



HAL
open science

Correction et traitement d'images des circuits VLSI issues d'un microscope électronique à balayage

Alireza Zolghadrasli

► **To cite this version:**

Alireza Zolghadrasli. Correction et traitement d'images des circuits VLSI issues d'un microscope électronique à balayage. Modélisation et simulation. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1985. Français. NNT : . tel-00315579

HAL Id: tel-00315579

<https://theses.hal.science/tel-00315579>

Submitted on 29 Aug 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

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR-INGENIEUR

par

ZOLGHADRASLI ALIREZA

*
* * *

CORRECTION ET TRAITEMENT D'IMAGES DES CIRCUITS VLSI
ISSUES D'UN MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

*
* * *

soutenue le 22 Avril 1985 devant la Commission d'Examen.

JURY

Monsieur G. VEILLON

PRESIDENT

Messieurs F. ANCEAU)

E. MACKOWIAK)

B. COURTOIS)

J. LAURENT)

EXAMINATEURS



INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

Année universitaire 1982-1983

Président de l'Université : D. BLOCH

Vice-Président : René CARRE

Hervé CHERADAME

Marcel IVANES

PROFESSEURS DES UNIVERSITES :

ANCEAU François	E.N.S.I.M.A.G.
BARRAUD Alain	E.N.S.I.E.G.
BAUDELET Bernard	E.N.S.I.E.G.
BESSON Jean	E.N.S.E.E.G.
BLIMAN Samuel	E.N.S.E.R.G.
BLOCH Daniel	E.N.S.I.E.G.
BOIS Philippe	E.N.S.H.G.
BONNETAIN Lucien	E.N.S.E.E.G.
BONNIER Etienne	E.N.S.E.E.G.
BOUVARD Maurice	E.N.S.H.G.
BRISSONNEAU Pierre	E.N.S.I.E.G.
BUYLE BODIN Maurice	E.N.S.E.R.G.
CAVAIGNAC Jean-François	E.N.S.I.E.G.
CHARTIER Germain	E.N.S.I.E.G.
CHENEVIER Pierre	E.N.S.E.R.G.
CHERADAME Hervé	U.E.R.M.C.P.P.
CHERUY Arlette	E.N.S.I.E.G.
CHIAVERINA Jean	U.E.R.M.C.P.P.
COHEN Joseph	E.N.S.E.R.G.
COUMES André	E.N.S.E.R.G.
DURAND Francis	E.N.S.E.E.G.
DURAND Jean-Louis	E.N.S.I.E.G.
FELICI Noël	E.N.S.I.E.G.
FOULARD Claude	E.N.S.I.E.G.
GENTIL Pierre	E.N.S.E.R.G.
GUERIN Bernard	E.N.S.E.R.G.
GUYOT Pierre	E.N.S.E.E.G.
IVANES Marcel	E.N.S.I.E.G.
JAUSSAUD Pierre	E.N.S.I.E.G.
JOUBERT Jean-Claude	E.N.S.I.E.G.
JOURDAIN Geneviève	E.N.S.I.E.G.
LACOUME Jean-Louis	E.N.S.I.E.G.
LATOMBE Jean-Claude	E.N.S.I.M.A.G.

.../...

LESSIEUR Marcel	E.N.S.H.G.
LESPINARD Georges	E.N.S.H.G.
LONGUEUE Jean-Pierre	E.N.S.I.E.G.
MAZARE Guy	E.N.S.I.M.A.G.
MOREAU René	E.N.S.H.G.
MORET Roger	E.N.S.I.E.G.
MOSSIERE Jacques	E.N.S.I.M.A.G.
PARIAUD Jean-Charles	E.N.S.E.E.G.
PAUTHENET René	E.N.S.I.E.G.
PERRET René	E.N.S.I.E.G.
PERRET Robert	E.N.S.I.E.G.
PIAU Jean-Michel	E.N.S.H.G.
POLOJADOFF Michel	E.N.S.I.E.G.
POUPOT Christian	E.N.S.E.R.G.
RAMEAU Jean-Jacques	E.N.S.E.E.G.
RENAUD Maurice	U.E.R.M.C.P.P.
ROBERT André	U.E.R.M.C.P.P.
ROBERT François	E.N.S.I.M.A.G.
SABONNADIÈRE Jean-Claude	E.N.S.I.E.G.
SAUCIER Gabrielle	E.N.S.I.M.A.G.
SCHLENKER Claire	E.N.S.I.E.G.
SCHLENKER Michel	E.N.S.I.E.G.
SERMET Pierre	E.N.S.E.R.G.
SILVY Jacques	U.E.R.M.C.P.P.
SOHM Jean-Claude	E.N.S.E.E.G.
SOUQUET Jean-Louis	E.N.S.E.E.G.
VEILLON Gérard	E.N.S.I.M.A.G.
ZADWORNY François	E.N.S.E.R.G.

PROFESSEURS ASSOCIES

BASTIN Georges	E.N.S.H.G.
BERRIL John	E.N.S.H.G.
CARREAU Pierre	E.N.S.H.G.
GANDINI Alessandro	U.E.R.M.C.P.P.
HAYASHI Hirashi	E.N.S.I.E.G.

PROFESSEURS UNIVERSITE DES SCIENCES SOCIALES (Grenoble II)

BOLLIET Louis
Chatelin Françoise

PROFESSEURS E.N.S. Mines de Saint-Etienne

RIEU Jean
SOUSTELLE Michel

CHERCHEURS DU C.N.R.S.

FRUCHART Robert
VACHAUD Georges

Directeur de Recherche
Directeur de Recherche

.../...

ALLIBERT Michel	Maître de Recherche
ANSARA Ibrahim	Maître de Recherche
ARMAND Michel	Maître de Recherche
BINDER Gilbert	
CARRE René	Maître de Recherche
DAVID René	Maître de Recherche
DEPORTES Jacques	
DRIOLE Jean	Maître de Recherche
GIGNOUX Damien	
GIVORD Dominique	
GUELIN Pierre	
HOPFINGER Emil	Maître de Recherche
JOUD Jean-Charles	Maître de Recherche
KAMARINOS Georges	Maître de Recherche
KLEITZ Michel	Maître de Recherche
LANDAU Ioan-Dore	Maître de Recherche
LASJAUNIAS J.C.	
MERMET Jean	Maître de Recherche
MUNIER Jacques	Maître de Recherche
PIAU Monique	
PORTESEIL Jean-Louis	
THOLENCE Jean-Louis	
VERDILLON André	

CHERCHEURS du MINISTÈRE de la RECHERCHE et de la TECHNOLOGIE (Directeurs et Maîtres de Recherches, ENS Mines de St. Etienne)

LESBATS Pierre	Directeur de Recherche
BISCONDI Michel	Maître de Recherche
KOBYLANSKI André	Maître de Recherche
LE COZE Jean	Maître de Recherche
LALAUZE René	Maître de Recherche
LANCELOT Francis	Maître de Recherche
THEVENOT François	Maître de Recherche
TRAN MINH Canh	Maître de Recherche

PERSONNALITES HABILITEES à DIRIGER des TRAVAUX de RECHERCHE (Décision du Conseil Scientifique)

ALLIBERT Colette	E.N.S.E.E.G.
BERNARD Claude	E.N.S.E.E.G.
BONNET Rolland	E.N.S.E.E.G.
CAILLET Marcel	E.N.S.E.E.G.
CHATILLON Catherine	E.N.S.E.E.G.
CHATILLON Christian	E.N.S.E.E.G.
COULON Michel	E.N.S.E.E.G.
DIARD Jean-Paul	E.N.S.E.E.G.
EUSTAPOPOULOS Nicolas	E.N.S.E.E.G.
FOSTER Panayotis	E.N.S.E.E.G.

.../...

GALERIE Alain	E.N.S.E.E.G.
HAMMOU Abdelkader	E.N.S.E.E.G.
MALMEJAC Yves	E.N.S.E.E.G. (CENG)
MARTIN GARIN Régina	E.N.S.E.E.G.
NGUYEN TRUONG Bernadette	E.N.S.E.E.G.
RAVAINE Denis	E.N.S.E.E.G.
SAINFORT	E.N.S.E.E.G. (CENG)
SARRAZIN Pierre	E.N.S.E.E.G.
SIMON Jean-Paul	E.N.S.E.E.G.
TOUZAIN Philippe	E.N.S.E.E.G.
URBAIN Georges	E.N.S.E.E.G. (Laboratoire des ultra-réfractaires ODEILLON)
GUILHOT Bernard	E.N.S. Mines Saint Etienne
THOMAS Gérard	E.N.S. Mines Saint Etienne
DRIVER Julien	E.N.S. Mines Saint Etienne
BARIBAUD Michel	E.N.S.E.R.G.
BOREL Joseph	E.N.S.E.R.G.
CHOVET Alain	E.N.S.E.R.G.
CHEHIKIAN Alain	E.N.S.E.R.G.
DOLMAZON Jean-Marc	E.N.S.E.R.G.
HERAULT Jeanny	E.N.S.E.R.G.
MONLLOR Christian	E.N.S.E.R.G.
BORNARD Guy	E.N.S.I.E.G.
DESCHIZEAU Pierre	E.N.S.I.E.G.
GLANGEAUD François	E.N.S.I.E.G.
KOFMAN Walter	E.N.S.I.E.G.
LEJEUNE Gérard	E.N.S.I.E.G.
MAZUER Jean	E.N.S.I.E.G.
PERARD Jacques	E.N.S.I.E.G.
REINISCH Raymond	E.N.S.I.E.G.
ALEMANY Antoine	E.N.S.H.G.
BOIS Daniel	E.N.S.H.G.
DARVE Félix	E.N.S.H.G.
MICHEL Jean-Marie	E.N.S.H.G.
OBLED Charles	E.N.S.H.G.
ROWE Alain	E.N.S.H.G.
VAUCLIN Michel	E.N.S.H.G.
WACK Bernard	E.N.S.H.G.
BERT Didier	E.N.S.I.M.A.G.
CALMET Jacques	E.N.S.I.M.A.G.
COURTIN Jacques	E.N.S.I.M.A.G.
COURTOIS Bernard	E.N.S.I.M.A.G.
DELLA DORA Jean	E.N.S.I.M.A.G.
FONLUPT Jean	E.N.S.I.M.A.G.
SIFAKIS Joseph	E.N.S.I.M.A.G.
CHARUEL Robert	U.E.R.M.C.P.P.
CADET Jean	C.E.N.G.
COEURE Philippe	C.E.N.G. (LETI)

.../...

DELHAYE Jean-Marc
DUPUY Michel
JOUVE Hubert
NICOLAU Yvan
NIFENECKER Hervé
PERROUD Paul
PEUZIN Jean-Claude
TAIEB Maurice
VINCENDON Marc

C.E.N.G. (STT)
C.E.N.G. (LETI)
C.E.N.G. (LETI)
C.E.N.G. (LETI)
C.E.N.G.
C.E.N.G.
C.E.N.G. (LETI)
C.E.N.G.
C.E.N.G.

LABORATOIRES EXTERIEURS

DEMOULIN Eric
DEVINE
GERBER Roland
MERCKEL Gérard
PAULEAU Yves
GAUBERT C.

C.N.E.T.
C.N.E.T. (R.A.B.)
C.N.E.T.
C.N.E.T.
C.N.E.T.
I.N.S.A. Lyon



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE SAINT-ETIENNE

Directeur : Monsieur M. MERMET
Directeur des Etudes et de la formation : Monsieur J. LEVASSEUR
Directeur des recherches : Monsieur J. LEVY
Secrétaire Général : Mademoiselle M. CLERGUE

Professeurs de 1ère Catégorie

DINDE	Alexandre	Gestion
DOUX	Claude	Métallurgie
LEVY	Jacques	Métallurgie
DOWYS	Jean-Pierre	Physique
ATHON	Albert	Gestion
LEU	Jean	Mécanique - Résistance des matériaux
JUSTELLE	Michel	Chimie
ORMERY	Philippe	Mathématiques Appliquées

Professeurs de 2ème catégorie

BIB	Michel	Informatique
RRIN	Michel	Géologie
RCHERY	Georges	Matériaux
UCHARD	Bernard	Physique Industrielle

Directeur de recherche

SBATS	Pierre	Métallurgie
-------	--------	-------------

Maîtres de recherche

CONDI	Michel	Métallurgie
VOINE	Philippe	Géologie
URDEUX	Angeline	Métallurgie
BYLANSKI	André	Métallurgie
LAUZE	René	Chimie
NCELOT	Francis	Chimie
DOZE	Jean	Métallurgie
VENOT	François	Chimie
AN MINH	Canh	Chimie

Personnalités habilitées à diriger des travaux de recherche

IVER	Julian	Métallurgie
ILHOT	Bernard	Chimie
OMAS	Gérard	Chimie

Professeur à l'UER de Sciences de Saint-Etienne

RGNAUD	Jean-Maurice	Chimie des Matériaux & chimie industrielle
--------	--------------	--



Je tiens à remercier :

Monsieur le Professeur G. VEILLON, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble et Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématique Appliquée de Grenoble (ENSIMAG) qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le Jury de cette thèse.

Monsieur le Professeur F. ANCEAU, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, qui m'a accepté dans l'équipe d'Architecture des ordinateurs et qui a dirigé mon travail de recherche.

Monsieur E. MACKOWIAK, Directeur du département de circuits avancés de la Direction Technique de la Société THOMSON-EFCIS qui a bien voulu juger ce travail et m'a honoré en acceptant de participer au jury de cette thèse.

Monsieur B. COURTOIS, chargé de recherches au CNRS, responsable de l'équipe de test des circuits VLSI au Laboratoire TIM3 - IMAG qui m'a honoré de sa présence au sein du jury.

Monsieur J. LAURENT, Ingénieur au CNRS/IMAG pour ses précieux conseils pendant la préparation de ce travail et sa participation au jury.

Il m'est un devoir agréable de remercier Monsieur G. BAILLE pour ses conseils dans mes premières études de ce travail et tous les participants au projet, notamment Monsieur L. BERGHER et Mademoiselle I. GUIGUET.



à mes parents ;
à mes frères martyrs : ABDOLALI et MANSSUR ,
à mon épouse Narges,
et
à mon fils Abdolali



SOMMAIRE

	Page
RESUME	1
CHAPITRE I - PRESENTATION DE L'OUTIL UTILISE	3
I.1. Introduction	5
I.2. Description générale du système	7
I.2.1 Conditionnement du CI	8
I.2.2. Le capteur	8
I.2.2.1. Principe de la formation d'image dans un MEB	9
I.2.3. Système de saisie et de digitalisation d'image	11
I.2.4. Système de contrôle	13
I.3. Avantages et Inconvénients du MEB	13
I.3.1. Avantages	13
I.3.2. Inconvénients	14
CHAPITRE II - PRINCIPALES TECHNIQUES D'UTILISATION DU MEB	
II.1. Acquisition des données	17
II.2. Principe d'exploitation des images	18
II.2.1. Analyse logique	18
II.2.2. Analyse électrique	18
II.3. Modes de traitement des données	19
II.3.1 Zones d'observation	21
II.3.1.a Zone libre	21
II.3.1.b Zone adressée	21
II.3.2. Mode image	21
II.3.3. Mode mémoire	22
II.4. Traitement de l'image saisie	23
II.4.1. Observation des circuits	23
II.4.1.a Observation des circuits passivés	23
II.4.1.b Observation des circuits non passivés	23
II.4.1.c Observation des circuits dépassivés	24
II.4.2 Digitalisation de l'image	24
II.4.2.1 Zoom électronique - Zoom informatique	24
II.4.3. Amélioration de la qualité des images	26

II.4.4.	Compactage de l'image	27
II.4.5.	Binarisation des images	28
II.5.	Les applications du MEB	29
CHAPITRE III - METHODES D'OBTENIR LES POINTS DE REPERES SUR L'IMAGE D'UN CIRCUIT INTEGRE.		32
III.1.	Introduction	34
III.2.	Transformation entre les systèmes des coordonnées	35
III.3.	Points de repère	35
III.4.	Méthodes de détection des points de repère	38
III.4.1.	Méthodes automatiques	38
III.4.1.a	Corrélation	38
III.4.1.b	Deuxième méthode	42
III.4.2.	Méthode non automatique	43
CHAPITRE IV-CORRECTION DES DEFORMATIONS D'IMAGES		45
IV.1.	Etude des déformations de l'image	47
IV.1.1.	Problème du montage	47
IV.1.2.	Aberrations optiques	49
IV.2.	Correction des déformations du montage	51
IV.3.	Correction des aberrations optiques	61
IV.3.1.	Segmentation de l'image et approximations linéaires des distorsions par région	61
IV.3.1.1.	Généralités	61
IV.3.1.2.	Estimation des fonctions reliant le système déformé au système non déformé	61
IV.3.2.	Approximation des fonctions analogiques	67
IV.3.2.1.	Aberration coussin	67
IV.3.2.2.	Détermination de la position d'un point sur le masque	69
IV.3.2.3.	Aberration tonneau	74

IV.3.3.	Détermination de la position d'un point sur l'image	76
IV. 3.3.1.	Aberration coussin	76
IV. 3.3.2.	Aberration tonneau	80
IV.4.	Notions sur les méthodes de correction d'images	83
IV.4.1.	Amélioration du procédé de correction	83
IV.4.2.	Généralisation à d'autres types de déformation	85
CONCLUSION		87
ANNEXES		88
LISTINGS DU LOGICIEL (Extraits)		
REFERENCES		108



RESUME

La complexité croissante des circuits intégrés (C.I.) et l'inadaptation des outils actuels à la mise au point des prototypes, conduit à rechercher d'autres méthodes d'investigation du comportement interne des circuits VLSI. Il est possible de voir travailler un C.I. en utilisant un microscope électronique à balayage (MEB) travaillant en mode de contraste de potentiel [18], [14]. Ce mode permet de relever la valeur des potentiels en un point quelconque du circuit sans trop en perturber le fonctionnement.

L'analyse qui s'appuie sur des méthodologies appropriées en cours de développement, a recours au MEB pour résoudre le problème de l'observabilité du comportement interne des VLSI. Le domaine d'applications recouvre notamment la mise au point des prototypes et l'analyse de défaillances. L'étude rapportée ici concerne essentiellement la validation de prototypes.

Les points à analyser sont choisis par le concepteur soit sur l'image observée, soit à partir de la description des masques ayant servi à le fabriquer, soit encore à partir d'une étude de simulation des fonctionnements logiques ou électriques.

Le but de notre travail consiste à déterminer les fonctions de transfert qui permettent au concepteur de situer par programme le(les) zone(s) contenant le(les) point(s) à étudier. Ces fonctions tiennent compte des déformations de l'image observée (issue de MEB) et dues en premier lieu au placement du circuit par rapport au faisceau incident (déformation géométrique) et aux imperfections du balayage (déformation optique).

La première partie présente l'outil permettant de visualiser l'évolution des potentiels internes à un C.I. en fonctionnement.

La seconde partie expose les types de corrections et de traitement à effectuer sur les images fournies par le MEB pour être exploitables lors des analyses relevant de la mise au point des prototypes.

Tous les calculs présentés dans ce rapport, ont été programmés et exécutés au moyen d'un ordinateur HB 68 et d'une Pascal-micro engine.

Ce travail a été étudié et réalisé au laboratoire IMAG (Institut d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble) sous la direction de Monsieur ANCEAU François, au sein de l'équipe architecture des ordinateurs.

CHAPITRE I

PRESENTATION DE L'OUTIL UTILISE



1.1. INTRODUCTION

Les deux dernières décennies ont vu la capacité d'intégration des composants à semi-conducteur faire un bond considérable. Si au début des années soixante les moyens technologiques permettaient aux fabricants d'intégrer quelques dizaines de transistors sur une puce de silicium ; les 500 000 transistors sont aujourd'hui atteints [14] , [18] , [21].

Le concepteur peut toujours maîtriser la définition d'un cahier des charges précis d'un circuit : sa décomposition fonctionnelle, sa conception globale et le dessin des masques. Cependant la réalisation physique du circuit demande des moyens et des compétences qui ne lui appartiennent plus. Il doit donc travailler en étroite collaboration avec les fabricants qui maîtrisent cette technologie complexe. Il se pose alors le problème essentiel de la mise au point des prototypes [14], [18].

Leur mauvais fonctionnement peut avoir deux sources principales :

- Les défauts de réalisation ;
- Les erreurs de conception.

Pour les défauts de réalisation, le concepteur revient au fabricant de revoir les conditions de fabrication.

Les erreurs de conception doivent être décelées et corrigées par le concepteur du circuit [14] , [18]. Mais on note qu'actuellement, les concepteurs ne disposent que de peu d'outils pour vérifier l'état interne d'un CI en fonctionnement, tandis que le développement de circuits intégrés à haute densité d'intégration nécessite des outils de plus en plus performants en vue de la mise au point des prototypes et de l'analyse de défaillances [10].

Les outils classiques existants (les pointes mécaniques) sont généralement peu pratique et de faible puissance d'investigation.

En effet, les testeurs disponibles sont utilisés pour le contrôle de fin de chaîne de fabrication. Ils permettent d'exciter un circuit et d'en analyser le comportement de l'extérieur par ses plots d'entrée/sortie. Cette analyse (analyse externe) n'est pas utilisable pour des circuits complexes. En effet, dans ce cas

le concepteur ne dispose que de quelques accès électriques (broches du circuit) pour étudier le comportement d'une centaine mille de transistors. Ces techniques sont donc, insuffisantes pour permettre la localisation d'une panne avec la précision nécessaire pour détecter un défaut en vue de sa correction. Ce type d'analyse est essentiellement utilisé pour les tests du type BON/MAUVAIS à la fin de production [14].

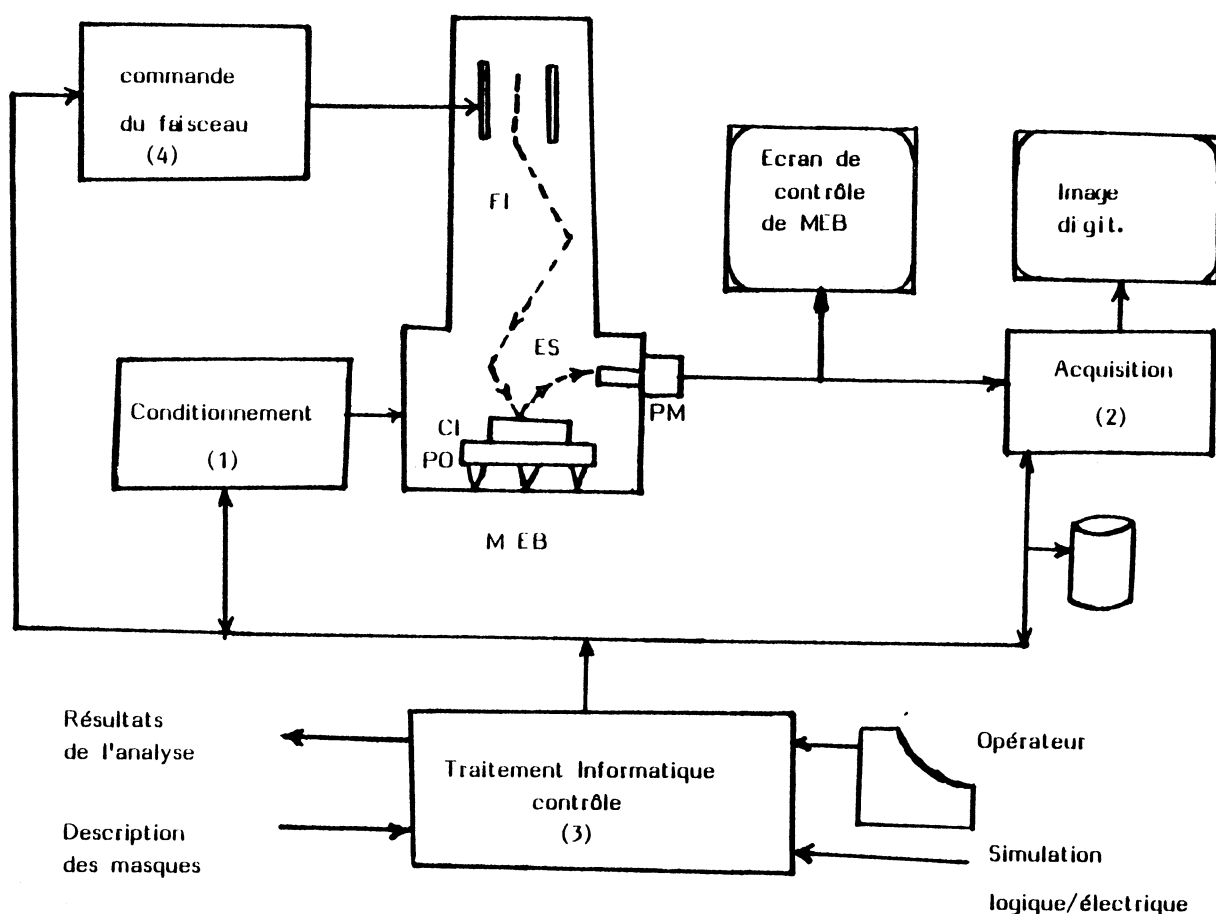
Puisque les informations disponibles par les broches du circuit sont insuffisantes pour permettre sa mise au point, il est donc nécessaire d'observer directement son fonctionnement interne. Mais les outils d'investigation interne d'un circuit intégré sont actuellement limités. Il s'agit des pointes mécaniques, qui permettent de relever les signaux électriques en un nombre limité de connexions (internes au circuit intégré) et de les visualiser sur un oscilloscope. Cette méthode devient inadaptée aux circuits à haute densité d'intégration pour les raisons suivantes [14] , [18] , [10] :

- l'augmentation du nombre de transistors dans un C.I. est grâce aux nouvelles technologies qui permettent la diminution de la géométrie des éléments ainsi que celles de la puce elle-même. Mais la diminution des dimensions géométriques s'accompagne d'une difficulté croissante de positionnement des pointes mécaniques. En plus, cette tâche est particulièrement longue et dangereuse pour le circuit.
- la capacité parasite introduit par la sonde à la surface du circuit, perturbe le fonctionnement et fausse les mesures. Pour pallier les inconvénients de l'utilisation des testeurs mécaniques, il semble que l'utilisation d'un microscope électronique à balayage (MEB) exploitant la technique dite de "contraste de potentiel" est la seule technique de test adaptée aux circuits VLSI. Cette technique permet aux utilisateurs d'observer un circuit en fonctionnement dans la chambre du MEB (fonctionnant en contraste de potentiel). (14).

1.2. DESCRIPTION GENERALE DU SYSTEME

Cet outil dont le schéma général est donné figure 1, peut se décomposer en quatre principaux éléments [21] , [14] :

- un dispositif de conditionnement du circuit ;
- un capteur électronique constitué d'un microscope électronique à balayage (MEB) équipé pour la technique de contraste de potentiel ;
- un organe d'acquisition et de digitalisation d'images (prétraitement)
- un système de contrôle et de traitement informatique des résultats.



Légende : MEB = Microscope Electronique à Balayage

FI = Faisceau incident

ES = Electrons secondaires

PO = Porte objet

PM = Photo multiplicateur

Figure 1 - Organisation générale de l'outil

1.2.1. CONDITIONNEMENT DU CIRCUIT

Le conditionnement permet de piloter le circuit. Il doit simuler l'environnement d'utilisation du circuit sous test et permettre son fonctionnement habituel. Pour cela, il a accès à toutes les broches du CI placé dans la chambre du MEB, par l'intermédiaire d'un cordon comprenant un fil par broche et traversant la paroi du microscope par des passages étanchés [14].

Le système utilisé pour le conditionnement des circuits lors des manipulations est le système MADAM (Matériel d'Aide au Développement d'Applications Microprogrammées développé à l'IMAG [24].

1.2.2. LE CAPTEUR

Il s'agit d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB) adapté au test des CI dont le principe est décrit dans la figure 2. Un dispositif de balayage synchronise le faisceau d'électrons du MEB et un écran de visualisation. Le MEB peut être équipé[13] :

- d'un dispositif de commande de faisceau qui effectue :
 - . le positionnement du faisceau en tout point du CI
 - . sa modulation en impulsions de très courte durée utilisée dans le mode stroboscopie.
- d'un écran de contrôle
- d'un spectromètre électronique qui permet d'effectuer des mesures quantitatives [26].
- d'une platine porte objet pour accueillir divers boîtiers
- d'un micro-ordinateur qui contrôle :
 - . la pulsation du faisceau d'e (pour les études dynamiques)
 - . le contrôle du balayage
 - . le positionnement du faisceau sur un point de départ du balayage ou sur un point fixe (pas de balayage).

Le microscope utilisé pendant les expériences est un JEOL 35. Ce microscope ne possède pas de commande de faisceau. On ne peut pas l'utiliser en "mode SPOT"

(Positionnement du faisceau sur un point, sans balayage).

