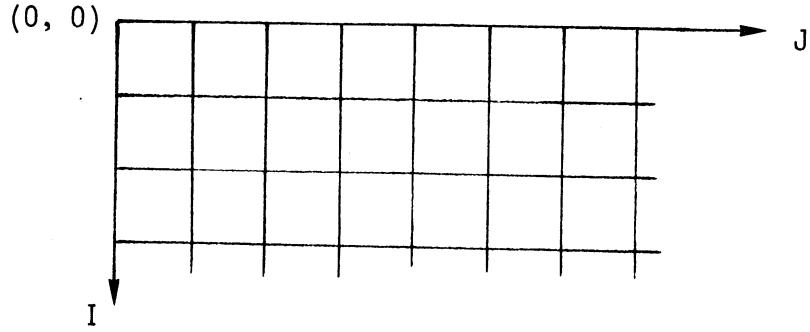
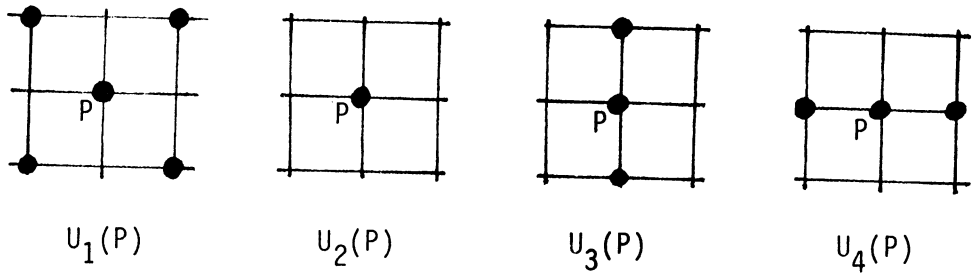


Figure 3 - Orientation des axes du support



$U_1(P)$ $U_2(P)$ $U_3(P)$ $U_4(P)$

Proposition :

$\mathcal{U}$ = {U(P) ; P ∈ Z × Z} forme une base topologique sur Z × Z.

Démonstration :

On vérifie que :

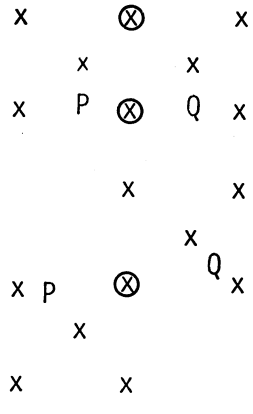
(i) $Z \times Z = \cup \{U(P) ; U(P) \in \mathcal{U}\}$

(ii) Si U(P) et U(Q) sont deux éléments de $\mathcal{U}$, alors U(P) ∩ U(Q) est une union d'éléments de $\mathcal{U}$ lorsqu'elle n'est pas vide.

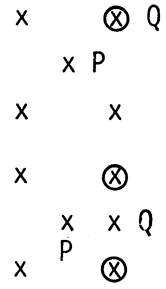
En effet, nous remarquons que pour que l'intersection U(P) ∩ U(Q) ne soit pas réduite à l'ensemble vide, il faut : $d_\infty(P, Q) \leq 2$.

La symétrie de l'intersection et la définition symétrique des ensembles U(P) nous permettent de nous restreindre aux différents cas suivants, I_P et J_P représentant les coordonnées d'un point P :

① I_P et J_P pairs :



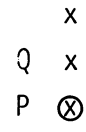
- I_Q et J_Q pairs
  - si $I_Q = I_P$ alors (U(P) ∩ U(Q)) est réduit à une union de 2 ensembles du type U_2.
  - si $I_Q = I_P + 2$ alors (U(P) ∩ U(Q)) est réduit à un ensemble de type U_2.



- I_Q et J_Q impairs
  $U(P) \cap U(Q)$ est réduit à $U(Q) = U_2(Q)$
- I_Q pair et J_Q impair
  $U(P) \cap U(Q)$ est réduit à l'union de 2 ensembles de type U_2.

② I_P impair et J_P impair

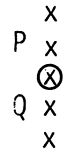
- I_Q et J_Q impair
  si P est différent de Q, on a une intersection vide car $U(P) = P$ et $U(Q) = Q$.



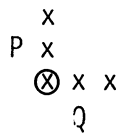
- I_Q pair et J_Q impair
  $U(P) \cap U(Q) = U(P) = P$ si $J_Q = J_P$
  $= \emptyset$ sinon.

- I_Q impair et J_Q pair
  $U(P) \cap U(Q) = P$ si $I_Q = I_P$
  $= \emptyset$ sinon

③ I_P pair et J_P impair



- I_Q pair et J_Q impair
  $U(P) \cap U(Q)$ est réduit à un ensemble du type U_2 si $J_Q = J_P$.
  sinon on a : $U(P) \cap U(Q) = \emptyset$



- I_Q impair et J_Q pair
  $U(P) \cap U(Q)$ est réduit à un ensemble du type U_2 si $|I_Q - I_P| = 1$ et $|J_Q - J_P| = 1$
  sinon on a : $U(P) \cap U(Q) = \emptyset$.

On a donc une base topologique.

Soit τ la classe des ensembles de $Z \times Z$, unions dénombrables d'éléments de $\mathcal{U}$. Alors τ est une topologie sur $Z \times Z$, appelée topologie digitale associée à un système de coordonnées.

Vérifions les axiomes :

O_1 : $Z \times Z \in \tau$ car $Z \times Z = \cup \{U(P) \; ; \; U(P) \in \mathcal{U}\}$

$\emptyset \in \tau$ car $\emptyset = \cup \{U(P) \; ; \; U(P) = \emptyset \in \mathcal{U}\}$

O_2 : Soit $\{A_i\}$ une classe d'éléments de τ. Chaque A_i est, par définition de τ, une union dénombrable d'éléments de $\mathcal{U}$. Alors $\cup_i A_i$ est aussi une union dénombrable d'éléments de $\mathcal{U}$ et appartient donc à τ.

O_3 : Soient A et B deux éléments de τ.

Montrons que $A \cap B$ est aussi un élément de τ. Par définition de τ, il existe deux suites dénombrables d'éléments de $\mathcal{U}$, $\{A_i \; ; \; i \in I\}$ et $\{B_j \; ; \; j \in J\}$ telles que :

$$A = \bigcup_{i \in I} A_i \text{ et } B = \bigcup_{j \in J} B_j$$

Par distributivité, on a :

$$A \cap B = \cup \{A_i \cap B_j \; ; \; i \in I \text{ et } j \in J\}$$

Comme $\mathcal{U}$ est une base topologique, on a :

$$A_i \cap B_j \in \mathcal{U}.$$

Donc $A \cap B$ est un élément de τ.

Ainsi on a construit une topologie τ sur $Z \times Z$. Les éléments de τ seront définis comme étant les ouverts.

Remarque : Cette topologie est en effet associé à un système de coordonnées car, si on modifie l'origine des axes, on n'aura pas le même U(P) pour le point P. Nous utiliserons l'expression "topologie digitale" pour désigner une telle topologie.

On définit le voisinage d'un point P, noté vois (P), tout ensemble contenant U(P).

Une topologie dans le cas de la d_1-consécutivité a été obtenue en utilisant pour base topologique les ensembles U(P) définis de la façon suivante [4] :

$$U(P) = \begin{cases} V_1(P) & \text{si } I+J \text{ est pair} \\ P & \text{sinon} \end{cases}$$

V. INTERIEUR - BORD.

5.1. DEFINITIONS.

Intérieur : Soit C une "cellule". L'ensemble des points P tels que U(P) soit inclus dans C est l'intérieur de C pour la "topologie digitale". Il sera noté int (C).

Bord : P est un point "bord" si :

. $P \in C$

. $V_1(P) \cap \complement_{Z\times Z} C \neq \emptyset$

Le bord de C, noté bord (C), est l'ensemble des points "bord".

Remarque : On n'a pas Int (C) ∪ Bord (C) = C

Exemple : Soit $P \in C$ *tel que* $\begin{cases} U(P) = U_1(P) \\ U(P) \cap \complement_{Z\times Z} C \neq \emptyset \text{ (donc } P \notin \text{int } C) \\ V_1(P) \subset C. \end{cases}$

Ce point P n'est ni point intérieur, ni point bord.

5.2. THEOREME.

Soit C une "cellule".

Soient P un point de int (C) et Q un point de $\complement_{Z\times Z} C$.

Tout chemin composé de points d_1-consécutifs reliant P à Q coupe bord (C).

Démonstration :

Soient $P_0, P_1, \ldots, P_n$ un chemin formé de points d_1-consécutifs reliant P à Q, vérifiant :

$P_0 = P$

$P_n = Q$

$P_{i+1} \in V_1(P_i)$

Il existe j tel que $P_j \in$ Int (C) et $P_{j+1} \in \int_{Z\times Z}$ int (C).

Deux cas se présente :

i) $P_{j+1} \in \int_{Z\times Z} C$.

Dans ce cas, on a $P_j \in$ Bord (C)

car :

$$\begin{cases} P_j \in C \\ P_{j+1} \in \int_{Z\times Z} C \\ P_{j+1} \in V_1(P_j) \end{cases}$$

ii) $P_{j+1} \in \int_{Z\times Z}$ int(C) $\setminus \int_{Z\times Z} C$, c'est-à-dire $P_{j+1} \in \int_C$ int (C)

Alors il existe k tel que :

$$P_k \in \int_C \text{int}(C) \quad \text{et} \quad P_{k+1} \in \int_{Z\times Z} C$$

On a $P_k \in$ bord (C)

En effet :

$$\begin{cases} P_k \in C \\ P_{k+1} \in \int_{Z\times Z} C \\ P_{k+1} \in V_1(P_k) \end{cases}$$

Ce théorème nous montre que si nous voulons distinguer les cellules du fond dans le sens que tout chemin, composé de points consécutifs reliant un point du fond à un point de la cellule, coupe le bord de celle ci, nous devons choisir des notions de consécutivité différentes pour la cellule et le fond.

Nous allons par la suite décrire deux algorithmes d'analyse d'images permettant d'isoler des ensembles de points d_∞-consécutifs et d'énumérer pour chacun les valeurs des critères recherchés.

Le premier de ces algorithmes, intitulé Bord, nécessite l'image totale en mémoire centrale, mais ne travaille que sur le "bord" de chaque "cellule" tel qu'il a été défini.

Le second a l'avantage de ne nécessiter la présence en mémoire centrale que des valeurs obtenues par un diaphragme-trou. Il analyse chaque point des cellules et permet d'obtenir des critères de photométrie pour chacune des cellules.

Comme nous le verrons lors de l'analyse des performances, cet algorithme peut être utilisé en "temps réel".

CHAPITRE V

ALGORITHME "BORD"

INTRODUCTION.

Dans un problème d'analyse de forme, il est généralement nécessaire d'extraire des paramètres de forme qui éventuellement, à l'aide d'autres paramètres, permettront d'aboutir à une classification des formes analysées.

Ainsi que nous le verrons, les paramètres de forme tels que périmètre, surface, courbure, position du centre de gravité sont des paramètres pouvant être calculés par connaissance seule du "bord" des différentes formes.

De nombreux auteurs [1] - [4] se sont intéressés à ce problème de suite du "bord". Nous donnerons une description d'un algorithme après avoir décrit la reconstitution du support de l'image digitale analysée à partir des différents champs-disques.

I. UTILISATION DU "BORD" POUR LE CALCUL DES PARAMETRES DE FORME.

Nous pouvons calculer le périmètre P d'une courbe fermée, la surface S intérieure à cette courbe, les coordonnées (x_G, y_G) du centre de gravité de S et la courbure K de cette courbe par les formules classiques :

$$P = \int_{\text{courbe}} (dx^2 + dy^2)^{1/2}$$

$$S = \frac{1}{2} \int_{\text{courbe}} (x\,dy - y\,dx)$$

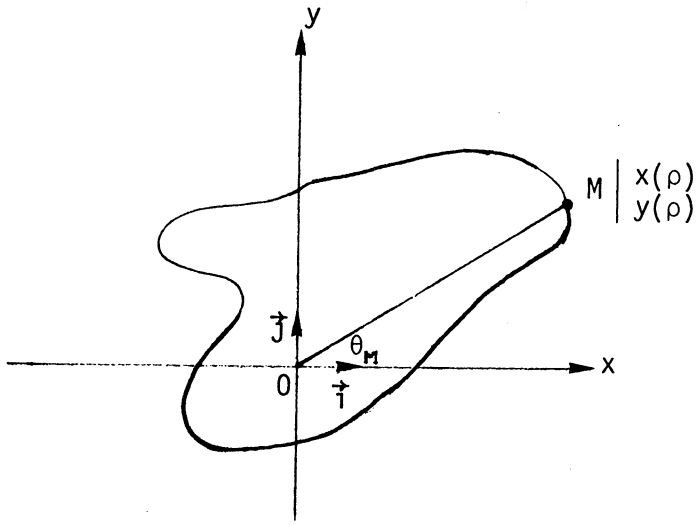
$$\begin{cases} x_G = \dfrac{\iint x\,dx\,dy}{S} \\ y_G = \dfrac{\iint y\,dx\,dy}{S} \end{cases}$$

En utilisant la formule de Riemann, nous pouvons ramener ces intégrales doubles, relatives à la surface intérieure S, à des intégrales simples sur la courbe.

$$\begin{cases} x_G = \dfrac{\int_{courbe} y^2 dx}{S} \\ y_G = \dfrac{\int_{courbe} y^2 dx}{S} \end{cases}$$

Courbure :

Etant donné une courbe C fermée continue, on peut représenter paramétriquement les coordonnées de tout point M de cette courbe par $\{x(\rho), y(\rho)\}$ où ρ désigne l'abscisse curviligne et vérifie $0 \leq \rho \leq P$.



On a la représentation vectorielle dans le repère $O\ \vec{i}\ \vec{j}$:

$$\overrightarrow{OM} = x(\rho)\ \vec{i} + y(\rho)\ \vec{j}$$

Au point M, le vecteur unitaire tangente est calculé par :

$$\overrightarrow{T_M} = \frac{dx(\rho)}{d\rho}\ \vec{i} + \frac{dy(\rho)}{d\rho}\ \vec{j}$$

Si $\vec{N}$ représente le vecteur unitaire normal en M on a :

$$\frac{d\ \overrightarrow{T_M}}{d\rho} = \frac{d\ \overrightarrow{T_M}}{d\ \theta_M} \times \frac{d\ \theta_M}{d\rho} = \vec{N} \times K_M$$

où θ_M représente l'angle $(Ox, \overrightarrow{OM})$ et K_M la courbure au point M.

D'où :

$$|K_M|^2 = \left|\frac{dT_M}{d\rho}\right|^2 = \left(\frac{d^2x}{d\rho^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{d\rho^2}\right)^2$$

On a une expression de la courbure K de la courbe C.

$$K = \int_{\text{courbe}} \left(\left(\frac{d^2x}{d\rho^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{d\rho^2}\right)^2\right)^{1/2} d\rho$$

Ces différentes expressions sont relatives au cas continu et nous construisons des formules analogues dans le cas digital pour le périmètre et la surface.

$$P = \sum_{i=1}^{N} (I_i - I_{i-1})^2 + (J_i - J_{i-1})^2$$

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} [I_{i-1}\,(J_i - J_{i-1}) - J_{i-1}(I_i - I_{i-1})]$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} (I_{i-1}\,J_i - J_{i-1}\,I_i)$$

où N représente le nombre de points du "bord".

