



**HAL**  
open science

# Traitement d'images en analyse de défaillances de circuits intégrés par faisceau d'électrons

Dider Conard

► **To cite this version:**

Dider Conard. Traitement d'images en analyse de défaillances de circuits intégrés par faisceau d'électrons. Modélisation et simulation. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1991. Français. NNT: . tel-00339510

**HAL Id: tel-00339510**

**<https://theses.hal.science/tel-00339510>**

Submitted on 18 Nov 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 par

**Didier CONARD**

pour obtenir le titre de **DOCTEUR**

de **L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

(arrêté ministériel du 23 novembre 1988)

(spécialité : **microélectronique**)

---

**TRAITEMENT D'IMAGES EN ANALYSE DE  
DEFAILLANCES DE CIRCUITS INTEGRES  
PAR FAISCEAU D'ELECTRONS**

---

date de soutenance : 11 février 1991

composition du jury :

Messieurs	Pierre	GENTIL	Président
	Alain	CHEHIKIAN	Rapporteur
	Alain	CHION	Rapporteur
	Bernard	COURTOIS	
	Jacques	LAURENT	Invité
	Max	SARFATI	
	Maurice	SECOURGEON	

Thèse préparée au sein du laboratoire TIM3





# INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

46 avenue Felix Viallet  
38031 GRENOBLE cedex

Tél : 76 57.45.00

Année universitaire 1989

**Président de l'Institut :**  
Monsieur Georges LESPINARD

## Professeurs des Universités

BARIBAUD Michel	ENSERG	JAUSSAUD Pierre	ENSIEG
BARRAUD Alain	ENSIEG	JOST Rémy	ENSPG
BAUDELET Bernard	ENSPG	JOUBERT Jean-Claude	ENSPG
BEAUFILS Jean-Pierre	INPG	JOURDAIN Geneviève	ENSIEG
BLIMAN Samuel	ENSERG	LACOUME Jean-Louis	ENSIEG
BOIS Philippe	ENSHMG	LADET Pierre	ENSIEG
BONNETAIN Lucien	ENSEEG	LESIEUR Marcel	ENSHMG
BONNET Guy	ENSPG	LESPINARD Georges	ENSHMG
BRISSONNEAU Pierre	ENSIEG	LONGEQUEUE Jean-Pierre	ENSPG
BRUNET Yves	IUFA	LORET Benjamin	ENSHMG
CAILLERIE Denis	ENSHMG	LOUCHET François	ENSEEG
CAVAIGNAC Jean-François	ENSPG	LUCAZEAU Guy	ENSEEG
CHARTIER Germain	ENSPG	MASSE Philippe	ENSIEG
CHENEVIER Pierre	ENSERG	MASSELOT Christian	ENSIEG
CHERADAME Hervé	UFR PGP	MAZARE Guy	ENSIMAG
CHERUY Arlette	ENSIEG	MOIR Roger	ENSIMAG
CHOVET Alain	ENSERG	MOREAU René	ENSHMG
COHEN Joseph	ENSERG	MORET Roger	ENSIEG
COLINET Catherine	ENSEEG	MOSSIERE Jacques	ENSIMAG
CORNUT Bruno	ENSIEG	OBLED Charles	ENSHMG
COULOMB Jean-Louis	ENSIEG	OZIL Patrick	ENSEEG
COUMES André	ENSERG	PA ULEAU Yves	ENSEEG
CROWLEY James	ENSIMAG	PERRET Robert	ENSIEG
DARVE Félix	ENSHMG	PIAU Jean-Michel	ENSHMG
DELLA-DORA Jean	ENSIMAG	PIC Etienne	ENSERG
DEPEY Maurice	ENSERG	PLATEAU Brigitte	ENSIMAG
DEPORTES Jacques	ENSPG	POUPOT Christian	ENSERG
DEROO Daniel	ENSEEG	RAMEAU Jean-Jacques	ENSEEG
DESRE Pierre	ENSEEG	REINISCH Raymond	ENSPG
DOLMAZON Jean-Marc	ENSERG	RENAUD Maurice	UFR PGP
DURAND Francis	ENSEEG	ROBERT André	UFR PGP
DURAND Jean-Louis	ENSPG	ROBERT François	ENSIMAG
FAUTRELLE Yves	ENSHMG	SABONNADIÈRE Jean-Claude	ENSIEG
FOGGIA Albert	ENSIEG	SAUCIER Gabrièle	ENSIMAG
FONLUPT Jean	ENSIMAG	SCHLENKER Claire	ENSPG
FOULARD Claude	ENSIEG	SCHLENKER Michel	ENSPG
GANDINI Alessandro	UFR PGP	SERMET Pierre	ENSERG
GAUBERT Claude	ENSPG	SILVY Jacques	UFR PGP
GENTIL Pierre	ENSERG	SIRIEYS Pierre	ENSHMG
GENTIL Sylviane	ENSIEG	SOHM Jean-Claude	ENSEEG
GREVEN Héléne	IUFA	SOLER Jean-Louis	ENSIMAG
GUEGUEN Claude	ENSIEG	SOUQUET Jean-Louis	ENSEEG
GUERIN Bernard	ENSERG	TROMPETTE Philippe	ENSHMG
GUYOT Pierre	ENSEEG	VINCENT Henri	ENSPG
IVANES Marcel	ENSIEG	ZADWORNY François	ENSERG

## Personnes ayant obtenu le diplôme d'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

BECKER Monique  
BINDER Zdenek  
CHASSERY Jean-Marc  
CHOLLET Jean-Pierre  
COEY John  
COLINET Catherine  
COMMAULT Christian  
CORNUJOLS Gérard  
COULOMB Jean- Louis  
COURNIL M.  
DALARD Francis  
DANES Florin  
DEROO Daniel  
DIARD Jean-Paul  
DION Jean-Michel  
DUGARD Luc  
DURAND Madeleine  
DURAND Robert  
GALERIE Alain  
GAUTHIER Jean-Paul  
GENTIL Sylviane

GHIBAUDO Gérard  
HAMAR Sylvaine  
HAMAR Roger  
LACHENAL D.  
LADET Pierre  
LATOMBE Claudine  
LE HUY H  
LE GORREC Bernard  
MADAR Roland  
MEUNIER G.  
MULLER Jean  
NGUYEN TRONG Bernadette  
NIEZ J.J  
PASTUREL Alain  
PLA Fernand  
ROGNON J.P.  
ROUGER Jean  
TCHUENTE Maurice  
VINCENT Henri  
YAVARI A.R.

### Chercheurs du C.N.R.S

#### DIRECTEURS DE RECHERCHE CLASSE 0

LANDEAU	Ioan
NAYROLLES	Bernard

#### Directeurs de recherche 1ère Classe

ANSARA Ibrahim  
CARRE René  
FRUCHART Robert  
HOPFINGER Emile

JORRAND Philippe  
KRAKOWIAK Sacha  
LEPROVOST Christian  
VACHAUD Georges  
VERJUS Jean-Pierre

#### Directeurs de recherche 2ème Classe

ALEMANY Antoine  
ALLIBERT Colette  
ALLIBERT Michel  
ARMAND Michel  
AUDIER Marc  
BERNARD Claude  
BINDER Gilbert  
BONNET Roland  
BORNARD Guy  
CAILLET Marcel  
CALMET Jacques  
CHATILLON Chritiant  
CLERMONT Jean-Robert  
COURTOIS Bernard  
DAVID René  
DION Jean-Michel  
DRIOLE Jean  
DURAND Robert  
ESCUDIER Pierre  
EUSTATHOPOULOS Nicolas  
GARNIER Marcel  
GUELIN Pierre

JOUD Jean-Charles  
KAMARINOS Georges  
KLEITZ Michel  
KOFMAN Walter  
LEJEUNE Gérard  
MADAR Roland  
MERMET Jean  
MICHEL Jean-Marie  
MEUNIER Jacques  
PEUZIN Jean-Claude  
PIAU Monique  
RENOUARD Dominique  
SENATEUR Jean-Pierre  
SIFAKIS Joseph  
SIMON Jean-Paul  
SUERY Michel  
TEODOSIU Christian  
VAUCLIN Michel  
VENNEREAU Pierre  
WACK Bernard  
YONNET Jean-Paul

**Personnalités agréées à titre permanent à diriger  
des travaux de recherche  
(décision du conseil scientifique)**

**E.N.S.E.E.G**

HAMMOU Abdelkader  
MARTIN-GARIN Régina  
SARRAZIN Pierre  
SIMON Jean-Paul

**E.N.S.E.R.G**

BOREL Joseph

**E.N.S.I.E.G**

DESCHIZEAUX Pierre  
GLANGEAUD François  
PERARD Jacques  
REINISCH Raymond

**E.N.S.H.M.G**

ROWE Alain

**E.N.S.I.M.A.G**

COURTIN Jacques

**C.E.N.G**

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

**Laboratoires extérieurs :**

**C.N.E.T**

DEVINE Rodericq  
GERBER Roland  
MERCKEL Gérard  
PAULEAU Yves

**Situation particulière**

**PROFESSEURS D'UNIVERSITE**

**DETACHEMENT**

ENSIMAG	LATOMBE	J. Claude	Détachement	21/10/1989
ENSHMG	PIERRARD	J. Marie	Détachement	30/04/1989
ENSIMAG	VEILLON	Gérard	Détachement	30/09/1990
ENSIMAG	VERJUS	J. Pierre	Détachement	30/09/1989
ENSPG	BLOCH	Daniel	Recteur à c/	21/12/1988

**SURNOMBRE**

INPG	CHIAVERINA	Jean	30/09/1989
ENSHMG	BOUVARD	Maurice	30/09/1991
ENSEEG	PARIAUD	J. Charles	30/09/1991



Président de l'Université :  
**M. NEMOZ Alain**

**Année universitaire 1988-1990**

**MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT DE SCIENCES ET DE GÉOGRAPHIE**

**PROFESSEURS de 1<sup>ère</sup> Classe**

ADIBA Michel  
 ANTOINE Pierre  
 ARNAUD Paul  
 ARVIEU Robert  
 AUBERT Guy  
 AURIAULT Jean-Louis  
 AYANT Yves  
 BARBIER Marie-Jeanne  
 BARJON Robert  
 BARNOUD Fernand  
 BARRA Jean-René  
 BECKER Pierre  
 BEGUIN Claude  
 BELORISKY Elie  
 BENZAKEN Claude  
 BERARD Pierre  
 BERNARD Alain  
 BERTRANDIAS Françoise  
 BERTRANDIAS Jean-Paul  
 BILLET Jean  
 BOELHER Jean-Paul  
 BRAVARD Yves  
 CARLIER Georges  
 CASTAING Bernard  
 CAUQUIS Georges  
 CHARDON Michel  
 CHIBON Pierre  
 COHEN ADDAD Jean-Pierre  
 COLIN DE VERDIERE Yves  
 CYROT Michel  
 DEBELMAS Jacques  
 DEGRANGE Charles  
 DEMAILLY Jean-Pierre  
 DENEUVILLE Alain  
 DEPORTES Charles  
 DOLIQUE Jean-Michel  
 DOUCE Roland  
 DUCROS Pierre  
 FINKE Gerd  
 GAGNAIRE Didier  
 GAUTRON René  
 GENIES Eugène  
 GERMAIN Jean-Pierre  
 GIDON Maurice  
 GUITTON Jacques  
 HICTER Pierre  
 IDELMAN Simon  
 JANIN Bernard  
 JOLY Jean-René

Informatique  
 Géologie I.R.I.G.M.  
 Chimie Organique  
 Physique Nucléaire I.S.N.  
 Physique C.N.R.S.  
 Mécanique  
 Physique Approfondie  
 Electrochimie  
 Physique Nucléaire I.S.N.  
 Biochimie Macromoléculaire Végétale  
 Statistiques-Mathématiques Appliquées  
 Physique  
 Chimie Organique  
 Physique  
 Mathématiques Pures  
 Mathématiques Pures  
 Mathématiques Pures  
 Mathématiques Pures  
 Géographie  
 Mécanique  
 Géographie  
 Biologie Végétale  
 Physique  
 Chimie Organique  
 Géographie  
 Biologie Animale  
 Physique  
 Mathématiques Pures  
 Physique du Solide  
 Géologie Générale  
 Zoologie  
 Mathématiques Pures  
 Physique  
 Chimie Minérale  
 Physique des Plasmas  
 Physiologie Végétale  
 Cristallographie  
 Informatique  
 Chimie Physique  
 Chimie  
 Chimie  
 Mécanique  
 Géologie  
 Chimie  
 Chimie  
 Physiologie Animale  
 Géographie  
 Mathématiques Pures

JOSELEAU Jean-Paul	Biochimie
KAHANE André, détaché	Physique
KAHANE Josette	Physique
KRAKOWIAK Sacha	Mathématiques Appliquées
LAJZEROWICZ Jeanine	Physique
LAJZEROWICZ Joseph	Physique
LAURENT Pierre-Jean	Mathématiques Appliquées
LEBRETON Alain	Mathématiques Appliquées
DE LEIRIS Joël	Biologie
LHOMME Jean	Chimie
LLIBOUTRY Louis	Géophysique
LOISEAUX Jean-Marie	Sciences Nucléaires I.S.N.
LONGEQUEUE Nicole	Physique
LUNA Domingo	Mathématiques Pures
MACHE Régis	Physiologie Végétale
MASCLE Georges	Géologie
MAYNARD Roger	Physique du solide
OMONT Alain	Astrophysique
OZENDA Paul	Botanique (Biologie Végétale)
PANNETIER Jean	Chimie
PAYAN Jean-Jacques	Mathématiques Pures
PEBAY-PEYROULA Jean-Claude	Physique
PERRIER Guy	Géophysique
PIERRE Jean-Louis	Chimie Organique
RENARD Michel	Thermodynamique
RIEDTMANN Christine	Mathématiques
RINAUDO Marguerite	Chimie CERMAV
ROSSI André	Biologie
SAXOD Raymond	Biologie Animale
SENGEL Philippe	Biologie Animale
SERGERAERT Francis	Mathématiques Pures
SOUCHIER Bernard	Biologie
SOUTIF Michel	Physique
STUTZ Pierre	Mécanique
TRILLING Laurent	Mathématiques Appliquées
VAN CUTSEM Bernard	Mathématiques Appliquées
VIALON Pierre	Géologie

### PROFESSEURS de 2<sup>ème</sup> Classe

ARMAND Gilbert	Géographie
ATTANE Pierre	Mécanique
BARET Paul	Chimie
BERTIN José	Mathématiques
BLANCHI J. Pierre	STAPS
BLOCK Marc	Biologie
BLUM Jacques	Mathématiques Appliquées
BOITET Christian	Mathématiques Appliquées
BORNAREL Jean	Physique
BORRIONE Dominique	Automatique Informatique
BOUVET Jean	Biologie
BROSSARD Jean	Mathématiques
BRUANDET Jean-François	Physique
BRUGAL Gérard	Biologie
BRUN Gilbert	Biologie
CASTAING Bernard	Physique
CERFF Rudiger	Biologie
CHIARAMELLA Yves	Mathématiques Appliquées
CHOLLET Jean-Pierre	Mécanique
COLOMBEAU Jean-François	Mathématiques (ENSL)
COURT Jean	Chimie
CUNIN Pierre-Yves	Informatique
DAVID Jean	Géographie

DHOUAILLY Danielle  
 DUFRESNOY Alain  
 GASPARD François  
 GIDON Maurice  
 GIGNOUX Claude  
 GILLARD Roland  
 GIORNI Alain  
 GONZALEZ SPRINBERG Gérardo  
 GUIGO Maryse  
 GUMUCHAIN Hervé  
 HACQUES Gérard  
 HERBIN Jacky  
 HERAULT Jeanny  
 HERINO Roland  
 JARDON Pierre  
 KERCKHOVE Claude  
 MANDARON Paul  
 MARTINEZ Francis  
 MOREL Alain  
 NEMOZ Alain  
 NGUYEN HUY Xuong  
 OUDET Bruno  
 PAUTOU Guy  
 PECHER Arnaud  
 PELMONT Jean  
 PELLETIER Guy  
 PERRIN Claude  
 PIBOULE Michel  
 RAYNAUD Hervé  
 REGNARD Jean-René  
 RICHARD Jean-Marc  
 RIEDTMANN Christine  
 ROBERT Danielle  
 ROBERT Gilles  
 ROBERT Jean-Bernard  
 SARROT-REYNAULD Jean  
 SAYETAT Françoise  
 SERVE Denis  
 STOECKEL Frédéric  
 SCHOLL Pierre-Claude  
 SUBRA Robert  
 VALLADE Marcel  
 VIDAL Michel  
 VINCENT Gilbert  
 VIVIAN Robert  
 VOTTERO Philippe

Biologie  
 Mathématiques Pures  
 Physique  
 Géologie  
 Sciences Nucléaires  
 Mathématiques Pures  
 Sciences Nucléaires  
 Mathématiques Pures  
 Géographie  
 Géographie  
 Mathématiques Appliquées  
 Géographie  
 Physique  
 Physique  
 Chimie  
 Géologie  
 Biologie  
 Mathématiques Appliquées  
 Géographie  
 Thermodynamique CNRS - CRTBT  
 Informatique  
 Mathématiques Appliquées  
 Biologie  
 Géologie  
 Biochimie  
 Astrophysique  
 Sciences Nucléaires I.S.N.  
 Géologie  
 Mathématiques Appliquées  
 Physique  
 Physique  
 Mathématiques Pures  
 Chimie  
 Mathématiques Pures  
 Chimie Physique  
 Géologie  
 Physique  
 Chimie  
 Physique  
 Mathématiques Appliquées  
 Chimie  
 Physique  
 Chimie Organique  
 Physique  
 Géographie  
 Chimie

## MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT DE L'IUT 1

### PROFESSEURS de 1<sup>ère</sup> Classe

BUISSON Roger  
 CHEHIKIAN Alain  
 DODU Jacques  
 NEGRE Robert  
 NOUGARET Marcel  
 PERARD Jacques

Physique IUT 1  
 E.E.A. IUT 1  
 Mécanique Appliquée IUT 1  
 Génie Civil IUT 1  
 Automatique IUT 1  
 E.E.A. IUT 1

### PROFESSEURS de 2<sup>ème</sup> Classe

BEE Marc  
 BOUTHINON Michel  
 CHAMBON René  
 CHENAVAS Jean

Physique IUT 1  
 E.E.A. IUT 1  
 Génie Mécanique IUT 1  
 Physique IUT 1

CHILO Jean	Physique IUT 1
CHOUTEAU Gérard	Physique IUT 1
CONTE René	Physique IUT 1
FOSTER Panayotis	Chimie IUT 1
GOSSE Jean-Pierre	E.E.A. IUT 1
GROS Yves	Physique IUT 1
HAMAR Roger	Chimie IUT 1
KUHN Gérard, (détaché)	Physique IUT 1
LEVIEL Jean-Louis	Physique IUT 1
MAZUER Jean	Physique IUT 1
MICHOULIER Jean	Physique IUT 1
MONLLOR Christian	E.E.A. IUT 1
PERRAUD Robert	Chimie IUT 1
PIERRE Gérard	Chimie IUT 1
TERRIEZ Jean-Michel	Génie Mécanique IUT 1
TOUZAIN Philippe	Chimie IUT 1
TURGEMAN Sylvain	Génie Civil
VINCENDON Marc	Chimie IUT 1
ZIGONE Michel	Physique IUT 1

### PROFESSEURS DE PHARMACIE

AGNIUS-DELORD Claudine	Physique	Faculté La Tronche
ALARY Josette	Chimie Analytique	Faculté La Tronche
BERIEL Hélène	Physiologie et Pharmacologie	Faculté La Tronche
CUSSAC Max	Chimie Thérapeutique	Faculté La Tronche
DEMENGE Pierre	Pharmacodynamie	Faculté La Tronche
FAVIER Alain	Biochimie	C.H.R.G.
JEANNIN Charles	Pharmacie Galénique	Faculté Meylan
LATURAZE Jean	Biochimie	Faculté La Tronche
LUU DUC Cuong	Chimie Générale	Faculté La Tronche
MARIOTTE Anne-Marie	Pharmacognosie	Faculté La Tronche
MARZIN Daniel	Toxicologie	Faculté Meylan
RENAUDET Jacqueline	Bactériologie	Faculté La Tronche
ROCHAT Jacques	Hygiène et Hydrologie	Faculté La Tronche
SEIGLE-MURANDI Françoise	Botanique et Cryptogamie	Faculté Meylan
VERAIN Alice	Pharmacie Galénique	Faculté Meylan

### MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT DE MEDECINE

#### PROFESSEURS Classe Exceptionnelle et 1<sup>ère</sup> Classe

AMBLARD Pierre	Dermatologie	C.H.R.G.
AMBROISE-THOMAS Pierre	Parasitologie	C.H.R.G.
BEAUDOING André	Pédiatrie-Puériculture	C.H.R.G.
BEREZ Henri	Orthopédie-Traumatologie	Hôpital Sud
BONNET Jean-Louis	Ophthalmologie	C.H.R.G.
BOUCHET Yves	Anatomie	Faculté La Merci
BUTEL Jean	Chirurgie Générale et Digestive	C.H.R.G.
CHAMBAZ Edmond	Orthopédie-Traumatologie	C.H.R.G.
CHAMPETIER Jean	Biochimie	C.H.R.G.
CHARACHON Robert	Anatomie Topographique et Appliquée	C.H.R.G.
COLOMB Maurice	O.R.L.	C.H.R.G.
COUDERC Pierre	Immunologie	Hôpital Sud
DELORMAS Pierre	Anatomie Pathologique	C.H.R.G.
DENIS Bernard	Pneumophtisiologie	C.H.R.G.
GAVEND Michel	Cardiologie	C.H.R.G.
HOLLARD Daniel	Pharmacologie	Faculté La Merci
LATREILLE René	Hématologie	C.H.R.G.
LE NOC Pierre	Chirurgie Thoracique et Cardiovasculaire	C.H.R.G.
MALINAS Yves	Bactériologie-Virologie	C.H.R.G.
MALLION Jean-Michel	Gynécologie et Obstétrique	C.H.R.G.
	Médecine du Travail	C.H.R.G.

MICOUUD Max	Clinique Médicale et Maladies Infectieuses	C.H.R.G.
MOURIQUAND Claude	Histologie	Faculté La Merci
PARAMELLE Bernard	Pneumologie	C.H.R.G.
PERRET Jean	Neurologie	C.H.R.G.
RACHAIL Michel	Hépto-Gastro-Entérologie	C.H.R.G.
DE ROUGEMONT Jacques	Neurochirurgie	C.H.R.G.
SARRAZIN Roger	Clinique Chirurgicale	C.H.R.G.
STIEGLITZ Paul	Anesthésiologie	C.H.R.G.
TANCHE Maurice	Physiologie	Faculté La Merci
VIGNAIS Pierre	Biochimie	Faculté La Merci

### PROFESSEURS 2<sup>ème</sup> Classe

BACHELOT Yvan	Endocrinologie	C.H.R.G.
BARGE Michel	Neurochirurgie	C.H.R.G.
BENABID Alim-Louis	Biophysique	Faculté La Merci
BENSA Jean-Claude	Immunologie	Hôpital Sud
BERNARD Pierre	Gynécologie Obstétrique	C.H.R.G.
BESSARD Germain	Pharmacologie	Abidjan
BOLLA Michel	Radiothérapie	C.H.R.G.
BOST Michel	Pédiatrie	C.H.R.G.
BOUCHARLAT Jacques	Psychiatrie Adultes	Hôpital Sud
BRAMBILLA Christian	Pneumologie	C.H.R.G.
CHIROSSSEL Jean-Paul	Anatomie-Neurochirurgie	C.H.R.G.
COMET Michel	Biophysique	Faculté La Merci
CONTAMIN Charles	Chirurgie Thoracique et Cardiovasculaire	C.H.R.G.
CORDONNIER Daniel	Néphrologie	C.H.R.G.
COULOMB Max	Radiologie	C.H.R.G.
CROUZET Guy	Radiologie	C.H.R.G.
DEBRU Jean-Luc	Médecine Interne et Toxicologie	C.H.R.G.
DEMONGEOT Jacques	Biostatistiques et informatique médicale	Faculté La Merci
DUPRE Alain	Chirurgie Générale	C.H.R.G.
DYON Jean-François	Chirurgie Infantile	C.H.R.G.
ETERRADOSSI Jacqueline	Physiologie	Faculté La Merci
FAURE Claude	Anatomie et Organogénèse	C.H.R.G.
FAURE Gilbert	Urologie	C.H.R.G.
FOURNET Jacques	Hépto-Gastro-Entérologie	C.H.R.G.
FRANCO Alain	Médecine Interne	C.H.R.G.
GIRARDET Pierre	Anesthésiologie	C.H.R.G.
GUIDICELLI Henri	Chirurgie Générale et Vasculaire	C.H.R.G.
GUIGNIER Michel	Thérapeutique et Réanimation Médicale	C.H.R.G.
HADJIAN Arthur	Biochimie	Faculté La Merci
HALIMI Serge	Endocrinologie et Maladies Métaboliques	C.H.R.G.
HOSTEIN Jean	Hépto-Gastro-Entérologie	C.H.R.G.
HUGONOT Robert	Médecine Interne	C.H.R.G.
JALBERT Pierre	Histologie Cytogénétique	C.H.R.G.
JUNIEN-LAVILLAUIROY Claude	O.R.L.	C.H.R.G.
KOLODIE Lucien	Hématologie Biologique	C.H.R.G.
LETOUBLON Christian	Chirurgie Générale	C.H.R.G.
MACHECOURT Jacques	Cardiologie et Maladies Vasculaires	C.H.R.G.
MAGNIN Robert	Hygiène	C.H.R.G.
MASSOT Christian	Médecine Interne	C.H.R.G.
MOUILLON Michel	Ophthalmologie	C.H.R.G.
PELLAT Jacques	Neurologie	C.H.R.G.
PHELIP Xavier	Rhumatologie	C.H.R.G.
RACINET Claude	Gynécologie Obstétrique	Hôpital Sud
RAMBAUD Pierre	Pédiatrie	C.H.R.G.
RAPHAEL Bernard	Stomatologie	C.H.R.G.
SCHAERER René	Cancérologie	C.H.R.G.
SEIGNEURIN Jean-Marie	Bactériologie-Virologie	Faculté La Merci
SELE Bernard	Cytogénétique	Faculté La Merci
SOTTO Jean-Jacques	Hématologie	C.H.R.G.
STOEBNER Pierre	Anatomic Pathologique	C.H.R.G.
VROUSOS Constantin	Radiothérapie	C.H.R.G.



# **REMERCIEMENTS**



Je tiens à exprimer ma reconnaissance à :

Monsieur Pierre Gentil, Directeur du Centre Interuniversitaire de Microélectronique, qui me fait l'honneur d'être président du jury de cette thèse,

Monsieur Bernard Courtois, Directeur de Recherche au Centre National de la Recherche Scientifique et Directeur du laboratoire TIM3, qui m'a accueilli dans son équipe et dirigé avec compétence,

Messieurs Alain Chéhikian, Directeur du laboratoire TIRF et Alain Chion, Chef du Groupe Validation de SGS THOMSON, pour avoir accepté d'être rapporteurs et membres de ce jury,

Messieurs Max Sarfati, Directeur Général de la société CAMECA et Maurice Secourgeon, "component engineering manager HEWLETT PACKARD France", pour avoir accepté d'être membres de ce jury,

Je tiens particulièrement à remercier Monsieur Jacques Laurent, Docteur INPG et responsable de l'équipe de microscopie, pour l'intérêt permanent qu'il a porté à mon travail, pour son aide et ses remarques constructives qui ont fait que mes travaux ont évolué dans les meilleurs conditions. Je le remercie également pour sa participation à ce jury,

Je tiens à remercier tous les membres de l'équipe microscopie, notamment Mademoiselle Isabelle Guiguet, Messieurs Dominique Micollet, Denis Savart, Gérard Baille, Ihsan Almeshhedani, Ali Skaf, Hocine Ait-Messaoud, Moëz Cherif et Jeremy Russell, pour leur amical soutien et plus particulièrement Madame Meryem Marzouki pour son aide et ses encouragements qui ont contribué dans une grande part à la réussite de ces travaux,

Je souhaite également remercier Messieurs Pierre Monsallut, Gérard Bourgeon et Dominique Giraud, Ingénieurs à la société CAMECA, pour leur contribution et le soutien apporté à la réalisation de ce projet.

Je remercie vivement Messieurs Raoul Velazco et Haisan Ziade, membres du LGI, et Joan Cabestany et Ferran Sala, membres de l'ESTE de Barcelonne, sans les compétences desquelles l'étude expérimentale rapportée dans cette thèse n'aurait pu être.

Enfin, je remercie tous les membres de l'équipe d'architecture des ordinateurs du laboratoire TIM3, et particulièrement Monsieur François Darlay pour avoir accepté de relire et de critiquer une partie de ce mémoire et Patricia pour son aide au tirage de ce document.

**A mes parents,**



## **RESUME**

Cette thèse présente l'étude et la réalisation d'un système automatique et intégré d'analyse de défaillances de circuits VLSI par faisceau d'électrons. Le principe d'analyse consiste à comparer les images représentant en contraste de potentiel le fonctionnement interne du circuit défaillant à celles d'un circuit de référence. L'application de cette technique de test à des circuits dont la structure détaillée est inconnue, a nécessité le développement d'un outil automatique permettant d'extraire les différences de contraste sur la totalité du circuit. L'automatisation s'est heurtée aux problèmes d'alignement entre les images à comparer. Une technique de reconnaissance des formes, basée sur la détection des coins, a été mise en œuvre pour s'affranchir de ces problèmes. Ces travaux ont été validés par une étude expérimentale menée sur des microprocesseurs 68000.

**Mots-clés** : circuits intégrés, analyse de défaillances, test par faisceau d'électrons, traitement d'images, reconnaissance des formes.



## **ABSTRACT**

This thesis deals with the study and the realization of an automated and integrated system for failure analysis using electron beam testing. The principle of this analysis consists of comparing images showing the internal functioning in voltage contrast of the failed circuit against that of a golden circuit. The application of this test technique to unknown circuits required the development of an automatic tool which allows the extraction of contrast differences over the whole circuit. Automation came up against problems of alignment between the images to be superimposed. A pattern recognition technique based on corner detection has been developed to automatically correct these problems. This work has been validated by an experimental study performed on 68000 microprocessors.

**Key-words** : integrated circuits, failure analysis, electron beam testing, image processing, pattern recognition.



## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>35</b>
 <b>PREMIERE PARTIE - ANALYSE DE DEFAILLANCES DE CIRCUITS INTEGRES PAR FAISCEAU D'ELECTRONS</b>  	
<b>I LE TEST PAR FAISCEAU D'ELECTRONS.....</b>	<b>41</b>
I.1 Introduction.....	41
I.2 L'outil de base - le Microscope Electronique à Balayage (MEB).....	41
I.2.1 Principe du MEB.....	41
I.2.2 Rappel des phénomènes de base.....	42
I.2.2.1 Interaction électron matière.....	42
I.2.2.2 Emission électronique secondaire .....	43
A - Définition et caractéristiques.....	43
B - Influence de l'énergie primaire .....	44
C - Influence de l'angle d'incidence du faisceau primaire.....	45
I.2.3 Colonne optique .....	46
I.2.3.1 Le canon à électrons .....	46
I.2.3.2 Optique de réduction.....	47
I.2.3.3 Système de déviation .....	48
I.2.4 Le dispositif d'observation .....	49
I.2.4.1 Système de détection .....	50
I.2.4.2 Système de visualisation .....	51
I.2.5 Eléments liés à l'échantillon .....	51
I.2.5.1 La chambre-objet .....	51
I.2.5.2 Le mouvement-objet.....	51
I.3 L'outil de mesure des potentiels - le Testeur à Faisceau d'Electrons (TFE).....	52
I.3.1 Mesure qualitative - contraste de potentiel.....	52
I.3.2 Mesure quantitative.....	54
I.3.2.1 Principe de la mesure.....	54
I.3.2.2 Résolution en potentiel.....	56
I.3.3 Mesure dynamique.....	56

I.3.4 Les contraintes liées à l'observation des circuits intégrés.....	58
I.3.4.1 Les effets d'irradiation.....	59
I.3.4.2 Les effets de proximité.....	60
I.4 Les Techniques d'observation .....	61
I.4.1 Le "voltage coding".....	62
I.4.2 Image stroboscopique .....	63
I.4.3 "Logic state mapping" .....	66
I.4.4 La forme d'onde.....	66
I.5 La station de test et ses applications.....	68
I.5.1 La validation de prototype.....	69
I.5.2 La recherche des limites de fonctionnement.....	69
I.5.3 l'analyse de défaillances .....	70
I.6 Conclusion.....	70
<b>II APPLICATION A L'ANALYSE DE DEFAILLANCES.....</b>	<b>77</b>
II.1 Introduction.....	77
II.2 Techniques de localisation.....	78
II.2.1 Principe de localisation.....	78
II.2.1.1 Etude des circuits combinatoires.....	79
II.2.1.2 Etude des circuits séquentiels .....	80
II.2.2 Cadre d'application .....	81
II.2.3 Motivation pour un outil automatique.....	81
II.3 Définition d'une procédure globale de comparaison .....	85
II.3.1 Organisation générale de la procédure globale de comparaison.....	85
A - L'initialisation	
B - Le déplacement de la platine porte-objet et l'acquisition de l'image	
C - La comparaison automatique	
II.3.2 Correction des différences d'orientation.....	86
II.3.2.1 Positionnement du centre de l'image.....	87
A - Rotation mécanique .....	88
B - Transformation des coordonnées.....	89
II.3.2.2 Alignement des images dans le référentiel de visualisation.....	91
II.3.3 Correction des écarts en translation .....	94
II.4 Conclusion.....	96

## DEUXIEME PARTIE - COMPARAISON AUTOMATIQUE D'IMAGES

<b>III TECHNIQUES DE DETECTION DES COINS .....</b>	<b>103</b>
III.1 Classification des techniques.....	103
III.2 Techniques de détections binaires.....	104
III.2.1 La segmentation.....	104
III.2.1.1 Segmentation par extraction de contours.....	104
A - la mise en évidence des contours .....	105
B - La réduction des contours .....	108
C - La binarisation des lignes de contour .....	108
III.2.1.2 Segmentation en régions homogènes.....	109
A - Le seuillage d'histogramme.....	110
B - Le contour d'une région homogène .....	113
III.2.2 Détecteurs de coins sur images binaires.....	114
III.2.2.1 Codage d'angle.....	114
III.2.2.2 Approximation par segments de droite.....	115
III.2.2.3 Approximation polynômiale.....	118
III.3 Techniques de détection en niveaux de gris.....	119
III.4 Conclusion.....	120
 <b>IV APPLICATION AUX IMAGES EN CONTRASTE DE POTENTIEL.....</b>	 <b>123</b>
IV.1 Présentation du processus de superpositon automatique d'images .....	123
IV.2 Algorithmes pour l'amélioration de la qualité de l'image.....	125
IV.2.1 Intégration d'images.....	127
IV.2.2 Transformation de l'image dans le domaine spatial.....	129
IV.2.2.1 Moyenne des voisins.....	129
IV.2.2.2 Filtre médian.....	129
IV.2.3 Résumé.....	130
IV.3 Algorithme pour le seuillage automatique .....	131
IV.4 Algorithme pour l'élimination des artéfacts .....	138
IV.5 Algorithme pour l'extraction de contours .....	141
IV.6 Algorithme pour la recherche et l'identification des coins .....	142
IV.7 Algorithme pour le calcul du décalage.....	149
IV.8 Conclusion.....	153

## TROISIEME PARTIE - ETUDE EXPERIMENTALE

<b>V REALISATIONS PRATIQUES .....</b>	<b>163</b>
V.1 Equipement de test.....	163
V.1.1 Le testeur CAMECA ST15.....	163
V.1.2 La station de travail SUN 3/160.....	165
V.1.3 Système d'acquisition.....	166
V.1.4 Carte de conditionnement .....	168
V.2 Description du logiciel de comparaison automatique d'images -COMPATOOLS .....	171
V.2.1 Structure générale du logiciel .....	172
V.2.2 Gestion et organisation des données .....	175
V.2.2.1 Les types de données.....	175
A - Les données liées aux images microscope.....	175
B - Les données liées à la zone d'observation.....	177
C - Les données liées à l'environnement de test.....	179
V.2.2.2 La hiérarchie des fichiers .....	182
V.2.3 Les fonctions de traitement d'images.....	183
V.2.4 Configuration de l'interface graphique .....	186
V.2.4.1 Panneau de contrôle principal.....	187
A - Boutons images .....	187
B - Icônes images.....	188
V.2.4.2 Fenêtre d'affichage.....	189
V.2.4.3 Panneaux secondaires.....	189
V.2.5 Description de l'étape d'initialisation.....	191
V.2.5.1 La définition du référentiel circuit.....	191
V.2.5.2 La définition du découpage de la zone d'observation.....	193
V.2.5.3 Le réglage du testeur à faisceau d'électrons.....	194
V.2.5.4 Choix des paramètres liés à l'imagerie.....	194
<b>VI APPLICATION AUX MICROPROCESSEURS MC68000.....</b>	<b>201</b>
VI.1 Présentation de l'étude .....	201
VI.2 Test fonctionnel de microprocesseurs.....	202
VI.2.1 Génération de programmes de test.....	203
VI.2.2 Le testeur fonctionnel - TEMAC.....	205
VI.3 Etude de cas .....	206

VI.3.1 Généralités.....	206
A - Caractéristiques des circuits.....	206
B - Caractéristiques de l'observation en microscope électronique.....	207
C - Caractéristiques liées à l'imagerie.....	208
VI.3.2 Premier cas d'étude .....	211
VI.3.2 Second cas d'étude.....	215
VI.4 Analyse des résultats de comparaison.....	218
VI.4.1 Définition des incidents de superposition.....	218
VI.4.1 Présentation des résultats de comparaison.....	219
VI.4.3 Vers une correction automatique des échecs de superposition.....	225
A - Diagnostic des échecs de superposition .....	227
B - Correction des échecs de superposition.....	228
C - Application aux études précédentes.....	229
VI.5 Conclusion .....	233
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>237</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>241</b>
<b>ANNEXES</b>	
<b>ANNEXE I - PRECISION DE LA CORRECTION EN ROTATION PAR TRANSFORMATION DE COORDONNEES .....</b>	<b>253</b>
<b>ANNEXE II - LES FONCTIONS D'APPLICATION.....</b>	<b>257</b>
<b>ANNEXE III - RESULTATS DES OPERATIONS DE COMPARAISON AUTOMATIQUE D'IMAGES.....</b>	<b>263</b>



## LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Principe du MEB .....	42
Figure I.2 Emission d'un échantillon sous l'impact d'électrons.....	42
Figure I.3 Courbe de variation du rendement en émission secondaire.....	44
Figure I.4 Incidence du faisceau primaire .....	45
Figure I.5 Contraste topographique.....	45
Figure I.6 Canon à électrons.....	47
Figure I.7 Optique de réduction.....	48
Figure I.8 Système de déflexion.....	49
Figure I.9 Dispositif de visualisation.....	49
Figure I.10 Détecteur d'Everhart et Thornley.....	50
Figure I.11 Mouvement-objet.....	52
Figure I.12 Origine du contraste de potentiel.....	53
Figure I.13 Courant détecté en fonction du potentiel d'échantillon.....	54
Figure I.14 principe du spectromètre en énergie.....	54
Figure I.15 Boucle de contre réaction.....	55
Figure I.16 Principe de la modulation de faisceau.....	57
Figure I.17 Système de stroboscopie de faisceau.....	58
Figure I.18 Trajectoire des électrons en fonction du potentiel du point d'émission et de ceux des connexions voisines.....	60
Figure I.19 Spectromètre de FROSIEN et PLIES .....	61
Figure I.20 Présentation des principales techniques d'observation.....	62
Figure I.21 Le "Voltage coding" .....	63
Figure I.22 L'image stroboscopique.....	64
Figure I.23 Influence de la vitesse de balayage sur les images stroboscopiques.....	64
Figure I.24 Principe du multiéchantillonnage.....	65
Figure I.25 Le "logic state mapping" .....	66
Figure I.26 La forme d'onde.....	67
Figure I.27 Organisation de la station de test.....	68
Figure II.1 Localisation de défaillances par comparaison d'images .....	78
Figure II.2 Technique de localisation pour circuits combinatoires.....	79
Figure II.3 Technique de localisation pour circuits séquentiels.....	80
Figure II.4 Acquisition d'un ensemble d'images adjacentes .....	82

Figure II.5 Erreurs de positionnement induites par la rotation des circuits .....	83
Figure II.6 Problèmes d'alignement des circuits .....	84
Figure II.7 Organisation de la procédure automatique de comparaison d'images .....	86
Figure II.8 Principe de positionnement du centre de chaque image.....	87
Figure II.9 Rotation mécanique.....	88
Figure II.10 Définition du référentiel associé au circuit .....	89
Figure II.11 Définition des coordonnées de déplacement (théoriques et corrigées).....	90
Figure II.12 Continuité des images dans le référentiel de visualisation .....	92
Figure II.13 Rotation du balayage par induction magnétique.....	93
Figure II.14 Limite de la précision de la rotation électronique.....	94
Figure II.15 Corrélation par superposition directe de masque.....	95
Figure II.16 Analyse des traits caractéristiques de l'image.....	96
Figure III.1 Techniques de détection des coins.....	103
Figure III.2 Principe de segmentation par extraction de contours.....	105
Figure III.3 approximation de ROBERTS .....	106
Figure III.4 Masques de PREWITT (a) et de SOBEL (b) .....	106
Figure III.5 Masques laplaciens.....	107
Figure III.6 Dérivation en présence d'un contour. a - contour, b - Laplacien.....	107
Figure III.7 Principe de segmentation en région homogène .....	109
Figure III.8 seuillage d'histogramme.....	110
Figure III.9 histogramme et densité de probabilité pour une image à 2 classes.....	112
Figure III.10 contour d'une région homogène .....	113
Figure III.11 Codage de FREEMAN. a - définition du codage, b - contour de l'objet, c - exemple de codage.....	114
Figure III.12 Codage d'angle, a - définition du codage, b - exemple de codage.....	115
Figure III.13 projection d'une chaîne numérique sur les axes X et Y .....	116
Figure III.14 Approximation par segment de droite. ....	117
Figure III.15 Modélisation locale du pixel .....	119
Figure IV.1 Procédure de recalage automatique. a - calcul du décalage, b - procédure générale de soustraction.....	124

Figure IV.2 Problème de dépassivation.....	126
Figure IV.3 Moyenne des voisins.....	129
Figure IV.4 techniques de filtrage en fonction de l'image brute.....	130
Figure IV.5 Action du filtre par moyenne des voisins sur les images binaires.....	131
Figure IV.6 Allure générale de l'histogramme des circuits passivés.....	132
Figure IV.7 Allure générale de l'histogramme des circuits non passivés.....	133
Figure IV.8 Allure générale de l'histogramme des circuits dépassivés.....	134
Figure IV.9 Modélisation de l'histogramme en théorie de la décision.....	135
Figure IV.10 Segmentation automatique.....	136
Figure IV.11 Valeur théorique du motif élémentaire.....	138
Figure IV.12 Elimination des artéfacts. a - séquence X puis Y.....	140
Figure IV.13 Définition d'un coin.....	143
Figure IV.14 Erreur de localisation des coins.....	144
Figure IV.15 Identification des coins.....	144
Figure IV.16 Définition du champ de recalage dans le cas de motifs redondants.....	150
Figure IV.17 Association des coins.....	151
Figure IV.18 Histogrammes de recalage sur la direction X.....	151
Figure V.1 Architecture de la station de test.....	164
Figure V.2 Environnement du système d'acquisition d'images.....	167
Figure V.3 Architecture de la carte d'acquisition d'images.....	167
Figure V.4 Structure fonctionnelle de la carte de conditionnement.....	169
Figure V.5 Blindage de la carte de conditionnement.....	170
Figure V.6 Organisation de COMPATTOOLS.....	173
Figure V.7 Organigramme général de COMPATTOOLS.....	174
Figure V.8 Organisation de la donnée image.....	175
Figure V.9 Définition des 4 plans mémoire image pour la comparaison automatique d'images.....	176
Figure V.10 Définition de la structure image.....	176
Figure V.11 Notion de réduction d'images.....	177
Figure V.12 Définition de la structure zone.....	178
Figure V.13 a définition de la sous-structure de topologie.....	180
Figure V.13 b définition de la sous-structure de microscope.....	180
Figure V.13 c Structure environnement.....	181

Figure V.14 Arborescence des fichiers .....	183
Figure V.15 Numérotation des images dans la zone d'observation .....	183
Figure V.16 Interface graphique COMPATTOOLS.....	186
Figure V.17 Boutons images du panneau de contrôle.....	187
Figure V.18 Icônes images du panneau de contrôle.....	188
Figure V.19 Palette de couleur .....	189
Figure V.20 Panneau secondaire "analyse de défaillances".....	190
Figure V.21 Modes de déplacement de la platine porte-objet .....	191
Figure V.22 Calcul de l'orientation des circuits par rapport au référentiel de la platine.....	192
Figure V.23 Mesure de l'orientation du circuit sur une horizontale .....	193
Figure V.24 Définition de la zone d'observation .....	193
Figure V.25 Alignement de l'image dans le référentiel de visualisation .....	194
Figure V.26 Calcul de la dimension du pixel.....	195
Figure VI.1 Stratégie globale d'analyse de défaillances de microprocesseurs .....	202
Figure VI.2 Système GAPT.....	203
Figure VI.3 Chaîne de test GAPT/TEMAC.....	205
Figure VI.4 Topologie du microprocesseur 68000 .....	207
Figure VI.5 Capacité mémoire et nombre d'images en fonction de la surface observée .....	209
Figure VI.6 Temps de comparaison d'un couple d'image.....	211
Figure VI.7 Description temporelle de la séquence de test - premier cas d'étude.....	212
Figure VI.8 Caractéristiques liées à l'observation du premier cas d'étude.....	212
Figure VI.9 Présentation des zones d'observations - premier cas d'étude.....	213
Figure VI.10 Description temporelle de la séquence de test - second cas d'étude.....	215
Figure VI.11 Caractéristiques liées à l'observation du second cas d'étude.....	216
Figure VI.12 Présentation de la zone d'observation - second cas d'étude.....	216
Figure VI.13 Classification des incidents de superposition.....	219
Figure VI.14 Bilan des incidents de superposition .....	221

Figure VI.15 Cartographie des incidents de superposition - a partie opérative du premier cas d'étude - b interface de contrôle du premier cas d'étude - c partie opérative du second cas d'étude.....	223
Figure VI.16 Les erreurs de déplacement .....	224
Figure VI.17 Procédure de correction automatique des échecs de superposition.....	226
Figure VI.18 Seuil moyen et écart type pour chaque cas d'étude .....	228
Figure VI.19 création artificielle de coins .....	229
Figure VI.20 Correction automatique des échecs de superposition - premier cas d'étude - partie opérative.....	230
Figure VI.21 Correction automatique des échecs de superposition - second cas d'étude - partie opérative.....	231
Figure VI.22 Estimation de la fiabilité après correction automatique des échecs de superposition.....	232
Figure C.1 - 1ère génération.....	239
Figure C.2 - 2ème génération.....	239
Figure C.3 - 3ème génération.....	239
Figure A.1 Calcul de l'angle de correction.....	254



## LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photo I.1 Contraste topographique.....	72
Photo I.2 Contraste de potentiel (superposé au contraste topographique).....	72
Photo I.3 "Voltage coding".....	72
Photo I.4 "Logic state mapping".....	72
Photo I.5 Images stroboscopiques obtenues à différentes phases d'observation.....	73
Photo II.1 Image du circuit de référence.....	97
Photo II.2 Image du circuit défaillant.....	97
Photo II.3 Différence sans correction spatiale.....	97
Photo II.4 Différence avec correction spatiale.....	97
Photo IV.1.a Pulse de 20 ns.....	154
Photo IV.1.b Pulse de 100 ns.....	154
Photo IV.1.c Pulse de 200 ns.....	154
Photo IV.1.d Pulse de 1 $\mu$ s.....	154
Photo IV.2.a Image initiale acquise en stroboscopie - pulse de 20 ns.....	155
Photo IV.2.b Image moyennée sur 10 trames.....	155
Photo IV.2.c Image moyennée sur 20 trames.....	155
Photo IV.2.d Image moyennée sur 50 trames.....	155
Photo IV.3.a Image initiale.....	156
Photo IV.3.b Image binaire.....	156
Photo IV.3.c Elimination des artéfacts.....	157
Photo IV.3.d Extraction des contours.....	157
Photo IV.3.e Localisation des coins.....	158
Photo V.1 Le testeur à faisceau d'électrons.....	196
Photo V.2 Chambre à vide et carte de conditionnement.....	196
Photo V.3 Blindage de la carte de conditionnement.....	197
Photo V.4 Interface graphique - COMPATTOOLS.....	197
Photo VI.1.a Images réduites reconstituant la zone d'observation de l'interface contrôle - premier cas d'étude.....	213
Photo VI.1.b Images réduites reconstituant la zone d'observation de la partie opérative - premier cas d'étude.....	213
Photo VI.2.a Image du circuit de référence.....	214

Photo VI.2.b Image du circuit défaillant .....	214
Photo VI.2.c Image de différence - vue du défaut .....	214
Photo VI.3 Images réduites reconstituant la zone d'observation de la partie opérative - second cas d'étude .....	216
Photo VI.4.a Image du circuit de référence .....	217
Photo VI.4.b Image du circuit défaillant .....	217
Photo VI.4.c Image de différence - vue du défaut .....	217
Photo VI.5.a Vue des plots - problème de contraste .....	222
Photo VI.5.b Motifs horizontaux - absence de coins .....	222
Photo VI.5.c Effet de proximité - erreur de seuillage .....	223

## **INTRODUCTION**



## INTRODUCTION

La complexité et la densité des Circuits Intégrés (CI) ont évolué dans de telles proportions que les techniques traditionnelles de test interne, basées sur l'utilisation des sondes mécaniques, sont devenues inadaptées. De ce fait des techniques plus performantes utilisant des sondes virtuelles (faisceau d'électrons ou faisceau laser) ont été développées, si bien que des outils commerciaux commencent à apparaître. Parmi ces outils, le Testeur à Faisceau d'Electrons (TFE) s'est désormais imposé comme l'instrument d'observation le plus efficace pour localiser les fautes de conception (validation de prototype) ou les défauts apparaissant en cours d'utilisation (analyse de défaillances et limites de fonctionnement).

Cependant et malgré ses possibilités, l'instrument seul est difficilement exploitable pour le test des circuits intégrés actuels car de l'observation résulte une grande quantité d'informations difficile à traiter manuellement. L'automatisation des outils d'observation et des techniques de localisation joue alors un rôle fondamental dans la mise en œuvre du test par faisceau d'électrons.

Dans notre cas, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'analyse de défaillances par faisceau d'électrons. Cet examen, qui a pour but de localiser le(s) défaut(s) à l'origine d'un dysfonctionnement apparu en cours de vie utile d'un circuit, est généralement réalisé par comparaison du fonctionnement interne du circuit défectueux à celui d'un circuit réputé bon. Notons que cette méthode est applicable dans le cas le plus général où la connaissance structurelle du circuit à tester est limitée voire inexistante.

La nécessité d'automatiser cette application a suscité dans le laboratoire un axe de recherche dans ce domaine. Les travaux successifs de [LAU84] et de [BER85] ont montré la faisabilité des techniques de localisation par comparaison de circuits. Plus récemment, les travaux de [SAV90] ont porté sur l'automatisation des opérations d'imagerie à la base de ces comparaisons.

L'étude présentée dans cette thèse constitue une suite logique à ces travaux. Elle a consisté à développer une procédure globale de comparaison capable d'extraire les différences de fonctionnement sur la totalité du circuit étudié. Dans ce but, les différences d'alignement, perturbant la comparaison entre les deux circuits, ont été étudiées pour être compensées automatiquement. Ce travail a été développé en collaboration avec le fabricant de sondes électroniques CAMECA en vue d'automatiser l'analyse de défaillances sur le testeur prototype "CAMECA ST15".

La première partie du document est consacrée à l'analyse de défaillances par faisceau d'électrons :

Le premier chapitre présente le test par faisceau d'électrons. Le chapitre II expose dans un premier temps les techniques de localisation adaptées à l'analyse de défaillances, et définis dans un deuxième temps la procédure globale de comparaison.

La seconde partie est consacrée à la comparaison automatique d'images :

Le chapitre III présente tout d'abord les techniques générales de détection des coins, qui seront utilisées pour la résolution des problèmes d'alignement. Le chapitre IV décrit les algorithmes retenus, et mis en œuvre pour la comparaison d'images.

Enfin la troisième partie est consacrée aux résultats expérimentaux : Le chapitre V présente l'implémentation de la procédure globale de comparaison sur le testeur prototype. Le chapitre VI rapporte les expériences, réalisées sur des cas réels (microprocesseurs 68000), qui ont permis la mise au point et la validation du logiciel développé .

**PREMIERE PARTIE - ANALYSE  
DE DEFAILLANCES DE  
CIRCUITS INTEGRES PAR  
FAISCEAU D'ELECTRONS**



**CHAPITRE I**  
**LE TEST PAR FAISCEAU D'ELECTRONS**

PREMIERE PARTIE

---

**ANALYSE DE DEFAILLANCES DE CIRCUITS INTEGRES PAR FAISCEAU  
D'ELECTRONS**



## **I LE TEST PAR FAISCEAU D'ELECTRONS**

### **I.1 Introduction**

Le test par faisceau d'électrons s'est désormais imposé comme la technique la plus efficace pour l'investigation du fonctionnement interne des circuits intégrés.

Son succès réside dans l'utilisation d'une sonde électronique qui apporte de nombreux avantages en regard des traditionnelles sondes mécaniques : elle est très fine ( $\approx 0,1 \mu\text{m}$ ) et d'un positionnement aisé et précis ; elle ne dégrade ni le circuit ni son fonctionnement ; enfin, à l'aide d'un système de balayage adéquat, elle permet une observation sous forme image.