Un schéma du MEB est représenté figure 2.

1.2.2.1. Principe de la formation d'image dans un MEB

Le circuit à analyser à l'aide d'un MEB doit être préparé de la façon suivante : il faut ouvrir le boîtier contenant le circuit et ensuite retirer la couche protectrice de passivation car elle diminue l'observabilité d'un circuit.

Le CI est placé dans la chambre à vide du MEB. Pour faire une mesure, le canon à électrons génère un faisceau d'électrons (faisceau primaire ou incident) qui bombarde la surface du circuit grâce à un système de lentilles et des bobines à balayage.

Le bombardement du CI par ce faisceau incident provoque la génération d'électrons secondaires. Les électrons secondaires de faible énergie libérés sont attirés par un collecteur qui est porté à un fort potentiel (300 V). Le signal résultant amplifié est visualisé sur l'écran cathodique du MEB. L'image ainsi formée fournira un contraste lié à la fois à la composition locale de l'échantillon et à sa topographie ainsi que les tensions de sa surface. On parle donc de contraste topographique et de contraste de potentiel [28]. En effet, le nombre d' e^- secondaires recueillis module l'intensité du signal analogique qui arrive sur l'écran du MEB et détermine ainsi le contraste de l'image.

a) Le contraste topographique [28], [11], [39]

Le contraste de l'image dépend entre autres paramètres du relief de la surface de l'échantillon. Ceci est du fait que l'émission d' e^- secondaires s'accroît en fonction de l'angle formé par le faisceau incident et la droite perpendiculaire à la surface. Si le faisceau incident bombarde une surface oblique (respectivement plane) peu, (respectivement beaucoup) d'électrons secondaires sont libérés et l'image apparaît sombre (respectivement claire). Ce phénomène constitue le contraste topographique.

b) Le contraste de potentiel

Le contraste de l'image dépend de la distribution de potentiel sur la surface du CI. Ce phénomène, appelé contraste de potentiel, peut être résumé comme

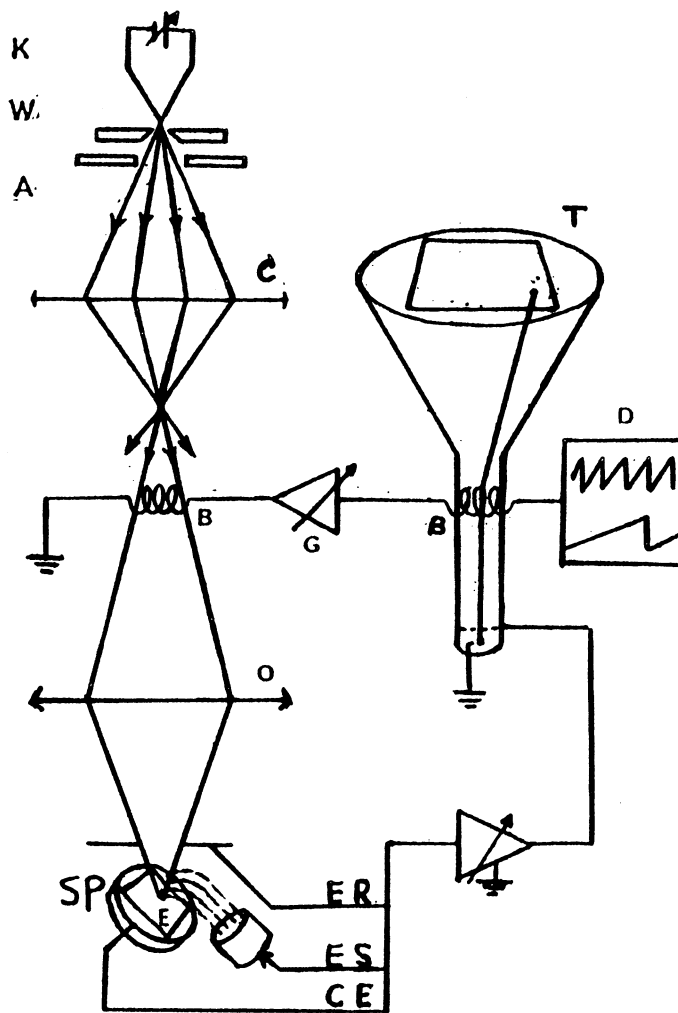


Figure 2 - Schéma de principe du MEB

- K = cathode thermoémissive
- W = Wehnelt
- A = anode
- C, O = lentilles électromagnétiques
- ER, ES, CE = détecteurs
- B = bobines de déflexion
- D = dispositif de balayage
- E = échantillon
- T = tube cathodique
- G = contrôle du grandissement
- SP = spectromètre électronique

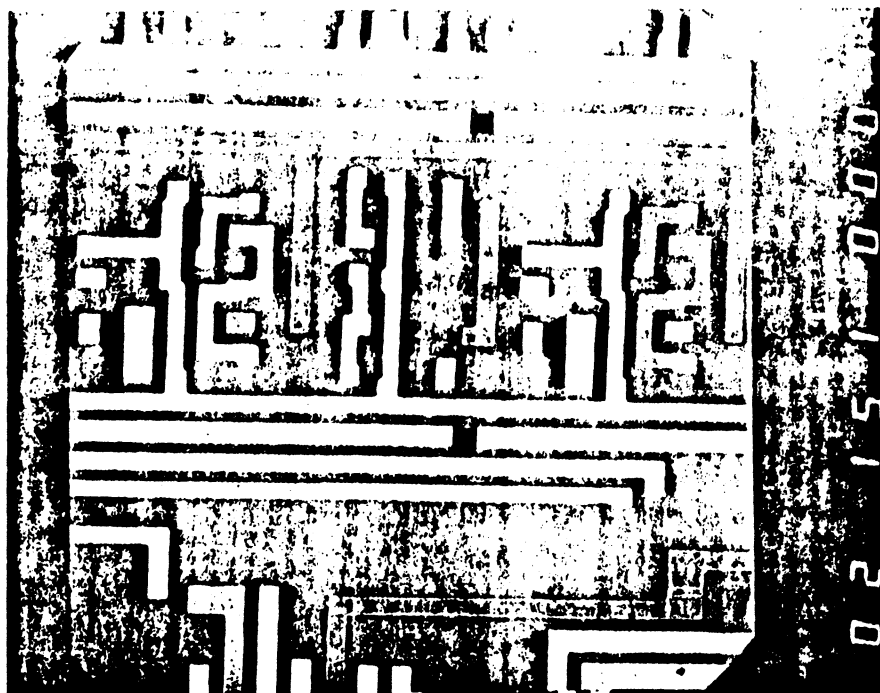
suit [27] : les électrons secondaires ont une faible énergie (< 50 eV) et sont donc très sensibles à des champs électriques créés par les potentiels de la surface du CI observé. A cause du fort potentiel du collecteur (≈ 300 V), presque tous les \bar{e} secondaires issus d'interconnexions à la masse, soumis à un champ d'extraction qui les accélère vers le collecteur et sont captés. Par contre, ceux issus d'interconnexions portées au potentiel positif (+ 5V p. ex.) doivent passer à travers un champ retardateur qui renvoie la plupart d'entre eux sur les interconnexions. Le collecteur reçoit donc moins d' \bar{e} secondaires des interconnexions à + 5 V que de celles à la masse. Ainsi, les zones portées à un potentiel positif apparaissent-elles sur l'écran du MEB d'autant plus sombres que leur potentiel est élevé. Par contre les zones à un potentiel bas ('0' logique) apparaissent claires. Il est donc possible de visualiser sur l'écran de MEB, à partir du signal analogique obtenu du détecteur d' \bar{e} secondaires ; l'image de la répartition des potentiels à la surface d'un C.I. (les états logiques du CI).[13], [14]. La figure 3 montre un CI en contraste de potentiel (alimenté) et sans contraste de potentiel (non alimenté).

1.2.3. SYSTEME DE SAISIE ET DE DIGITALISATION D'IMAGES

L'utilisation du faisceau d'électrons (MBE) permet la possibilité de balayer la surface d'un CI et d'obtenir ainsi des images sur l'état électrique, logique et topologique du circuit. Cette image est générée par un signal analogique de type vidéo, il n'y a donc aucun obstacle à la digitaliser en prenant le plus grand nombre de points possibles afin de conserver une bonne définition. Certains d'entre eux, présentant un intérêt pour l'étude (points clés ou prédéfinis par le concepteur) seront collectés par l'outil associé au MEB (voir ci-dessous).[14].

Pour la saisie et la digitalisation des images issues du MEB et leur traitement, nous avons utilisé ROMUALD, une machine de traitement d'image réalisée au Centre Inter-Universitaire de Calcul de Grenoble (C.I.C.G.).

Cette machine permet de digitaliser et de mettre en mémoire une image de 512 par 512 points (Pixels). Chaque point représente une valeur de gris codée sur 8 bits à partir d'un signal vidéo standard, ce qui permet de différencier 256 niveaux de gris. Le ROMUALD digitalise des fenêtres (zones) du C.I. observé sans modifier le facteur du grossissement du MBE et sans déplacer la platine porte-objet à fréquence variable : 1 - 2 - 4 - 8 - 12 - 24 MHz.[14], [22], [13]. Cette machine permet les opérations nécessaires en traitement d'image tel que : tracer l'histogramme, seuillage, binarisation, filtrage (lissage et gradient) et



a) circuit alimenté (contraste de potentiel)



b) circuit non alimenté

Figure 3

finalement détection de contour sur l'image saisie et mémorisée [30] , [31]

1.2.4. SYSTEME DE CONTROLE ET DE TRAITEMENT DES RESULTATS

Il s'agit d'un ordinateur puissant disposant d'une capacité mémoire importante. Il effectue les fonctions suivantes :

- a) Il contrôle le fonctionnement de l'ensemble de l'outil. Il pilote donc :
 - .Le MBE : il lui transmet les coordonnées des points à analyser (soit à partir du fichier des descriptions du masque ou par l'opérateur) et effectue le positionnement automatique du faisceau sur ces points.
 - . Le dispositif de conditionnement :le système charge et contrôle le dispositif de conditionnement du circuit en générant des vecteurs d'entrée choisis en fonction des résultats obtenus et les lui transmet. Puis il contrôle leur séquen- cement selon une stratégie de test [13].
- b) Le traitement des observations : ce système récupère et analyse des images digitalisées se trouvant dans la mémoire d'images de l'organe d'acquisition. Il compare la valeur logique des points à analyser avec des valeurs théoriques prédéterminées ou avec des résultats de simulation électrique ou logique (obtenues par CAO) ou la valeur de référence (valeur obtenue avec un circuit bon). De cette façon il trouve, dans le cadre d'une méthodologie de test, le(s) point(s) défectueux du CI.

1.3. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU MEB

1.3.1. AVANTAGES

- Le MEB permet d'observer un très grand nombre de valeurs logiques des différents points internes du C.I., alors que de façon classique seules ses sorties sont observables. Ainsi cette possibilité d'observabilité permet de distinguer des pannes auparavant considérées équivalentes en raison du faible nombre de points observables (avec les machines de test classiques), ce qui facilite la localisation des défauts. [21] , [30].

- L'absence de contact entre la sonde et le point de mesure supprime tout risque de destruction mécanique de la surface.

La capacité introduite par le faisceau est négligeable par rapport à celle de testeur mécanique. Ainsi la sonde électronique ne perturbe pas le fonctionnement électrique du CI (à condition de la faible tension d'accélération du faisceau incident, 1 - 3 KV par exemple).

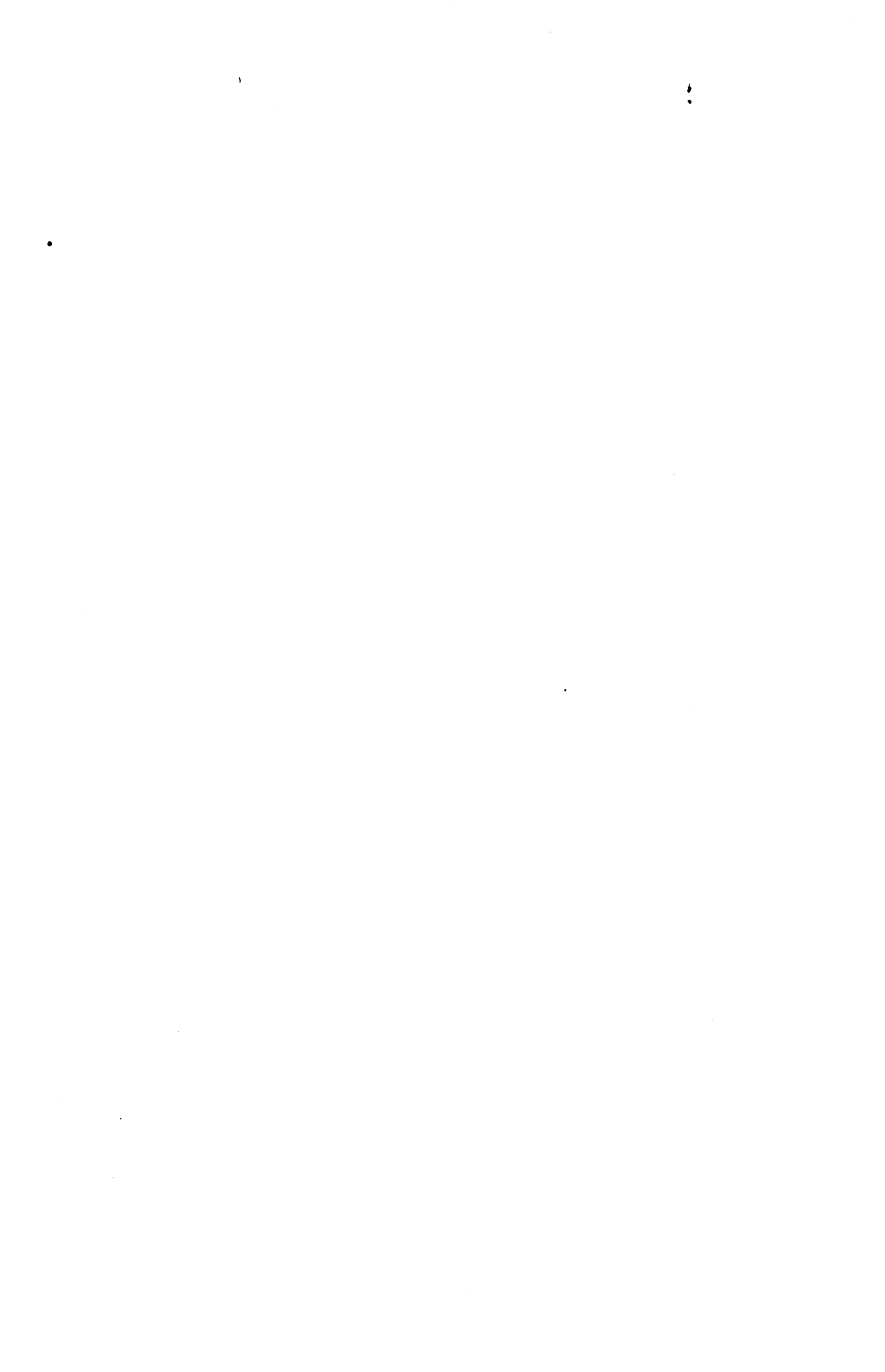
- Possibilité d'étudier les comportements logiques et électriques du CI.
- Possibilité de traiter un grand nombre de points en parallèle : en balayant rapidement le faisceau sur toute la surface du CI. Ainsi l'état électrique de tout le CI peut être visualisé.
- Le faisceau incident a un diamètre de quelques centaines d'Angstroems. Le positionnement d'une telle sonde, sur n'importe quel point de l'échantillon est rapide, facile et très précis. [13], [34].

1.3.2. INCONVENIENTS

- L'usage de nouvelles méthodes de test a pour inconvénient la nécessité de développer de nouvelles méthodologies.
- L'utilisation d'un MEB dans l'outil impose des temps de test relativement longs :
 - . mise en place du circuit dans la chambre à vide du MEB
 - . temps d'acquisition d'une image
 - . nécessité d'étudier et prendre en compte les diverses déformations des images (sujet de cette étude).
- Pour éviter de fausser les mesures et d'éviter d'endommager le C.I., la sonde électronique doit être faiblement énergétique :
 - . Les circuits doivent être dépassivés (ou non passivés) pour éviter les charges d'oxyde de protection.
 - . La fiabilité des images et la résolution sont amoindries.

CHAPITRE II

PRINCIPALES TECHNIQUES D'UTILISATION DU MEB



II.1. ACQUISITION DES DONNEES

Il s'agit d'obtenir du signal délivré par le MEB (l'image de contraste de potentiel du CI) ; la valeur du potentiel en un certain nombre de points du circuit observé (de la couche métallique supérieure).

Ces points sont choisis par le concepteur [14] , [18] :

- . soit intuitivement, en positionnant le curseur de l'écran du MEB aux endroits qui lui paraissent significatifs ;
- . soit à partir du descriptif des masques
- . soit de l'exploitation des résultats d'observations précédentes
- . soit à partir d'une analyse du schéma électrique voire du schéma logique.

Il faut noter que quelques dispositifs de mesure et de contrôle peuvent ne pas être présents dans certaines installations (par exemple le système de commande du faisceau). Ces restrictions obligent l'utilisateur d'effectuer une méthode spécifique de test selon des matériels disponibles.

Ainsi l'absence ou la présence d'un matériel informatique (organe d'acquisition et de traitement, CHAPITRE I) détermine le mode d'acquisition applicable, qui est respectivement :

- le mode image : les informations sont visualisées sur l'écran de contrôle du MEB. L'analyse peut être faite : visuellement sur l'écran, sur photo ou sur image d'un film vidéo enregistrée au magnétoscope.
- Le mode mémoire : un système de traitement d'images digitalise et stocke les images de tout (ou une partie) du CI dans une mémoire masse. Le diagnostic peut être fait par des comparaisons automatiques (l'avantage de ce mode au premier) à des valeurs de référence (valeurs obtenues avec un circuit bon, ou calculées par des outils CAO).

II.2. PRINCIPE D'EXPLOITATION DES IMAGES

L'exploitation du contraste de potentiel peut s'effectuer de deux façons complémentaires suivant le type d'analyse désiré : l'analyse logique ou l'analyse électrique.

II.2.1. ANALYSE LOGIQUE (QUALITATIVE) [13] , [14]

Elle vise à mesurer la valeur logique des points à contrôler par observation du circuit dans un état stable (l'excitation du circuit, c'est à dire les vecteurs d'entrée sont stables). Dans ce cas le MEB se comporte comme un analyseur logique . L 'analyse qualitative (visualisation des états logiques d'un CI) est adaptée à la recherche d'une panne dans l'ensemble d'un CI (localisation de pannes). Ce principe peut être effectué pour :

- Les circuits combinatoires ; dont les états sont stables et ne dépendent que des conditions d'entrée.
- Les circuits séquentiels statiques : dont l'état peut être fixé pour une durée indéterminée sans perturbation.

On peut appliquer également le principe statique (qualitative) aux circuits séquentiels dynamiques si les conditions suivantes sont vérifiées :

- . l'observation est synchrone de l'excitation du circuit.
- . Pendant la saisie d'informations, la variation d'états est assez lente pour être considérée comme stable [13].

II.2.2. ANALYSE ELECTRIQUE (DYNAMIQUE)[13] , [14] , [10]

Cette analyse utilise la technique "stroboscopie". Dans ce principe le faisceau incident est pulsé en synchronisme avec l'excitation du CI. Le décalage de la synchronisation par un retard connu et continûment variable permet d'observer l'évolution temporelle d'un point de circuit [14]. L'échelle des temps est celle du décalage de phase. Avec des impulsions de très courtes durées, on peut observer l'évolution quantitative de potentiel dans le domaine de nanoseconde. Le MEB se comporte alors comme un oscilloscope.

Les mesures suivantes peuvent être effectuées par cette méthode :

- Les temps de propagation à travers un ou plusieurs éléments internes.
- la forme d'évolution temporelle du potentiel d'un point (sur la couche métallique supérieure).

- le temps de basculement des niveaux logiques (temps de montée et de descente)
- la valeur réelle du potentiel d'un point.

Cette technique permet d'étudier le fonctionnement électrique des composants du CI. Elle est utilisée pour analyser finement la cause réelle d'une panne (détectée et localisée auparavant par une analyse logique) provenant d'un comportement électrique critique.

Le principe de la stroboscopie est représenté figure 4.

Analyse dynamique présente l'inconvénient de nécessiter un fonctionnement répétitif de l'élément du CI choisi en étude (à chaque cycle de la séquence d'excitation externe). Ce n'est pas toujours possible dans un circuit séquentiel complexe.

Remarque

Le contraste de potentiel permet d'effectuer des mesures qualitatives de niveaux logiques (Analyse logique). Par contre il n'est pas adapté directement aux mesures quantitatives du potentiel de points (tension électrique) car il ne varie pas linéairement avec le potentiel de surface. Cette non linéarité est principalement due aux facteurs suivants :

- la collecte des \bar{e} secondaires étant réalisée par un champ électrostatique, le signal obtenu ne varie pas linéairement avec la variation du potentiel à mesurer à la surface du CI (effet de non linéarité des champs électrostatiques)
- la présence de potentiels différents au voisinage de l'interconnexion à mesurer perturbe les mesures (effet de proximité).[27].

Il faut donc utiliser des techniques particulières pour relever avec précision la tension électrique des points souhaités. L'adjonction d'un spectromètre électronique permet d'effectuer ces mesures [26] , [30].

II.3. MODES DE TRAITEMENT DES DONNEES

Il y a deux formes de traitement des informations obtenues de MEB :

- le mode image
- le mode mémoire

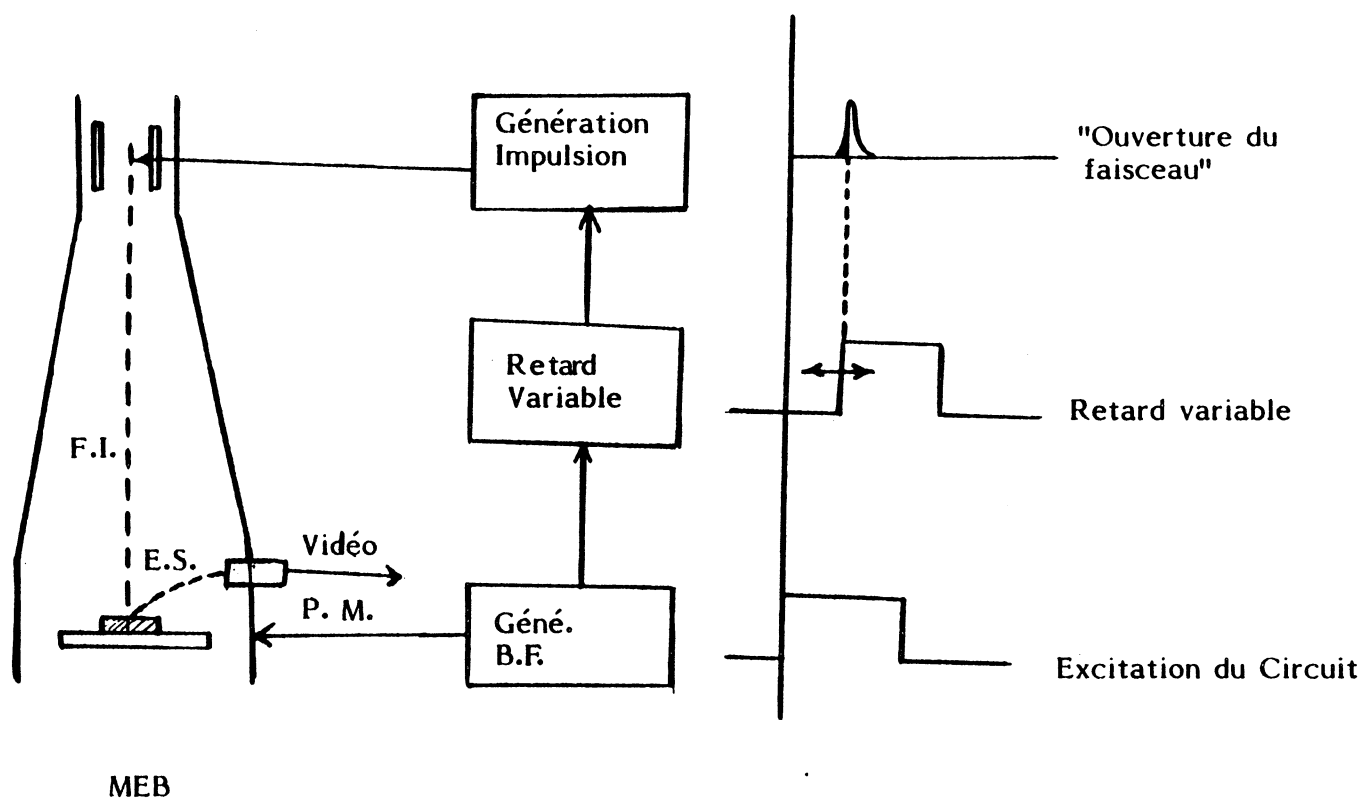


Figure 4 : Schéma de principe de la technique de stroboscopie du M.E.B.

Le faisceau incident est modulé en impulsions de très faible durée, à la fréquence du signal pilotant le circuit, mais avec un retard variable.

avant leurs explications, nous donnons la définition des zones d'observations, utilisées pour analyser des images.

II.3.1. ZONES D'OBSERVATION (13)

Deux types de zones sont définis :

- libre
- adressée

II.3.1.a Zone libre

Le zoom du MEB donne une image de l'ensemble (ou une partie) de la puce qui reste fixe. Les zones libres sont obtenues par un découpage systématique de l'image de la puce. Le faisceau balaie l'ensemble de l'image, mais la saisie est validée au passage sur la zone choisie.

II.3.1.b Zone adressée

Si le MEB est équipée d'un système de commande de positionnement de faisceau, on saisit la zone souhaitée avec un gain de temps important. Dans ce cas le balayage est fait seulement sur la zone adressée sans modification de zoom ou la platine porte objet du MEB. L'adresse de zone est transmise (soit manuellement par l'opérateur, soit automatiquement par le système informatique de contrôle) à la commande de positionnement qui place le faisceau au début de zone à balayer. Dans le cas d'absence d'un système de commandement du faisceau, il faut balayer toute la surface du CI (comme le cas précédent).

II.3.2. MODE IMAGE

L'image de la totalité d'un CI n'est pas suffisamment détaillée pour être exploitable. Le circuit doit être analysé par zones. La situation et les dimensions d'une zone sont libres et son image détaillée est obtenue par un zoom du MEB. Effectuer un zoom MEB consiste à centrer le point à observer par rapport au faisceau incident en déplaçant la platine porte-objet, puis à ajuster le grossissement jusqu'à ce que la topologie de la zone analysée soit très nette. L'ensemble du circuit étant visualisé en plusieurs fois, pour un même vecteur d'entrée, il faudra saisir une série d'images en déplaçant à chaque fois la platine porte-objet. Se pose alors, et de façon cruciale, le problème de la précision des dépla-

cements de la platine. Il est en effet nécessaire d'obtenir un positionnement avec une erreur absolue inférieure au micron pour atteindre une fenêtre et de connaître, avec la même précision, les déplacements de cette fenêtre [14]. Si le déplacement de la platine est d'une précision insuffisante, il entraîne la perte des références de position du circuit dans la chambre ; un recentrage est alors nécessaire pour chaque saisie d'image, ce qui entraîne d'importantes pertes de temps.

II.3.3. MODE MEMOIRE

Cette méthode consiste à saisir, digitaliser et ranger en mémoire les informations des parties à analyser du CI, données par le MEB [13].

Les parties à analyser peuvent être choisies au cours du test ou lors de la conception des masques. Le MEB est réglé afin de visualiser la totalité ou une partie du circuit. En fonction de la technique d'observation choisie, l'unité à analyser sera :

- la totalité de la partie visualisée
- une seule zone de la partie visualisée
- un seul point circuit (un P.C. est défini comme étant le plus petit rectangle significatif contenu dans le fichier de description des masques).

Le processeur de traitement d'images doit connaître l'adresse pratique sur l'image microscope du début de la partie à analyser. Il s'agit des coordonnées du premier point qui nous intéresse (numéro m de la ligne balayée, numéro n de la colonne balayée). [14]. Pour cela, il existe plusieurs possibilités [13] :

- a) L'opérateur lui transmet directement cette adresse.
- b) Le processeur détermine cette adresse à partir de la position du curseur sur l'écran du MEB qui est placé préalablement par l'opérateur à l'endroit désiré.
- c) Le processeur la calcule à partir de l'adresse théorique du point dans la description du masque. Pour cela :
 - . soit l'opérateur transmet cette adresse théorique (relevée sur le dessin du masque) au système de traitement informatique des données ;
 - . soit ce dernier (le processeur) relève cette valeur dans le fichier de

description des masques (M. D.).