Après avoir décrit l'algorithme de reconstitution des différents champs en un support rectangulaire d'une image digitale et l'algorithme d'exploration du bord d'une "cellule", nous établirons une formule d'évaluation de la variation "totale" de la suite des valeurs représentatives des courbures locales.

II. ALGORITHME DE RECONSTITUTION DES DIFFERENTS CHAMPS EN UN SUPPORT RECTANGULAIRE.

Nous rappelons que l'exploration d'une portion de lame s'effectue par l'acquisition de plusieurs champs disques obtenus successivement au cours d'un balayage en méandre de cette portion constituant le support de l'image digitale acquise.

Compte tenu du grossissement de l'objectif du microscope, les dimensions d'un champ disque ne correspondent pas à des multiples du parcours effectué par les platines au cours d'un pas de déplacement. Aussi nous devons tenir compte de l'existence de recouvrements d'un champ au champ adjacent dans les deux directions.

Pour les algorithmes de reconstitution et de traitement, nous emploierons les variables suivantes relatives à la géométrie du support exploré (figure 1).

NTL = nombre de champs explorés par bande. Une bande étant constituée d'une suite de champs "adjacents" dans la direction orthogonale au sens du balayage des diaphragmes-trous.

NTC = nombre de bandes explorées.

NL = nombre de diaphragmes trous = 43

NC = nombre de valeurs échantillonnées pour chaque diaphragme trou = 45

RL = nombre de recouvrements entre 2 champs "adjacents" d'une même bande.

RC = nombre de recouvrements entre 2 champs "adjacents" d'une bande à la suivante.

NLRL = NL - RL

NCRC = NC - RC

NRLD = nombre de recouvrements pris au début des NL diaphragmes parmi les RL recouvrements.

NRCD = nombre de recouvrements pris au début des NC valeurs digitales de chaque diaphragme trou.

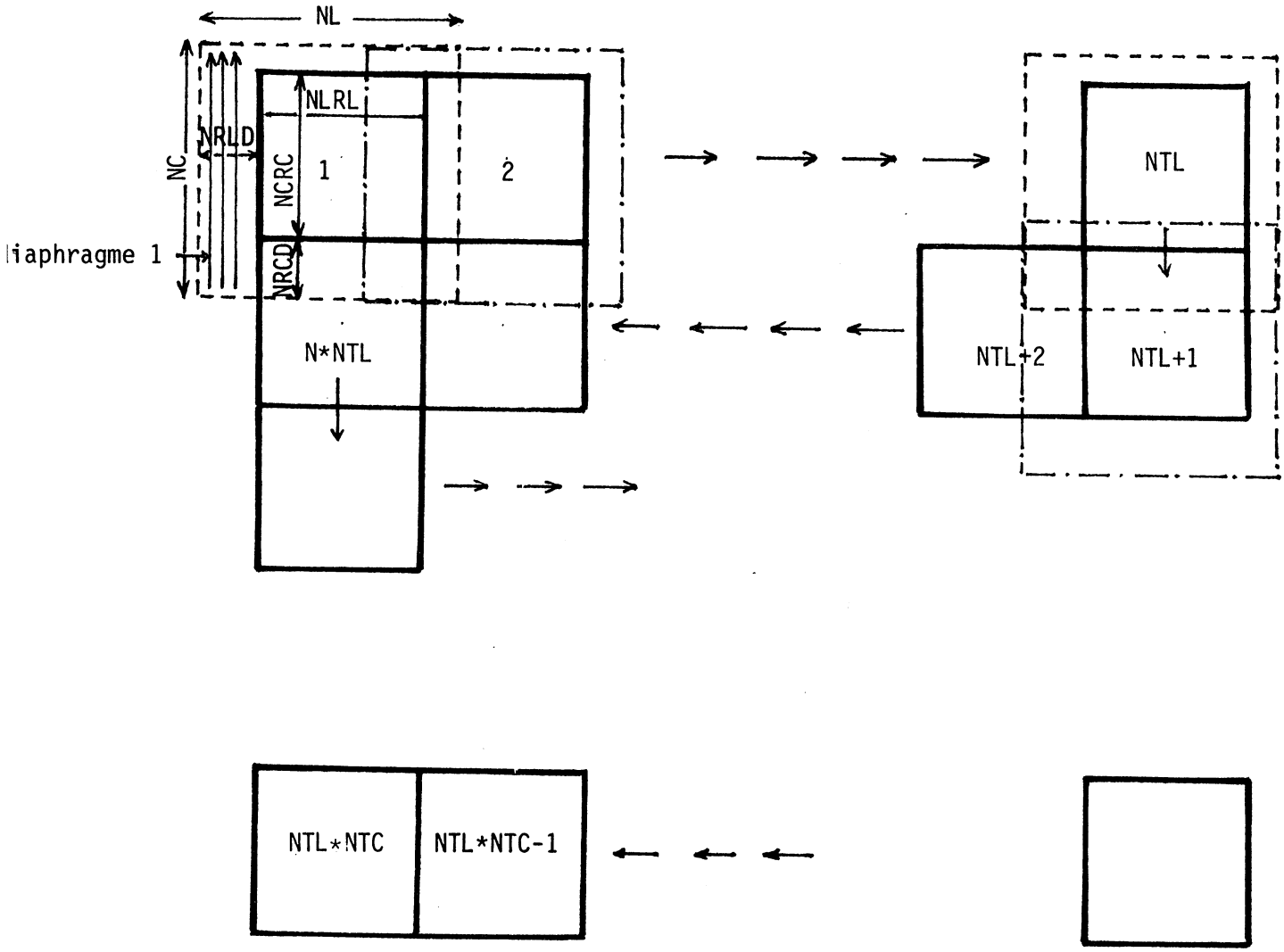


Figure 1 - Géométrie du balayage

La procédure IMAG1 dont l'algorithme est donné ci-après permet de transformer la suite des valeurs C(I), I = 1, ... NDIMC = NTL*NTC*NL*NC, obtenue séquentiellement après digitalisation en une matrice IMAGE d'éléments IMAGE (I, J) où I = 1, ... NIML = NLRL×NTL

J = 1, ... NIMC = NCRC×NTC

Pour cela, nous utilisons une application intermédiaire :

MAT : $Z^4 \longrightarrow R$ où MAT (I, J, K, L)

représente l'élément en colonne L de la ligne K du champ situé dans la

bande numéro J en position I si J est impair, sinon en position (NTL - I + 1).
(Les recouvrements sont éliminés au cours de cette transformation).

Puis, disposant de l'application MAT, on crée la matrice IMAGE ligne par ligne en calculant les adresses II, JJ, KK, LL à l'aide des indices I et J correspondant à la ligne et à la colonne où se situe IMAGE (I, J).

Algorithme de la procédure IMAG1 écrit en FORTRAN

```
      SUBROUTINE IMAG1 (C,MAT,IMAGE,NTL,NTC,NL,NC,NDIMC,NLRL,NCRC,NBNL,
     * NBNC,NDCR)
      REAL C(NDIMC)
      REAL MAT (NTL,NTC,NLRL,NCRC)
      REAL IMAGE (NBNL,NBNC)
      DO 20 I=1,NTC,2
      II=(I-1)*NTL*NL*NC
      DO 21 J=1,NTL
      JJ=(J-1)*NL*NC
      DO 22 L=1,NLRL
      LL=(L-1)*NC
      IJK=II+JJ+LL+NDCR
      DO 23 K=1,NCRC
      KK=NCRC-K+1
      MAT (J,I,L,KK)=C(IJK+K)
   23 CONTINUE
   22 CONTINUE
   21 CONTINUE
   20 CONTINUE
      IF (NTC.EQ.1) GOTO 34
      DO 30 I=2,NTC,2
      II=(I-1)*NTL*NL*NC
      DO 31 J=1,NTL
      JJ=(J-1)*NL*NC
      KK=NTL-J+1
      DO 32 L=1,NLRL
      LL=(L-1)*NC
      IJK=II+JJ+LL+NDCR
      DO 33 K=1,NCRC
      KK=NCRC-K+1
      MAT (JJ,I,L,KK)=C(IJK+K)
   33 CONTINUE
   32 CONTINUE
   31 CONTINUE
   30 CONTINUE
   34 DO 40 I=1,NBNL
      II=(I-1)/NLRL
      KK=I-II*NLRL
      II=II+1
      DO 41 J=1,NBNC
      JJ=(J-1)/NCRC
      LL=J-JJ*NCRC
      JJ=JJ+1
      IMAGE (I,J)=MAT(II,JJ,KK,LL)
   41 CONTINUE
   40 CONTINUE
      RETURN
      END
```

Ayant appliqué cet algorithme à différents exemples, nous donnons ci-dessous un tableau de coût en temps d'unités centrales.

NTL	NTC	NLRL	NCRC	Temps
4	2	35	37	7,5 sec.
6	2	35	37	10,5 sec.
8	2	35	37	14 sec.

Cet algorithme a l'avantage d'utiliser peu d'opérations arithmétiques telles que les multiplications coûteuses en temps de calcul, mais par contre, il nécessite des calculs d'adresses, ainsi qu'une grande place en mémoire centrale.

Aussi peut-on proposer une seconde procédure IMAG2 permettant de transformer la suite C(K), K = 1, ..., NDIMC en une matrice IMAGE d'éléments IMAGE (I, J) en calculant l'indice K de l'élément de la suite C à l'aide des indices I et J de l'élément IMAGE (I, J).

Algorithme de la procédure IMAG2 écrit en FORTRAN

```
      SUBROUTINE IMAG2 (C,IMAGE,NTL,NTC,NL,NC,NDIMC,NLRL,NCRC,NIML,
     *  NIMC,NRCP,NRLP)
      REAL C(NDIMC)
      REAL IMAGE (NIML,NIMC)
      N1=NL*NC
      N2=N1*NTL
      DO 1 I=1,NIML
      I1=((I-1)/NLRL)*N1
      I2=(I-((I-1)/NLRL)*NLRL)*NC
      I3=(NTL-((I-1)/NLRL)-1)*N1
      DO 2 J=1,NIMC
      IF (MOD((J-1)/NCRC,2).EQ.1) GOTO 3
      IMAGE(I,J)=C(((J-1)/NCRC)*N2+I1+I2+NRCP+(((J-1)/NCRC)+1)*NCRC-J+1)
      GOTO 2
    3 IMAGE(I,J)=C(((J-1)/NCRC)*N2+I3+I2+NRCP+(((J-1)/NCRC)+1)*NCRC-J+1)
    2 CONTINUE
    1 CONTINUE
      RETURN
      END
```

Figure 2

Du point de vue coût en temps d'unité centrale, les deux algorithmes sont comparables.

Nous présentons en figure 2 un exemple de reconstitution de champs provenant du balayage d'une lame histologique avec les paramètres :

NTL = 5
NTC = 4
NLRL = 35
NCRC = 37

III. ALGORITHME DE SUITE DES "BORDS" DES CELLULES.

Nous rappelons qu'une cellule est définie comme un ensemble de points (I, J) d_∞-consécutifs où la valeur de la fonction image digitale est inférieure à un seuil S préfixé.

Le choix de ce seuil peut être établi par une méthode d'exploration d'une cellule dont on connait le bord.

Freeman [1], [5], [6] s'est intéressé au problème du codage des figures géométriques dans le but d'en donner une représentation sous la forme d'une suite numérique plus "économique" en stockage que l'ensemble des coordonnées de chaque point.

L'algorithme que nous allons décrire ne nécessitant pas les valeurs de la fonction image digitale, on modifie la fonction IMAGE précédemment construite en une application binaire à l'aide de la valeur du seuil S.

A(I, J) = 1 si IMAGE (I, J) < S
= 0 si IMAGE (I, J) ≥ S

Cette transformation ayant pu être effectuée au cours de l'algorithme de reconstitution, on suppose disposer en entrée de l'algorithme de suite des "bords",d'une image digitale A composée de la valeur 0 pour

les points du fond et de la valeur 1 pour les points appartenant aux cellules.

3.1. DESCRIPTION DE L'ALGORITHME.

3.1.1. Le premier pas de l'algorithme consiste à rechercher le premier point "bord" en balayant le support de l'image A ligne par ligne et détectant le premier point de valeur 1.

Soient (I_0, J_0) les coordonnées de ce point.
On a effectivement un point "bord" tel qu'il a été défini au chapitre précédent car :

$$A\ (I_0,\ J_0 - 1) = 0$$

$$A\ (I_0,\ J_0) = 1$$

Ce point (I_0, J_0) va servir de point initial à une suite composée des points "bord " (I_i, J_i) tels que :

$$(I_{i+1},\ J_{i+1}) \in V_\infty(I_i,\ J_i)$$

$$(I_N,\ J_N) = (I_0,\ J_0)$$

où N représente le nombre de points "bord" de la cellule à laquelle appartient le point (I_0, J_0).

3.1.2. Passage d'un point "bord" au suivant :
On teste les 8 points voisins de (I_0, J_0) séquentiellement en prenant pour point de départ le point $(I_0, J_0 - 1)$ qui appartient au fond et en contournant le point (I_0, J_0) dans le sens trigonométrique.
On choisit comme point "bord" suivant (I_1, J_1) le premier point de ce voisinage où la fonction image a pour valeur 1.

Ce point (I_1, J_1) est un point "bord" de la même cellule que (I_0, J_0), car si on note (K, L) le point qui le précède dans l'exploration du voisinage de (I_0, J_0), on a :

$(K, L) \in$ fond

$(K, L) \in V_1(I_1, J_1)$

$(I_1, J_1) \in V_\infty(I_0, J_0)$

On recommence le processus de recherche du point "bord" suivant en faisant jouer à (I_1, J_1) le rôle de (I_0, J_0) et en prenant comme point de départ d'exploration du voisinage de (I_1, J_1) le point (K, L).

On poursuit ainsi jusqu'au retour au point (I_0, J_0).

Compte tenu du sens d'exploration de chaque voisinage, on remarque que, si on oriente le "bord" de la cellule suivant le sens trigonométrique, l'algorithme l'explore en laissant la cellule sur la gauche.

Or le "bord" est un chemin formé de points d_∞-consécutifs, fermé et fini. Cela prouve que l'algorithme revient au point de départ.

3.1.3. Identification des cellules.

Afin d'obtenir une labellisation de chaque cellule et de la préserver d'une nouvelle exploration de son "bord", on l'identifie en affectant à ses points "bord" une valeur "label" autre que "0" et "1".

Ainsi, étant revenu au point (I_0, J_0), l'algorithme se poursuit en testant les points de la même ligne jusqu'à ce que l'on retrouve la même valeur label que celle du point (I_0, J_0), ce qui permet de franchir le "bord" de la cellule.

L'algorithme se poursuit en balayant le support de l'image jusqu'à la détection d'un "bord" non labellé.

A ce stade, cet algorithme permet d'effectuer au niveau de chaque cellule de label j les mesures de périmètre P_j et de surface S_j selon les expressions :

$$P_j = \sum_{i=1}^{N_j} ((I_i - I_{i-1})^2 + (J_i - J_{i-1})^2)^{1/2}$$

$$S_j = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_j} I_{i-1} (J_i - J_{i-1}) - J_{i-1}(I_i - I_{i-1})$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_j} (I_{i-1}J_i - J_{i-1} I_i)$$

Si nous désirons évaluer la courbure en chaque point "bord", il nous faut une mesure de la variation de la pente de la "tangente" aux points "bord".