Ce moyen de test a pour base l'utilisation du faisceau d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB). Depuis une dizaine d'années, le MEB n'a cessé d'être amélioré en vue du test des circuits intégrés. Cette optimisation a pris la forme du Testeur à Faisceau d'Electrons (TFE) actuel, outil principalement dédié à l'observation des potentiels à la surface des circuits intégrés.

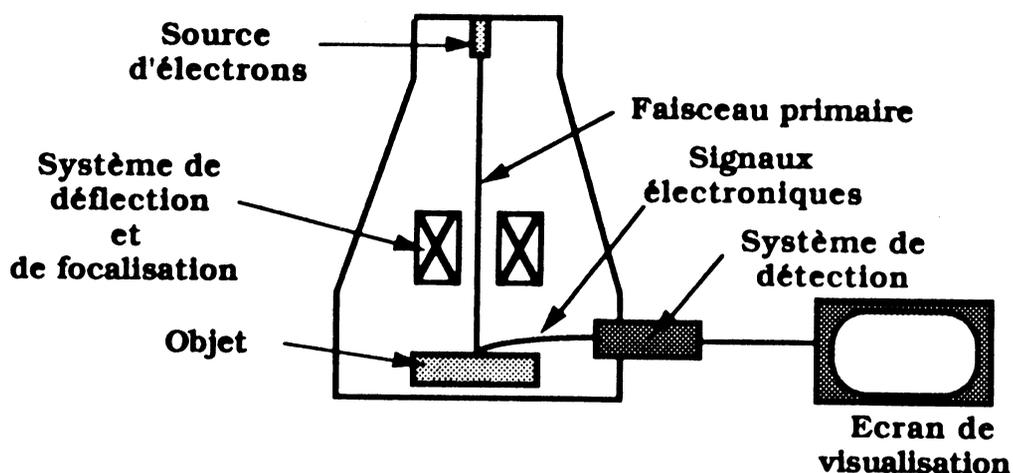
Ce premier chapitre présente l'outil d'observation, ses différents modes de fonctionnement et ses principales applications.

### **I.2 L'outil de base - le Microscope Electronique à Balayage (MEB)**

#### **I.2.1 Principe du MEB**

Le MEB permet l'examen de la surface d'objets massifs par la détection des signaux produits sous l'impact d'un faisceau d'électrons primaire, qui balaye la surface de l'échantillon. L'observation réalisée sous forme d'images utilise, après détection, un des signaux pour moduler la luminosité d'un écran cathodique dont le balayage est synchrone du faisceau primaire.

L'instrument comporte donc les moyens nécessaires pour créer et dévier un faisceau d'électrons, et les moyens de détection des signaux pour reconstituer l'image de l'objet observé.

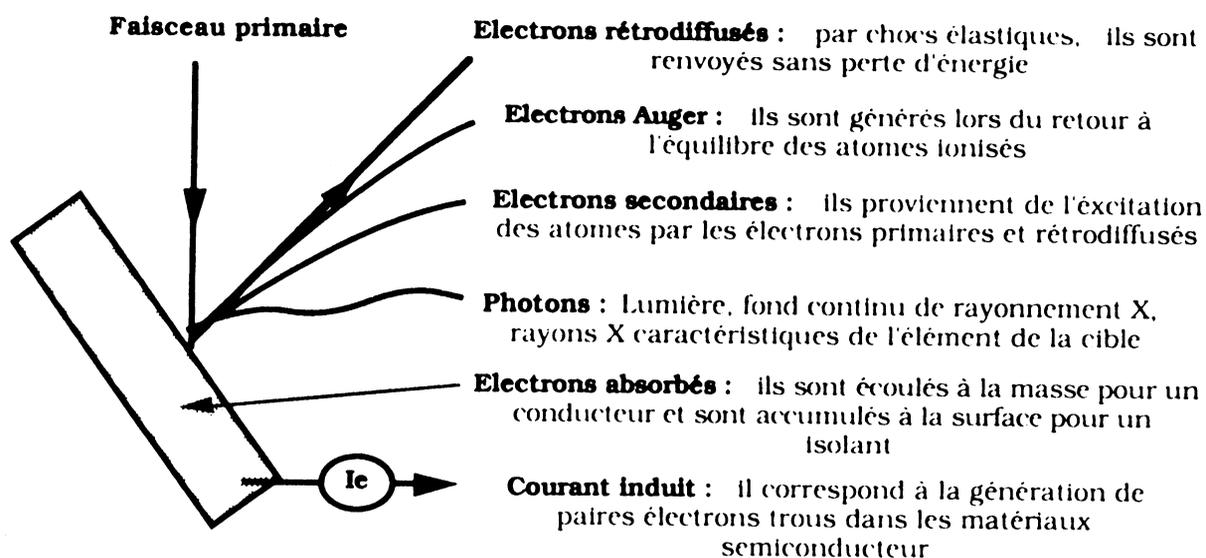


**Figure I.1** Principe du MEB

## I.2.2 Rappel des phénomènes de base

### I.2.2.1 Interaction électron matière

Lorsque le faisceau d'électrons primaire doué d'une énergie de quelques Kev (kiloélectronvolts) ou dizaines de kev frappe l'échantillon, celui-ci émet divers électrons d'énergie variable et des rayonnements (cf. figure I.2).



**Figure I.2** Emission d'un échantillon sous l'impact d'électrons

Les Electrons Secondaires (ES) et dans une moindre part, les électrons rétrodiffusés, constituent l'information de base utilisée en microscopie électronique à balayage. Toutefois, l'émission secondaire est le phénomène principal utilisé pour l'observation des circuits intégrés. Il est plus amplement décrit dans la suite de ce paragraphe.

### **I.2.2.2 Emission électronique secondaire ((FON78a))**

#### **A - Définition et caractéristiques**

Les électrons secondaires proviennent des couches situées près de la surface entre 1 à 10 nm. Ils sont produits, pour une part, dans la région d'entrée du faisceau primaire, et d'autre part, dans la région de sortie des électrons rétrodiffusés.

Ces électrons, issus de ces 2 origines, ont des propriétés identiques qui ne permettent pas de les différencier au niveau de la détection. Cette limitation permet d'expliquer la nature bruitée des signaux obtenus en émission secondaire au niveau des interfaces. En effet, à cet endroit, les électrons secondaires générés par les électrons rétrodiffusés proviennent d'une zone différente de celle de l'impact du faisceau primaire. Ces électrons s'ajoute à la présence des électrons rétrodiffusés eux-mêmes et qui ne font que perturber la netteté du signal.

L'émission électronique secondaire est caractérisée par son rendement  $\Delta$  défini comme le nombre d'électrons secondaires émis par électrons incidents.

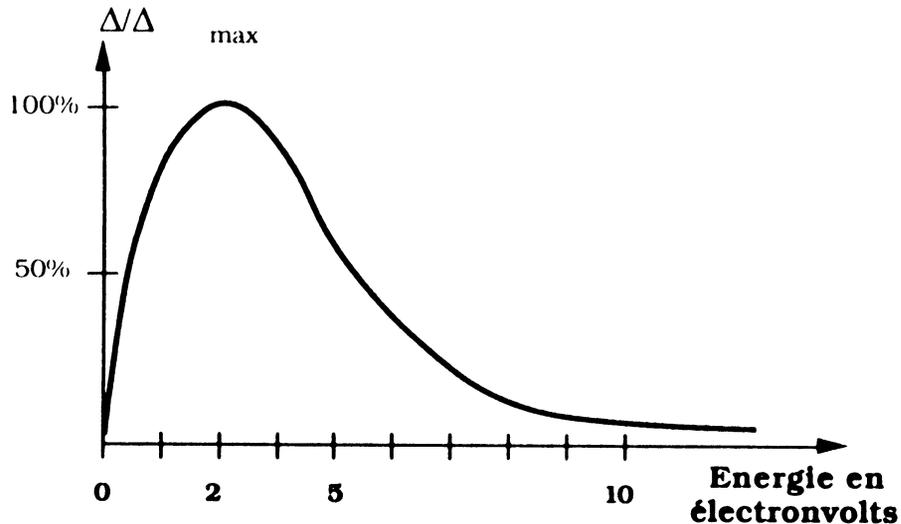
Le rendement en émission secondaire est la somme des 2 contributions  $\Delta_p$  due aux électrons secondaires excités par les électrons primaires et  $\Delta_r$  due aux électrons secondaires créés par les électrons rétrodiffusés :

$$\Delta = \Delta_p + \Delta_r$$

La courbe de variation de rendement des ES en fonction de leur énergie est présentée en figure I.3. Elle s'étend jusqu'à quelques dizaines d'électronvolts (l'émission secondaire est conventionnellement et arbitrairement limitée à une énergie de 50 électronvolts) avec un maximum

à quelques électronvolts selon les matériaux : 1 à 3 électronvolts pour les métaux, 0,5 à 2 pour les isolants.

**Abondance relative :**



**Figure I.3** Courbe de variation du rendement en émission secondaire

### **B - Influence de l'énergie primaire**

Le rendement d'émission varie avec l'énergie primaire de la même manière pour tous les matériaux : il augmente aux basses énergies jusqu'à une valeur maximale, pour une valeur en énergie de plusieurs centaines d'électronvolts, et diminue aux énergies primaires plus élevées.

Le rendement maximal est de l'ordre de l'unité pour les métaux et les semiconducteurs. Pour les isolants, le rendement est bien plus élevé, variant entre 6 et 10, pour des énergies primaires de l'ordre de 400 à 800 électronvolts. Ce rendement élevé provient du fait que dans un isolant le libre parcours moyen est beaucoup plus grand que dans un métal : quelques dizaines de nm pour les isolants contre quelques nm pour les métaux.

Pour des énergies supérieures (de l'ordre de quelques kiloélectronvolts) le rendement dans les isolants devient inférieur à l'unité. Ce résultat entraîne une charge négative de l'isolant rendant impossible l'observation.

### C - Influence de l'angle d'incidence du faisceau primaire

Aux énergies élevées, l'influence de l'angle d'incidence sur le rendement d'émission est de la forme :

$$\frac{\Delta(\alpha)}{\Delta(0)} = \cos(\alpha)$$

dans laquelle  $\Delta(\alpha)$  représente le rendement pour un faisceau primaire d'incidence  $\alpha$  par rapport à la normale et  $\Delta(0)$  le rendement pour une incidence normale (cf figure I.4).

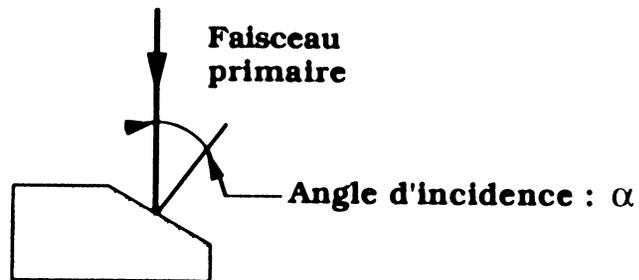


Figure I.4 Incidence du faisceau primaire

Cette variation de rendement est due au fait que les électrons secondaires ont une distance plus faible à parcourir pour sortir d'un échantillon incliné (cf figure I.5). Au niveau de l'image, des variations de contraste apparaissent dans les mêmes proportions. Ce phénomène, que l'on nomme contraste topographique, permet l'observation du relief de l'échantillon (cf photo I.1).

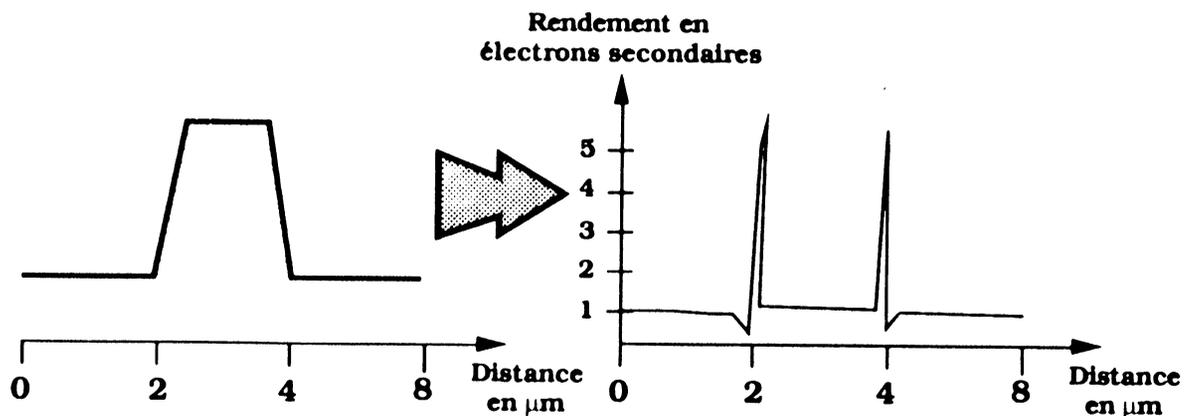


Figure I.5 Contraste topographique

### **I.2.3 Colonne optique ([FON78b])**

Le MEB est composé d'une source émissive d'électrons et d'un système magnétique de focalisation et de déflexion qui permet de focaliser le faisceau et de le déplacer à la surface de l'échantillon.

#### **I.2.3.1 Le canon à électrons**

Le canon à électrons a pour rôle de générer une source d'électrons stable en énergie et en intensité de courant. Il est constitué d'une cathode émettrice, d'une cage cylindrique ("wehnelt") qui contrôle le courant d'émission, et d'une anode qui accélère les électrons émis par la cathode . La source d'électrons est considérée au voisinage de la cathode émettrice. Elle correspond au point de "cross-over" situé à l'intersection des pinceaux d'électrons émis par la cathode émettrice. Ce point est formé par l'action d'un potentiel négatif (entre -200 et -300 V) appliqué à la cage cylindrique, qui fait converger les trajectoires des électrons en un point commun (cf figure I.6).

Deux types de canons sont couramment utilisés :

- le canon à filament de tungstène ;

c'est la source d'électrons la plus simple à mettre en œuvre. La cathode émettrice est composée par un filament de tungstène qui libère des électrons grâce à l'émission thermoélectronique. Le filament est donc fortement chauffé (environ 2700 K) pour fournir une bonne luminescence (à 30 Kilovolts on obtient environ 50000 A/cm<sup>2</sup>).

- canon à hexaborure de lanthane (LaB6) ;

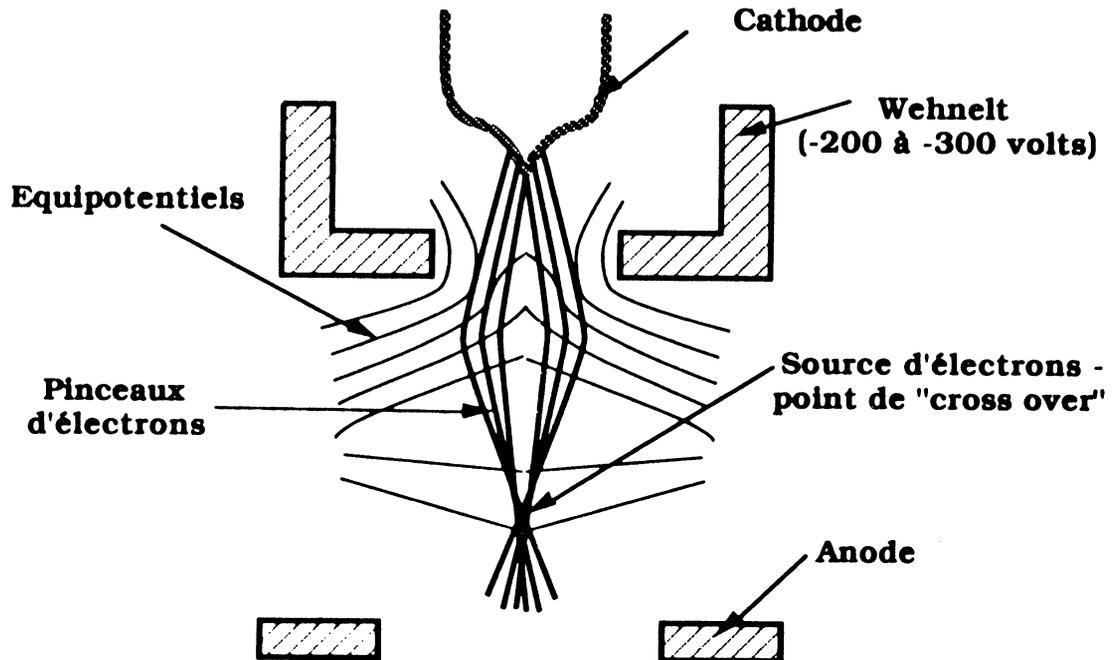
Ce canon utilise un cristal d'hexaborure de lanthane qui émet des électrons grâce au phénomène quantique d'émission de champs. Le cristal est chauffé pour faciliter l'émission électronique.

Ce matériau offre 2 avantages principaux par rapport au tungstène :

- une luminescence augmentée d'un facteur 10 ;

- une durée de vie plus importante due à sa capacité d'évaporation 10 fois moins grande.

Son utilisation est toutefois moins aisée car il nécessite des précautions spéciales de montage et une pression résiduelle assez basse (meilleur que  $10^{-4}$  pascal).



**Figure I.6** Canon à électrons

### **I.2.3.2 Optique de réduction**

Avec un canon ordinaire, la taille initiale du "cross over" (diamètre de  $50\ \mu\text{m}$ ) doit être réduit au moyen de 2 ou 3 lentilles pour former sur l'échantillon une sonde suffisamment précise ( $5\ \text{nm}$  à  $1\ \mu\text{m}$ ).

Deux types de lentilles sont à considérer :

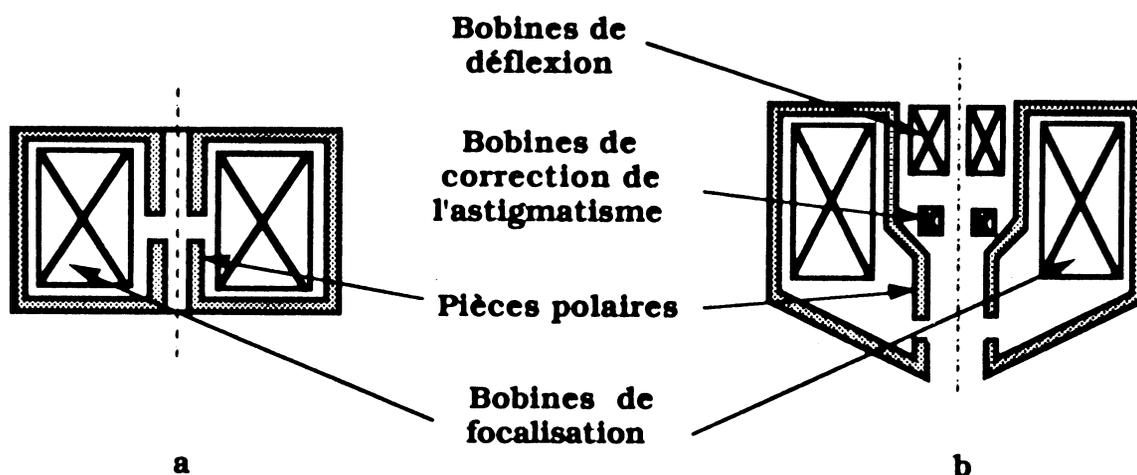
- le condenseur qui forme au dessus de la lentille finale l'image réduite du "cross over" ;
- l'objectif (lentille finale) qui amène cette image à la surface de l'échantillon.

La qualité de focalisation dépend essentiellement de l'objectif. Les défauts éventuels apportés par les condenseurs peuvent être réduits à un niveau négligeable par l'objectif.

L'objectif doit donc satisfaire à plusieurs conditions :

- avoir une faible aberration sphérique ;
- ne pas provoquer dans la région de l'échantillon une induction magnétique supérieure à 10 gauss qui perturberait la détection des électrons secondaires ;
- offrir une place suffisante pour loger le système de déviation et de correction de l'astigmatisme (stigmatiseur).

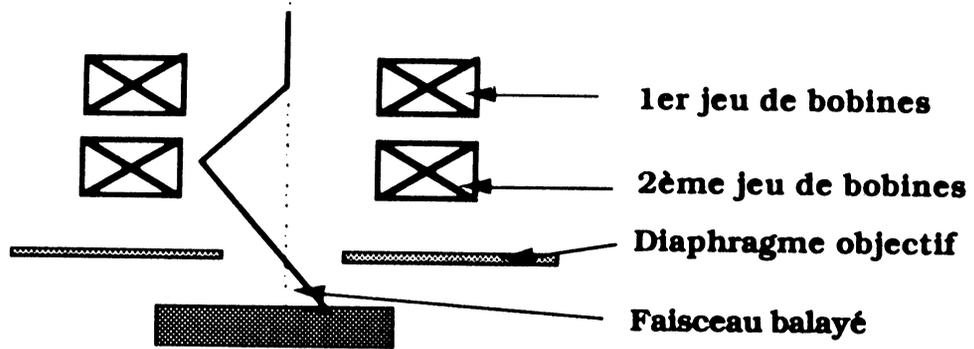
Les condenseurs se présentent sous forme de pièces polaires symétriques (cf figure I.7.a). A l'inverse, l'objectif utilise des pièces polaires dissymétriques pour limiter d'une part le champs magnétique au niveau de l'objet et d'autre part, offrir la place suffisante pour loger les bobines de balayage et les bobines de correction de l'astigmatisme (cf figure I.7.b).



**Figure I.7** Optique de réduction : a - condenseur. b - objectif.

### I.2.3.3 Système de déviation

Le balayage de l'échantillon est assuré par un double jeu de 2 bobines qui assurent un pivotement du faisceau par rapport au centre du diaphragme objectif (cf figure I.8). Les 2 jeux de bobines sont perpendiculaires pour permettre un balayage plan.



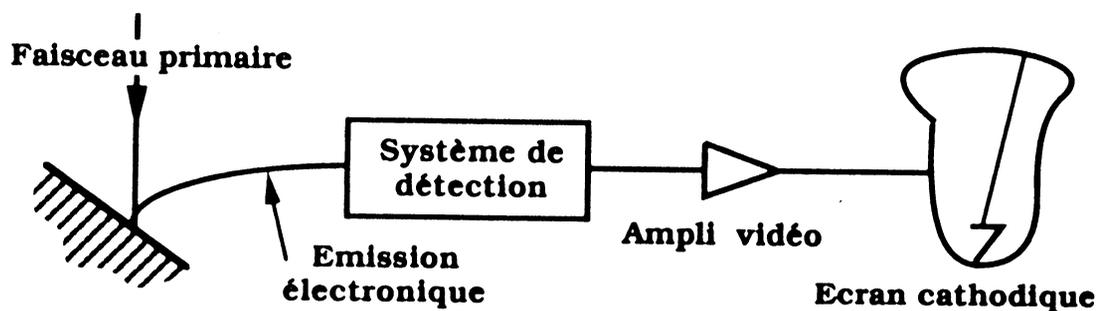
**Figure I.8** Système de déflexion

Comme mentionné plus haut, ces bobines sont généralement logées dans la pièce polaire supérieure de l'objectif.

Il est important de remarquer que l'amplitude de déplacement permet de définir le grandissement du microscope : plus l'amplitude est faible plus le grandissement est important.

#### **I.2.4 Le dispositif d'observation**

Le dispositif d'observation permet de former une image caractéristique de la quantité des électrons émis sous l'impact du faisceau primaire. (cf figure I.9).

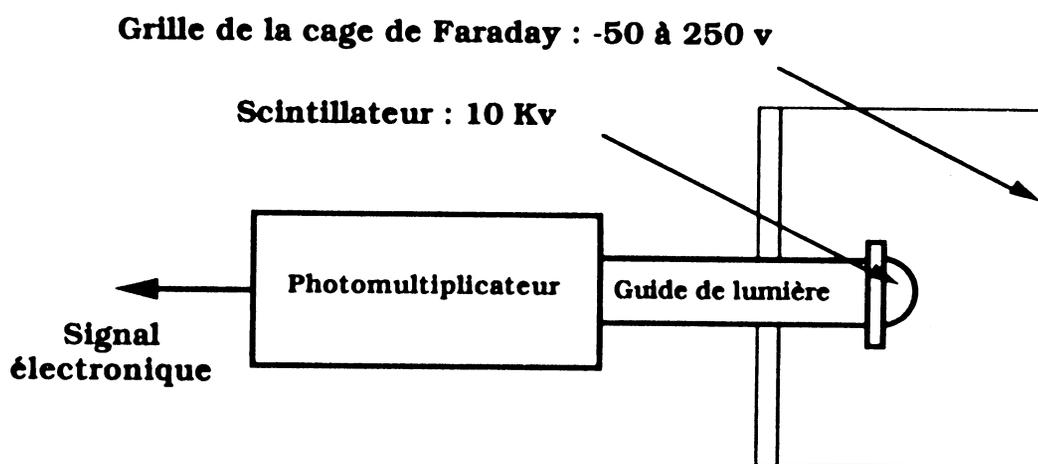


**Figure I.9** Dispositif de visualisation

### I.2.4.1 Système de détection

Le système de détection a pour rôle de capter les électrons émergeant de l'échantillon et d'amplifier le courant résultant pour donner un signal électronique suffisant pour être exploité par la suite.

Le détecteur d'Everhart et Thornley **[EVE60]** est le plus fréquemment employé (cf figure I.10). Il utilise un scintillateur couplé à un photomultiplicateur qui permet de travailler avec un courant d'entrée très faible (jusqu'à  $10^{-16}$  Ampères). Son fonctionnement est le suivant : le scintillateur, porté à un fort potentiel (10 Kv), attire les électrons émis par l'échantillon pour produire des photons qui seront guidés jusqu'à la photocathode du photomultiplicateur (PM). Par la suite, le signal électronique, issu du PM, est amplifié pour sa visualisation sur un écran cathodique.



**Figure I.10** Détecteur d'Everhart et Thornley

Une cage de Faraday, fermée par une grille, est placée autour du scintillateur afin que le faisceau primaire ne soit pas perturbé par la haute tension du scintillateur. Le potentiel porté sur la grille permet de :

- entre 200 à 250 v, collecter les électrons secondaires ; ce potentiel est suffisant pour courber la trajectoire de ces électrons ;
- avec -50 v, récupérer principalement les électrons rétrodiffusés ; ce potentiel négatif permet de repousser les électrons secondaires qui ont une énergie inférieure à 50 électronvolts.

### **I.2.4.2 Système de visualisation**

Le signal électronique, issu du système de détection, est visualisé sur un écran à grande rémanence. L'image, représentant la surface de l'échantillon, est obtenue en synchronisant le balayage du faisceau avec le balayage de l'écran cathodique.

### **I.2.5 Eléments liés à l'échantillon**

#### **I.2.5.1 La chambre-objet**

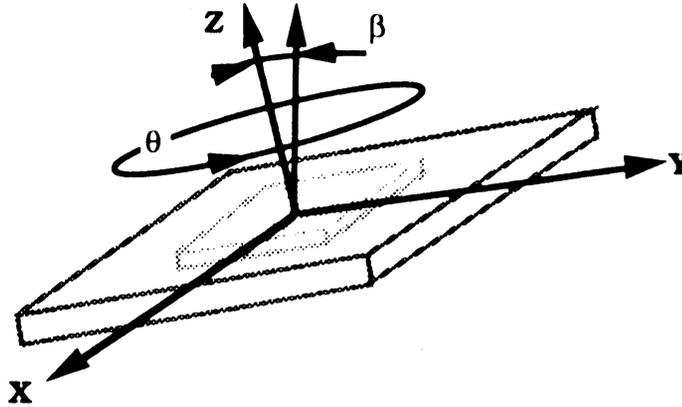
Elle représente l'élément qui permet d'accueillir l'échantillon à l'intérieur du MEB. Placé sous vide comme la colonne optique, elle doit permettre d'atteindre des pressions résiduelles d'au moins  $10^{-3}$  pascal.

La chambre-objet est caractérisée par 2 paramètres importants :

- le temps de pompage qui définit la rapidité d'introduction d'un échantillon ; il doit évidemment être le plus petit possible car cette opération peut être fréquente.
- ses dimensions qui doivent être suffisamment grandes pour accueillir plusieurs échantillons ainsi que le système permettant leur mouvement pour placement sous le faisceau.

#### **I.2.5.2 Le mouvement-objet**

A l'intérieur de la chambre-objet, l'échantillon, placé sur une platine porte-objet, doit pouvoir être déplacé mécaniquement sous le faisceau. Le mouvement-objet assure cette fonction. Il réalise des déplacements dans les 3 degrés de libertés X, Y et Z, et peut posséder des mouvements supplémentaires comme la rotation  $\theta$  ou l'inclinaison  $\beta$  (tilt) (cf figure I.11).



**Figure I.11** Mouvement-objet

La réalisation du mouvement-objet doit être extrêmement soignée pour assurer des déplacements précis (sur les MEB actuels elle est de l'ordre du micromètre) et éviter les dérives lentes de positionnement.

### **I.3 L'outil de mesure des potentiels - le Testeur à Faisceau d'Electrons (TFE)**

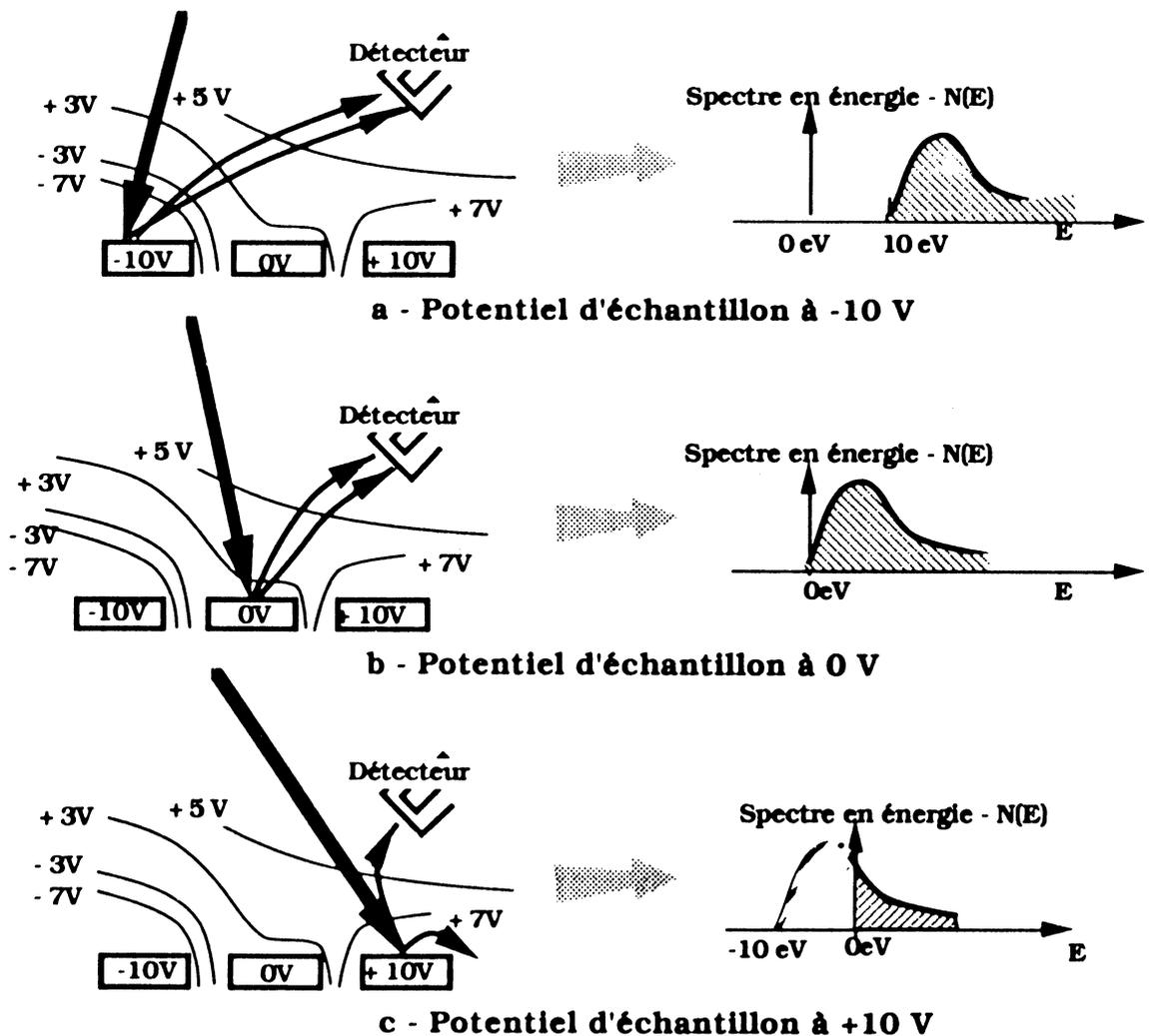
Le TFE se distingue du MEB par la modification et l'apport d'éléments au niveau de la colonne optique qui permettent d'effectuer à la surface des circuits intégrés, des mesures de potentiels de façon qualitative, quantitative et dynamique.

#### **I.3.1 Mesure qualitative - contraste de potentiel**

Le principe de mesure des potentiels repose sur la détection des électrons secondaires. Lorsque des potentiels sont présents à la surface de l'échantillon, le nombre d'électrons secondaires collectés est plus ou moins important selon le signe de ces potentiels.

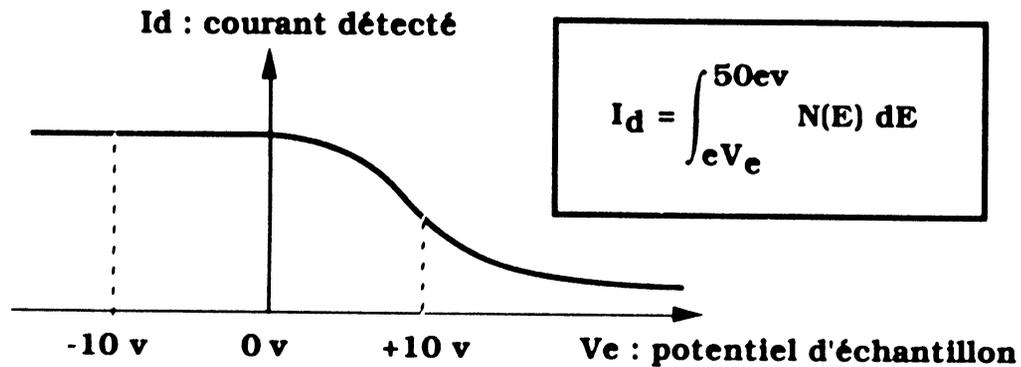
Ce phénomène, appelé contraste de potentiel, se superpose au contraste topographique et se traduit sur l'image vidéo par des zones claires pour les potentiels positifs et des zones sombres pour les potentiels négatifs (cf photo I.2). Il est lié à la différence de potentiel entre l'échantillon et le détecteur.

La figure I.12 explique ce phénomène **[MEN83a]** : lorsque le potentiel de l'échantillon passe de 0 v à  $V_e$ , le gain en énergie cinétique des électrons secondaires est égal à  $-e \cdot V_e$  ( $e$  charge de l'électron). Pour les potentiels négatifs, le gain en énergie positif ne perturbe pas la détection des électrons secondaires car la distribution du spectre  $N(E)$  est traduite sans modification (cf figure I.12.a). Par contre, les potentiels positifs donnent un gain en énergie négatif qui perturbe les trajectoires des électrons secondaires ; ce phénomène modifie la distribution du spectre  $N(E)$  entraînant ainsi une réduction du rendement de détection (cf figure I.12.c).



**Figure I.12** Origine du contraste de potentiel

La relation entre le signal détecté  $I_d$  et le potentiel d'échantillon  $V_e$  donne une courbe (cf figure I.13) qui présente une saturation pour les potentiels d'échantillon négatifs. Cette saturation limite donc l'observation à des mesures qualitatives des variations de potentiels positifs.

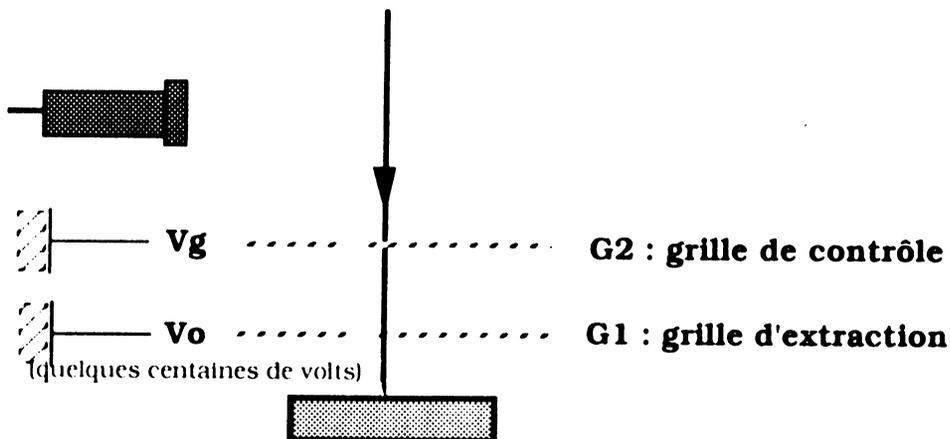


**Figure I.13** Courant détecté en fonction du potentiel d'échantillon

### I.3.2 Mesure quantitative

#### I.3.2.1 Principe de la mesure

Une mesure quantitative peut toutefois être obtenue en installant entre l'échantillon et le détecteur un spectromètre d'énergie qui permet de relier le potentiel d'échantillon au nombre d'électrons secondaires détectés [MEN83b].



**Figure I.14** principe du spectromètre en énergie

Le spectromètre le plus simple à mettre en œuvre se compose de 2 grilles planes G1 et G2 que l'on nomme respectivement grille d'extraction et grille de contrôle (cf figure I.14). La grille G1 est placée près de la surface de l'échantillon ; elle est polarisée à une tension de plusieurs centaines de volts pour extraire la majeure partie des électrons secondaires. La grille G2, portée à un potentiel  $V_g$ , crée un champ retardateur qui agit comme un filtre à sélection d'énergie : les électrons secondaires dont l'énergie cinétique est positive sont transmis, les autres sont réfléchis.

Avec un tel système, le signal détecté  $I_d$  correspond à un courant qui intègre les énergies suivantes :

$$I_d = \int_{e(V_g - V_e)}^{50 \text{ eV}} N(E) dE = I_d(V_g - V_e)$$

avec  $V_e$  pour le potentiel d'échantillon et  $V_g$  pour le potentiel de grille. Le courant détecté est donc une fonction qui dépend de la différence  $V_g - V_e$ . Cette relation est utilisée pour effectuer une mesure directe du potentiel. Pour cela, il est nécessaire d'inclure le spectromètre dans une boucle de contre-réaction qui maintient le courant détecté à une valeur constante. Comme le courant ne dépend que de la différence  $V_g - V_e$ , les variations de potentiel de grille sont alors linéairement liées aux variations de potentiel d'échantillon, assurant ainsi une mesure directe du potentiel (cf figure I.15).

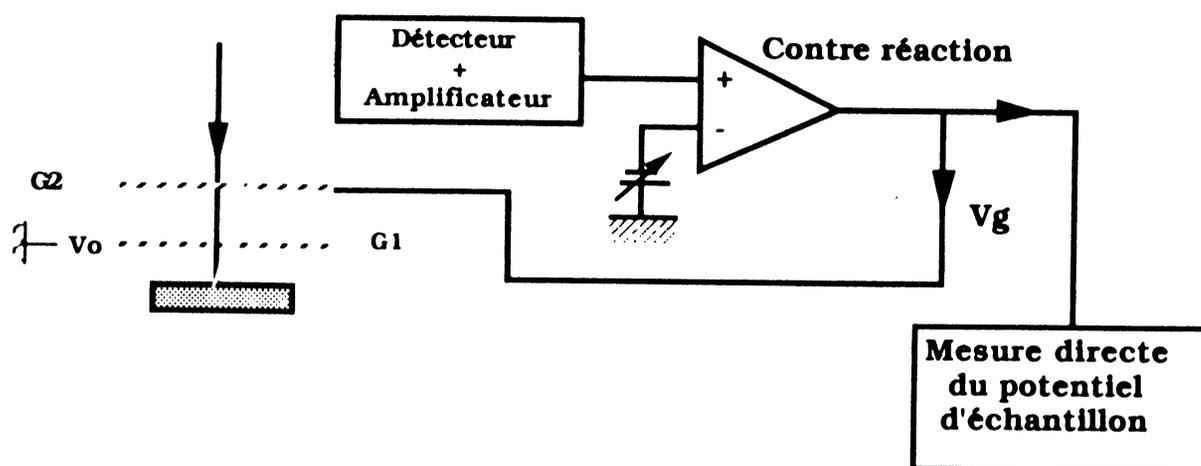


Figure I.15 Boucle de contre réaction

### I.3.2.2 Résolution en potentiel

La résolution en potentiel représente la tension minimale qui peut être détectée en mesure quantitative.

D'après [GOP77], cette valeur est d'une part fonction du bruit du à la nature corpusculaire du faisceau primaire (le bruit généré par l'électronique de détection et d'amplification est négligeable) et d'autre part liée à la sensibilité du spectromètre. Cette sensibilité caractérise la transmission des électrons secondaires à travers la grille du spectromètre. Elle est limitée par l'effet divergent des mailles de la grille d'extraction qui réduit le phénomène de capture.

D'après ces considérations, la tension minimale s'exprime par la formule suivante :

$$V_{\min} = C \cdot n \cdot (\Delta f)^{\frac{1}{2}} I_p$$

dans laquelle **C** est une constante qui dépend du spectromètre et du matériaux de l'échantillon, **n** le rapport signal sur bruit,  $\Delta f$  la bande passante du système de détection et  $I_p$  le courant du faisceau primaire.

L'augmentation de cette résolution peut être réalisée en diminuant la bande passante du détecteur ce qui implique des temps de mesure plus importants ou encore, en augmentant le courant du faisceau primaire mais ceci a le désavantage de réduire la résolution spatiale de la sonde (le diamètre du spot est une valeur qui croit avec la racine carrée du courant de faisceau).

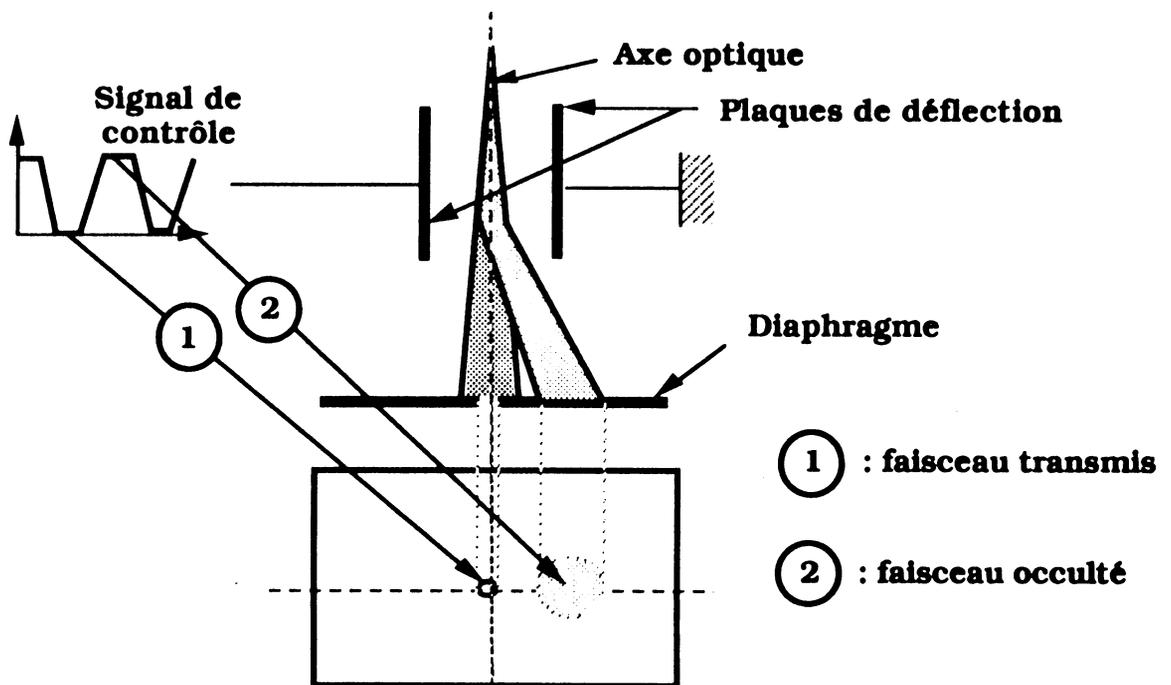
L'optimisation nécessite donc un compromis entre la résolution spatiale et le temps de mesure. Sur les testeurs actuels, la résolution en potentiel est de l'ordre du millivolt (entre 5 à 10 millivolts) avec un rapport signal sur bruit de 2, une bande passante de 10 Hertz et un diamètre de spot de 0,1  $\mu\text{m}$ .

### I.3.3 Mesure dynamique

Avec un faisceau primaire continu, la mesure des potentiels dynamiques est limitée à la bande passante du système de détection

(quelques hertz). Pour augmenter cette bande passante, la stroboscopie de faisceau est utilisée.

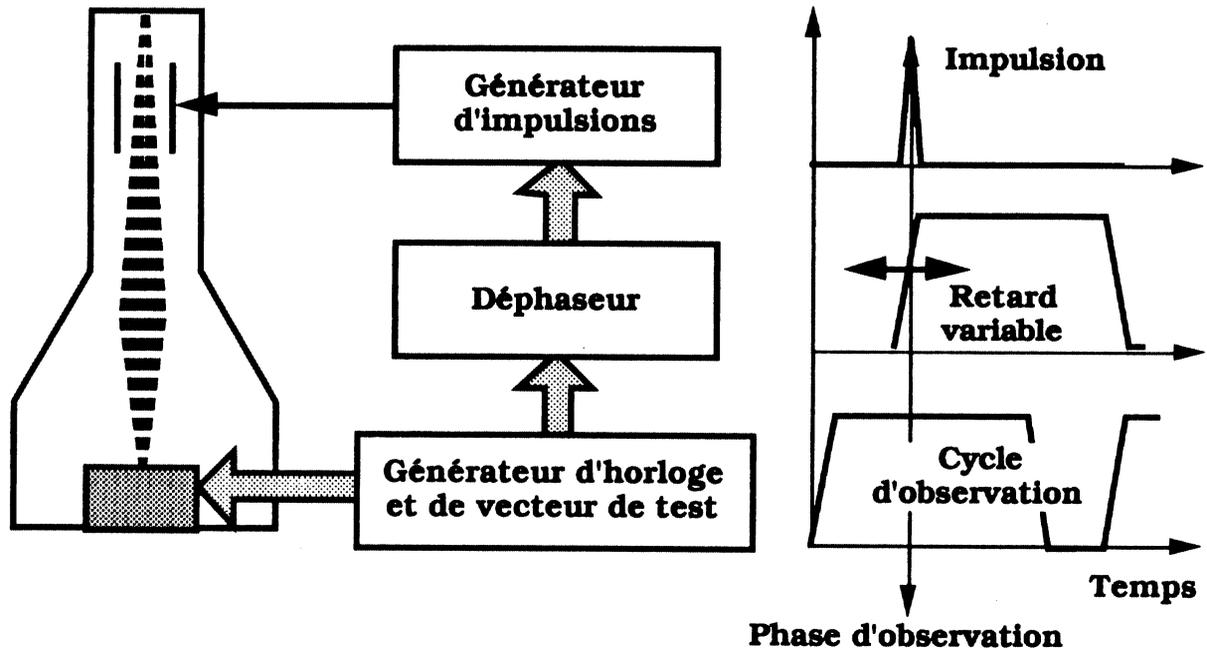
Son principe consiste à échantillonner le faisceau primaire avec un système de modulation. Ce système est basé sur l'utilisation de plaques de déflexion qui dévient, par l'action d'un champ électrique, le faisceau primaire hors de l'axe optique, interdisant ainsi son passage au niveau d'un diaphragme (cf figure I.16) [URA89].



**Figure I.16** Principe de la modulation de faisceau

En contrôlant les plaques de déflexion avec un générateur d'impulsions, il est alors possible d'observer le potentiel pendant un temps très court. La cohérence temporelle est obtenue en synchronisant l'impulsion sur une horloge externe qui reproduit cycliquement le vecteur de test appliqué au dispositif sous test. Ainsi, la mesure des potentiels est réalisée à un instant donné du cycle d'observation (période du vecteur de test). Un déphaseur complète ce dispositif : il permet la sélection de l'instant d'observation

(encore appelé phase d'observation) en introduisant un retard sur le déclenchement de l'impulsion (cf figure I.17).



**Figure I.17** Système de stroboscopie de faisceau

La durée minimale d'impulsion d'électrons primaires conditionne la résolution temporelle du testeur. Les systèmes de modulation actuels offrent une durée minimale comprise entre 100 picosecondes et 10 picosecondes [OZA86], qui permettent de reproduire des fronts de transition de l'ordre de 0,1 nanoseconde avec une distorsion de 10%.

### **I.3.4 Les contraintes liées à l'observation des circuits intégrés**

L'observation des potentiels à la surface des circuits intégrés doit prendre en compte plusieurs phénomènes qui peuvent être sources de dégradation des mesures.

### **I.3.4.1 Les effets d'irradiation**

La sonde électronique peut avoir des conséquences non négligeables sur le comportement électrique des circuits intégrés. Elle peut induire plusieurs phénomènes :

- un décalage de la tension de seuil des transistors MOS par la création d'une charge sur l'oxyde mince ;
- une augmentation de recombinaison à l'interface silicium-oxyde ;
- une variation de la résistivité et une induction de courant par la génération de paires électrons-trous dans les semi-conducteurs.

Pour éviter ces problèmes, il convient de limiter l'énergie du faisceau primaire qui est la source principale des dégradations électriques. Une énergie primaire de 1 Kiloélectronvolt est généralement employée. elle permet l'observation en émission secondaire sans perturber le fonctionnement des circuits intégrés.

Par ailleurs, la mesure des potentiels peut être dégradée dans le temps, par le phénomène de contamination qui réduit le rendement en émission secondaire.

Ce phénomène de pollution s'explique par la migration de molécules d'hydrocarbures sur les régions balayées par le faisceau [HRE79] ; il est activé par l'énergie du faisceau primaire qui piège les hydrocarbures provenant du système de vide (pompe à diffusion). Les caractérisations de [MUL71] ont montré que le taux de contamination était inversement proportionnel au carré du diamètre de faisceau.

Pour limiter ce phénomène, il est d'une part, important d'éviter les forts grandissements et d'autre part, ne pas exposer inutilement le circuit au faisceau d'électrons en limitant le temps de balayage.

Enfin, la couche de passivation des circuits intégrés constitue une limitation à l'observation des potentiels car elle recouvre les connexions par un matériaux isolant qui se charge négativement sous l'impact du faisceau primaire (cf chapitre I.2.2.2.C) et interdit ainsi, les mesures directes de potentiel.

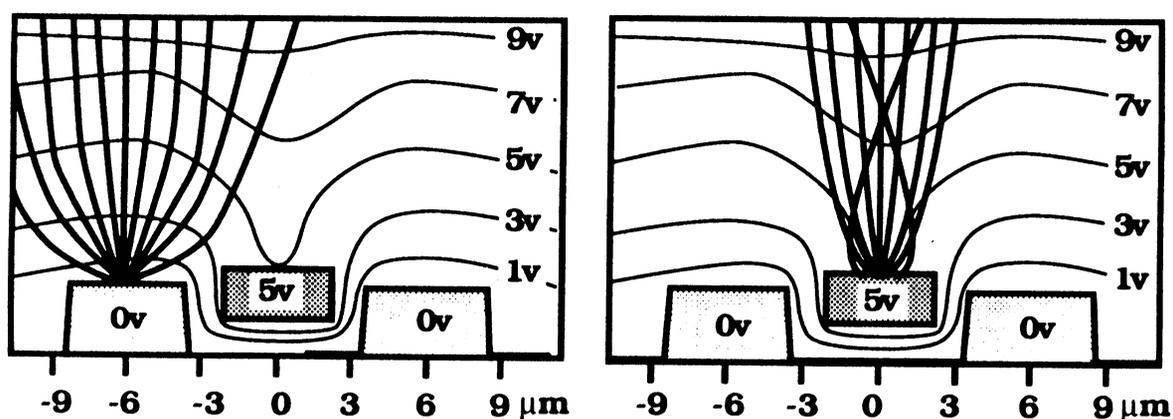
La méthode usuelle pour s'affranchir de cette charge consiste à éliminer la couche de passivation par une attaque chimique ou plasma.