Cette conversion entre adresse théorique (les coordonnées du fichier MD) et adresse pratique (situation réelle dans l'image) est réalisée grâce à une fonction de correspondance que le processeur doit avoir au préalable calculée. Ce calcul est réalisé à partir d'une initialisation : l'opérateur donne la correspondance entre ces deux adresses pour 3 points facilement repérables du circuit (des plots rectangulaires) au processeur (dans notre étude, c'est le processeur lui-même qui détecte automatiquement ces 3 repères sur l'image sans l'intervention de l'opérateur, sauf pour la commande de digitalisation des zones contenant des repères) qui peut ainsi déterminer la fonction de correspondance (sujet de notre étude, voir les chapitres III et IV). Cette fonction de transfert reste vraie pendant toute la durée des analyses tant que les paramètres du MEB concernant (zoom, balayage, position de platine) sont constants.

II.4. TRAITEMENT DE L'IMAGE SAISIE

Des C.I. sont généralement couvertes d'une couche de protection dite de passivation. L'absence ou présence de celle-ci influence fortement la qualité des images observées. Ainsi avant de décrire des méthodes de traitement des images nous donnons quelques précisions sur les images des CI en différentes conditions [12]

II.4.1. OBSERVATION DES CIRCUITS

II.4.1.a Observation des connexions sur circuits passivés

Lorsque le circuit est alimenté, les lignes métalliques supérieures (Aluminium) sont visibles, mais disparaissent au bout d'un certain temps (car le faisceau incident charge l'oxyde de la surface). Les lignes en Si-Poly ou en diffusion apparaissent très fugitives. Si le circuit n'est pas alimentée, des lignes d'Al sont visibles, mais leur niveau de gris est identique à celui du substrat.

II.4.1.b Circuits non passivés

S'ils sont alimentés, les lignes d'aluminium sont observables en permanence et les lignes en Si-Poly ou en diffusion apparaissent de manière fugitive. Sinon les connexions d'aluminium apparaissent blanches et le reste gris.

II.4.1.c Circuits dépassivés

Dans ce cas toutes les connexions sont visibles, que le circuit soit alimenté ou non. La possibilité de distinguer le niveau Alu du reste du circuit dépend à la profondeur de l'attaque de la passivation. Toutefois la qualité des images obtenues sur des circuits passivés est moins bonne que celle des images obtenues sur des circuits dépassivés ou non passivés.

II.4.2. DIGITALISATION DE L'IMAGE

Pour effectuer les traitements nécessaires (par exemple : seuillage, compactage... sur les images du CI obtenues par le MEB, il faut les digitaliser et ranger en mémoire.

Rappelons que le signal fournit par le MEB au processeur de traitement d'images est un signal vidéo qui comprend donc :

- L'information analogique relative au niveau de gris
- Des informations de synchronisation :
 - . I top trame (début de trame)
 - . N tops lignes (début de ligne), N étant le nombre de lignes balayées par le faisceau incident.

La digitalisation de l'image s'obtient en échantillonnant ce signal analogique. Le CI étant balayé en N lignes, N échantillons (pixels) sont relevés pour chaque ligne (pour respecter le rapport d'homothétie). Avec les balayages lents, de type photo, on obtient une excellente résolution jusqu'à 20 000 lignes par image [14] , [18] . Un pixel est codé sur 8 bits contenant la valeur de gris du point correspondant. 256 niveaux de gris peuvent donc être distingués. Les instants d'échantillonnage sont déterminés à l'aide des top trame (début d'image) et "N" tops lignes.

Pour digitaliser le signal du MEB, nous avons utilisé la machine ROMUALD qui permet chaque fois la digitalisation d'une fenêtre de 512 x 512 pixels.

II.4.2.1. Le Zoom Electronique et le Zoom Informatique [12] , [14]

Comme précédemment signalé (II.3.2.) l'image de l'ensemble d'un circuit VLSI n'est pas exploitable en faible grossissement. Surtout une image de 512 x 512 pixels ne suffit pas pour couvrir l'ensemble du C.I. Dans ce cas la résolution de l'image numérisée n'est pas suffisante. Ces restrictions imposent d'utiliser

des zooms électroniques.

Cette méthode, décrite précédemment (II.3.2), consiste à régler le MEB de façon à visualiser nettement une zone agrandie du CI. Dans ce cas seule la partie du circuit visualisée (la zone agrandie) est balayée par le faisceau. Ainsi pour saisir l'image de l'ensemble de circuit, devient-il nécessaire de déplacer la platine porte-objet avec une précision de l'ordre du micron, ce qui nécessite d'utiliser un équipement délicat et coûteux. [14]

Pour pallier ces inconvénients, nous nous sommes donc orientés vers une méthode d'acquisition utilisant le concept de zoom informatique. Cette méthode permet, à partir d'un zoom électronique pour lequel la totalité du circuit est visualisé, de réaliser et d'observer un zoom informatique sur l'image du MEB sans modifier le facteur de grossissement et sans déplacer la platine porte-objet [14], [12], [18].

L'idée de base est la possibilité de balayer le faisceau incident sur l'échantillon et de digitaliser le signal vidéo obtenue en décomposant une ligne image en un nombre de points correspondant au nombre de lignes dans une image pour respecter le rapport d'homothétie (II.4.1).

En gardant le grossissement électrique du MEB constant, on peut augmenter/diminuer la fréquence d'échantillonnage et par conséquent augmenter/diminuer le nombre de points (pixels) par ligne. Ainsi la résolution de l'image varie. L'image est ainsi mise sous la forme d'une matrice de "n" lignes et de "n" colonnes (n : nombre de points/ligne peut varier entre 5 000 et 20 000) de laquelle il est possible des sous matrices (zones) de 512 par 512 points. De cette façon, avec le même facteur de grossissement électrique du MEB, on peut obtenir, de manière informatique, différents grossissements. D'où on l'appelle donc zoom informatique. Figure 5.

Toutefois, plus le zoom informatique est important (la vitesse de balayage diminue ou la fréquence d'échantillonnage augmente), plus l'image obtenue est dégradée. Cette dégradation de la qualité des images impose des restrictions dans l'utilisation de ce zoom [12].

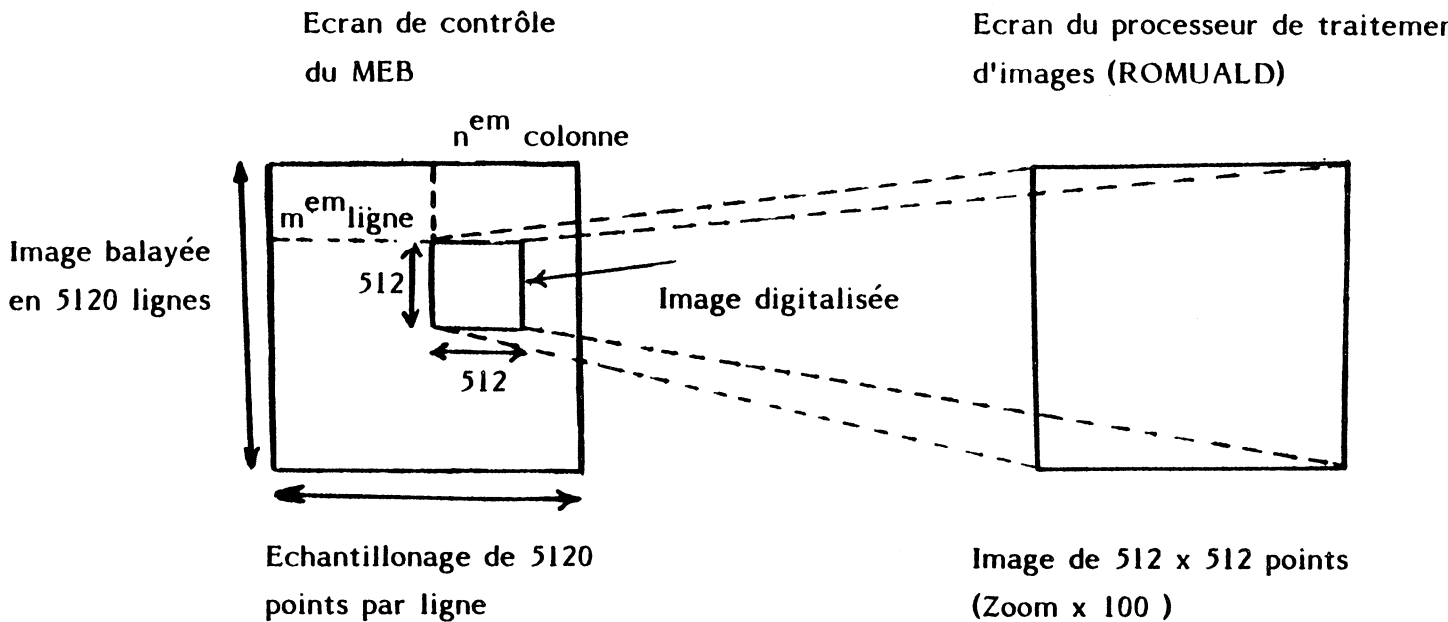


Figure 5 - Zoom informatique (100) sur l'image de microscope

II.4.3. AMELIORATION DE LA QUALITE DES IMAGES

Les images saisies lors des expériences sont relativement bruitées. L'origine des bruits n'est pas facile à déterminer. Cependant, les différents paramètres du microscope peuvent intervenir dans ces déformations[12]. Nous avons tenté d'améliorer, de façon logicielle, la qualité des images. Le traitement effectué consiste à :

- . appliquer des filtres médians[12] ,
- . lisser l'image par un filtre pass-bas à deux dimensions

II.4.3.1. La première solution consiste à effectuer deux filtres médians successifs sur l'image d'origine :

- a) un filtre médian réalisé sur une fenêtre verticale pour redresser les bords horizontaux déformés ;
- b) un filtre médian réalisé sur une fenêtre horizontale qui permet d'éliminer les ondulations sur les bords verticaux.

Ce programme apporte des améliorations sensibles à la qualité des images. Il a toutefois l'inconvénient de diminuer les contrastes.

II.4.3.2. Lissage de l'image (30) , (31)

Afin de diminuer les bruits des images, on peut aussi effectuer une autre méthode :
lisser l'image par un filtre pass-bas à deux dimensions.

Ceci est une fonction simple dont le principe est le suivant :

- . pour chaque pixel, prendre une fenêtre de dimension 3 x 3 centré sur ce point ;
- . calculer la valeur moyenne de ces 9 points ;
- . remplacer la valeur du pixel (point central) par la valeur moyenne.
- . passer au pixel suivant.

II.4.4. COMPACTAGE DE L'IMAGE

Le niveau de gris de chaque point de l'image origine est codé sur 8 bits (256 niveaux).

Il est intéressant de réduire la taille mémoire des images, pour les raisons suivantes :

- diminuer l'espace mémoire nécessaire de stockage des informations,
- diminuer les temps de calcul et de traitement (P. ex. le temps de :
 - . transfert des images du ROMUALD sur un mémoire de masse,
 - . correction des déformations).
- on ne s'intéresse pas en général à une mesure quantitative de potentiel de chaque point, mais à une étude qualitative:
 - . soit on veut la valeur logique des connexions métalliques (la valeur '1' ou '0' dans analyse logique).
 - . soit on est intéressé à une étude topologique du circuit (P. ex. détection des contours, ou détection différents niveaux du circuit).

Cette réduction peut être effectuée de deux façons différentes :

- en diminuant le nombre de pixels de l'image
- en diminuant le nombre de niveaux de gris distingués par pixel.

La deuxième méthode est préférable à la première qui conduirait à une diminution de la résolution de l'image.

Réduire la taille des images nécessite donc de réduire le nombre de bits/pixel.

Cette solution nécessite une opération de seuillage sur les images saisies (analyse de l'histogramme des niveaux de gris) (12).

II.4.5. BINARISATION DES IMAGES

Dans ce projet nous nous sommes intéressés à une étude topologique du circuit afin de corriger les déformations des images issues de MEB. Pour ce faire, il faut extraire (distinguer) les images des petits rectangles en aluminium (des plots ou repères) du reste de l'image du circuit (substrat). Ces repères sont déposés sur le substrat et en dehors de la partie fonctionnelle du C.I. Il est donc nécessaire de définir deux états différents : un pour des plots et l'autre pour le substrat.

L'expérience montre que pour des circuits non passivés (ou dépassivés) des bandes d'Alu apparaissent blanches et le substrat reste gris (II.4.1.). Ainsi on peut binariser facilement des zones de l'image contenant ces repères blancs. Pour cela, il faut déterminer un seul niveau de seuil qui sépare les deux régions. La méthode plus simple et plus rapide est d'utiliser le programme réticule qui est exécutable sur ROMUALD. Ce programme permet de relever le niveau de gris de n'importe quel point de l'image (repéré par le centre de réticule) affiché sur l'écran de ROMUALD [12].

Après avoir déterminé cette valeur de seuil, on binarise l'image à l'aide de programme de binarisation qui est aussi exécutable sur ROMUALD [30], [31]. L'image résultante est alors mémorisée sous la forme d'une suite de bits : si le ième pixel de l'image est blanc (sur plot) alors le ième bit de cette suite vaut '1', sinon il vaut '0' (ces deux valeurs utilisées ici pour la description topologique du C.I. n'ont rien à voir avec des valeurs '0' et '1' des connexions utilisées en analyse logique du CI. En effet dans l'étude topologique présente, le CI n'est pas alimenté).

La taille mémoire nécessaire pour stocker cette image binaire est alors 8 fois plus petite que celle nécessaire pour l'image origine.

Afin d'obtenir une valeur de seuil plus précise et donc une image binaire plus nette, il est préférable d'effectuer un (ou plusieurs) lissage (s) sur l'image origine avant la binariser.

Remarque

Des images binarisées par ROMUALD sont compactées et chaque pixel est codé sur un seul bit. Afin de faire des calculs nécessaires (p. ex. correction des déformations), il faut les transférer sur une mémoire masse du système informatique. Pour ce faire, il faut d'abord décompacter les images et convertir leurs valeurs binaires aux codes ASCII correspondant. Dans cette transformation,

la valeur '1' (blanc) devient 'AA' et la valeur '0' change à '55'. Nous avons donc écrit un programme qui reconvertit l'image ainsi obtenue à une image codée sur un seul bit, identique à l'image avant le transfert.

II.5. LES APPLICATIONS DU MEB

Le MEB est surtout bien adapté à l'analyse du mauvais fonctionnement d'un circuit qui peut avoir trois sources principales [13] :

- . les erreurs de conception
- . les défauts de fabrication
- . les défaillances en utilisation

Pour certaines applications, le CI n'est pas alimenté (le contraste de potentiel n'est pas utilisé). Pour d'autres, il est observé et analysé en fonctionnement.

II.5.1. CARACTERISATION

Elle consiste à étudier des semi-conducteurs afin de mettre au point des technologies nouvelles. Le MEB permet de mesurer précisément différents paramètres physiques tels que la profondeur de la jonction, longueur de diffusion des porteurs, durée de vie, le doppage etc... [13] ,[36].

II. 5.2. RECHERCHE DE FONCTIONNEMENT LIMITE

Le circuit est alimenté. La technique s'effectue en 2 Phases :

- a) Détermination des frontières de fonctionnement du circuit en fonction de certains paramètres. Il est nécessaire simplement de disposer d'un critère de fonctionnement/non fonctionnement du CI.
- b) localisation du point géographique cause du passage fonctionnement/non fonctionnement à l'aide du faisceau d'ē. [13].

II.5.3. RESTRUCTURATION [13]

2 types de restructuration peuvent être effectués :

- une restructuration temporaire qui sert à aider un test (CI alimenté)
- une restructuration définitive qui sert à isoler une zone défectueuse afin d'améliorer le rendement de production (CI non alimenté).

II.5.4. "REVERSE ENGINEERING"

Cette application consiste à analyser un circuit à structure inconnue afin de retrouver ses schémas électriques, logique etc... Le MEB peut alors être utilisé pour faciliter la compréhension du fonctionnement du circuit [13].

II.5.5. INSPECTION - CONTROLE DE QUALITE

Le CI n'est pas alimenté. Un opérateur observe la surface du circuit sur l'écran du MEB afin de détecter certains défauts de fabrication tels que des coupures de lignes, des courts-circuits, des rétrécissements de métallisation etc... [13].

II.5.6. MISE AU POINT DE CIRCUITS PROTOTYPES

Il s'agit de l'une des applications les plus importantes du MEB. Ce dernier fonctionnant en contraste de potentiel permet de recueillir les réponses du circuit en certains endroits clés pour différentes séquences de test, préalablement définies par le concepteur [19]. Cette application est considérablement facilitée si des outils CAO sont disponibles. La méthode s'effectue en 2 étapes [13] :

- a) Détection de défaut de fabrication (étapes préliminaires à toute mise au point)
- b) Détection des défauts de conception (mis au point probablement dite) par des méthodes spécifiques.

Les méthodes pouvant être utilisées pour réaliser ces opérations sont présentées en [20] , [13].

II.5.7. ANALYSE DE DEFAILLANCES

Elle peut avoir lieu à 2 moments de la vie d'un CI [13] , [19] :

- Après fabrication afin de localiser puis examiner des défauts de fabrication.
- Après défaillance afin de localiser puis examiner des défauts se produisant pendant la vie du circuit.

Elle est réalisée en 2 phases :

1) Localisation du défaut

Le MEB est utilisé en contraste de potentiel (circuit alimenté) pour localiser le défaut à l'intérieur du circuit intégré.

2) Diagnostic

C'est une analyse classique qui consiste à rechercher du procédé physico-chimique entraînant la défaillance (circuit non alimenté).

En [33] ,[32] ,[21] sont données les différentes méthodes qui peuvent être employées pour la phase de localisation du défaut.



CHAPITRE III

METHODES D'OBTENIR LES POINTS DE REPERES

SUR L'IMAGE D'UN CIRCUIT INTEGRE

III.1. INTRODUCTION

Comme nous l'avons déjà indiqué, pour étudier le comportement interne d'un circuit intégré, le concepteur n'a pas besoin d'étudier en général tous les éléments du C.I. Par contre, il est intéressant d'étudier le comportement d'un circuit ; en fonctionnement sous le MEB, en quelques points de test prédéfinis par le concepteur (2.3.3.). On définit donc une petite zone d'analyse autour de chaque point de test (contenant ce dernier aussi), préalablement choisi. Pour ce faire, le concepteur doit être capable de trouver les positions exactes de ces points (appelés les points pratiques) sur le circuit sous test à partir de leurs coordonnées sur le masque et vice-versa (les points définis sur le masque sont appelés points théoriques). On a donc besoin de fonctions de transformation binivoques qui établissent la correspondance entre les points de l'image et ceux du masque.

Les résultats obtenus à partir des fonctions de transfert sont :

a) soit les points de circuit dont on veut vérifier les états logiques (p. ex. entrée/sortie d'une porte ou le collecteur d'un transistor) ;

Dans ce cas l'utilisateur aura la possibilité d'utiliser le MEB comme un analyseur logique. A partir des fonctions de transfert, le système de Traitement Informatique détermine l'adresse de(s) point(s) demandé(s) et le système de commande du faisceau positionne le faisceau directement sur ces points (sans balayage du C.I.) afin de relever leurs valeurs logiques. Si le microscope ne possède pas un système de commande de positionnement de faisceau (comme le MBE que nous avons utilisé) ; les fonctions de transfert permettent d'extraire facilement les valeurs logiques des points définis, à partir d'une matrice numérisée (une zone de C.I. balayée par le faisceau et numérisée par le système TII : ROMUALD).

b) soit les adresses des zones (fenêtres) contenant les points de test prédéfinis, mentionnés en 'a' ci-dessus (mode adressage des zones, voir II.3.1.b)

III.2. TRANSFORMATION ENTRE LES SYSTEMES DES COORDONNEES

Pour trouver la position exacte d'un point prédéfini du masque sur l'image du C.I. sous test et vice-versa ; il faut transformer les systèmes de coordonnées du masque et du C.I., monté sur la platine-porte objet du MEB. De plus, il sera tenu compte de la déformation de l'image par rapport au masque et des différences de grossissement.

Pour ce faire, nous avons considéré quatre points de repères appelés A, B, C, D et constituant un rectangle sur le masque.

Par une méthode logicielle expliquée ci-dessous nous retrouvons leurs images, sur le C.I. sous test, appelées A', B', C' et D' (leurs coordonnées numériques sous forme de deux nombres entiers indiquant le numéro de ligne balayée et le numéro de point dans la ligne pour chaque point de repère) fig. 6.

III.3. POINTS DE REPERE

III.3.1. GENERALITES

Comme nous l'avons vu en section II.4.1. pour un circuit non alimenté et non passivé (ou de-passivé) on obtient une bonne image de la topologie du circuit. Dans ce cas, le niveau Alu apparaît très clair (blanc) et distinct par rapport au reste du circuit qui a un gris quasiment uniforme. Ce phénomène rend possible, facilement le seuillage et la binarisation de l'image du circuit ainsi obtenue.

Nous avons donc diffusé, aux quatre coins de la puce, quatre petits carrés identiques en Alu sur le substrat au dehors du circuit (pour pouvoir les distinguer facilement) de telle sorte qu'ils constituent un rectangle. On a connecté tous les repères à la mass (zéro volt) Fig. 6 ci-dessous.

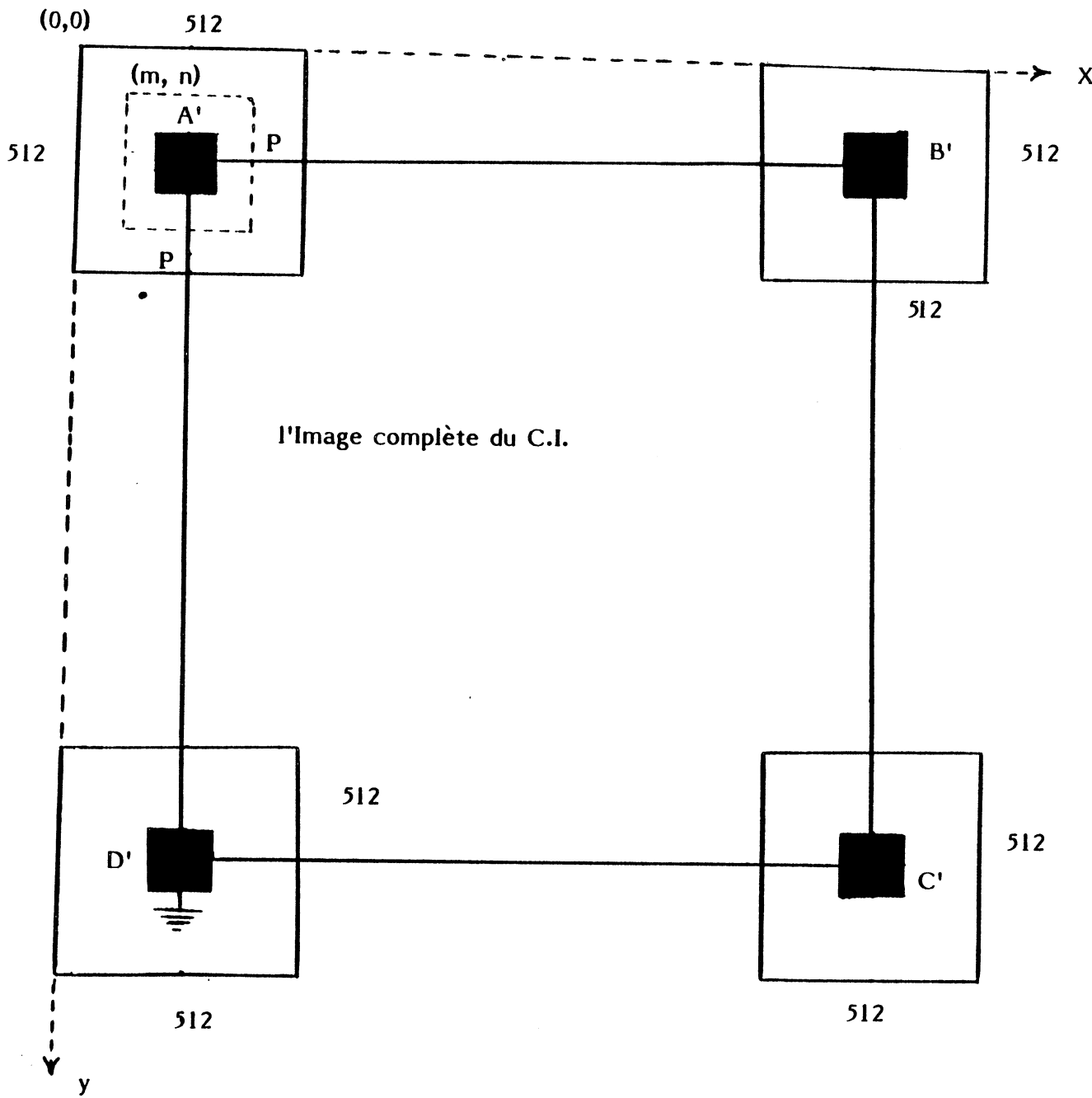


Fig. 6 rectangle englobant et des repères en Alu.

Après avoir déposé le circuit dans la chambre à vide du MBE, on choisit le grossissement du microscope de telle façon que tout le circuit (y compris les carrés de repère) soit visualisé sur l'écran du MBE. Puis, on définit quatre fenêtres (zone) de ROMUALD (image de 512 x 512 pixels) sur les quatre coins de l'image du C.I. autour des repères A', B', C' et D'. Ensuite on saisit et on numérise sur 8 bits respectivement ces zones l'une après l'autre (ROMUALD ne peut saisir et numériser qu'une seule fenêtre à la fois).

A l'aide de la machine ROMUALD, nous faisons les opérations suivantes sur chaque segment (fenêtre) saisi :

- a) Sachant que ROMUALD est réalisé et programmé au départ pour saisir des images de dimensions 512 x 512 points, afin de réduire le temps de calcul sur les segments saisis, nous avons écrit un programme qui permet d'extraire une matrice plus petite (p. ex. 200 x 200) englobée dans l'image numérisée originale (512 x 512). Figure 7.

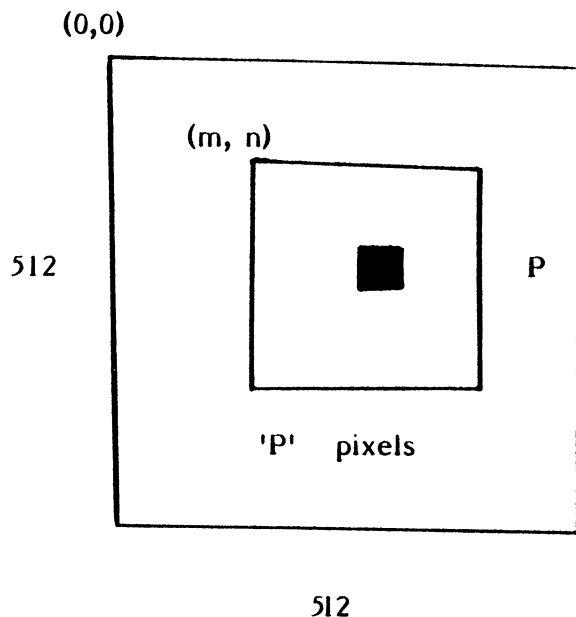


Fig.7 - Une fenêtre et une matrice englobée contenant un repère
m : n° de lignes, n : n° de colonnes dans la fenêtre

- b) Pour réhausser les images et réduire les bruits, on fait un ou plusieurs lissages sur chacune de ces nouvelles petites fenêtres.
- c) On détermine un niveau de seuil et puis on binarise l'image en cours. Ainsi on affecte au substrat la valeur '0' et au niveau Alu (repère) la valeur '1'.
- d) Pour déterminer le centre de chaque carré de repère (c-à-d. les points repères A', B', C' et D') et effectuer les autres calculs nécessaires, on transfère ces images binarisées sur la mémoire de masse d'un ordinateur.

III.4. METHODES DE DETECTION DES POINTS DE REPERE

III.4.1. METHODES AUTOMATIQUES (LOGICIELLE)

III.4.1.a. Première méthode - Corrélation

Pour déterminer les centres des carrés de repères (les points A', B', C' et D' en fig.6) on peut corrélérer ; d'une manière logicielle ; séparément chacune des images binaires obtenues en III.3.1. avec une image théorique prédéfinie. L'image théorique doit être une image binaire et parfaite, identique exactement en forme et en dimension à l'image des repères issue du MBE. Cette image de référence ; appelée "Template" ; est donc un simple carré, représenté par des valeurs '1' (sur les contours et à l'intérieur) entouré par un substrat représenté par '0'. Elle est obtenue d'une manière informatique. La dimension de ce carré est celle de l'image de carré du MBE qui est calculée facilement en donnant d'une part le grossissement du microscope et la dimension métrique du carré sur la puce et d'autre part le temps de balayage ligne et la fréquence d'échantillonnage.