Ainsi est-il intéressant d'avoir une valeur de direction d'un point "bord" au suivant.

Comme on l'a vu dans le cas d'une fonction image continue, on a la courbure au point M donnée par :

$$K_M = \frac{d\theta_M}{d\rho}$$

Ceci se transpose dans le cas digital sous la forme :

$$K_M = \frac{\Delta\theta_M}{\Delta p}$$

où $\Delta\theta_M$ est la variation de direction entre le point "bord" M et le point "bord" précédent, et Δ_P est la portion de "périmètre" P autour du point M.

Un autre intérêt de cette notion de valeur de direction est le stockage des cellules qui pourra ainsi se faire par retenue des coordonnées du point "bord" initial et de la suite des valeurs de direction.

3.2. CODAGE DU "BORD" D'UNE CELLULE.

Disposant d'un maillage carré pour la création des images digitales, nous utiliserons un ensemble de 8 valeurs de direction pour le passage d'un point "bord" (I, J) au suivant comme il est indiqué en figure 3.

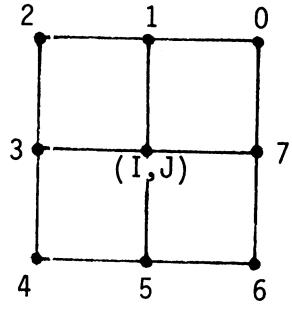


Figure 3
Tableau des correspondances entre les valeurs de direction et les points de $V_\infty(I, J)$.

Ainsi que le précise Freemann [5], cette suite de valeurs permet de nombreuses évaluations relatives à la forme de l'objet auquel correspond le "bord". Comme exemple, nous retiendrons le calcul du périmètre qui, dans notre cas, s'évalue par :

$$P = n_{impair} + n_{pair} \times \sqrt{2}$$

où n_{impair} et n_{pair} représentent respectivement le nombre de valeurs de directions impaires et paires.

Nous nous intéresserons à la courbure en raison de notre problème où les cellules en phase mitotique ont un contour plus "dentelé" que les cellules en repos.

Valeur de direction - angle - courbure.

On oriente les axes de coordonnées du support d'une image digitale selon la direction 7 pour les ordonnées croissantes et la direction 5 pour les abscisses croissantes.

On choisit comme origine des angles la demi droite orientée de direction 7.

Si (I, J) et (I + ΔI, J + ΔJ) sont les coordonnées respectives de deux points "bord" successifs, on a en figure 4 le tableau reliant les valeurs de la direction D et des écarts ΔI et ΔJ.

D	0	1	2	3	4	5	6	7
ΔI	-1	-1	-1	0	1	1	1	0
ΔJ	1	0	-1	-1	-1	0	1	1

Figure 4
Tableau de variations des coordonnées entre 2 points "bord" en fonction de la valeur de direction

On a alors une autre évaluation du périmètre donnée par :

$$P = \sum_{(I,\ J)\in bord} ((\Delta I)^2 + (\Delta J)^2)^{1/2}$$

Si on représente par θ(i) la valeur de l'angle correspondant à la direction i, on a :

$$\theta(i) = (i + 1) * \pi/4$$

Ainsi, si A et B représentent deux points "bord" successifs et D(A) et D(B) leur valeur de direction respective, on a une évaluation de la courbure au point B donnée par :

$$K(B) = \frac{\theta(D(B)) - \theta(D(A))}{L(D(B)) + L(D(A))}$$

où : $L(i) = \frac{1}{2}$ si i est impair

$\frac{\sqrt{2}}{2}$ si i est pair

Nous définissons la variation "totale" K de la suite des valeurs de courbure aux points bord d'une cellule par :

$$L = \sum_{B \in Bord} |K(B)|$$

IV. ALGORITHME - EXEMPLES D'APPLICATION.

Nous présentons l'algorithme de ce traitement sous forme d'une procédure intitulée BORD écrite en FORTRAN et ayant comme paramètres :

X : fonction image digitale composée, en entrée de la procédure, de 0 ou de 1.

NI, NJ : dimensions du support de X.

FOND : valeur seuil du fond. Dans notre cas, on a : FOND = 0.

Après traitement, on obtient une représentation de l'image digitale à l'aide du symbole '1' pour les points appartenant à une cellule.

On a pour chaque cellule : le label, les coordonnées du premier point "bord" et la suite des valeurs de direction permettant de reconstituer le bord.

Du point de vue résultats, on obtient pour chaque cellule son périmètre et sa "courbure" telle qu'elle a été définie précédemment.

Suite à l'algorithme, nous donnons des exemples d'application à des images digitales dont les dimensions du support sont 43 × 45.

Les exemples 1 et 2 représentent des cellules en repos, alors que dans l'exemple 3 nous avons une portion de cellule et une cellule en mitose.

Cette cellule en mitose possède des "trous" dont les bords ne sont pas détectés car les bords des cellules sont déterminés par passage du fond à la cellule. D'autre part, il est précisé dans l'algorithme que, lorsque l'on rencontre un "bord" labellé, on poursuit l'exploration de la ligne jusqu'à ce que l'on retrouve le label, ce qui permet d'éviter les "trous".

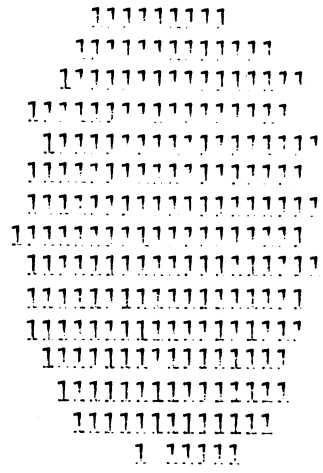
Pour répondre à notre problème de différenciation des cellules en mitose, on constate que la "courbure" est un paramètre utile.

```
      SUBROUTINE BORD(X,NI,NJ,FOND)
      INTEGER*2 X(NI,NJ)
      INTEGER FOND
      INTEGER II(8),JJ(8),III(8),JJJ(8)
      INTEGER S(2)
      NUMERO=1
      ICOIN=0
      JCOIN=0
      I=1
      J=2
C RECHERCHE DU PREMIER POINT BORD D'UNE CELLULE NON LABELLEE.
C
    2 PERIM=0
      COUPB=0
      IF ((X(I,J).GT.FOND).AND.(X(I,J-1).LE.FOND).AND.(X(I,J).LT.2))
     *  GOTO 8
      IF (X(I,J).LT.2) GOTO 16
      IF ((X(I,J-1).LE.FOND).AND.(X(I,J+1).LE.FOND)) GOTO 16
 1001 IF (X(I,J+1).LT.2) GOTO 1000
      J=J+1
      GOTO 1001
 1000 IF (J.EQ.NJ) GOTO 4
      J=J+1
      IF ((X(I,J-1).GE.2).AND.(X(I,J).LE.FOND)) GOTO 16
      GOTO 1000
   16 IF(J.EQ.NJ) GOTO 4
      J=J+1
      GOTO 2
    4 IF (I.GT.(NI-1 )) GOTO 34
      J=2
      I=I+1
      GOTO 2
    8 NUMERO=NUMERO+1
C
CNUMERO=LABEL DU PREMIER POINT BORD (I,J) ET DES POINTS BORD
C SUIVANTS DE LA NOUVELLE CELLULE.
C
      WRITE (8,200) NUMERO,I,J
  200 FORMAT (' COORDONNEES DU PREMIER POINT  BORD   DE LA CELLULE NUM
     *ERO ',I3,5X,I3,2X,I3)
      X(I,J)=NUMERO
      S(1)=3
C
C TABLEAUX DONNANT LES COORDONNEES DES 8 POINTS VOISINS D'UN
C POINT BORD (I,J).
C
      II(1)=I
      II(2)=I+1
      II(3)=I+1
      II(4)=I+1
      II(5)=I
      II(6)=I-1
      II(7)=I-1
      II(8)=I-1
      JJ(1)=J-1
      JJ(2)=J-1
      JJ(3)=J
      JJ(4)=J+1
      JJ(5)=J+1
```

```
      JJ(6)=J+1
      JJ(7)=J
      JJ(8)=J-1
C
C TABLEAUX DONNANT LES VARIATIONS DES COORDONNEES ENTRE UN POINT
C BORD ET SES 8 VOISINS.
C
      III(1)=0
      III(2)=1
      III(3)=1
      III(4)=1
      III(5)=0
      III(6)=-1
      III(7)=-1
      III(8)=-1
      JJJ(1)=-1
      JJJ(2)=-1
      JJJ(3)=0
      JJJ(4)=1
      JJJ(5)=1
      JJJ(6)=1
      JJJ(7)=0
      JJJ(8)=-1
      KK=2
   10 K=1
C
C RECHERCHE DU POINT BORD SUIVANT.
C
   12 IF(X(II(K),JJ(K)).GT.EGND) GOTO 14
      K=K+1
      IF(K.LE.8) GOTO 12
      WRITE (8,300)
  300 FORMAT (' POINT ISOLE' )
      GOTO 16
   14 IND=II(K)
      JND=JJ(K)
C
C (IND,JND)=COORDONNEES DE CE NOUVEAU POINT BORD. K SA VALEUR DE
C DIRECTION
C
      X(IND,JND)=NUMERO
   13 M=MOD(K+KK,8)
      WRITE (8,350) M
  350 FORMAT (3X,I2)
C
C INCREMENTATION DU PERIMETRE ET DE LA COURBURE.
C (ICOIN,JCOIN)=COORDONNEES DU POINT BORD PRECEDENT.
C
      PERIM=PERIM+1.414-0.414*MOD(M,2)
      S(2)=M
      IF ((ICOIN+JCOIN).EQ.0) GOTO 70
      R1=(1+(1-MOD(S(1),2))*0.414)/2
      R2=(1+(1-MOD(S(2),2))*0.414)/2
      COURB=COURB+ABS((S(2)-S(1))/(R2+R1))
      IF (S(1).EQ.S(2)) GOTO 70
   70 ICOIN=IND
      JCOIN=JND
      IF ((IND .NE. I) .OR. (JND .NE. J)) GOTO 12
C
C ON EST REVENU AU PREMIER POINT BORD.
C
```

```
      ICOIN=0
      WRITE (6,450) NUMERO ,PERIM,COURB
  450 FORMAT (' CELLULE NUMERO ',I2,'  PERIMETRE ',F6.2,'  COURBURE  ',
     * F6.2)
      JCOIN=0
      GOTO 2
C
C RECORGANISATION DU VOISINAGE DU POINT (IND,JND) POUR LA
C RECHERCHE D'UN NOUVEAU POINT BORD.
C
   10 S(1)=S(2)
   15 IF (K .NE. 1) GOTO 140
      II(1)=II(8)
      JJ(1)=JJ(8)
      GOTO 150
  140 II(1)=II(K-1)
      JJ(1)=JJ(K-1)
  150 IF (IND .NE. II(1)) GOTO 21
      IF(JND.LT.JJ(1)) GOTO 20
      KK=2
      GOTO 18
   20 KK=6
      GOTO 18
   21 IF(IND.GT.II(1)) GOTO 24
      KK=4
      GOTO 18
   24 KK=0
      GOTO 18
   18 L=0
      IF (KK.EQ.0) KK=8
   30 II(L+2)=IND+III(MOD(KK+L-1,8)+1)
      JJ(L+2)= JND+JJJ(MOD(KK+L-1,8)+1)
   32 IF(L.EQ.6) GOTO 10
      L=L+1
      GOTO 30
   34 RETURN
      END
```

EXEMPLE 1



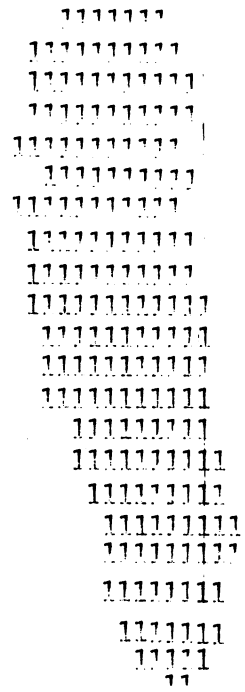
CELLULE NUMERO 3 PERIMETRE 61.35 COURBURE 57.33

COORDONNEES DU PREMIER POINT BORD DE LA CELLULE NUMERO 2 2 30

POINT ISOLE

COORDONNEES DU PREMIER POINT BORD DE LA CELLULE NUMERO 3 21 20

EXEMPLE 2

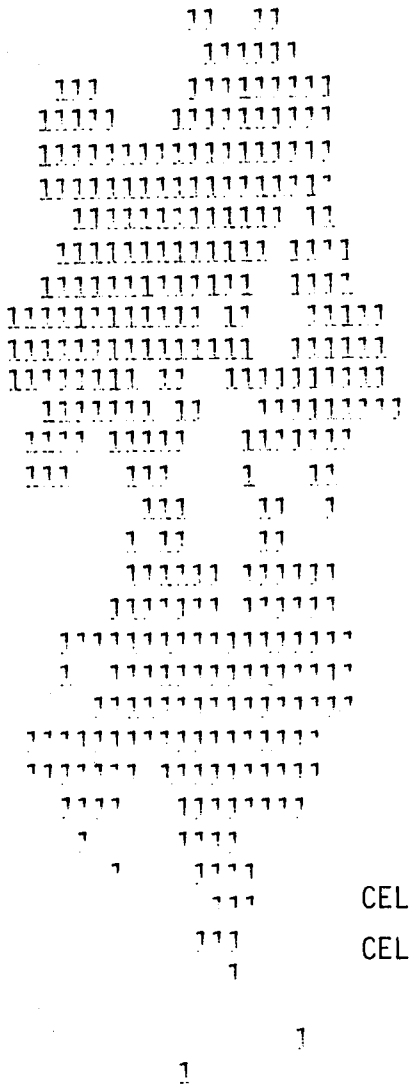


CELLULE NUMERO 2 PERIMETRE 63.94 COURBURE 43.63

COORDONNEES DU PREMIER POINT BORD DE LA CELLULE NUMERO 2 18 20

4	6	6	0	1	1
3	5	6	0	1	2
5	5	5	1	1	2
5	6	5	0	2	3
4	5	6	1	1	3
7	5	6	2	2	3
6	7	7	1	0	3
4	6	6	2	2	3
3	5	7	1	0	3

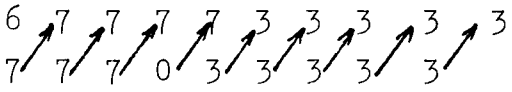
EXEMPLE 3



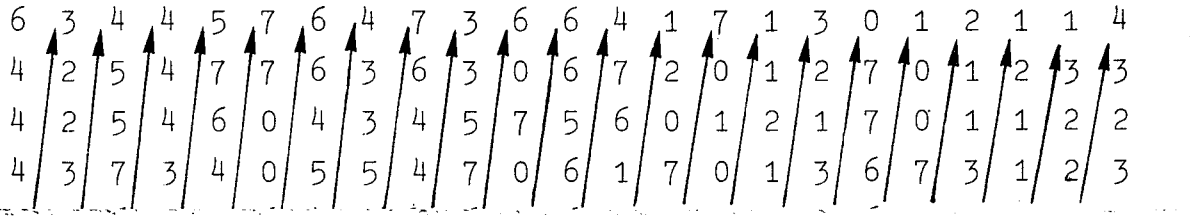
CELLULE NUMERO 2 PERIMETRE 20.83 COURBURE 17.26

CELLULE NUMERO 7 PERIMETRE 137.18 COURBURE 157.26

COORDONNEES DU PREMIER POINT BORD DE LA CELLULE NUMERO 2 2 10



COORDONNEES DU PREMIER POINT BORD DE LA CELLULE NUMERO 3 2 31
POINT ISOLE
COORDONNEES DU PREMIER POINT BORD DE LA CELLULE NUMERO 4 2 37
POINT ISOLE
COORDONNEES DU PREMIER POINT BORD DE LA CELLULE NUMERO 5 2 42
POINT ISOLE
COORDONNEES DU PREMIER POINT BORD DE LA CELLULE NUMERO 6 2 44
POINT ISOLE
COORDONNEES DU PREMIER POINT BORD DE LA CELLULE NUMERO 7 8 21



V - DISCUSSION

Cet algorithme est intéressant du fait qu'il permet un adressage de chaque cellule et un stockage restreint de celle ci par son "bord" qui est un domaine riche en information.