Par ailleurs, des techniques d'observation à travers la couche de passivation ont été développées. Elles sont basées sur l'observation dynamique de la charge de l'isolant lors d'une variation de potentiel sur la connexion : une variation qui évolue du niveau "haut" vers le niveau "bas" induit un contraste clair sur l'image (la variation opposée donne un contraste sombre). Encore à l'état d'expérimentation, ces techniques, nommées "Capacitive coupling voltage contrast", permettent dès à présent de réaliser des mesures de potentiel qualitatives et quantitatives sur circuits passivés ([REI89], [GOR85])

### I.3.4.2 Les effets de proximité

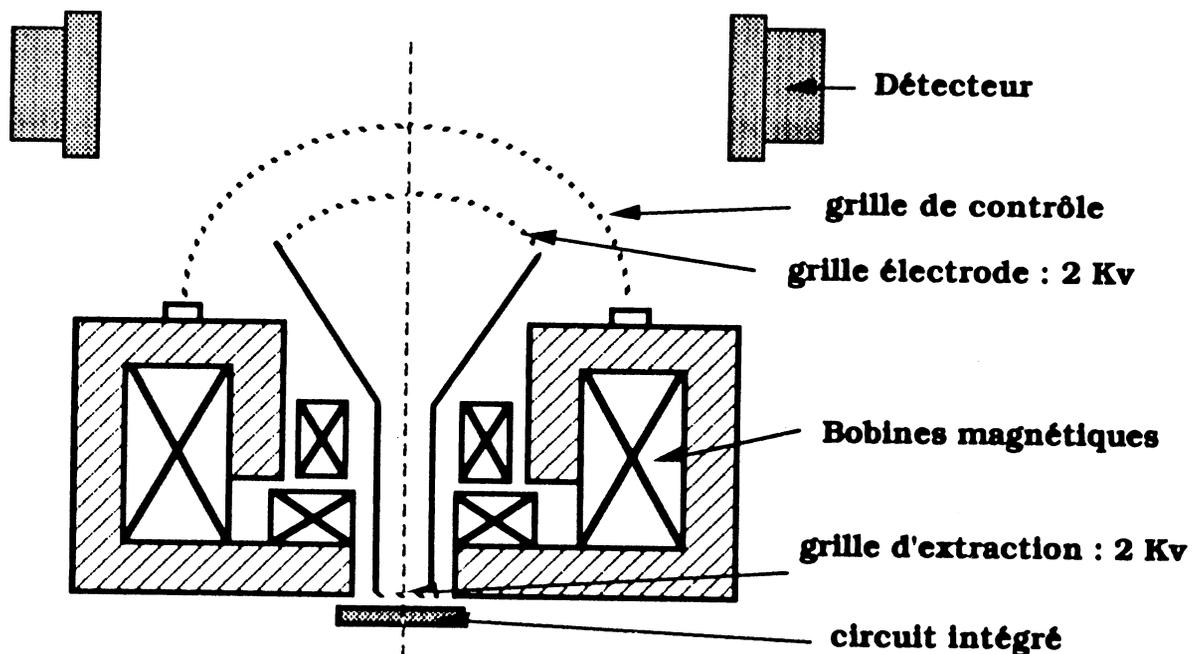
L'effet de proximité caractérise les perturbations du champ électrique de surface dues aux interactions électrostatiques entre connexions portées à des potentiels différents. Ces interactions sont d'autant plus importantes que les connexions sont rapprochées

Ce phénomène crée des champs inhomogènes qui induisent des effets focalisateurs et défocalisateurs sur les trajectoires des électrons secondaires (cf figure I.18) [MEN83b]. Le courant détecté est par conséquent perturbé car il résulte d'un couplage entre le signal à mesurer et les potentiels des connexions voisines.



**Figure I.18** Trajectoire des électrons en fonction du potentiel du point d'émission et de ceux des connexions voisines

Pour diminuer cet effet, il faut modifier la trajectoire des électrons secondaires pour que la totalité du spectre d'énergie soit détectée par le spectromètre. Les solutions actuelles consistent à inclure le spectromètre dans la lentille objectif de la colonne (cf figure I.19) [FRO87]. Outre l'action de focalisation, le champ magnétique créé par cette lentille agit sur les trajectoires des électrons secondaires de telle sorte qu'ils se présentent sous incidence normale à une grille de filtrage hémisphérique. Avec un tel système, l'erreur de mesure due aux effets de proximité, pour des connexions au pas de  $1,5 \mu\text{m}$ , est réduite à moins de 3% contre 40% pour un spectromètre plan (cf figure I.15) [PLI89].



**Figure I.19** Spectromètre de FROSIEN et PLIES

#### I.4 Les Techniques d'observation

A partir des systèmes de mesure précédemment décrits, l'observation des potentiels peut être réalisée sous plusieurs formes qui diffèrent par :

- le mode d'utilisation de la sonde (continu ou pulsé) ;
- le mode de balayage (surface, ligne ou point) ;
- le mode de mesure (qualitatif ou quantitatif).

La combinaison de ces modes a permis de créer plusieurs techniques d'observation qui restituent des informations sur la distribution spatiale et temporelle des potentiels ([MEN81], [WOL86]).

Actuellement 4 techniques sont principalement employées. Résumées dans le tableau de la figure 1.20, elles sont détaillées dans la suite de ce paragraphe.

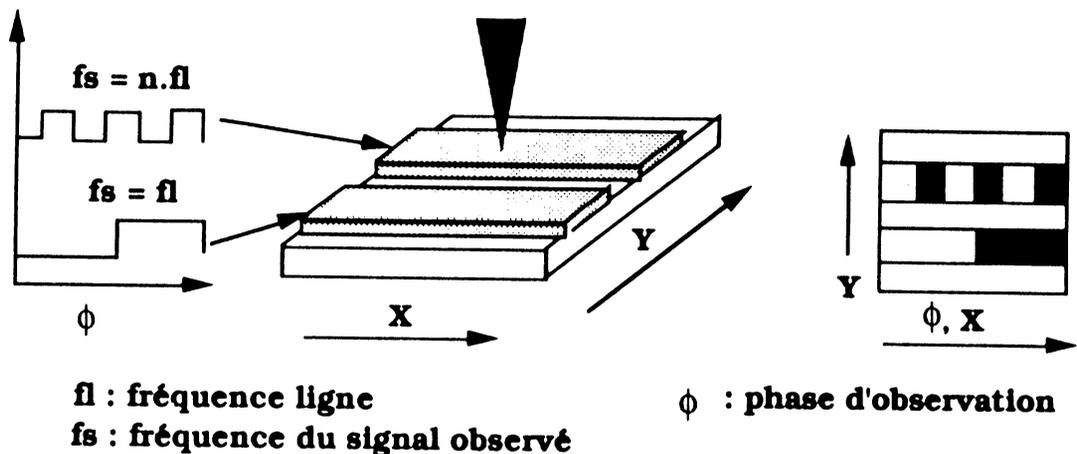
<b>Techniques d'observation</b>	<b>Mode d'utilisation de la sonde</b>	<b>Mode de balayage</b>	<b>Mode de mesure</b>
<b>"Voltage coding"</b>	Continu	Surface	Qualitatif (contraste de potentiel)
<b>Image stroboscopique</b>	Pulsé - phase d'observation fixe	Surface	Qualitatif (contraste de potentiel)
<b>"Logic-state mapping"</b>	Pulsé - phase d'observation variable	Ligne	Qualitatif (contraste de potentiel)
<b>Forme d'onde</b>	Pulsé - phase d'observation variable	Point	Quantitatif

**Figure 1.20** Présentation des principales techniques d'observation

#### **1.4.1 Le "voltage coding"**

La technique de "voltage coding" restitue une cartographie des états logiques dans l'espace et le temps. Basée sur l'observation en contraste de potentiel, elle utilise un faisceau continu qui balaye le circuit en surface.

Le principe d'observation consiste à stabiliser l'évolution des potentiels à chaque balayage de ligne, en synchronisant la fréquence du signal étudié avec la fréquence ligne de l'écran vidéo.



**Figure I.21** Le "Voltage coding"

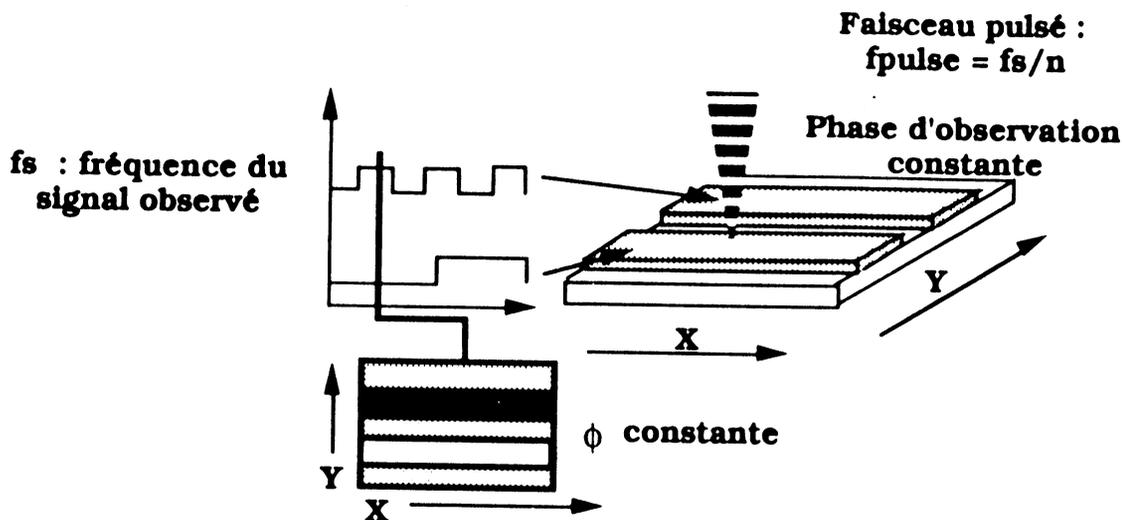
Cette observation donne une image avec des alternances claires et sombres (contraste de potentiel) qui représente l'évolution des niveaux logiques dans le temps. L'information temporelle est obtenue par la mesure du nombre d'alternances sur la largeur de l'image : ce nombre est fixé par le rapport de la fréquence de balayage ligne sur la fréquence du signal observé (cf figure I.21 et photo I.3).

Ce moyen d'observation est limité en fréquence par la résolution spatiale du moniteur vidéo et par la fréquence de balayage ligne. Pour un moniteur classique, fonctionnant à la vitesse télévision, la fréquence maximale d'observation est limitée à 1,5 Mhz. Cette valeur correspond à un rapport de fréquence de 100 (nombre maximale d'alternances discernables sur le moniteur) avec une fréquence ligne de 15 KHz.

#### **I.4.2 Image stroboscopique**

L'image stroboscopique donne une cartographie des potentiels à un instant donné du cycle d'observation.

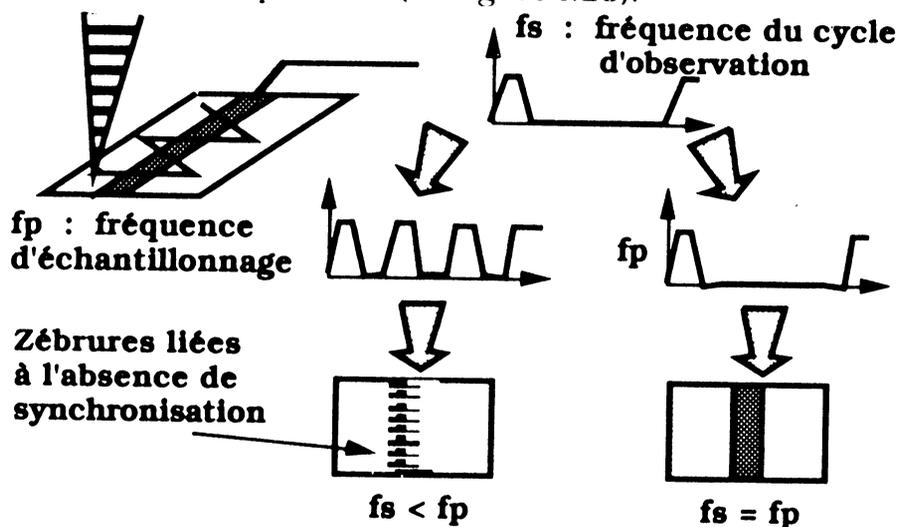
Basée sur le principe de la stroboscopie de faisceau (cf paragraphe I.3.3), l'image est construite à partir de pixels, acquis pendant la même phase d'observation. Il en résulte une image qui fige l'état des potentiels dans le temps (cf figure I.22 et photos I.5 a et b).



**Figure I.22** L'image stroboscopique

Cette technique stroboscopique est limitée en fréquence par la largeur d'impulsion du faisceau primaire (cf paragraphe I.3.3). Les testeurs actuels permettent d'observer des signaux dont la fréquence maximale est de l'ordre de 200 Mhz.

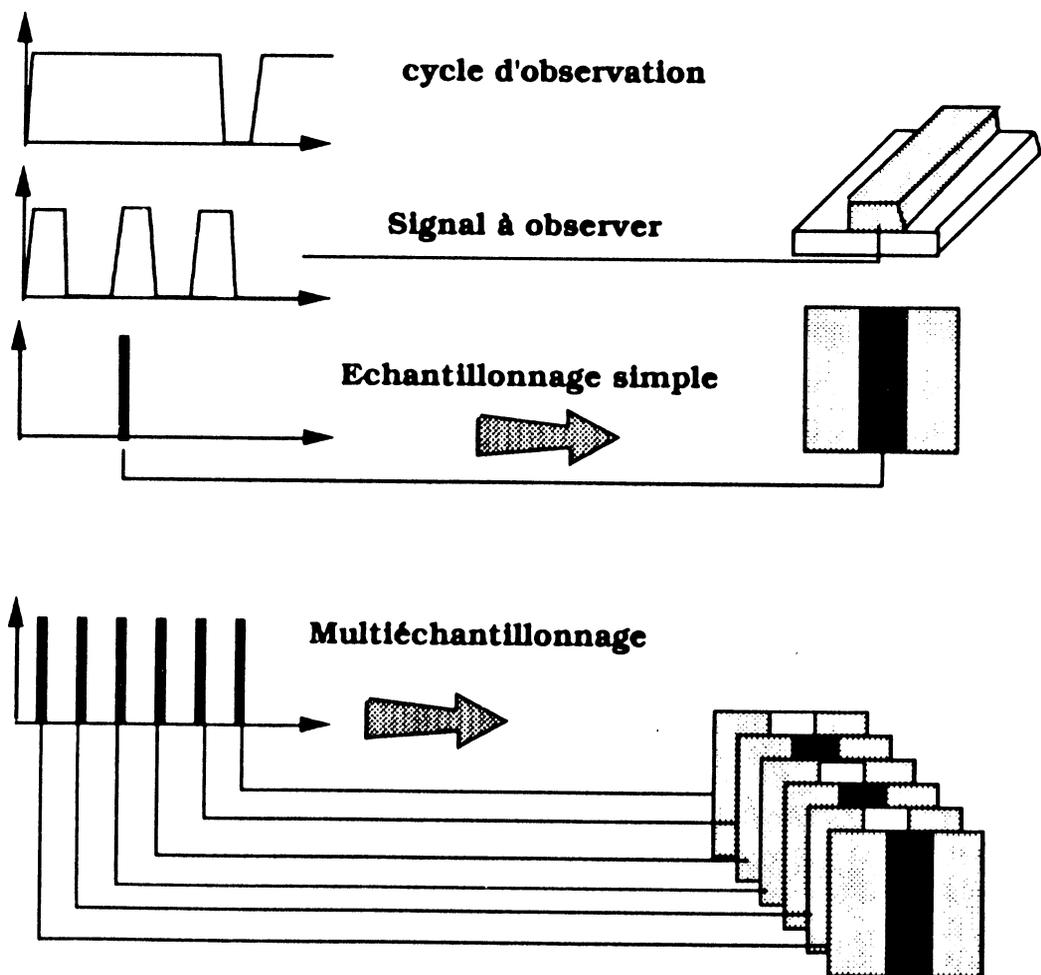
L'inconvénient majeur de cette technique est le temps d'acquisition qui peut vite devenir prohibitif dans le cas où le cycle d'observation est long. Ce problème est dû à la fréquence d'échantillonnage qui doit être égale ou inférieure à la fréquence du cycle d'observation (synchrone de la fréquence de modulation de faisceau). Dans le cas où celle-ci est supérieure, l'acquisition des pixels devient anarchique et induit un effet de brouillage qui rend l'observation impossible (cf. figure I.23).



**Figure I.23** Influence de la vitesse de balayage sur les images stroboscopiques.

Cette contrainte peut donc être très pénalisante au niveau des temps d'acquisition. Par exemple, un cycle d'observation de 1 milliseconde requiert 4 mn 30 s pour l'acquisition d'une image de dimension 512 x 512 pixels ; si l'on souhaite couvrir le cycle par une centaine d'images, le temps d'acquisition total est alors supérieur à 7 heures.

Récemment des solutions ont été proposées par [HAL89] et [MEN89] pour réduire le temps total d'acquisition. Ces solutions sont basées sur la technique de multiéchantillonnage permettant d'acquérir, en un temps identique, un ensemble d'images à différentes phases d'observation contre une seule image avec une technique d'échantillonnage classique (cf figure I.24). la réduction des temps d'observation est donc égale au nombre d'images couvrant le cycle d'observation. Ainsi pour l'exemple précédent, un facteur 100 est gagné.



**Figure I.24** Principe du multiéchantillonnage

### I.4.3 "Logic state mapping"

Le "logic state mapping" utilise comme précédemment le principe de stroboscopie de faisceau. L'observation est réalisée en mode ligne avec une incrémentation de phase à chaque balayage. Cette technique permet de visualiser, sur le cycle complet d'observation, l'état logique des connexions balayées par le faisceau. Elle est représentée par une image qui montre l'évolution des potentiels en fonction du balayage ligne et de la phase d'observation (cf figure I.25 et photo I.6).

Cette technique donne une information identique au "voltage coding" avec une investigation en fréquence largement supérieure : 200 Mhz pour le "logic state mapping" qui utilise la stroboscopie de faisceau, contre 1,5 Mhz pour le "voltage coding".

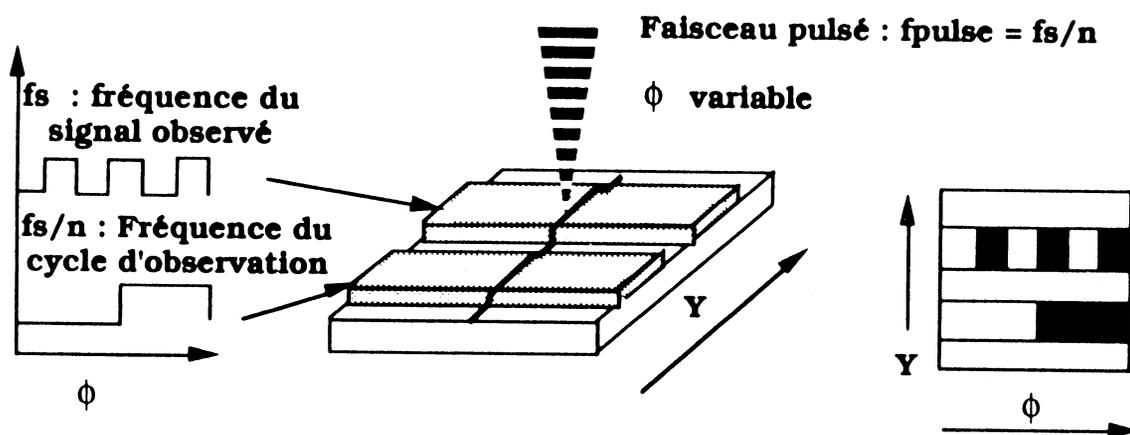
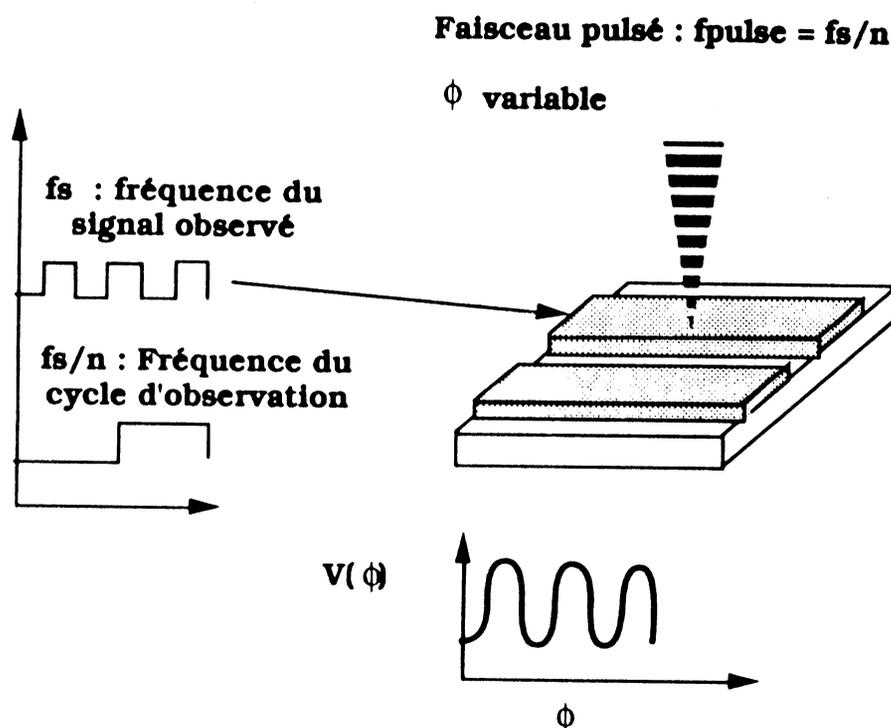


Figure I.25 Le "logic state mapping"

### I.4.4 La forme d'onde

La forme d'onde est une technique d'observation qui permet de mesurer dans le temps, la valeur d'un potentiel en un point fixe du circuit. Comme dans le cas du "logic state mapping", l'observation stroboscopique est réalisée pour un ensemble de phases couvrant la totalité du cycle d'observation. La mesure quantitative est bien évidemment réalisée à l'aide d'un spectromètre en énergie (cf au chapitre I.3.2).

L'observation est effectuée sans balayage. Elle restitue un oscillogramme représentant la valeur du potentiel en fonction de l'instant d'observation (cf figure I.26).



**Figure I.26** La forme d'onde

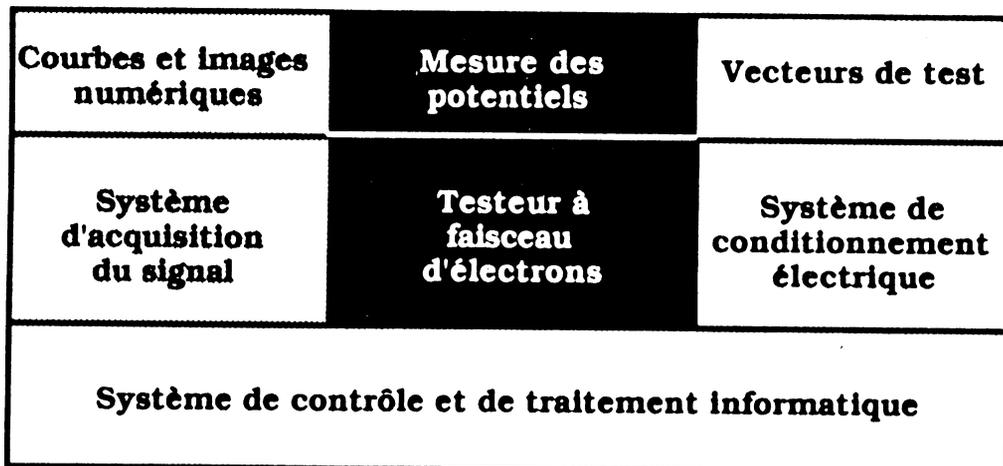
Cette technique offre une résolution temporelle qui permet de reproduire des transitions de l'ordre de 0,1 nanoseconde (cf paragraphe I.3.3) avec une résolution en potentiel de l'ordre du millivolt (cf paragraphe I.3.2.2). Comme dans le cas des images stroboscopiques, l'observation d'un cycle long peut être très pénalisante au niveau des temps d'acquisition. La technique de multiéchantillonnage a également été employée. Cette solution est encore peu satisfaisante pour les mesures quantitatives car il est difficile de contrôler en temps réel la grille de filtrage du spectromètre. Toutefois des mesures qualitatives restent possibles. Dès à présent, des systèmes commercialisés [TAL89], permettent des mesures rapides de niveaux logiques à l'aide de ce principe.

### I.5 La station de test et ses applications

Les techniques d'observation précédemment décrites, donnent au testeur à faisceau d'électrons (TFE) de nombreuses possibilités d'observation du fonctionnement interne des circuits. Son application seule au test des circuits intégrés reste toutefois peu efficace, face au nombre important de connexions à observer. Le développement de stations de test informatisées est donc devenu indispensable pour l'investigation de tels circuits [LAU84].

D'une manière générale, il convient de relier le TFE à des systèmes externes pour concevoir une station de test performante (cf figure I.27). Les principaux systèmes adjoints aux TFE sont les suivants :

- un conditionneur électrique qui permet d'alimenter le circuit à analyser ;
- un système d'acquisition du signal qui permet de numériser les résultats d'observation sous forme de courbes ou d'images ;
- un système informatique qui permet d'une part de contrôler le TFE et ses systèmes annexes et d'autre part, de traiter et d'analyser les résultats d'observation.



**Figure I.27** Organisation de la station de test

Ces stations de test sont utilisées pour la localisation des fautes ou des défauts dans les domaines de :

### **I.5.1 La validation de prototype**

Cette application est un test qui a pour but de localiser les fautes résiduelles de fabrication et de conception en vue de la mise au point des circuits intégrés.

Menée par le concepteur, la validation des prototypes est réalisée par confrontation des résultats d'observation (images ou courbes) aux résultats issus des outils de CAO. La liste des divergences obtenues en fin de traitements, indique les lieux et instants auxquels les erreurs ont été détectées. Cette information est par la suite utilisée pour remonter à la source de la faute.

L'efficacité de cette application est réellement assurée si un lien informatique est créé entre les outils d'aide à la conception et les résultats d'observation.

Dès à présent, les constructeurs **[CON87]** et **[HEN87]** proposent des stations de test équipées de logiciels qui permettent de relier topologiquement le dessin des masques avec les images microscopes. Ces solutions apportent un gain de temps important car elles permettent d'accéder rapidement aux connexions internes du circuit.

De telles stations rendent parfaitement envisageable un test entièrement automatique. Les recherches menées dans ce domaine consistent à développer des méthodes de diagnostics automatiques pour la localisation de fautes. Ces travaux sont basés soit sur l'utilisation d'un dictionnaire de fautes **[MEL88]** soit sur l'utilisation d'un système expert **[MAR89]**.

### **I.5.2 La recherche des limites de fonctionnement**

Une fois le circuit validé, il est important de déterminer ses limites d'utilisation, en fonction des conditions externes : tensions d'alimentation, fréquences d'horloge, températures, ...

Dans certains cas, le circuit peut présenter une faiblesse de fonctionnement au niveau d'un bloc (ou plusieurs) qui limite les performances d'ensemble du produit.

La recherche des limites de fonctionnement a donc pour but de localiser les points faibles du circuit. La localisation est généralement réalisée par comparaison des résultats d'observation (courbes ou images) à des résultats

de référence : soit sur un même circuit si celui-ci peut être mis dans un état de fonctionnement correct, soit avec un second circuit réputé bon. A l'issue de cette comparaison, la liste des différences est alors utilisée pour isoler le(s) bloc(s) sensible(s) **[MAY84]**

### **1.5.3 l'analyse de défaillances**

L'analyse de défaillances est un examen qui a pour but de déterminer l'origine du dysfonctionnement d'un circuit apparaissant en cours d'utilisation. Cette analyse peut être réalisée à deux moments distincts dans la vie d'un circuit intégré :

- après fabrication pour détecter les défauts de fabrication ;
- après défaillance pour détecter les défauts se produisant pendant la vie utile du circuit.

Cette analyse est menée différemment selon la connaissance interne (structurelle) du circuit. Dans le cas où l'analyste possède les données de CAO, la localisation du défaut peut être réalisée à l'aide des outils présentés en mise au point de prototypes (cf §1.5.1). Dans le cas de circuits à structure interne inconnue, cette opération est réalisée par comparaison des résultats d'observation issus du circuit défaillant à ceux d'un circuit réputé bon **[BAI82]** et **[MAY84]**.

Cette application est à la base des travaux réalisés dans cette thèse. Elle est présentée dans le chapitre suivant.

## **1.6 Conclusion**

Pour conclure ce premier chapitre, nous résumerons les caractéristiques principales du test par faisceau d'électrons.

Ce moyen de test permet d'accéder aux nœuds internes des blocs du circuit sans perturber son fonctionnement. La détection des électrons secondaires, générés sous l'impact d'un faisceau d'électrons primaire d'énergie 1 Kev, permet d'effectuer des mesures de potentiel qualitatives (observation des niveaux logiques à l'aide du contraste de potentiel) et quantitatives en modes statique et dynamique.

L'outil de mesure, nommé Testeur à Faisceau d'Electrons (TFE), se compose à la base d'un microscope électronique à balayage auquel il a été adjoint :

- un spectromètre en énergie pour les mesures quantitatives ;
- un modulateur de faisceau pour les mesures dynamiques.

Au niveau des performances, les TFE actuels offrent les caractéristiques suivantes :

- une résolution spatiale de 0,1  $\mu\text{m}$  (diamètre de la sonde électronique);
- une résolution en potentiel de l'ordre du millivolt ;
- une résolution temporelle, comprise entre 100 ps et 10 ps qui permet de reproduire des fronts de transition de l'ordre de quelques ns.

Les possibilités de mesure ont permis de développer des techniques d'observation qui fournissent une information sur la distribution spatiale et temporelle des potentiels à la surface du circuit. les principales techniques sont :

- le "voltage coding" ;
- l'image stroboscopique ;
- le "logic state mapping" ;
- la forme d'onde.

Enfin, couplé a des systèmes de traitements informatiques, d'acquisition du signal et de conditionnement électrique, le TFE devient un instrument performant pour les applications :

- de mise au point de prototypes ;
- de recherche des limites de fonctionnement ;
- d'analyse de défaillances.

## OBSERVATION EN CONTRASTE DE POTENTIEL

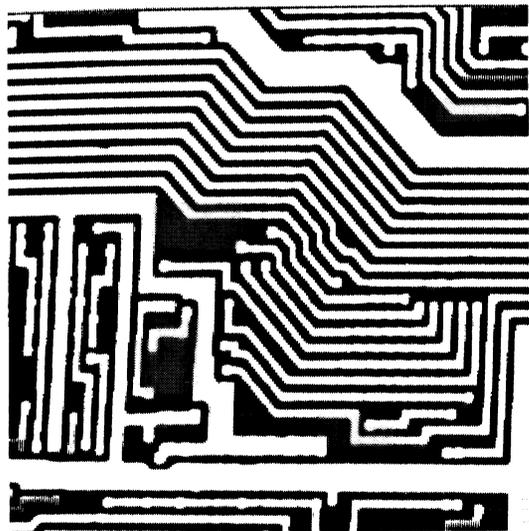


Photo I.1 Contraste topographique

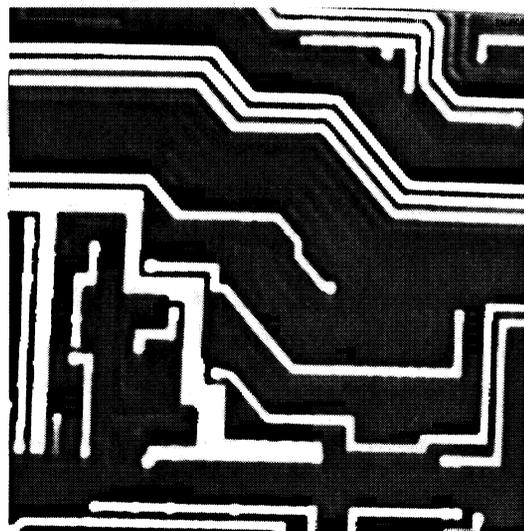
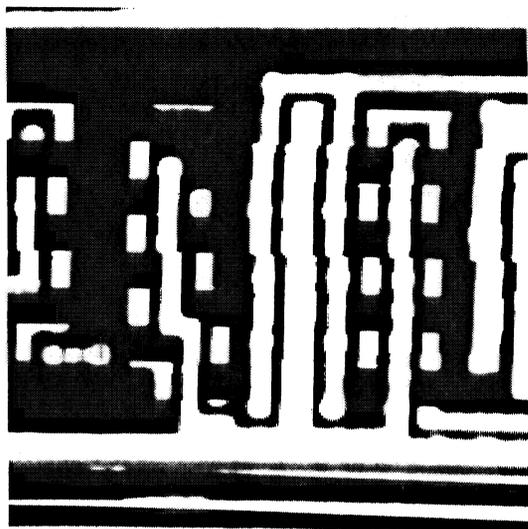
Photo I.2 Contraste de potentiel  
(superposé au contraste topographique)

Photo I.3 "Voltage coding"

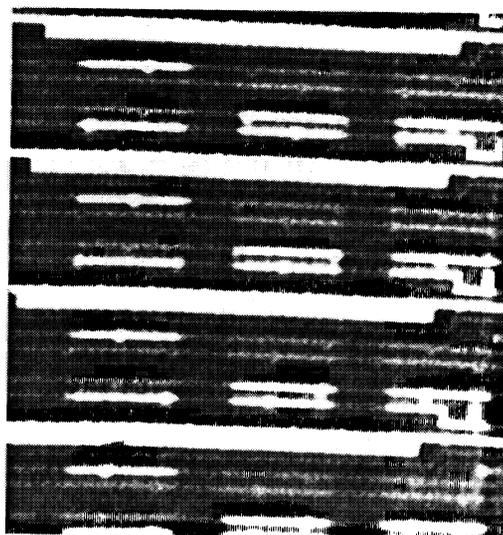
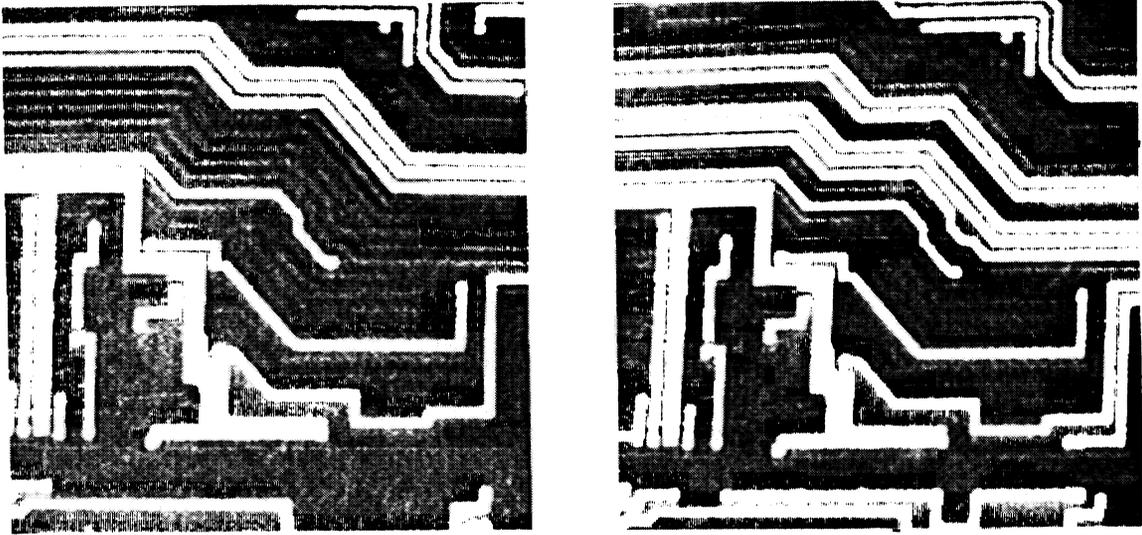


Photo I.4 "Logic state mapping"



**Photo I.5** Images stroboscopiques obtenues à différentes phases d'observation



**CHAPITRE II**  
**APPLICATION A L'ANALYSE DE**  
**DEFAILLANCES**

PREMIERE PARTIE

---

**ANALYSE DE DEFAILLANCES DE CIRCUITS INTEGRES PAR FAISCEAU**  
**D'ELECTRONS**



## **II APPLICATION A L'ANALYSE DE DEFAILLANCES**

### **II.1 Introduction**

L'analyse de défaillances est un examen qui est réalisé en 3 phases :

- une phase de caractérisation fonctionnelle qui détermine au moins un vecteur de test rendant la défaillance observable de façon reproductible.
- une phase de localisation qui détermine le lieu de la défaillance ;
- une phase de caractérisation physique qui recherche d'une part le type de défaut (court-circuit, coupure,...) et d'autre part le procédé physico-chimique responsable de la défaillance (corrosion électromigration,...).

Dans cette analyse, la phase de localisation est l'opération la moins bien maîtrisée par l'analyste. En effet, dans une première approche, la localisation du défaut ne peut être diagnostiquée qu'à partir des résultats du test fonctionnel. Or, l'accroissement de la complexité et de l'intégration des circuits rend de plus en plus difficile l'élaboration et la confirmation de ce diagnostic. De plus, ce moyen d'investigation requiert une connaissance approfondie de la structure interne du circuit, information qui n'est pas toujours à la disposition de l'analyste. C'est notamment le cas des CI testés après commercialisation, lorsque l'analyse est menée par le client pour certifier et suivre l'évolution des produits livrés [COL87].

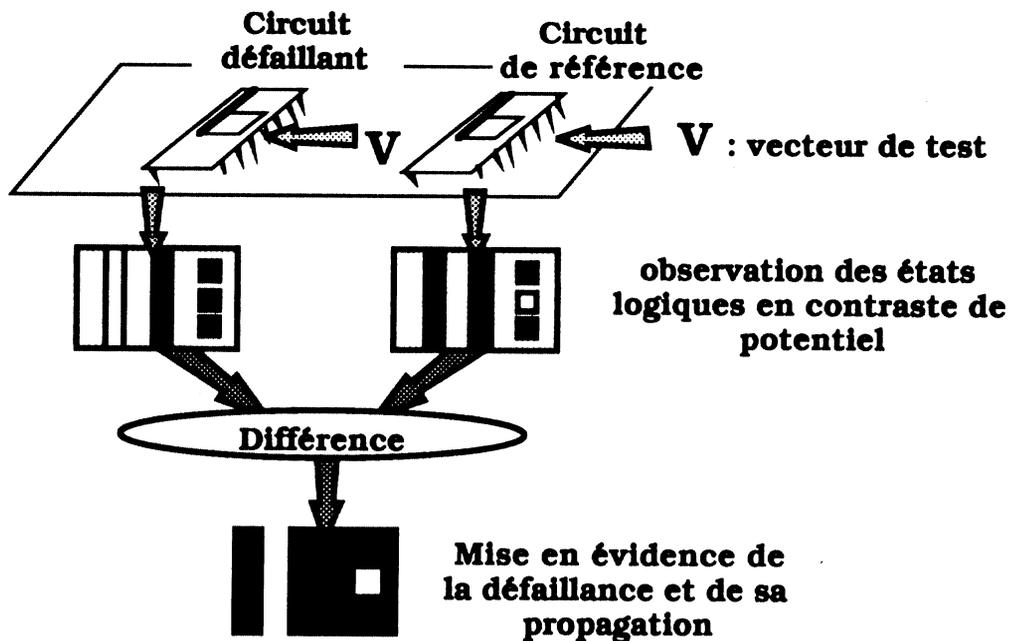
Actuellement, le test par faisceau d'électrons, qui permet l'analyse du comportement interne des circuits, s'avère un excellent moyen pour pallier à ces difficultés de localisation. Pour les circuits dont la structure interne est connue, ce moyen d'observation offre la possibilité de vérifier rapidement le diagnostic de localisation grâce aux outils développés dans le cadre de l'application à la mise au point de prototypes (cf chapitre I.5.1). Par ailleurs, sa capacité à pouvoir observer simultanément un très grand nombre de valeurs logiques permet, par des techniques appropriées, de s'affranchir de la connaissance de la structure détaillée du circuit.

Ce chapitre est consacré à la localisation des défauts par faisceau d'électrons. Dans une première partie, les techniques de localisation adaptées aux circuits à structure inconnue, sont présentées. Dans une deuxième partie, une procédure automatique est proposée pour faciliter la tâche de l'analyste.

## II.2 Techniques de localisation

### II.2.1 Principe de localisation

Pour un circuit à structure inconnue, le principe de localisation repose sur la comparaison du fonctionnement du circuit défaillant à celui d'un circuit réputé bon [BAI82]. La comparaison est rendue possible par le phénomène de contraste de potentiel qui permet d'observer la répartition spatiale des niveaux logiques sous forme d'images (cf chapitre I.4).



**Figure II.1** Localisation de défaillances par comparaison d'images

La localisation consiste alors à comparer les images issues de l'observation des 2 circuits (référence et défaillant), obtenues avec un vecteur de test identique et manifestant la défaillance (vecteur généralement déterminé au

cours de la phase initiale de test fonctionnel). Cette opération de comparaison fournit des différences de contraste qui correspondent au défaut et à sa propagation dans le circuit (cf figure II.1). Le problème est de distinguer la zone contenant le siège du défaut des zones dans lesquelles la défaillance a été propagée. Pour cela, plusieurs techniques ont été définies. Elles diffèrent avec le type de circuit analysé :

### II.2.1.1 Etude des circuits combinatoires

Pour les circuits combinatoires, l'investigation du fonctionnement est réalisée en contraste de potentiel statique. L'étape de comparaison fournit donc une cartographie des différences par vecteurs de test. Ce résultat est bien évidemment insuffisant pour localiser le lieu de la défaillance.

Sous réserve de posséder plusieurs vecteurs de test manifestant le défaut, il est possible d'affiner la localisation par intersections successives des cartographies de différences obtenues pour chacun de ces vecteurs (cf figure I.2) [BAI82]. La convergence vers le défaut suppose bien évidemment que le siège de la défaillance est situé dans les zones pour lesquelles une différence de contraste est apparue.

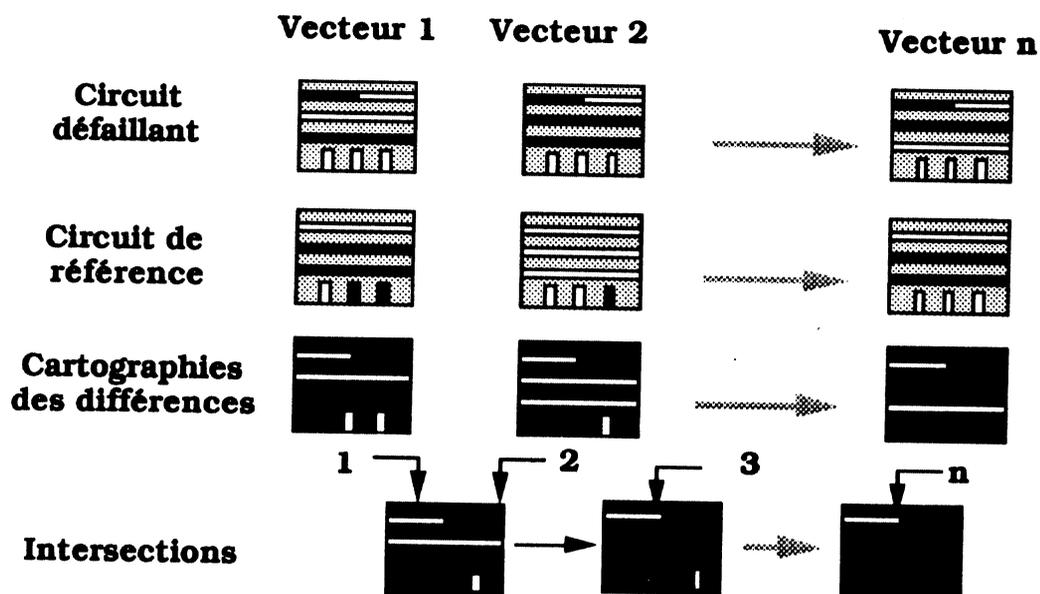


Figure II.2 Technique de localisation pour circuits combinatoires

### II.2.1.2 Etude des circuits séquentiels

Le cas des circuits séquentiels diffère du précédent par le fait que le défaut doit être localisé dans le temps. En effet, le séquençage de ces circuits peut induire une mémorisation des erreurs et par la suite entraîner d'autres erreurs alors que le défaut n'est pas (n'est plus) sensibilisé.

Pour s'affranchir de ce problème, [MAY84] propose de comparer des images dans le temps et de ne retenir que celles correspondant à l'instant d'apparition de la première différence. La technique consiste à saisir dans le temps une série d'images stroboscopiques qui couvrent le vecteur ou la séquence de test qui manifeste le défaut. L'étape de comparaison donne un ensemble d'images qui fournit une information sur la propagation de la défaillance dans l'espace et le temps (cf figure I.3). Le lieu du défaut est alors donné par l'image qui manifeste la première différence de contraste.

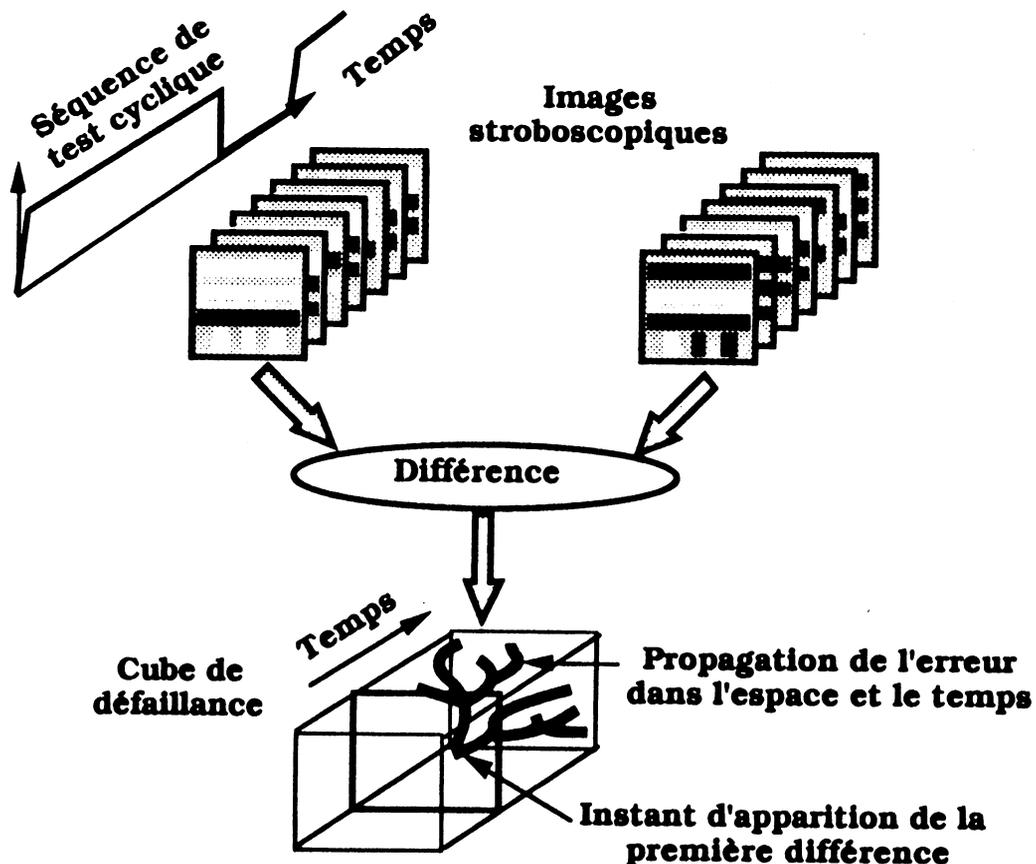


Figure II.3 Technique de localisation pour circuits séquentiels

### **II.2.2 Cadre d'application**

L'application de ces techniques suppose que toutes les connexions du circuit sont observables. Malheureusement, le contraste de potentiel est un phénomène de surface qui limite l'observation aux connexions supérieures et ne permet donc pas de localiser précisément les défauts situés dans les couches enterrées.

Malgré cette limitation, la technique de comparaison apporte toutefois à l'analyste une aide importante pour localiser de telles défaillances, car elle permet de réduire considérablement le champ d'investigation à partir des informations recueillies en surface.

Ces techniques supposent par ailleurs que le défaut est unique. Le cas de pannes multiples peut être traité si les défaillances sont fonctionnellement indépendantes [**BER85**]. Dans ces conditions, il est possible de se ramener dans des hypothèses de panne simple en déterminant des vecteurs distincts qui permettent de sensibiliser une seule défaillance à la fois.

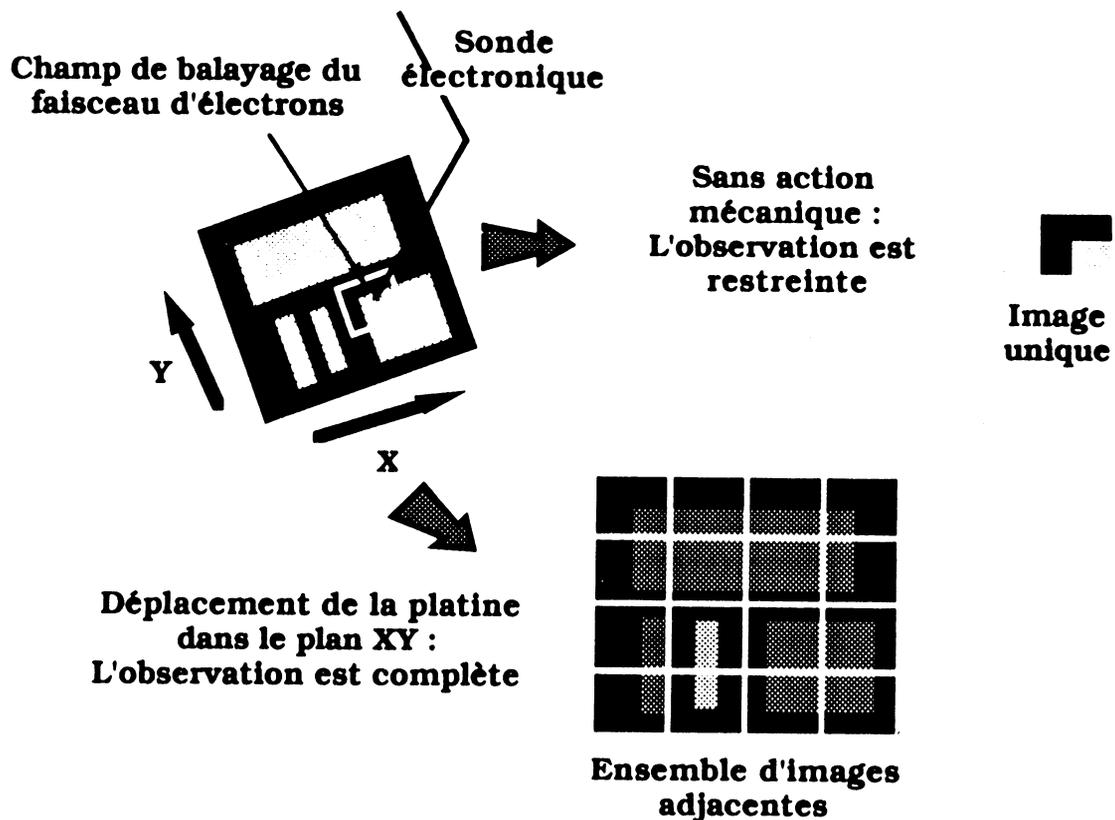
Enfin, les circuits défaillants doivent présenter un minimum de fonctionnalité pour être observables en contraste de potentiel statique ou dynamique. Les pannes entraînant la "mort du circuit" (panne d'alimentation, panne d'horloge, panne affectant les plots du circuit, ...), sont en général suffisamment grossières pour être investies par des techniques classiques (inspection visuelle, rayons X,...).

### **II.2.3 Motivation pour un outil automatique**

La mise en œuvre de ces techniques nécessite le développement d'outils automatiques pour faire face au volume énorme d'informations à traiter ([**BER86**], [**SAV87**]). En effet, l'absence de connaissances sur la structure interne du circuit constitue une contrainte qui conduit à observer l'ensemble des connexions accessibles en surface. Une telle investigation ne peut être réalisée manuellement pour les circuits actuels qui présentent plusieurs millions de connexions.

Actuellement, les stations de test commerciales offrent un niveau d'automatisation assez pauvre pour ces techniques de comparaison. Seul le testeur Sentry IDS4000 [PEL89] propose une procédure automatique pour la comparaison d'images stroboscopiques. Toutefois, cet outil est inadapté à l'étude des circuits à structure inconnue car il offre un champ d'investigation limité à une seule image ce qui ne permet pas de couvrir facilement la totalité du circuit.

Par conséquent, il convient de développer de nouveaux systèmes offrant un champ d'investigation plus important. Pour cela, il faut réaliser une procédure opérant un déplacement de platine après chaque acquisition, afin de saisir un ensemble d'images adjacentes permettant ainsi d'observer et d'analyser la totalité de la surface (cf. figure II.4).



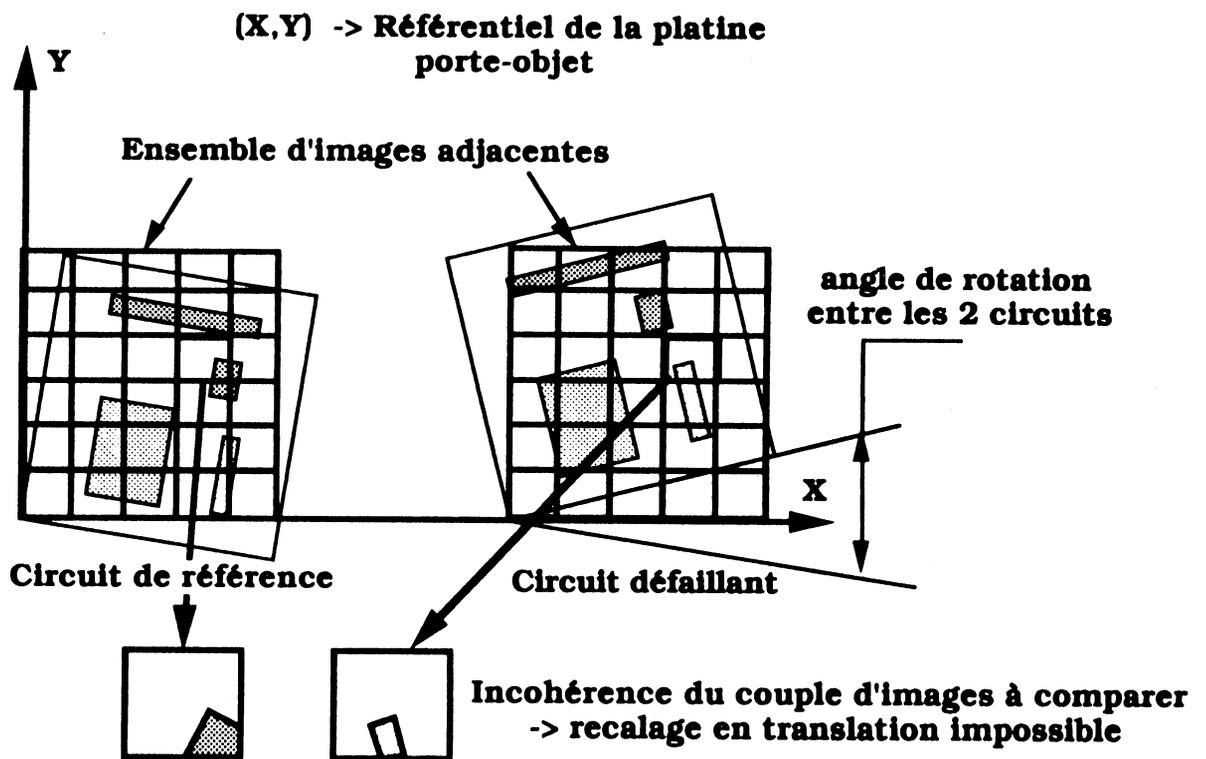
**Figure II.4** Acquisition d'un ensemble d'images adjacentes

Le développement de tels systèmes ne poserait pas de réels problèmes si l'extraction des différences de contraste ne nécessitait pas une exacte mise en correspondance des images issues des 2 circuits à comparer.