La méthode de corrélation est utilisée très fréquemment pour étudier des problèmes de similarité et détecter une figure prédéfinie dans une image disponible ("Template Matching")[4] , [5] , [6].

Cette méthode est assez ancienne et connue en traitement image et plus généralement en traitement du signal. On peut trouver dans la littérature beaucoup d'articles sur différentes méthodes de corrélation et pour différents usages [8] , [9] , [1]. Le principe de corrélation en traitement d'image est de balayer progressivement une image de référence, ("Template"), dans une image connue et plus grande afin de détecter l'image de référence dans celle-ci (corrélation en deux dimensions). Pour ce faire, on calcule pour chaque position de "Template" la valeur de corrélation normalisée entre les deux images : l'image de référence

(qui est toujours constante) et la partie de la deuxième image recouverte par la première. La position dans laquelle on obtient un taux de corrélation maximum indique la coïncidence du "Template" avec son image dans la fenêtre recherchée [3], [4], [8], [2], [6], [5], [25], [15]. On a donc trouvé la position (coordonnées) d'un repère prédéfini dans une image générale (avec une tolérance acceptable et prédéfinie).

La fonction de corrélation en deux dimensions, pour deux images numérisées est définie par :

$$R(u,v) = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K F_1(j,k) F_2(j+U,k+v)}{[\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K F_1^2(j,k)]^{1/2} [\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K F_2^2(j+u,k+v)]^{1/2}} \quad \text{III.1}$$

Pour $0 \leq U \leq M - J$ et $0 \leq v \leq N - K$

où F_1 est l'image de référence (fenêtre) avec les dimensions $J \cdot K$ et la surface $w (= J \times K)$ et F_2 la deuxième image (l'image de recherche) avec les dimensions $M \times N$ et la surface $S (M \gg J \text{ et } N \gg K)$; j, k sont des indices dans le $J \times K$ pixels fenêtre (F_1) situé dans le $M \times N$ pixels de recherche surface S . U et V représentent les coordonnées discrètes de la position F_1 dans F_2 . La figure 8 montre la relation entre la surface de recherche, S (image F_2) et la "Template" (image F_1 , ou fenêtre W).

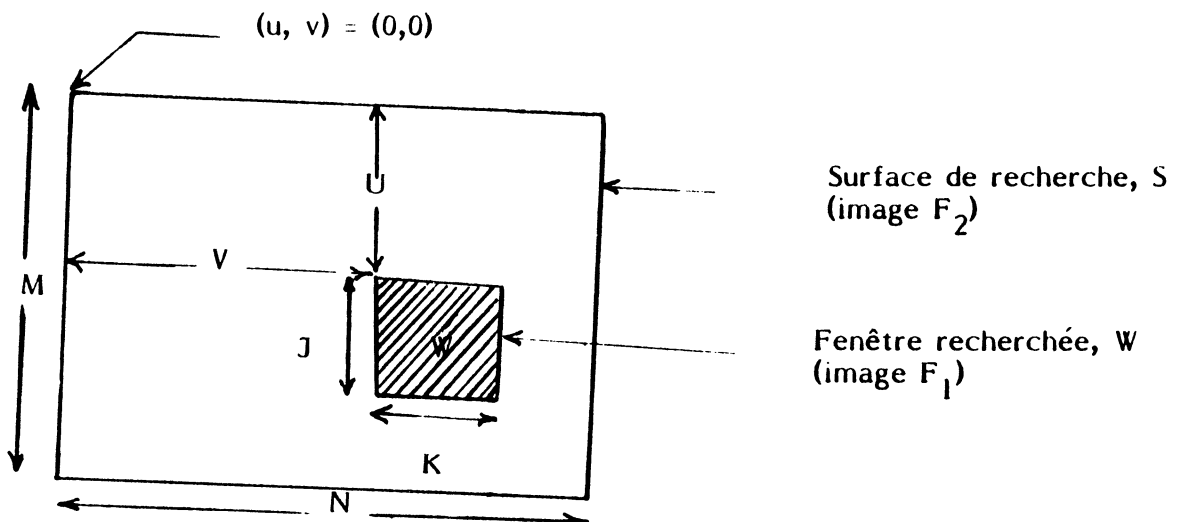


Figure 8

Le dénominateur de l'équation III.1 est un facteur de normalisation qui réduit les nombres de crêtes érronnées apparues en fonction de la corrélation [8] , [3]. les valeurs de R (u,v) sont comprises entre 0 et 1.

En général, la fonction de corrélation R (u,v) (III.1) doit être calculée pour tous les (M - J + 1) (N - K + 1) translations possibles de la fenêtre F₁ sur F₂ pour déterminer sa valeur maximale (comme la fig. 8 montre u et v peuvent varier entre ['0' et M - J] et ['0' et N - K] respectivement) [2] , [6].

Si les images utilisées en équation III.1 sont binaires et les valeurs de chaque bit (deux niveaux) sont ± 1, dans ce cas le dénominateur de cette équation est simplement JK. Donc l'équation normalisée pour la corrélation des deux images binaires devient :

$$R(u,v) = \frac{1}{JK} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K F_1(j,k) F_2(j+u, k+v) \quad \text{III. 2.a}$$

ou

$$R(u,v) = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K F_1(j,k) F_2(j+u, k+v) \quad \text{III.2.b}$$

Or la division par JK qui est un facteur d'échelle constant est arbitraire. En tenant compte de JK, R (u,v) dans l'équation III.2.a prend les valeurs entre 0 et 1 en l'échelon discrète de 1/JK. Dans le second cas, (équation III.2.b), R (u,v) prend des valeurs entières entre 0 et JK.

Dans un premier temps nous avons pensé utiliser cette méthode .

Cependant nous préférons abandonner cette méthode pour les raisons suivantes :

- I. Il existe deux problèmes essentiels avec cette méthode classique de corrélation :
 - a - la fonction de corrélation (Eq. III.1) peut être assez dilatée, rendant ainsi la détection de crête (c. à d. la coïncidence de fenêtre avec l'objet recherché) difficile [2] , [3] , [8]
 - b - le bruit résidant sur l'image F₂, issue de MBE ; peut masquer la crête de corrélation ou la transférer, donnant ainsi un résultat érronné [2] , [3] , [8] , [1] , [6].

2. Avec la technique de corrélation utilisée pour la détection d'objets, ("Template Matching") expliquée ci-dessus ; le problème essentiel est de pouvoir choisir une image de référence exactement identique en grossissement et en rotation avec l'objet recherché. En pratique on ne connaît pas à priori le grossissement de l'objet en question dans l'image de recherché F_2 ; et surtout sa direction. Ce problème impose donc de considérer et de tester plusieurs fenêtres ("Templates") pour compenser les changements de rotation et de grossissement de l'objet. Dans ce cas le programme devient long et lent. [2] , [3] , [15].

Selon les analyses précises que nous avons faites sur des images saisies, nous nous sommes aperçus qu'il existe d'une part une incertitude sur la valeur affichée du grossissement par le MEB ; et d'autre part une petite différence de grossissement dans les deux directions. En plus, à cause de la non linéarité du balayage du faisceau d'é, le grossissement (informatique) n'est pas linéaire et constant dans la direction horizontale. De ce fait un carré situé à la droite de la surface balayée devient un peu dilaté dans la direction horizontale (direction x sur l'écran de ROMUALD).

Des imperfections mentionnées sur le grossissement introduisent ainsi une erreur sur la dimension (calculée) du carré de référence utilisé pour la corrélation.

Cela provoque donc, des résultats incorrects lors de la corrélation.

Pour ces raisons, nous préférons utiliser la méthode expliquée ci-dessous, qui est indépendante des paramètres du MEB et du système de saisie (fréquence d'échantillonnage, nombre de points par ligne et surtout le grossissement affiché). En outre, son utilisation pour l'opérateur est plus rapide et plus facile par rapport au programme de corrélation. Ce programme détermine aussi les vrais facteurs du grossissement du microscope dans les deux directions ; appelées g_x et g_y (voir l'annexe).

Remarque :

En utilisant la méthode de corrélation statistique ; c'est à dire en considérant les propriétés statistiques des images F_1 et F_2 ; on améliore les résultats de la fonction de corrélation. En effet, cette méthode enlève les ambiguïtés sur la crête de fonction, et la courbe résultante devient plus pointue [2] , [3]. Mais dans ce cas l'algorithme nécessaire devient plus long ; de plus le problème du grossissement et de la rotation de l'image recherchée existe toujours.

III.4.1.b. Deuxième méthode

En général, on utilise la méthode de corrélation pour détecter des objets assez complexes dans une image. Or dans le cas actuel, les objets recherchés (les repères) sont des petits carrés. Ils ont donc une géométrie très simple et de ce fait facilement reconnaissables. De plus les images (fenêtres) contenant ces repères sont binaires, et les carrés de repères apparaissent blanc. Leur niveau de gris est donc différent ('1') par rapport aux points environnants (ayant avec le niveau de gris '0').

Ces deux propriétés particulières rendent d'une part possible la détection des centres des carrés (points de repères A', B', C' et D' en fig.6) et d'autre part facilite le calcul de leurs coordonnées.

L'algorithme utilisé est le suivant :

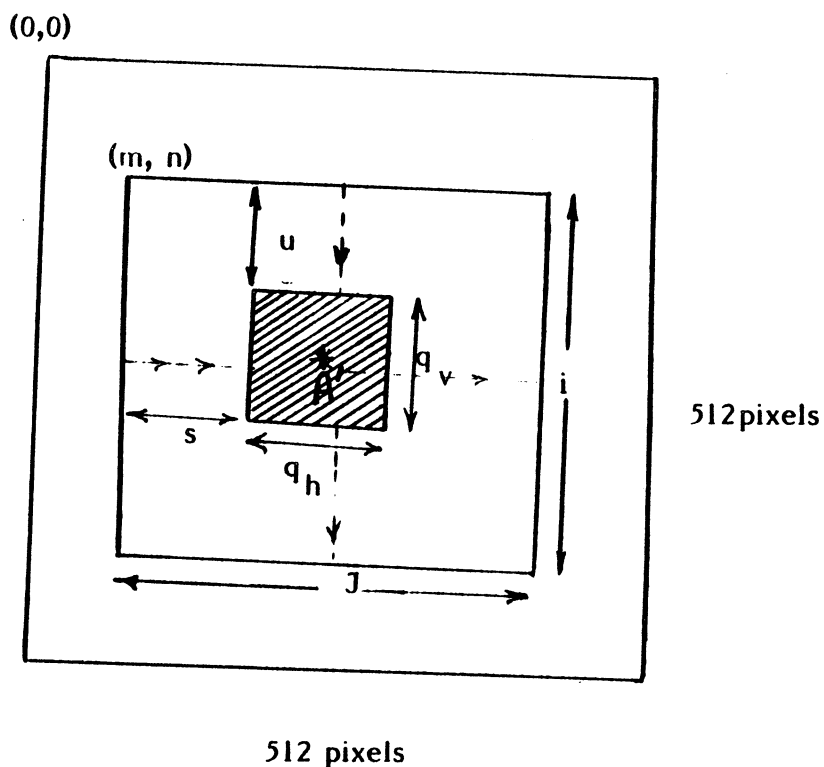


Fig. 9 - Les fenêtres utilisées en 2ème méthode

- 1) On lit le fichier d'images (qui est la sous-matrice située à l'adresse (m.n) dans la fenêtre de ROMUALD : 512 x 512 points) et on le transfère à un fichier binaire contenant des valeurs '0' et 1 (ou + 1 et - 1). On attribue des valeurs '1' au carré en Alu et '0' (ou - 1) aux environnants. A cette étape de transformation, on détermine les dimensions de cette fenêtre, c'est à dire i et j.
- 2) On parcourt le fichier ainsi obtenu, respectivement horizontalement (sur la ligne numéro i/2), et verticalement (sur la ligne numéro i/2). De cette façon, on détecte les contours du carré et on détermine ensuite les dimensions u, s, qh et qv (voir la fig.9)
- 3) On calcule alors les coordonnées du centre de repère en question (p. ex. le point A' en fig. 8) par rapport au point 0, 0) de fenêtre ROMUALD et ce, grâce aux équations suivantes (voir la fig.9)

$$XA' = m + s + q_h/2$$

III.3

$$YA' = n + u + q_v/2$$

- 4) Ces mêmes procédures sont répétées automatiquement pour les autres fichiers de repères et on détermine les coordonnées locales de leurs centres (point B', C' et D').
- 5) Finalement le programme calcule les coordonnées dans l'image complète du C.I. c'est à dire, par rapport aux coordonnées du MEB (voir la figure 6), en donnant les adresses des fenêtres ROMUADL sur l'image du C.I.

III.4.2. METHODE NON AUTOMATIQUE

L'opérateur visualise respectivement les 4 coins de l'image du C.I. sur l'écran de ROMUALD. Il affiche ensuite le curseur sur l'écran de ROMUALD et en superposant ceci sur le centre de chaque repère, il détermine l'adresse relative de chaque point. Ces adresses sont sous forme hexadécimale et indiquent le numéro de segment et le numéro d'offset. Ces informations seront alors transférées à un autre programme qui les convertira en deux nombres entiers indiquant le numéro de la colonne et celui de la ligne de ce point dans la fenêtre concernée. Après avoir déterminé les positions exactes des repères A', B', C' et D' (avec n'importe quelle méthode) on peut calculer les distorsions de l'image et les corriger.

Ce problème sera étudié par la suite.

Remarque

Dans les calculs décrits en III.4.1. nous n'avons pas considéré des déformations des petits carrés de repères, étant donné qu'ils sont situés dans le coins de l'image de C.I. Comme on le verra plus tard ils subissent moins de déformations.

CHAPITRE IV

CORRECTION LES DEFORMATIONS D'IMAGES



IV.1. ETUDE DES DEFORMATIONS DE L'IMAGE

En général, l'image issue du MEB et traitée par ROMUALD a subi des déformations qui peuvent être groupées en deux catégories :

- a) Celles provenant d'un montage imparfait du C.I. sur la platine porte-objet du MEB.
- b) Les autres sont dues aux imperfections du système optique et à la non linéarité du balayage du faisceau d'électrons du MEB qui produisent des aberrations optiques (distorsions géométriques). Nous étudierons ces distorsions par la suite.

IV.1.1. PROBLEME DU MONTAGE DU C.I. SOUS LE MEB

A cause de l'inclinaison et de l'imperfection du support de la puce et celle de la platine du MEB, l'image d'un rectangle sur le masque (comme le rectangle repère ABCD) devient en général un parallélogramme, au lieu d'un rectangle. En plus, l'ajustement imparfait de la platine et la rotation du C.I. sur la platine entraînent une nouvelle déformation (rotation) de ce parallélogramme par rapport à son original, c'est à dire le rectangle A B C D sur le masque. Selon l'inclinaison du circuit et la direction de rotation de la platine, le parallélogramme obtenu peut avoir un des 4 aspects de la figure 10.

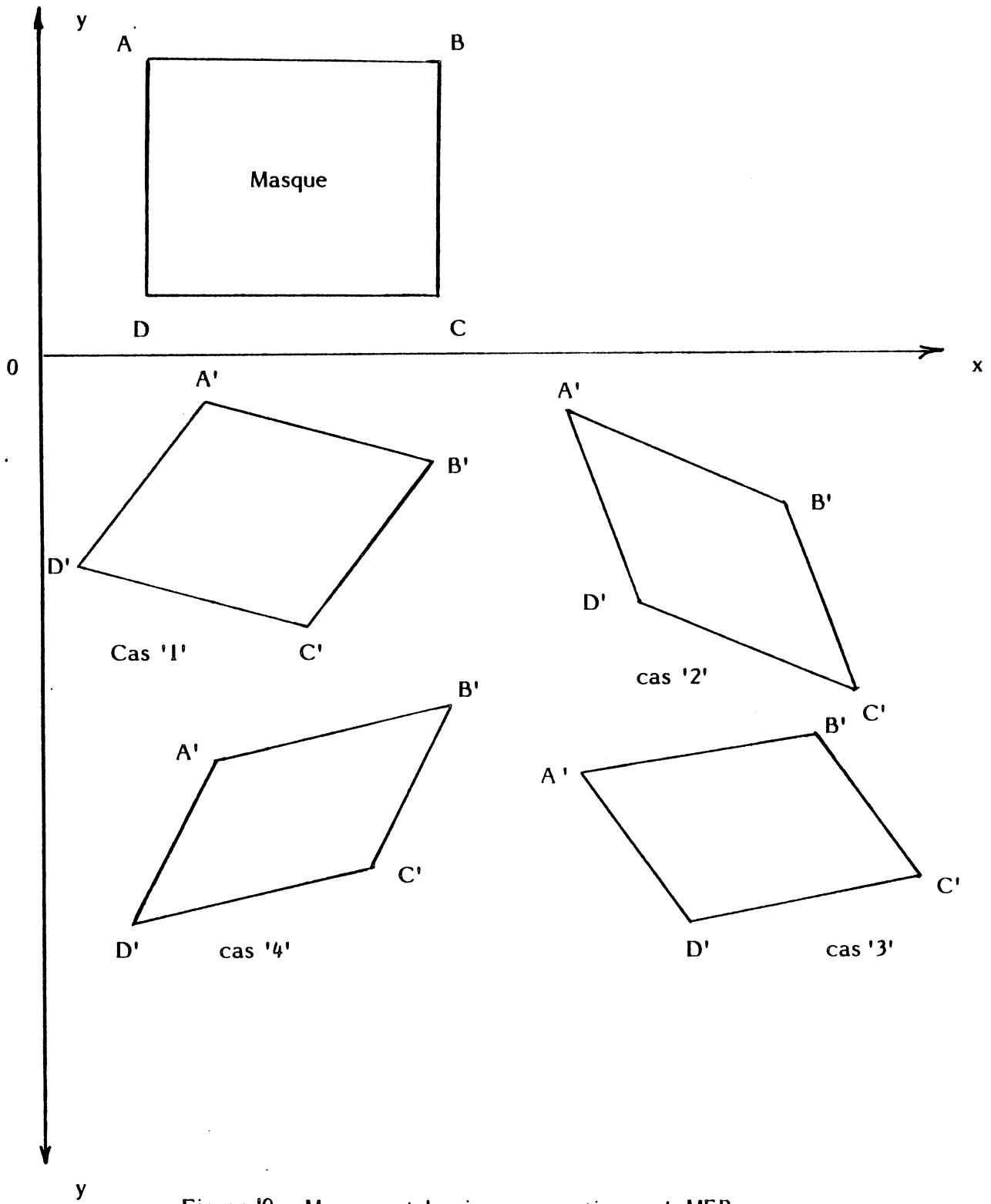


Figure 10 - Masque et les images pratiques du MEB
(abérations optiques ne sont pas considérés)

IV.1.2. ABERRATIONS OPTIQUES

Les imperfections du système optique du microscope et la non linéarité du balayage du faisceau d'électrons produisent des aberrations optiques (distorsions géométriques).

La figure 11 montre deux types de distorsions qu'on rencontre le plus souvent dans les outils optiques utilisant un système de balayage [2] , [38] , [17].

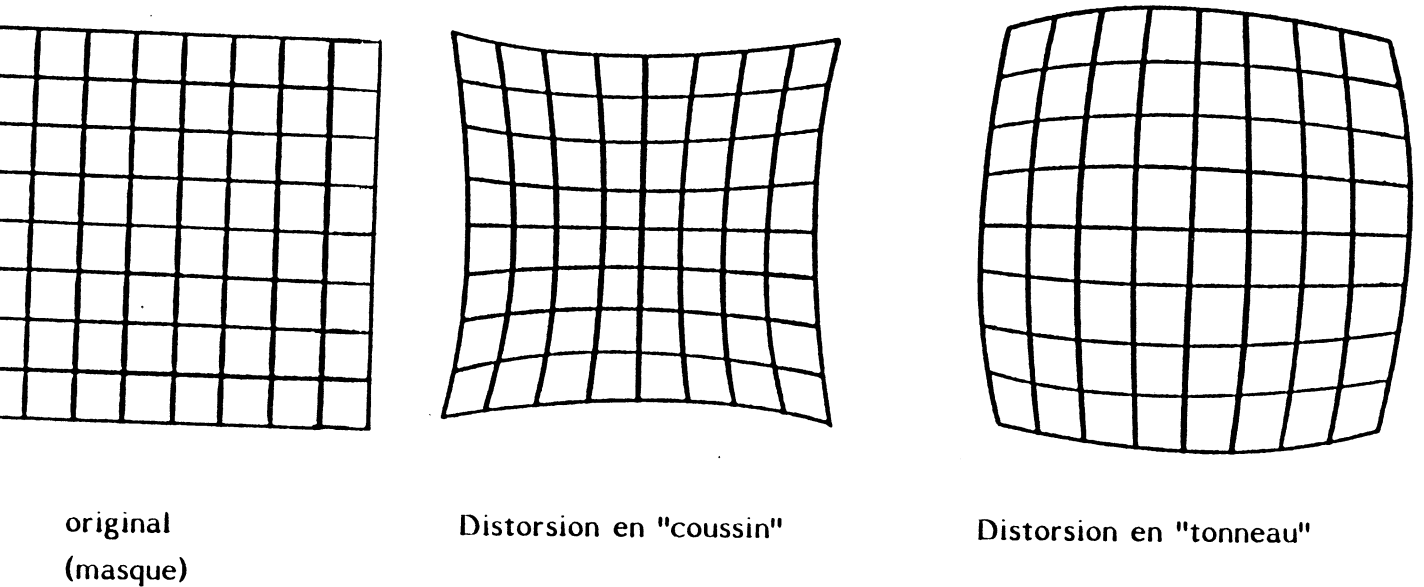


Figure 11 - Exemples de déformations optiques

Selon la figure 11, l'image d'un rectangle (comme le rectangle repère ABCD du masque) compte tenu de l'imperfection du support et de la puce, devient un parallélogramme déformé A' B' C' D', figure 12.

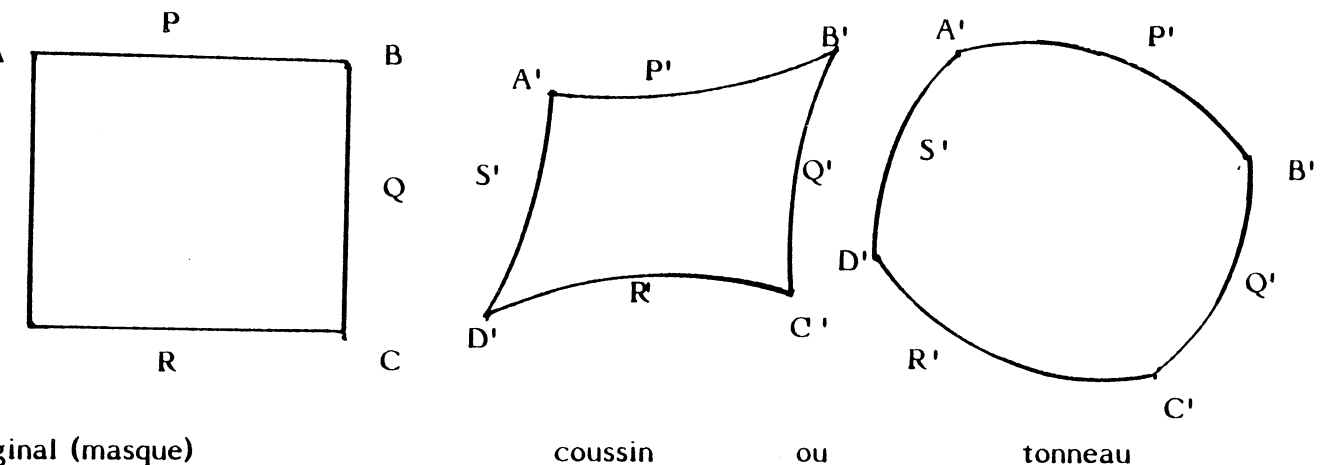


Figure 12 - Exemple de déformation du rectangle repère

La forme exacte dépend de l'inclinaison du circuit sur son support ainsi que du type d'aberration propre au microscope.

Nous n'étudierons pas dans ce projet l'origine de ces aberrations.

Pour mémoire, il faut noter qu'il existe deux types d'aberrations dues au système de lentilles et au système de balayage : aberration sphérique et aberration chromatique [37], [38], [39].

L'aberration sphérique est dominante quand la tension d'accélération du faisceau d'é est supérieure à 10 KV. Par contre avec de faibles tensions d'accélération, de l'ordre de quelques KV. (conditions remplies au cours de nos expériences) c'est l'aberration chromatique qui domine [16], [39].

Comme nous considérons toutes les déformations géométrique de l'image du C.I. et que nous les corrigeons ensemble, indépendamment de leur nature, l'étude de l'origine des causes d'aberrations de l'image n'est donc pas nécessaire.

Le problème essentiel consiste à trouver une méthode qui permet la correction des distorsions des images (fonctions de transfert).

Pour simplifier le problème on considère les distorsions précédentes séparément (distorsion dû au montage, et distorsion optique) ; ensuite nous les corrigeons indépendamment et par la méthode de superposition, on trouve alors l'image corrigée. Figure 13.c et Fig. 14.c.

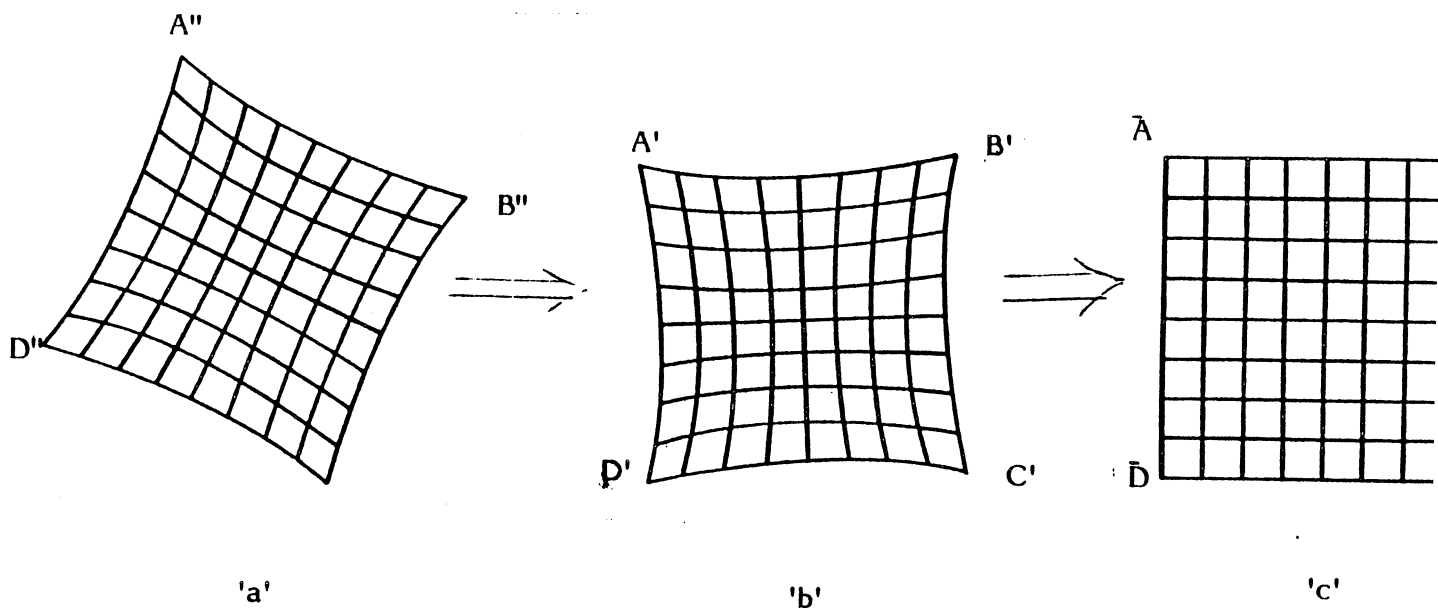


Figure 13 - Méthode de superposition pour le cas d'aberration coussin

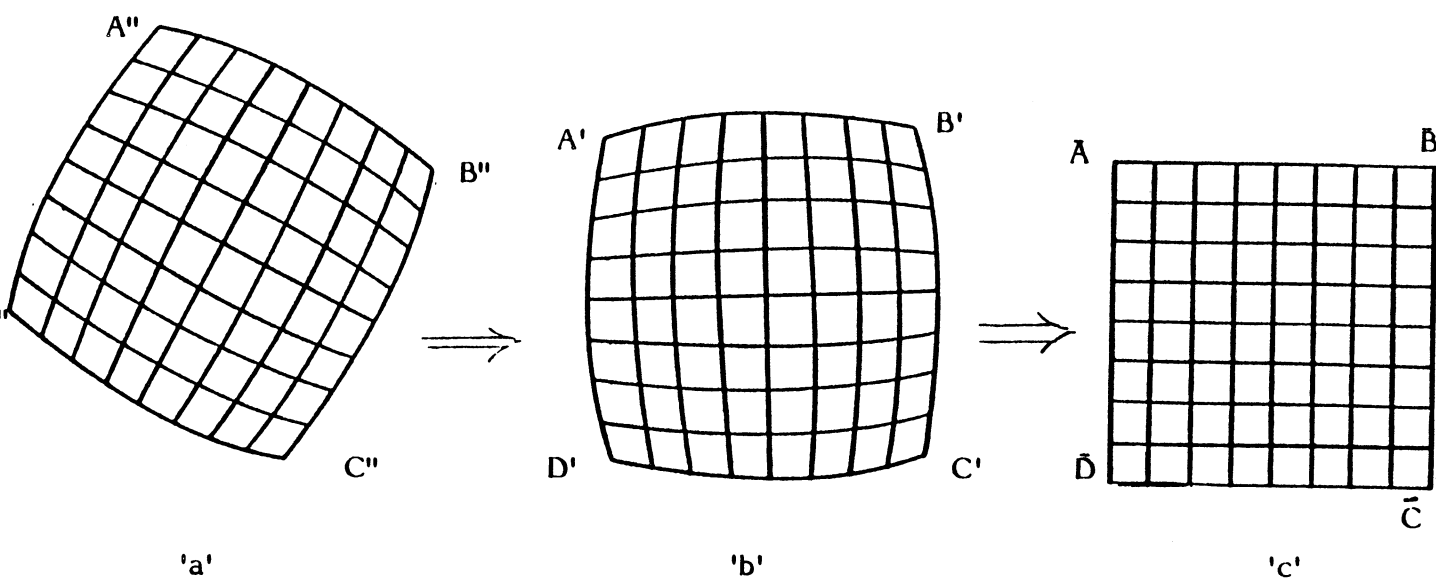


Figure 14 - Méthode de superposition pour le cas d'aberration
Tonneau

Dans les deux cas l'image 'C' est identique au masque au facteur d'échelle près.