Pour les problèmes ne nécessitant pas la connaissance de la valeur de l'information au niveau de chaque point un tel algorithme semble utile.

Compte tenu de la nécessité du stockage de l'image entière on ne peut travailler sur des images digitales ayant de grands supports.

Du point de vue temps de calcul, l'exploration d'une image digitale dont le support est de taille 43 × 45, identique à ceux des images précitées en exemple, nécessite 2,5 secondes de traitement en unité centrale d'un calculateur du type IBM 360/67.

Afin de réduire ce temps de traitement, nous allons décrire un algorithme d'analyse des données ne nécessitant ni la restructuration des différents champs ni la présence de toute l'image en mémoire centrale.

CHAPITRE VI

ALGORITHME "CELL"

I. INTRODUCTION

Compte tenu des remarques effectuées sur l'algorithme BORD non adapté à l'exploration de nombreux champs élémentaires et à l'étude des valeurs du signal photométrique à l'intérieur des cellules, ces valeurs pouvant apporter des renseignements utiles pour la classification des phases cellulaires, nous allons décrire un algorithme, dénommé CELL, avec les objectifs suivants :

- Ne pas nécessiter la reconstitution des différents champs élémentaires en une image digitale à support rectangulaire.

- Analyser les images digitales élémentaires et évaluer les différents paramètres relatifs à chaque cellule, en ayant en entrée les valeurs numériques dans l'ordre où elles ont été lues

- Ne pas nécessiter en mémoire centrale la présence de toutes les valeurs.

Ces objectifs nous amènent à l'utilisation des machines séquentielles et des automates d'états finis [1].

SELKOW a invoqué l'usage de la notion algébrique d'automates d'états finis pour la recherche et l'affectation de labels à des ensembles composés de points d_1-consécutifs dans une image digitale [2].

Dans cet exemple d'application, le procédé est étroitement lié avec le fait que le support de l'image soit composé d'un unique rectangle.

Nous allons décrire un modèle d'application des machines séquentielles finies, adapté à la géométrie d'acquisition des valeurs, permettant d'affecter un label aux cellules définies au chapitre IV et d'évaluer, pour chacune d'elles, des paramètres de différenciation.

On désigne par ligne élémentaire, l'ensemble des NL valeurs correspondant au balayage d'un diaphragme-trou à travers un champ disque élémentaire.

Nous montrerons, par l'application de l'algorithme"cell", que, dans le cas des bandes aller (figure 1, chapitre V), nous pouvons explorer une telle bande à l'aide d'un seul buffer de taille NCRC (les RC points de recouvrements étant supprimés).

Ce buffer verra le passage successif des NTL × NLRL lignes élémentaires d'une telle bande.

Ainsi, au lieu de mémoriser toute l'image digitale (composée dans ce cas d'une bande aller), on ne retient à chaque instant que les valeurs correspondant à un diaphragme-trou.

Dans le cas des bandes "retour", où le déplacement des platines s'effectue en sens inverse de la progression des lignes élémentaires dans un champ disque, on n'a plus coïncidence entre l'ordre de lecture des lignes élémentaires et l'ordre de positionnement dans la bande.

Si on veut utiliser le même algorithme que pour les bandes aller, on devra retenir en mémoire l'ensemble des valeurs digitales composant un champ élémentaire et les réordonner.

Ainsi, à tout instant, cet algorithme "cell" nécessite au maximum la mémorisation des valeurs de la fonction image digitale correspondant à un champ disque, soit 1935 valeurs.

II. MACHINES SEQUENTIELLES FINIES.

2.1 DEFINITION :

Soient X et Y deux ensembles finis, définis respectivement comme ensemble d'entrée et ensemble de sortie.

Une machine séquentielle finie m : $X \to Y$ est constituée des éléments :

- Un ensemble fini Q, ensemble des états.
- Un élement de Q, dénommé état initial.
- Un couple d'applications

$\delta : Q \times X \to Q$ fonction successeur
$\lambda : Q \to Y$ fonction de sortie.

La machine m reçoit des éléments ou informations en provenance de X et son état évolue en fonction de ces valeurs informations selon un processus rigoureux décrit par la fonction successeur δ.

Pour chaque état, elle affiche une valeur réponse parmi un nombre fini de réponses à l'aide de la fonction de sortie λ.

A deux états distincts, elle peut donner la même valeur réponse.

On peut formaliser une telle machine de la façon suivante :

$(X, Q, Y, \delta : Q \times X \to Q, \lambda : Q \to Y)$

2.2 UTILISATION DES MACHINES SEQUENTIELLES FINIES POUR LA MODELISATION DE NOTRE PROBLEME.

Le buffer dont nous avons fait mention précédemment pour explorer les bandes composées de champs disques successifs sera une suite de NCRC machines séquentielles finies m_j où l'état de chacune de ces machines évoluera au cours de la progression du buffer dans la bande selon des règles que nous préciserons ultérieurement.

On représente par $Q_j(i)$ l'état de la machine m_j au cours du traitement, par le buffer, de la ligne élémentaire numéro i, i = 1,...NTL × NLRL.

On suppose avoir effectué, si nécessaire, la modification dans l'ordre de traitement des lignes élémentaires afin de conserver un ordre de positionnement de ces lignes dans la bande (cas des bandes "retour").

Chaque machine m_j évolue dans les mêmes ensembles d'entrée X, de sortie Y et d'états Q.

L'ensemble X est l'ensemble des valeurs de la fonction image digitale.

L'ensemble Q est l'ensemble des valeurs entières représentant les numéros des cellules ou du fond.

Pour le fond, on choisit la valeur 0 qui représente également l'état initial de chaque machine.

L'ensemble Y est l'ensemble des labels des cellules.

Dans un premier temps, nous allons décrire l'algorithme "cell" pour l'exploration d'une bande de NTL champs. Puis nous l'étendrons au cas de plusieurs bandes adjacentes.

Afin de préciser les notions de fonctions successeur et de sortie, on définit chaque m_j sous la forme :

$$(X, Q_j, Y, \delta_j, \alpha_j, a_j, \lambda_j, \beta_j, b_j)$$

où : Q_j est l'ensemble des états rencontrés par la machine m_j.

où : $\delta_j : \prod_{k=1}^{a_j} Q_{\alpha_j(k)} \times X \to Q_j$

est la fonction successeur qui donne l'état de la machine m_j en fonction des a_j états de certaines machines "voisines" de m_j et de la valeur de la fonction image; $\alpha_j : (1, \ldots, a_j) \to (1, \ldots, NCRC)$ étant une fonction énumérant les machines "voisines" de la machine m_j.

où : $\lambda_j : \prod_{k=1}^{b_j} Q_{\beta_j(k)} \to Q_j$

est la fonction de sortie donnant l'état de la machine m_j en fonction des b_j états de certaines machines "voisines" de m_j; $\beta_j : (1, \ldots, b_j) \to (1, \ldots, NCRC)$ étant une fonction énumérant les machines "voisines" de la machine m_j.

Le déroulement de l'algorithme s'effectue avec l'objectif principal suivant :

> Il faut qu'à chaque fin de traitement d'une ligne élémentaire, deux points d'une même cellule dans la partie de l'image déjà traitée, aient leur machine dans le même état.

III. ALGORITHME

3.1 ANALYSE D'UNE BANDE DE NTL CHAMPS DISQUES.

A l'instant initial, on suppose que les machines m_j sont toutes à l'état '0'.

Supposons avoir traité les (n-1) premières lignes élémentaires et que l'on y ait détecté NUMER cellules (où NUMER ϵ IN).

La $N^{ième}$ étape se dércule selon le schéma suivant :

- On transfère la Nième ligne élémentaire dans un tableau ACOUR de dimension NCRC.
- On teste séquentiellement les valeurs ACOUR (J) à l'aide d'un seuil S pour déterminer les points appartenant aux cellules.
  - Si ACOUR (J) $\geq$ S, alors l'état Q_j de la machine m_j est affecté de la valeur 0.
  - Sinon, soit J1 le premier indice tel que :

$$\begin{cases} \text{ACOUR } (J1) < S \\ \text{ACOUR } (J1 - 1) \geq S \end{cases}$$

On détermine alors J2 ($\geq$ J1) tel que :

$$\begin{cases} \text{ACOUR } (J2 + 1) \geq S \\ \text{ACOUR } (K) < S \quad \text{pour } K = J1, \ldots, J2. \end{cases}$$

On a ainsi localisé dans la ligne élémentaire numéro N une suite de points d_∞-consécutifs appartenant à une cellule.

Afin de relier ces points à la partie de l'image déjà explorée, il faut examiner les différents cas :

Cas 1 : Ces points appartiennent-ils à une cellule déjà existante ; c'est-à-dire forment-ils un chemin d_∞-consécutif avec des points déjà explorés dont les machines à l'étape N - 1 sont à un état différent de 0?

Cas 2 : Ces points forment-ils le "début" d'une nouvelle cellule ? Auquel cas les états des machines correspondantes seraient affectés de la valeur label (NUMER + 1).

Cas 3 : Ces points permettent-ils la concaténation de deux ou plusieurs cellules de labels différents ? Auquel cas on devra modifier les états des machines des points concernés afin qu'elles aient la même valeur état.

Pour cela, nous testons les états des machines m_K pour K = J1 - 1, ... J2 + 1 (en raison de la d_∞-consécutivité).

On modifie, à l'aide des fonctions successeurs, les états Q_j des machines m_J, J = J1, ..., J2, comme il est précisé ci-après.

Fonction successeur :

On définit (a_J, α_J) pour J = J1, ..., J2 par :

$$a_J = J2 - J1 + 3$$

$$\alpha_J(r) = J1 + r - 2 \qquad r = 1, \ldots, a_J.$$

Ainsi, pour chaque machine m_j, l'état successeur $Q_J(N)$ sera calculé en fonction de la valeur de la fonction image digitale au point considéré dans la ligne élémentaire, des états $Q_K(N)$ des machines m_K pour K = J1 - 1, ..., J - 1 et des états $Q_K(N-1)$ des machines m_K pour K = J, ..., J2 + 1.

Calcul de $Q_J(N)$:

- Si $Q_{J-1}(N) = 0$, alors :

$Q_J(N) = Q_{\alpha_J(k)}(N-1)$ s'il existe k tel que :

$$\begin{cases} Q_{\alpha_J(\ell)}(N-1) = 0 & 1 \leq \ell < k \\ \text{et} \\ Q_{\alpha_J(k)}(N-1) \neq 0 \end{cases}$$

(C'est le cas 1)

= NUMER + 1 sinon.
(C'est le cas 2).

- Sinon :

. Si $Q_J(N-1) = Q_{J-1}(N)$ ou $Q_J(N-1) = 0$
alors $Q_J(N) = Q_{J-1}(N)$.
(C'est le cas 1).

. Sinon on est dans le cas où $Q_{J-1}(N)$ et $Q_J(N-1)$ sont non nuls et différents.
Alors $Q_J(N) = Q_J(N-1)$.
(C'est le cas 3).

On remarque, à ce niveau de l'algorithme, que les machines m_J ($J = J1, \ldots, J2$), qui correspondent à des points d_∞-consécutifs, sont dans le même état, lorsque l'on se trouve dans les cas 1 ou 2.

Par contre, lorsque l'on est dans le cas 3, on a des machines qui correspondent à des points d_∞-consécutifs et qui ne sont pas dans le même état (figure 1).

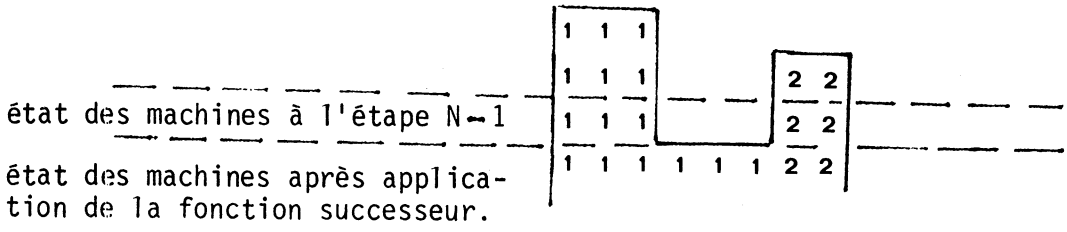


Figure 1 : exemple où, à l'étape N, on a la concaténation de deux ensembles de points d_∞-consécutifs

Le rôle de la fonction de sortie va être de ramener ces machines au même état.

Fonction de sortie :

On désigne par Q_K l'état de la machine m_K, après l'application de la fonction successeur, aux points de coordonnée inférieure ou égale à J2.

On a donc :

$$Q_K = Q_K(N) \qquad \text{pour } K \leq J2$$

$$Q_K = Q_K(N-1) \qquad \text{pour } K > J2$$

On détermine $L \geq J2$ tel que :

$$\forall K \in \{J2, \ldots, L\}$$

on ait $Q_K \neq 0$.

La coordonnée L permet de déterminer les points de l'étape N-1, dont les machines sont dans un état non nul, et qui forment un chemin d_∞-consécutif avec les points de coordonnée J, J = J1, ... J2, de l'étape N.

Le but de la fonction de sortie va être de ramener les différents états rencontrés entre les points de coordonnée J1 et L à un même état qui sera celui de la machine m_{J1}.

Puis il faudra également modifier les états des machines m_K, K = 1, ..., NCRC, dont la valeur a été rencontrée entre les points de coordonnées J1 et L, afin de satisfaire à l'objectif principal.

Donc la fonction de sortie agit sur toutes les machines.