Dans la pratique, à l'échelle micronique des circuits intégrés, l'alignement des images est perturbé par 2 problèmes principaux :

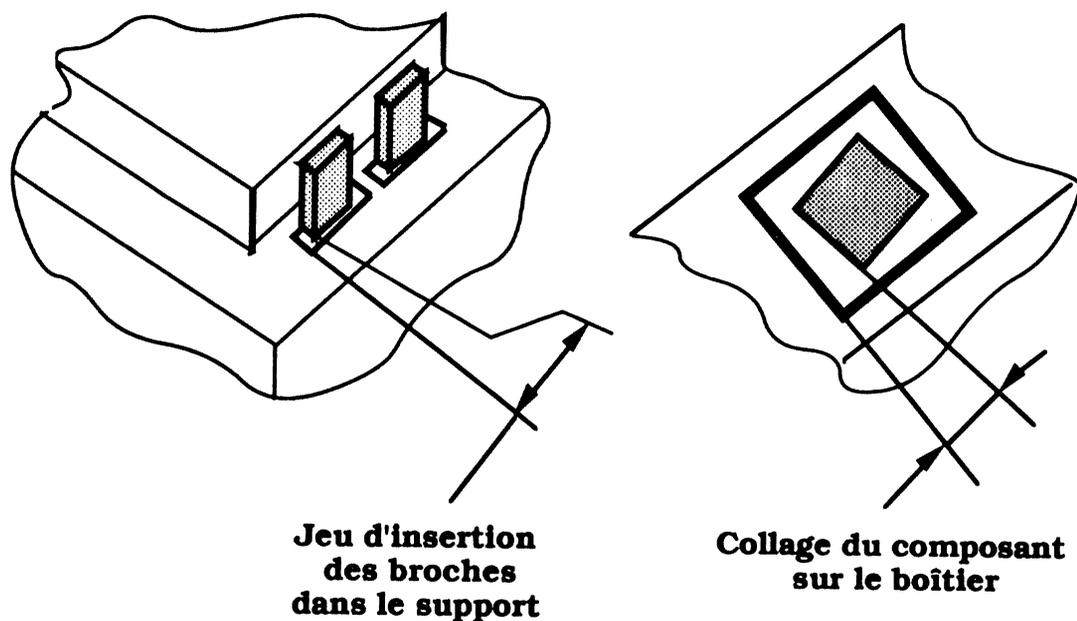
**- les différences d'orientation entre les circuits à comparer.**

Ces différences engendrent, au cours de l'acquisition d'un ensemble d'images adjacentes, des erreurs de positionnement de platine qui ne peuvent être négligées lors de la saisie des couples images. En effet, ces erreurs peuvent conduire à comparer des images ne se correspondant pas (cf. figure II.5).



**Figure II.5** Erreurs de positionnement induites par la rotation des circuits

Ce problème ne peut être résolu par un positionnement parallèle des supports sur la platine porte-objet. En effet, le jeu des circuits dans les supports et le collage du composant dans le boîtier (cf. figure II.6) sont des sources d'erreur dont il est quasiment impossible de s'affranchir par un simple positionnement manuel.



**Figure II.6** Problèmes d'alignement des circuits

**- l'imprécision de positionnement du porte-objet.**

Des erreurs d'alignement peuvent survenir si le mouvement-objet (platine porte-objet) ne présente pas une précision de déplacement suffisante. Actuellement, les testeurs à faisceau d'électrons sont équipés de mouvement-objet motorisé dont la précision, de l'ordre du micromètre, est insuffisante pour l'observation des circuits intégrés VLSI. Cette imprécision donne après comparaison, une information inexploitable par l'analyste. Les photos II.1, II.2, II.3 et II.4 illustrent ce problème et montrent qu'un simple écart de quelques micromètres rend impossible l'interprétation des images de différence.

La correction automatique des problèmes d'alignement est donc l'opération majeure qui conditionne le développement d'un système d'extraction automatique des différences de contraste.

Les recherches menées dans ce domaine ont permis de mettre au point des algorithmes pour corriger automatiquement les écarts en translation [SAV90]. Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont poursuivi ces recherches pour développer une procédure globale de comparaison qui s'affranchit des erreurs d'alignement sur un ensemble d'images adjacentes.

## **II.3 Définition d'une procédure globale de comparaison**

### **II.3.1 Organisation générale de la procédure globale de comparaison**

La procédure globale de comparaison consiste à extraire automatiquement les différences de contraste sur des zones d'observation constituées par un ensemble d'images adjacentes.

La structure générale de cette procédure est présentée en figure II.7. elle se décompose en 3 étapes [CON89b] :

#### **A - L'initialisation :**

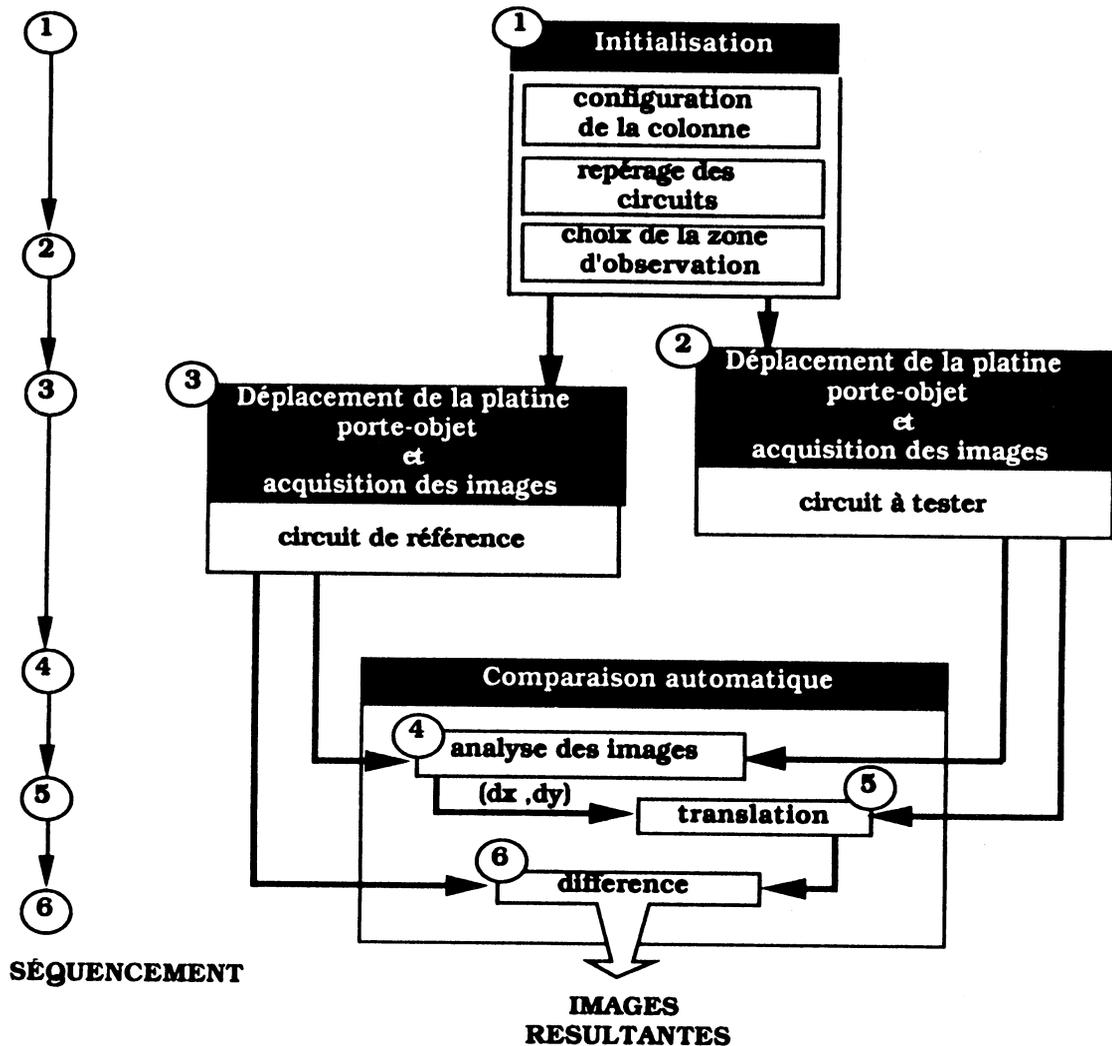
Cette étape manuelle permet de collecter l'ensemble des informations utiles à l'automatisation de la procédure. Dans un premier temps, les paramètres nécessaires à l'obtention des images en contraste de potentiel sont recueillis. Puis la position des circuits sur la platine porte-objet est relevée pour assurer un positionnement correct de la platine au cours de l'étape d'acquisition. Enfin, la zone d'observation est définie par 2 points opposés sur le circuit de référence. Cette dernière opération permet de partager automatiquement la zone d'observation en un ensemble d'images contiguës.

#### **B - Le déplacement de la platine porte-objet et l'acquisition de l'image :**

Cette étape est réalisée pour chacun des 2 deux circuits à comparer. L'alignement en rotation des images à comparer est effectué au cours du déplacement de la platine par une transformation angulaire de la position théorique des images définies par l'étape d'initialisation. Ce moyen de correction, plus amplement détaillé dans le paragraphe II.3.2 permet une correction automatique du problème de rotation et assure un positionnement "grossier" limité seulement par la précision de la platine.

#### **C - La comparaison automatique :**

Cette dernière étape réalise automatiquement l'opération de différence sur l'ensemble des images constituant les zones d'observation du circuit défaillant et du circuit de référence. Pour cela, on effectue des recalages d'images en translation afin de mettre les couples d'images à comparer en parfaite correspondance. Cette opération, basée sur l'extraction des traits caractéristiques de l'image, est présentée au paragraphe II.3.3.



**Figure II.7** Organisation de la procédure automatique de comparaison d'images

### II.3.2 Correction des différences d'orientation

L'élimination des différences d'orientation entre les circuits à comparer est la première étape de correction pour automatiser la procédure de comparaison. Ces défauts d'alignement doivent être éliminés avant l'étape d'acquisition par zone, pour que ne subsistent que les problèmes liés aux écarts en translation.

Les techniques de correction en rotation sont basées sur l'alignement d'un motif horizontal ou vertical de l'image dans le référentiel de visualisation (écran de la station de travail). Cette correction a pour double rôle

d'éliminer les problèmes de rotation et d'assurer un positionnement "grossier" de la platine en vue du recalage en translation. Les techniques de correction dépendent du type de mécanisation de la platine porte-objet. Elles nécessitent dans tous les cas 2 niveaux de correction qui sont :

- un positionnement du centre de l'image ;
- un alignement de l'image dans le référentiel de visualisation.

Ces différentes étapes de correction sont décrites dans la suite de ce paragraphe.

### II.3.2.1 Positionnement du centre de l'image

Le positionnement exact du centre de chaque image est réalisé en alignant le référentiel de déplacement de la platine porte-objet sur les directions principales (horizontales et verticales) des motifs de chaque circuit. Cette opération consiste à effectuer un changement de référentiel entre les axes de déplacement du mouvement-objet et l'orientation des motifs des circuits (cf. figure II.8).

Le changement de référentiel peut être réalisé soit par rotation mécanique, si la mécanisation de la platine le permet, soit par une transformation des coordonnées de déplacement de la platine porte-objet.

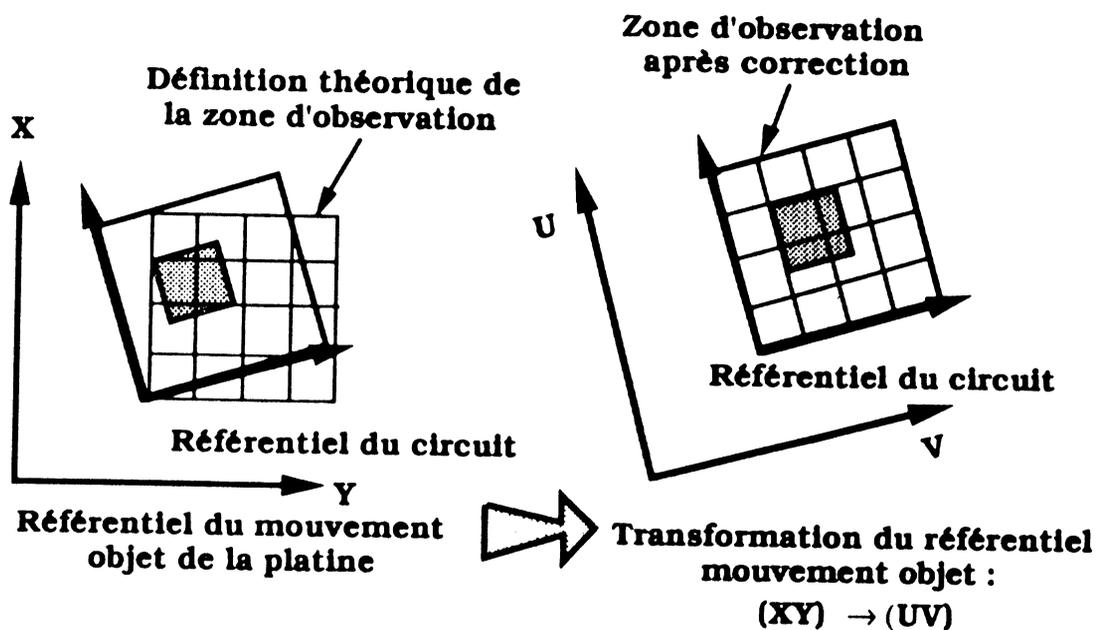


Figure II.8 Principe de positionnement du centre de chaque image

### A - Rotation mécanique

Ce moyen de correction nécessite une platine équipée d'un plateau tournant qui permet d'orienter le référentiel du circuit dans la même direction que les axes du mouvement objet.

La figure II.9 présente une platine équipée d'une mécanique de rotation : elle se compose d'un mouvement objet X,Y qui assure un déplacement absolu de la platine, et d'un plateau tournant qui permet d'aligner les circuits, représentés par les axes U,V, parallèlement aux axes X,Y, de la platine.

La rotation mécanique est efficace pour des platines qui offrent une précision angulaire inférieure à  $10^{-4}$  radian. Cette précision assure une erreur de positionnement inférieure à  $1 \mu\text{m}$  pour un circuit classique de 1 cm de côté.

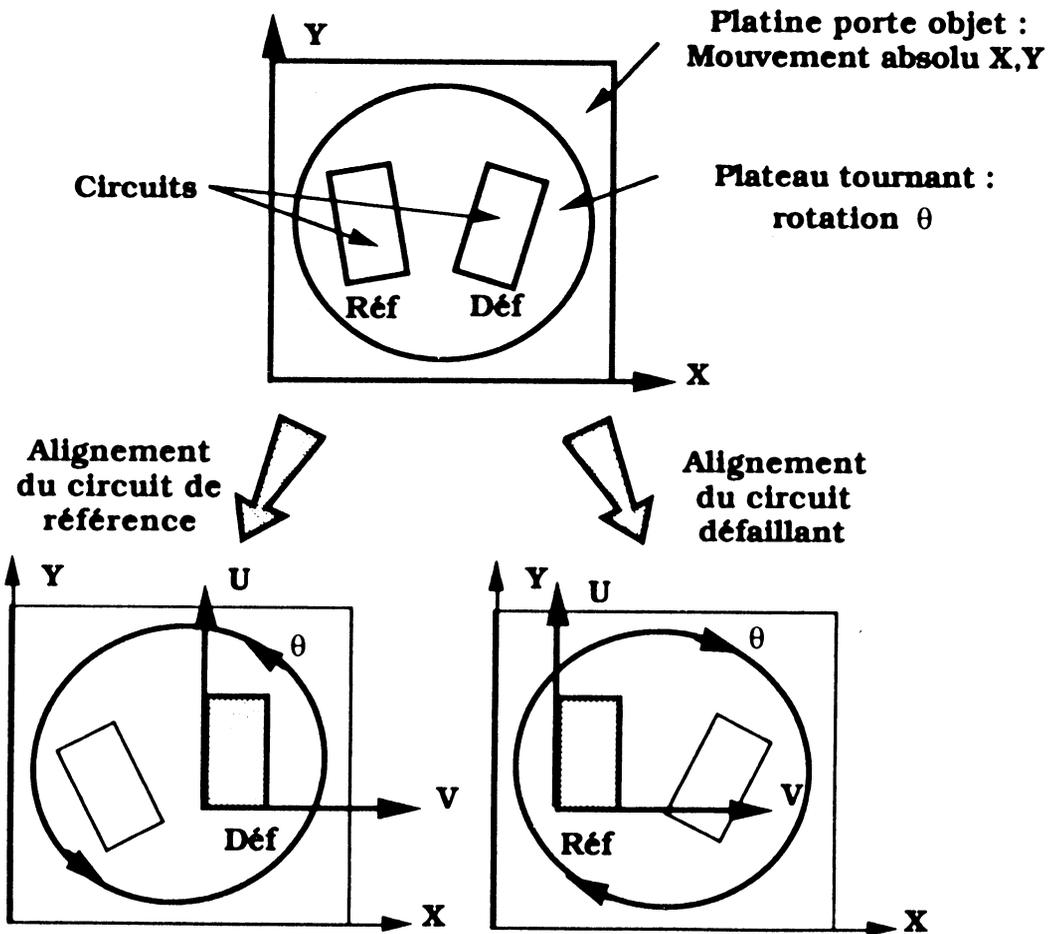
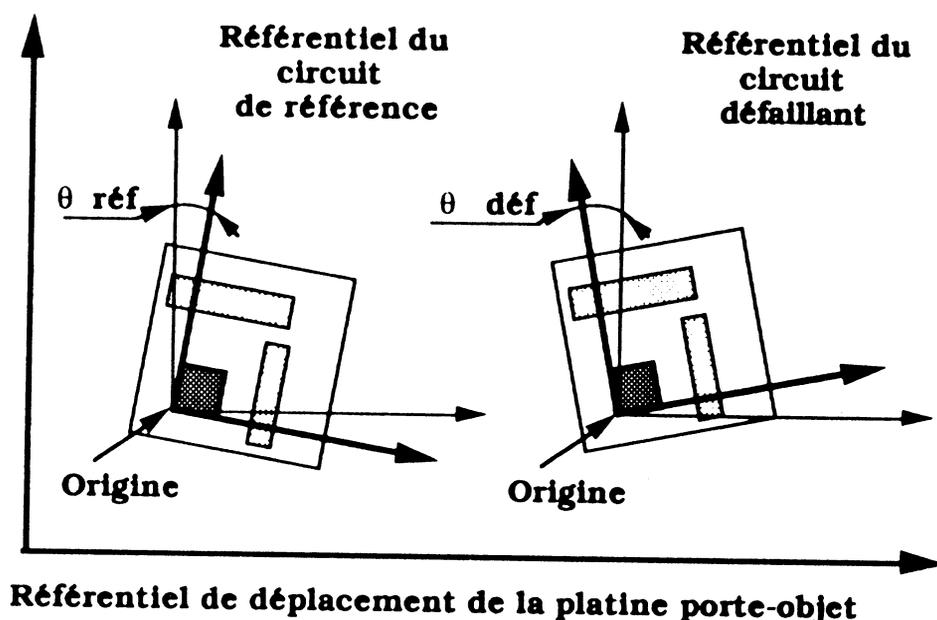


Figure II.9 Rotation mécanique

## B - Transformation des coordonnées

La transformation de coordonnées est une technique qui ne nécessite aucune rotation mécanique. Cette solution a donc été retenue pour notre procédure de comparaison, qui a été développée avec une platine munie uniquement de 3 degrés de liberté X, Y et Z.

Son principe réside en un changement de référentiel qui permet de corriger les coordonnées théoriques de déplacement de la platine porte-objet [CON88c].



**Figure II.10** Définition du référentiel associé au circuit

Cette opération nécessite de définir pour chaque circuit un référentiel avec les paramètres suivants (cf. figure II.10) :

- une origine identique pour les 2 circuits ;
- un angle de rotation  $\theta$  mesurant l'orientation du circuit par rapport au référentiel de la platine.

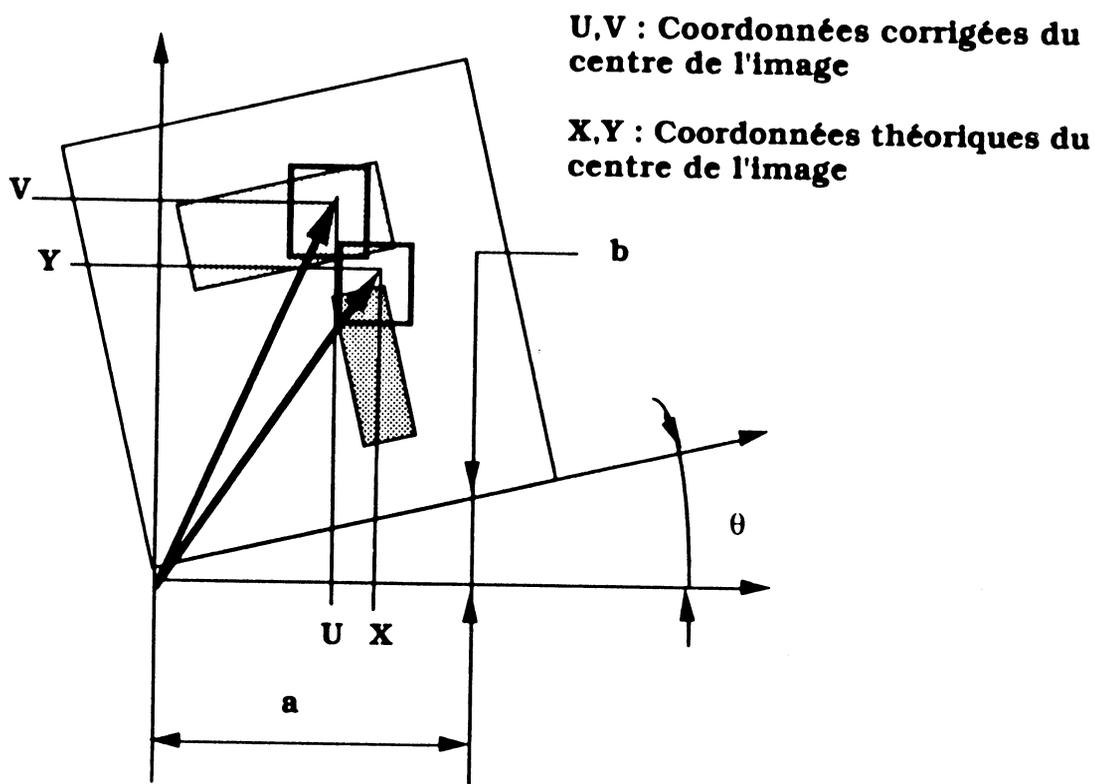
Ainsi, on associe à chaque circuit la matrice de rotation :

$$\mathbf{R}_\theta = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

qui permet d'appliquer la transformation :

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = R_{\theta} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$$

aux coordonnées théoriques de déplacement de la platine (cf. figure II.11).



**Figure II.11** Définition des coordonnées de déplacement (théoriques et corrigées)

La précision de cette technique de correction est dépendante de la précision du mouvement objet et du soin accordé aux manipulations pour relever les angles de rotation. Les calculs d'erreur présentés en annexe 1 donnent une estimation de la précision de cette transformation. Leur expression est la suivante :

$$\Delta U = \left( \frac{X b}{a^2} + \frac{Y}{a} \right) d(a) \quad \Delta V = \left( \frac{Y b}{a^2} + \frac{X}{a} \right) d(a)$$

avec (cf. figure II.11) :

- (a,b)** -> coordonnées utilisées pour calculer l'angle de rotation  $\theta$   
 $\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$  -> coordonnées théoriques du centre de l'image  
 $\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix}$  -> coordonnées corrigées du centre de l'image  
**d(a)** -> précision du mouvement de la platine  
 $\Delta U, \Delta V$  -> précision des coordonnées corrigées

D'après ces calculs, il est aisé de constater que la précision de cette correction pourra être limitée à la précision de la platine si l'on choisit une valeur de **a** (valeur utilisée pour le calcul de l'angle de rotation) toujours supérieure aux positions théoriques X,Y.

En pratique, cette condition sera respectée en utilisant la garde qui entoure le circuit pour calculer l'angle de rotation (cf. chapitre V, § V.2.3).

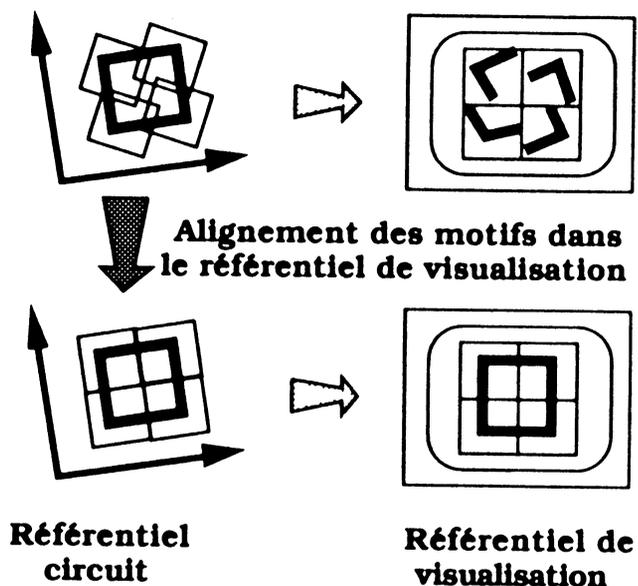
### **II.3.2.2 Alignement des images dans le référentiel de visualisation**

L'alignement des images est la seconde étape de correction pour assurer une orientation identique des images à comparer.

L'orientation du référentiel de visualisation a été choisie pour résoudre ce problème, car elle offre d'une part une orientation fixe pour chacun des 2 circuits, et assure d'autre part la continuité des motifs lors de l'acquisition des images par zone (cf. figure II.12).

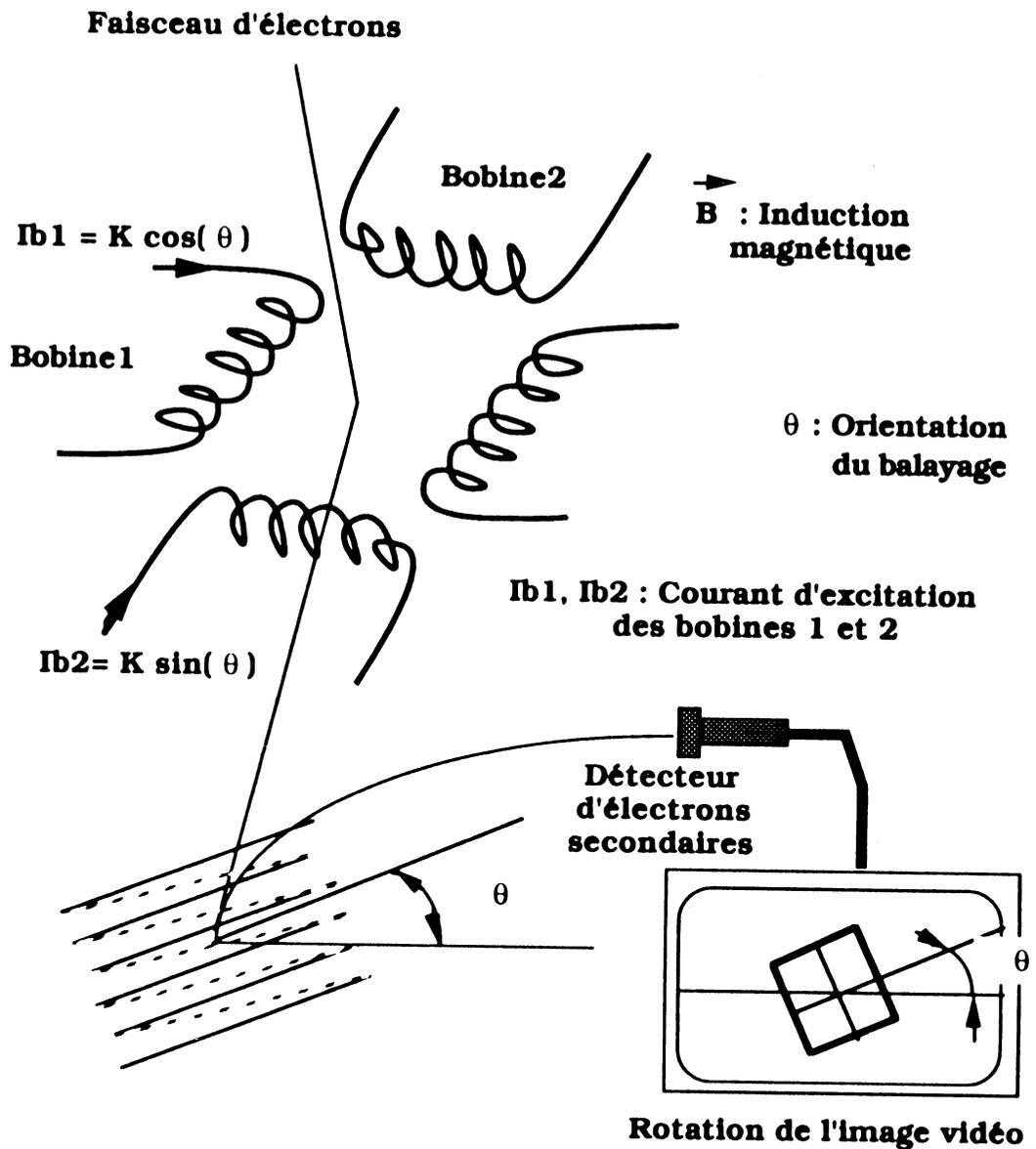
Pour réaliser cette correction, on dispose de 2 techniques qui permettent d'effectuer une rotation de l'image par rapport à son centre :

- la rotation électronique du faisceau, qui oriente par induction magnétique le balayage du faisceau (cf. figure II.13) ;
- la rotation numérique, qui opère une rotation de l'image par déplacement des pixels.



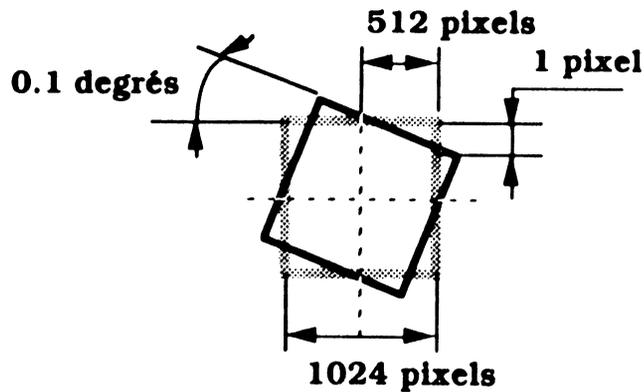
**Figure II.12** Continuité des images dans le référentiel de visualisation

Pour notre procédure automatique, nous préférons utiliser la première technique, qui offre le moyen de correction le plus rapide. En effet, la rotation électronique ne sera appliquée qu'une seule fois avant l'étape d'acquisition par zone, alors que la rotation numérique devra être employée pour chacune des images de la zone d'observation. De plus, la rotation numérique peut devenir très coûteuse en temps de calcul si le système de traitement d'images n'est pas dédié à ce type d'opérateur.



**Figure II.13** Rotation du balayage par induction magnétique

La seule contrainte imposée à la technique de correction par rotation électronique est la précision du système de rotation. Celle-ci doit être inférieure à 0,1 degré pour assurer des erreurs de continuité de moins de 1 pixel, avec des images de dimension 1024 x 1024 pixels (cf. figure II.14).



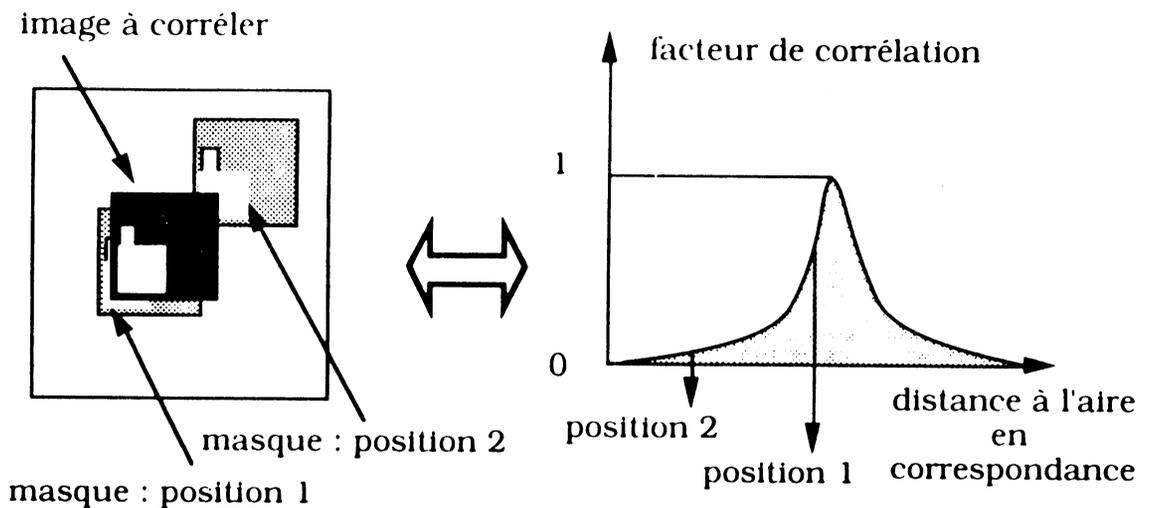
**Figure II.14** Limite de la précision de la rotation électronique

En pratique, cette correction consistera à aligner les pistes rectilignes sur les bords de l'écran de visualisation. Cette opération, réalisée au cours de l'étape d'initialisation, permettra de mesurer l'angle de rotation électronique pour chacun des deux circuits et sera appliquée au début de l'acquisition de la zone d'observation (cf. chapitre V, § V.2.3).

### II.3.3 Correction des écarts en translation

La correction des écarts en translation reste l'ultime étape pour l'exacte mise en correspondance des images à comparer. Elle consiste à déterminer automatiquement les écarts en translation afin de les compenser par une opération de recalage (cf figure II.7- séquence 4, 5 et 6).

A ce stade de la procédure, seule des techniques basées sur les traitements d'images peuvent permettre une automatisation complète. Les traitements d'images offrent plusieurs approches pour résoudre ce problème. La première est une méthode de corrélation par superposition directe d'images. Cette méthode directe est dite déterministe ; elle consiste à comparer un masque représentant un modèle d'objet à toute la surface de l'image. Cette technique calcule pour chaque position du masque un facteur de corrélation ; l'exacte mise en correspondance est déterminée au maximum d'une courbe dressée à partir des facteurs de corrélation (cf. figure II.15).

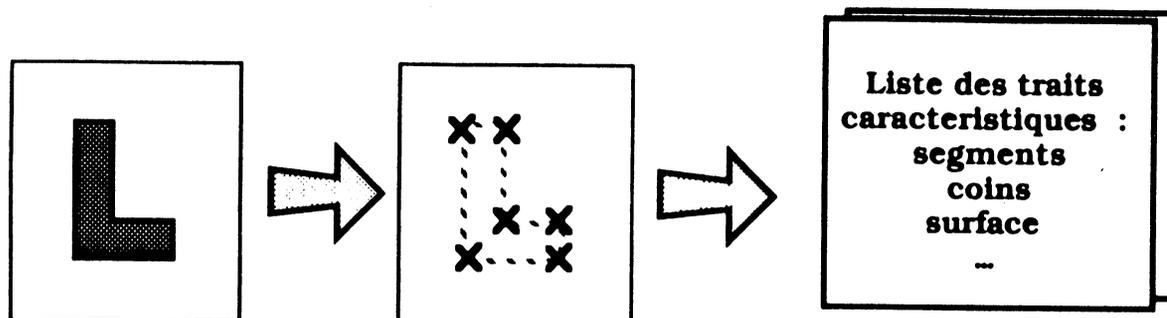


**Figure II.15** Corrélation par superposition directe de masque

L'efficacité de cette approche dépend de la connaissance *a priori* des objets de l'image. Dans [GUI87], une méthode de ce type est utilisée, en mise au point de prototypes, pour mettre en correspondance les images obtenues en contraste de potentiel et le dessin des masques. Dans ce cas, la corrélation est facilitée par le fait que les motifs de comparaison sont connus grâce à la description des masques.

L'analyse de défaillances basée sur la comparaison de circuits (référence et défaillant) est bien moins adaptée à cette méthode car elle compare des images dont le contenu est inconnu de l'utilisateur. Ce manque d'information a pour conséquence de rendre très difficile la détermination automatique d'un masque de corrélation cohérent. La seule solution pour s'affranchir de ce problème, consiste à prendre l'image entière comme masque de corrélation, mais dans ce cas, le temps de comparaison devient vite prohibitif.

Pour notre procédure, cette méthode de corrélation directe a été rejetée au profit de méthodes plus évoluées qui permettent d'identifier les objets de l'image. Ces méthodes sont basées sur l'analyse des traits caractéristiques de l'image : elle consiste à transformer l'image en une liste de paramètres géométriques qui facilite la reconnaissance des objets et la compréhension de la scène (cf. figure II.16).



**Figure II.16** Analyse des traits caractéristiques de l'image.

L'utilisation de ces méthodes pour notre application consiste à rechercher et à localiser des objets caractéristiques communs aux 2 images à comparer : les images sont transformées en liste de coordonnées qui correspondent à la position des objets de la scène ; les écarts en translation sont calculés à partir de ces positions.

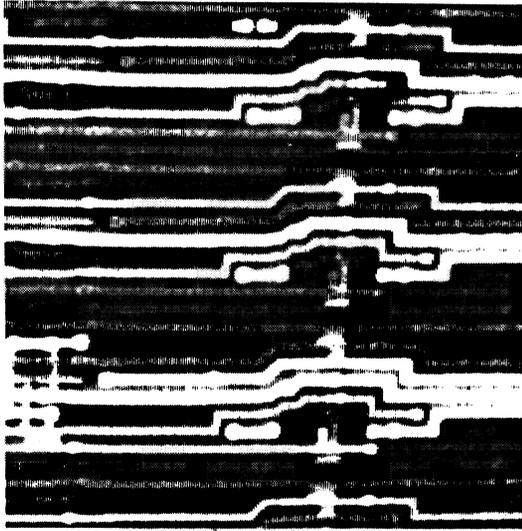
Le choix des traits caractéristiques dépend du type de données étudiées. Dans notre cas, l'observation des circuits intégrés en contraste de potentiel donne principalement des objets rectangulaires qui représentent les connexions à la surface du circuit. Ces formes ont orienté notre choix vers l'utilisation des **techniques de détection des coins** qui s'avèrent très efficaces pour la localisation des formes polygonales.

L'implémentation de ces techniques a fait l'objet d'une étude plus détaillée. Elle est présentée dans la deuxième partie de cette thèse.

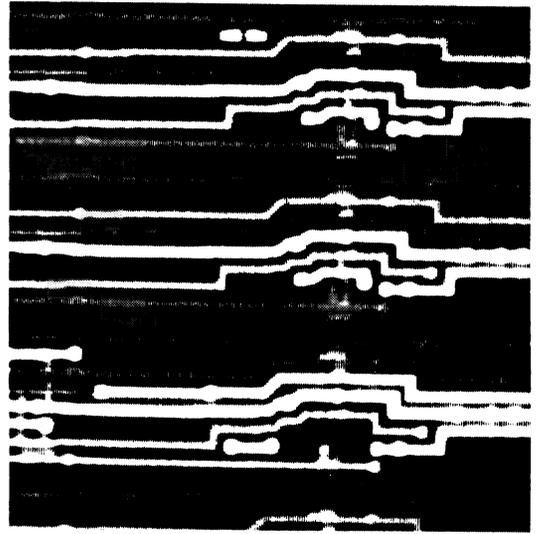
#### **II.4 Conclusion**

Les techniques de comparaisons d'images exposées dans ce chapitre montrent que le test par faisceau d'électrons peut pallier aux difficultés, de localisation de défauts, rencontrées en analyse de défaillances de circuits à structures inconnues. Par ailleurs, nous avons vu que le degré d'automatisation des stations de test actuelles rendaient peu effectives la mise en œuvre de ces techniques.

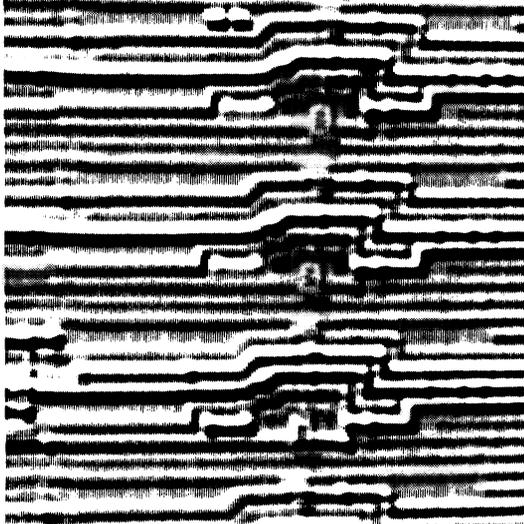
Devant ce besoin, nous avons défini une procédure globale de comparaison pour automatiser la tâche fastidieuse d'extraction des différences de contraste. Cette procédure est à la base de la réalisation d'un logiciel, présenté dans la suite de cette thèse.



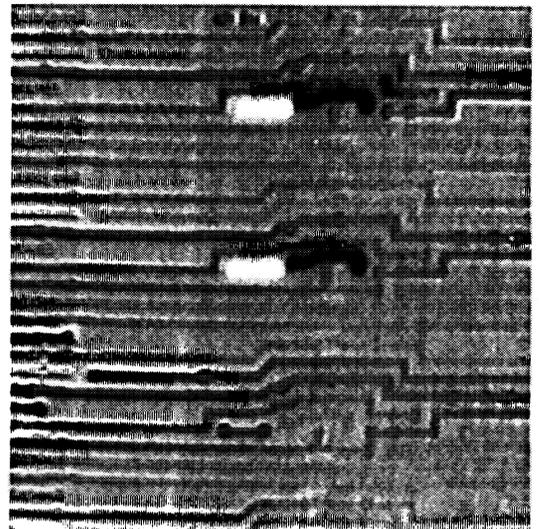
**Photo II.1** Image du circuit de référence



**Photo II.2** Image du circuit défailant



**Photo II.3** Différence sans correction spatiale



**Photo II.4** Différence avec correction spatiale



**DEUXIEME PARTIE -  
COMPARAISON  
AUTOMATIQUE D'IMAGES**



**CHAPITRE III**  
**TECHNIQUES DE DETECTION DES COINS**

DEUXIEME PARTIE

---

**COMPARAISON AUTOMATIQUE D'IMAGES**



### III TECHNIQUES DE DETECTION DES COINS

#### III.1 Classification des techniques

Les techniques de détection des coins sont employées en imagerie pour la localisation automatique d'objets polygonaux. Diverses applications ont été développées à partir de ces techniques. A titre d'exemple, on peut citer les travaux de [HUE88] sur l'analyse des images aériennes, ou encore les méthodes d'analyse dynamique de scènes présentées par [NAG82] et [MUB84] pour calculer le mouvement d'objets issus d'une série d'images prises dans le temps.

Ces techniques se divisent en 2 groupes selon la nature des données analysées (cf. figure III.1).

Le premier groupe recherche les coins sur des images binaires (images codée sur 2 niveaux de gris) dont les objets se présentent sous la forme de contours fermés d'épaisseur 1 pixel. Elles nécessitent une opération préalable de segmentation pour extraire les contours binaires de l'image initiale codée en niveaux de gris. Elles sont notées par la suite "**techniques de détection binaires**".

Le deuxième groupe recherche les coins directement sur les images en niveaux de gris. Elles sont nommées par la suite "**techniques de détection en niveaux de gris**".

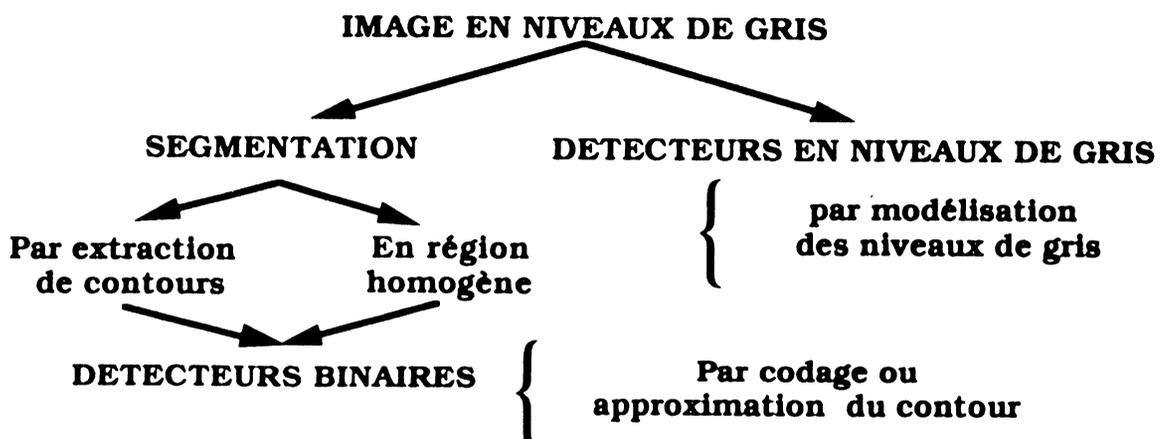


Figure III.1 Techniques de détection des coins

### **III.2 Techniques de détections binaires**

Ces techniques sont actuellement les plus employées en reconnaissance des formes. Elles consistent à rechercher, sur l'image de contours binaires, les segments de droite qui présentent une cassure importante. Elles utilisent soit un codage de contour basé sur la connectivité des pixels soit une approximation des contours par segments de droite ou par polynômes.

Ces techniques offrent une grande efficacité de détection à partir du moment où les contours binaires sont bien préparés. Il est évident alors que l'étape de segmentation conditionne la réussite ou l'échec de la détection.

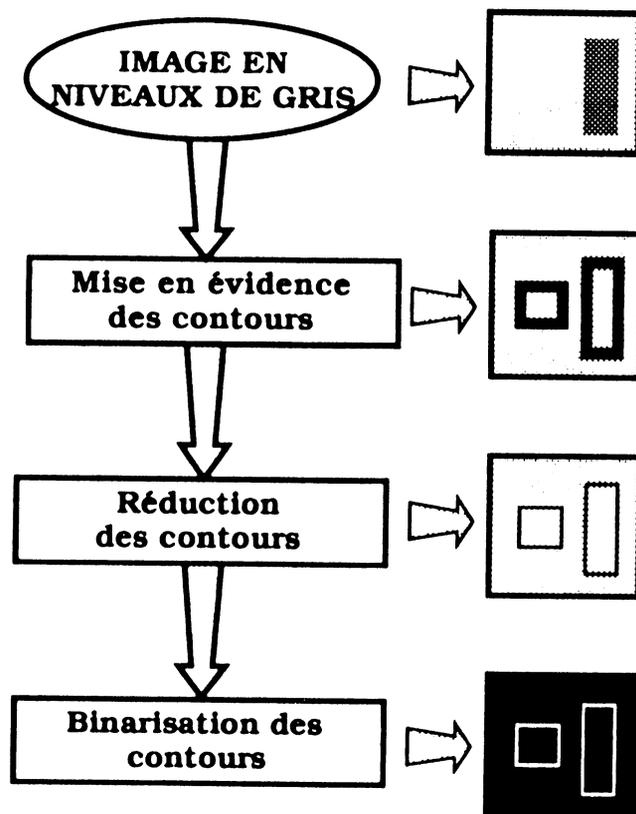
Un premier paragraphe décrira les principales techniques de segmentation. Puis, les techniques de détections binaires seront présentées dans une seconde partie.

#### **III.2.1 La segmentation**

Ce paragraphe constitue l'introduction à la première étape de l'analyse d'une image, qui est la séparation des divers éléments de celle-ci en régions connexes représentées par leurs contours. Ces contours peuvent être obtenus par leurs frontières, c'est dans ce cas **la segmentation par extraction de contours** ou bien peuvent être directement caractérisés par les pixels qui les composent, il s'agit alors de **la segmentation en régions homogènes..**

##### **III.2.1.1 Segmentation par extraction de contours**

Le processus d'extraction de contours consiste à détecter les brusques variations de niveau de gris dans l'image. Le processus complet se décompose en plusieurs étapes distinctes (cf. figure III.2) :



**Figure III.2** Principe de segmentation par extraction de contours

**A - la mise en évidence des contours ;**

Elle s'obtient par une différentiation de l'image. Ceci est réalisé en dérivant l'image 1 ou 2 fois selon l'opérateur utilisé : gradient ou laplacien.

**le gradient** se présente sous la forme suivante :  
pour une fonction  $f(x,y)$  le gradient

$$\vec{\nabla}(f(x,y)) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \end{pmatrix}$$

est un vecteur orienté dans le sens de la variation maximale.

Il est représenté pour les images digitales  $I(x,y)$  par sa norme approximée au 1er ordre

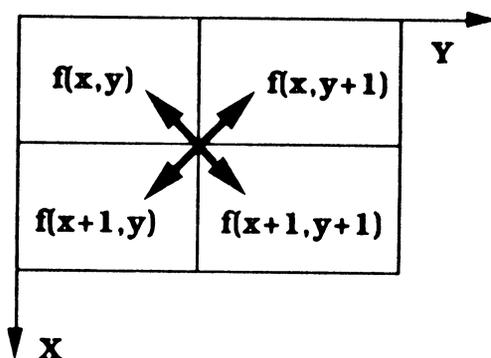
$$|\nabla f(x,y)| \equiv |f(x,y) - f(x+1,y)| + |f(x,y) - f(x,y+1)|$$

qui convient bien pour le calcul par informatique :

et par sa direction, caractérisée par sa tangente

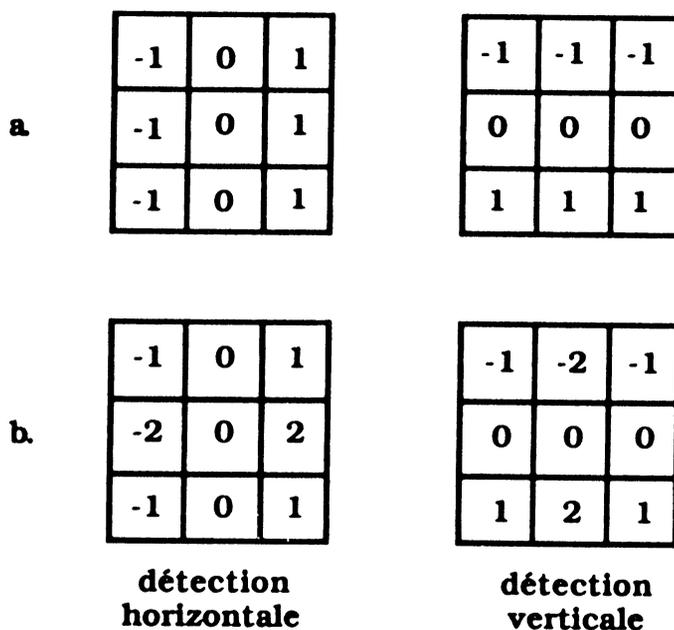
$$D(x,y) \equiv \text{Arctan}((f(x,y) - f(x,y+1)) / (f(x+1,y) - f(x,y)))$$

Le premier opérateur fut développé par Roberts en 1965. Il s'exprime sous la forme d'un masque 2 x 2, faisant appel aux différences croisées (cf. Figure III.3).



**Figure III.3** approximation de ROBERTS

Par la suite, Prewitt et Sobel ont proposé des masques 3 x 3 (cf. figure III.4).



**Figure III.4** Masques de PREWITT (a) et de SOBEL (b)

Par rapport à l'opérateur de Roberts, ils offrent l'avantage d'être peu sensibles au bruit, car ils effectuent une moyenne locale sur le domaine couvert par le masque.

Le calcul du laplacien  $\nabla^2$  de la fonction  $f(x,y)$  revient à calculer la dérivée seconde suivante :

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y^2}$$

De même que précédemment, plusieurs types de masques, basés sur des dérivées secondes ou quatrièmes, peuvent être utilisés (cf. figure III.5).

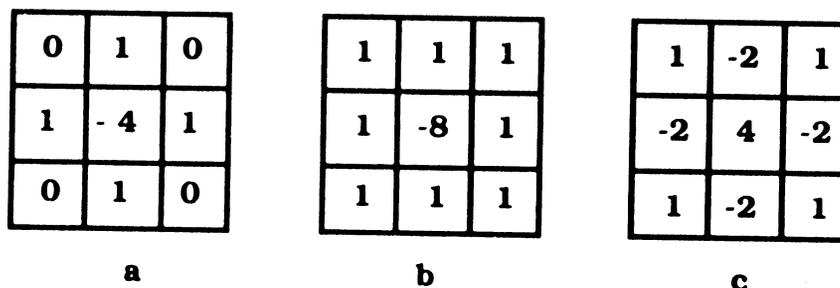


Figure III.5 a) Masque laplacien  $\nabla^2 f(x,y)$ , b)  $3 \cdot \nabla^2 f(x,y)$ , c)  $\frac{\partial^4 f(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2}$

L'extraction des contours est réalisée grâce à la propriété du laplacien qui présente pour une fonction continue un unique passage par zéro (cf. figure III.6). l'application aux images numériques est moins efficace car le laplacien opère sur une fonction discrète. De plus, cet opérateur est très sensible au bruit et nécessite d'être atténué par convolution de l'image à l'aide d'un filtre passe-bas.