IV.2. CORRECTION DES DEFORMATIONS DU MONTAGE

Comme on l'a vu, le parallélogramme $A' B' C' D'$ peut avoir une des quatre formes de la figure 10

Une étude de chaque cas donne les fonctions de transfert du point considéré.

IV.2.1.a Premier cas

Les caractéristiques du parallélogramme sont :

$YA' \leq YB'$ et $XD' \leq XA'$ Figure 15.

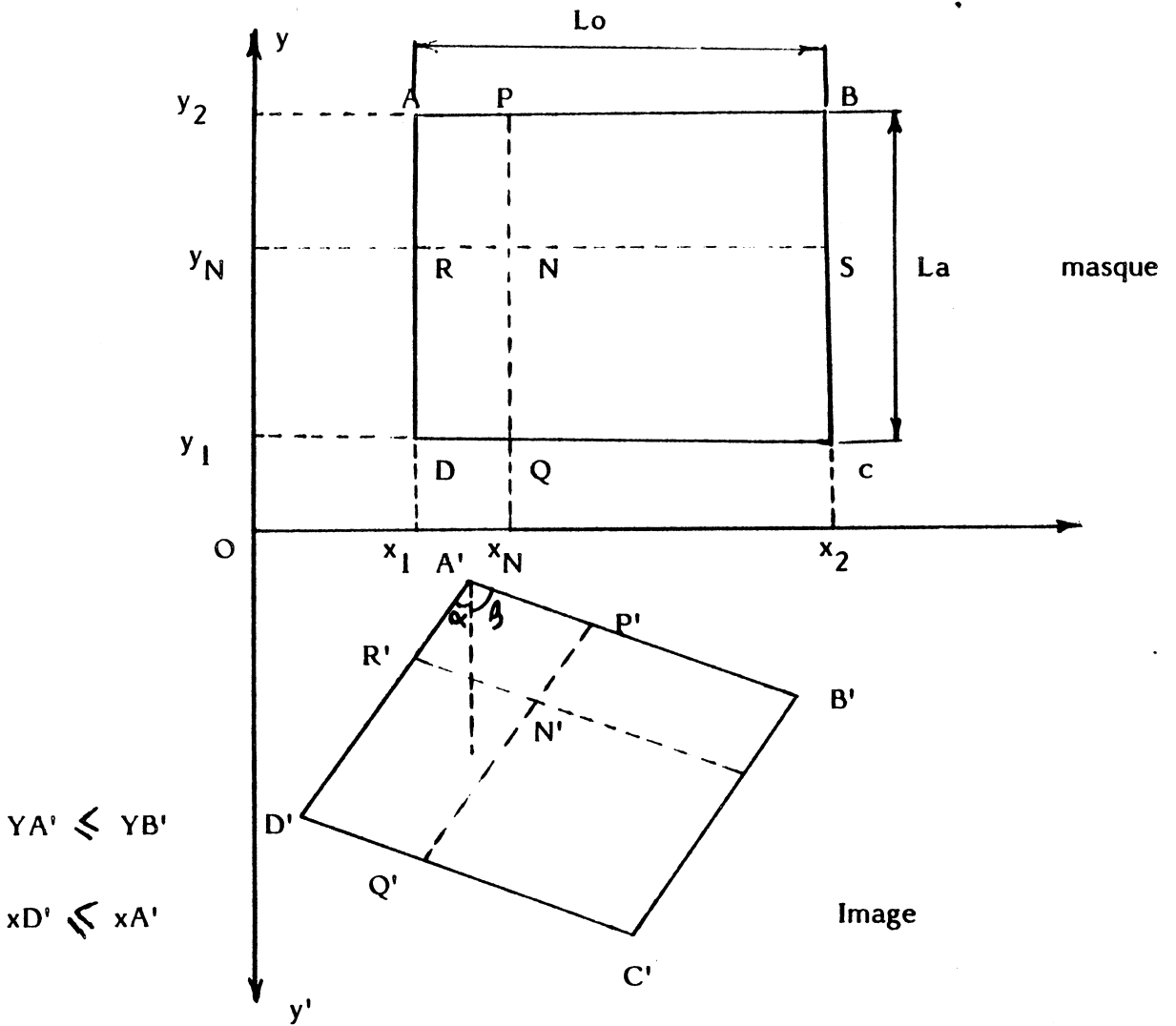


Figure 15

Les coordonnées d'un point N quelconque du masque étant connues, on cherche son image N' sur l'image du C.I. ; (XN' et YN' ;) et ce ; à partir des coordonnées des repères sur les deux images (A, B, C, D, A', B', C' et D') qui sont déterminées précédemment.

En utilisant la similitude entre les deux schémas, on peut écrire les relations suivantes :

$$\frac{AR}{AD} = \frac{A'R'}{A'D'} = \frac{P'N'}{P'Q'} = \frac{Y_2 - Y_N}{Y_2 - Y_1} \quad 4.1.$$

et

$$\frac{A'P'}{A'B'} = \frac{AP}{AB} = \frac{X_N - X_1}{X_2 - X_1}$$

./.

Pour simplifier ces équations, nous considérons le point D comme l'origine (référence). De ce fait, x_1 et y_1 prennent la valeur zéro :

x_1 et $y_1 = 0$. En notant respectivement La et Lo la largeur et la longueur du masque, les équations précédentes deviennent :

$$\frac{A'R'}{A'D'} = \frac{Y_A - Y_N}{La} \equiv b \quad 4.2.$$

$$\frac{A'P'}{A'B'} = \frac{x_N}{Lo} \equiv a$$

A partir de ces équations et en se référant à la figure 15, nous pouvons écrire les relations suivantes :

$$A'R' = P'N' = A'D' * b = b * [(x_{A'} - x_{D'})^2 + (Y_{A'} - Y_{D'})^2]^{1/2} \quad 4.3.$$

$$A'P' = R'N' = A'B' * a = a * [(x_{A'} - x_{B'})^2 + (Y_{A'} - Y_{B'})^2]^{1/2}$$

$$\alpha = \text{Arctg} \left(\frac{IX_{D'} - X_{A'} I}{IY_{A'} - Y_{D'} I} \right) \quad 4.4.$$

$$\beta = \text{Arctg} \left(\frac{XB' - X_{A'} I}{IY_{A'} - Y_{B'} I} \right)$$

$$\left| \begin{array}{l} XR' = X_{A'} - A'R' \text{ Sin } \alpha \\ YR' = Y_{A'} + A'R' \text{ Cos } \alpha \end{array} \right. \quad 4.5.$$

$$\left| \begin{array}{l} XN' = R'N' \text{ Sin } \beta + XR' \\ YN' = R'N' \text{ Cos } \beta + YR' \end{array} \right. \quad 4.6.$$

En conjuguant les équations 4.5 en 4.6 on trouve les coordonnées du point N' sur l'image de C.I. (en unité du système de traitement d'image, c'est à dire, no,de ligne et no,de colonne).

$$XN' = \text{Rond} [xA' + R'N' \sin \beta - A'R' \sin \alpha]$$

$$YN' = \text{Rond} [YA' + R'N' \cos \beta + A'R' \cos \alpha]$$

4.7.

IV.2.1.b Le cas inverse de IV.2.1.a

Dans ce cas on résout le problème inverse c'est à dire qu'étant donné les coordonnées d'un point quelconque N' sur l'image déformée du MEB, il faut déterminer la position du point correspondant sur la masque (point N fig. 15).

On détermine ensuite les angles α et β . A partir des équations 4.7 qui donnent les coordonnées N', les équations suivantes sont obtenues :

$$R'N' \sin \beta - A'R' \sin \alpha = xN' - xA'$$

$$R'N' \cos \beta + A'R' \cos \alpha = YN' - YA'$$

on résout ces équations pour les variables inconnues A'R' et R'N', on obtient :

$$A'R' = \frac{(YN' - YA') \sin \beta + (xA' - xN') \cos \beta}{\sin (\alpha + \beta)}$$

$$R'N' = \frac{(YN' - YA') \sin \alpha - (xA' - xN') \cos \alpha}{\sin (\alpha + \beta)}$$

Etant données :

$$A'D' = [(xA' - xD')^2 + (YA' - YD')^2]^{1/2}$$

$$A'B' = [(xA' - xB')^2 + (YA' - YB')^2]^{1/2}$$

$$b \equiv \frac{A'R'}{A'D'} \quad , \quad a \equiv \frac{R'N'}{A'B'}$$

On peut écrire :

$$AP = a * AB = a * (x_2 - x_1)$$

$$xP = xN$$

$$xN = xA + AP = xA + a * (x_2 - x_1)$$

$$AR = b \cdot AD = Y_2 - Y_N$$

$$Y_N = Y_R = Y_2 - AR = Y_2 - b(Y_2 - Y_1)$$

$$\left| \begin{array}{l} x_1 = x_D = 0 \\ y_1 = Y_D = 0 \end{array} \right. \quad \text{Référence}$$

$$x_2 = L_0 \text{ et } Y_2 = L_a$$

On obtient finalement :

$$x_N = a \cdot L_0$$

4.8

$$Y_N = (1 - b) \cdot L_a$$

IV.2.2.a Deuxième cas

Dans ce cas, caractéristiques sont : $Y_{A'} \leq Y_{B'}$ et $x_{D'} \geq x_{A'}$ (Fig. 16)

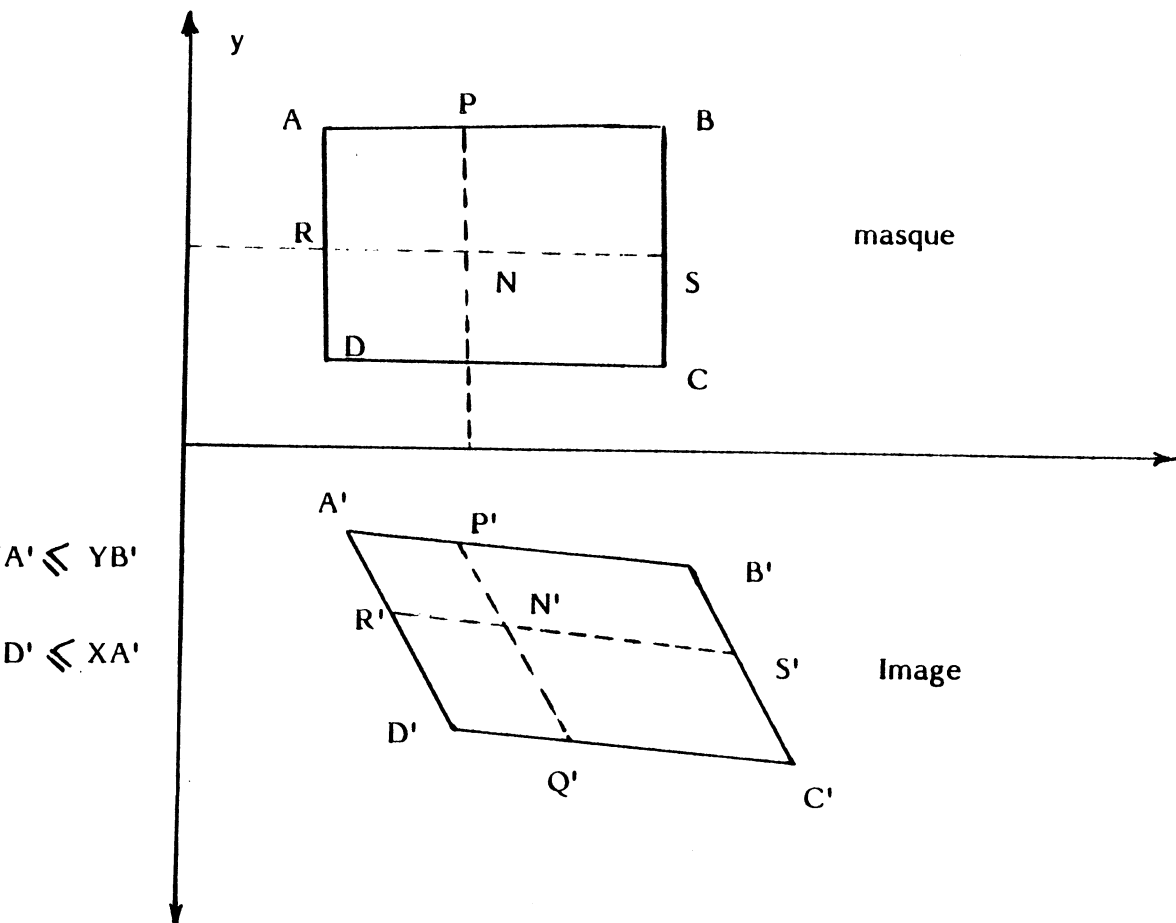


Figure 16

Les paramètres a , b , $A'R'$, $A'P'$, α et β sont définis et calculés conformément au 1er cas, mais les autres paramètres sont modifiés de la manière suivante (référant à la fig. 16) :

$$XR' = XA' + A'R' \sin \alpha$$

$$YR' = YA' + A'R' \cos \alpha$$

$$XN' = XR' + R'N' \sin \beta$$

$$YN' = YR' + R'N' \cos \beta$$

De ces deux systèmes d'équations on déduit :

$$XN' = \text{Rond} [XA' + R'N' \sin \beta + A'R' \sin \alpha]$$

$$YN' = \text{Rond} [YA' + R'N' \cos \beta + A'R' \cos \alpha]$$

4.9

IV.2.2.b. Le cas inverse de IV.2.2.a

Les paramètres a , b , α et β sont identiques à ceux obtenus en 4.2 et 4.4, grâce aux équations 4.9. On calcule :

$$A'R' = \frac{(YN' - YA') \sin \beta + (XA' - XN') \cos \beta}{\sin (\beta - \alpha)}$$

$$R'N' = \frac{(YA' - YN') \sin \alpha + (XN' - XA') \cos \alpha}{\sin (\beta - \alpha)}$$

A partir de $A'R'$ et $R'N'$, on détermine les paramètres : α , β , a , b , $A'D'$ et $A'B'$.

Conformément au 1er cas, on obtient finalement :

$$XN = \text{Rond} [x_1 + a (x_2 - x_1)]$$

$$YN = \text{Rond} [Y_2 - b (Y_2 - Y_1)]$$

En considérant $Y_1 = 0$ et $x_1 = 0$, on obtient finalement :

$$XN = a \cdot L_0$$

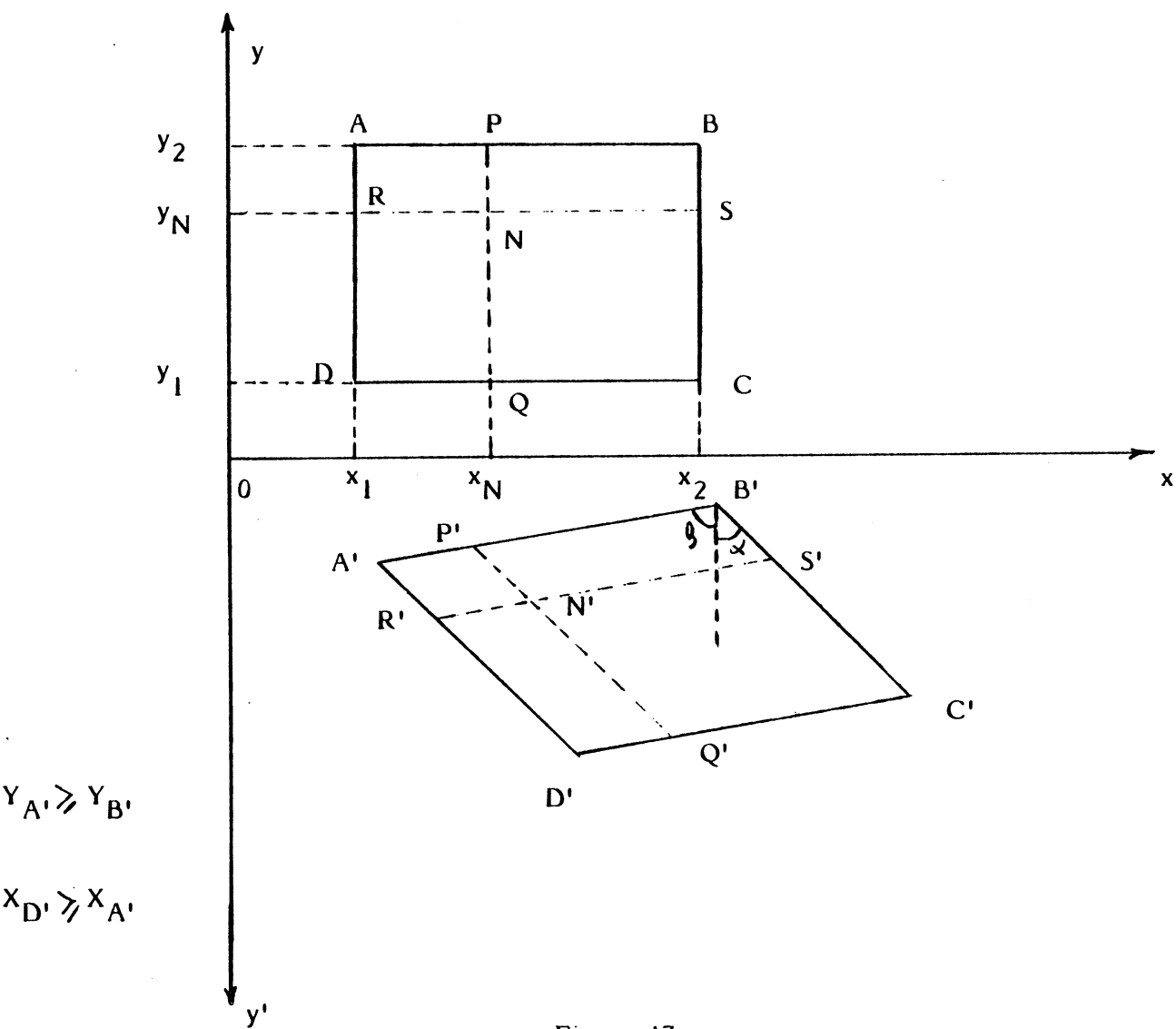
4.10

$$YN = (1 - b) \cdot L_a$$

IV.2.3.a Troisième cas

Dans ce cas, les caractéristiques du parallélogramme de repère sont :

$Y_{A'} > Y_{B'}$ et $x_{D'} > x_{A'}$. Fig. 17



Comme dans les cas précédents, on calcule les paramètres a , b , α , β , $A'R'$ et $A'P'$. La figure 17 montre :

$$XR' = XA' + A'R' \sin \alpha$$

$$YR' = YA' + A'R' \cos \alpha$$

et

$$XN' = XR' + R'N' \sin \beta$$

$$YN' = YR' - R'N' \cos \beta$$

De ces deux systèmes d'équations on déduit finalement :

$$XN' = \text{Rond} [XA' + R'N' \sin \beta + A'R' \sin \alpha]$$

4.11

$$YN' = \text{Rond} [YA' - R'N' \cos \beta + A'R' \cos \alpha]$$

IV.2.3.b Le Cas inverse de IV.2.3a

A partir des équations 4.11 nous calculons $A'R'$ et $R'N'$

$$A'R' = \frac{(YN' - YA') \sin \beta + (XN' - XA') \cos \beta}{\sin (\alpha + \beta)}$$

$$R'N' = \frac{(XN' - XA') \cos \alpha - (YN' - YA') \sin \alpha}{\sin (\alpha + \beta)}$$

et ensuite on manipule $A'D'$, $A'B'$, a et b

On obtient finalement :

$$xN = \text{Rond} [x_1 + a (x_2 - x_1)]$$

$$YN = \text{Rond} [Y_2 - b (Y_2 - Y_1)]$$

Pour le cas particulier $x_1 = y_1 = 0$:

$$x_N = a \cdot L_o \quad (L_o = x_2 : \text{Longueur de C.I.})$$

$$y_N = (1 - b) \cdot L_a \quad (L_a = Y_2 : \text{Largeur de C.I.})$$

IV.2.4.a Quatrième cas

Dans ce dernier cas on a $Y_{A'} \gg Y_{B'}$ et $x_{D'} \leq x_{A'}$

Figure 18

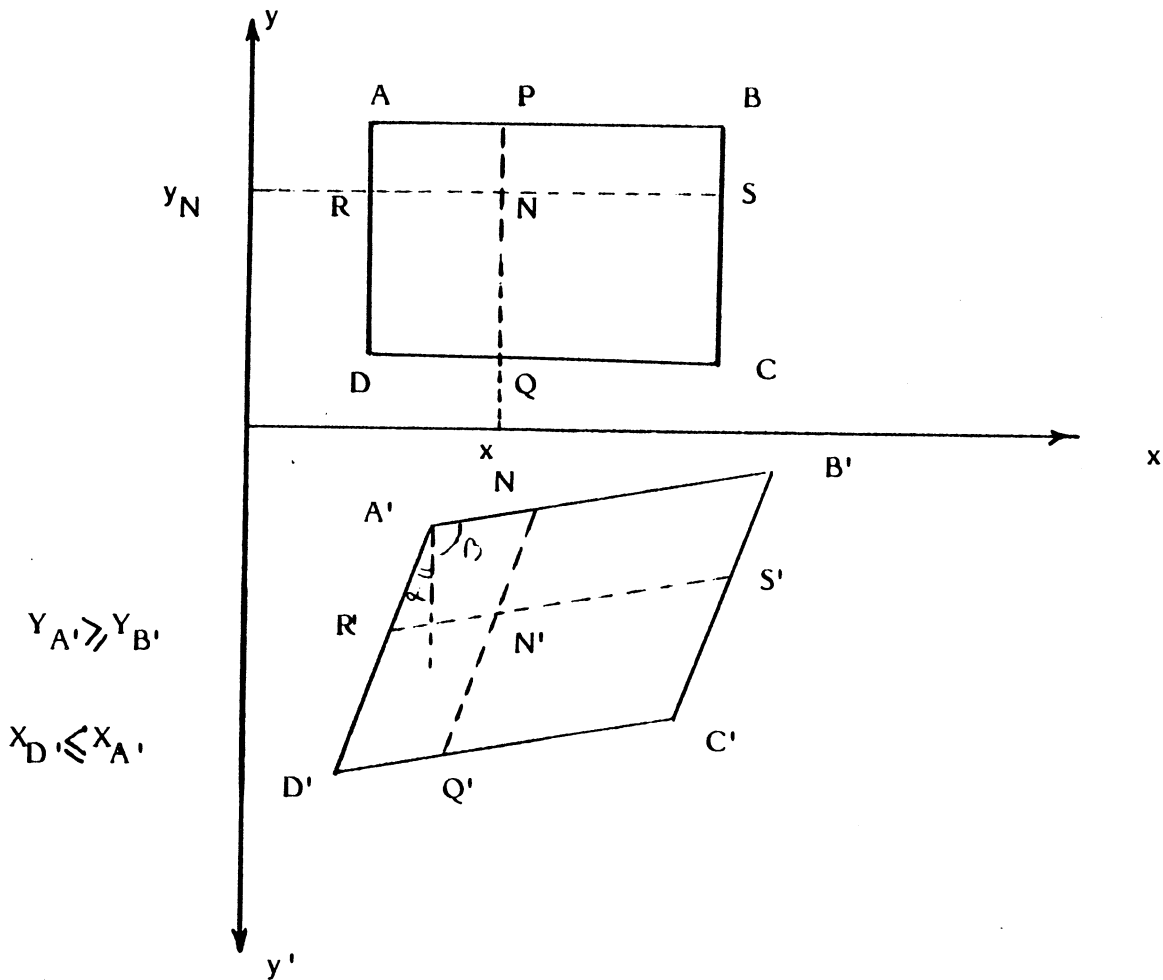


Figure 18

Les paramètres $a, b, \alpha, \beta, A'R'$ et $A'P'$ sont définis et calculés comme dans le cas IV.2.1.a. Selon la figure 18, on peut écrire :

$$\begin{cases} XR' = XA' - A'R' \sin \alpha \\ YR' = YA' + A'R' \cos \alpha \end{cases}$$

et

$$\begin{cases} XN' = XR' + R'N' \sin \beta \\ YN' = YR' - R'N' \cos \beta \end{cases} \quad 4.13$$

Enfin :

$$\begin{cases} xN' = \text{Rond} [XA' + R'N' \sin \beta - A'R' \sin \alpha] \\ YN' = \text{Rond} [YA' - R'N' \cos \beta + A'R' \cos \alpha] \end{cases}$$

IV.2.4.b Le cas inverse de IV.2.4.a

La position d'un point N' de l'image étant connue, on cherche sa position N , sur le masque.

Au moyen des équations 4.13 on calcule $A'R'$ et $R'N'$

$$A'R' = \frac{YN' - YA' \sin \beta + (XN' - XA') \cos \beta}{\sin (\beta - \alpha)}$$

$$R'N' = \frac{YN' - YA' \sin \alpha + (XN' - XA') \cos \alpha}{\sin (\beta - \alpha)}$$

On détermine ensuite les facteurs a et b . Le reste de l'opération se déroule comme les cas précédents.

$$XN = \text{Rond} [x_1 + a (x_2 - x_1)]$$

$$YN = \text{Rond} [Y_2 - b (Y_2 - Y_1)]$$

et pour le cas particulier $x_1 = Y_1 = 0$

$$xN = a * Lo$$

4.14

$$YN = (1 - b) * La$$

Pour corriger les distorsions de l'orientation et de l'inclinaison (distorsions de montage) nous avons écrit deux sous-programmes en langage Pascal, à partir des méthodes et des équations décrites ci-dessus.

Ces procédures sont exploitées dans les programmes plus général de correction des images (les programmes Z_2 et Z_3 , voir l'annexe).

IV.3. CORRECTION DES ABERRATIONS OPTIQUES

Nous expliquons ici deux méthodes pour corriger des aberrations optiques. La première méthode (IV 3.1) est proposée et utilisée par plusieurs auteurs dans différents laboratoires, [1], [7], [17].

La deuxième méthode qui est plus adaptée à notre projet est proposée par nous.

IV.3.1. SEGMENTATION DE L'IMAGE ET APPROXIMATION LINEAIRE DES DISTORSIONS PAR REGION [1], [17].

IV.3.1.1. GENERALITE

Une déformation géométrique peut être définie par des équations donnant la transformation du système non déformé (X , Y) en système déformé (W , Z) ; on obtient donc :

$$\begin{aligned} W &= h_1(x, y) \\ Z &= h_2(x, y) \end{aligned} \quad 4.15$$

Soit f l'image non déformée et g l'image résultant d'une déformation de f par une transformation géométrique définie par h_1 et h_2 ; on a donc :

$$g(W, Z) = f(x, y) \quad 4.16$$

Le niveau de gris qui devait apparaître au point (x , y) apparaît actuellement au point (W , Z). On recherche donc f à partir de g et les fonctions h_1 et h_2 ; f et g sont toutes deux des images numériques.

Les éléments de f et g sont donc la valeur du niveau de gris apparaissant en chaque point d'une matrice de 512 x 512 (par exemple).