On définit b_K et β_K par :

$$b_K = NCRC \qquad \forall K \in \{1, \ldots, NCRC\}.$$

$$\beta_K(r) = r \qquad r = 1, \ldots, b_K$$

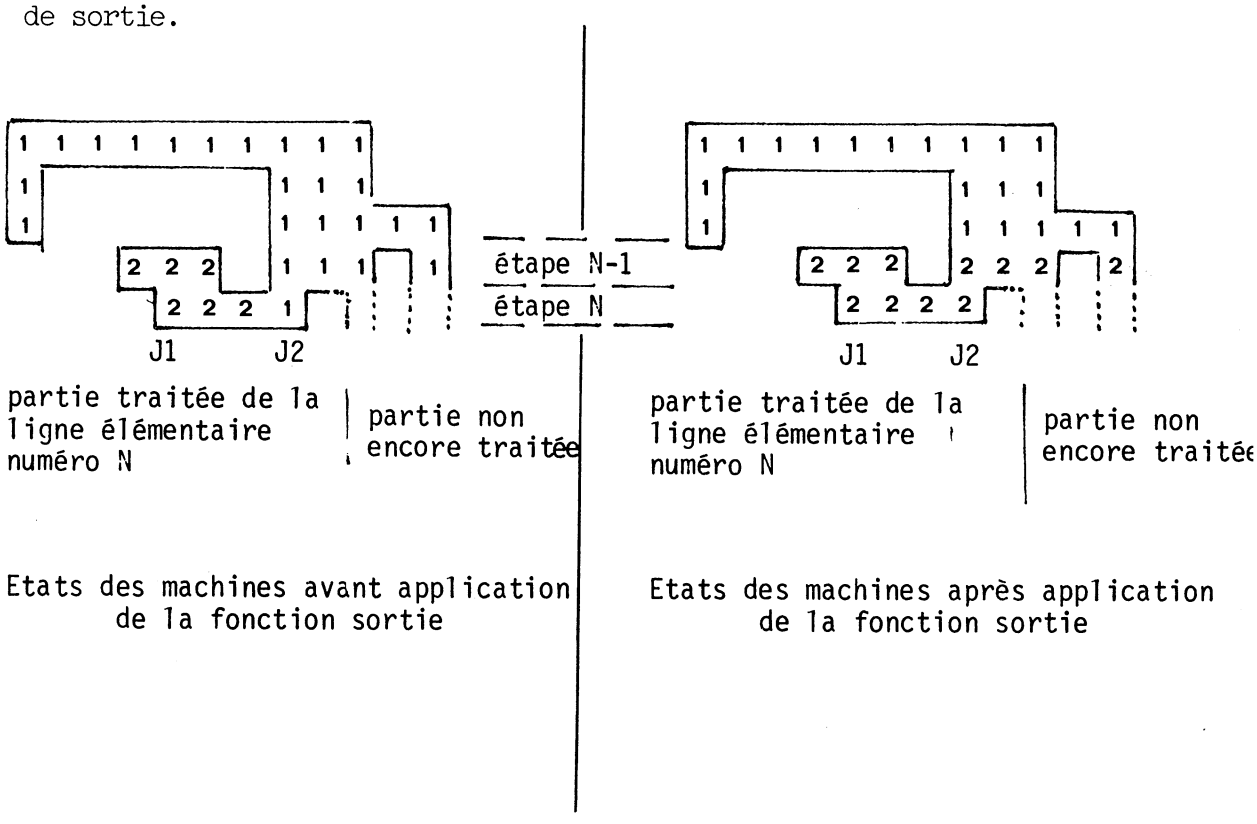
On définit l'état de sortie à l'étape N de la machine m_K par :

$$Q_K(N) = \lambda_K(Q_K) = 0 \quad \text{si } Q_K = 0$$

$$= Q_{J1} \quad \text{s'il existe } h \in \{J1, \ldots, L\} \text{ tel que } Q_h = Q_K.$$

$$= Q_K \text{ sinon.}$$

Nous donnons ci-dessous un exemple d'application de la fonction de sortie.



L'algorithme se poursuit en reprenant le test de la ligne élémentaire ACOUR à partir du point J = J2 + 1.

3.2 INSERTION DU CALCUL D'UN PARAMETRE.

Supposons que nous voulions calculer la valeur d'un paramètre (Param) pour chaque cellule.

Au terme de l'analyse d'une bande, nous désirons obtenir pour chaque cellule explorée :

- son indice I, qui correspond à une valeur d'état
- la valeur du paramètre, PARAM (I).

Pour cela, au cours de l'algorithme précédemment cité, on modifie la valeur PARAM (I) chaque fois que l'état I est sollicité durant l'analyse.

Lorsque deux ensembles de points d_∞-consécutifs, situés dans des états Q_1 et Q_2 différents, se concatènent pour donner un ensemble de points d_∞-consécutifs dans l'état Q_1, on "transpose" la valeur de PARAM (Q2) dans PARAM (Q1) et on réinitialise PARAM (Q2).

Cette transposition peut être une "addition", une comparaison de valeurs ou toute autre opération de R^2 dans R.

3.3 EXTENSION AU CAS DE PLUSIEURS "BANDES" ADJACENTES.

Afin d'effectuer la liaison entre deux "bandes", nous instaurons une liste de (NTL × NLRL) machines m'_I qui permettront de mémoriser les états successifs de la machine m_1 au cours du traitement de la première bande.

L'état de la machine m'_I sera égal à celui de la machine m_1 au terme du traitement de la ligne élémentaire numéro I si on est dans une bande d'ordre impair ; sinon, il sera égal à l'état de la machine m_1 au

terme du traitement de la ligne élémentaire numéro NTL × NLRL - I + 1 (en raison du balayage en lacet).

Nous nous fixons, pour l'algorithme, un objectif analogue à celui du traitement d'une bande :

Il faut qu'au terme de chaque traitement de bandes, les points d'une même cellule dans la partie de l'image déjà traitée aient leur machine dans le même état.

Les états de ces machines m'_I seront modifiés selon les mêmes règles que celles invoquées dans la fonction de sortie pour les machines m_K :

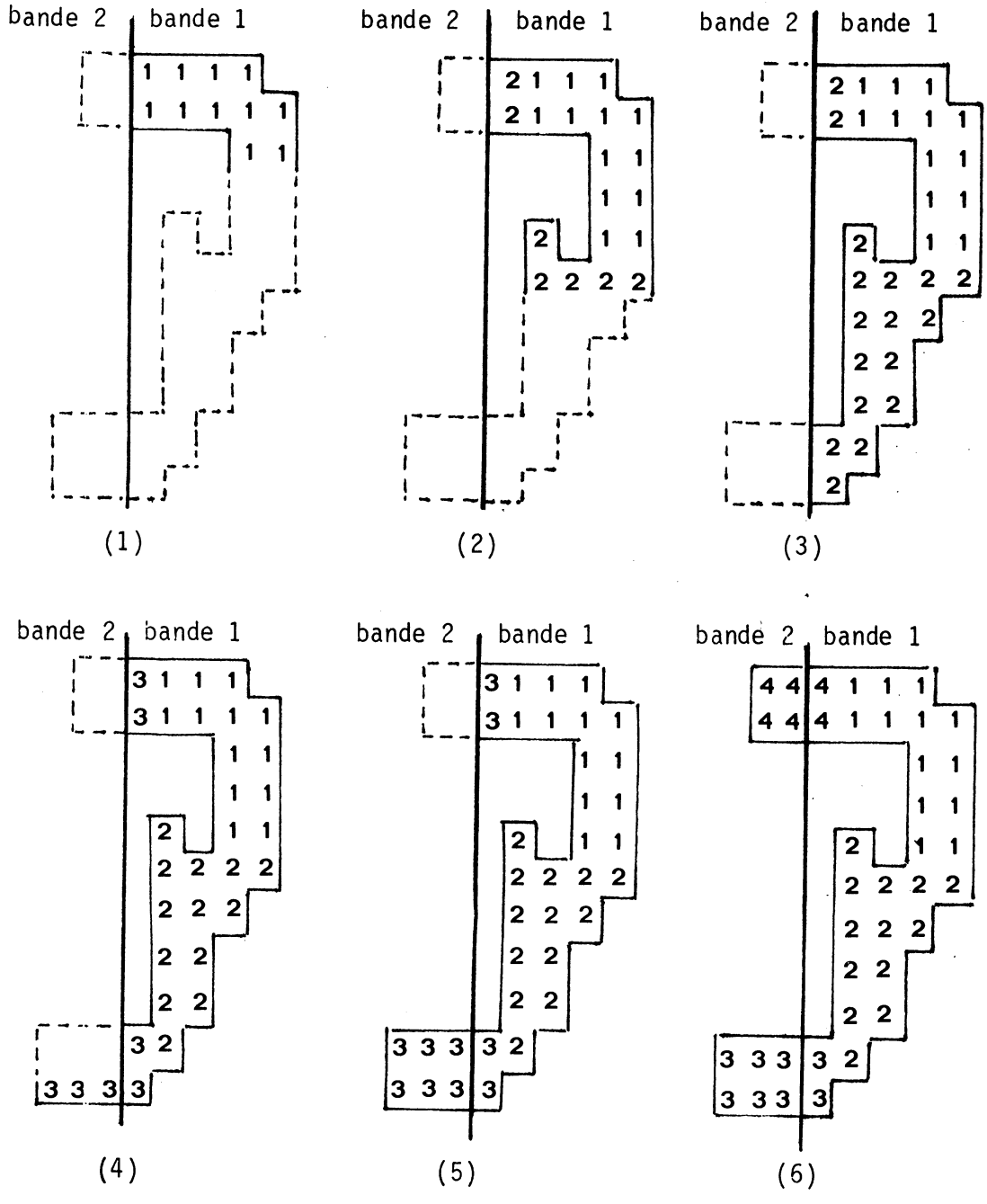
- l'état reste à la valeur 0 s'il est déjà à cette valeur.
- si, au cours de l'étape N de l'analyse d'une bande, on a un cas de concaténation entre des ensembles d'états différents, on teste, dans la partie de l'image déjà explorée (c'est-à-dire I = 1, N pour le cas de bandes aller, sinon I = NTL × NLRL, ..., N pour les bandes retour) s'il existe des machines m'_I dans le même état qu'une machine m_k associée à un point de la ligne N d_∞-consécutif avec le point de coordonnée J1.
  Si tel est le cas, l'état de chacune de ces machines m' prend la valeur de celui de la machine m_{J1}.

Un cas nouveau est celui de la concaténation d'une bande à la suivante. C'est-à-dire, on explore au cours de l'étape M un ensemble de points dont les machines sont à un état Q_2, tels que l'on ait J2 = NCRC et tels que $m'_M = Q'_t \neq 0$.

On effectuera sur les paramètres la même opération que dans les cas d'une concaténation dans une bande.

Puis on affectera à toutes les machines m'_I, qui avaient la même valeur état Q'_t que la machine m'_M, la nouvelle valeur état Q_2.

Nous donnons ci-après un exemple d'évolution des états au cours de l'analyse.



Evolution des états des machines m_K et m'_I au cours de l'exploration d'une figure située dans deux bandes adjacentes

en trait plein : partie déjà explorée.
en pointillé : partie à explorer.

Une telle cellule aura, au terme de l'exploration, l'indice 4.

IV. MISE EN APPLICATION DE CET ALGORITHME.

4.1 VALEURS DE LA FONCTION IMAGE DIGITALE-TRANSMISSION-DENSITE OPTIQUE.

Les valeurs de la fonction image digitale appartiennent à un ensemble de 256 niveaux réels équidistants.

Nous transformons ces valeurs en transmission, ce qui facilite en plus le choix du seuil S d'appartenance à une cellule, que nous prendrons égal à 0,8.

Au niveau de chaque cellule, nous travaillons en Densité Optique pour l'évaluation desparamètres liés à cette variable.

On rappelle que les valeurs photométriques sont amplifiées à l'aide d'un amplificateur linéaire.

$$I_m = I_r \times B + C$$

où

I_m est l'intensité de lumière mesurée,

I_r est l'intensité de lumière réelle,

B et C sont des constantes liées à l'amplificateur.

Dans le cas où le faisceau lumineux ne rencontre aucun élément absorbant sur la lame histologique, on a :

$$I_{fond} = I_0 \times B + C$$

où

I_0 est l'intensité de référence.

Dans le cas où le faisceau est totalement absorbé, on a :

$$I_{noir} = C$$

D'où :

$$I_m = \frac{I_r}{I_0} \times (I_{fond} - I_{noir}) + I_{noir}$$

ou encore :

$$\frac{I_r}{I_0} = \frac{I_m - I_{noir}}{I_{fond} - I_{noir}} = T$$

où T représente la transmission.

La valeur I_{noir} est fixe durant toute l'expérience et est représentée par la valeur minimale de l'ensemble des valeurs digitales, évaluée sur une portion de l'image.

La valeur I_{fond} peut être initialisée en s'imposant le positionnement du premier champ disque sur une zone sans cellules. Elle n'est pas identique en tout point du "fond" en raison des inhomogénéités inévitables de l'éclairage, du verre, de la lame histologique, de la lamelle et du milieu de montage.

Aussi, dans l'algorithme, cette valeur I_{fond} est recalculée pour chaque cellule par un procédé de moyenne sur les valeurs du fond précédant la cellule. Ceci permet une correction plus précise de chaque cellule par rapport au "fond" environnant.

Les valeurs de transmission appartiennent à l'intervalle [0.1, 1.] ; ceci permet pour le calcul de la Densité Optique d'utiliser une approximation de la fonction $\log_{10}$ [3] :

$$DO = \log_{10} \frac{1}{T} \sim - \frac{0,28932 \times T^2 - 0,03633 \times T - 0,25024}{T + 0,15158}$$

On a une précision de 24×10^{-4} qui représente l'erreur absolue sur la transmission.

En figure 2 nous avons un exemple de fonction image digitale en valeur de transmission avant l'étape de calcul des paramètres.