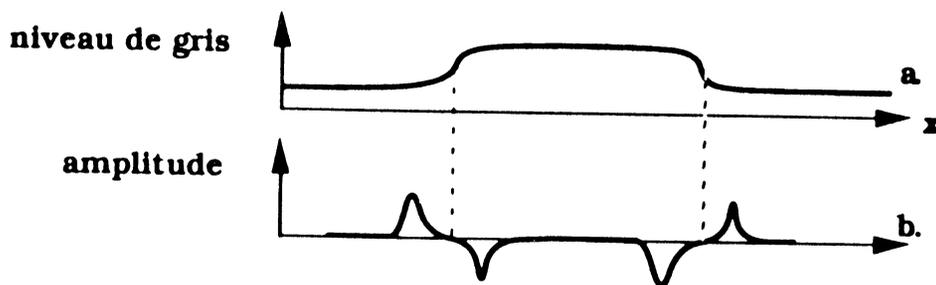


Figure III.6 Dérivation en présence d'un contour. a - contour, b - Laplacien

**B - La réduction des contours ;**

Elle consiste à amincir les lignes de contour à un seul pixel d'épaisseur. [CAN83] a proposé une méthode appelée "méthode de suppression des points non maximum". Son algorithme est le suivant :

- signification des identificateurs utilisés :

$A(x,y)$  -> image des amplitudes de gradients ;

$D(x,y)$  -> carte des directions ;

**Début** : Méthode de suppression des points non maximum

**Pour** chaque point  $A(x,y)$  déterminer les points adjacents dans la direction du gradient  $D(x,y)$

**Si**  $A(x,y)$  est supérieur aux 2 points adjacents

**Alors**  $A(x,y)$  est conservé

**Sinon**  $A(x,y) = 0$

**Fs**

**Fp**

**Fin** :

**C - La binarisation des lignes de contour ;**

Cette étape est à la base de la description du contour. Elle consiste à réduire l'ensemble des niveaux de gris à 2 niveaux, de manière à analyser facilement les traits caractéristiques de l'image. Généralement, on effectue la binarisation afin d'éliminer les fluctuations dues au bruit de l'image ou à la texture des objets\*.

Cette étape de décision est certainement la plus délicate dans le cas où l'on veut automatiser le processus d'extraction de contour. Le problème est accru lorsque des images présentent une information qui est *a priori* inconnue. En effet, les variations de forme et de contraste empêchent d'imposer un seuil fixe. Des techniques basées sur l'analyse de l'histogramme de niveaux de gris donnent une solution à ce problème. Elles

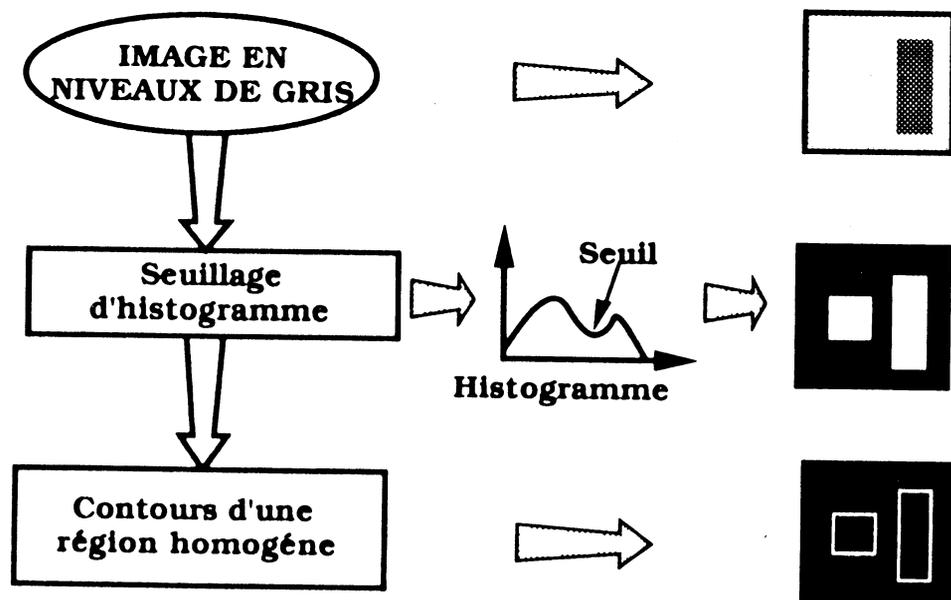
---

\* La texture d'une image caractérise l'organisation spatiale des éléments constituant la surface des objets. Par exemple, un mur de brique, du grillage, du tissu, ... présentent des textures que l'on qualifie de fines ou grossières, de ridées ou granuleuses, ...

permettent un seuillage adaptatif en fonction des classes de niveaux de gris. Ces techniques seront détaillées dans le paragraphe suivant.

### III.2.1.2 Segmentation en régions homogènes

La deuxième approche consiste à s'intéresser à l'homogénéité des régions de l'image. Le critère qui définit l'homogénéité est donc un point déterminant pour les performances de la segmentation. Les principaux critères utilisés sont le niveau de gris, la couleur, la texture et le mouvement. Pour les images microscope, seuls la texture et le niveau de gris peuvent présenter un intérêt. Cependant, les images en contraste de potentiel ne présentent pas de texture suffisamment marquée pour constituer un critère de segmentation efficace. Aussi, nous limiterons notre présentation aux techniques de segmentation basées sur l'analyse de l'histogramme des niveaux de gris.



**Figure III.7** Principe de segmentation en région homogène

La figure III.7 présente le processus de segmentation en régions homogènes. Il se compose des étapes suivantes :

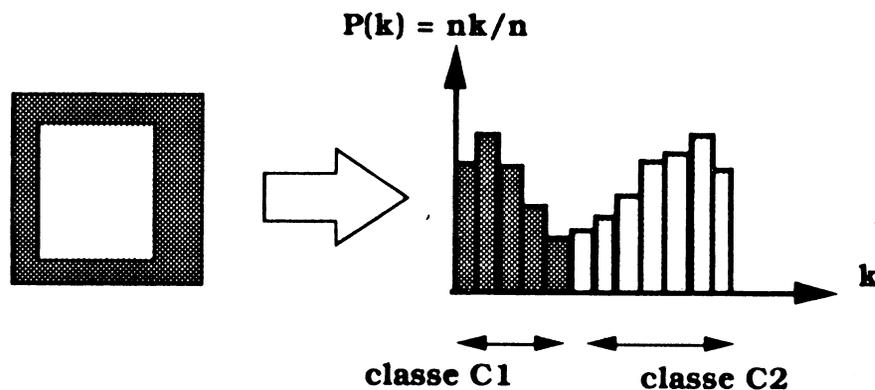
### A - Le seuillage d'histogramme

Le seuillage d'histogramme est une méthode de détection d'objets à partir de l'histogramme des niveaux de gris.

L'histogramme représente la fréquence d'apparition de chaque niveau de gris dans l'image. Ainsi, pour une image de  $n$  pixels prenant des valeurs en niveaux de gris parmi  $k$  valeurs discrètes, la fréquence d'apparition  $P_k$  s'exprime par la formule suivante :

$$P_k = nk/n \quad \text{où } nk \text{ est le nombre de pixels au niveau } k.$$

Une image composée d'objets gris clair sur un fond sombre fait apparaître 2 groupes de niveaux de gris sur l'histogramme (cf. figure III.8).



**Figure III.8** seuillage d'histogramme

L'extraction de l'objet revient à sélectionner une valeur seuil  $S$  qui sépare les 2 groupes dominants en 2 classes C1 et C2. Ainsi, l'objet est défini par la condition suivante :

**Pour** chaque pixel d'intensité  $I(x,y)$

**Si**  $I(x,y) > S$  alors objet

**Sinon** fond

**Fs**

**Fp**

La séparation de l'image en 2 classes distinctes est appelée binarisation. Cependant, cette analyse peut être étendue au multiseuillage dans le cas où

l'histogramme fait apparaître plusieurs classes distinctes. Ce type d'analyse est très utilisé en cytologie pour l'analyse automatique des images [ZUC76] : dans ce contexte, les images sont en général composées de trois régions : le fond, le cytoplasme et le noyau de la cellule.

Dans le cas d'une procédure automatique, le seuillage nécessite une prise de décision pour le choix de la valeur des seuils. Plusieurs techniques ont été développées selon la dépendance du seuil par rapport aux paramètres suivants : position du pixel, valeur du niveau de gris, définition d'un attribut (par exemple, l'intensité médiane centrée sur le voisinage du point considéré).

La relation du seuil avec ces paramètres permet de définir les types de seuillage suivants [WES78] :

- si S ne dépend que du niveau de gris, alors le seuillage est **global** ;
- si S dépend de l'attribut et du niveau de gris, alors le seuillage est **local** ;
- si S dépend de la position, du niveau de gris et de l'attribut, alors le seuillage est **dynamique**.

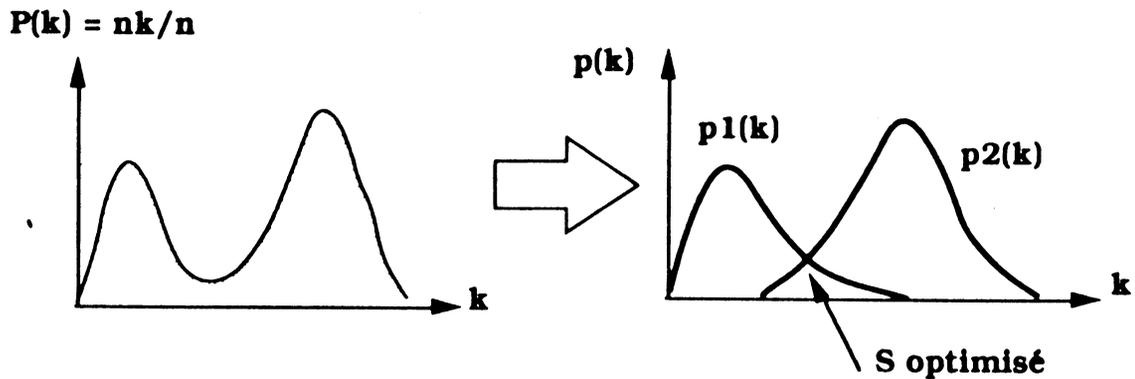
La "théorie de la décision" en reconnaissance des formes a développé, dans le cas du seuillage global, des techniques de recherche de seuil optimisé [POS87]. Ces techniques s'appuient sur une modélisation de l'histogramme sous forme de fonctions de densité de probabilité.

Pour la binarisation, l'histogramme  $H(k)$  est considéré comme la somme de 2 densités de probabilité (figure III.9) :

$$\text{soit } H(k) = P1.p1(k) + P2.p2(k)$$

$p1(k)$  et  $p2(k)$  représentent les densités de probabilité courantes ;  $P1$  et  $P2$  sont les probabilités *a priori*, c'est-à-dire les probabilités d'existence des 2 niveaux de gris. Les probabilités *a priori* ont la propriété suivante :

$$P1 + P2 = 1$$



**Figure III.9** histogramme et densité de probabilité pour une image à 2 classes

A partir de ces définitions, on peut établir des probabilités de classement par erreur pour les classes C1 et C2. Elles s'expriment par les relations suivantes :

$E1(S) = \int p2(k)dk$ , qui représente la probabilité de classement par erreur d'un point clair dans la zone sombre.

$E2(S) = \int p1(k)dk$ , qui représente la probabilité de classement par erreur d'un point sombre dans la zone claire.

La probabilité totale d'erreur s'exprime alors par :

$$E(S) = P2 E1(S) + P1 E2(S)$$

La recherche de la valeur du seuil optimisé correspond à l'erreur minimale. Elle s'obtient en annulant la dérivée de E par rapport à S. On établit alors la relation suivante :

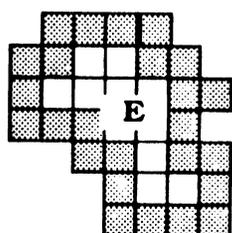
$$P1 \cdot p1(S) = P2 \cdot p2(S) \quad (1)$$

Cette solution générale montre que le seuil S se situe au minimum de la vallée formée par les 2 pics.

Lorsque les fonctions de densité de probabilité peuvent être modélisées par une étape préalable d'apprentissage, la valeur optimisée du seuil se déduit facilement de la relation (1).

## B - Le contour d'une région homogène

La détection des contours en régions homogènes d'une image segmentée peut être obtenue par une méthode de différentiation comme décrit précédemment. Cependant, on préfère utiliser des méthodes plus rapides, basées sur le voisinage direct des pixels constituant les régions homogènes ; la définition du contour est présentée en figure III.10.



**Définition :**

**Le contour d'une région homogène E est défini comme l'ensemble de tous les pixels qui ont au moins un voisin direct qui ne soit pas dans E**

**Figure III.10** contour d'une région homogène

Le contour peut être mémorisé et codé par une suite de valeurs constituant une chaîne numérique ("chain code"). Ce codage décrit chaque pixel du contour par la position du pixel précédent relativement au pixel courant. [FRE77] a défini un code qui détermine pour chacune des huit directions possibles une valeur numérique pour les points connexes à un point central (cf. figure III.11 a).

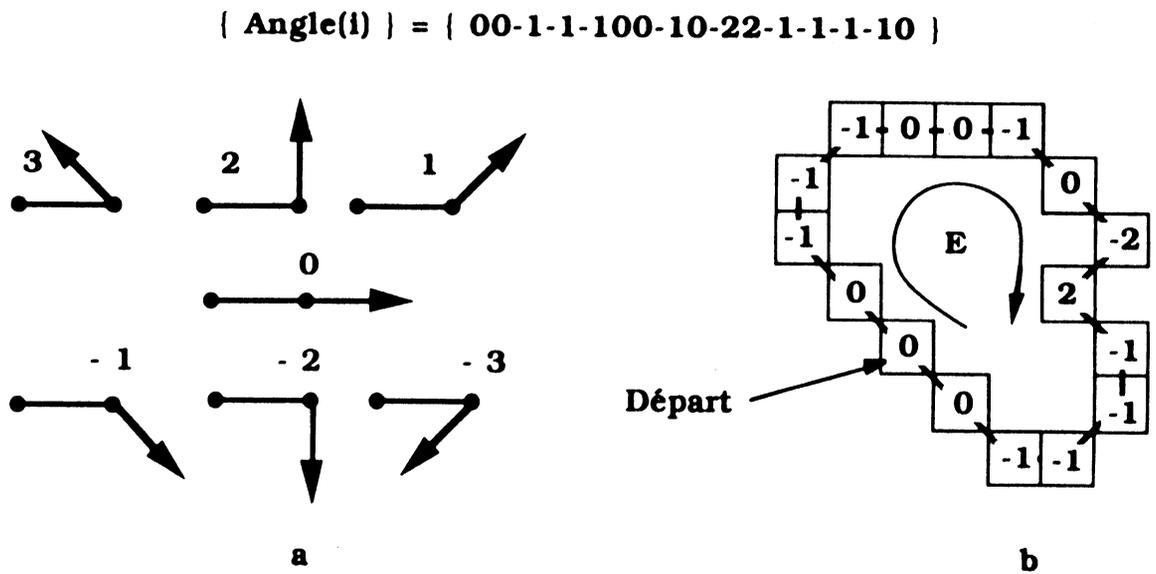
La figure III.11 c montre un exemple de codage de l'objet E défini en figure III.10. Ce codage donne une représentation de l'objet par un ensemble d'arcs élémentaires :

$$\mathbf{E} = \{ \text{Arc}(l) \} = \{ \mathbf{3321000775765433} \}$$

Le principal avantage de ce codage est sa grande capacité à compacter et à extraire l'information contenue dans le contour de l'image.

D'autres techniques basées sur ce principe ont été développées. Nous présenterons dans le paragraphe suivant la technique de codage d'angle.





**Figure III.12** Codage d'angle, a - définition du codage, b - exemple de codage

Cette technique reste néanmoins peu précise pour la détection des coins. En effet, elle ne prend en compte que 3 pixels adjacents, ce qui ne permet pas de déterminer les coins sur des objets dont les bords présentent de nombreuses fluctuations.

### III.2.2.2 Approximation par segments de droite

Cette approximation consiste à déterminer la courbure de l'objet à l'aide de segments de droite. Cette méthode associe à chaque pixel du contour un segment de droite qui relie les extrémités de  $K$  pixels adjacents.

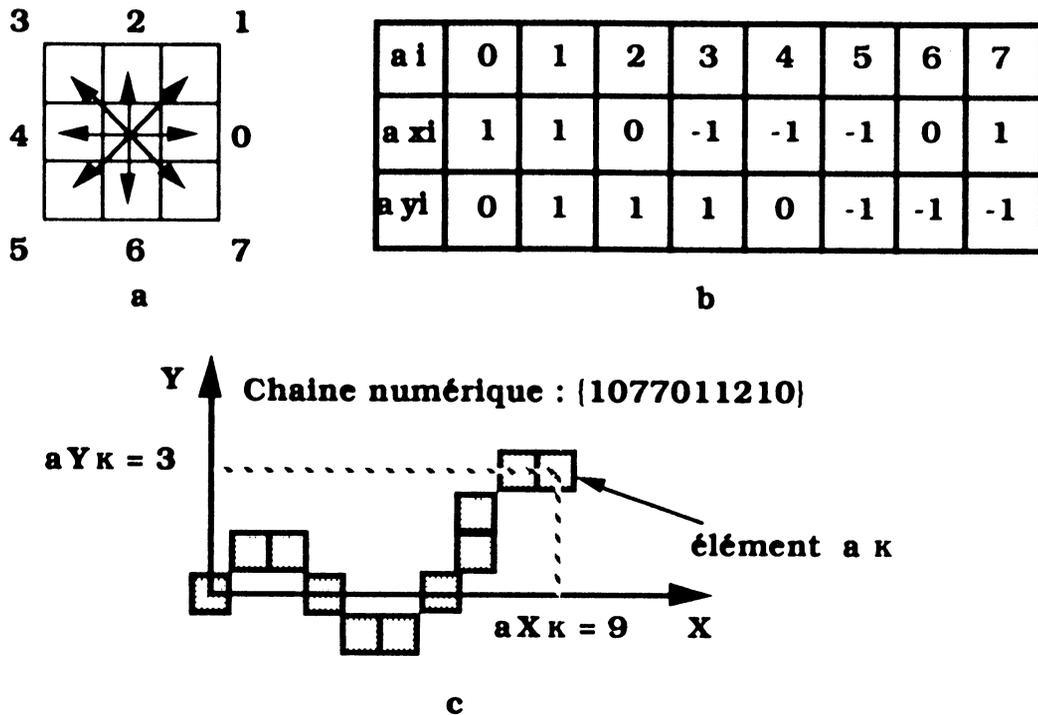
La formulation est la suivante :

Les segments de  $K$  pixels sont représentés en notation de **FREEMAN** par l'expression :

$$\mathbf{A} = \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_i, \dots, \mathbf{a}_K \text{ avec } a_i \in \{0, \dots, 7\}$$

dans laquelle chaque lien  $\mathbf{a}_i$  est un vecteur de longueur 1 si  $i$  est pair et  $\sqrt{2}$  si  $i$  est impair. Ces segments peuvent encore être définis par leurs coordonnées selon les directions principales  $\mathbf{X}$  et  $\mathbf{Y}$  (cf. figure III.13). La

table présentée en figure III.13.a donne la relation entre le code numérique  $a_i$  et ses projections sur les axes  $X$  et  $Y$  notées respectivement  $a_{xi}$  et  $a_{yi}$ .



**Figure III.13** projection d'une chaîne numérique sur les axes X et Y ; a : table de projection, b : exemple de projection.

Avec cette notation, l'élément de la chaîne numérique  $a_k$  a pour coordonnées (cf Figure III.13.b) :

$$X_K = \sum_{i=1}^K a_{xi} \quad Y_K = \sum_{i=1}^K a_{yi}$$

Les segments utilisés pour la détection de la courbure sont définis par l'élément initial  $a_{j-K+1}$  et l'élément final  $a_j$ . Ce segment a pour composantes :

$$X_j^K = \sum_{i=j-K+1}^j a_{xi} \quad Y_j^K = \sum_{i=j-K+1}^j a_{yi} \quad \text{avec : } j = 1, \dots, n \text{ (points du contour)}$$

A partir de ces composantes on peut définir l'angle du segment dans le référentiel  $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$  par les formules :

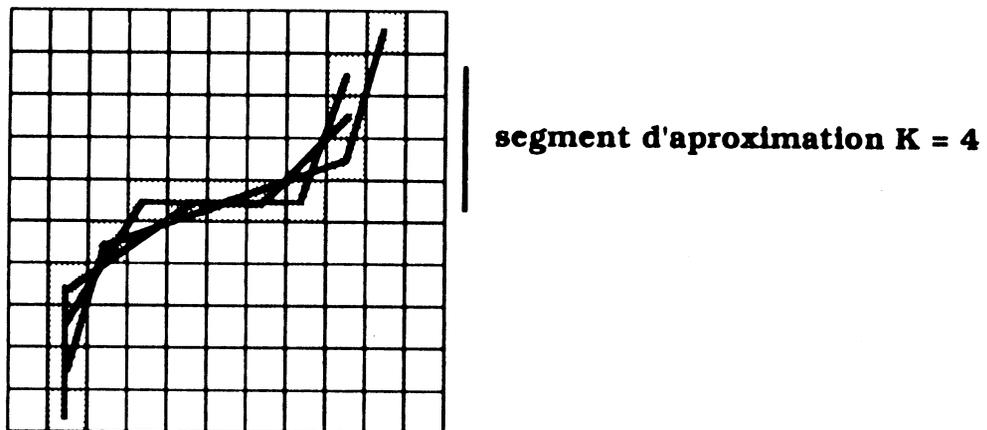
$$\theta_j^K = \tan^{-1}(|y_j^K|/|x_j^K|) \quad \text{si } |x_j^K| \geq |y_j^K|$$

$$\theta_j^K = \cot^{-1}(|x_j^K|/|y_j^K|) \quad \text{si } |x_j^K| < |y_j^K|$$

et la variation de courbure par l'expression :

$$\delta_j^K = \theta_{j+1}^K - \theta_j^K$$

La figure III.14 présente l'analyse d'une courbure pour un segment  $\mathbf{K}$  égal à 4 éléments.



**Figure III.14** Approximation par segment de droite.

Les coins sont alors caractérisés par un facteur d'amplitude déterminé à partir de la variation de courbure. Ce facteur s'exprime par la relation :

$$C_1 = \sum_{j=1}^K \delta_j^K$$

Il mesure un angle pour chaque point du contour. Ainsi, il est aisé de classer ces points en fonction de l'ouverture des angles composant le contour.

### III.2.2.3 Approximation polynômiale

Cette méthode consiste à modéliser les contours par un ensemble continu de fonctions polynômiales. Cette approche ne restitue pas toute l'information mais assure une transformation entre une représentation discrète (mode pixel) et un ensemble de fonctions continues qui facilite l'analyse de la courbure du contour.

Dans ce mode de représentation, les coins sont caractérisés par la courbure des polynômes ajustés au contour.

La courbure est définie pour une courbe paramétrique S dont les coordonnées sont :

$$\begin{aligned} X &= f(t) \\ Y &= g(t) \end{aligned} \quad t \in [t_1, t_2]$$

par la dérivée de la pente  $(dy/dx)_{t=t_1}$  au point  $t_1$ , par rapport à la longueur de l'arc entre  $t_1$  et  $t_2$  :

$$\int_{t_1}^{t_2} \sqrt{(df(t)/dt)^2 + (dg(t)/dt)^2} dt$$

Cette opération donne une courbure qui s'exprime par l'expression :

$$C(t) = ((df/dt)(d^2g/dt^2) - (dg/dt)(d^2f/dt^2)) / ((df/dt)^2 + (dg/dt)^2)^{3/2}$$

A partir de cette expression, on définit des seuils de courbure pour la sélection des points du contour qui présente la cassure recherchée.

A titre d'exemple, on peut citer les travaux de [MED87] qui a utilisé une approximation polynômiale cubique définie par les expressions paramétriques :

$$\begin{aligned} x &= f(t) = a_1 t^3 + b_1 t^2 + c_1 t + d_1 \\ y &= f(t) = a_2 t^3 + b_2 t^2 + c_2 t + d_2 \end{aligned}$$

pour lesquelles la courbure en  $t = 0$  est la suivante :

$$C(0) = (2 c_1 b_2 - c_2 b_1) / (c_1^2 + c_2^2)^{3/2}$$

### III.3 Techniques de détection en niveaux de gris

Ces techniques introduites par [BEA78], ont l'avantage de s'affranchir de la délicate étape de segmentation. En contrepartie, elles restent très sensibles au bruit car elles sont directement basées sur l'analyse des variations de niveaux de gris.

Le principe de détection nécessite une modélisation spatiale de la distribution de l'intensité des niveaux de gris. [ZUN83] ont proposé de modéliser localement chaque pixel en tenant compte de son voisinage (cf figure III.15). Pour cela, il utilise une approximation polynômiale bicubique modélisant le pixel courant et son voisinage par la fonction :

$$g(x,y) = K_1 + K_2 x + K_3 y + K_4 x^2 + K_5 xy + K_6 y^2 + K_7 x^3 + K_8 x^2y + K_9 xy^2 + K_{10} y^3$$

dans laquelle les coefficients  $K_i$  sont déterminés par la méthode des moindres carrés ; le voisinage est composé par la matrice carrée de pixels centrée sur le pixel courant (cf figure III.15).

L'approximation polynômiale bicubique est la plus utilisée pour ces calculs. Néanmoins d'autres fonctions, comme les polynômes quadratiques [KIT82], sont employées.

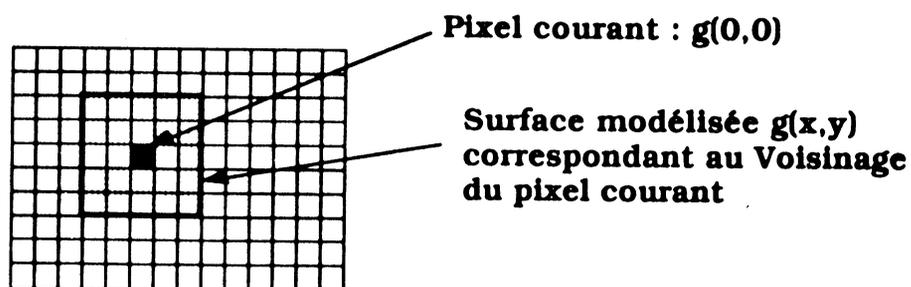


Figure III.15 Modélisation locale du pixel

Cette modélisation effectuée, les coins sont recherchés en mesurant au niveau du pixel courant un facteur caractérisant l'ouverture du contour. Le calcul de ce facteur est basé sur l'étude de la variation de l'orientation du gradient de la fonction  $g(x,y)$ . Ce calcul est mené uniquement sur les pixels

appartenant aux contours des objets. Pour cela, le pixel courant doit présenter une fonction  $g(x,y)$  dont l'intensité de son gradient est non nulle et son laplacien est égal à zéro.

Dans le cas où le pixel courant est un point de contour, [ZUN83] propose un facteur d'ouverture  $K$ , calculé en dérivant l'angle du gradient

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{\partial g(x,y)}{\partial x}}{\frac{\partial g(x,y)}{\partial y}} \right)$$

dans la direction  $\alpha$ , perpendiculaire à cet angle.

Ainsi, pour l'approximation polynômiale précédente, le facteur d'ouverture  $K$  (pour le pixel courant,  $x=0$  et  $y=0$ ) est donné par l'expression :

$$K = \theta'_{\alpha} = -2 (K_2^2 K_6 - K_2 K_3 K_5 + K_3^2 K_4) / (K_2^2 + K_3^2)^{3/2}$$

### III.4 Conclusion

Deux approches sont envisageables pour la détection des coins.

Les techniques à base de segmentation sont les plus utilisées en reconnaissance des formes. Elles ont l'avantage d'être rapides car elles travaillent sur une information binaire, réduite aux contours des objets. De plus, si l'étape de segmentation s'effectue correctement, elles offrent une bonne efficacité de détection.

Les techniques travaillant directement sur les images de niveaux de gris présentent l'avantage de s'affranchir de l'étape de segmentation. Par contre, elles ont les inconvénients d'être très sensibles au bruit et d'être moins rapides car elles traitent tous les pixels de l'image.

Pour notre procédure, les techniques à bases de segmentation sont par leur rapidité, les mieux adaptées à notre environnement de test qui ne possède aucun processeur câblé. Un détecteur, basé sur cette approche, a été optimisé pour les images de contraste en potentiel. Il est présenté dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE IV**  
**APPLICATION AUX IMAGES**  
**EN CONTRASTE DE POTENTIEL**

DEUXIEME PARTIE

---

**COMPARAISON AUTOMATIQUE D'IMAGES**



## **IV APPLICATION AUX IMAGES EN CONTRASTE DE POTENTIEL**

Le processus de superposition automatique d'images est une opération fondamentale qui doit être fiable et rapide pour offrir à l'analyste un outil de comparaison efficace dans le cadre d'un système de test par faisceau d'électrons automatique et intégré.

Pour assurer le processus de superposition, nous avons été conduit à développer un détecteur de coins adapté aux images en contraste de potentiel [COL89] et donc, compte tenu de la nature de ces images, mettre au point un opérateur optimisé pour la localisation des angles droits. Dans ce but, comme il a été mentionné au chapitre précédent, l'approche à base de segmentation nous est apparue comme étant la mieux adaptée à un environnement de test dépourvu de processeurs cablés. Notre choix s'est donc orienté vers la mise au point d'un détecteur binaire qui, à l'opposé des détecteurs en niveaux de gris, ne traite qu'un minimum d'information.

### **IV.1 Présentation du processus de superposition automatique d'images**

Le processus de superposition automatique d'images par détection des coins sur les images binaires consiste à séparer chaque image (référence et défaillante) en contours fermés afin d'appliquer un algorithme de recherche d'angles droits.

Pour cela, il faut isoler l'information utile par les traitements suivants (cf. figure IV.1) :

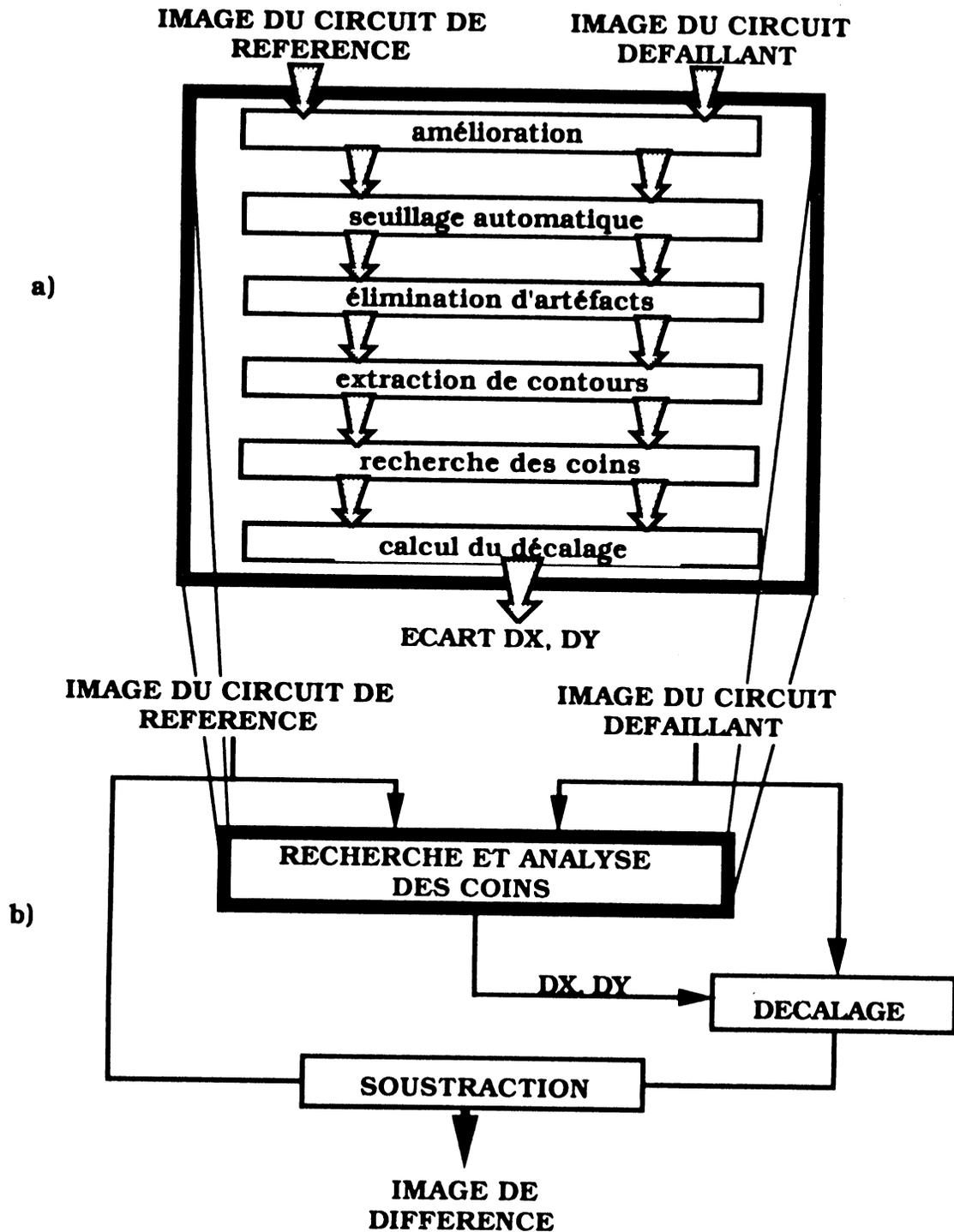
- amélioration de l'image ;
- seuillage automatique ;
- élimination des artéfacts ;
- extraction des contours.

A l'issue de ces traitements, les coins sont localisés et mémorisés dans une table avec les attributs suivants :

- coordonnées ;
- orientation ;
- convexité.

A partir de ces données, le décalage est déduit en mesurant les positions relatives des coins issus de l'image du circuit défaillant et de l'image de référence.

Finalement, la correction en translation de l'image de référence permet une exacte mise en correspondance des images à comparer (cf. figure IV.1.b).



**Figure IV.1** Procédure de recalage automatique. a - calcul du décalage, b - procédure générale de soustraction.

Ces traitements ont été implémentés en langage C sur la station de travail SUN de notre station de test (cf. chapitre V). Leurs algorithmes sont détaillés dans la suite de ce chapitre.

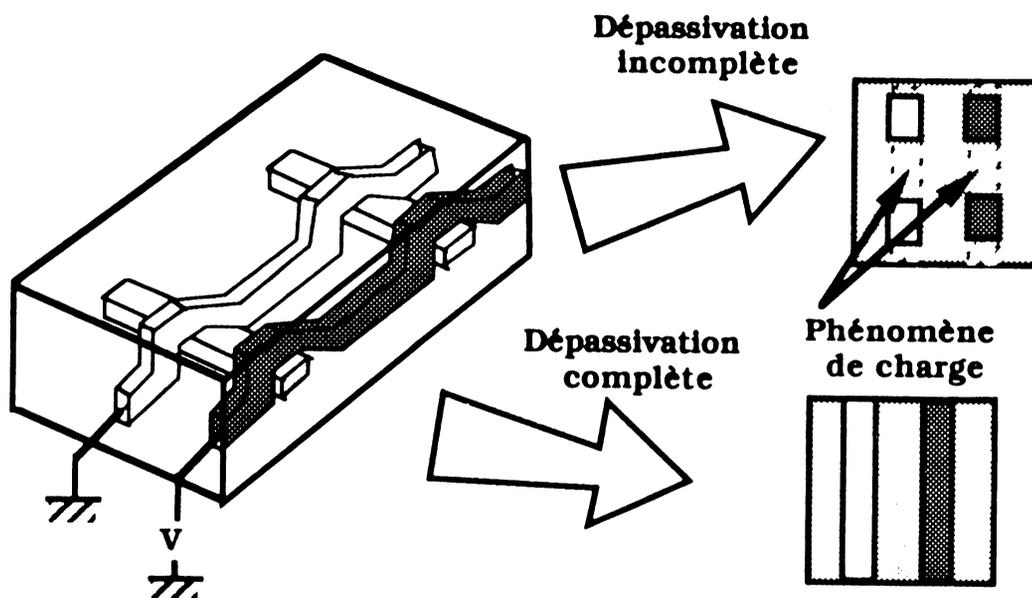
#### **IV.2 Algorithmes pour l'amélioration de la qualité de l'image**

Les images obtenues en contraste de potentiel offrent généralement une qualité médiocre dont on ne peut se satisfaire pour nos opérations d'imagerie. Plusieurs facteurs sont à l'origine de la dégradation de l'image initiale.

L'une des sources importantes de bruit est liée à l'effet de grenaille de l'émission secondaire à basse tension (entre 0,7 et 2 KeV). Celui-ci a été limité par le développement de colonnes (lentille + détecteur) adaptées à l'analyse de circuits intégrés en contraste de potentiel. Ces outils permettent d'obtenir en contraste statique des images brutes directement exploitables au niveau des pré-traitements de l'image. Dès les débuts du test par faisceau d'électrons, cet aspect matériel a fait l'objet de nombreux travaux qui ont débouché sur des développements industriels **[MEN83b]**. Néanmoins, si pour les testeurs à faisceau d'électrons actuels la qualité des images statiques est bien maîtrisée, il n'en est pas de même pour celle des images dynamiques. En effet, l'utilisation de la stroboscopie de faisceau (cf. première partie, chapitre I) introduit une dégradation de l'image qui est inversement proportionnelle à la durée du pulse d'exposition du faisceau. Les photos 1a, 1b, 1c et 1d illustrent ce phénomène pour plusieurs largeurs de pulse. Nous verrons par la suite que les techniques d'intégration d'images se prêtent bien à l'élimination de ce type de bruit.

Le second facteur limitant la qualité des images est lié à la nature de la surface de l'échantillon. Les problèmes principaux sont dus à la qualité de la dépassivation et à la contamination de la surface.

La dépassivation doit être réalisée de façon uniforme, afin de ne pas créer de variations de luminosité due à la charge de l'oxyde laissée localement en surface. Les problèmes apparaissent principalement au niveau des creux dans lesquelles l'oxyde est difficile à retirer sans dégrader le fonctionnement du circuit ; ces zones non dépassivées donnent par la suite des zébrures sur les images en contraste de potentiel (cf. figure IV.2).



**Figure IV.2** Problème de dépassivation

Ce phénomène doit absolument être évité afin de ne pas perturber l'observation du contraste de potentiel. La dépassivation est donc une étape-clé qu'il faut parfaitement maîtriser pour l'application de la procédure automatique de comparaison.

La contamination est une dégradation dans le temps qui a pour effet d'assombrir la surface exposée au faisceau d'électrons. Au niveau de l'image, ce phénomène se présente par une dégradation du contraste allant jusqu'à un noircissement complet de la surface, qui rend très difficile, voire impossible, le traitement d'images. Ce phénomène étant cumulatif, on prendra garde de ne pas exposer inutilement l'échantillon au faisceau. Il est évident que le fonctionnement en contraste statique dégrade plus rapidement l'état de surface, car le temps d'exposition réel est beaucoup plus important qu'en stroboscopie. Comme nous l'avons déjà mentionné dans le chapitre I.3.4 de la première partie, ce phénomène peut être réduit par ailleurs, en limitant l'usage des grossissements trop importants.

Enfin, on ne peut parler de la détérioration de l'image sans mentionner les problèmes de déformations dues à la distorsion du balayage. Pour notre procédure de comparaison, ce problème est peu important puisque **les circuits à comparer sont placés simultanément dans la chambre à vide.** (cf chapitre V, §V..1.4). Dans ce cas, les images acquises sur chaque

circuit offriront **les mêmes déformations, qui s'annuleront au cours de l'étape finale de différence.**

Dans le cas où la chambre à vide ne pourrait accueillir qu'un seul circuit, le problème des déformations ne peut être négligé, et il devient important de caractériser les déformations afin de corriger les images microscope. La solution consiste à effectuer des transformations de l'image. On peut citer les travaux de [YOK86], qui proposent une transformation basée sur des polynômes de degré 3, ou encore des corrections à l'aide des polynômes de Bézier [GOS89]. Néanmoins, ces corrections restent lourdes à mettre en œuvre et très pénalisantes au niveau des temps d'exécution.

Finalement, on constate que la qualité de l'image est un état fragile qui dépend du matériel, des manipulations et du soin accordé à la préparation des circuits. Si ces paramètres sont difficiles à maîtriser, il est toujours possible d'utiliser des techniques d'amélioration de l'image, qui permettent d'obtenir une distribution des niveaux de gris plus facilement exploitable par les procédures de traitement d'images.

Les techniques utilisées sont fondées sur l'intégration d'images à la saisie et sur les transformations dans le domaine spatial.

#### IV.2 1 Intégration d'images

Cette technique consiste à améliorer le rapport signal/bruit de l'image au moment de la saisie en réalisant une moyenne sur plusieurs images. Le principe s'appuie sur une définition aléatoire du bruit, considéré comme un processus stochastique.

Dans ces conditions, si l'on appelle  $m_i(x,y)$  chaque image et  $b_i(x,y)$  le bruit dont elle est entachée, le signal original  $f(x,y)$  de l'image non altérée satisfait à la relation :

$$m_i(x,y) = f(x,y) + b_i(x,y) \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ nombre d'images moyennées}$$

Le calcul de la moyenne arithmétique de ces n images permet d'évaluer la moyenne et le rapport signal/bruit [PAP65] :

soit

$$E(m) = \overline{m_i(x,y)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i(x,y) = f(x,y) + b(x,y)$$

avec

$$\mathbf{b}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{b}_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

Cette relation montre que le calcul de  $\mathbf{E}(\mathbf{m})$  ne modifie pas l'image originale  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ . Le bruit  $\mathbf{b}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  qui en résulte donne un écart type  $\sigma_B$  tel que

$$\sigma_B = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

le terme  $\sigma$  représente l'écart type de l'image non moyennée.

A partir de cette relation, le rapport signal/bruit de l'image moyennée  $\overline{\mathbf{m}}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  est défini par le rapport de l'image originale par l'écart type  $\sigma_B$  du bruit moyenné, c'est-à-dire :

$$\mathbf{S}/\mathbf{B} = \frac{\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\sigma_B} = \frac{\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\sigma} \sqrt{n}$$

Le terme  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y})/\sigma$  est le rapport signal/bruit d'une image comparée à son propre bruit. Cette dernière relation montre que l'opération de moyenne apporte une amélioration en  $\sqrt{n}$ .

Cette technique est particulièrement efficace sur les images stroboscopiques qui sont très altérées par le bruit. Nos expérimentations ont montré que des moyennes sur 10 trames offraient un bon compromis entre la charge et la contamination du circuit, le temps d'acquisition et l'élimination du bruit. Cette valeur a donc été systématiquement utilisée pour l'acquisition des images stroboscopiques. Les images acquises en contraste de potentiel statique n'ont pas nécessité l'utilisation de cette technique, car la qualité de l'outil (testeur CAMECA) donne des images correctes pour des vitesses d'acquisition de quelques secondes (2 à 4 secondes).

Les photos IV.2.a, b, c et d présentent une comparaison d'images stroboscopiques (pulse de 20ns) moyennées sur 1, 10, 20 et 50 trames.

## IV.2.2 Transformation de l'image dans le domaine spatial

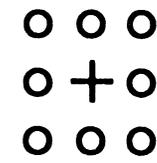
Le filtrage spatial est une opération directe sur les pixels et leur attribut principal : le niveau de gris. Cette technique permet de lutter contre les effets du bruit, en opérant une transformation qui, pour chaque pixel, tient compte de son voisinage.

### IV.2.2.1 Moyenne des voisins

Le filtre utilisant la moyenne non pondérée des proches voisins permet d'adoucir une image abimée par un bruit à haute fréquence : le niveau de gris de chaque pixel est remplacé par la moyenne des valeurs de ses 8 voisins. Si  $i$  et  $j$  sont les coordonnées des pixels appartenant à l'ensemble  $E$  des 8 voisins, alors pour chaque coordonnée  $(x,y)$ , l'image filtrée  $g(x,y)$  est obtenue en utilisant la relation présentée en figure IV.3.

$$g(x,y) = \frac{1}{n} \sum_{(i,j) \in E} f(i,j)$$

$n = 8$  (nombre de voisins)



○ proches voisins

Figure IV.3 Moyenne des voisins

### IV.2.2.2 Filtre médian

Un second filtre est souvent préféré à la moyenne des voisins car il permet d'atténuer le bruit sans trop altérer les bords des objets.

Le filtre médian remplace l'intensité de chaque pixel par la valeur médiane de l'ensemble des intensités des proches voisins. En pratique, on choisit une fenêtre 3 x 3 centrée sur le point à filtrer et par une méthode de tri sur 8 nombres, on attribue au pixel central la valeur médiane des niveaux de gris l'entourant.

Le filtre utilisant la moyenne des voisins a été retenu pour notre procédure de comparaison automatique. Ce choix a été motivé par le bon compromis entre l'amélioration de l'image et le temps d'exécution. Il est évident que le filtre médian, par son opération de tri, réalise beaucoup plus d'opérations que le filtre utilisant la moyenne. De plus, le filtre par moyenne réduit les fluctuations des niveaux de gris et permet ainsi d'obtenir des régions plus homogènes après l'étape de segmentation (cf. figure IV.5). Nous verrons par la suite que cette propriété est très importante pour l'étape d'élimination des artéfacts (cf chapitre IV, § IV.4).

### IV.2.3 Résumé

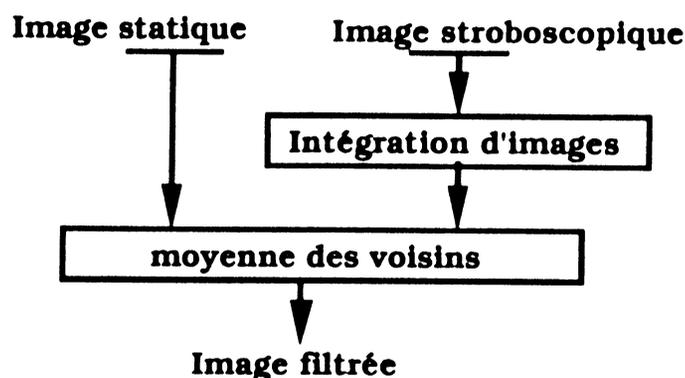
En résumé, nous allons rappeler les règles essentielles pour l'obtention d'images offrant le meilleur contraste :

1. Limiter les phénomènes locaux de charge en dépassivant les circuits de façon uniforme ;

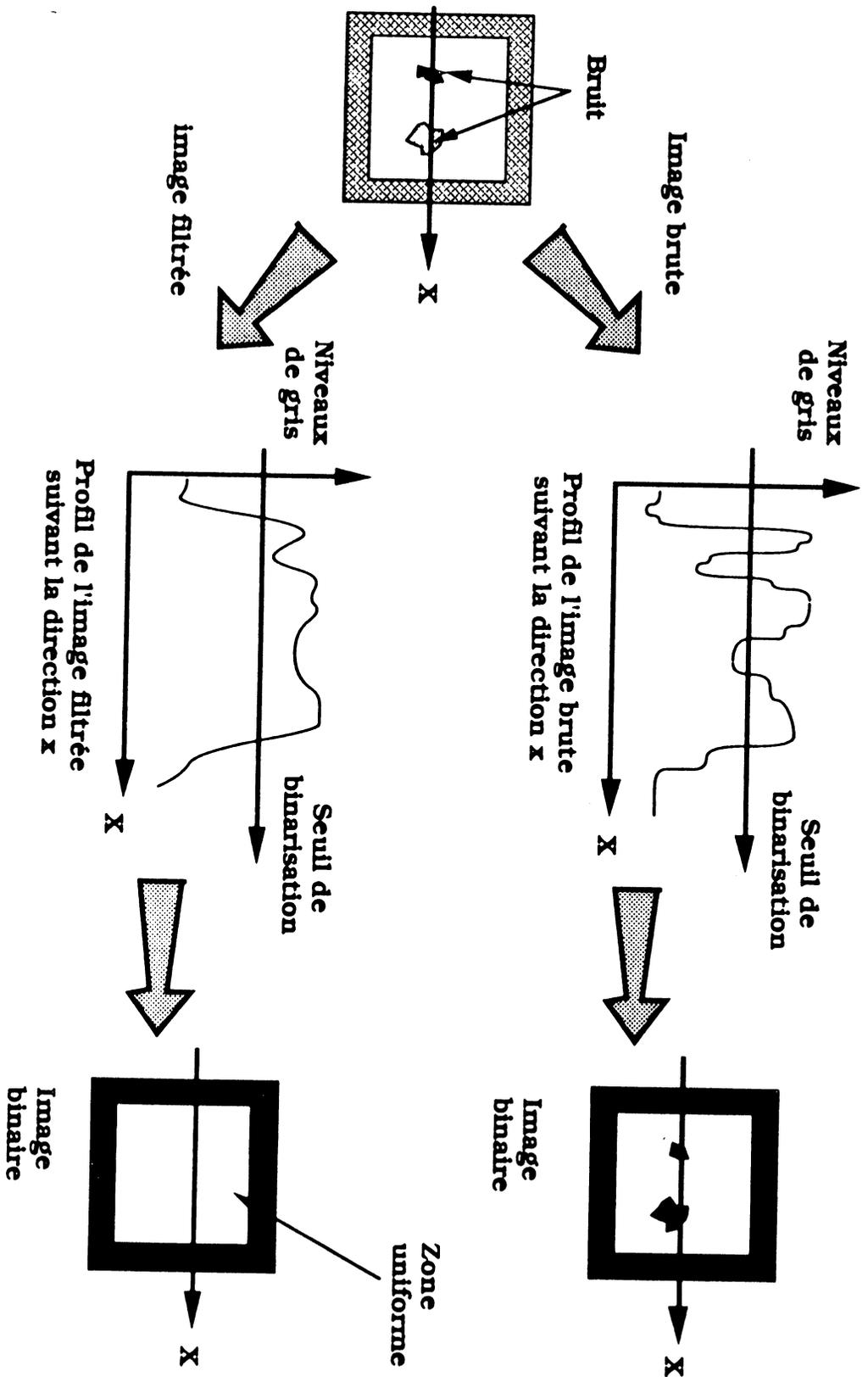
2. Limiter la contamination du circuit en évitant les trop forts grossissements et en réduisant au maximum les temps d'exposition du circuit, principalement en mode statique ;

3. Eviter les problèmes de déformation de l'image en plaçant simultanément les 2 circuits dans la chambre à vide ;

4. Améliorer la distribution des niveaux de gris par des techniques de filtrage ; les méthodes employées dépendront de la nature de l'image brute ; elles sont présentées en figure IV.4.



**Figure IV.4** techniques de filtrage en fonction de l'image brute.

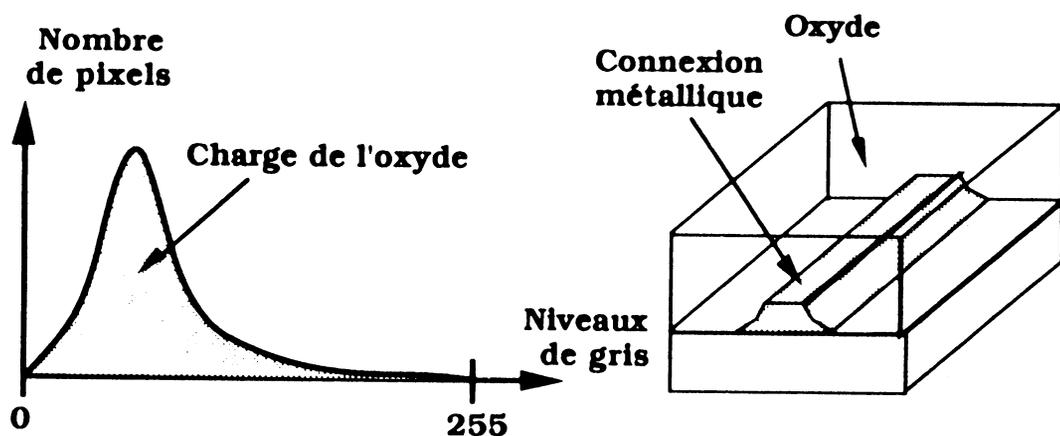


**Figure IV.5** Action du filtre par moyenne des voisins sur les images binaires  
**IV.3** Algorithme pour le seuillage automatique (cf photo IV.3.b)

La technique de seuillage automatique est basée sur l'analyse de l'histogramme des niveaux de gris (cf. chapitre III, §III.2.2.A). En contraste de potentiel, l'histogramme fait apparaître plusieurs pics, selon que le circuit est :

- passivé ;
- non passivé ;
- dépassivé.

L'étude des circuits passivés présente une courbe histogramme avec un pic principal correspondant à la charge de l'oxyde de surface (cf. figure IV.6).