L'image f est déterminée de la façon suivante : pour chaque point (x_0, y_0) de l'image désirée f , on évalue la localisation correspondante (a, b) dans l'image déformée g . Cette localisation nous est donnée par l'équation :

$$(a, b) = (h_1(x_0, y_0), h_2(x_0, y_0)) \quad 4.17$$

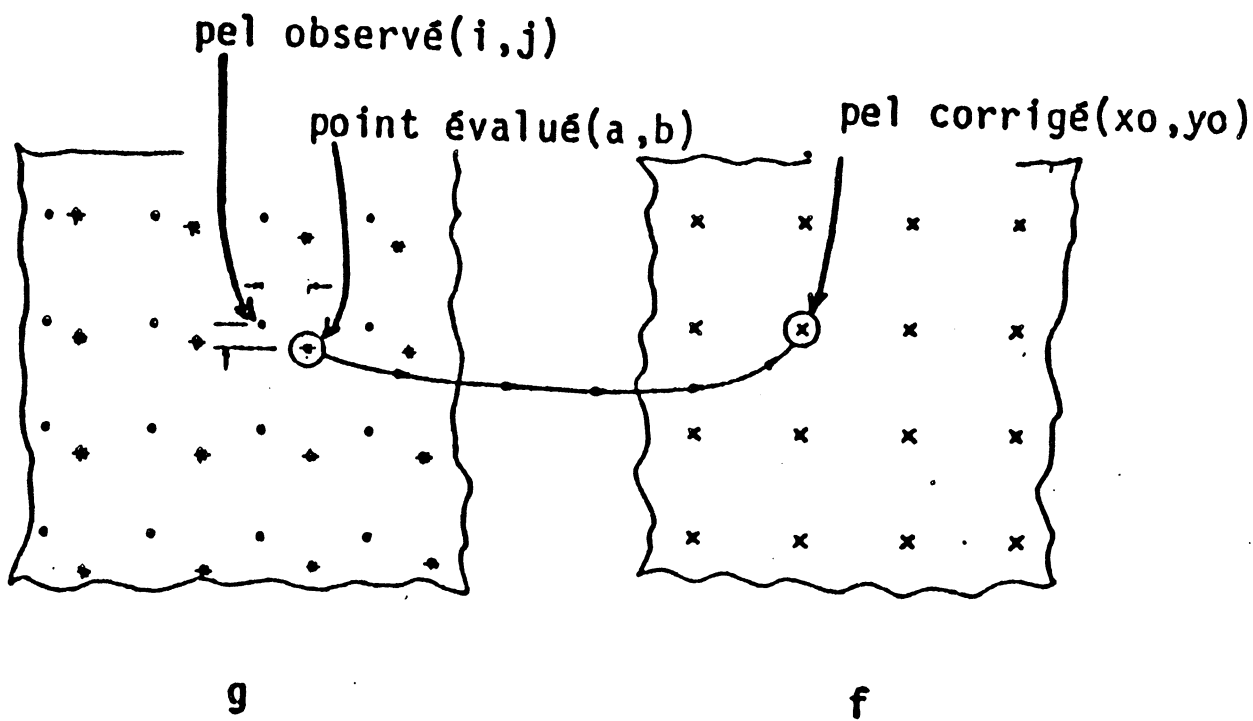


Figure 19. Evaluation de l'image non déformée f

Remarquons que le point (a, b) ne correspondra en général à aucun des points de l'image g ; donc a et b ne seront pas nécessairement des entiers. La figure 19 montre les différentes opérations effectuées. La valeur du niveau de gris du point (a, b) dans l'image g doit être évaluée par une interpolation linéaire. Pour utiliser cette technique il faut d'abord déterminer les fonctions h_1 et h_2 . La méthode utilisée pour estimer h_1 et h_2 est maintenant décrite.

IV.3.1.2. ESTIMATION DES FONCTIONS RELIANT LE SYSTEME DEFORME AU SYSTEME NON DEFORME. [1] , [17] , [2].

Pour évaluer les fonctions h_1 et h_2 , on utilise l'image de référence permettant d'évaluer les distorsions géométriques ; on appellera cette image de référence "image de mire". Cette image comprend une série de repères disposés de façon à diviser l'image en une série de triangles. Les sommets des triangles sont identifiés par ces repères. Les repères sont de petites croix. La figure 20 montre une image de mire. La figure 21 montre la grille des triangles formée par les repères de l'image de mire.

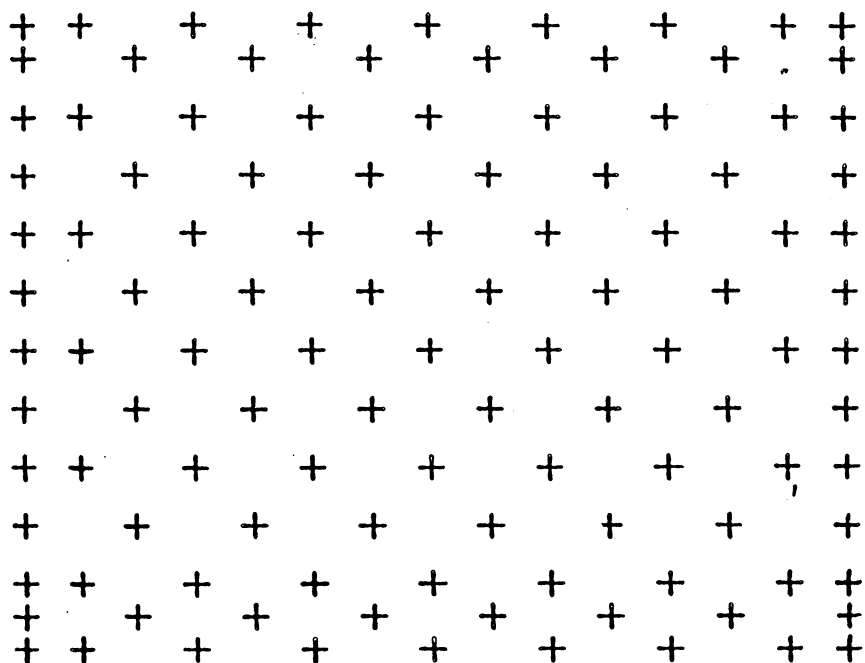


Figure 20 : Image de Mire

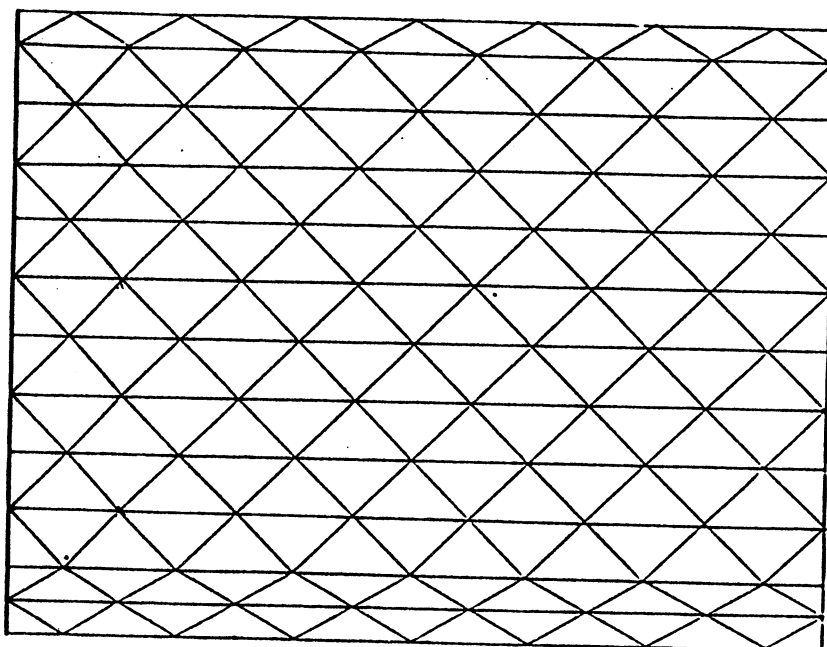


Figure 21 : Grille des triangles formée par les repères de l'image de mire de la figure 21.

Lorsque l'on enregistre l'image de mire, on obtient une image déformée g . Le problème essentiel dans cette méthode est de trouver la position des repères (centre des croix correspondant aux sommets des triangles) dans l'image déformée g . On trouve dans la référence [17] un algorithme utilisé pour estimer la position des croix dans l'image de mire.

Connaissant la position des sommets des triangles dans l'image non déformée f et dans l'image déformée g , on peut maintenant évaluer une approximation de la transformation de la distorsion (i.e. h_1 et h_2). En effet, soit 3 points formant un triangle dans f et g :

Leurs coordonnées dans f et dans g sont respectivement :

$$(r_1, s_1), (r_2, s_2), (r_3, s_3) ;$$

$$(u_1, v_1), (u_2, v_2), (u_3, v_3).$$

On peut définir la transformation linéaire :

$$W = ax + by + c \quad 4.18$$

$$Z = Kx + mY + n$$

En résolvant le système d'équation :

$$U_1 = ar_1 + bs_1 + c$$

$$U_2 = ar_2 + bs_2 + c$$

$$U_3 = ar_3 + bs_3 + c \quad 4.19$$

$$V_1 = Kr_1 + ms_1 + n$$

$$V_2 = Kr_2 + ms_2 + n$$

$$V_3 = Kr_3 + ms_3 + n$$

Pour a, b, c, K, m, n .

Cette transformation est alors utilisée pour corriger les distorsions géométriques dans la région triangulaire de g définie par les droites joignant les 3 points.

On répète le processus pour les autres groupes de triplets de l'image de mire.

On fait donc une approximation linéaire de la distorsion par région.

La précision obtenue dans la correction des distorsions géométriques dépend de l'importance de la distorsion et de la dimension de chaque région triangulaire. Plus la distorsion est importante, plus la région triangulaire devra être petite pour que l'approximation linéaire de h_1 et h_2 soit valable. Ceci explique la dimension plus petite des triangles dans les extrémités de l'image de mire. En effet, les distorsions géométriques sont beaucoup plus importantes aux extrémités d'une image.

Cependant cette méthode ne s'adapte pas au projet en cours pour les raisons suivantes :

- il n'existe pas au début assez de points de repères réguliers sur le C.I. (ou le masque), utilisées comme sommets des triangles pour l'image de mire ;
- pour avoir une image de mire, il faut donc, superposer une grille sur le C.I. sous test, ce qui implique en pratique de gros problèmes :

- 1) la grille absorbe des \bar{e} , et l'image devient bruitée et noire.
- 2) du point de vue du fonctionnement électrique, la grille peut perturber le fonctionnement du C.I. (des courts circuits/capacités parasites).

Pour éviter ces phénomènes, il faut les installer séparément : d'abord la grille et après avoir enregistré l'image de mire ; on installe le C.I. lui-même. Mais cette étape pose des problèmes:

- a) pour installer chacun des circuits il faut briser le vide du MBE et après installation, refaire le vide. Ce qui est assez long.
 - b) quand on remplace la grille par le C.I., il est possible de perdre les références initiales de la grille dans la chambre de vide (à cause des changements des paramètres du MEB) ; et dans ce cas l'image de mire enregistrée n'est plus utile lorsqu'on voudra la faire correspondre avec celle du C.I. (et sa correction)
- En plus des problèmes techniques mentionnés, l'algorithme proposé (segmentation de l'image par région) est assez lent.

Nous avons donc utilisé la deuxième méthode décrite ci-dessous, qui est plus facile et plus rapide.

IV.3.2. APPROXIMATION DES FONCTIONS RELIANT LE SYSTEME DEFORME AU SYSTEMES NON DEFORME PAR DES POLYNOMES ANALOGIQUES.

Dans cette méthode on essaie de trouver des fonctions analytiques (par ex. polynomes) qui sont le plus possibles adaptées à chaque courbe de la fig. 11 dans les sens horizontal et vertical.

Nous étudierons ces fonctions pour les deux types d'aberration suivantes :

IV.3.2.1. ABERRATION COUSSIN

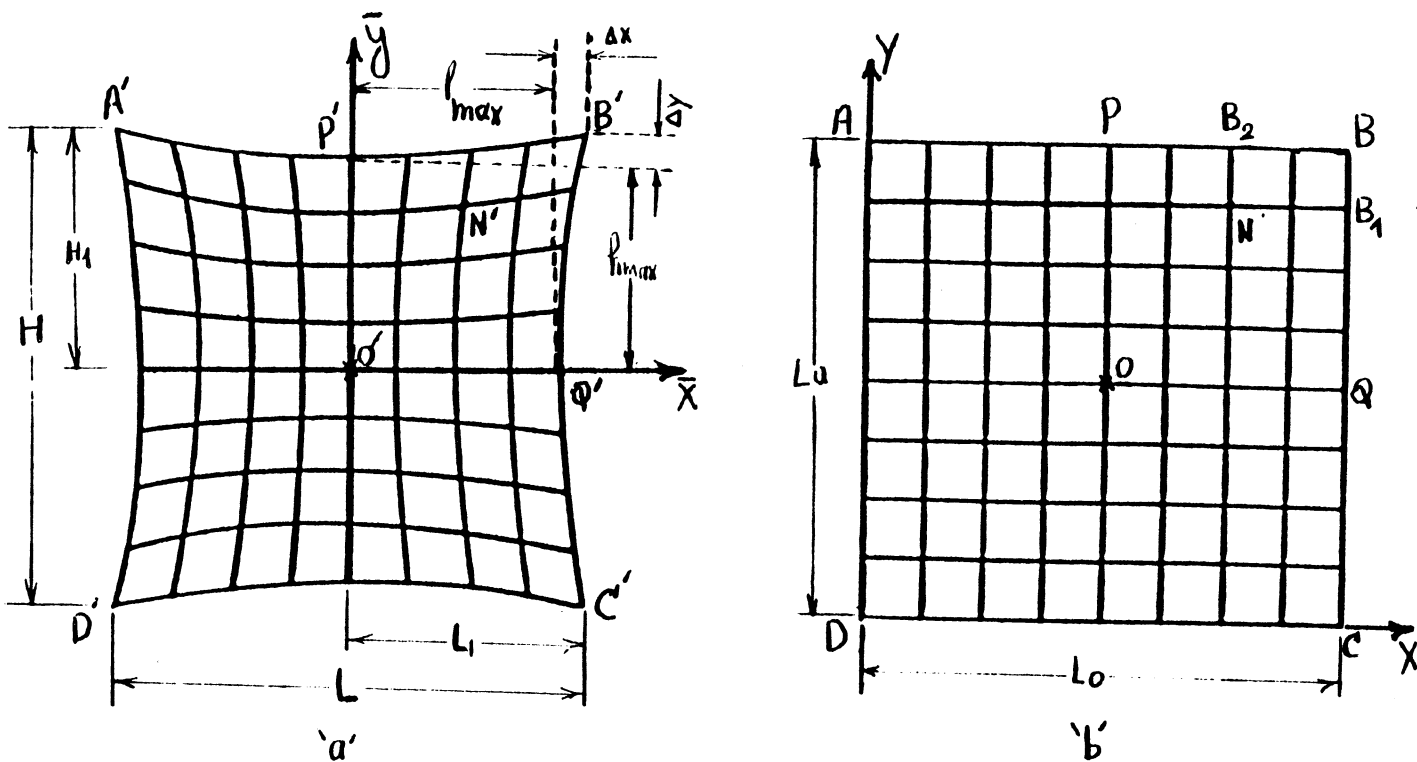


Figure 22

La figure 22a montre qu'en approchant les bords de l'image ; les convexités augmentent. La fonction la plus simple qui peut représenter le mieux possible chaque courbe est une parabole. Il suffit donc d'écrire la fonction générale d'une série de paraboles dont les convexités varient avec leur distance par rapport au bord. Nous supposons que cette variation est linéaire.

Pour simplifier les équations nous considérons la centre de coordonnées \bar{x} ou \bar{y} au point 'o', au milieu de l'image de la grille, fig. 22.a. c'est à dire le point symétrique des paraboles. Ainsi, on peut représenter les courbes par les équations suivantes :

$$\bar{y} = \pm \delta h \bar{x}^2 \pm h$$

	Pour les paraboles horizontales				
+	"	"	"	avec $y > 0$	4.20
-	"	"	"	avec $y < 0$	

$$\bar{x} = \pm \lambda l \bar{y}^2 \pm l$$

	Pour les paraboles verticales				
+	"	"	"	avec $x > 0$	4.21
-	"	"	"	avec $x < 0$	

où δ et λ sont les coefficients dépendant de la convexité des courbes A' P' B' et B' Q' C' (les deux bords extrêmes de l'image) respectivement ; h et l sont les distances des points minimums de chaque parabole au point 'o'.

De cette façon la convexité de chaque parabole est une fonction linéaire de leur distance par rapport au centre.

Pour trouver les coefficients, δ et λ , on remplace les coordonnées du point B' (L_1, H_1) dans les équations 4.20 et 4.21 par $h = h_{\max}$ et $l = l_{\max}$

On obtient :

$$H_1 = \delta h_{\max} L_1^2 + h_{\max}$$

$$L_1 = \lambda l_{\max} H_1^2 + l_{\max}$$

Alors :

$$\delta = \frac{H_1 - h_{\max}}{h_{\max} L_1^2} = \frac{\Delta y}{L_1^2 h_{\max}} \quad 4.22$$

$$\lambda = \frac{L_1 - l_{\max}}{H_1^2 l_{\max}} = \frac{\Delta x}{H_1^2 l_{\max}} \quad 4.23$$

Etant données que (figure 22) :

$$l_{\max} = L_1 - \Delta x ; \quad 4.24$$

$$h_{\max} = H_1 - \Delta y ; \quad 4.25$$

$$L_1 = L/2 ;$$

$$H_1 = H/2 ;$$

On peut écrire :

$$\delta = \frac{4 \Delta y}{L^2 (H/2 - \Delta y)} \quad 4.26$$

$$\lambda = \frac{4 \Delta x}{H^2 (L/2 - \Delta x)} \quad 4.27$$

Les paramètres Δx , Δy , H et L sont mesurables. On peut donc déterminer les valeurs numériques de δ et λ expérimentalement. Nous avons fait ces mesures sur un circuit de test réalisé dans le laboratoire de l'IMAG.

IV.3.2.2. DETERMINATION DE LA POSITION D'UN POINT SUR LE MASQUE

Pour trouver les coordonnées d'un point théorique N sur le masque, sachant sa position (point N') sur l'image du C.I. (les numéros de la fenêtre et son adresse locale), on fait les opérations suivantes :

1. On calcule l'adresse générale (globale) du point N', par rapport au point de référence dans le système saisi et ce, à partir de l'adresse de la fenêtre correspondante et de l'adresse locale de ce point à l'intérieur de cette fenêtre. Par exemple, l'adresse générale du point N' avec les coordonnées locales (x_1, y_1) et le numéro de fenêtre (UV) est obtenue de la manière suivante (fig. 23) :

$$\begin{cases} X_{N'} = x_1 + U * 512 \\ Y_{N'} = Y_1 + v * 512 \end{cases} \quad 4.28$$

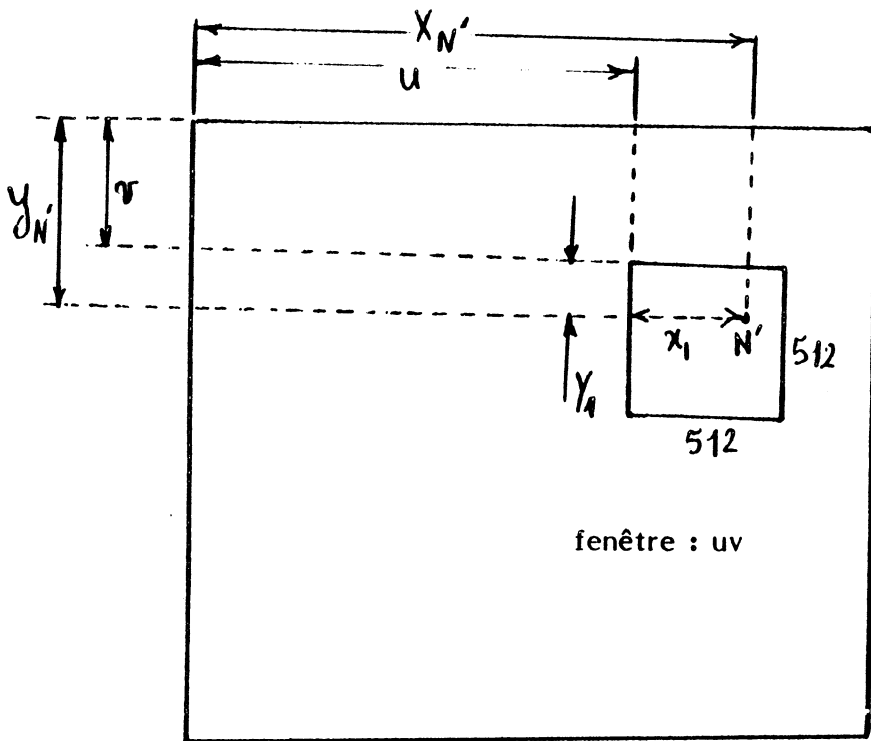


Figure 23 : Adresse locale et générale de Point N'

2. A partir des coordonnées des repères calculées en section III.4.1.b, on détermine le type d'inclinaison de l'image (figure 10).

Ensuite grâce aux équations de transformation propres à ce type, on calcule les coordonnées de ce point appelées $(x^* N', Y^* N')$, sur l'image non inclinée (rectangulaire), figure 22 b.

On effectue cette transformation s'il existe une déformation de montage et si celle-ci est supérieure à un niveau fixé par la programmation.

3. Déterminer les coordonnées du point N' par rapport au centre o :

$$\bar{x}_{N'} = x_{N'} - x_o \quad 4.29$$

$$\bar{Y}_{N'} = Y_{N'} - Y_o$$

4. En considérant les signes des coordonnées obtenues en 4.29 ; la zone de ce point est déterminée et nous choisissons ensuite les équations propres à cette zone. Par exemple pour le point N'.

Fig. 21 (situé en zone 1 avec $x > 0$ et $y > 0$) les équations sont :

$$\bar{Y} = \delta h \bar{x}^2 + h \quad 4.30$$

$$\bar{x} = \lambda l \bar{Y}^2 + l$$

5. En remplaçant \bar{x} et \bar{y} par $\bar{x}_{N'}$ et $\bar{Y}_{N'}$ dans les équations ci-dessus, on trouve les coefficients h et l des paraboles qui passent par ce point. Pour le point N' dans zone 1 on peut écrire :

$$Y_{N'} = \delta h \bar{x}_{N'}^2 + h$$

$$x_{N'} = \lambda l \bar{Y}_{N'}^2 + l$$

On obtient alors :

$$h = \frac{\bar{Y}_{N'}}{\delta \bar{x}_{N'}^2 + 1} \quad , \quad l = \frac{\bar{x}_{N'}}{\lambda \bar{Y}_{N'}^2 + 1}$$

6. En se référant à la figure 22 .b et pour déterminer les coordonnées du point N, il faut écrire les équations suivantes (à noter que l'abscisse de point N est

égale à celle de point B_1 et l'ordonnée de N identique à celle de B_2).

$$\overline{Y}_N = \delta h L_1^2 + h$$

(pour la zone 1 $x > 0$ et $y > 0$)

$$\overline{x}_N = \lambda l H_1^2 + l$$

7. On multiplie \overline{x}_N et \overline{Y}_N par les facteurs de grossissement g_x et g_y obtenus en III.4.1.b on peut alors écrire :

$$\overline{x}_N = \overline{x}_N * g_x$$

$$\overline{Y}_N = \overline{Y}_N * g_y$$

8. Pour mieux adapter les coordonnées du point N avec le repère cartésien de masque, on calcule les coordonnées obtenues en 7 par rapport au point D.

$$x_N = \text{Round}(x_N + x_0) = \text{Round}(x_N + L_0/2)$$

4.31

$$Y_N = \text{Round}(Y_N + Y_0) = \text{Round}(Y_n + L_a/2)$$

Remarque

Pour les autres zones les étapes décrites ci-dessus sont les mêmes. Mais les équations des paraboles et les paramètres h et l changent de la manière suivante
Pour la zone 2 ($x > 0$ et $y < 0$)

$$x = \lambda l y^2 + l$$

$$y = -\delta h x^2 - h$$

$$h = -\frac{y}{\delta x^2 + 1}$$

$$l = \frac{x}{\lambda y^2 + 1}$$

Zone 3 (x < 0 et y > 0) :

$$x = -\lambda l y^2 - l$$

$$y = \delta h x^2 + h$$

$$h = \frac{y}{\delta x^2 + 1}$$

$$l = -\frac{x}{\lambda y^2 + 1}$$

Zone 4 (x < 0 et y < 0) :

$$x = -\lambda l y^2 - l$$

$$y = -\delta h x^2 - h$$

$$h = -\frac{y}{\delta x^2 + 1}$$

$$l = -\frac{x}{\lambda y^2 + 1}$$

IV.3.2.3. ABERRATION TONNEAU

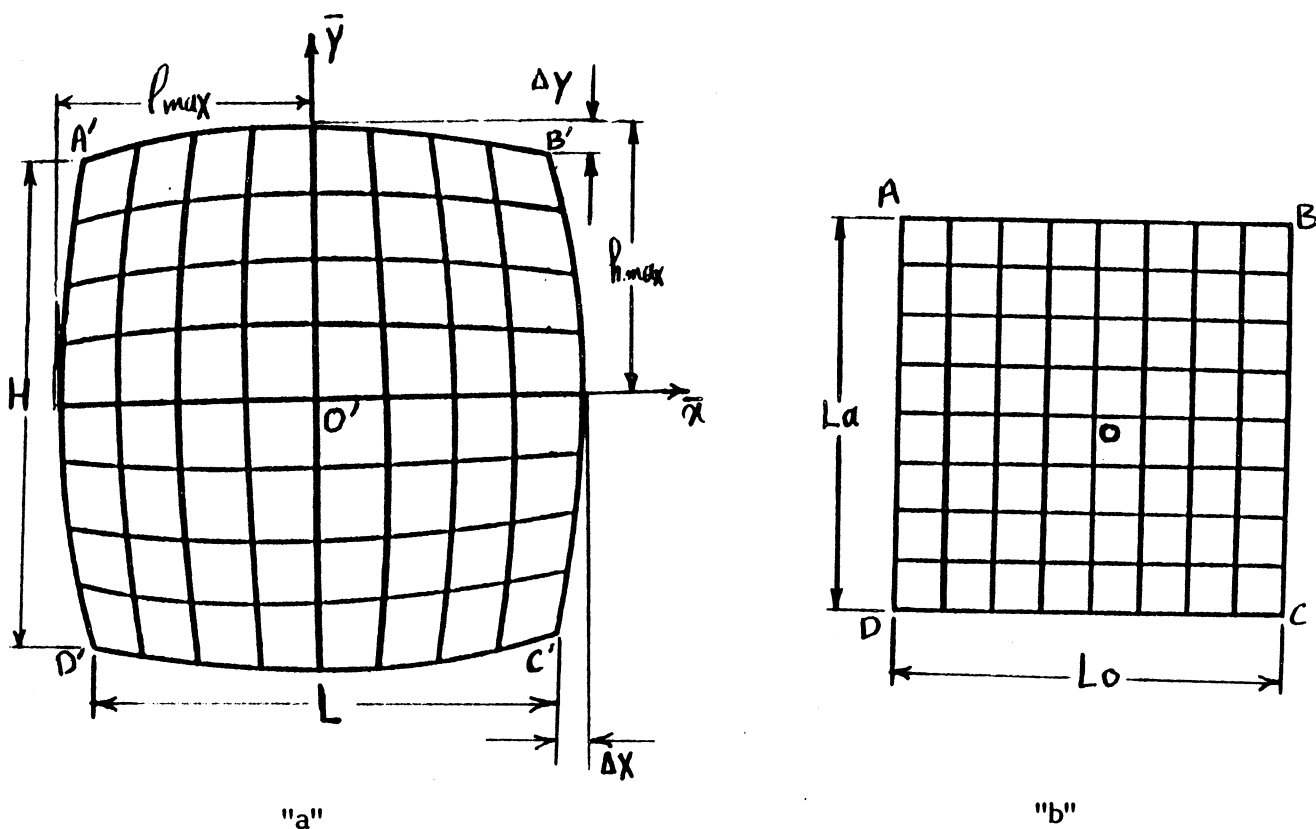


Figure 24

Dans ce cas les équations des paraboles (figure 24.a) et les paramètres correspondants sont les suivants :

a) Zone I ($x > 0$ et $y > 0$) :

$$x = - \lambda ly^2 + l$$

4.32

$$y = - \delta hx^2 + h$$

après des calculs similaires à ceux effectués dans le cas précédent, on trouve, pour les coefficients λ et δ les équations suivantes :

$$\delta = \frac{4 \Delta y}{L^2(H/2 + \Delta y)} \quad 4.33$$

$$\lambda = \frac{4 \Delta x}{H^2(L/2 + \Delta x)} \quad 4.34$$

δ et λ sont inchangeables pour toutes les zones (comme dans le cas coussin).