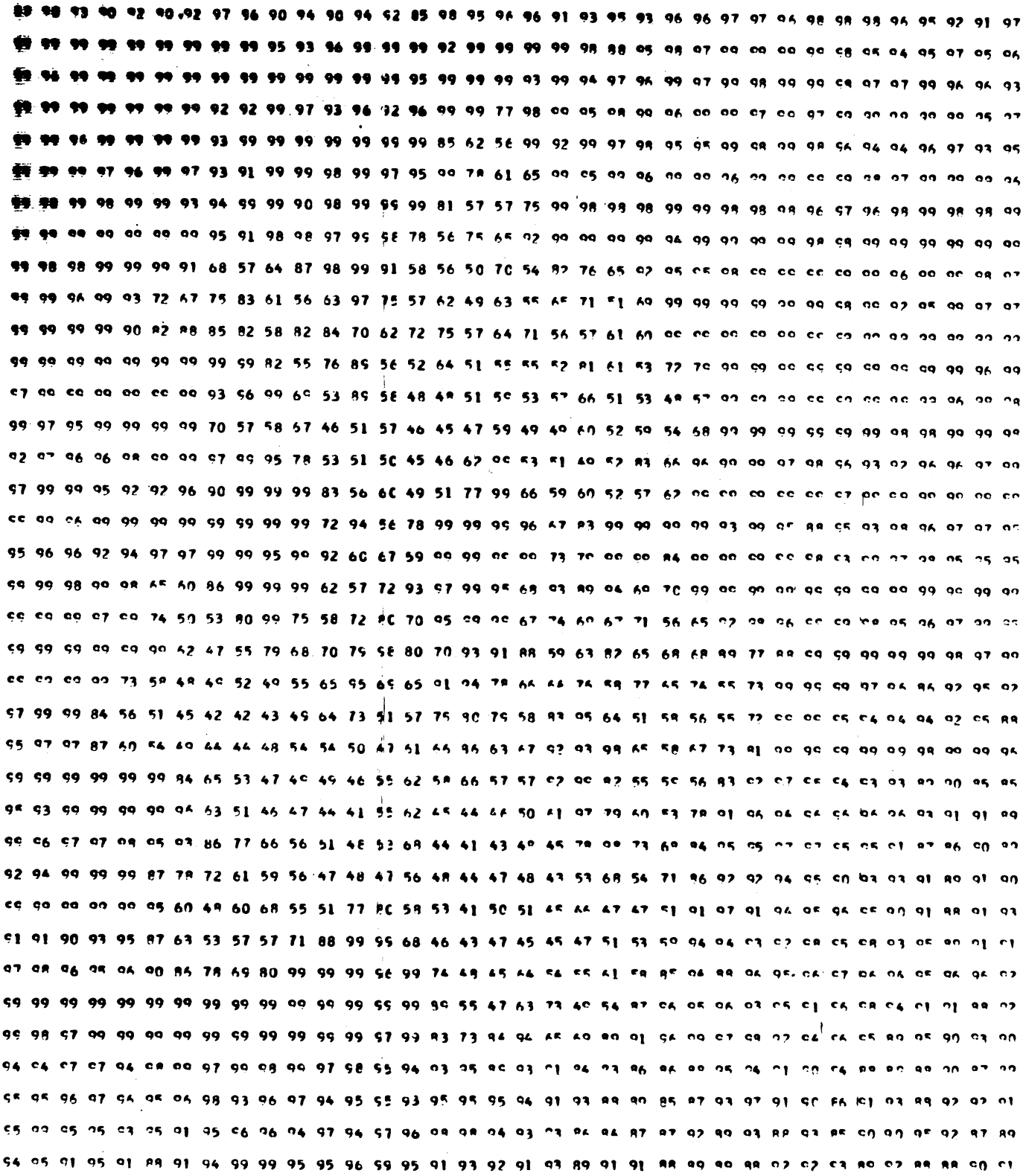


Figure 2 : Représentation d'une image digitale
en transmission

4.2 PARAMETRES EVALUES.

Pour chaque cellule C on évalue les paramètres suivants :

- Densité optique intégrée.
- Surface : c'est-à-dire le nombre de points appartenant à la cellule.
- "périmètre" : il comprend le nombre de points P appartenant à C tels que $V_1(P) \cap c \neq \emptyset$.
- D.O. maximale qui correspond à la transmission minimale.
- D.O. minimale évaluée sur toute la cellule excepté les points concernés par le calcul du périmètre où la transmission maximale peut être faussée en raison du chevauchement du diaphragme-trou avec le bord de la cellule.

V. RESULTATS.

Les valeurs données sont relatives à un échantillon d'une population de cellules nerveuses embryonnaires du télencéphale de l'Amphibien Urodèle Pleurodeles Waltlii Michah. Les paramètres de la prolifération de ces cellules ont été étudiés notamment par les méthodes autoradiographiques [4], [5]. Afin d'être soumis à l'analyse automatique, le télencéphale d'embryon au state 34 [6] a été prélevé, fixé dans le liquide de SMITH, puis écrasé entre lame et lamelle. Les préparations obtenues ont été colorées par le réactif de FEULGEN (45 mn, 20 ° c) après une hydrolyse dans HCL 6N (60 mn, 20° c), puis montées dans l'Euparal (n = 1,535).

5.1 VALIDITE DE L'ALGORITHME SUR UN EXEMPLE DE 12 CHAMPS.

Nous avons, en figure 3, une représentation d'une image digitale composée de 12 champs, à l'aide de symboles de transmission distribués selon l'échelle ci-dessous :

valeur	symbole
0,9 <	
0,8 < ≤ 0,9	.
0,7 < ≤ 0,8	+
0,6 < ≤ 0,7	×
0,5 < ≤ 0,6	▪
0,4 < ≤ 0,5	●
0,3 < ≤ 0,4	▪
0,2 < ≤ 0,3	●
≤ 0,2	●

Une telle figure est établie, sans mémorisation de l'image entière, en utilisant un traceur Benson.

Outre les numéros des champs, les valeurs numériques présentées sur cette figure sont les valeurs d'états des machines à la détection des cellules.

Les valeurs entourées sont les labels définitifs affectés à chaque cellule, tels qu'ils sont donnés en résultat de l'activation de l'algorithme "Cell", accompagnés des paramètres précédemment cités.

LABEL	D.O. INTEGREE	SURFACE	PERIMETRE	D.O. MAX	D.O. MIN.
4	67.72	263	63	.374	.106
7	88.96	421	133	.365	.100
8	40.44	184	60	.318	.153
9	43.06	155	44	.380	.176
14	139.87	557	184	.407	.100

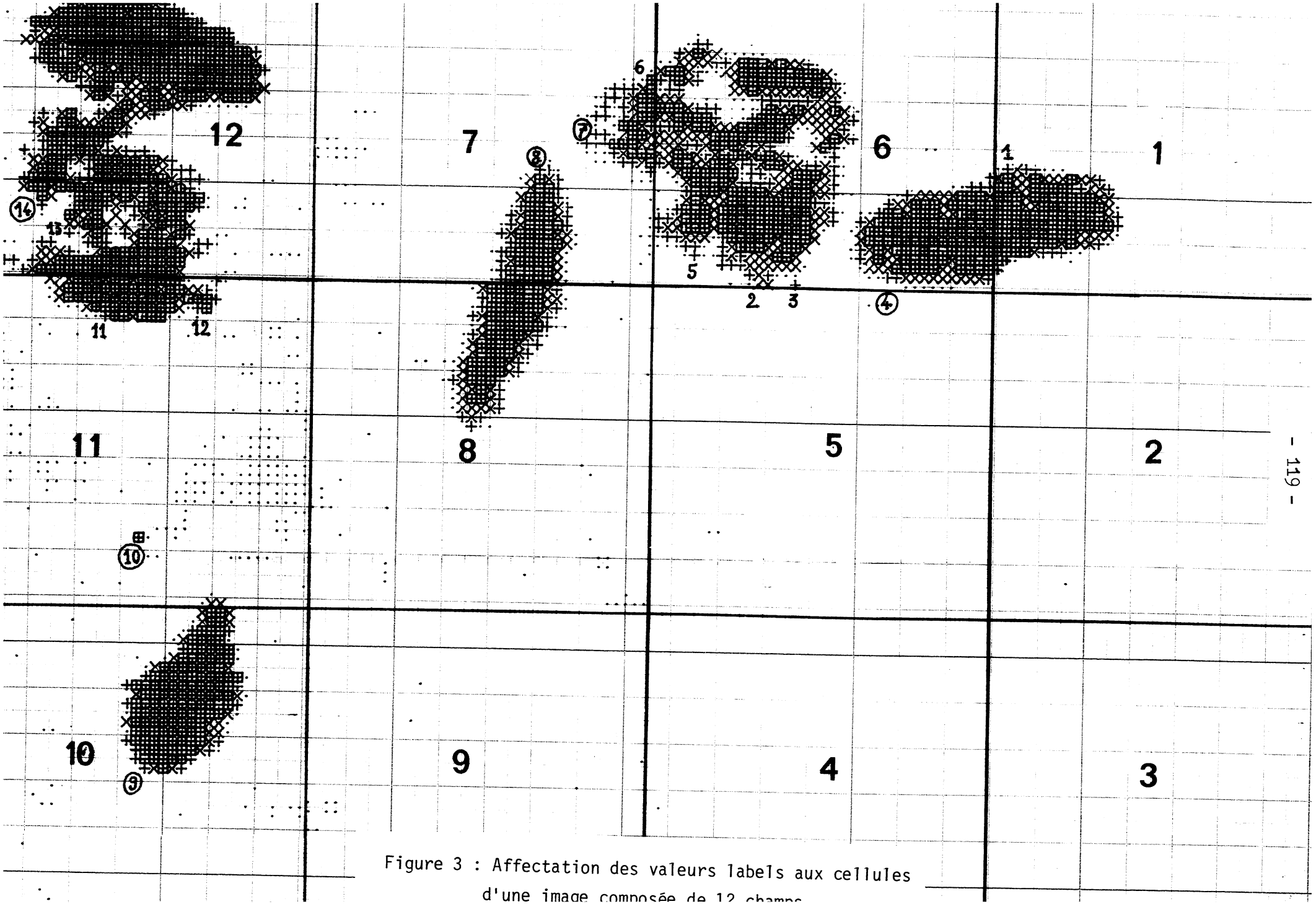


Figure 3 : Affectation des valeurs labels aux cellules d'une image composée de 12 champs

5.2 ANALYSE D'UNE PORTION DE LAME PAR L'ALGORITHME "CELL" ET LA METHODE DES DEUX LONGUEURS D'ONDE.

La méthode des deux longueurs d'onde est une méthode photométrique permettant de mesurer pour chaque cellule la densité optique intégrée [7].

Dans ce paragraphe, nous comparons les valeurs de densité optique intégrée données par l'algorithme "cell" et celles mesurées avec cette méthode photométrique sur une image dont le support est composé de 36 champs disques.

Afin d'illustrer cette comparaison, nous donnons en figure 4a une photo d'une portion de lame comprenant le support de l'image analysée. En figure 4b, nous avons la représentation Benson des 24 premiers champs de l'image analysée (Sur cette représentation Benson, outre les cellules, nous avons inclus des points de symbole + afin de justifier de la reconstitution géométrique correcte de l'image).

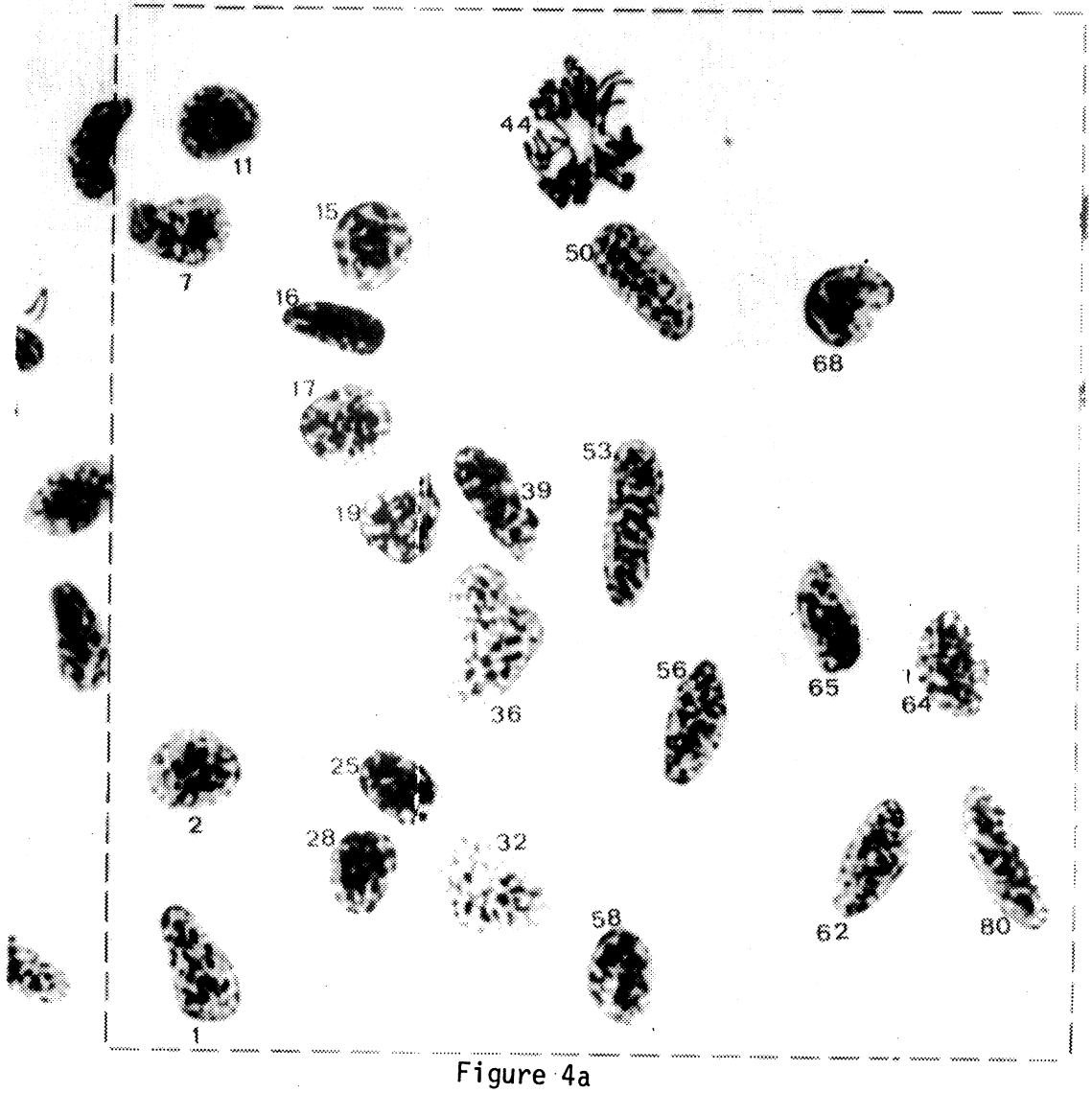


Figure 4a

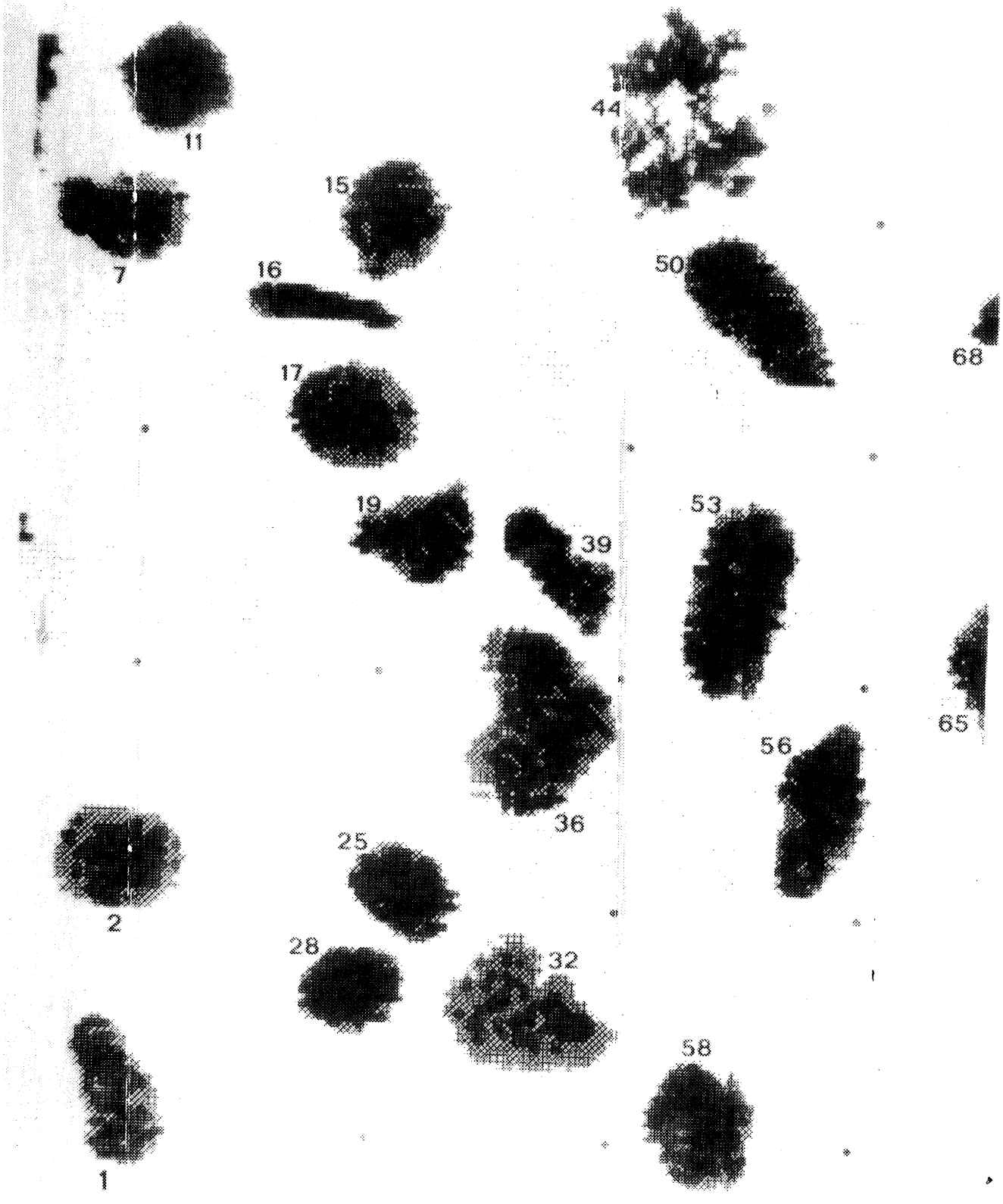


Figure 4b

Sur chacune de ces figures, nous avons rapporté pour chaque cellule analysée la valeur label donnée par l'algorithme "cell".