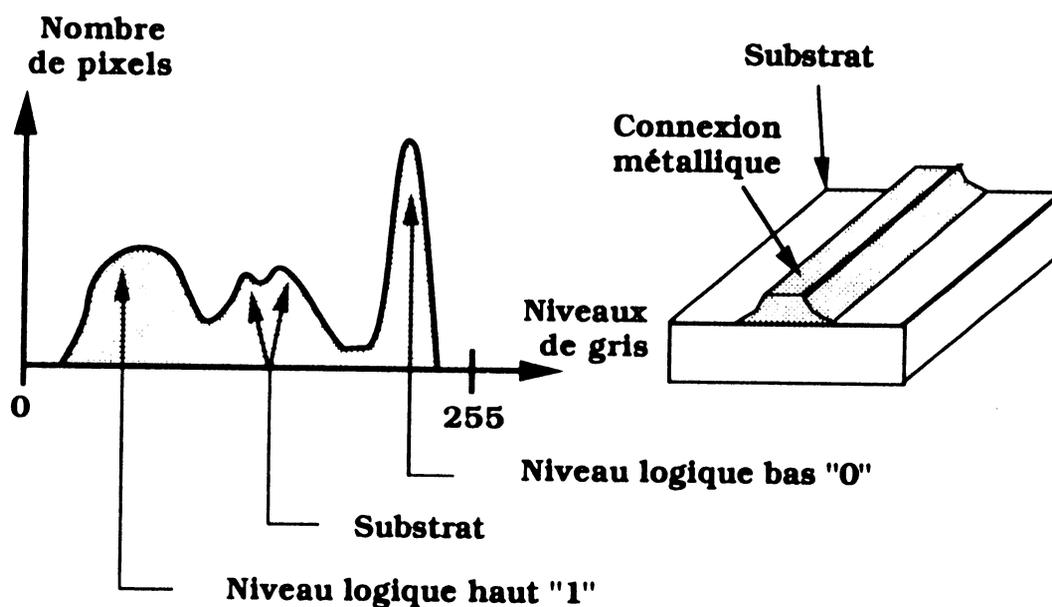
**Figure IV.6** Allure générale de l'histogramme des circuits passivés

Ce type de surface donne, en contraste de potentiel, des images uniformément sombres qui seront inexploitable pour les traitements automatiques d'images.

Les circuits non passivés offrent les meilleures conditions pour l'observation en contraste de potentiel. En effet, pour ce type de circuit, il n'y a pas de dégradation du contraste par des phénomènes de charge d'oxyde au niveau des connexions métalliques supérieures.

La figure IV.7 présente l'histogramme-type avec ses 3 pics principaux :

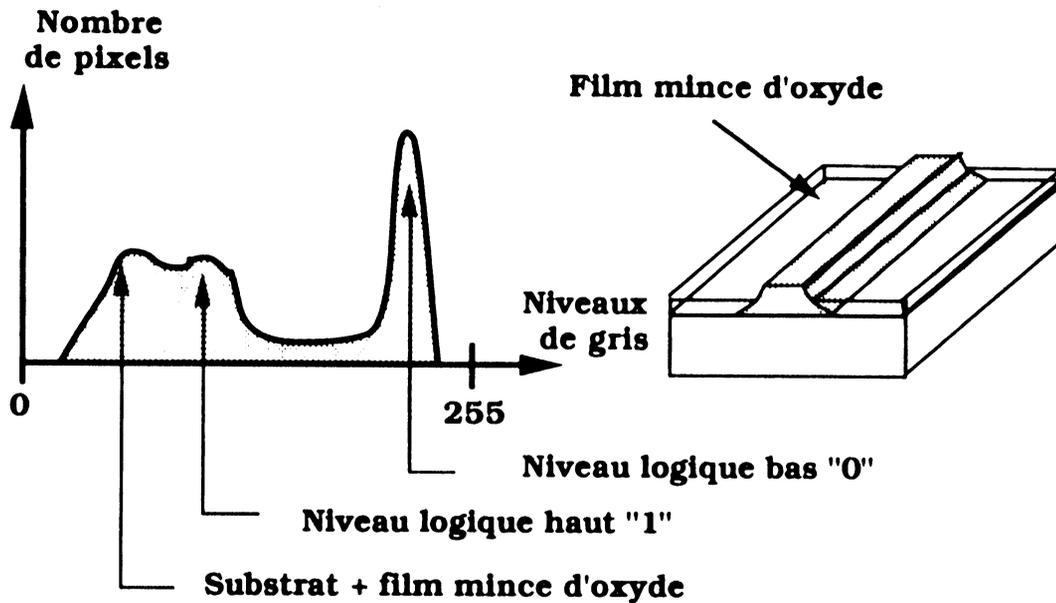
- niveau logique bas (parties claires de l'image) ;
- substrat et contraste topographique (parties grises de l'image) ;
- niveau logique haut (parties sombres de l'image).



**Figure IV.7** Allure générale de l'histogramme des circuits non passivés.

Les circuits dépassivés présentent un histogramme différent des circuits non passivés (cf. figure IV.8) ; la position du pic correspondant au substrat est échangée avec celle du pic du niveau logique haut. Ce phénomène s'explique par la charge d'un film mince d'oxyde, persistant à la surface du substrat après l'étape de dépassivation.

Notre procédure de seuillage automatique a été optimisée pour les circuits dépassivés. Ce choix a été motivé par le fait qu'en analyse de défaillances nous étudions des circuits issus d'une fabrication en série, qui présentent inmanquablement une couche de passivation. De ce fait, l'opération de dépassivation est indispensable pour assurer une bonne observabilité en contraste de potentiel.



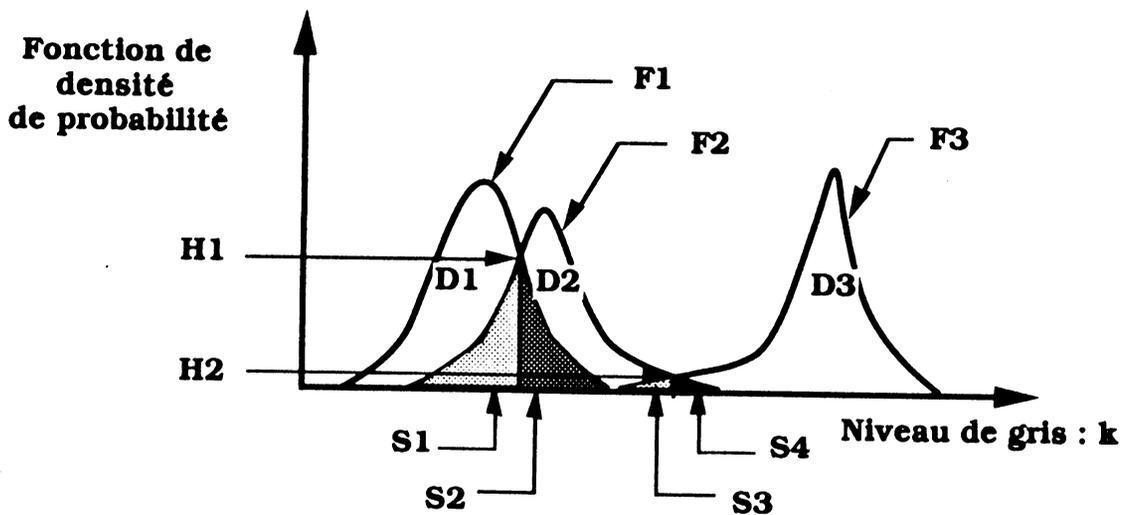
**Figure IV.8** Allure générale de l'histogramme des circuits dépassivés.

La procédure consiste à déterminer automatiquement un seuil afin de binariser l'image en niveaux de gris. Elle est basée sur l'analyse de l'histogramme des circuits dépassivés présenté en figure IV.8.

L'histogramme peut être modélisé en "théorie de la décision" (cf. chapitre III, §III.2.1.2.A) par trois fonctions de densité de probabilité représentant les 3 classes de niveaux de gris : niveaux haut, substrat + film mince d'oxyde, niveau bas.

La figure IV.9 présente ces courbes ; elle met en évidence, pour l'histogramme des circuits dépassivés, les propriétés suivantes :

- une grande probabilité de classement par erreur entre la classe du **niveau logique "1"** et la classe du **substrat + film mince d'oxyde**, ce qui se traduit par des surfaces de recouvrement **S1** et **S2** très importantes ;
- une faible probabilité de classement par erreur entre la classe du **niveau logique "0"** et la classe du **niveau logique "1"**, ce qui se traduit par des surfaces de recouvrement **S3** et **S4** plus petites ;
- des intensités au lieu de rencontre des fonctions de densité de probabilité qui présentent la propriété : **H1 >> H2**



**Légende :**

Domaine **D1** -> **Substrat + film mince d'oxyde**  
 Fonction de densité de probabilité **F1** ->  $p_1(k).P_1$

Domaine **D2** -> **Niveau logique haut "1"**  
 Fonction de densité de probabilité **F2** ->  $p_2(k).P_2$

Domaine **D3** -> **Niveau logique bas "0"**  
 Fonction de densité de probabilité **F3** ->  $p_3(k).P_3$

**Surface de classement par erreur :**

$$\text{de D2 dans D1} \rightarrow S1 = \int_{D1} p_2(k) P_2 dk$$

$$\text{de D1 dans D2} \rightarrow S2 = \int_{D2} p_1(k) P_1 dk$$

$$\text{de D3 dans D2} \rightarrow S3 = \int_{D2} p_3(k) P_3 dk$$

$$\text{de D2 dans D3} \rightarrow S4 = \int_{D3} p_2(k) P_2 dk$$

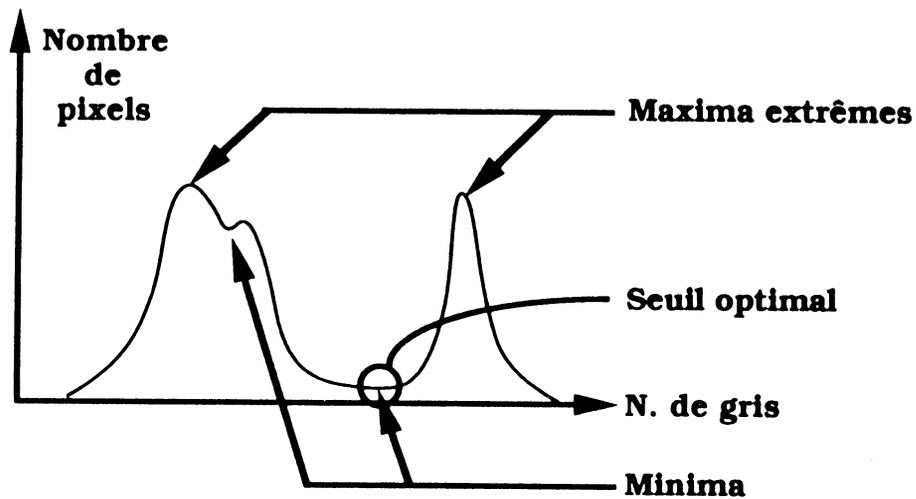
**Intensité au lieu de rencontre des fonctions de densité de probabilité :**

- entre D1 et D2 -> **H1**
- entre D2 et D3 -> **H2**

**Figure IV.9** Modélisation de l'histogramme en théorie de la décision.

Ces propriétés montrent que le niveau logique bas (niveau "0") peut être extrait de l'image en niveaux de gris avec la plus faible probabilité d'erreur. Cette constatation nous a amenés à travailler sur les zones claires de l'image. La recherche du seuil optimal a donc consisté à rechercher sur la courbe histogramme le minimum offrant l'intensité la plus faible en nombre de pixels.

En pratique, cette opération a été réalisée par une recherche des minima entre les 2 maxima extrêmes de la courbe (cf figure IV.10).



**Figure IV.10** Segmentation automatique

Les extremums sont recherchés sur l'histogramme lissé. Ceci permet d'éliminer les fluctuations de la courbe qui perturbent les calculs en introduisant des minima locaux.

L'algorithme de recherche du seuil optimal est le suivant :

- signification des identificateurs utilisés :

$I(x,y)$  -> Image en niveaux de gris

$x, y$  -> coordonnées du pixel

$his(n)$  -> tableau de 256 valeurs représentant

l'histogramme

$n$  -> niveau de gris variant de 0 à 255

$Max(i)$  -> maxima de la courbe histogramme

$i$  -> niveaux de gris correspondant aux maxima

$Min(j)$  -> minima de la courbe histogramme

j -> niveaux de gris correspondant aux minima  
 Maxinf, Maxsup -> niveaux de gris correspondant aux maxima les plus éloignés  
 S -> seuil optimal

**Début** : Seuillage automatique:

: Mise à zéro de l'histogramme :

**Pour** chaque niveau de gris n **faire**

**his(n) = 0**

**FP**

: Calcul de l'histogramme :

**Pour** chaque pixel I(x,y) **faire**

**his(I(x,y)) = his(I(x,y)) + 1**

**FP**

: Lissage de l'histogramme :

**Pour** chaque niveau de gris n **faire**

**his(n) =  $\frac{\text{his}(n-2) + 2 \text{ his}(n-1) + \text{his}(n) + 2 \text{ his}(n+1) + \text{his}(n+2)}{7}$**

**FP**

: Définition de la zone de recherche des minima :

**Pour** chaque niveau de gris n **faire**

**calculer le tableau Max(i)**

**FP**

**Pour** chaque valeur de i **faire**

**calculer Maxinf et Maxsup**

**FP**

: Recherche du seuil optimal :

**Pour** n = Maxinf à n = Maxsup **faire**

**calculer le tableau Min(j)**

**FP**

**Pour** chaque valeur de j **faire**

**chercher S = j tel que his(Min(j)) minimum**

**FP**

**FIN** :

#### IV.4 Algorithme pour l'élimination des artéfacts (photo IV.3.c)

Le rôle principal de ce filtre est de préparer au mieux l'image binaire pour l'étape finale de détection des coins. Cet opérateur nettoie l'image des résidus provenant d'une mauvaise délimitation de la classe correspondant au niveau logique "0". De plus, son action permet de linéariser les contours, ce qui facilite la recherche des coins en limitant les fluctuations des bords de l'objet.

Le principe consiste à éliminer suivant les horizontales et les verticales les segments linéaires dont la taille est inférieure à l'élément minimal du circuit.

L'élément minimal du circuit, noté sur les images digitales "motif élémentaire", correspond à la largeur de connexion la plus faible à la surface du circuit. Elle est mesurée en nombre de pixels et fixée, indépendamment de la technologie, grâce au grandissement linéaire du microscope. [LAU84] a proposé une valeur théorique de 5 pixels qui tient compte du contraste topographique. Ce dernier, principalement localisé sur le bord des connexions, ne peut être négligé sous peine de perdre l'information significative contenue à l'intérieur du contour après l'étape de segmentation. Il faut donc compter un minimum de 2 pixels au niveau du contour pour obtenir au moins 1 pixel significatif après binarisation (cf. figure IV.11)

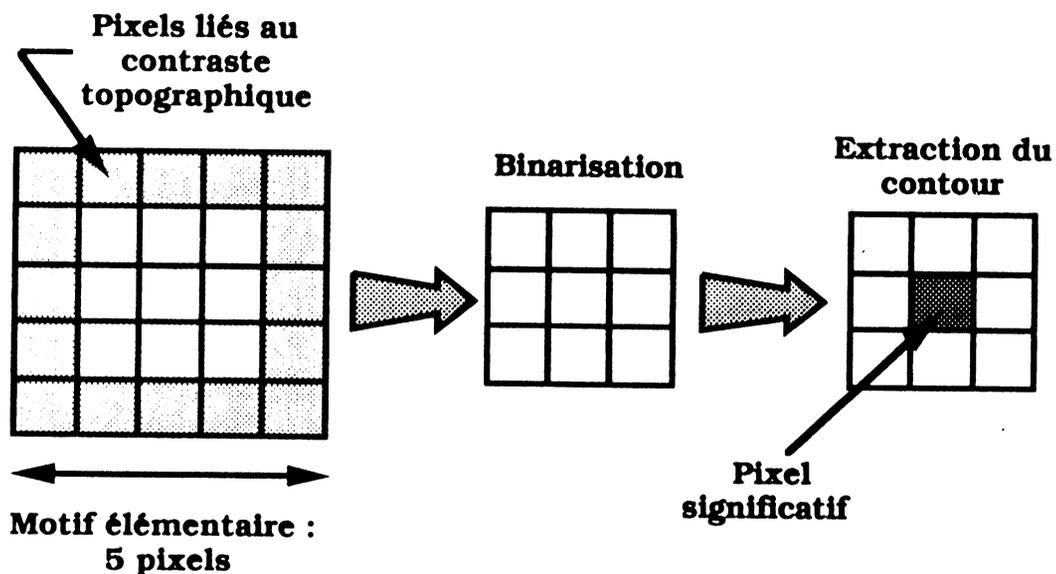


Figure IV.11 Valeur théorique du motif élémentaire

Nos expérimentations, présentées au chapitre VI, ont été menées avec une valeur légèrement supérieure (motif élémentaire de 6 pixels) afin de prendre en compte la nature bruitée de l'image, qui induit des fluctuations sur le contour des objets.

L'algorithme suivant décrit l'opérateur qui élimine les segments blancs selon l'horizontale :

**Début** : Elimination des segments blancs sur l'horizontale :

**Pour** chaque pixel de l'image  $I(x,y)$  **faire**

**Si**  $I(x,y)$  = point blanc

**Alors** : rechercher un segment :

longueur segment = 0

**Tant que**  $I(x,y)$  = point blanc **faire**

longueur segment = longueur segment + 1

$x = x+1$

**Ftq**

**Si** longueur segment < motif élémentaire **alors**

effacer longueur des points blancs précédents

**Fsi**

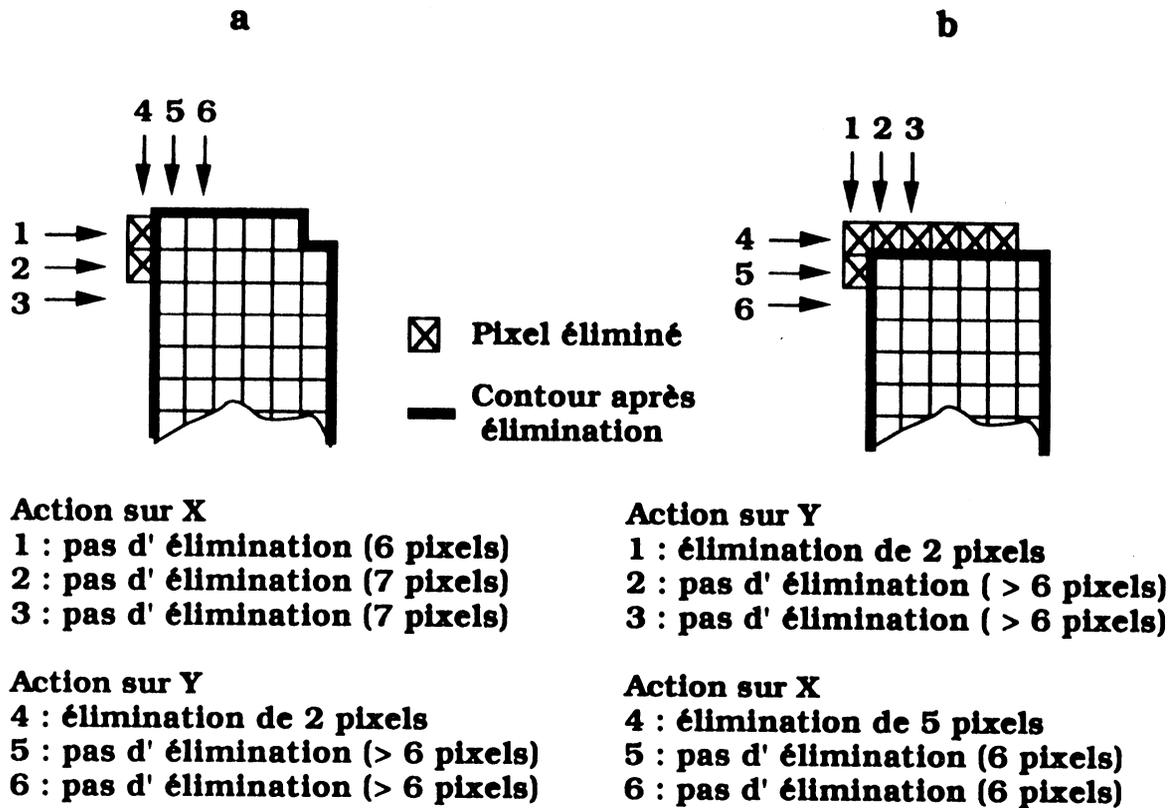
**Fsi**

**Fp**

**Fln** :

L'élimination dans la direction verticale est identique à l'algorithme précédent et s'obtient en inversant les lignes et les colonnes.

En pratique, ce filtre s'applique successivement sur les axes horizontal et vertical. Cependant, on constate que son action n'est pas identique selon que l'on débute par l'axe X ou par l'axe Y. La figure IV.12 illustre ce problème.



**Figure IV.12** Elimination des artéfacts. a - séquence X puis Y ; b - séquence Y puis X.

Pour éviter ce problème de dissymétrie, nous appliquons plusieurs fois les filtres élémentaires dans les directions X et Y jusqu'à ce que le nombre de pixels éliminés converge vers zéro.

L'algorithme final d'élimination tient compte de ce problème. Il est le suivant :

- signification des identificateurs utilisés :

$I(x,y)$	-> image en niveau de gris
$n$	-> nombre temporaire de pixels blancs
$nb\_pix\_blanc(I((x,y)))$	-> fonction calculant le nombre de pixels blanc de l'image $I(x,y)$
$élimine(DIR,I(x,y))$	-> élimination des pixels blancs sur l'axe DIR (X ou Y)
$axe\_tempo$	-> variable temporaire de type axe

**Début** : Elimination des artéfacts sur l'image  $I(x,y)$  :

$n = \text{nb\_pix\_blanc}(I(x,y))$

**Tant que**  $\text{nb\_pix\_blanc}(I(x,y)) - n > 0$  **faire**

élimine(X,  $I(x,y)$ )

élimine(Y,  $I(x,y)$ )

élimine(X,  $I(x,y)$ )

$n = \text{nb\_pix\_blanc}(I(x,y))$

X = axe\_tempo

X = Y

Y = axe\_tempo

**Ftq**

**FIN** :

**Remarque** :

Ce type d'élimination peut dégrader les images lorsque celles-ci présentent des surfaces non homogènes. Dans ce cas, le filtre coupe les motifs et introduit des coins artificiels qui faussent l'opération de calcul du décalage.

Pour s'affranchir de cet effet, [SAV90] propose d'appliquer le dual de ce filtre ; il consiste alors à remplacer les segments noirs par des segments blancs. Son action permet de restaurer les motifs détruits artificiellement sans créer de résidus supplémentaires.

Pour notre étude, la qualité des images que nous avons traitées a permis de s'affranchir de cette étape.

#### **IV.5 Algorithme pour l'extraction de contours (photo IV.3.d)**

La mise en évidence des contours est réalisée par un extracteur de contours dit topologique. Cette fonction, adaptée aux images binaires, procède à un suivi du motif sans effectuer de dérivation. Elle donne des contours fermés d'épaisseur 1 pixel.

La recherche de la convexité du contour a été ajoutée à cet opérateur afin de mieux identifier les types de coins (cf. chapitre IV, §IV.6). Cet attribut est déterminé pendant l'étape d'extraction du contour. Il est codé sur l'image binaire par un niveau de gris moyen marquant l'intérieur du motif. Ainsi, après l'étape d'extraction de contours, nous obtenons des

images codées sur 3 niveaux de gris correspondant au noir pour le fond, au blanc pour les motifs et au gris moyen pour l'intérieur des motifs.

L'algorithme d'extraction de contours est le suivant :

**Début** : Extraction de contours :

**Pour** chaque pixel de l'image binaire  $I(x,y)$  **faire**

**Si**  $I(x,y)$  = point blanc **alors**

**Si** tous les pixels adjacents sont blancs **alors**

$I(x,y)$  = point gris moyen : intérieur du motif :

**Sinon**  $I(x,y)$  = point blanc : contour du motif :

**Fsi**

**Fsi**

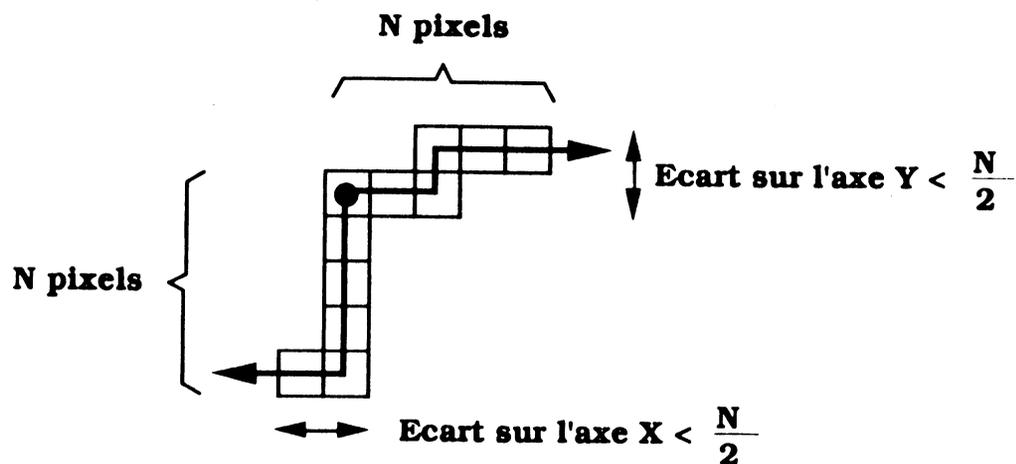
**Fp**

**Fin** :

#### **IV.6 Algorithme pour la recherche et l'identification des coins (photo IV.3.e)**

La recherche des coins est réalisée sur les contours binaires d'épaisseur 1 pixel. Son principe consiste à déterminer sur l'image des contours les angles droits composés de 2 chaînes numériques de  $N$  pixels contiguës et orientées dans des directions perpendiculaires (cf. figure IV.13).

La sélection des chaînes numériques dépend de la longueur du motif élémentaire. Cette longueur est définie grâce au grandissement du microscope (cf. chapitre IV.4). En théorie, une valeur de 3 pixels est suffisante pour extraire un contour significatif sur lequel les coins pourront être localisés. Cependant, les fluctuations des contours, introduites par la faible qualité de l'image, ne permettent pas de travailler de façon fiable avec des dimensions aussi petites. L'expérimentation a montré qu'à partir de 6 pixels, l'opération de localisation des coins offrait d'excellents résultats. Cette valeur a donc été retenue pour la mise au point de notre procédure de comparaison.



**Figure IV.13** Définition d'un coin

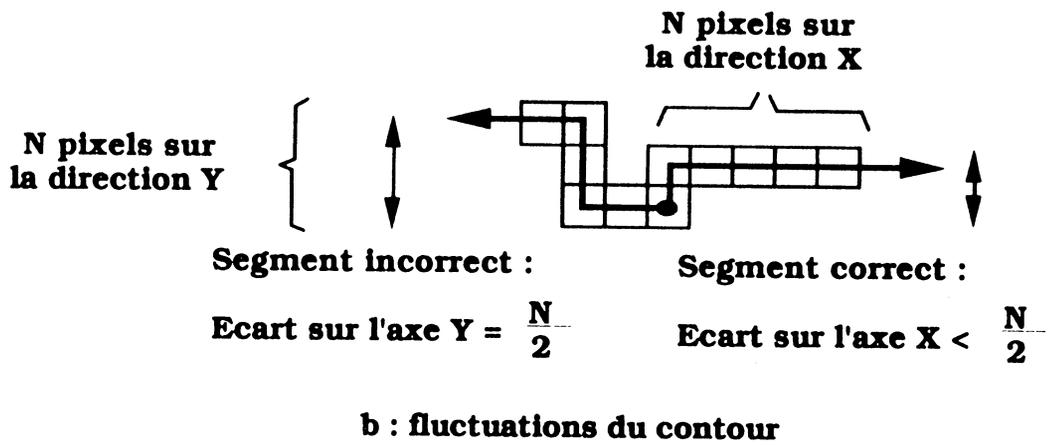
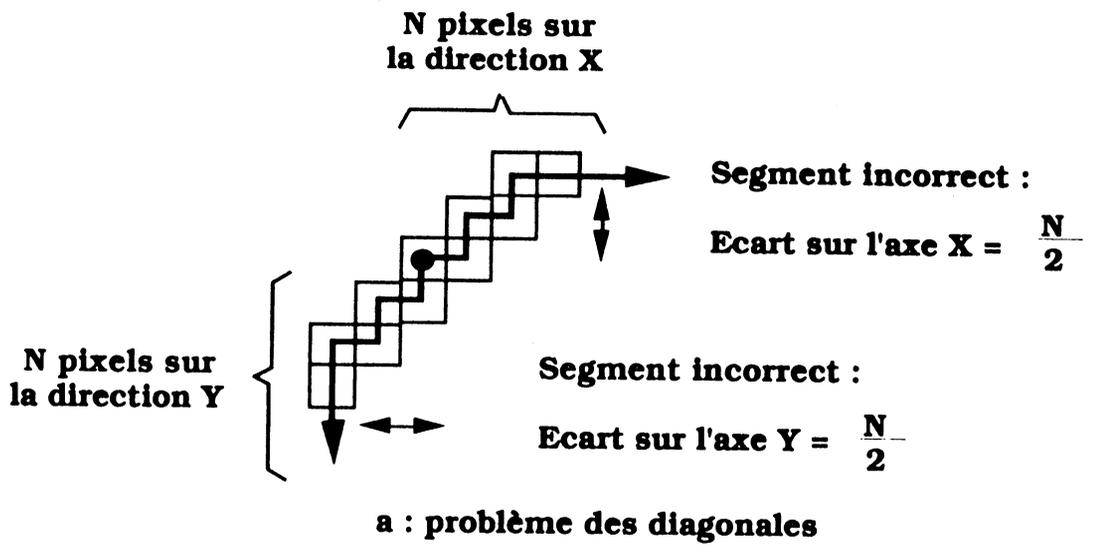
En tenant compte de ces considérations, un ensemble de pixels du contour sera considéré comme un coin s'il respecte les conditions suivantes :

- le nombre de pixels composant la chaîne numérique doit être au moins égal à la longueur d'un motif élémentaire ;
- l'écart en pixels de la chaîne numérique par rapport aux axes principaux doit être inférieur à la moitié de la longueur du motif élémentaire (cf figure IV.13) ; cette dernière condition a été introduite pour éviter les erreurs de localisation sur les diagonales (cf. figure IV.14.a) ou les fluctuations du contour (cf. figure IV.14.b).

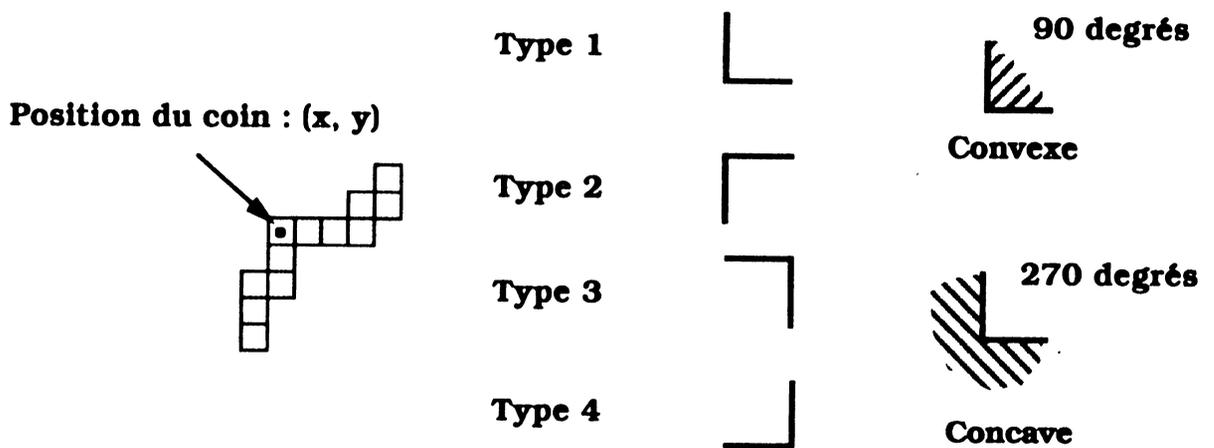
Le point de rencontre des 2 segments représente le point de singularité du coin. Un fois ce point déterminé, le coin est identifié en fonction (cf. figure IV.15) :

- de sa position ; elle correspond aux coordonnées du pixel marquant le point de singularité.
- du type ; il définit l'orientation de l'angle dans le plan de l'image.
- de la convexité ou de la concavité ; elle caractérise la valeur de l'angle droit qui peut être soit de 90 degrés, soit de 270 degrés.

Les coins ainsi identifiés transforment l'image en une liste de valeurs qui servira au calcul du décalage entre les images à comparer.



**Figure IV.14** Erreur de localisation des coins



**Figure IV.15** Identification des coins

l'algorithme de détection des coins est appliqué à tous les points constituant les contours. Sa description générale est la suivante :

- signification des identificateurs utilisés :

image(x,y)	->	image binarisée
x,y	->	coordonnées des pixels de l'image
coin(x,y)	->	position du pixel marquant le coin
seg	->	dimension en pixels du motif élémentaire
longueur	->	longueur de la chaîne numérique composant le coin
déport	->	écart de la chaîne numérique par rapport aux axes principaux
limite_déport	->	limite supérieure du déport
flag	->	variable temporaire

test\_convexité -> procédure de test de la convexité du coin.  
Le test de convexité s'effectue sur l'image de contour ; son principe consiste à repérer les pixels de gris moyen marquant l'intérieur du contour.

coin\_type\_1, coin\_type\_2, coin\_type\_3 et coin\_type\_4 -> procédures de détermination de l'orientation du coin

### Programme principal

**Début** : détection des coins

**Pour** chaque pixel de image(x,y) **Faire**

**Si** image(x,y) = point blanc

**Alors** : chercher coin type 1 :

**Si** (procédure coin\_type\_1) VRAI

**Alors**

test\_convexité

mémoriser le coin

incrémenter la position du pixel image(x,y)

**Si non** : chercher coin type 2 :

**Si** (procédure coin\_type\_2) VRAI

```

Alors
test_convexité
mémemoriser le coin
incrémenter la position du pixel image(x,y)
Sinon : chercher coin type 3 :
    Si (procédure coin_type_3) VRAI
        Alors
        test_convexité
        mémémoriser le coin
        incrémenter la position du pixel image(x,y)
        Sinon : chercher coin type 4 :
            Si (procédure coin_type_4) VRAI
                Alors
                test_convexité
                mémémoriser le coin
                incrémenter la position du pixel
                image(x,y)
                Sinon
                coin incorrect
                incrémenter la position du pixel
                image(x,y)
                Fsi
            Fsi
        Fsi
    Fsi
Fp
Fin :

```

### Sous-programmes

**Début** : procédure chercher coin\_type\_1

flag = 0

limite\_déport = seg /2

longueur = 0

déport = 0

écart = 0

: recherche dans la direction  $X > 0$  :

**Tant que** longueur < seg+1 **Faire**

**Si** image(x + 1, y) = point blanc

**Alors**

flag = 0

x = x + 1

longueur = longueur + 1

**Sinon** **Si** image(x + 1, y + 1) = point blanc

**Alors**

flag = 1

x = x + 1

y = y + 1

longueur = longueur + 1

**Sinon** **Si** image(x + 1, y - 1) = point blanc

**Alors**

flag = -1

x = x + 1

y = y - 1

longueur = longueur + 1

**Sinon** retour FAUX

**Fsi**

**Fsi**

**Fsi**

écart = écart + flag

**Si** valeur absolue ( écart) > limite\_déport

**Alors**

retour FAUX

**Fsi**

**Ftq**

: recherche dans la direction  $Y > 0$  :

longueur = 0

déport = 0

**Tant que** longueur < seg + 1 **Faire**

**Si** image(x , y + 1) = point blanc

**Alors**

```

flag = 0
Y = Y + 1
longueur = longueur + 1
Sinon      Si image(x + 1, y + 1) = point blanc
              Alors
                flag = 1
                x = x + 1
                y = y + 1
                longueur = longueur + 1
              Sinon      Si image(x - 1, y + 1) = point blanc
                            Alors
                              flag = -1
                              x = x - 1
                              y = y + 1
                              longueur = longueur + 1
                            Sinon retour FAUX
                              Fsi
              Fsi
Fsi
écart = écart + flag
Si valeur absolue ( écart) > limite_déport
Alors
  retour FAUX
Fsi
Ftq
  retour VRAI
Fin :
```

Remarque : La recherche des autres types de coins est similaire à la procédure "coin\_type\_1" décrite précédemment ; seule l'incrémentation des coordonnées des pixels changera selon la direction de l'axe de recherche.

```

Début : test_convexité
Si coin(x,y) = coin de type 1
Alors      Si Image(x + seg/2, y + seg/2) = point de gris moyen
```

```

Alors coin convexe
Sinon coin concave
Fsi
Sinon Si coin(x,y) = coin de type 2
Alors Si Image(x + seg/2, y - seg/2) = point de gris moyen
Alors coin convexe
Sinon coin concave
Fsi
Sinon Si coin(x,y) = coin de type 3
Alors Si Image(x - seg/2, y - seg/2) = point de
gris moyen
Alors coin convexe
Sinon coin concave
Fsi
Sinon Si coin(x,y) = coin de type 4
Alors Si Image(x - seg/2, y + seg/2)
= point de gris moyen
Alors coin convexe
Sinon coin concave
Fsi
Sinon coin incorrect
Fsi
Fsi
Fsi
Fsi
Fin :

```

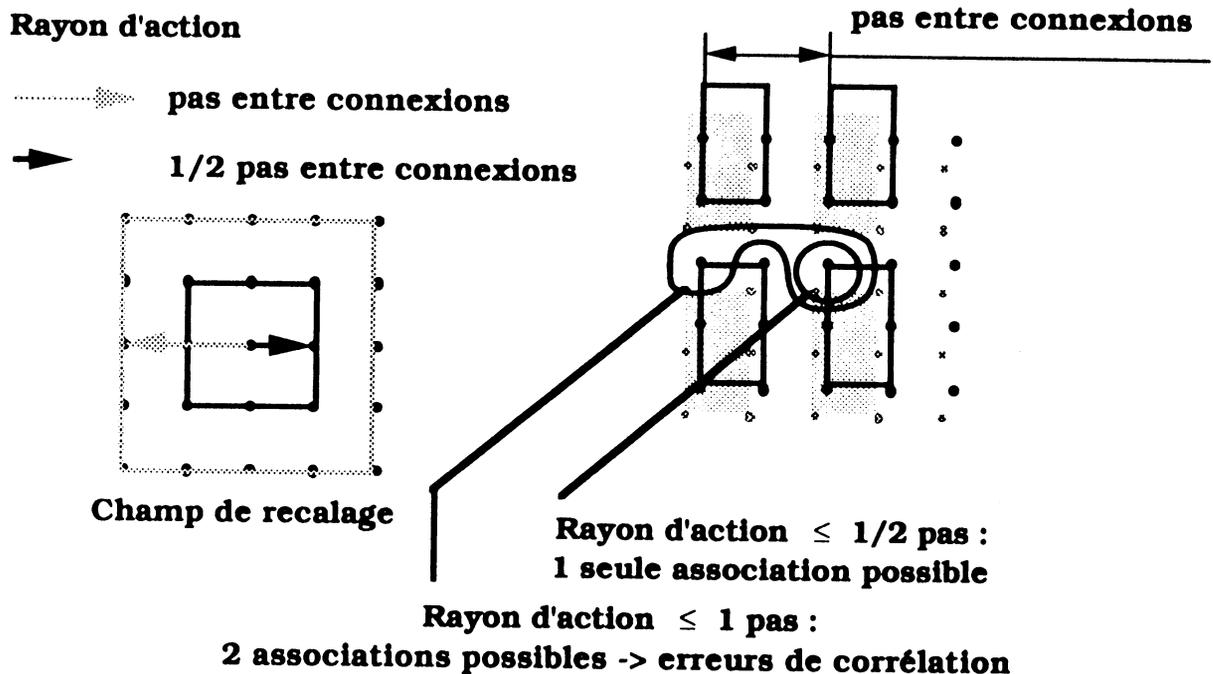
#### IV.7 Algorithme pour le calcul du décalage

Cette dernière étape permet de calculer les écarts en translation afin de réaliser l'exacte mise en correspondance des images à comparer.

Les listes de coins, générées au cours de l'étape précédente, sont utilisées pour former des couples de coin avec les critères suivants :

- les types de coin doivent être identiques ;
- les coins doivent posséder le même angle (concavité ou convexité) ;

- les différences de position ( $dx$  et  $dy$ ) des 2 coins formant le couple doivent être contenues dans le champ de recalage. Ce dernier dépendra de l'organisation des motifs observés. Dans le cas de motifs redondants, le champ de recalage ne pourra dépasser un rayon d'action supérieur à la moitié du pas entre connexions, sous peine de comparer des motifs identiques par la forme mais différents par la position (cf. figure IV.16). Néanmoins, si les motifs ne sont pas redondants, ce risque de confusion est réduit et le champ de recalage peut être doublé (distance totale du pas entre connexion). La distance du rayon d'action sera déterminée au cours de l'étape d'initialisation, en fonction des motifs à analyser.

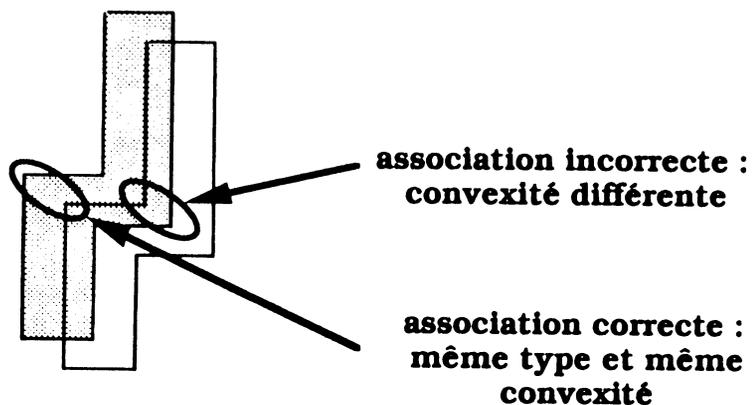


**Figure IV.16** Définition du champ de recalage dans le cas de motifs redondants

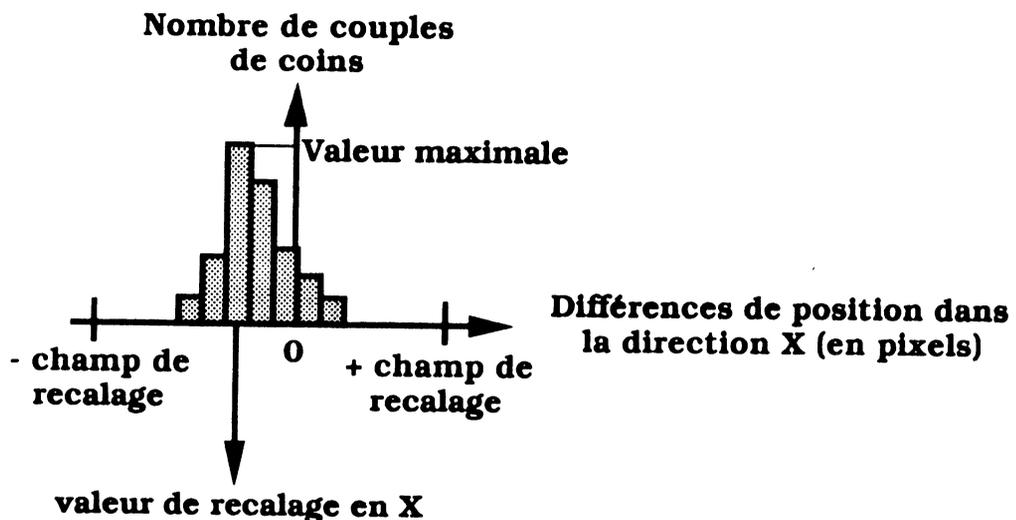
Le premier critère, basé sur l'orientation des coins, assure une association de motifs identiques uniquement par la forme et non par la position. Dans un deuxième temps, une notion de convexité a été introduite pour s'affranchir des différences d'angles qui, dans certaines configurations, peuvent entraîner de mauvaises associations de coins (cf. figure IV.17). Finalement, la prise en compte de la position des motifs est réalisée à l'aide du troisième critère.

A l'issue de cette association, le décalage est déterminé à partir de la position relative de chaque couple de coins. Les différences de position sont effectuées séparément sur les axes X et Y. Les écarts les plus fréquents seront retenus pour le recalage des images à comparer.

Ce calcul est réalisé à l'aide des courbes histogrammes représentant pour chaque direction le nombre de couples de coins en fonction des écarts en pixels ; les valeurs les plus fréquentes, qui correspondent dans cette représentation aux valeurs maximales des courbes histogrammes, donneront les écarts les plus probables pour la correction en translation (cf. figure IV.18).



**Figure IV.17** Association des coins : problème de la convexité



**Figure IV.18** Histogrammes de recalage sur la direction X

l'implémentation de ces calculs est représentée par l'algorithme suivant :

- signification des identificateurs utilisés :

dx, dy	->	Différence de position en nombre de pixels
histoX[i], histoY[i]	->	Histogrammes de recalage dans les directions X et Y
i	->	Indice du tableau histogramme
coin réf.	->	liste des coins du circuit de référence
coin déf.	->	liste des coins du circuit défaillant
rayon	->	longueur en pixels du champ de recalage

**Début** : calcul du décalage

**Pour** chaque coin réf. **Faire**

**Pour** chaque coin déf. **Faire**

**Si** même type de coin **Alors**

**Si** même convexité **Alors**

dx = (position en X de l'élément de coin réf) -  
(position en X de l'élément de coin déf.)

dy = (position en Y de l'élément de coin réf) -  
(position en Y de l'élément de coin déf.)

**Si**  $|dx| < \text{rayon}$  et  $|dy| < \text{rayon}$  **Alors**

histoX[dx] = histoX[dx] + 1

histoY[dy] = histoY[dy] + 1

**Sinon** mauvaise association

**Fsi**

**Fsi**

**Fsi**

**Fp**

**Fp**

: calcul des écarts de recalage décalX et décalY :

décalX = maximum de histoX[dx]

décalY = maximum de histoY[dy]

#### **IV.8 Conclusion**

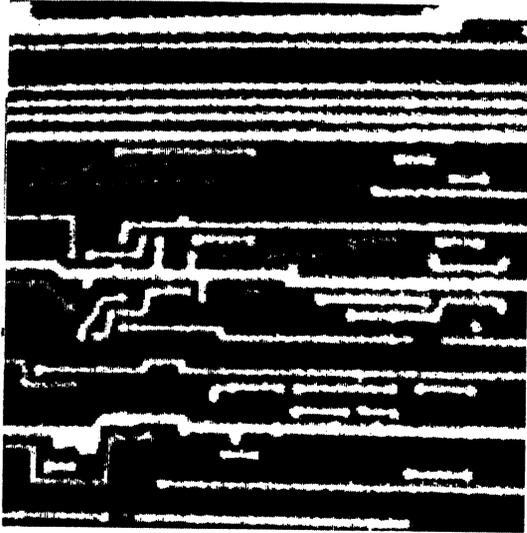
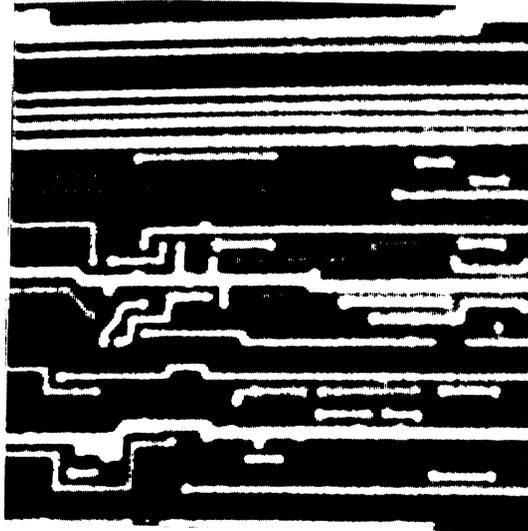
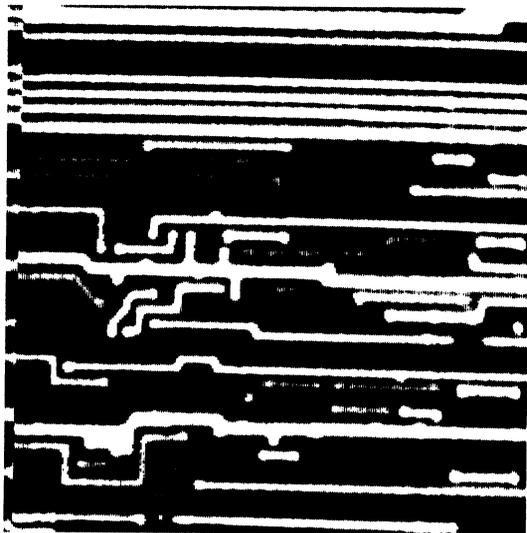
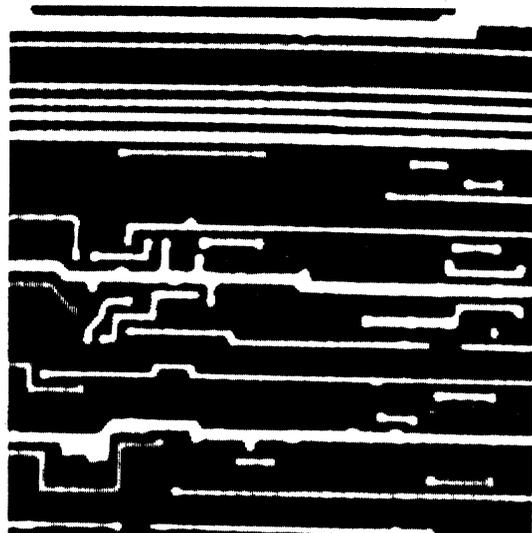
Les algorithmes présentés dans ce chapitre montrent la faisabilité d'un processus de superposition automatique d'images par la technique de détection des coins.

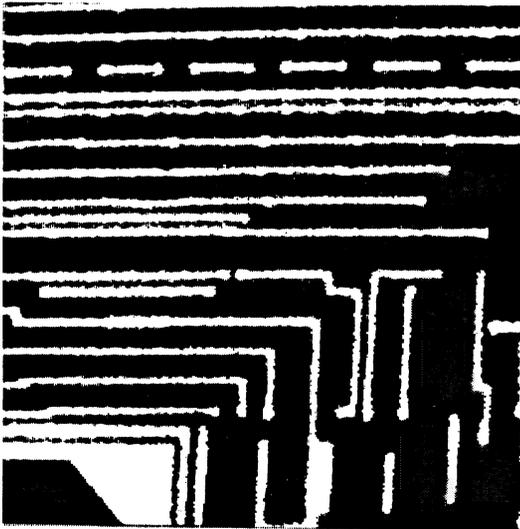
Le choix de mettre en œuvre un détecteur binaire se justifie d'une part par la nature des images à traiter (fortement bruitées) et d'autre part par l'équipement de test disponible (dépourvu de processeurs câblés).

Cependant l'efficacité d'une approche à base de détecteur binaire dépend du bon déroulement de l'étape de segmentation. De plus, le gain de rapidité d'exécution n'est appréciable que dans notre environnement de test.

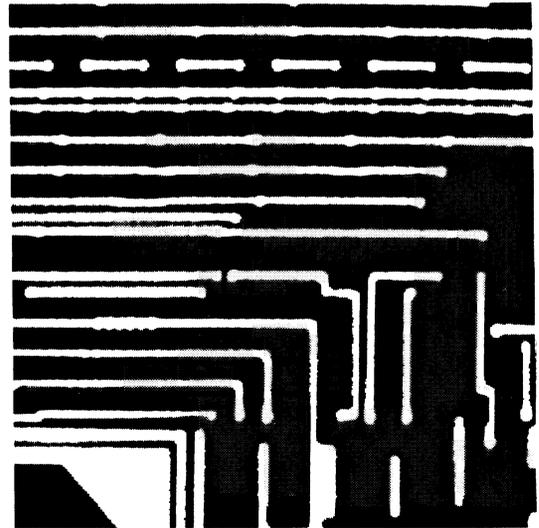
Pour une meilleure optimisation du système intégré de test par faisceau d'électrons, des développements futurs se devront de définir un environnement spécifique qui permettra d'intégrer les algorithmes (de recherche des coins par exemple) sur des opérateurs câblés.

Par ailleurs, ces recherches pourraient prendre en compte les détecteurs en niveaux de gris qui permettent d'assurer un recalage automatique indépendant de tout prétraitement. Néanmoins, une étude préalable de faisabilité devra être effectuée afin de déterminer l'efficacité réelle de ces détecteurs sur des images obtenues en contraste de potentiel.