Les paramètres h et l deviennent :

a) Zone 1 ($x > 0$ et $y > 0$)

$$h = \frac{Y_{N'}}{1 - \delta x_{N'}^2} \quad 4.35$$

$$l = \frac{x_{N'}}{1 - \lambda Y_{N'}^2} \quad 4.36$$

($x_{N'}$ et $y_{N'}$ sont des coordonnées d'un point, N' , sur l'image déformée dans la zone 1).

b) Zone 2 ($x > 0$ et $y < 0$)

$$x = -\lambda l y^2 + l$$

$$y = \delta h x^2 - h$$

$$h = \frac{y_{N'}}{\delta x_{N'}^2 - 1}$$

$$l = \frac{x_{N'}}{1 - \lambda y_{N'}^2} \quad (N', \text{ un point dans la zone 2})$$

c) Zone 3 ($x < 0$ et $y > 0$)

$$x = \lambda l y^2 - l$$

$$y = -\delta h x^2 + h$$

$$h = \frac{y_{N'}}{1 - \delta x_{N'}^2} \quad (N', \text{ un point dans la zone 3})$$

$$l = \frac{x_{N'}}{\lambda y_{N'}^2 - 1}$$

d) Zone 4 ($x < 0$ et $y > 0$)

$$x_N = \lambda |y_N|^2 - l$$

$$y_N = \delta hx^2 - h$$

$$l = \frac{x_{N'}}{\lambda |y_{N'}|^2 - 1}$$

$$h = \frac{y_{N'}}{\delta x_{N'}^2 - 1} \quad (N' : \text{un point sur l'image déformée se situe dans la zone 4})$$

La méthode utilisée pour obtenir l'adresse d'un point sur le masque, dans le cas d'aberration tonneau, est exactement identique à celle expliquée en §IV.3.2.2. Cependant les équations utilisées en IV.3.2.2. sont remplacées par leurs équivalences (présentées en (§ IV.3.2.3)).

Nous avons écrit un programme général qui s'appelle Z_3 et qui exécute toutes les phases présentées en § IV.3.2.2. et IV.3.2.3. ainsi que la correction automatique de montage et de l'inclinaison de l'image.

IV.3.3. DETERMINATION DE LA POSITION D'UN POINT SUR L'IMAGE

Ce cas est l'inverse de IV.3.2.2. En effet, à partir de l'adresse d'un point N sur le masque (x_N, Y_N), on cherche sa position sur l'image du C.I. (point N'). Suivant que l'aberration de l'image est du type coussin ou tonneau, nous considérerons l'un des deux cas suivants :

IV.3.3.1. ABERRATION COUSSIN

Nous procédons respectivement aux étapes suivantes :

1. On lit les dimensions du masque L_a et L_o (fig. 22.b) et les coordonnées d'un point N (tous en unité de masque λ ou micromètre). On fait une multiplication par les facteurs d'échelle g_x et g_y :

$$g_x = (x_{B'} - x_{A'})/L_o \quad 4.37$$

$$g_y = (y_{A'} - y_{D'})/L_a$$

$x_N = x_N * g_x$ (ces coordonnées sont données par rapport au point D - Fig. 22.b)

$$y_N = y_N * g_y \quad 4.38$$

2. On calcule les coordonnées du point N obtenues en phase 'I' par rapport au point o (cente du masque fig. 22.b)

$$X_o = L_o * g_x/2 \quad 4.39$$

$$Y_o = L_a * g_y/2$$

$$x_N = x_N - x_o \quad 4.40$$

$$Y_N = Y_N - Y_o$$

3. Selon les signes de x_N et Y_N on désigne la zone et on choisit les équations correspondantes de la manière suivante :

a) $x_N > 0$ et $y_N > 0$ (zone I)

par les équations :

$$x_N = \lambda H_1^2 + l$$

$$Y_N = \delta h L_1^2 + h$$

ou $H_1 = H/2$ et $L_1 = L/2$ (voir fig. 22a)

$$\text{et } \delta = \frac{4 \Delta y}{L^2(H/2 - \Delta y)} \quad , \quad \lambda = \frac{4 \Delta x}{H^2(L/2 - \Delta x)} \quad ;$$

(δ et λ sont interchangeables pour toutes les zones dans le cas d'aberration coussin)
on trouve les paramètres h, l :

$$h = \frac{Y_N}{\delta L^2 + 1}$$

$$l = \frac{x_N}{\lambda H^2 + 1}$$

Les paramètres h, l, δ et λ étant connus, on peut donc écrire :

$$Y_{N'} = \delta h x_{N'}^2 + h$$

$$x_{N'} = \lambda l Y_{N'}^2 + l$$

Pour trouver $x_{N'}$ et $Y_{N'}$ (les coordonnées de point N' sur l'image non inclinée)

On déduit du système d'équation précédente la nouvelle équation :

$$\delta h \lambda^2 Y_{N'}^4 + 2 \delta h \lambda l^2 Y_{N'}^2 + \delta h l^2 + h = 0 \quad 4.41$$

On résout cette équation par une méthode numérique. On obtient $Y_{N'}$

(> 0) et ensuite $x_{N'}$ grâce à l'équation :

$$x_{N'} = \lambda l Y_{N'}^2 + l \quad 4.42$$

b) $x_N > 0$ et $Y_N < 0$ (Zone 2)

Dans ce cas les équations sont :

$$x_N = \lambda l Y_N^2 + l$$

$$Y_N = -\delta h x_N^2 - h$$

$$h = - \frac{Y_N}{\delta L_1^2 + 1}$$

$$l = \frac{x_N}{1 + \lambda H_1^2}$$

Les équations pour $x_{N'}$ et $Y_{N'}$ sont alors :

$$\delta h \lambda^2 l^2 Y_{N'}^4 + 2 \delta h \lambda l^2 Y_{N'}^2 + Y_{N'} + \delta h l^2 + h = 0 \quad (Y_{N'} < 0)$$

$$x_{N'} = \lambda l Y_{N'}^2 + l \quad 4.43$$

c) $x_N = 0 <$ et $Y_N > 0$ (Zone 3)

Dans ce cas on a :

$$x_N = -\lambda l y_N^2 - l$$

$$Y_N = + \delta h x_N^2 + h$$

$$h = \frac{Y_N}{\delta L_1^2 + 1}$$

$$l = \frac{-x_N}{1 + \lambda H_1^2}$$

$$\delta h \lambda^2 l^2 Y_{N'}^4 + 2 \delta h \lambda l^2 Y_{N'}^2 - Y_{N'} + \delta h l^2 + h = 0 \quad (\text{choisir } Y_{N'} > 0)$$

$$x_{N'} = -\lambda l Y_{N'}^2 - l \quad 4.44$$

./.

d) $x_N < 0$ et $Y_N < 0$ (Zone 4)

$$Y_N = -\delta h x_N^2 - h$$

$$x_N = -\lambda l Y_N^2 - l$$

$$h = -\frac{Y_N}{\delta L_l^2 + 1}$$

$$l = -\frac{x_N}{\lambda H_l^2 + 1}$$

Pour $x_{N'}$ et $Y_{N'}$ on obtient :

$$\left| \begin{array}{l} \delta h \lambda^2 l^2 Y_{N'}^4 + 2 \delta h \lambda l^2 Y_{N'}^2 + Y_{N'} + \delta h l^2 + h = 0 \quad (Y_{N'} < 0) \\ x_{N'} = -\lambda l Y_{N'}^2 - l \end{array} \right. \quad 4.45$$

Après avoir déterminé $x_{N'}$ et $Y_{N'}$ à partir de l'une des équations 4.41 jusqu'au 4.45 ; on transfère le système de coordonnées au point A' :

$$\left| \begin{array}{l} x_{N'} = L/2 + x_{N'} \\ Y_{N'} = H/2 - Y_{N'} \end{array} \right. \quad 4.46$$

5. On effectue la correction de déformation de montage (si cela est nécessaire) afin de déterminer la position exacte du point N' sur l'image du MEB.

6. On calcule le numéro de zone ROMUALD contenant ce point et son adresse locale à l'intérieur de cette zone.

IV.3.3.2. ABERRATION TONNEAU

Dans ce cas, les phases 1, 2, 4, 5 et 6 expliquées en IV.3.3.1. sont exactement applicables sans aucune modification. Néanmoins les équations utilisées en phase 3 changent de la façon suivante :

a) $x_N > 0$ et $Y_N > 0$ (Zone 1)

$$x_N = -\lambda l Y_N^2 + l$$

$$y_N = -\delta h x_N^2 + h$$

$$h = \frac{Y_N}{1 - \delta L_1^2}$$

$$l = \frac{x_N}{1 - \lambda H_1^2}$$

$$\delta h \lambda^2 l^2 Y_{N'}^4 - 2 \delta h \lambda l^2 Y_{N'}^2 + Y_{N'} + \delta h l^2 - h = 0 \quad (Y_{N'} > 0) \quad 4.47$$

$$x_{N'} = -\lambda l Y_{N'}^2 + l$$

b) $x_N > 0$ et $Y_N < 0$ (Zone 2)

$$Y_N = \delta h x_N^2 - h$$

$$x_N = -\lambda l Y_N^2 + l$$

$$h = \frac{Y_N}{\delta L_1^2 - 1}$$

$$l = \frac{x_N}{1 - \lambda H_1^2}$$

$$\delta h \lambda^2 Y_{N'}^4 - 2 \delta h \lambda l^2 Y_{N'}^2 - Y_{N'} + \delta h l^2 - h = 0 \quad (\text{choisir } Y_{N'} < 0)$$

$$x_{N'} = -\lambda l Y_{N'}^2 + l$$

4.48

c) $x_N < 0$ et $Y_N > 0$ (Zone 3)

$$Y_N = -\delta h x_N^2 + h$$

$$x_N = \lambda l Y_N^2 - l$$

$$h = \frac{Y_N}{l - L_1^2}$$

$$l = \frac{x_N}{\lambda H_1^2 - 1}$$

$$\delta h \lambda^2 l^2 Y_{N'}^4 - 2 \delta h \lambda l^2 Y_{N'}^2 + Y_{N'} + \delta h l^2 - h = 0 \quad (Y_{N'} > 0) \quad 4.49$$

$$x_{N'} = \lambda l Y_{N'}^2 + l$$

d) $x_N < 0$ et $Y_N < 0$ (zone 4)

$$Y_N = \delta h x_N^2 - h$$

$$x_N = \lambda l Y_N^2 - l$$

$$h = \frac{Y_N}{\delta L_1^2 - 1}$$

$$l = \frac{x_N}{\lambda H_1^2 - 1}$$

$$\delta h \lambda^2 l^2 Y_{N'}^4 - 2 \delta h \lambda l^2 Y_{N'}^2 - Y_{N'} + \delta h l^2 - h = 0 \quad (Y_{N'} < 0) \quad 4.50$$

$$x_{N'} = \lambda l Y_{N'}^2 - l$$

Dans toutes les équations données en IV.3.3.2. (Aberration Tonneau) λ et δ sont définies comme suit :

$$\delta = \frac{4 \Delta y}{L^2 (H/2 + \Delta Y)} \quad 4.51$$

et

$$\lambda = \frac{4 \Delta x}{H^2 (l/2 + \Delta x)} \quad 4.52$$

Afin de déterminer la position d'un point sur l'image, nous avons écrit un programme qui s'appelle Z_2 (voir l'annexe). Il exécute toutes les étapes décrites en § IV.3.3.1 et § IV.3.3.2 ainsi que la correction de montage ; et ce de manière automatique.

IV.4. NOTIONS SUR LES METHODES DE CORRECTION D'IMAGES

IV.4.1. AMELIORATION DU PROCEDE DE CORRECTION

Comme nous l'avons déjà indiqué aux § IV.3.2.1. et § IV.3.2.3. les paramètres prédominants dans la correction des aberrations d'une image sont Δx et Δy exprimées dans les formules utilisées.

Ces deux valeurs sont des nombres entiers qui dépendent des différents paramètres de fonctionnement du système. Ces paramètres sont :

- pour le MEB
 - . la vitesse de balayage ligne (temps de balayage ligne)
 - . le nombre de lignes par image (trame)
 - . la distance de balayage par le faisceau incident
- pour le système de saisie (ROMUALD)
 - . la fréquence d'échantillonnage F_e
- Pour le circuit
 - . les dimensions (longueur et largeur) de l'échantillon sous test.

Nous avons fait plusieurs essais sur un circuit de test et une grille avec différentes conditions afin de rechercher des ordres de grandeurs sur Δx et Δy . La totalité du circuit était balayée en choisissant un grossissement le plus grand possible de façon à ce que tout le circuit apparut sur l'écran de contrôle du MEB. Pour un circuit quelconque le taux d'aberration dépend surtout de la distance balayée par le faisceau primaire (incident). Cependant les valeurs numériques de Δx et de Δy , nécessaires dans les programmes, sont directement proportionnelles au nombre de pixels par ligne balayée (c'est à dire à la fréquence d'échantillonnage et la vitesse de balayage ligne).

Pour rendre les programmes de correction des déformations les plus indépendants possibles des paramètres du système de saisie et du MEB, nous proposons ici une méthode qui permet de déterminer les valeurs de Δx et de Δy . Ces valeurs sont recherchées pour chaque circuit et pour des conditions quelconques.

La méthode comprend les étapes suivantes :

1. au début de chaque série d'essais, on enregistre deux fenêtres situées respectivement au milieu des bords horizontaux et verticaux du circuit et contenant les points P' et Q' (situé sur les lignes connectant les repères). Fig. 25.

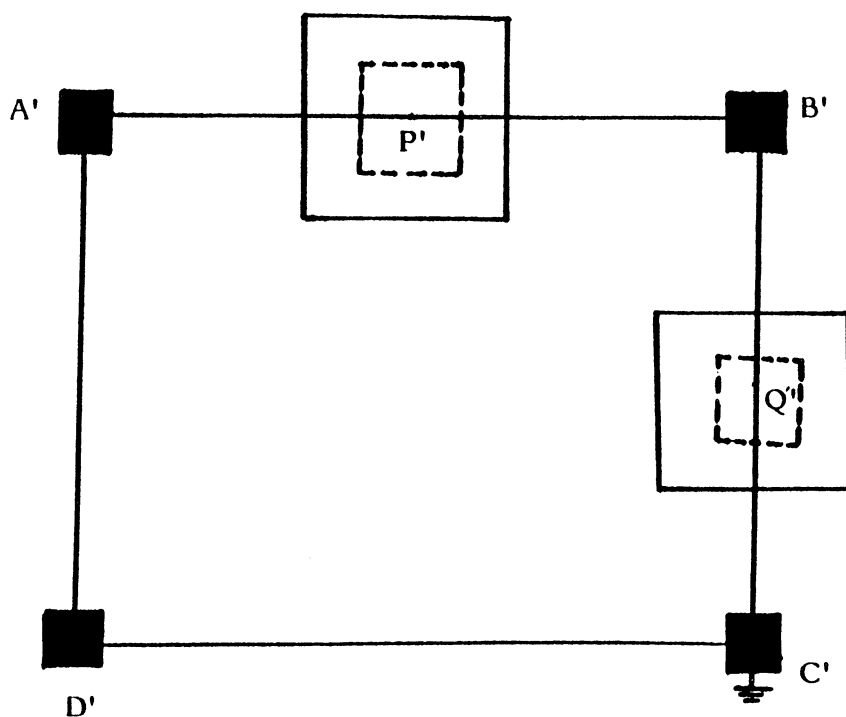


Figure 25

Avec un logiciel simple, on détermine la position de ces points (P' et Q') par rapport au point A' qui sert de référence.

2. Après avoir corrigé la déformation du montage (si elle existe), on calcule les valeurs Δx et Δy par les formules ci-dessous.

$$\Delta y = | Y_{A'} - Y_{P'} |$$

$$\Delta x = | X_{Q'} - X_{B'} |$$

IV.4.2. GENERALISATION A D'AUTRES TYPES DE DEFORMATION

Comme nous l'avons indiqué au début de ce chapitre de nombreux auteurs supposent l'aberration optique d'une image de type tonneau ou de type coussin.

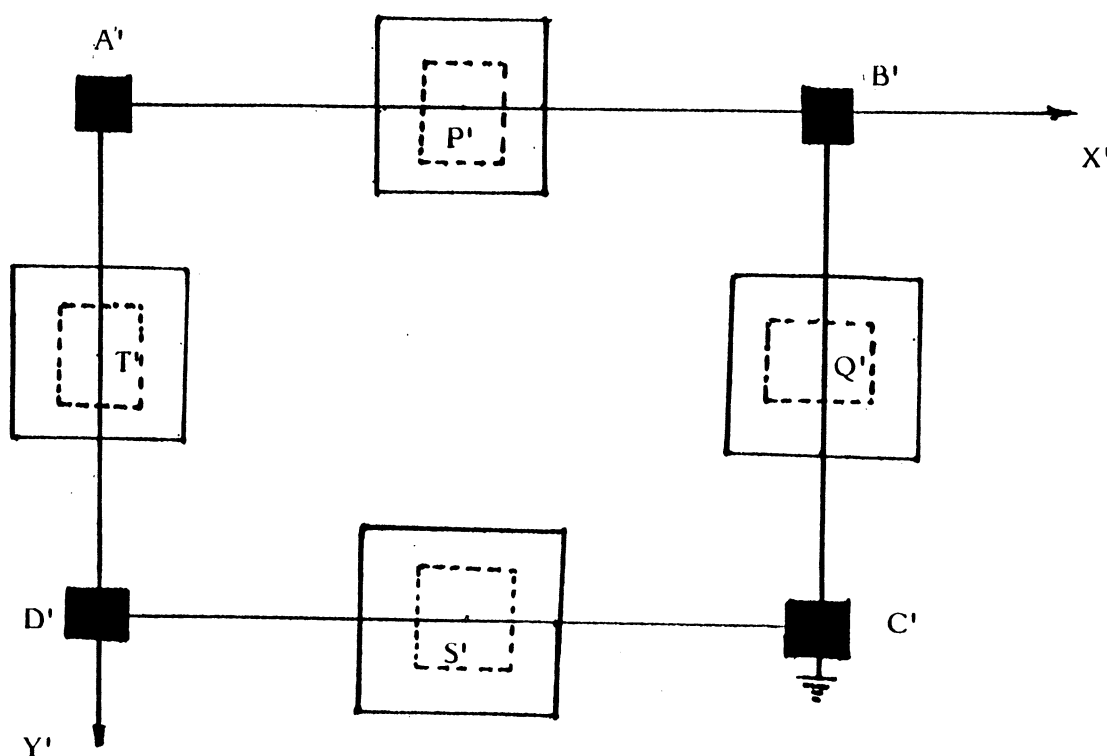
Fig. 11. Nous avons aussi constaté que la majorité des images analysées ont subi une déformation de type tonneau. Mais quelquefois, on observe des anomalies.

En l'occurrence, certaines images présentent un voire deux côtés de forme convexe.

Pour corriger de telles structures et avoir un programme qui soit exécutable dans la majorité des cas, nous proposons une méthode la plus générale possible.

Elle comprend les étapes suivantes :

1. On enregistre au milieu de chaque côté, une fenêtre de ROMUALD contenant respectivement les points P', Q', S' et T'. Fig.26 .



2. On détermine l'adresse de ces pixels par rapport au point A'.
3. On modifie ces adresses s'il existe une déformation du montage (rotation, inclinaison...)
4. On détermine la forme des déformations de chaque côté (convexité ou concavité) et leurs valeurs numérique d'après les relations ci-dessous :

$$\Delta X_1 = |X_{Q'} - X_{B'}|, \text{ si } X_{B'} > X_{Q'} \text{ côté B'C' est concave sinon convexe}$$

$$\Delta X_2 = |X_{T'} - X_{A'}|, \text{ si } X_{A'} > X_{T'} \text{ côté A'D' est convexe sinon concave}$$

$$\Delta Y_1 = |Y_{A'} - Y_{P'}|, \text{ si } Y_{P'} > Y_{A'} \text{ côté A'B' est convexe sinon concave}$$

$$\Delta Y_2 = |Y_{D'} - Y_{S'}|, \text{ si } Y_{S'} > Y_{D'} \text{ côté C'D' est convexe sinon concave}$$

De cette manière on détermine d'une part la forme de l'aberration de chaque côté de l'image et d'autre part les valeurs numériques de ces aberrations.

On relève ainsi 8 cas différents pour l'image déformée.

5. Selon la zone du point étudié et la forme de la déformation propre à cette zone, on utilise une combinaison convenable des différentes équations des paraboles étudiés dans les sections précédentes (§ IV.3.2.1. et § IV.3.2.3.)

CONCLUSION

Le sujet abordé dans ce mémoire concerne l'étude des images des circuits intégrés issues du MEB et surtout leurs corrections.

Nous avons étudié toutes les déformations qui proviennent du montage ou de déplacement du circuit sous le MEB et des déformations optiques dues au système de balayage et aux lentilles du microscope.

Le but de cette correction est l'obtention d'une image comparable point par point avec celle obtenue par un système de CAO ou de masque correspondant.

Pour ce faire, nous avons étudié les méthodes qui permettent au concepteur de situer par programme la (les) zone (s) contenant le (les) point (s) à étudier en considérant toutes sortes de déformations.

Les deux sortes d'aberrations optiques (coussin ou tonneau) souvent présentées dans la littérature, ont été étudiées et programmées en détail. En plus, on présente une méthode plus générale, à la fois indépendante des paramètres du microscope utilisé et capable de corriger toute autre forme d'aberration possible.

Pour trouver des points de repères (références) nécessaires dans les fonctions de transfert, on peut utiliser la visualisation humaine d'un opérateur ou les méthodes logicielles (la corrélation, la méthode proposée par nous).

Le domaine d'applications de ce sujet recouvre essentiellement la mise au point des circuits prototypes. Avec les méthodes de visualisation humaine ou les corrélations, ces programmes sont aussi exploitables dans la phase de l'analyse de défaillance des C.Is.

La vérification de cette méthode sur le micro-ordinateur : DIGITAL MINC

Il pour une image artificielle et déformée montre un bon accord entre la théorie et les résultats obtenus.

ANNEXES

LISTINGS DU LOGICIEL (Extraits)

```

program z1 (input, output, im1, im2, im3, result) ;
(* ce programme lit respectivement 3 fichiers d'images im1, im2, im3, et dete
rmine les adresses des 3 reperes a', b', d' dans ces fichiers et les ecrit dans le fichier result *)
type couple = record
  x, y : integer
end ;
var ap, bp, dp, m1, m2, m3 : couple ;
  q, r, s, t : char ;
result : file of couple ;
im1, im2, im3, im, fich : text ;
xfb, yfd, i, j, n : integer ;
procedure p1 (var im : text) ;
  n une fichier contenant les carc. 'O' et '1' *)
var m, n, t : char ;
begin
  reset (im) ;
  rewrite (fich) ;
  i := 0 ; j := 0 ;
  while not (eof (im)) do
    begin
      while not eofn (im) do
        begin
          read (im, m, n) ;
          if m = '8' then t := '1' else t := '0' ;
          write (fich, t) ;
          j := j + 1 ;
        end ;
        writeln (fich) ;
        get (im) ;
        i := i + 1 ;
      end ;
    end ;
  end ;
procedure p2 (var mg : couple) ;
  s forme x,y dans un systeme cartisienne *)
var nm, np, q1 : integer ;
function val (m : char) : integer ;
  var i : integer ;
  begin
    i := ord (m) ;
    if ((i >= ord ('0')) and (i <= ord ('9'))) then val := i - ord ('0') else if ((i <= ord ('f')) and (i >= ord ('a'))) the
n val := i - ord ('a') + 10 else
      writeln ('!! ya un erreur a l'entree : les carac. donnees ne sont pas hexa.') ;
  end ;
begin
  if val (q) < 8 then writeln ('!! ya un erreur : l'adresse de pixel <8000 ')
  else begin
    nm := val (q) * 16 * 16 * 16 + val (r) * 16 * 16 + val (s) * 16 + val (t) ;
    np := nm - 8 * 16 * 16 * 16 ;
    q1 := np div 512 ;
    mg.x := np mod 512 ;
    mg.y := q1 + 64 * (n - 1) ;
  end ;
end ;
procedure p3 (var am, bm : couple) ;
(* fin de la procedure p1 *)
(* procd. pour convertir l'adresse d'un point en hexa. a decimal et puis sou
tres des reperes *)
var a, si, u, qh, qv : integer ;
  c : char ;
begin
  reset (fich) ;
  (* i indique le no. des lignes de l'image et j le no. des colonnes *)
  (* procedure pour convertir une fichier d'image contenant des carac. ASCII e
  *)
  (* cette procd. determine des dimensions de chaque repere et detecte des cen

```

```

for qh := 1 to round (1 / 2) do readln (fich) ;
s1 := 0 ;
read (fich, c) ; while c <> '1' do
begin
s1 := s1 + 1 ;
read (fich, c)
end ;
qh := 0 ;
while c <> 'o' do
begin
qh := qh + 1 ;
read (fich, c)
end ;
reset (fich) ;
c := '0' ; u := 0 ; while c <> '1' do
begin
u := u + 1 ;
readln (fich) ;
for qv := 1 to round (j / 2) do get (fich) ;
read (fich, c)
end ;
qv := 0 ; while c <> '0' do
begin
qv := qv + 1 ;
readln (fich) ;
for a := 1 to round (j / 2) do get (fich) ;
read (fich, c) ;
end ;
am.x := bm.x+s1 + round (qh / 2) ;
am.y := bm.y+u+round (qv / 2) ;
end ;
(* fin de proced. p3 *)
begin
(* debut du programme principal z1 *)
writeln (' donner l.adresse de la fenetre contenant le repere b'' (en haut , a droite ) xfb : un no. entier decimal indiqu. le
deplacement de la fenetre horizontalement ') ;
writeln ('xfb =? ') ;
readln (xfb) ;
writeln (' donner le deplacement vertical de la fenetre contenant le repere d''(en bas a gauche ) yfd : un no. entier decimal ,
) ;
writeln ('yfd =? ') ;
readln (yfd) ;
writeln (' donner l.adresse de 1 er. sous matrice dans la fenetre 0.0 sous forme 5 carac. 4 hexa.(q.r.s.t) et un no. entier n
) ;
writeln (' q.r.s.t.n =? ') ;
readln (q, r, s, t, n) ;
p2 (m1) ;
p1 (im1) ;
p3 (ap, mi) ;
rewrite (result) ;
write (result, ap) ;
writeln (' donner l.adresse de 2em. sous matrice contenant le repere en haut a droite : q.r.s.t.n =? ') ;
readln (q, r, s, t, n) ;
p2 (m2) ;
p1 (im2) ;
p3 (bp, m2) ;
bp.x := bp.x+xfb * 512 ;
write (result, bp) ;
writeln (' donner l.adresse de 3em sous matrice contenant le repere en bas a gauche : q.r.s.t.n =? ') ;
readln (q, r, s, t, n) ;

```

```
p2 (m3) ;  
p1 (1m3) ;  
p3 (dp, m3) ;  
dp.y := dp.y+yfd * (512 - 64) ;  
write (result, dp)  
end.
```

```

program z2 (input, output, result) ;
r de son adresse sur le masque *)
const er = 5 ;
type couple = record
  x, y : real
end ;
var ap, bp, dp, pp, p : couple ;
result : file of couple ;
dx, dy, xf, yf : integer ;
al, la, lo, a, b, c, d, bet, gx, gy : real ;
aber : char ;
procedure quad (var w : real) ;
var gc, gq, ga, gb : real ;
  i : integer ;
function f (t : real) : real ;
begin
  f := a * sqr (t * t) + b * sqr (t) + c * t + d ;
end ;
begin
  (* debut de quad *)
  ga := 0 ;
  if ((i = 1) or (i = 3)) then gb := la / 2 else gb := -la / 2 ;
  if f (gb) = 0 then w := gb else if f (ga) = 0 then w := 0 else
  begin
    gc := abs (ga - gb) ;
    while gc >= 1 do
      begin
        gq := (ga + gb) / 2 ;
        if f (gq) = 0 then w := gq else
          if f (gq) = f (ga) < 0 then
            gb := gq else ga := gq ; gc := abs (ga - gb)
          end ;
        w := (ga + gb) / 2
      end ;
    end ;
  end ;
  (* fin de proce. quad *)
  procedure coussin1 ;
  var h, l, h1, l1 : real ; i : integer ;
  begin
    h1 := la / 2 ; l1 := lo / 2 ;
    if (p.x >= 0) and (p.y >= 0) then begin
      i := 1 ;
      c := -1
    end else
      if ((p.x >= 0) and (p.y <= 0)) then begin
        i := 2 ;
        c := 1
      end else
        if ((p.x <= 0) and (p.y >= 0)) then begin
          i := 3 ;
          c := -1
        end else
          begin
            i := 4 ;
            c := 1
          end
        end else
          begin
            h := p.y / (a1 * l1 * l1 + 1) ; l := p.x / (bet * h1 * h1 + 1) ;
          case 1 of
            1 : begin
              h := h ; l := l
            end ;
            2 : begin