En figure 5, nous donnons pour chaque cellule sa valeur label, la mesure obtenue par la méthode des deux longueurs d'onde (A), la mesure donnée par l'algorithme "cell" (B), le rapport de ces deux qunatités et l'erreur relative de ce rapport donnée par :

$$\frac{A/B - \text{moyenne } (A/B)}{A/B}$$

LABEL	A	B	A/B	Δ%	LABEL	A	B	A/B	Δ%
1	137	48,56	2,821	-1,66	39	133	45,35	2,932	2,18
2	151	53,45	2,825	-1,52	44	221	77,78	2,841	-0,95
7	138	48,82	2,827	-1,45	50	226	70,51	3,205	10,51
11	152	53,72	2,829	-1,37	53	251	88,80	2,826	-1,48
15	126	44,43	2,835	-1,16	56	170	60,29	2,819	-1,73
17	157	54,18	2,897	1,00	58	174	61,55	2,827	-1,45
19	146	46,1	3,167	9,42	62	136	47,99	2,834	-1,19
25	124	43,87	2,826	-1,48	64	112	38,85	2,883	0,52
28	126	44,59	2,825	-1,52	65	147	52,42	2,804	-2,2
32	164	61,5	2,663	-7,72	68	153	52,90	2,892	0,82
36	267	92,08	2,899	-1,06	80	214	75,48	2,835	-1,16

Moyenne A/B = 2,868

Figure 5 : Tableau de comparaison entre les mesures de masse de produit absorbant données par la méthode des deux longueurs d'onde et les mesures de densité optique données par l'algorithme "cell".

Ces résultats nous prouvent que la différence entre les mesures est indépendante de la densité optique et qu'en outre le procédé d'exploration à l'aide du disque de Nipkow est satisfaisant, ainsi que l'algorithme "cell" d'analyse des différents champs, ne nécessitant pas un prétraitement de reconstitution.

5.3 PARAMETRES DE DIFFERENCIATION DES PHASES.

5.3.1 Courbure et contraste.

En plus des paramètres obtenus avec l'algorithme "cell", nous introduisons pour chaque cellule deux indices :

- "courbure" = (Périmètre)^2/ Surface.

  Cet indice a été employé pour la différenciation des cellules du sang [8] et nous permet une nette différenciation des cellules à contour dentelé telles que les mitoses.

- "contraste" = Densité Optique Maximale / Densité Optique Minimale.

  Cet indice est d'autant plus élevé que l'hétérogéneité de répartition de la chromatine d'une cellule est plus grande. Ce qui est le cas des cellules en phase G2 et en phase mitotique.

5.3.2 Diagnostic établi sur 109 cellules.

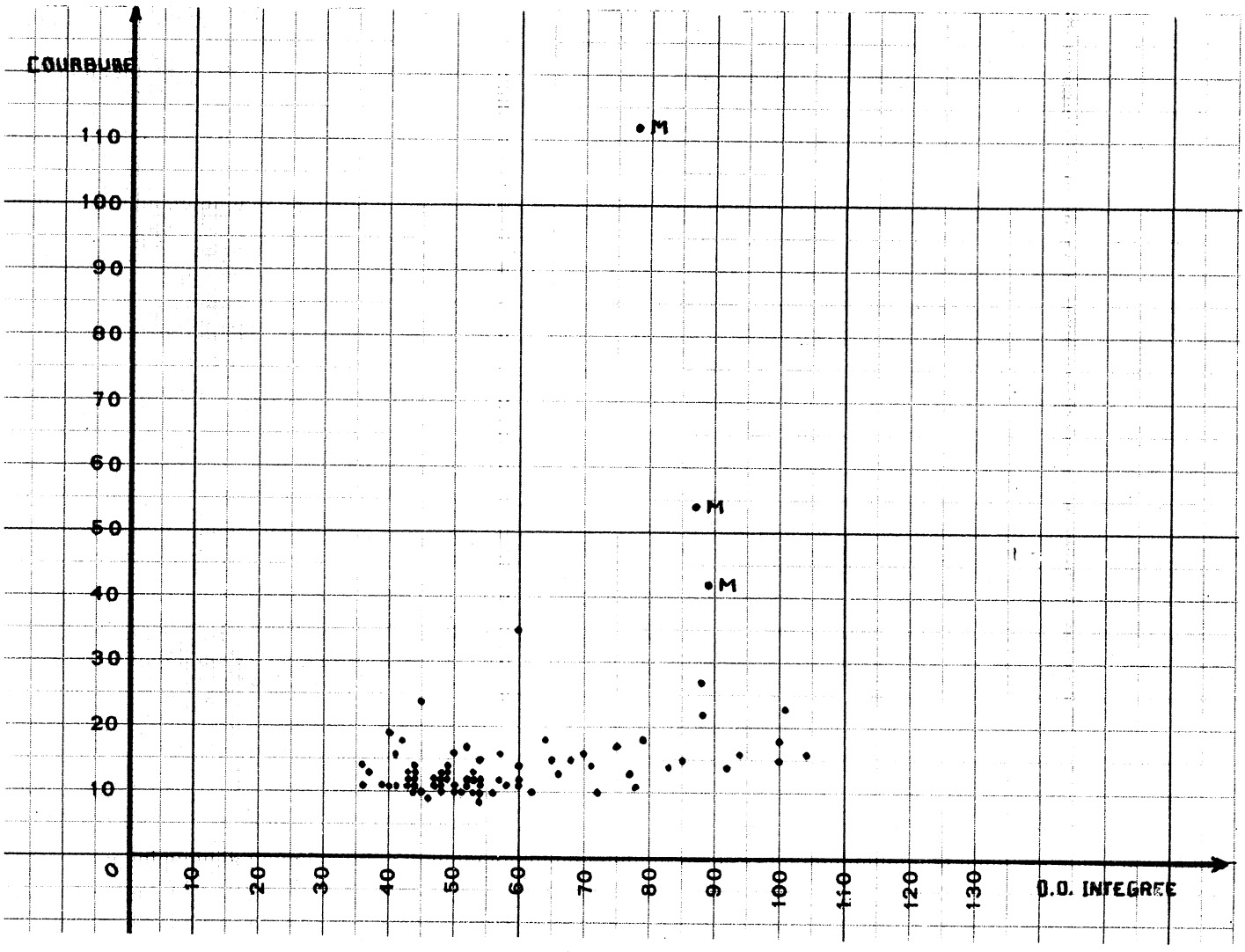
Nous donnons en figure 6 la liste des paramètres évalués sur 109 cellules et le diagnostic de phase.

Ce diagnostic a été établi selon les règles suivantes :

D.O. intégrée $\leq$ 35	cellule incomplète
D.O. intégrée $\geq$ 70 et courbure $\geq$ 40	mitose
35 < D.O. intégrée $\leq$ 55	
contraste < 3	phase G0
contraste $\geq$ 3	phase G1

55 < D.O. intégrée ≤ 80	phase S
80 < D.O. intégrée ≤ 90	
contraste > 3	prophase G2
contraste ≤ 3	phase S
90 < D.O. intégrée ≤ 130	
contraste ≤ 3	phase G2
contraste > 3	prophase G2
D.O. intégrée > 130	cellule accolées

Ainsi qu'on peut le remarquer sur la figure 7, représentant la distribution des cellules en fonction de leur D.O. intégrée et de leur courbure, on a une caractérisation précise des mitoses.



5.4. PERFORMANCES DE L'ALGORITHME CELL.

Outre l'avantage principal de cet algorithme dans la non nécessité de stocker les valeurs de toute l'image en mémoire centrale, nous attirons l'attention sur le coût de l'exécution en secondes d'unité centrale d'un calculateur du type IBM 360/67.

nombre de champs analysés	temps d'exécution en secondes
1	1,8
4	5
24	27
28	31
36	40
72	72

VI. DISCUSSION

Les résultats énumérés ci-dessus ne sont certes pas suffisants en quantité pour effectuer une évaluation d'un indice mitotique, bien que le bilan donné en figure 6 ne soit pas en désaccord avec les paramètres de la prolifération cellulaire dont il est question.

Cette analyse automatique nous a cependant permis de reconstituer le schéma du cycle cellulaire, tel qu'il avait été présenté au chapitre I, en utilisant les paramètres de D.O. intégrée et de contraste (figure 8)

En plus de l'avantage, pour cet algorithme, de la possibilité d'analyser des images possédant de très grands supports, nous retenons celui du calcul de paramètres morphologiques et photométriques.

% INTEGREE	SURFACE	D.O. MOYENNE	PERIMETRE	COURBURE	D. O. MAX	D.O. MIN	CONTRASTE	DIAGNOSTIC
87.66	361	.241	140	54.0	.391	.099	3.95	METAPHASE MITOSE
92.63	178	.296	48	12.0	.383	.161	2.38	G0
88.35	173	.264	46	11.0	.405	.137	2.96	G0
13.66	73							CELLULE INCOMPLETE
87.45	154	.238	41	10.0	.394	.205	1.92	G0
78.36	277	.286	71	18.0	.387	.126	3.07	S
83.78	176	.273	44	10.0	.359	.196	1.93	G0
99.06	289	.287	48	11.0	.392	.148	2.65	S
93.90	227	.319	49	10.0	.411	.161	2.55	S
92.07	271	.307	63	14.0	.399	.184	2.17	S
219.94	1167							CELLULES ACCOLEES
15.29	65							CELLULE INCOMPLETE
40.66	144	.278	40	11.0	.393	.103	3.82	PHASE G1
85.20	294	.290	67	15.0	.409	.173	2.36	S
160.46	604							CELLULES ACCOLEES
28.86	95							CELLULE INCOMPLETE
50.12	186	.269	44	10.0	.392	.120	3.27	PHASE G1
64.69	241	.268	62	15.0	.362	.147	2.46	S
57.50	216	.264	53	12.0	.383	.132	2.90	S
56.91	196	.291	47	11.0	.384	.101	3.80	PHASE G1
44.09	178	.248	45	11.0	.344	.101	3.41	PHASE G1
53.82	199	.270	49	12.0	.392	.132	2.97	G0
66.00	264	.247	61	13.0	.387	.131	2.95	S
41.50	155	.268	51	16.0	.365	.157	2.32	G0
54.32	196	.277	48	11.0	.382	.115	3.32	PHASE G1
41.53	160	.260	43	11.0	.375	.155	2.42	G0
56.83	196	.290	56	16.0	.383	.189	2.03	S
41.47	143	.291	51	18.0	.401	.181	2.22	G0
53.96	239	.235	52	11.0	.365	.121	3.02	PHASE G1
8.70	30							CELLULE INCOMPLETE
43.32	161	.269	44	12.0	.366	.179	2.04	G0
36.40	134	.268	40	11.0	.406	.149	2.72	G0
47.32	182	.246	47	11.0	.348	.134	2.60	G0
28.45	106							CELLULE INCOMPLETE
48.25	181	.267	49	13.0	.379	.131	2.89	G0
44.11	153	.288	45	13.0	.384	.193	1.99	G0
48.29	181	.267	46	11.0	.372	.138	2.70	G0
43.56	158	.276	46	13.0	.404	.196	2.06	G0
70.66	245	.287	59	14.0	.389	.169	2.30	S
45.40	154	.298	39	9.0	.392	.141	2.78	G0
53.75	193	.278	46	10.0	.399	.155	2.57	G0
50.21	191	.263	47	11.0	.367	.111	3.31	PHASE G1
53.73	194	.277	55	15.0	.392	.169	2.32	G0
35.56	145	.245	46	14.0	.350	.140	2.50	G0
51.67	238	.217	52	11.0	.358	.107	3.35	PHASE G1
88.44	325	.272	95	27.0	.381	.165	2.31	S
56.20	222	.253	49	10.0	.376	.165	2.28	S
6.47	27							CELLULE INCOMPLETE
73.36	264	.297	56	11.0	.388	.181	2.14	S
22.82	74							CELLULE INCOMPLETE
5.33	23							CELLULE INCOMPLETE
76.62	264	.289	60	13.0	.384	.119	3.23	S
116.41	414							CELLULES ACCOLEES