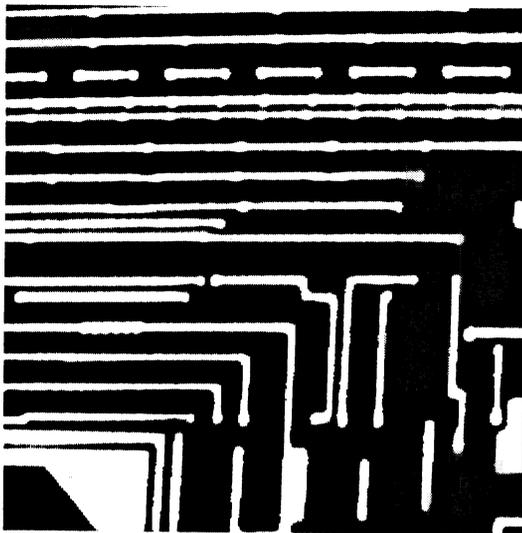
**Images stroboscopiques****Photo IV.1.a** Pulse de 20 ns**Photo IV.1.b** Pulse de 100 ns**Photo IV.1.c** Pulse de 200 ns**Photo IV.1.d** Pulse de 1  $\mu$ s

**Intégration d'images**

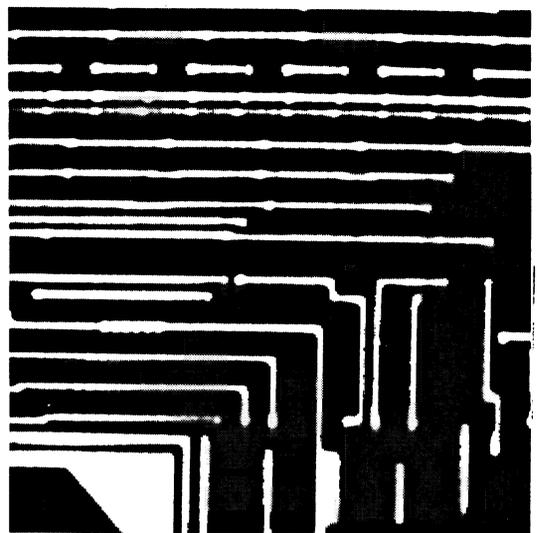
**Photo IV.2.a** Image initiale acquise en stroboscopie - pulse de 20 ns



**Photo IV.2.b** Image moyennée sur 10 trames

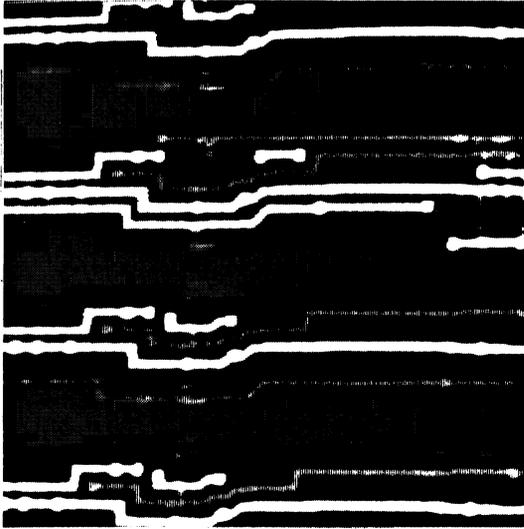


**Photo IV.2.c** Image moyennée sur 20 trames

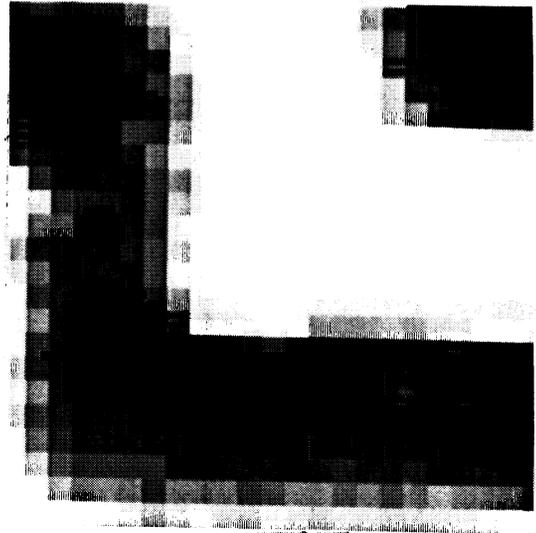


**Photo IV.2.d** Image moyennée sur 50 trames

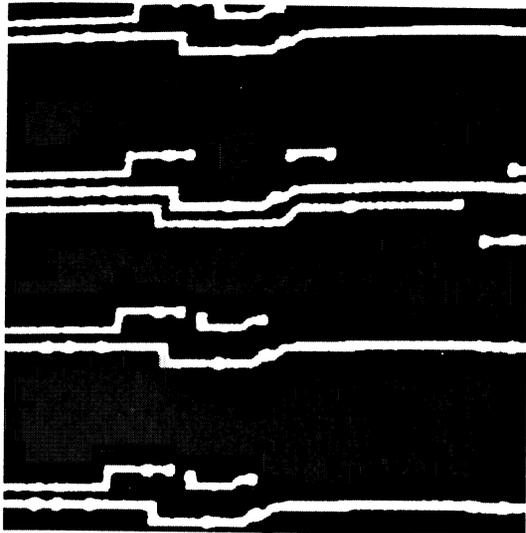
### Détection des coins



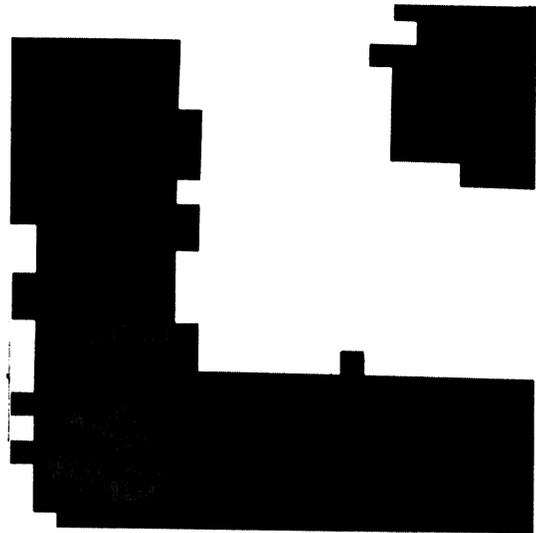
**Photo IV.3.a** Image initiale



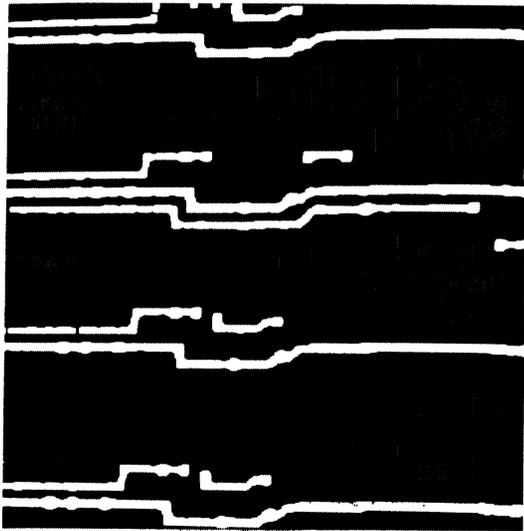
Zoom x 20



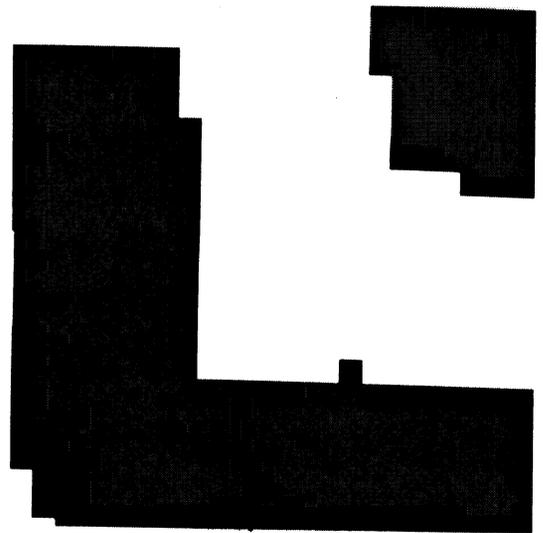
**Photo IV.3.b** Image binaire



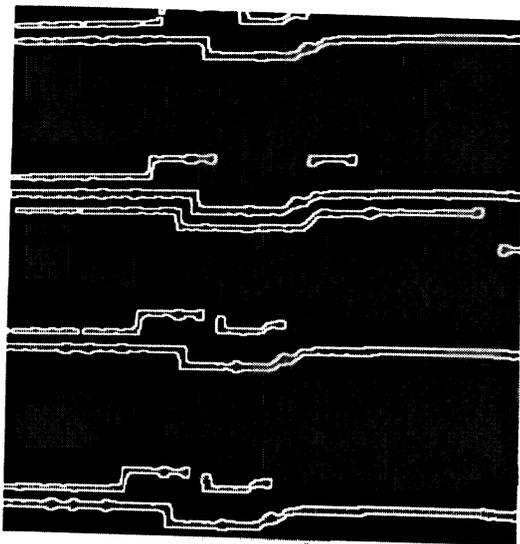
Zoom x 20



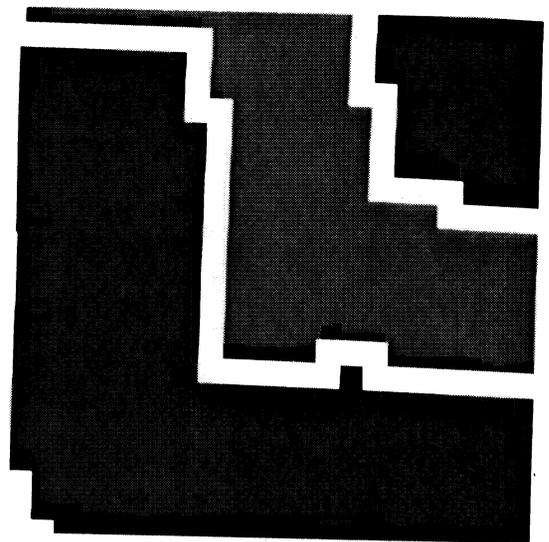
**Photo IV.3.c** Elimination des artéfacts



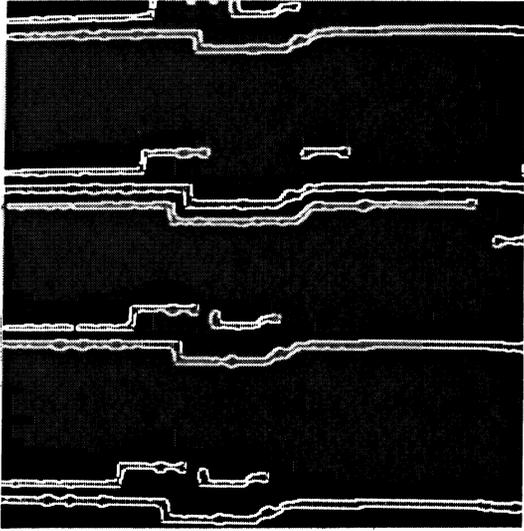
Zoom x 20



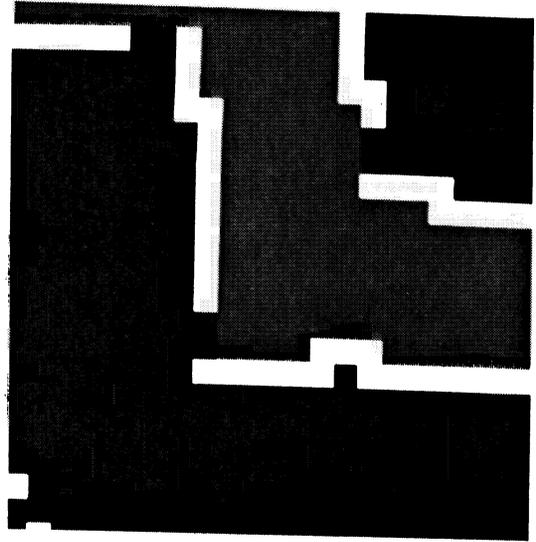
**Photo IV.3.d** Extraction des contours



Zoom x 20



**Photo IV.3.e** Localisation des coins



Zoom x 20

**TROISIEME PARTIE -  
ETUDE EXPERIMENTALE**



**CHAPITRE V**  
**REALISATION PRATIQUE**

TROISIEME PARTIE

---

**ETUDE EXPERIMENTALE**



## V REALISATIONS PRATIQUES

Les réalisations pratiques ont été développées dans le cadre d'un projet monté en collaboration avec la société CAMECA. L'objectif principal de ce projet visait à automatiser les techniques de comparaison d'images sur leur testeur prototype appelé CAMECA ST15.

Dans ce cadre, nous avons donc bénéficié d'un environnement matériel adapté au test de circuits intégrés par faisceau d'électrons et notre travail a consisté à étudier et mettre au point, sur ce matériel, un logiciel d'analyse de défaillances : basé sur la méthodologie, dite "par référence à un circuit réputé bon", qui a été présentée au chapitre II, intégrant la procédure de comparaison automatique d'images définie dans le chapitre précédent, et de plus, exploitable industriellement, c'est à dire disposant d'une interface graphique ergonomique et assistée en vue de son utilisation en "clientèle".

Dans la suite, après une rapide description des principaux éléments constituant la station de test par faisceau d'électrons, dans une deuxième partie, nous présentons le logiciel de comparaison automatique d'images, dénommé COMPATOOLS et développé dans le cadre de ce projet.

### V.1 Equipement de test

La station de test est constituée d'un ensemble de modules organisés autour du testeur à faisceau d'électrons.

Cet équipement, dont l'architecture est présentée en figure V.1, se compose du matériel suivant :

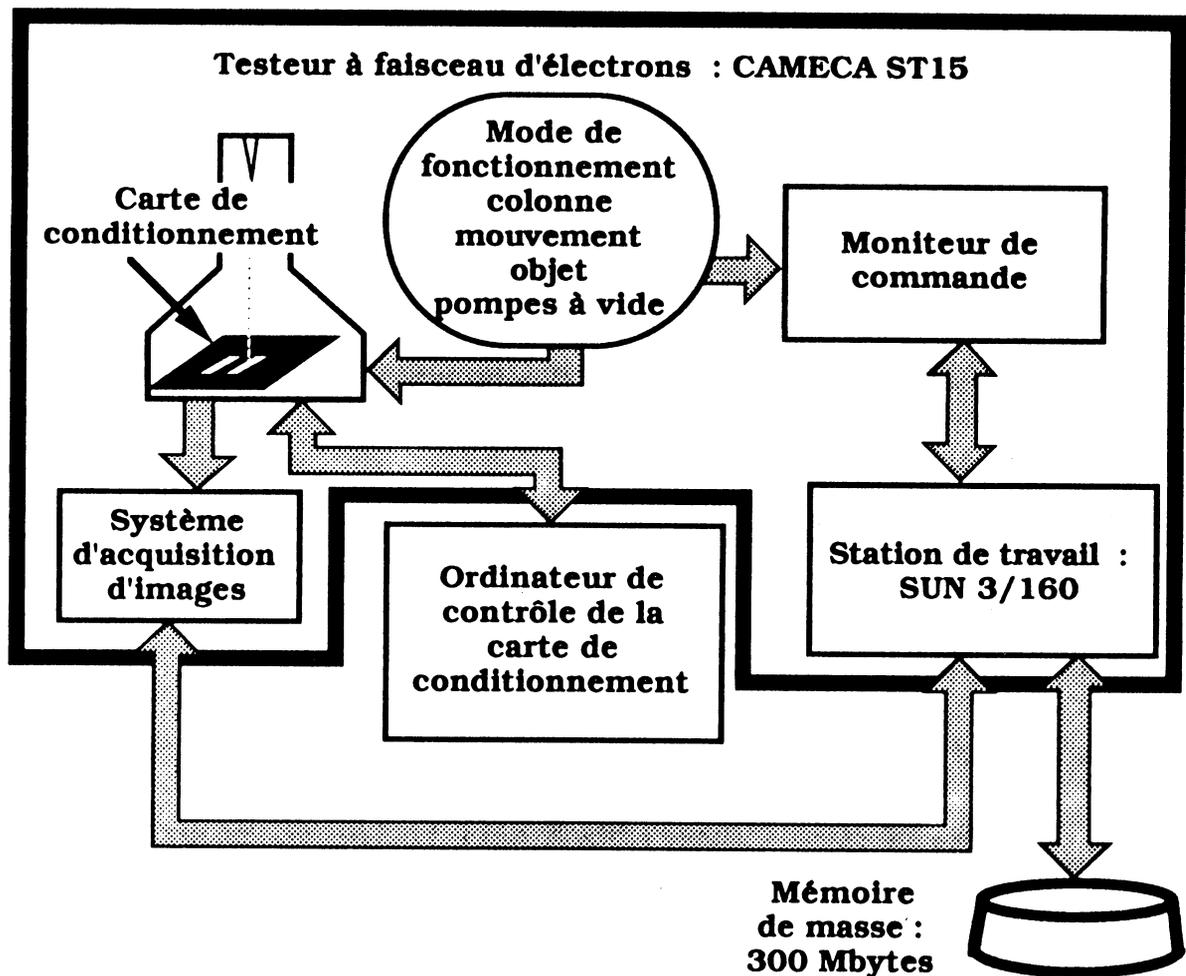
#### V.1.1 Le testeur CAMECA ST15

Le prototype CAMECA ST15 propose les modes de fonctionnement classique d'un testeur à faisceau d'électrons, à savoir **[BOU87]** :

- \* le mode image (image classique en électron secondaire) ;
- \* le mode stroboscopie de potentiel ("voltage coding") ;
- \* le mode photo instantanée (image stroboscopique) ;

- \* le mode contraste de phases relatives ;
- \* le mode analyseur logique ("logic state mapping");
- \* le mode forme d'onde.

Ce testeur a été conçu autour d'un moniteur de commande qui permet une automatisation poussée de la station de test. Cette organisation a été fortement appréciée dans le développement de ce projet, qui vise à automatiser l'application d'analyse de défaillances.



**Figure V.1** Architecture de la station de test

Le moniteur de commande se compose d'une carte microprocesseur MC68000 qui pilote :

- \* les paramètres de configuration de la colonne ;
- \* le déplacement de la platine porte-objet ;

- \* la gestion du vide ;
- \* les divers modes de fonctionnement.

Le dialogue avec l'utilisateur du testeur à faisceau d'électrons peut être réalisé selon 2 modes :

- \* le mode manuel : les ordres sont envoyés à partir d'un terminal via une liaison série. Le terminal est directement émulé à partir d'une fenêtre de la station de travail (SUN 3/160).

- \* le mode programmé : les paramètres sont contrôlés par l'intermédiaire de programmes évolués (langages C ou Fortran). Une bibliothèque regroupe l'ensemble des commandes sous forme de modules indépendants. Dans ce mode, les ordres sont envoyés par l'intermédiaire d'une liaison parallèle.

Par ailleurs, les caractéristiques de la chambre à vide sont très avantageuses pour la mise en œuvre de notre procédure d'analyse de défaillances. Tout d'abord, elle est équipée d'une platine motorisée assez performante :

- \* elle permet des déplacements avec une précision de  $1 \mu\text{m}$  ;
- \* le déplacement est réalisé à l'aide d'un système de règles optiques qui assure un positionnement en coordonnées absolues, évitant ainsi de cumuler les erreurs de déplacement au cours de positionnements successifs ;

- \* la mobilité de la platine sous le faisceau, permet de couvrir une surface de  $50 \times 80 \text{ mm}$ . Ce large champ d'action a été utilisé pour placer sur la même platine porte-objet les 2 circuits à comparer.

Ensuite, les larges dimensions de la chambre à vide permettent d'accueillir des cartes aux dimensions de  $160 \times 230 \text{ mm}$ . Cet avantage a été utilisé pour placer à l'intérieur de la chambre à vide une carte d'émulation (de conditionnement) des circuits à tester (cf. chapitre V, §V.1.4).

### **V.1.2 La station de travail SUN 3/160**

Le système de traitement informatique est assuré par une station de travail de type SUN 3/160. Sa configuration offre à l'utilisateur un environnement multifenêtre et multitâche qui permet aisément de gérer les modules suivants :

- \* le testeur à faisceau d'électrons par l'intermédiaire de son moniteur de commande ;

- \* le système d'acquisition d'images ;

Au niveau logiciel, l'environnement graphique a permis de développer en langage évolué (langage C) les traitements d'imagerie destinés à la comparaison d'images automatique. Nous avons également utilisé les bibliothèques de fenêtrage SUNVIEW pour le développement des interfaces graphiques (cf. chapitre V, §V.2.4).

Au niveau matériel, la station SUN 3/160 possède les caractéristiques suivantes :

- \* un microprocesseur MC68020 qui fonctionne à 16,67 Mhz ;
- \* une mémoire centrale de 4 Mbits ;
- \* une mémoire de masse de 140 Moctets qui a été étendue à 440 Moctets pour les besoins de l'imagerie : une partition de 300 Moctets est réservée à la procédure de comparaison d'images et permet de stocker environ 1200 images.

Cette station offre une puissance de calcul de 2 Millions d'Instructions Par Seconde (MIPS). Cette puissance sera augmentée à 10 MIPS sur la première génération commerciale de testeurs CAMECA-ST15 qui seront équipés de stations de travail à architecture RISC (Reduced Instruction Set Computer). Cette évolution sera principalement appréciée au niveau des temps d'exécution des traitements d'images, qui n'utilisent actuellement aucun processeur spécialisé. Les performances du logiciel présenté au chapitre VI montreront que ces nouvelles stations pourront diminuer d'un facteur 4 les temps d'exécution.

### **V.1.3 Système d'acquisition**

Le système d'acquisition se présente sous la forme d'un module relié au système d'analyse par une liaison de type analogique, correspondant à l'acquisition des signaux vidéo au standard télévision. Les communications avec le système de traitement informatique sont réalisées par l'intermédiaire du bus VME de la station de travail. La figure V.2 présente l'implantation de ce système dans l'environnement de la station de test.

Le module d'acquisition, réalisé par [MAL87], se compose (cf. figure V.3) :

- \* d'un microprocesseur MC68000 ;
- \* de 2 méga-octets de mémoire dynamique ;
- \* des interfaces de lecture de pixels numérisés ;
- \* d'une mémoire de programme rapide.

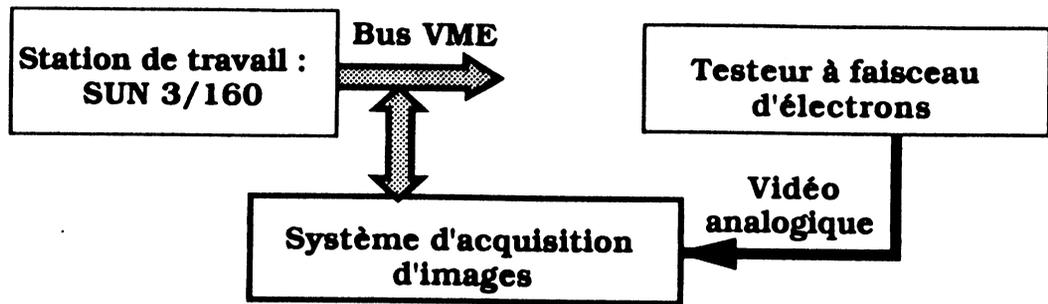


Figure V.2 Environnement du système d'acquisition d'images

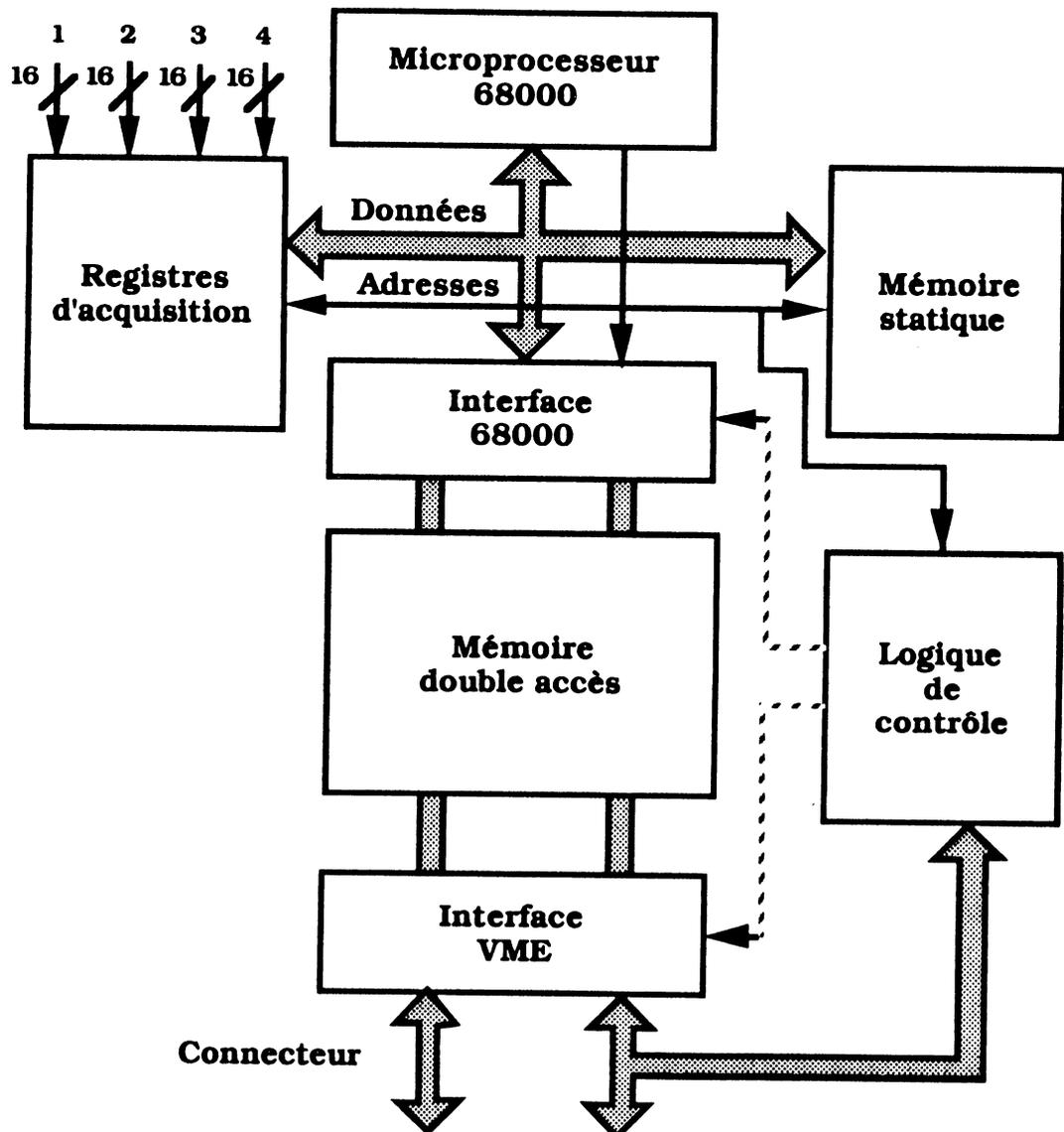


Figure V.3 Architecture de la carte d'acquisition d'images

La mémoire de programme rapide permet de stocker les programmes utiles au microprocesseur de la carte d'acquisition.

Les images acquises sont stockées dans une mémoire dynamique (de 2 méga-octets), dont le double accès permet de stocker les données digitalisées d'une part, et la lecture de ces données par le système de traitement informatique d'autre part.

Cette configuration permet d'acquérir des images en un temps minimal de 0.8 secondes. Les images sont digitalisées au format de 256x256, 512x512 ou 1024x1024 pixels avec une profondeur de 8 ou 16 bits. De plus, elle offre la possibilité d'effectuer des opérations d'intégration par moyenne sur un maximum de 256 trames.

Enfin, une interface utilisateur, développée par **[GIR88]**, permet le contrôle de la carte d'acquisition à partir de la station de travail. Elle offre un mode d'affichage continu qui permet de visualiser les images quasiment en temps réel.

Une partie de cette interface a été intégrée au logiciel de comparaison automatique d'images (cf. chapitre V, §V.2.4).

#### **V.1.4 Carte de conditionnement**

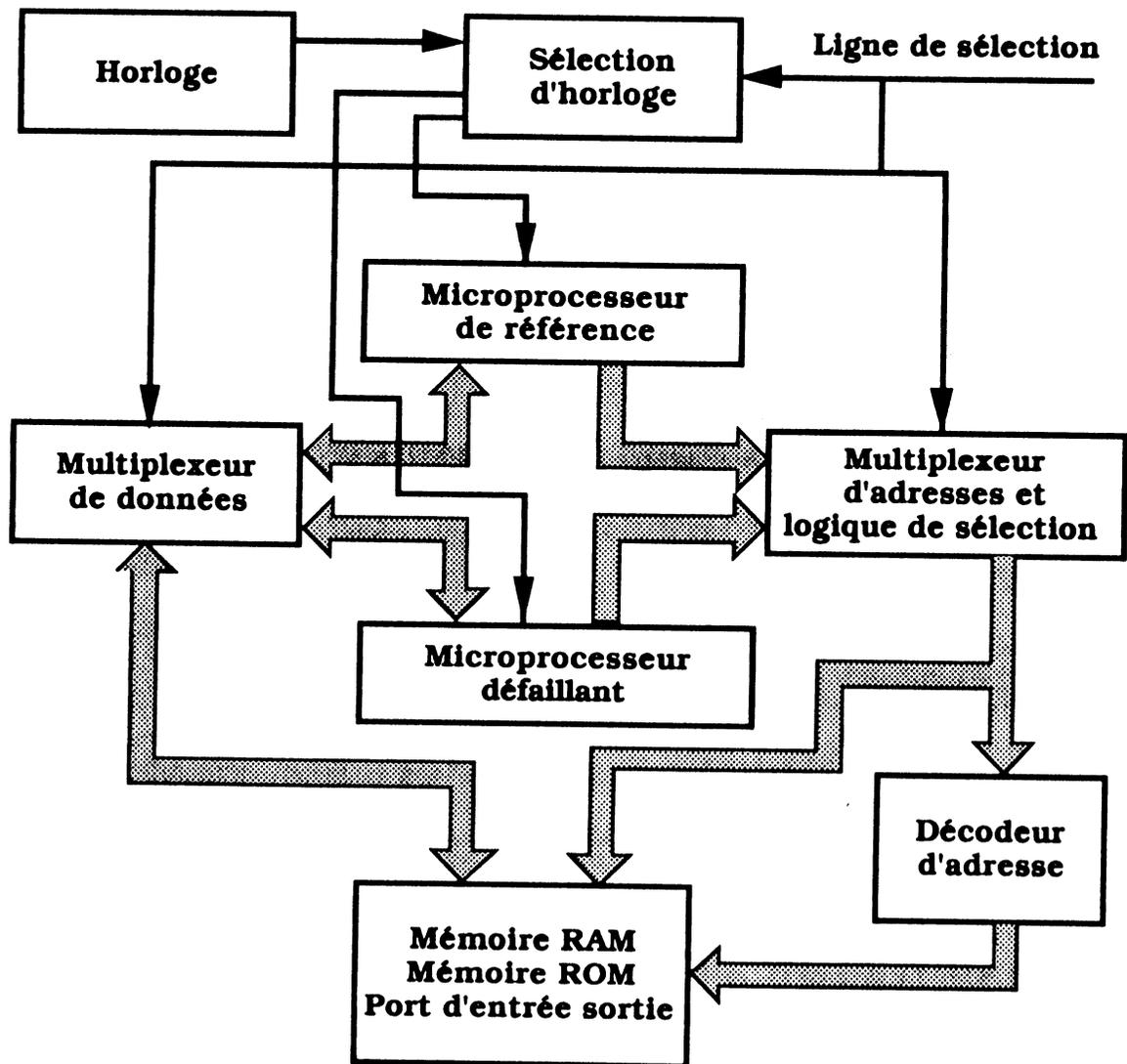
Le conditionnement des circuits est réalisé par une carte spécialement développée pour l'étude des circuits microprocesseurs 68000 (cf. chapitre VI). Sa réalisation est le fruit d'une collaboration avec l'Université de Barcelone dans le cadre d'une Action Intégrée France-Espagne.

La différence principale présentée par ce système de conditionnement par rapport aux systèmes classiques **[BAI84]** est qu'il est entièrement placé à l'intérieur de la chambre à vide du testeur. Ce type d'organisation a été recherché pour limiter la connectique à travers la chambre à vide, et éviter ainsi la dégradation des signaux utiles au fonctionnement des circuits.

La taille de la carte a donc été une des contraintes principales pour sa mise en œuvre qui a nécessité l'intégration des 2 circuits à comparer et de l'électronique de contrôle associée dans un espace limité aux dimensions de la chambre à vide (160 x 230 mm).

Sa structure fonctionnelle, présentée en figure V.4 se compose :

- \* des 2 microprocesseurs à comparer (référence et test) ;
- \* d'un système d'horloge, interne (8 MHz) ou externe ;
- \* d'un bus multiplexé et d'une logique de sélection de circuit ;
- \* d'un décodeur d'adresse ;
- \* d'une mémoire ROM pour le contrôle logiciel de la carte de conditionnement ;
- \* d'une mémoire RAM pour stocker les séquences de test ;
- \* d'un port d'entrée/sortie pour les communications avec le système informatique externe contrôlant la carte.

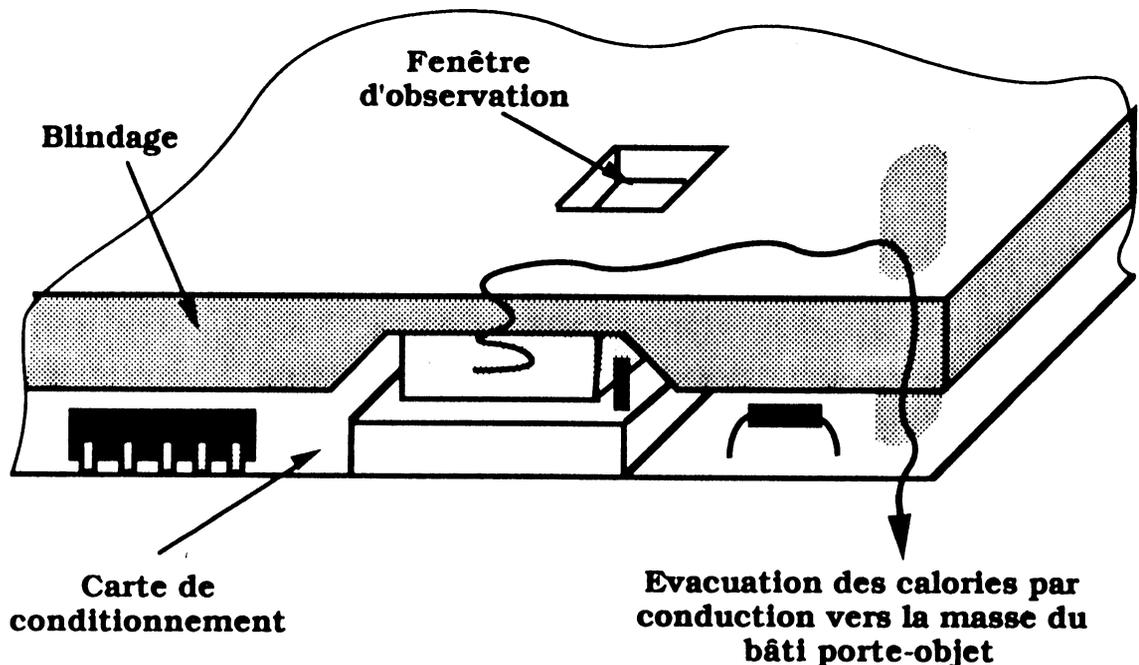


**Figure V.4** Structure fonctionnelle de la carte de conditionnement

Au niveau logiciel, un moniteur (ITF68K), développé sur PC (Personal Computer) à l'université de Barcelone, offre une interface de contrôle qui permet l'édition et le chargement en mémoire RAM des séquences de test, directement en langage assembleur.

Par ailleurs, la synchronisation du pulse en stroboscopie de faisceau est réalisée par un décodeur d'adresses qui a été ajouté à l'extérieur de la chambre à vide. Ce système détecte le passage de la séquence de test par une adresse fixe, et génère ainsi un signal de synchronisation. L'observation en mode dynamique nécessite donc des séquences de test qui bouclent sur une même adresse. L'organisation de ces séquences est présentée au chapitre VI.

Finalement, un blindage en aluminium présentant 2 fenêtres pour l'observation des circuits sous microscope (cf. photo V.3), a été placé sur cette carte de conditionnement. Son rôle est double : tout d'abord, il protège les composants des effets d'irradiation du faisceau ; puis il élimine, grâce au contact des composants sous le blindage, les excès de calories qui, vu l'absence de convection dans la chambre à vide, ne peuvent être évacués que par conduction (cf. figure V.5).



**Figure V.5** Blindage de la carte de conditionnement

## V.2 Description du logiciel de comparaison automatique d'images - COMPATTOOLS

Le logiciel "COMPATTOOLS" est un outil dédié à la localisation automatique d'erreur par comparaison d'images.

Ce logiciel a été développé dans le cadre de cette thèse en vue d'automatiser la procédure d'analyse de défaillances sur le testeur prototype : le CAMECA ST15. Dans cet objectif, la réalisation a été guidée par les fonctionnalités suivantes :

- \* contrôler automatiquement tous les modules (colonne, carte d'acquisition, mouvement objet, ...) de la station de test afin d'assurer une automatisation complète de la procédure de comparaison d'images ;
- \* intégrer les opérateurs élémentaires de traitement d'images pour réaliser les opérations de comparaison manuelle et automatique ;
- \* présenter une interface graphique conviviale permettant d'analyser facilement les résultats de différences.

La dernière fonctionnalité est importante pour notre procédure, qui évolue dans un environnement relativement complexe, et qui traite une masse importante d'informations liées à l'imagerie. Dans ces conditions, l'ergonomie est devenu l'un des critères importants pour le développement de ce système. La plupart des industriels, évoluant dans le marché du test sans contact, ont attaché une grande importance à la convivialité de leurs applications, qu'ils destinent à des utilisateurs ayant peu d'expérience dans ce domaine du test. En effet, ce critère est bien souvent à la base du succès de leurs outils de test. Pour illustrer ce commentaire, on peut citer la réussite dans le domaine du testeur SENTRY IDS 5000 [CON87] avec son application de mise au point de circuits prototypes.

Aussi, cette composante n'a pas été négligée dans le développement de ce logiciel qui devrait à court terme être implanté sur la génération industrielle des testeurs CAMECA ST15.

Dans ce paragraphe, nous exposerons tout d'abord la structure générale du logiciel. La gestion et l'organisation des données seront présentées dans une deuxième partie. La troisième partie sera consacrée à la description des fonctions d'application. Une quatrième partie présentera l'interface graphique. Enfin, la dernière partie de ce chapitre présentera les

principales opérations nécessaires à la mise en œuvre la procédure automatique de comparaison.

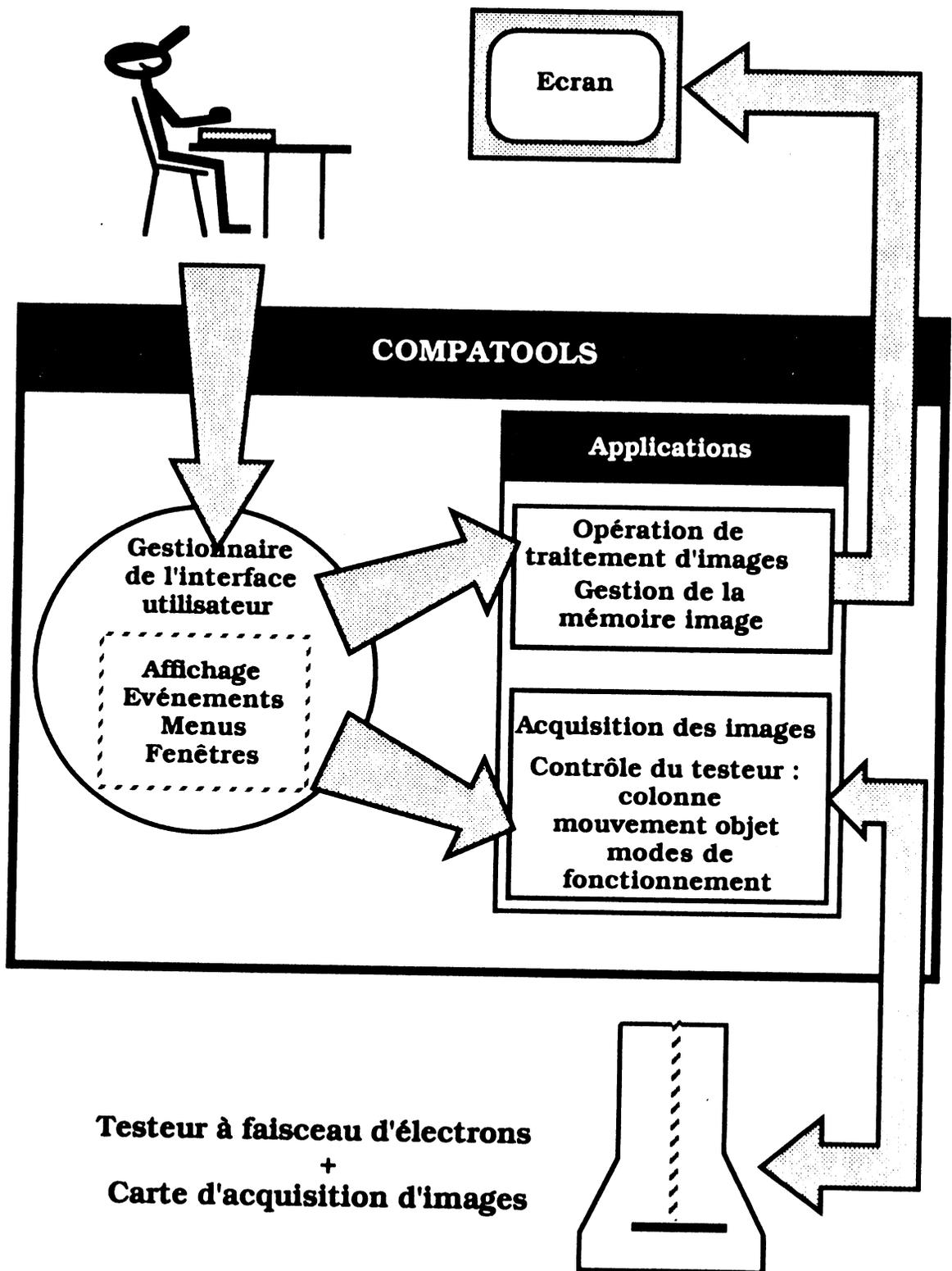
### **V.2.1 Structure générale du logiciel**

Le logiciel se compose d'une interface utilisateur évoluée qui autorise un dialogue continu entre l'utilisateur et les applications de contrôle et d'analyse (cf. figure V.6)

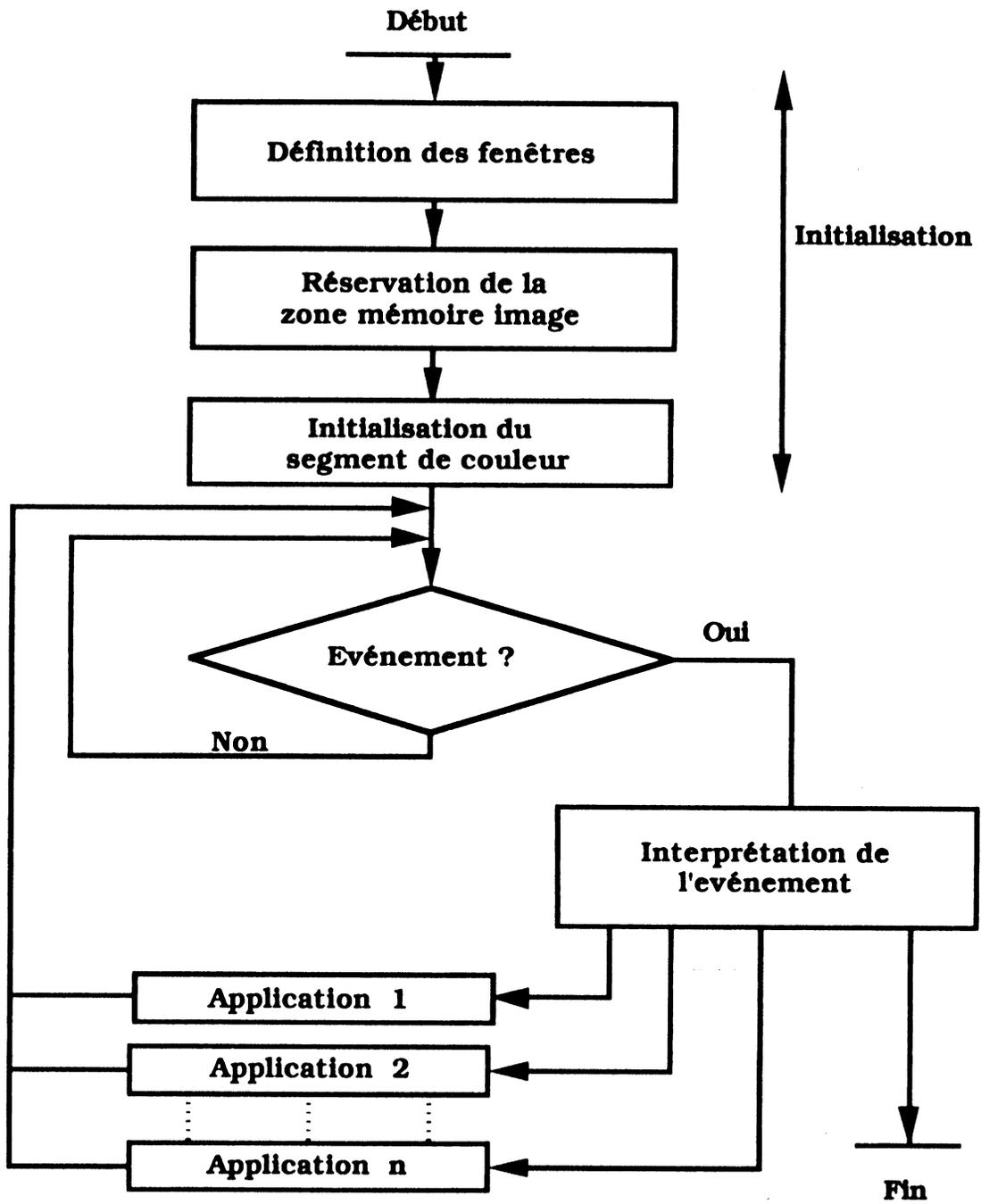
La figure V.7 présente l'organigramme principal de ce logiciel. Il se divise en 2 parties :

- \* la partie initialisation, dont le rôle est de construire l'environnement graphique de travail. Elle réalise plus particulièrement la construction des fenêtres et la réservation des espaces mémoires images ;

- \* la partie contrôle, qui est réalisée par un interpréteur d'événements autour duquel s'articulent toutes les applications. Les événements pourront être issus soit du clavier, soit de la souris. Par ailleurs, l'organisation des applications est modulaire, ce qui permet d'intégrer facilement de nouvelles procédures adaptées aux besoins de l'utilisateur (**[CON88a]**, **[CON88b]**).



**Figure V.6** Organisation de COMPATOOLS



**Figure V.7** Organigramme général de COMPATOOLS

## V.2.2 Gestion et organisation des données

### V.2.2.1 Les types de données

Trois types de données ont été définis pour notre logiciel :

#### A - Les données liées aux images microscope

Ces données constituent l'information de base qui correspond à l'image en niveaux de gris.

L'image est représentée en mémoire centrale par un tableau unidimensionnel d'octets dans lesquels les pixels sont rangés ligne par ligne (cf. figure V.8). Ce tableau, généralement appelé "plan mémoire image", est réservé en allocation de mémoire statique à l'initialisation.

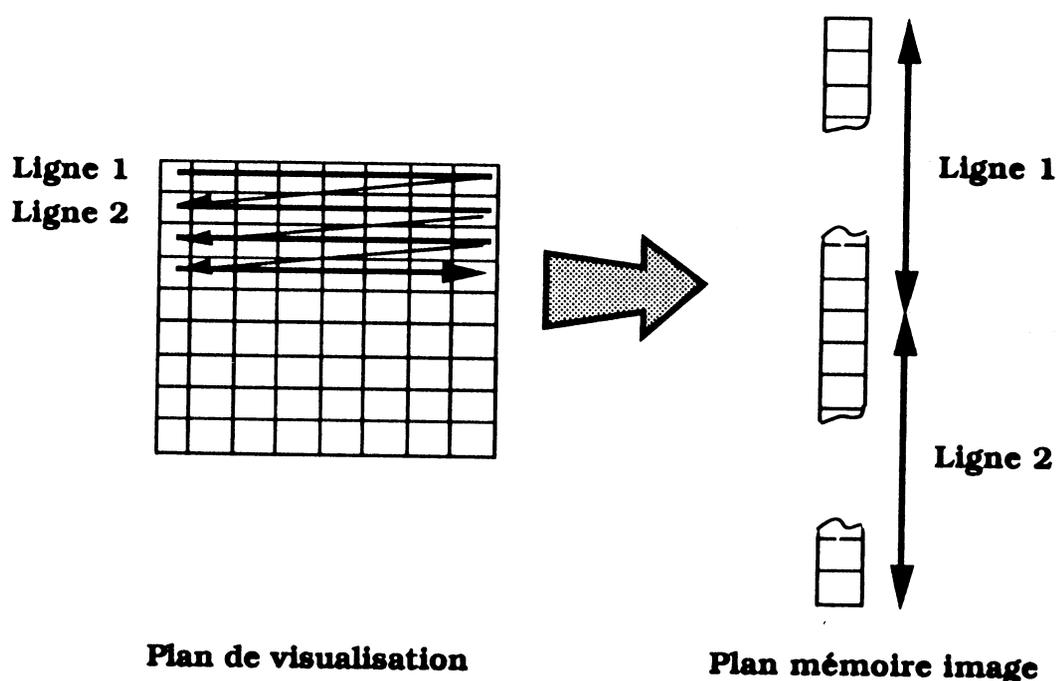
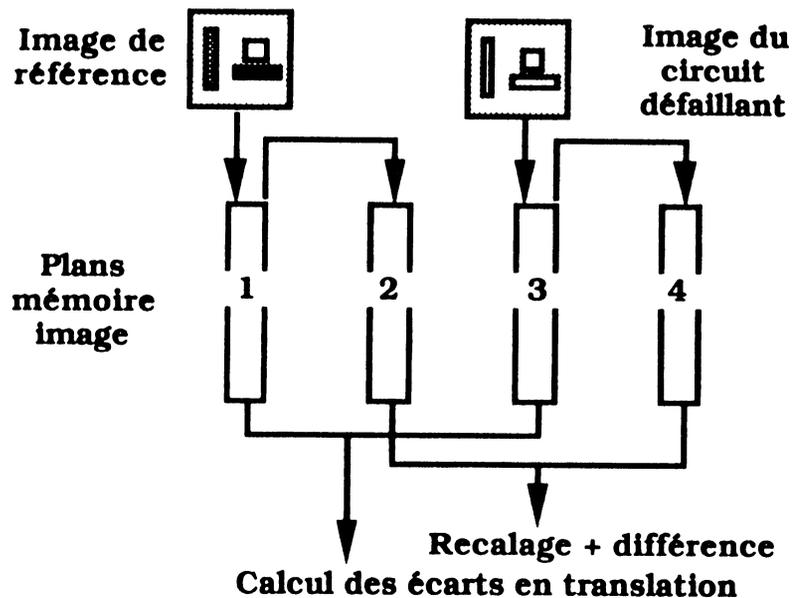


Figure V.8 Organisation de la donnée image

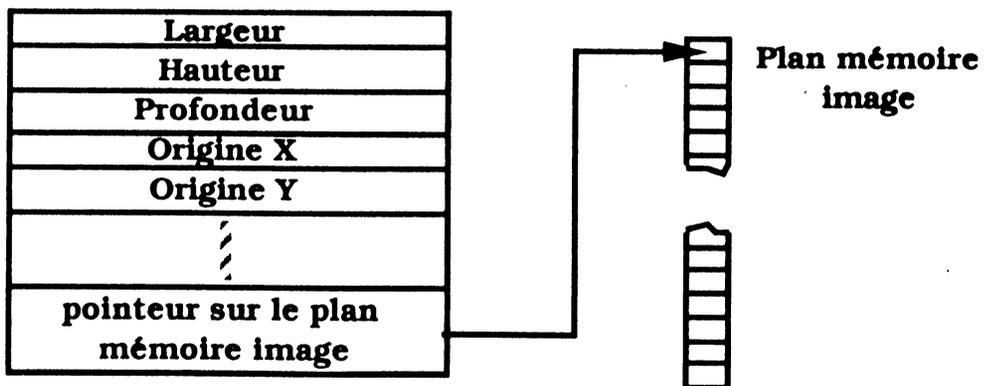
L'optimisation temporelle de la comparaison automatique a nécessité la définition de 4 plans mémoire image, afin de limiter les accès à la mémoire de masse. Cette organisation est utilisée pour comparer un couple d'images : les images brutes à superposer sont chargées dans les plans 1 et 3, et dupliquées dans les plans 2 et 4 ; le premier couple est utilisé pour

calculer les écarts en translation et le second pour effectuer le recalage en translation et la différence (cf. figure V.9) ; toutes ces opérations sont réalisées en mémoire centrale, ne nécessitant ainsi aucun accès disque.



**Figure V.9** Définition des 4 plans mémoire image pour la comparaison automatique d'images

La manipulation des images est réalisée en mémoire centrale à l'aide d'une structure qui regroupe d'une part les caractéristiques de l'image telles que la taille, la profondeur, l'origine, ..., et d'autre part l'adresse qui pointe sur le premier élément du plan mémoire image associé (cf. figure V.10).



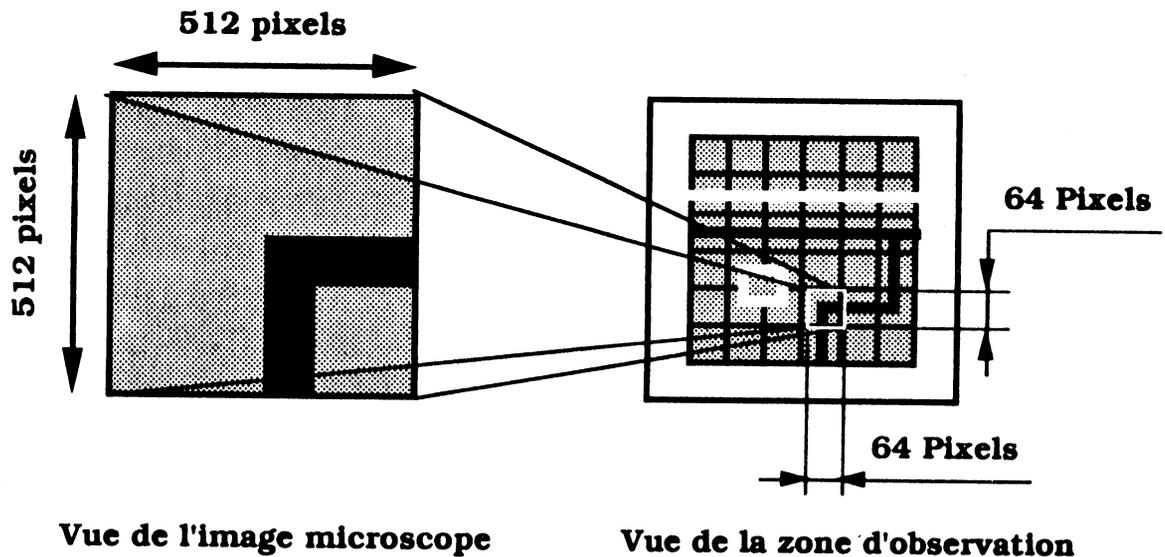
**Figure V.10** Définition de la structure image

Au niveau de la mémoire de masse, la sauvegarde en fichier est réalisée par un enregistrement séquentiel qui place devant les données issues du plan mémoire image un en-tête décrivant les caractéristiques de l'image précédemment définies.