```



```

procedure choix ;
begin
  case 1 of
    1 : begin
      p.x := (ap.x+app * sin (b1) - arp * sin (a1)) ;
      p.y := (ap.y+app * cos (b1) + arp * cos (a1)) ;
      end ;
    2 : begin
      p.x := (ap.x+app * sin (b1) + arp * sin (a1)) ;
      p.y := (ap.y+app * cos (b1) + arp * cos (a1)) ;
      end ;
    3 : begin
      p.x := (ap.x+app * sin (b1) + arp * sin (a1)) ;
      p.y := (ap.y+app * cos (b1) + arp * cos (a1)) ;
      end ;
    4 : begin
      p.x := (ap.x+app * sin (b1) - arp * sin (a1)) ;
      p.y := (ap.y+app * cos (b1) + arp * cos (a1)) ;
      end ;
  end ;
  (* fin de case *)
  (* fin de choix *)
  (* debut de parallele1 *)
begin
  a := p.x / lo ; b := p.y / la ;
  arp := b * sqrt (sqr (ap.x-dp.x) + sqr (ap.y-dp.y)) ;
  app := a * sqrt (sqr (ap.x-bp.x) + sqr (ap.y-bp.y)) ;
  a1 := arctan (abs (dp.x - ap.x) / abs (ap.y-dp.y)) ;
  if (abs (ap.y - bp.y) = 0) then b1 := pi / 2 else
    b1 := arctan (abs (bp.x-ap.x) / (abs (ap.y - bp.y))) ;
  if (dp.x <= ap.x) and (ap.y <= bp.y) then i := 1 else
    if (dp.x >= ap.x) and (ap.y <= bp.y) then i := 2 else
      if (dp.x >= ap.x) and (ap.y >= bp.y) then i := 3 else
        if (dp.x <= ap.x) and (ap.y >= bp.y) then i := 4 ;
  choix ;
  end ;
  (* fin de parallele1 *)
begin
  writeln (' donner respectivement les dimensions du masque en direction verticale ( la ) et en direction horizontale ( lo ) et p
  uis les max.deviation des parabols dx et dy ') ;
  writeln (' la ,lo,dx,dy = ? ') ;
  readln (la, lo, dx, dy) ;
  writeln (' donner l'adresse d'un point sur le masque : p.x = ? et p.y = ? ') ;
  readln (p.x, p.y) ;
  reset (result) ;
  read (result, ap, bp, dp) ;
  gx := (bp.x-ap.x) / lo ;
  gy := (dp.y-ap.y) / la ;
  p.x := (p.x * gx) ;
  p.y := (p.y * gy) ;
  la := dp.y-ap.y ;
  lo := bp.x-ap.x ;
  p.x := p.x-lo / 2 ; p.y := p.y-la / 2 ;
  writeln ('est ce que le type d.aberration dans le cas actuel est coussin ou tonneau ? si cou. donc aber = c sinon aber = t ') ;
  writeln (' aber =? donner la reponse c ou t ') ;
  read (aber) ;
  a1 := (4 * dy) / (lo * lo * (lo / 2 - dy)) ;
  bet := (4 * dx) / (la * la * (lo / 2 - dx)) ;
  if aber = 'c' then coussin1 else tonneau1 ;
  p.x := (lo / 2 + p.x) ; p.y := (la / 2 - p.y) ;
  if (abs (an v-dn x) >= er) or (abs (ap.y - bp.y) >= er) then parallele1 ;

```

```
writeln ('no. de la fenetre en direction x = ', xf : 2, 'et en direction y = ', yf : 2) ;  
write ('position du point a1, interieur de ce zoom : x = ', pp.x : 4, 'y = ', pp.y : 4)  
end.
```

```

program z3 (input, output, result) ;
e son position sur l'image de MBE *)
const er = 5 ;
type couple = record
  x, y : real
end ;
var ap, bp, dp, gp, couple : couple ;
    al, bet, gx, gy, la, lo : real ;
    result : file of couple ;
    n, dx, dy, xf, yf : integer ;
    q, r, s, t, aber : char ;
procedure romu ;
sous forme x et y dans un system cartisienne *)
var nm, np, q1 : integer ;
function val (m : char) : integer ;
  var i : integer ;
  begin
    i := ord (m) ;
    if (i >= ord ('0')) and (i <= ord ('9')) then val := i - ord ('0') else if (i <= ord ('f')) and (i >= ord ('a')) then va
    l := i - ord ('a') + 10 else writeln (' il ya un erreur a l.entree : les carac. donnees ne sont pas hex. ') ;
  end ;
  begin
    if val (q) < 8 then writeln (' il ya un erreur : l.adresse du pixel <8000 ') else
      nm := val (q) * 16 * 16 * 16 + val (r) * 16 * 16 * 16 + val (s) * 16 * 16 + val (t) ;
      np := nm - 8 * 16 * 16 * 16 ;
      q1 := np div 512 ;
      p.x := np mod 512 ;
      p.y := q1 + 64 * (n - 1) ;
      ayage de MBE *)
        p.x := p.x + xf * 512 ;
        p.y := p.y + yf * (512 - 64) ;
      end
    end ;
  procedure paralle12 ;
  const pl = 3.1416 ;
  var a, b, a1, b1, abp, arp, rnp : real ;
  i : integer ;
  procedure choix2 ;
  begin
    case i of
      1 : begin
          arp := ((p.y-ap.y) * sin (b1) + (ap.x-p.x) * cos (b1)) / sin (a1 + b1) ;
          rnp := ((p.y-ap.y) * sin (a1) - (ap.x-p.x) * cos (a1)) / sin (a1 + b1) ;
        end ;
      2 : begin
          arp := ((p.y-ap.y) * sin (b1) + (ap.x-p.x) * cos (b1)) / sin (abs (a1 - b1)) ;
          rnp := ((p.y-p.y) * sin (a1) + (p.x-ap.x) * cos (a1)) / sin (abs (a1 - b1)) ;
        end ;
      3 : begin
          arp := ((p.y-ap.y) * sin (b1) + (p.x-ap.x) * cos (b1)) / sin (a1 + b1) ;
          rnp := ((p.x-ap.x) * cos (a1) - (p.y-ap.y) * sin (a1)) / sin (a1 + b1) ;
        end ;
      4 : begin
          arp := ((p.y-ap.y) * sin (b1) + (p.x - ap.x) * cos (b1)) / sin (abs (a1 - b1)) ;
          rnp := ((p.x-ap.x) * cos (a1) + (p.x-ap.x) * cos (a1)) / sin (abs (a1 - b1)) ;
        end ;
    end ;
  end ;
  (* programme pour determiner la position d.un point sur le masque a partir d
  (* procedure pour convertir l.adresse d.un point en hexa. a decimal et puis
  (* debut de fonction val *)
  (* fin de romu *)
  (* procedure pour corriger des deformations de montage et rotation de C.I *)

```

```

end ;
begin
  adp := sqrt (sqr (ap.x-dp.x) + sqr (dp.y-ap.y)) ;
  abp := sqrt (sqr (bp.x-ap.x) + sqr (ap.y-bp.y)) ;
  a1 := arctan (abs (dp.x-ap.x) / abs (ap.y-dp.y)) ;
  if abs (ap.y-bp.y) = 0 then b1 := pi / 2 else
    b1 := arctan (abs (bp.x - ap.x) / abs (ap.y-bp.y)) ;
  if (dp.x <= ap.x) and (ap.y <= bp.y) then i := 1 else
    if (dp.x >= ap.x) and (ap.y <= bp.y) then i := 2 else
      if (dp.x >= ap.x) and (ap.y >= bp.y) then i := 3 else i := 4 ;
  choix2 ;
  a := rnp / abp ; b := arp / adp ;
  p.x := a * (bp.x-ap.x) ; p.y := b * (dp.y-ap.y) ;
end ;
)
procedure coussin2 ;
var h, l : real ;
begin
  h := p.y / (a1 * sqr (p.x) + 1) ;
  l := p.x / (bet * sqr (p.y) + 1) ;
  p.x := 0.25 * a1 * h * sqr (lo) + l ;
  p.y := 0.25 * bet * l * sqr (la) + h ;
end ;
)
procedure tonneau2 ;
var h, l : real ;
begin
  h := p.y / (1 - a1 * sqr (p.x)) ;
  l := p.x / (1 - bet * sqr (p.y)) ;
  p.x := 1 - 0.25 * bet * l * sqr (la) ;
  p.y := h - 0.25 * a1 * h * sqr (lo) ;
end ;
)
begin
  (* fin de choix *)
  (* debut de parallele2 *)
  (* fin de coussin2 *)
  (* proc. pour corriger l.aber. de l.image si elle est de type tonneau *)
  (* fin de tonneau2 *)
  (* debut du programme principal *)
  writeln (' donner les dimensions du masque : la et lo ') ;
  readln (la, lo) ;
  writeln (' donner les max. deviations dx et dy : dx =? ,dy =? ') ;
  readln (dx, dy) ;
  writeln ('donner l.adresse d'un point sur l.image sous forme de 5 carac. consecutifs : 4 carac. hexa. + no. de processeur q,r. ,t,n =? ') ;
  readln (q, r, s, t, n) ;
  writeln (' donner l.adresse de la fenetre contenant cette point : xf =? et yf =? xf indique le déplacement de la fenetre en direction horizontale et yf le déplacement vertical ') ;
  readln (xf, yf) ;
  writeln ('est ce que le type d.aberration dans le cas actuel est coussin ou tonneau ? si cou. donc aber = c sinon aber = t ')
  readln (' aber = ? donner la reponse c ou t ') ;
  readln (aber) ;
  reset (result) ;
  read (result, ap, bp, dp) ;
  romu ;
  if (abs (ap.x-dp.x) >= er) or (abs (ap.y-bp.y) >= er) then parallele2 ;
  a1 := 4 * dy / (lo * lo * (la / 2 - dy)) ; bet := 4 * dx / (la * la * (lo / 2 - dx)) ;
  gx := (bp.x-ap.x) / lo ; gy := (dp.y-ap.y) / la ;
  p.x := p.x / gx - lo / 2 ; p.y := la / 2 - p.y / gy ;
  if aber = 'c' then coussin2 else tonneau2 ;
  p.x := round (p.x + lo / 2) ; p.y := round (p.y + la / 2) ;

```

```
write (' position du point sur le masque = ', 'x =', p.x : 4, 'y =', p.y : 4) ;  
end.
```

```

E *)
program romu (input,output);
label 10,11;
var
  m,s,t,u:char;
  nm,np,x,y,n,q,r : integer;
function val(m:char):integer;
var
  i:integer;
begin
  i:=ord(m);
  if ((i>= ord('0')) and (i<= ord('9'))) then
    val:=i- ord('0')
  else if ((i<= ord('f')) and (i>= ord('a'))) then
    val:=i-ord('a') +10
  else goto 10
end;

begin (* debut du programme principale *)
  read(m,s,t,u,n);
  if val(m)<8 then goto 10 else (* partie du l.adresse image en ROMUALD est entre 8000 et ffff *)
  begin
    nm:=val(m)*16*16+val(s)*16*16+val(t)*16+val(u);
    np:=nm-8*16*16*16;
    q:=np div 512;
    r:=np mod 512;
    y:=q+64*(n-1);
    write('x = ',r:4);
    write('y = ',y:4);
    goto 11
  end;
10: write('11 ya un erreur a l.entree : soit les caracteres donnees no sont pas hexa. soit l.adresse du pixel est < 8000 ');
11: end.

```

(* Programme pour déterminer l'histogramme d'une image de 256 niveaux de gris *)

```
program hist1(fich,output);
const  eche=100;
var  fich :file of 0..255;
j,k: integer;
p:array[0..255] of integer;
  i:0..255;
begin
  reset(fich);
  for i:=0 to 255 do p[i]:=0;
  while not eof(fich) do
  begin
    p[fich^]:=p[fich^]+1;
    get(fich);
  end;
  for i:=0 to 255 do
    p[i]:=trunc(p[i]/eche);
  for k:=1 to 2 do
  begin
    for j:=trunc(3200/eche) downto 0 do
      begin
        write(j#eche:5,' ');
        for i:=(k-1)*125 to k*125+5 do if p[i]>=j then write('*') else write(' ');
        writeln;
        end;
        writeln(' ',i);
      end;
    for i:=1 to 5 do writeln(' ',i);
    end;
  end.
end.
```

(* Programme pour éliminer des bruits sur les lignes*)

```
program b1(output, fich2, fich3);
const col:=25;
var
  fich2, fich3: file of 0..3;
  l, j: integer;
  l, k: 0..3;
  p: array[0..3] of integer;
  t: char;

begin
  k:=0;
  reset(fich2);
  rewrite(fich3);
  for l:=0 to 3 do p[l]:=0;
  for l:=1 to 218 do if not eof(fich2) then
    begin
      for j:=1 to col do
        begin
          l:=fich2^;
          p[l]:=p[l]+1;
          if not eof(fich2) then get(fich2);
        end;
      j:=0;
      for l:=0 to 3 do if p[l]>j then
        begin
          j:=p[l];
          k:=l;
        end;
      fich3^:=k;
      put(fich3);
      case k of
        0:t:='0';
        1:t:='1';
        2:t:='2';
        3:t:='3';
      end;
      write(' ', 25);
      for j:=1 to 25 do write(t);
      writeln;
      if not eof(fich2) then get(fich2);
    end;
  end.
```

```

(* programme pour eliminer des bruits sur les lignes *)
program bruit(input,fich2,fich3,output);
const col=25;
var
  fich2,fich3: file of 0..3;
  l:array[0..10,1..25] of integer;
  t:char;
  k:0..3;

begin
  reset(fich2);
  rewrite(fich3);
  read(lm,col);
  writeln(' ');
  for l:=1 to 128 do
    begin
      if not eof(fich2) then
        begin
          10:=0; 11:=0; 12:=0; 13:=0;
          for j:=1 to col do
            begin
              case fich2^ of
                0: 10:=10+1;
                1: 11:=11+1;
                2: 12:=12+1;
                3: 13:=13+1;
              end;
              if not eof(fich2) then get(fich2);
            end;
          end;
          (* on trouve le maximum des 10;11; 12; 13; *)
          if 10>11 then l:=10 else l:=11;
          if 12>l then l:=12;
          if 13>l then l:=13;
          if l=10 then k:=0 else if l=12 then k:=2
            else if l=11 then k:=1 else k:=0;
          fich3^:=k;
          put(fich3);
          case k of
            0: t:='0';
            1: t:='1';
            2: t:='2';
            3: t:='3';
          end;
          write(' ',20..l:3,' ');
          for i:=1 to 25 do write(t:2);
          writeln;
          if not eof(fich2) then get(fich2);
        end;
      end;
    end;
  end;
  writeln(' ');
end;

```

```
program abr(fich3,input,output); (* programme pour determiner l'aberation *)
```

```
var  
  fich3 :file of 0..3;  
  niv :0..3;  
  l.ln,row:integer;
```

```
begin
```

```
  reset(fich3);
```

```
  read(niv,row);
```

```
  for l:=1 to row do get(fich3);
```

```
  ln:=row;
```

```
  while(fich3<>niv) and(not eof(fich3))do
```

```
    begin
```

```
      ln:=ln+1;
```

```
      get(fich3);
```

```
    end;
```

```
    writeln(' ',45,'a partir de la ligne =',row:3, 'et pour la niveau =',niv);
```

```
    write(' ',50,ln+1);
```

```
    while(fich3^=niv) and (not eof(fich3)) do
```

```
      begin
```

```
        ln:=ln+1;
```

```
        get(fich3);
```

```
      end;
```

```
      writeln;
```

```
      writeln;
```

```
      write(' ',50,ln
```

```
end.
```

```

program pfich3(output,fich,txfich,input);
(* programme pour imprimer les fichiers de type intervalles *)
type niv=0..3;

var fich:file of niv;
txfich:text:(*fichier de type text pour ecrire la dessus*)
i,im,col:integer;

begin
  writeln('col=?');
  readln(col);
  writeln('image no.=?');
  readln(im);
  reset(fich);
  rewrite(txfich);
  writeln(txfich,'***** image no.=',im:2,' a ',col+25:3,' *****');
  writeln(txfich);

  while not eof(fich) do
  begin
    for i:=1 to 25 do
    begin
      write(txfich,fich^:2);
      if not eof(fich) then get(fich);
    end;
    writeln(txfich);
  end;
  writeln(txfich,'FIN DU FICHER');
end.

```

```

program pfich4(output, fich, txfich, input); (*programme pour imprimer les fichiers de type caracteres *)
type niv=0..3;
var fich:file of niv;
    txfich:text; (* fichier de type text pour ecrire la dessus *)
    i,im,col:integer;
    ch:char;
begin
    writeln('col=?');
    readln(col);
    writeln('image no.=?');
    readln(im);
    reset(fich);
    rewrite(txfich);
        writeln(txfich,'***** image no.=',im:2,' col=',col:3,' a ',col+25,' *****');
        writeln(txfich);
    while not eof(fich) do
    begin
        for i:=1 to 25 do
        begin
            case fich^ of
            0: ch:='*';
            1: ch:='$';
            2: ch:='-';
            3: ch:='.';
            end;
            write(txfich,ch);
            if not eof(fich) then get(fich);
        end;
        writeln(txfich);
    end;
    writeln(txfich,'FIN DU FICHIER');
end.

```

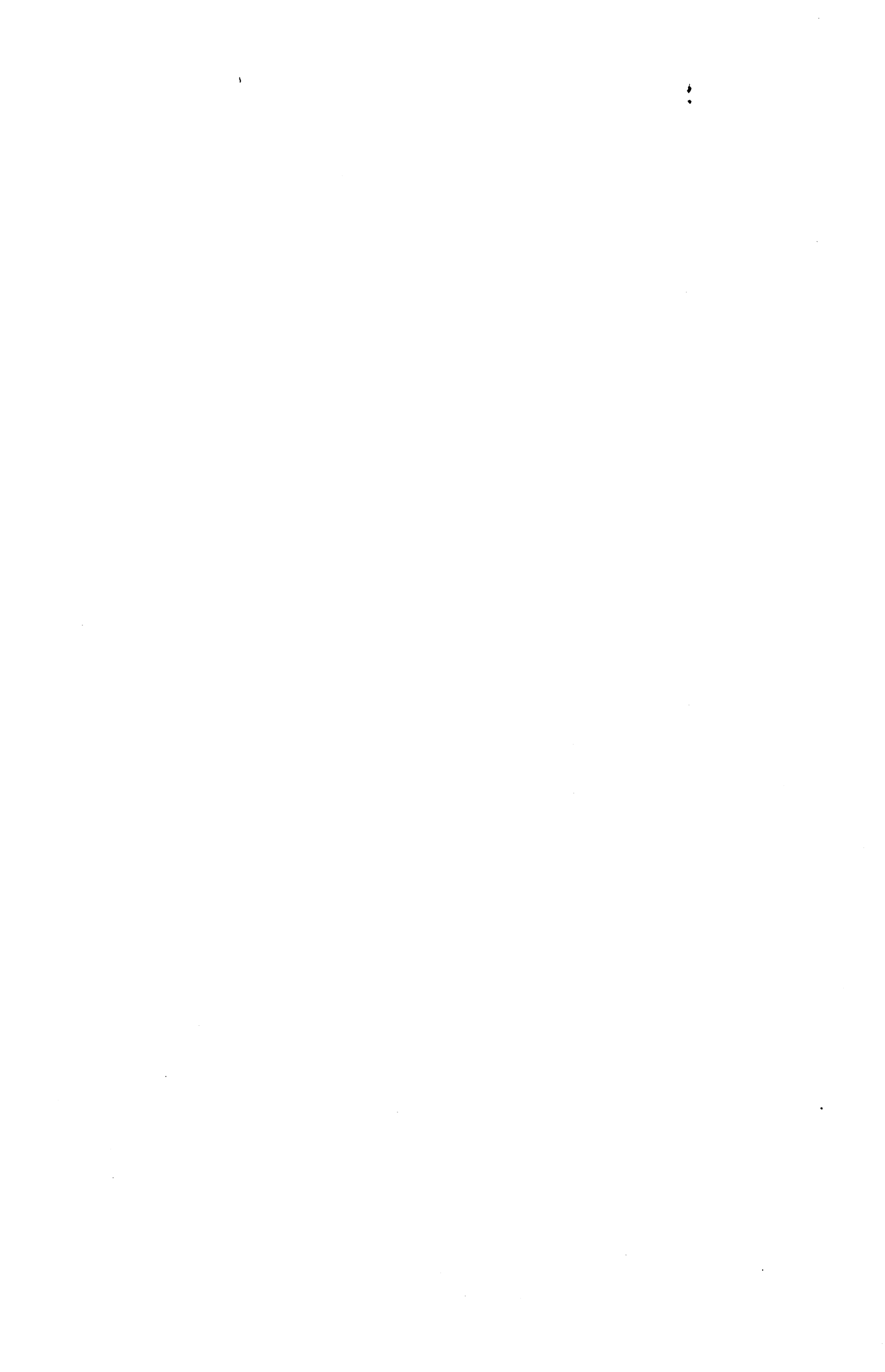
```
program code1(fich1,fich2); (*programme pour convertir 1, intervalle 0..255 a 4 niveaux *)
const a=50; b=100; c=180;
var fich1:file of 0..255;
    fich2:file of 0..3;
begin
  reset(fich1);
  rewrite(fich2);
  while not eof(fich1) do
  begin
    if fich1^<a then fich2^:=0
    else if fich1^<b then fich2^:=1
    else if fich1^<c then fich2^:=2
    else fich2^:=3;
    put(fich2);
    get(fich1);
  end;
end.
```


REFERENCES

- [1] Rosenfeld A. and KAK A.C. "Digital Picture Processing" - Academic Press 1976
- [2] Pratt W.K. : "Digital image processing" Wiley-New York 1978
- [3] Pratt W.K. : "Correlation Techniques of Image Registration" IEEE Trans. Aer and Elec Syst. Vol 10 n° 3 - 1974
- [4] Rosenfeld A. and KAK A.C. "Digital Picture Processing" Second Edition Volume 1 Academic Press 1982
- [5] Rosenfeld A. and KAK A.C. "Digital Picture Processing" Second Edition Volume 2 Academic Press 1982
- [6] Duda R.O. and Hart P.E. "Pattern Classification and scene Analysis" Wiley New-York 1973
- [7] O'Handley d.A. and Green W.B. "Recent developements in Digital Image processing" Proc. IEEE Vol 60 N° 7 1972
- [8] Gonzals R.C. and Wintz P. "Digital image processing" Addison Wesley 1977
- [9] MAX J. "Methodes et Techniques de Traitement du Signal" Masson 1980
- [10] J.M. Fournier, a. Georges, J.L. Rajnard : "Analyse en dynamique des circuits intégrés VLSI par stroboscopie au MBE" Note technique CNET/GRE/34 Mai 1981
- [11] M.R. Burgress, H.B. Haanstra, C. Schiller Scanning electron microscopy and its application to semiconductor device assessment. Acta Electronica 18.1.1975
- [12] L. Bergher "Analyse de défaillances de circuits intégrés par microscopie Electronique : Premières Expérimentations" R.R. de recherche IMAG n° 426 Janvier 1984
- [13] J. Laurent B. Courtois : "Définition et utilisation d'un outil de tests de VLSI par faisceau d'électrons" R.R. n° 374 IMAG Mai 1983
- [14] G. Baille, J.Laurent : Présentation d'un outil d'aide à la mise au point de circuits intégrés VLSI Prototypes" R.R. n° 298 IMAG Mars 1982
- [15] P.I. BARNEA and F. Silverman : "A class of Algorithms for fast digital image Régistration" IEEE Trans. on Computers Vol. C.21 n° 2 Feb. 1972

- [16] R. Buchman : "The Scanning Electron Microscope for Semiconductor Applications
Micro-electronic manufacturing and testing Feb. 1983
- [17] Hamel G. "Correction des déformations d'Images Numériques"
Thèse P.H.D préparée au Canada 1981
- [18] C. Baille, J.Laurent : Etude du comportement interne des circuits VLSI
par microscopie électronique "Congrès AFCET, Lille Nov. 1982
- [19] L. Bergher, J. Laurent "Analyse du comportement interne de circuits intégrés
par faisceau d'Electrons". Rapport de IMAG Mai 1984
- [20] B. Courtois : Debugging VLSI Using SEM
R.R. IMAG n° 310 Sep. 1983
- [21] G. Baille, B. Courtois, J.Laurent "Analyse de défaillances de VLSI par
microscopie électronique"
R. R. n° 304 IMAG Juin 1983
- [22] Rubat du Merac-c, Jutier P., Laurent J., Courtois B. "A new domain for
image Analysis : VLSI Circuits Testing with ROMUALD specialized in parallel
image Porcessing" British Pattern Recognition Association Sept. 1983
- [23] G. Baille, B. Courtois, J.Laurent "Analyse de défaillances de VLSI par
microscopie Electronique" Bordeaux Octobre 1982
- [24] G. Baille, J. Laurent, J.P. Schoellkopf "présentation du système MADAM,
ENSIMAG, Grenoble 1979
- [25] M. KUNT "Traitement Numérique des Signaux" Dunod 1981
- [26] G.V. LUKIANOFF, J.S. WOLCOTT, J.M. MORISSEY : Electron beam Testing
of VLSI dynamic RAMS" Int. Test. Conf. Philadelphie USA Octobre 1981
- [27] P. Fazekas, H.P. Feurbaum, E. Wolfgang : Scaning electron beam probes
VLSI chips", Electronics Juillet 1981.
- [28] R. Moulin "le microscope électronique à balayage et la microanalyse
a selection d'énergie" 1ère partie Journal du Four Electronique et des
industries électrochimiques.
- [29] T.R. TOWN, P.A. MERMAN, G.V. LUKIANOFF : practical technique for
application of voltage contrast to diagnosis of integrated circuits" Scaning
Electron Microscopy Vol. 1 1977
- [30] B. Bretagnolle, C. Rubat du Merac" Mode d'emploi de la machine ROMUALD
multimicroprocesseur interactif de traitement d'images" AFCET
Toulouse 1979
- [31] B. Bretagnolle, C. Rubert du Merac, J. Seguin : "Architecture of a multi-
processeur for picture capture and processing"
Int. mini and micro-conference Houston Nov. 1979

- [32] G. Baille, L. Bergher, C. Courtois, J. Laurent - C. Rubat du Merac
"Testing for failure Analysis : New tools and new test methodes" Milan
Juin 1983
- [33] Berger Sabatel G., Courtois B. : E. Beam Testing Stratégies for VLSI
R.R. n° 371 IMAG Mai 1983
- [34] E. Wolfgang, R. Lindner, P. Fazkas, H.P. Feuerbaum
"Electron-beam testing of VLSI Circuits"
IEEE Trans on electron-devices vol. Ed. 26 n° 4 April 1979
- [35] E.I. Muehldorf, A.D. Sarkar "LSI logique testing. An overview"
IEEE Trans on Computer Vol. C. 30 n° 1 Janv. 1981
- [36] J.F. Bresse "Courant induit (E.B.I.C.) et contraste de potentiel dans les
dispositifs semiconducteurs"
Journal de microscopie et stroboscopie électronique Vol. 6 - 1981
- [37] E.V. Ageev, I.F. Anaskin, P.A. Stoyanor "Experimental Analysis of Image
Correction Methods For Electron Microscopy"
Izvestiya Akademii Nauk SSSR Vol. 41 n° 7 PP.1447 - 1451 - 1977
- [38] P.W. Hawkes "Lens Aberrations" The Cavendish Laboratory
Cambridge-England - 1969
- [39] F. Maurice, L. Meny et R. Tixier
"Microanalyse et Microscopie Electronique à Balayage"
Les Editions de Physique, ouvrage présentant les cours de l'école d'été
organisée à l'ENS d'Electrochimie et d'Electrometallurgie de Grenoble (ENSEEG)
en Septembre 1978.



AUTORISATION de SOUTENANCE

VU les dispositions de l'arrêté du 16 avril 1974

VU les rapports de présentation de Messieurs

- . F. ANCEAU, Professeur
- . E. MACKOWIAK, Directeur D.C.A EFCIS

Monsieur ZOLGHADRASLI Alireza

est autorisé à présenter une thèse en soutenance en vue de l'obtention du diplôme de
DOCTEUR-INGENIEUR, spécialité "Informatique".

Fait à Grenoble, le 15 mars 1985

Le Président de l'I.N.P.-G

D. BLOCH
Président
de l'Institut National Polytechnique
de Grenoble

P.O. le Vice-Président,