[illegible]	! 154	! .239	! 46	! 13.0	! .355	! .126	! 2.82	!!	CELLULES ACCOLEES
100.87	! 335	! .301	! 89	! 23.0	! .401	! .149	! 2.69	!!	G0
50.69	! 210	! .240	! 59	! 16.0	! .377	! .107	! 3.52	!!	G2
59.59	! 243	! .245	! 53	! 11.0	! .343	! .131	! 2.62	!!	PHASE G1
100.26	! 322	! .311	! 65	! 13.0	! .403	! .163	! 2.47	!!	S
47.15	! 191	! .247	! 46	! 11.0	! .372	! .128	! 2.91	!!	G2
94.51	! 322	! .294	! 73	! 16.0	! .394	! .149	! 2.64	!!	G0
99.87	! 366	! .272	! 76	! 15.0	! .391	! .123	! 3.18	!!	G2
210.56	! 782	!							PROPHASE G2
51.27	! 177	! .296	! 44	! 10.0	! .400	! .147	! 2.72	!!	CELLULES ACCOLEES
67.72	! 263	! .257	! 63	! 15.0	! .374	! .106	! 3.53	!!	G0
89.36	! 421	! .211	! 133	! 42.0	! .365	! .100	! 3.65	!!	S
40.44	! 184	! .220	! 60	! 19.0	! .318	! .153	! 2.08	!!	METAPHASE MITOSE
43.06	! 155	! .278	! 44	! 12.0	! .380	! .176	! 2.16	!!	G0
139.97	! 557	!							G0
49.56	! 211	! .230	! 52	! 12.0	! .339	! .102	! 3.32	!!	CELLULES ACCOLEES
53.45	! 238	! .225	! 51	! 10.0	! .340	! .108	! 3.15	!!	PHASE G1
3.10	! 13	!							PHASE G1
48.82	! 200	! .244	! 53	! 14.0	! .379	! .126	! 3.01	!!	CELLULE INCOMPLETE
53.72	! 207	! .260	! 45	! 9.0	! .347	! .167	! 2.08	!!	PHASE G1
7.41	! 27	!							G0
44.43	! 210	! .212	! 54	! 13.0	! .360	! .125	! 2.88	!!	CELLULE INCOMPLETE
23.02	! 79	!							G0
54.19	! 232	! .234	! 49	! 10.0	! .344	! .121	! 2.84	!!	CELLULE INCOMPLETE
44.43	! 185	! .240	! 49	! 12.0	! .343	! .145	! 2.37	!!	G0
43.87	! 168	! .261	! 42	! 10.0	! .376	! .129	! 2.91	!!	G0
44.56	! 160	! .279	! 43	! 11.0	! .372	! .175	! 2.13	!!	G0
64.53	! 342	! .189	! 79	! 18.0	! .344	! .107	! 3.21	!!	G0
92.09	! 414	! .222	! 74	! 14.0	! .357	! .113	! 3.16	!!	S
45.35	! 183	! .248	! 67	! 24.0	! .351	! .137	! 2.56	!!	PROPHASE G2
77.74	! 340	! .229	! 196	! 112.0	! .361	! .104	! 3.47	!!	G0
70.51	! 285	! .247	! 58	! 16.0	! .364	! .133	! 2.74	!!	METAPHASE MITOSE
88.80	! 348	! .255	! 88	! 22.0	! .363	! .131	! 2.77	!!	S
60.20	! 250	! .241	! 60	! 14.0	! .361	! .112	! 3.22	!!	S
61.55	! 240	! .256	! 49	! 10.0	! .369	! .134	! 2.75	!!	S
47.60	! 207	! .232	! 52	! 13.0	! .336	! .131	! 2.56	!!	G0
35.05	! 163	! .238	! 43	! 11.0	! .350	! .158	! 2.22	!!	G0
59.42	! 205	! .256	! 60	! 17.0	! .379	! .145	! 2.61	!!	G0
52.90	! 209	! .254	! 51	! 12.0	! .365	! .126	! 2.90	!!	G0
15.27	! 56	!							CELLULE INCOMPLETE
47.80	! 190	! .252	! 48	! 12.0	! .359	! .143	! 2.51	!!	G0
60.08	! 314	! .189	! 106	! 35.0	! .335	! .103	! 3.25	!!	S
75.48	! 323	! .234	! 75	! 17.0	! .345	! .124	! 2.78	!!	S

[illegible]

[illegible] DE CELLULES = 91
NOMBRE DE CELLULES EN MITOSE = 3
NOMBRE DE CELLULES EN PHASE G0 = 36
NOMBRE DE CELLULES EN PHASE G1 = 12
NOMBRE DE CELLULES EN PHASE S = 24
NOMBRE DE CELLULES EN PROPHASE G2 = 2
NOMBRE DE CELLULES EN PHASE G2 = 4

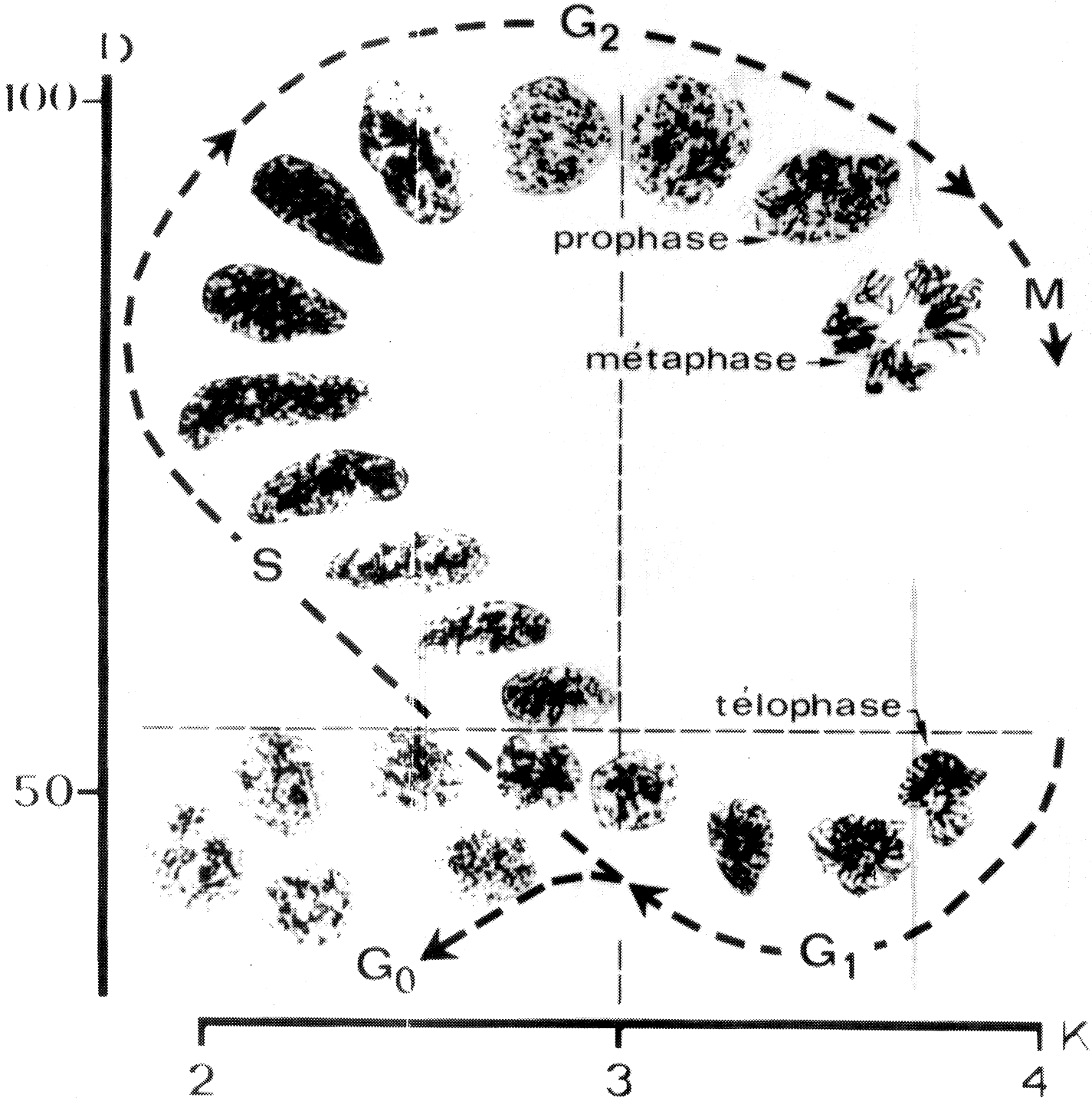


Figure 8 : Représentation du cycle cellulaire.

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

(1) GOLD, B. ; RADER, C.M. : Digital processing of signals. Lincoln Laboratory Publications. Mac Graw-Hill (1969).

(2) HU, J.V., , RABINER, L. : Design techniques for two-dimensional Digital filters. IEEE Trans. on audio and electroacoustics, vol. AU20, 4,(oct. 1972).

(3) FREEMAN, H. : Computer processing of line drawing image. Computing Surveys 6 (1) (march 1974) 57-97.

(4) GRASSELLI, A. : Automatic interpretation and classification of images. Academic Press, New-York (1969).

(5) PRATT, W. : Generalized Wiener filtering computation techniques. IEEE Trans. on computers, C21, 7, (july 1972) 636-641.

(6) BEAUCHAMP, K.G. : Walsh functions and their applications. Academic Press, New-York (1975).

(7) AHMED, N. RAO, K.R. : Orthogonal transforms for Digital Signal Processing. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, (1975).

(8) SERRA, J. : L'analyseur de textures. Sciences de la terre 16, n° 3 et 4, (1971) 275-289.

(9) LIPKIN, L.E., WATT, W.C., RUSSEL, A.K. : The Analysis, synthesis, and description of biological images. Annals of New-York Academ. of Sciences, 128, (1966) 984-1012.

(10) MENDELSOHN, M.L. and al : Computer oriented analysis of human chromosomes. Deoxyribonucleic acid based centromeric index. J. of Histochem and cytochem., 22, 7, (1974) 554-560.

(11) WIED, G.L. BARTELS, P.H., BAHR, G.F., OLDFIELD, D.G. : Taxonomic Intra Cellular Analytic System. (TICAS) for cell identification. Acta cytologica 12 (3), (1968) 180-204.

(12) MONTANARI, U. : Continuous skeletons from digitized images. J. of the A.C.M. 16, 4, (1969) 534-549.

(13) CASTAN, S. NABONNE, A. : Un algorithme de squelettisation opérant par tests locaux sur une suite de voisinagessuccessifs. Colloque National sur le traitement du signal. NICE, (16-20 juin 1975).

(14) HUNT, B.R. : Digital Image processing. Proc. of the IEEE, 63, 4, (april 1975).

(15) SONDHI, M.M. : Image restoration. Proc. of the IEEE, 60, 7 (july 1972), 842-853.

Chapitre I

(1) MITCHISON, J.M. - The biology of the cell cycle. Cambridge University Press (1971)

(2) VENDRELY, C. - La cinétique de la prolifération cellulaire. Cytophotométrie. INSERM, 67-79 (1971)

(3) SAWYER, H.S. et BOSTROM, R.C. - A new Nipkow disk scanner for accurate cytological measurements. IRE, Nat. Convention Re, 37-41 (1958)

(4) MENDELSOHN, M.L. et MAYALL, B.H. - Deoxyribonucleic acid cytophotometry of stained human leucocytes. II. The mechanical scanner of CYDAC, the theory of scanning photometry and the magnitude of residual errors. J. Histochem.- Cytochem. 18 (6) 383-407 (1970)

Chapitre II

(1) BRUGAL, G., BOUTTAZ, R. et CHASSERY, J.M. - Le S.A.M.B. : un nouveau système d'acquisition de l'image donnée par un microscope pour l'analyse morphométrique et densitométrique. Automatisme (1976) (sous presse)

(2) BOUTTAZ, R. et DROUET, Ph. - Commande de platines micrométriques de microscope. Mathématiques Appliquées et informatique, Formation permanente, Grenoble.

Chapitre III

(1) WIED, G. et BAHR, G. - Introduction to quantitative cytochemistry. Academic Press, New York and London. 1970

(2) HUNT, B.R. - Digital image processing. Proc. of the IEEE, 63, 4, April 1975

(3) ZAANEN, A.C. - Integration. North-holland publishing company. Amsterdam 1967

(4) GOODMAN - Introduction to Fourier optics, ch. 6. Mac Graw Hill. New York 1968

(5) MAX, J. - Traitement du signal (tome I). Masson and Cie. 1972

(6) OPPENHEIM, A.V. et SCHAFER, R.W. - Digital signal processing. Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, New Jersey 1975

(7) ROSENFELD, A. - Picture processing by computer. Computer Science and Applied Mathematics. Academic Press, New York 1969

(8) MERSEREAU, R.M. et DUDGEON, D.E. - Two-Dimensional Digital Filtering. Proceedings of the IEEE, vol. 63, 4, April 1975

(9) JURY, E.I. - Theory and application of the z-transform method. John Wiley and Sons. INC. New York 1964

(10) EL MALLAWANY, I. - Le filtrage numérique. Annales des télécommunications, t. 24, n° 3-4. 1969

(11) WOLF, J. - Analyse numérique de quelques problèmes liés au traitement de signaux. Thèse - Grenoble 1974

(12) COOLEY, J.W. et TUKEY, J.W. - An algorithm for the Machine. Computation of complex Fourier Series, Math. Comput., 19, p. 297-301. April 1965

(13) SINGLETON, R.C. - On computing of the Fast Fourier Transform. Comm.A.C.M., vol. 10, 10, oct. 1967

(14) HUNT, B.R. - Computational considerations in digital image enhancement. Proc. two dimensional digital signal processing conference. Columbia, Missouri. October 1971

(15) ROUSSEL, A. et SIMON, A. - Filtrage des fréquences spatiales en éclairage incohérent : application à l'amplification des contrastes. Physique dans l'industrie. DUBLIN 11-13. Mars 1976

(16) KOVASNAY, L.S.G. et JOSEPH, H.M. - Image Processing. Proc. IRE 43, 560-570 (May 1955)

Chapitre IV

(1) ROSENFELD, A. - Connectivity in digital Pictures. J. ACM 17, 1, 146-160, (Jan. 1970)

(2) MYLOPOULOS, J.P. et PAVLIDIS, T. - On the topological properties of quantized spaces.
I. The notion of dimension. J. ACM 18, 2, 239-246 (Apr. 1971)
II. Connectivity and order of connectivity. J. ACM 18, 2, 247-254 (Apr. 1971)

(3) ROSENFELD, A. - Arcs and Curves in Digital Pictures. J. ACM 20, 1, 81-87, (Janvier 1973)

(4) Solution to Problem 5712. Amer. Math. Mon. 77, 12, 1119, (Dec. 1970)

Chapitre V

(1) FREEMAN, H. - On the encoding of Arbitrary Geometric Configurations. IRE Trans- on elect. comp. EC 10 (2). 260-268 (June 1961)

(2) ROSENFELD, A. - Picture Processing by computer. Computer Science and Applied Mathematics. Academic Press (1969)

(3) MONTANARI, U. - A note on minimal length polygon approximation. Comm. ACM 13 (1), 41-47 (January 1970)

(4) LEDLEY, R.S. - Analysis of cells. IEEE Trans- on computers. 740-753 (July 1972).

(5) FREEMAN, H. - Computer processing of line-drawing images. Computing Surveys. 6 (1), 57-97 (March 1974)

(6) GRASSELLI, A. et FREEMAN, H. - A review of relevant problems in the processing of line-drawing data. Automatic interpretation and classification of images. Chap. 7, Academic Press, New York (1974)

Chapitre VI

(1) EILENBERG, S. - Automata, Languages and machines (vol. A), Academic Press, New York (1974)

(2) SELKOW, S.M. - One pass complexity of digital picture properties. J. ACM 19, 2, 283-295 (Apr. 1972)

(3) HART, J.F. et CHENEY, E.W. - Computer Approximations. John Wiley and sons, INC, New York (1968)

(4) CHIBON, P. - Etude au moyen de la Thymidine tritiée de la durée des cycles mitotiques dans la jeune larve de Pleurodeles waltlii Michah. (Amphibien, Urodèle). C.R. Acad. Sci. Paris, 267, 203-205 (1968)

(5) BRUGAL, G. - Relations entre la prolifération et la différenciation cellulaires : étude autoradiographique chez les embryons et les jeunes larves de Pleurodeles waltlii Michah. (Amphibien, Urodèle). Develop. Biol. 24, 301-321 (1971)

(6) GALLIEN, L. et DUROCHER, M. - Table chronologique du développement de Pleurodeles waltlii. Bull. Biol. Fr. et Belg. 91, 97-114 (1957)

(7) RASCH, E.M. et RASCH, R.W. - Special application of two-wavelength cytophotometry in biologie systems. Introduction. Quant. cytochem II. WIED, G.L. and BAHR, G.F. Academic Press, p. 297-333. 1970

(8) BACUS, J.W. et GOSE, E.E. - IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics SMC-2, N° 4 (Sept. 1972)