Pour la définition de la structure image et de l'en-tête de fichier, nous avons utilisé l'organisation des données proposées par la société NOESIS pour son logiciel de traitement d'image VISILOG. Ce choix a permis de rendre compatibles les données images entre le logiciel VISILOG, qui équipe par défaut des sondes CAMECA, et notre logiciel COMPATOOLS.

### B - Les données liées à la zone d'observation

Face au nombre important d'images à analyser, une donnée associée à la zone d'observation a été définie pour faciliter la manipulation des images microscope.



**Figure V.11** Notion de réduction d'images

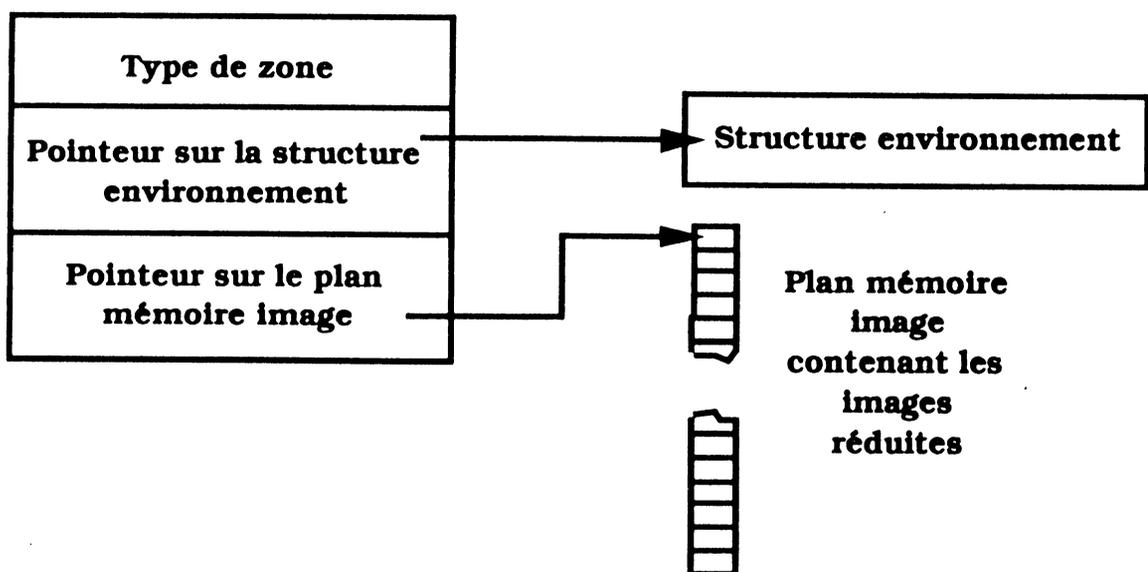
Son rôle est, d'une part de visualiser l'arrangement des images de la zone d'observation par un ensemble d'images réduites, et d'autre part de sélectionner simplement une image de la zone d'observation par une action du curseur sur l'image réduite qui lui est associée (photo V.4). Par ailleurs, la sélection d'une image s'accompagnera du déplacement de la platine

porte-objet aux positions utilisées lors de l'acquisition. De plus, les paramètres de microscope (contraste vidéo, focalisation, astigmatisme, ...), préalablement définis aux cours de l'initialisation de la procédure de comparaison, seront imposés pour assurer automatiquement le réglage de l'image vidéo. Cette gestion des données permet aisément de retrouver sur le circuit la position d'une image sur laquelle on souhaite effectuer une étude plus approfondie.

La réduction des images est réalisée, après chaque acquisition d'une image microscope, par un échantillonnage de l'image réelle. Cette opération permet de reconstituer la zone d'observation dans une image aux dimensions classiques de 512 x 512 pixels (cf. figure V.11). L'ensemble des images réduites sera géré comme une image microscope.

Une structure zone a donc été définie. Elle se compose des paramètres suivants (cf. figure V.12) :

- le type de zone utilisé, qui peut être la zone du circuit de référence, la zone du circuit défaillant ou encore la zone de différence ;
- un pointeur sur l'adresse de la structure environnement qui permettra de retrouver les paramètres liés à la microscope (contraste vidéo, focalisation, ...) d'une part, et les données concernant le nombre d'images constituant la zone d'observation et les positions de ces images sur le circuit d'autre part ;
- un pointeur sur l'adresse du plan mémoire image contenant les données issues de la réduction des images microscope.



**Figure V.12** Définition de la structure zone

Comme dans le cas des structures image, la sauvegarde sous forme de fichier est réalisée de manière séquentielle avec un en-tête réunissant les caractéristiques de la zone (nombre d'images, contraste vidéo, focalisation, ...).

### **C - Les données liées à l'environnement de test**

Ces données constituent l'ensemble des paramètres utiles à la procédure de comparaison automatique d'images. Elles sont définies au cours de l'étape d'initialisation (cf. chapitre II, § II.3.1.A) et enregistrées dans un fichier nommé "fichier environnement".

La définition de l'environnement de test doit prendre en compte :

#### **- les paramètres des contraintes externes**

Ils correspondent tout d'abord aux contraintes électriques qui caractérisent la séquence de test utilisée pour le conditionnement des circuits. Puis, on peut noter les contraintes thermiques qui peuvent être importantes en analyse de défaillances, pour activer le défaut ou caractériser les conditions limites de fonctionnement.

#### **- les paramètres de topologie**

Un premier groupe de paramètres définit la position des circuits sur la platine porte-objet ; il se compose pour chaque circuit d'une origine et de 2 points orthogonaux utilisés pour le calcul de l'orientation des circuits par rapport au mouvement objet (cf. chapitre II § II.3.2.1). Un second groupe permet de définir la zone d'observation ; cette opération est réalisée en sélectionnant 2 points opposés délimitant les extrêmes de la zone observée au microscope.

#### **- les paramètres de microscopie**

Il s'agit d'une part des paramètres physiques liés à la formation de l'image en contraste de potentiel (contraste vidéo, astigmatisme, focalisation, rotation électronique, ...), et d'autre part des paramètres liés au mode de fonctionnement du testeur (largeur du pulse de faisceau, fenêtre temporelle d'observation, ...).

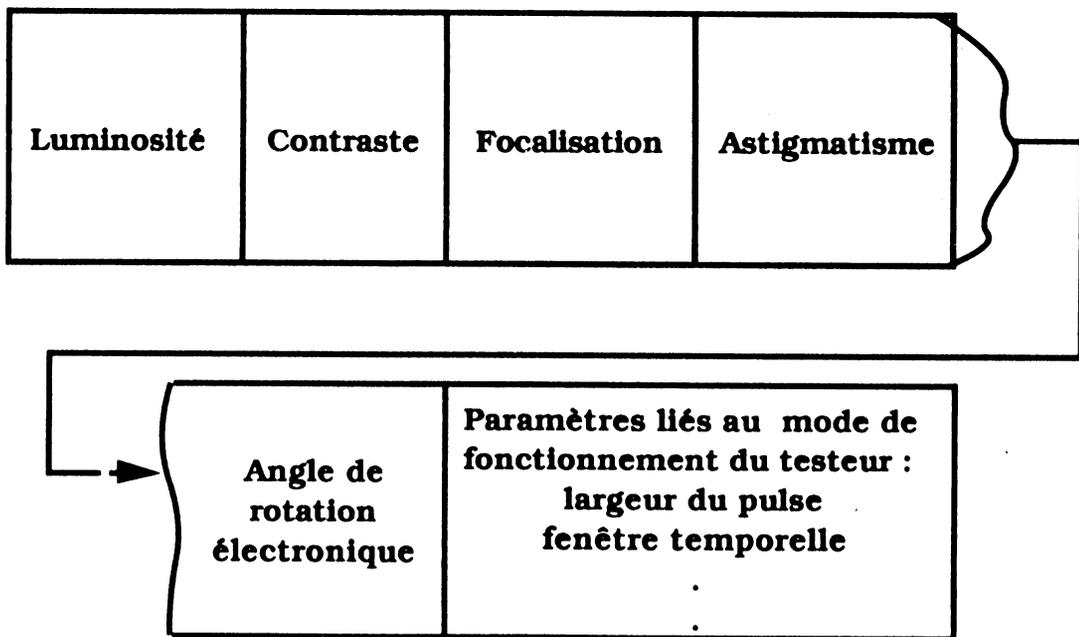
### - les paramètres d'imagerie

Ces derniers paramètres caractérisent d'une part les informations propres à l'acquisition de l'image, définies par la dimension de l'image, le temps de balayage et le nombre d'images moyennées, et d'autre part les informations liées au traitement des images, constituées par : la dimension du pixel (qui dépend de la taille du motif élémentaire) et le type de différence choisie qui peut s'effectuer avec ou sans recalage automatique.

La structure environnement possède la hiérarchie présentée par les figures V.13 a, b, et c.

<b>Point origine</b>	<b>1er point orthogonal</b>	<b>2ème point orthogonal</b>	<b>Orientation du circuit</b>	<b>Points opposés de définition de la zone d'observation</b>
----------------------	-----------------------------	------------------------------	-------------------------------	--

**Figure V.13 a** définition de la sous-structure de topologie



**Figure V.13 b** définition de la sous-structure de microscope

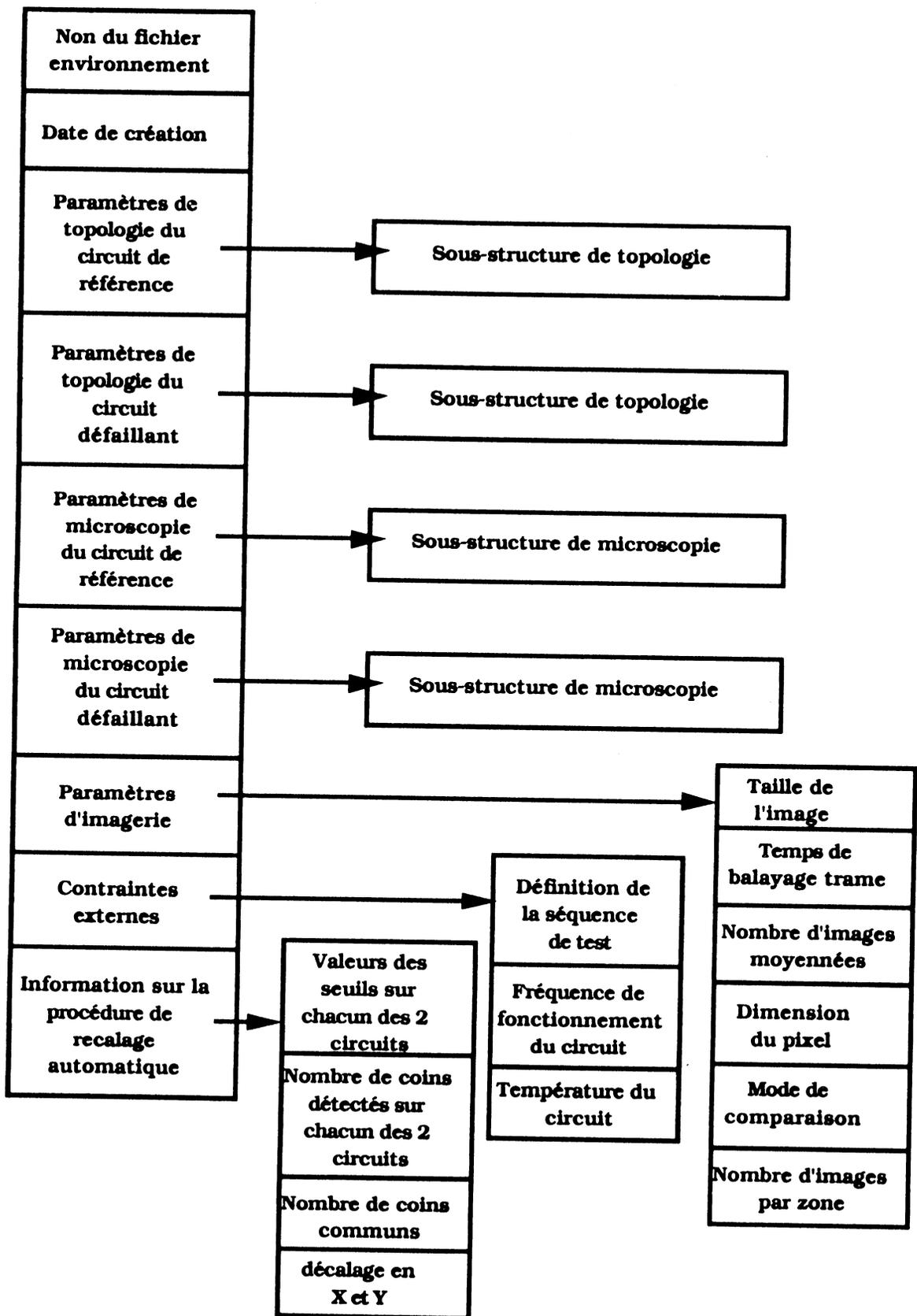


Figure V.13 c Structure environnement

Dans l'état actuel de la station de test, tous ces paramètres ne sont pas accessibles par logiciel ; en particulier, on notera les paramètres de contrainte électrique (dont la liaison entre le conditionneur et la station de travail, qui n'a pas été achevée); par ailleurs, les paramètres de sélection des différents modes de fonctionnement du testeur ne sont pas tous intégrés à la bibliothèque de commande du testeur.

Néanmoins, ces données sont d'une grande importance pour la réalisation d'une procédure entièrement automatique. Elles ont donc été prises en compte au niveau de la structure environnement pour y être facilement intégrées lorsqu'elles seront disponibles.

Enfin, on remarque que la structure environnement (cf. figure V.13.c) présente une sous-structure qui collecte les informations liées aux opérations de superposition automatique. Elle recueille en particulier pour chaque couple d'image :

- la valeur des seuils utilisés pour la binarisation des images ;
- le nombre de coins détectés sur chaque image ;
- le nombre de coins communs utilisés pour le calcul des écarts en translation ;
- la valeur des écarts en translation.

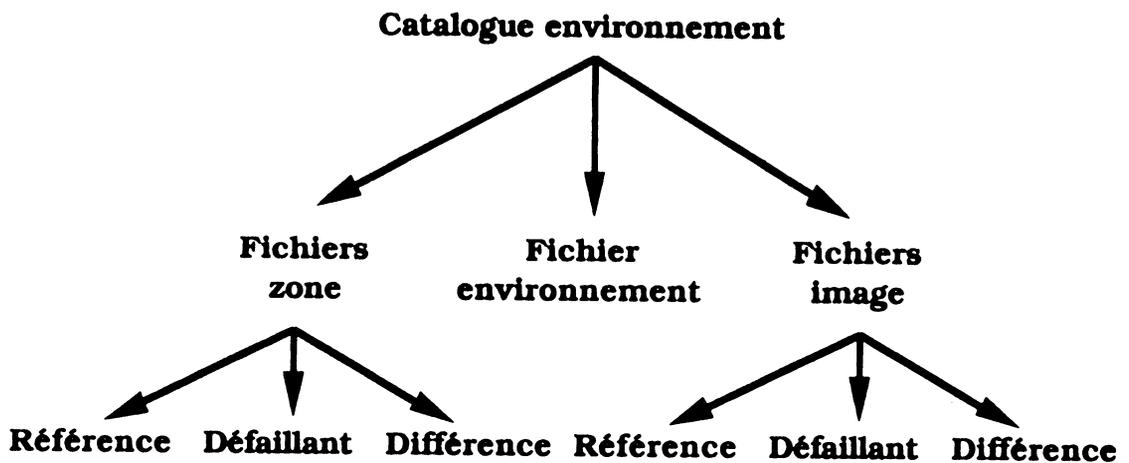
Cet historique de données pourra être utilisé pour corriger les erreurs de recalage automatique et augmenter ainsi la fiabilité des opérations de superposition automatique. Ces améliorations seront présentées en détail au chapitre VI.

### **V.2.2.2 La hiérarchie des fichiers**

Les fichiers environnement, image et zone sont archivés et organisés sous la forme de l'arborescence présentée en figure V.14. Ces trois fichiers regroupent l'information utile à une analyse automatique caractérisant soit un vecteur de test dans le cas d'une étude statique, soit une phase d'observation dans le cas d'une étude dynamique.

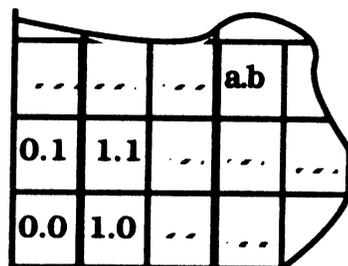
Pour les fichiers image et zone, on distingue les informations provenant du circuit de référence, du circuit défaillant et des résultats de différence. Les noms de ces 2 fichiers sont générés automatiquement à partir du nom de fichier environnement. Ils sont codés de la façon suivante :

- (nom du fichier environnement).**ref\_Z** pour la zone du circuit de référence ;
- (nom du fichier environnement).**tst\_Z** pour la zone du circuit défaillant ;
- (nom du fichier environnement).**dif\_Z** pour la zone de différence ;
- (nom du fichier environnement).**ref\_a.b** pour les images du circuit de référence ;
- (nom du fichier environnement).**tst\_a.b** pour les images du circuit défaillant ;
- (nom du fichier environnement).**dif\_a.b** pour les images de différence



**Figure V.14** Arborescence des fichiers

Dans cette codification, la numérotation des images composant la zone d'observation est réalisée de façon matricielle par le suffixe a.b (figure V.15).



**Figure V.15** Numérotation des images dans la zone d'observation

### V.2.3 Les fonctions de traitement d'images

Les fonctions de traitement d'images représentent les programmes propres aux opérations d'imagerie. Ces fonctions ont été réalisées en

langage C et sont archivées en bibliothèque. Elles sont détaillées en annexe II.

Nous avons développé 2 grandes classes de fonctions qui sont :

- les fonctions d'analyse, qui effectuent une opération directe sur l'image. Elles sont formalisées par l'expression :

**F(image, a, b, ...) --> image**

dans laquelle image représente un pointeur sur une structure image et a, b,... correspondent à des paramètres entiers ou réels ;

- les fonctions de comparaison, qui permettent des opérations entre 2 images. Elles s'expriment par la formule générale :

**F(image1, image2) --> image1**

où image1 et image2 sont des pointeurs sur 2 structures image.

Ces fonctions présentent 2 propriétés importantes :

- elles sauvegardent les résultats dans la mémoire image initiale;
- elles restituent l'adresse de la mémoire initiale.

Ceci permet de construire facilement des fonctions complexes qui enchainent plusieurs traitements de base.

L'opération de superposition automatique a été construite à l'aide de cette organisation modulaire. Elle est composée par les opérateurs élémentaires dont les algorithmes ont été décrits au chapitre IV.

Sa description est la suivante :

signification des identificateurs utilisés pour :

**les paramètres :**

Image1, Image2,

Image3, Image4

Tab\_coin1, Tab\_coin2

--> pointeurs sur les 4 structures mémoire image  
 --> listes des coins composées par des structures décrivant pour chaque coin les attributs de position, d'orientation et de convexité.

Recal

--> structure qui contient les écarts en translation

seg --> valeur en pixels du motif élémentaire

**les opérateurs élémentaires :**

liss(image) --> amélioration de l'image par moyenne non pondérée des proches voisins

inv(image) --> inversion de l'image

autobina(image) --> seuillage automatique

contour(image) --> extraction de contours

copy(imageA,imageB) --> copie du contenu de la zone mémoire A dans la zone mémoire B

coin(image, seg, tab\_coin) --> recherche des listes de coins tab\_coin

statcoin(tab\_coinA,tab\_coinB)--> calcul des écarts en translation à l'aide des listes de coins ; cette fonction retourne un pointeur sur la structure Recal

decal(image,Recal) --> translation de l'image

som(imageA,imageB) --> addition des images A et B

**Début :** fonction correl(Image1, Image2, Image3, Image4)

**: sauvegarde des images initiales pour l'opération de différence après correction en translation :**

copy(Image1, Image2)

copy(Image3, Image4)

**: recherche des écarts en translation :**

contour(artéfact(autobina(liss(Image1)),seg))

contour(artéfact(autobina(liss(Image3)),seg))

coin(Image1, seg, Tab\_coin1)

coin(Image3, seg, Tab\_coin3)

recal = statcoin(Tab\_coin1, Tab\_coin3)

**: recalage et différence :**

som(inv(Image2), decal(Image3, recal))

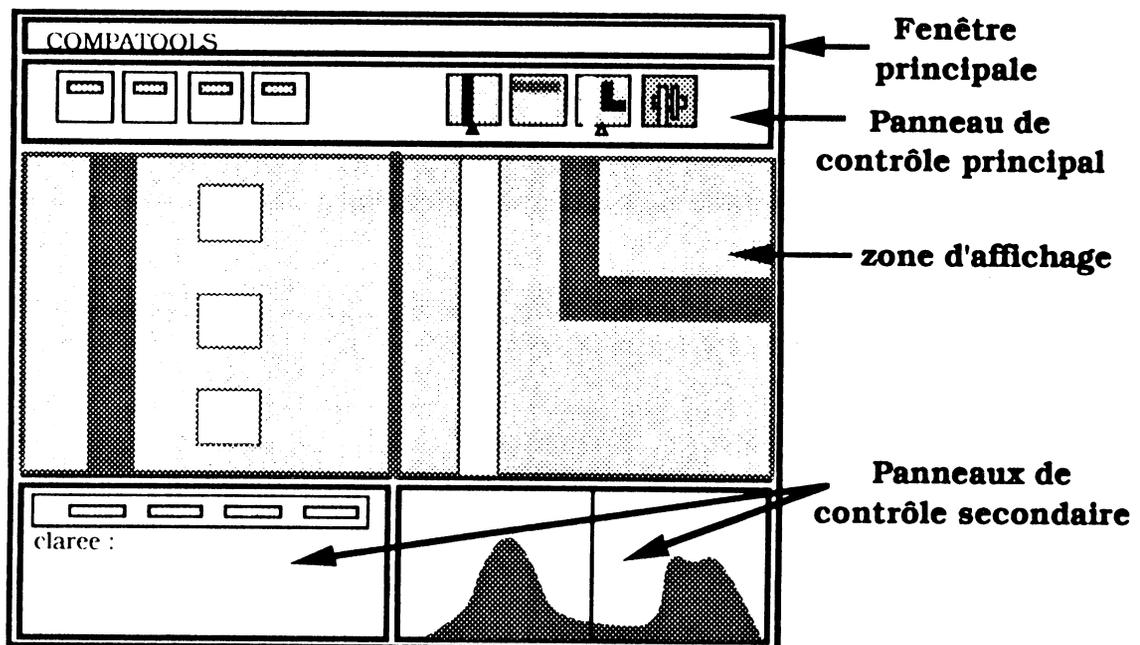
**Fin :**

**Remarque :** Dans cette procédure, nous utilisons 4 plans mémoire image ; les plans 1 et 3 sont chargés avec les images initiales et utilisés pour le calcul des écarts en translation ; les plans 2 et 4 sont employés pour les opérations finales de recalage et de différence.

### V.2.4 Configuration de l'interface graphique

Ce paragraphe présente l'interface graphique du logiciel COMPATOOLS (cf. photo IV.4). Elle se compose d'une fenêtre principale qui accueille 4 sous-fenêtres définies comme suit (cf figure V.16) :

- \* le panneau de contrôle principal ;
- \* la zone d'affichage ;
- \* le panneau secondaire gauche ;
- \* le panneau secondaire droit.

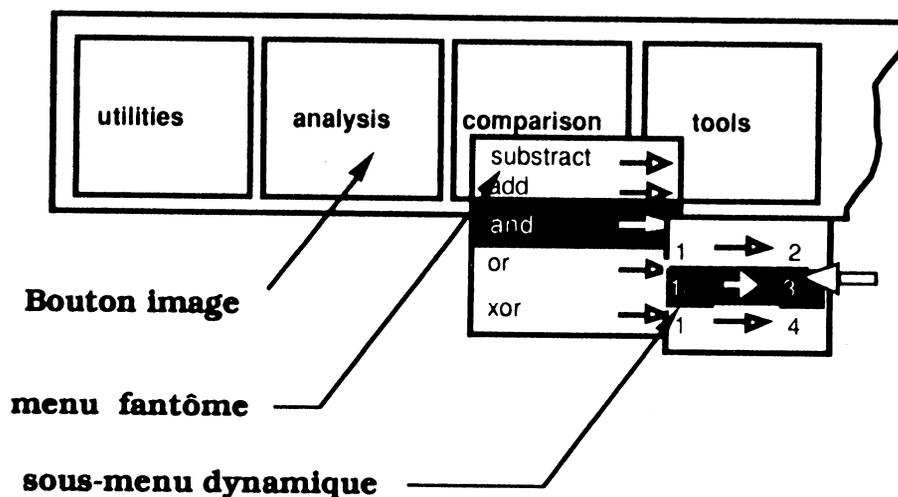


**Figure V.16** Interface graphique COMPATOOLS

### V.2.4.1 Panneau de contrôle principal

le panneau de contrôle principal est divisé en 2 parties. La première partie permet de commander les applications à l'aide de menus fantômes associés aux "BOUTONS IMAGES" (cf. figure V.17). La deuxième partie est composée d' "ICONES IMAGES" qui permettent de visualiser le contenu des 4 zones mémoires (cf. figure V.18).

#### A - Boutons images



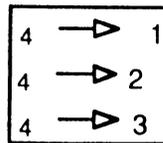
**Figure V.17** Boutons images du panneau de contrôle

Les boutons images permettent d'accéder à 4 groupes de fonctions :

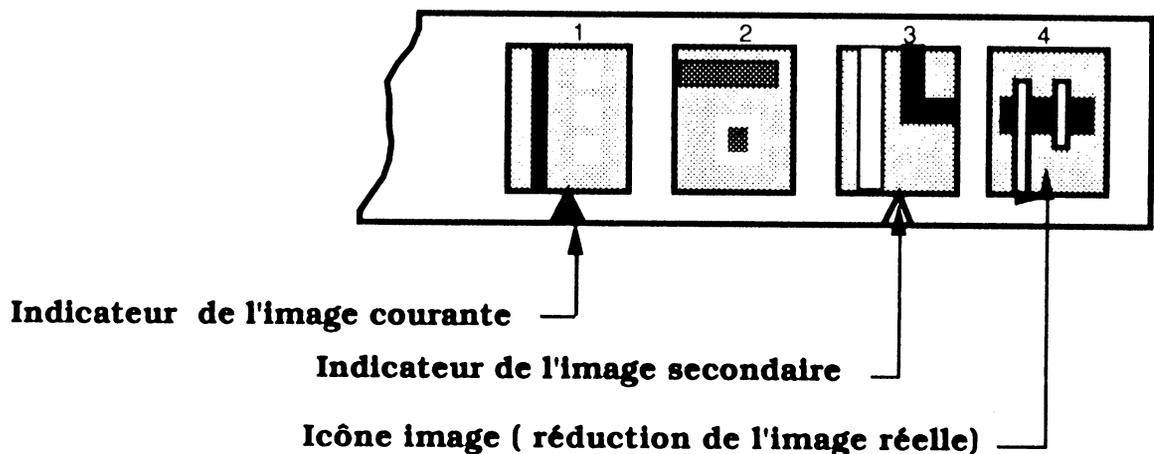
- groupe gestion, qui regroupe les fonctions de chargement, de sauvegarde et d'acquisition de l'image ;
- groupe analyse, qui regroupe les fonctions élémentaires de traitement de l'image ;
- groupe comparaison, qui effectue des opérations avec 2 images ;
- groupe développement, qui regroupe les fonctions composées, telles que la procédure automatique de différence.

Un menu fantôme est associé à chaque groupe de fonctions. lorsqu'une application nécessite la sélection de 2 mémoires images, un

sous-menu dynamique est créé en fonction de l'image courante ; il permet de choisir l'une des 3 autres mémoires disponibles. Par exemple, la copie de la zone mémoire 4 fait apparaître le sous-menu suivant :



## B - Icônes images



**Figure V.18** Icônes images du panneau de contrôle.

Les icônes images sont des boutons de commande qui assurent deux fonctions. Elles permettent d'abord de sélectionner et d'afficher l'image courante. Ceci est réalisé par une action sur l'icône à l'aide de la souris. Dans la configuration présente, nous visualisons les zones mémoire 1 et 2 dans la partie droite de la zone d'affichage, et les zones 3 et 4 dans la partie gauche. La deuxième fonction de ces icônes est de visualiser le contenu des 4 zones mémoire. Pour cela, nous réduisons les images par échantillonnage et nous reconstruisons les icônes avec ces données. Ces icônes sont mises à jour au cours de chaque affichage. Elles sont définies avec 16 niveaux de gris et ont pour taille 64 x 64 pixels.

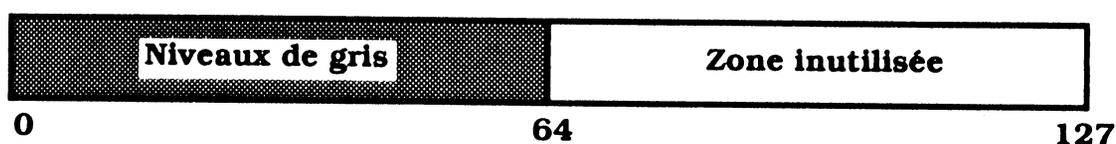
Parallèlement à ce processus, nous effectuons une gestion d'indicateurs (cf. figure V.18) qui permet de marquer les mémoires image visualisées dans la zone d'affichage. Ainsi nous avons :

- un indicateur principal pour l'image courante (indicateur plein).

- un indicateur secondaire pour la seconde image (indicateur vide).

#### V.2.4.2 Fenêtre d'affichage

La zone d'affichage permet de visualiser côte à côte 2 images aux dimension de 512x512 pixels. Elle utilise une palette de 127 couleurs dont 64 sont réservées aux niveaux de gris (cf. figure V.19). La zone inutilisée peut permettre de définir d'autres couleurs si le développement des applications le nécessite. Par exemple, on pourrait afficher le dessin des masques si notre logiciel s'enrichissait d'un lien avec des outils de CAO.



**Figure V.19** Palette de couleur

Par ailleurs, on peut obtenir la position et l'intensité de chaque pixel au niveau de la fenêtre d'affichage. Cette possibilité est utilisée pour mettre en œuvre une fonction de zoom.

#### V.2.4.3 Panneaux secondaires

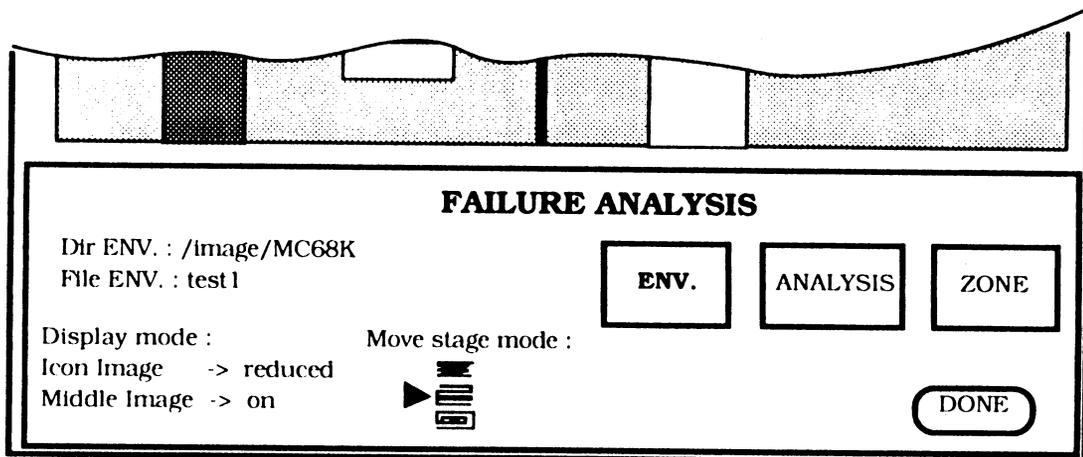
Ces sous-fenêtres sont créées en fonction des besoins de l'utilisateur. Elles permettent d'envoyer ou de recevoir les informations nécessaires aux diverses applications. Deux panneaux secondaires sont en permanence affichés dans la partie inférieure de la fenêtre principale (cf. figure V.16). Nous avons adopté une organisation dynamique (création/destruction) qui a permis de définir un nombre important de panneaux secondaires sans pénaliser le gestionnaire de fenêtres.

Actuellement nous disposons de 6 panneaux secondaires définis comme suit :

- \* le panneau liste image, qui permet de charger en mémoire centrale les fichiers images ;
- \* le panneau de sauvegarde, qui assure la mémorisation disque des plans mémoire image ;

- \* le panneau de binarisation, qui permet de choisir un seuil ;
- \* le panneau zoom, qui permet d'agrandir une partie de l'image sélectionnée à l'aide du curseur ; l'intensité et la position de chaque pixel peuvent être établies au niveau de cette fenêtre ;
- \* le panneau acquisition, qui contrôle l'acquisition et l'affichage des images dans la zone de visualisation ;
- \* le panneau histogramme, qui permet d'afficher l'histogramme des niveaux de gris.

En mode d'analyse automatique, les panneaux secondaires de droite et de gauche s'effacent pour laisser la place à une sous-fenêtre qui occupe la largeur de la fenêtre principale (cf. figure V.20).

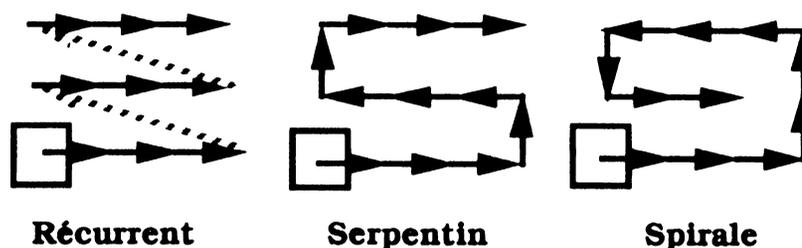


**Figure V.20** Panneau secondaire "analyse de défaillances"

Ce panneau secondaire, nommé "analyse de défaillances", permet de définir le nom du catalogue et du fichier environnement. De plus, il permet d'accéder aux options d'utilisation de la procédure automatique de comparaison, qui sont :

- \* le mode de déplacement de la platine porte-objet, qui peut être "récurrent", "serpentin" ou "spirale" (cf. figure V.21) ;
- \* le mode d'affichage, qui offre le choix de visualiser soit toutes les images intermédiaires, soit aucune ;
- \* le mode de représentation des icônes image, qui servent à la construction de la zone d'observation. Ces icônes peuvent soit ne pas être

affichées, soit être visualisées avec une couleur uniforme, ou encore être créées par réduction de l'image réelle.



**Figure V.21** Modes de déplacement de la platine porte-objet

Il est évident que ces options sont uniquement des moyens de représentation qui n'influent en rien sur les résultats de comparaison d'images.

Les paramètres relatifs à l'environnement de test sont également accessibles à partir de ce panneau. Pour ce faire, un bouton d'activation permet de créer une fenêtre qui se superpose à la fenêtre principale. Elle se compose d'un panneau tournant, qui permet d'éditer les paramètres précédemment définis pour la structure environnement.

### **V.2.5 Description de l'étape d'initialisation**

La mise en œuvre de la procédure de comparaison automatique d'images nécessite une étape d'initialisation afin d'enregistrer tous les paramètres liés à l'environnement de test. Cette étape est importante pour l'automatisation de la comparaison d'images. Le soin apporté à sa réalisation conditionnera la réussite ou l'échec de cette procédure.

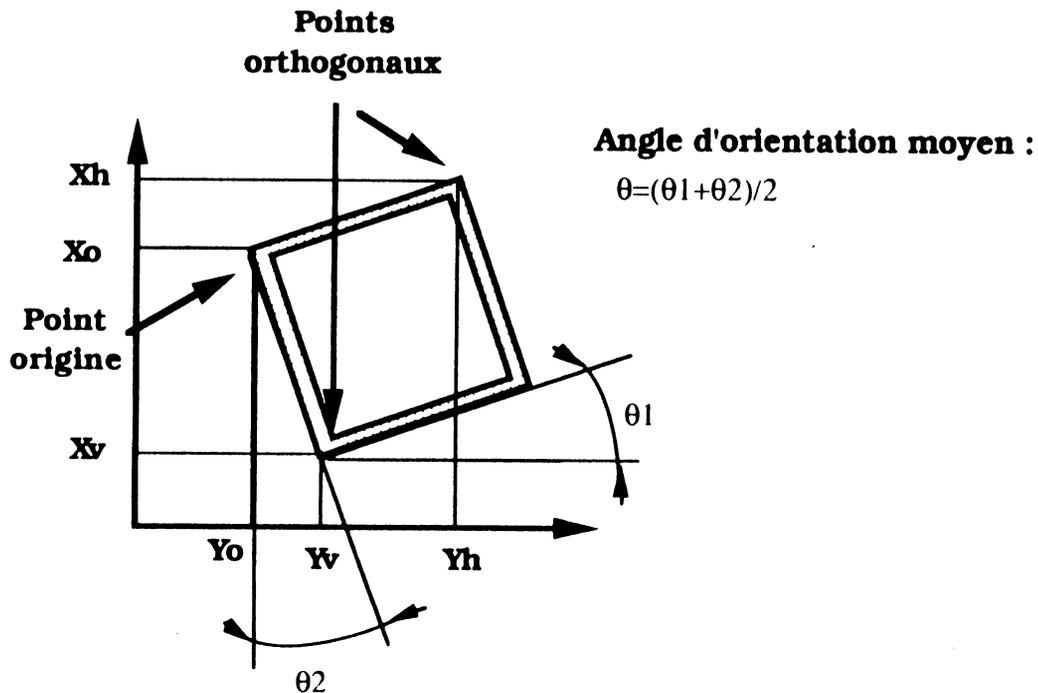
Cette étape se compose essentiellement de 4 opérations :

#### **V.2.5.1 La définition du référentiel circuit**

Cette première opération consiste à définir le référentiel associé à chaque circuit, tel qu'il a été défini au chapitre II, §II.3.2.1.B. Celui-ci se compose des données suivantes :

- \* une origine sur chaque circuit constituée par un motif identique et facilement repérable ;

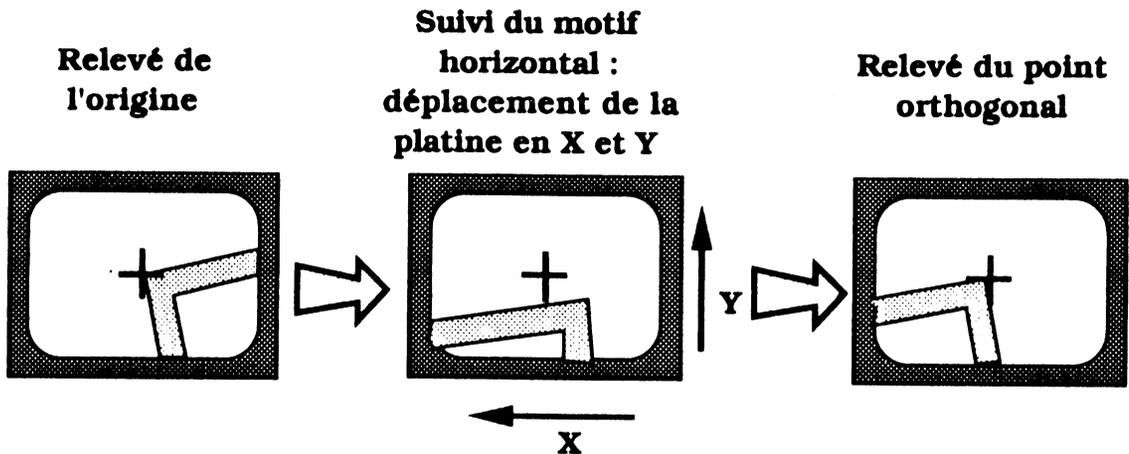
\* une orientation associée à chaque circuit : elle est déterminée à l'aide de 2 points orthogonaux par rapport à l'origine ; ces 2 points permettent de calculer une orientation moyenne (cf. figure V.22). Le moyennage permet de limiter les erreurs dues au relevé des coordonnées des points orthogonaux.



**Figure V.22** Calcul de l'orientation des circuits par rapport au référentiel de la platine

D'un point de vue pratique, les relevés sont faits manuellement sur l'image vidéo à l'aide d'un indicateur fixe. Ils sont réalisés à fort grandissement (x 1000) afin de limiter les erreurs de positionnement.

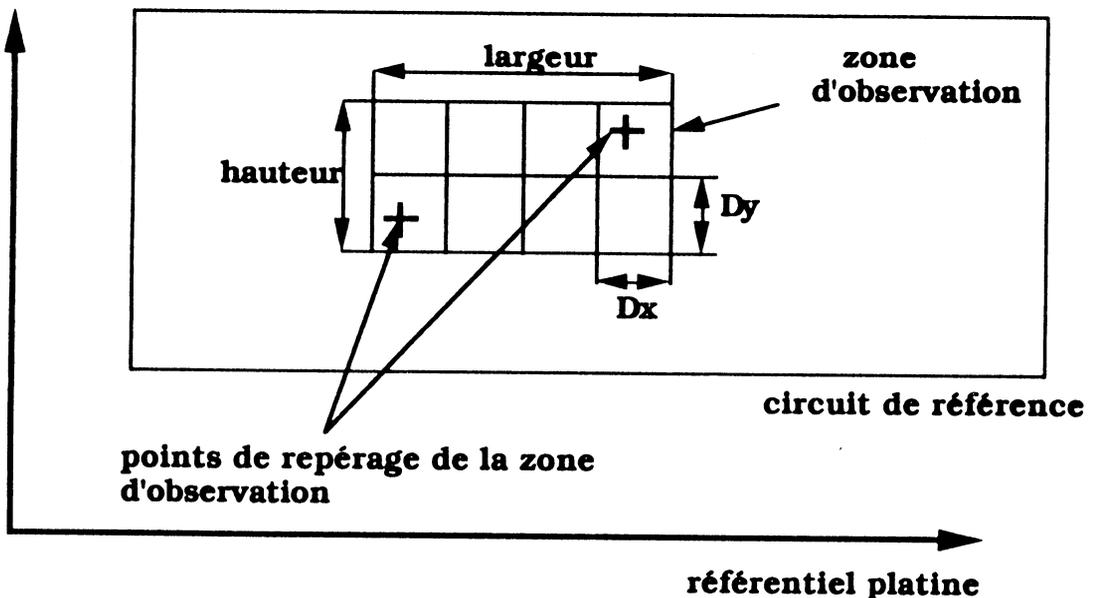
Le calcul de l'angle s'effectue en mesurant l'écart par rapport à l'horizontale ou à la verticale selon le point étudié. La figure V.23 montre un exemple de calcul d'angle à partir de l'image vidéo.



**Figure V.23** Mesure de l'orientation du circuit sur une horizontale

#### V.2.5.2 La définition du découpage de la zone d'observation

La zone d'observation est déterminée par 2 points opposés choisis sur le circuit de référence (cf. figure V.24).



**Figure V.24** Définition de la zone d'observation

Le découpage de la zone d'observation en images contiguës impose des pas de déplacement  $DX$  et  $DY$  égaux à la largeur et la hauteur d'une

image. Des mesures réalisées à l'aide d'une grille ont permis d'étalonner ces pas en fonction du grandissement.

### V.2.5.3 Le réglage du testeur à faisceau d'électrons

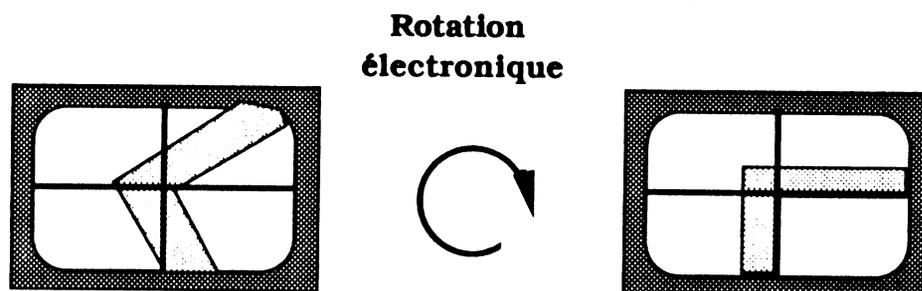
Cette opération consiste à configurer la colonne afin d'obtenir des images offrant la meilleure qualité pour l'imagerie.

Au cours de cette étape, il faut :

- \* aligner le faisceau pour obtenir une image correcte en contraste topographique ;

- \* ajuster la répartition des niveaux de gris des images acquises en contraste de potentiel à l'aide de la luminosité et du contraste vidéo. Cette opération s'effectue sur la courbe histogramme : elle consiste à étaler la courbe sur les 256 niveaux de gris afin d'obtenir la meilleur répartition du contraste sur l'image numérique ;

- \* orienter l'image dans le référentiel de visualisation. Ceci est réalisé sur l'image vidéo à l'aide de la rotation électronique de faisceau (cf. chapitre II, § II.3.2.2) : on utilise pour cela un réticule permettant d'aligner les motifs sur l'horizontale ou la verticale (cf. figure V.25).



**Figure V.25** Alignement de l'image dans le référentiel de visualisation

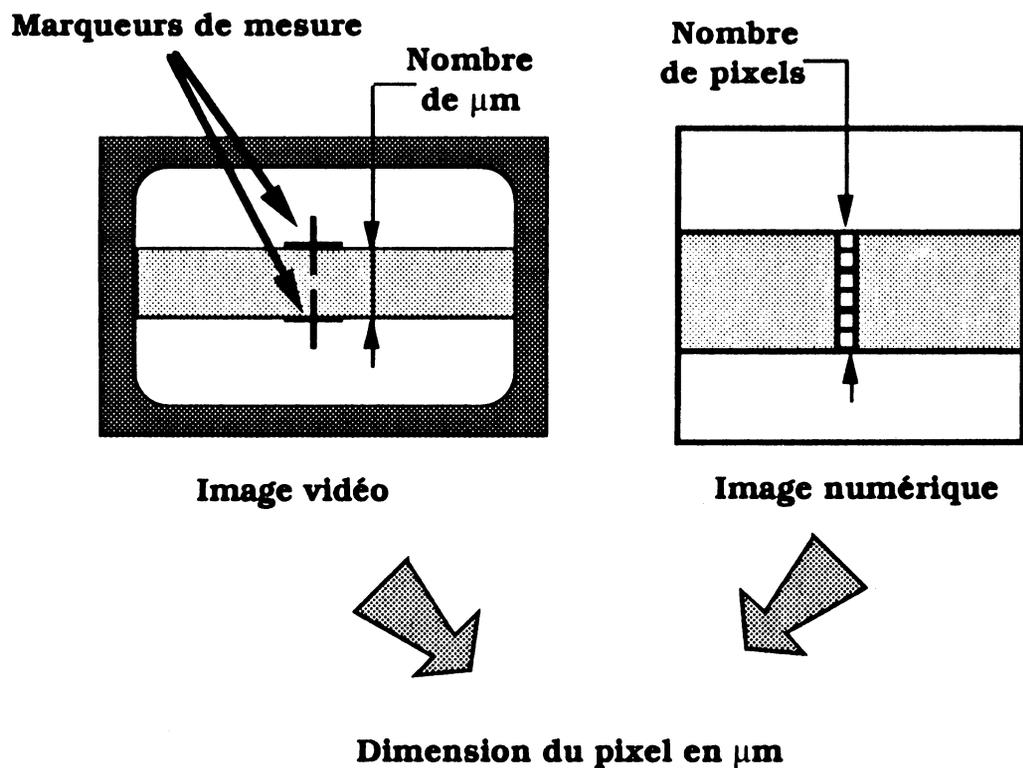
### V.2.5.4 Choix des paramètres liés à l'imagerie

Ces paramètres regroupent l'information concernant l'opération d'acquisition d'images :

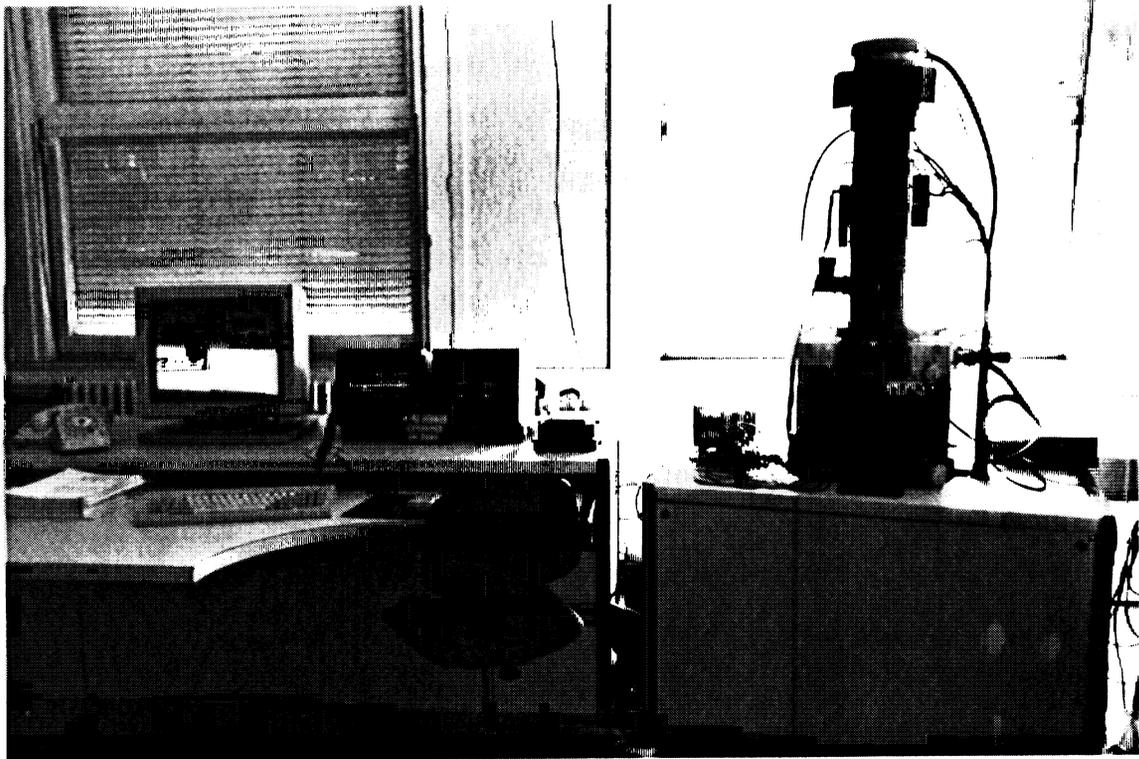
- \* le temps d'acquisition ;
- \* la dimension de l'image (fixée à 512x512 pixels dans notre configuration) ;

\* le nombre d'images moyennées ;

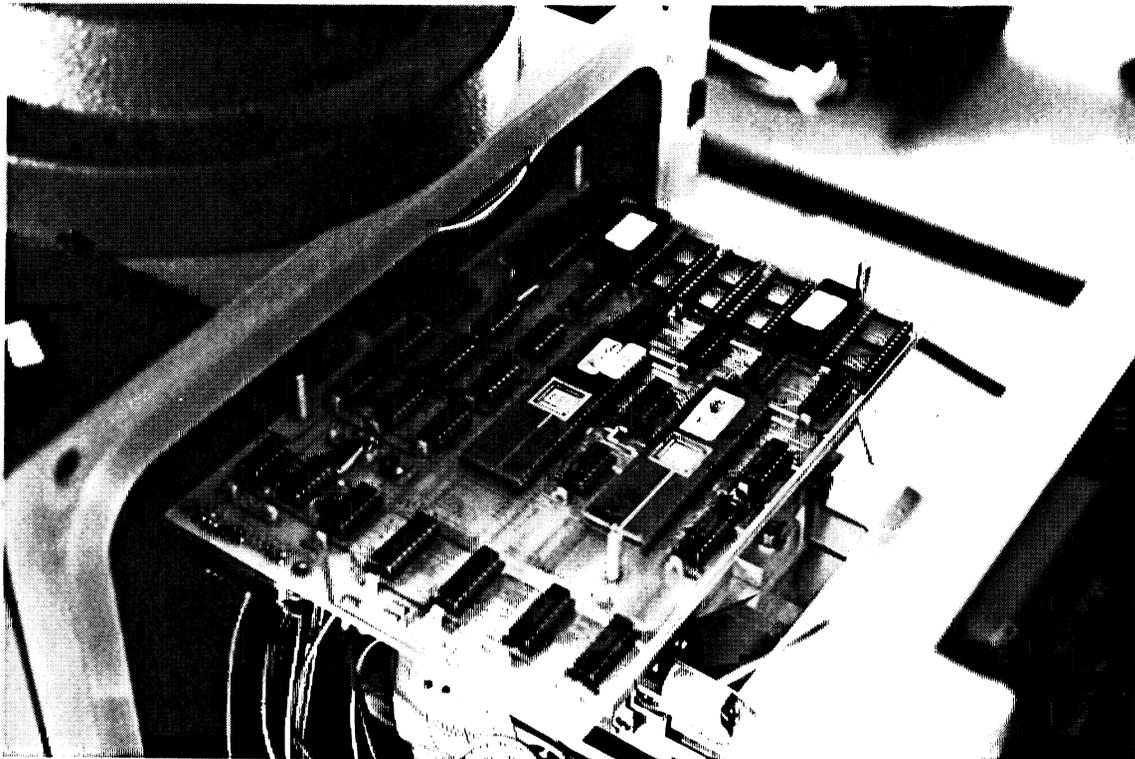
Par ailleurs, on calcule la dimension (en  $\mu\text{m}$ ) du pixel afin de déterminer le pas de déplacement de la platine porte-objet et le grandissement linéaire du microscope. Cette dimension est déterminée par le rapport de la largeur d'un motif élémentaire en  $\mu\text{m}$  sur sa largeur en pixels (cf. figure V.26) : le premier paramètre est déterminé à fort grandissement sur l'image vidéo à l'aide de 2 réticules ; le nombre de pixels est fixé par l'utilisateur ; en général, on choisit une valeur de 6 pixels (cf. chapitre IV, § IV.4).



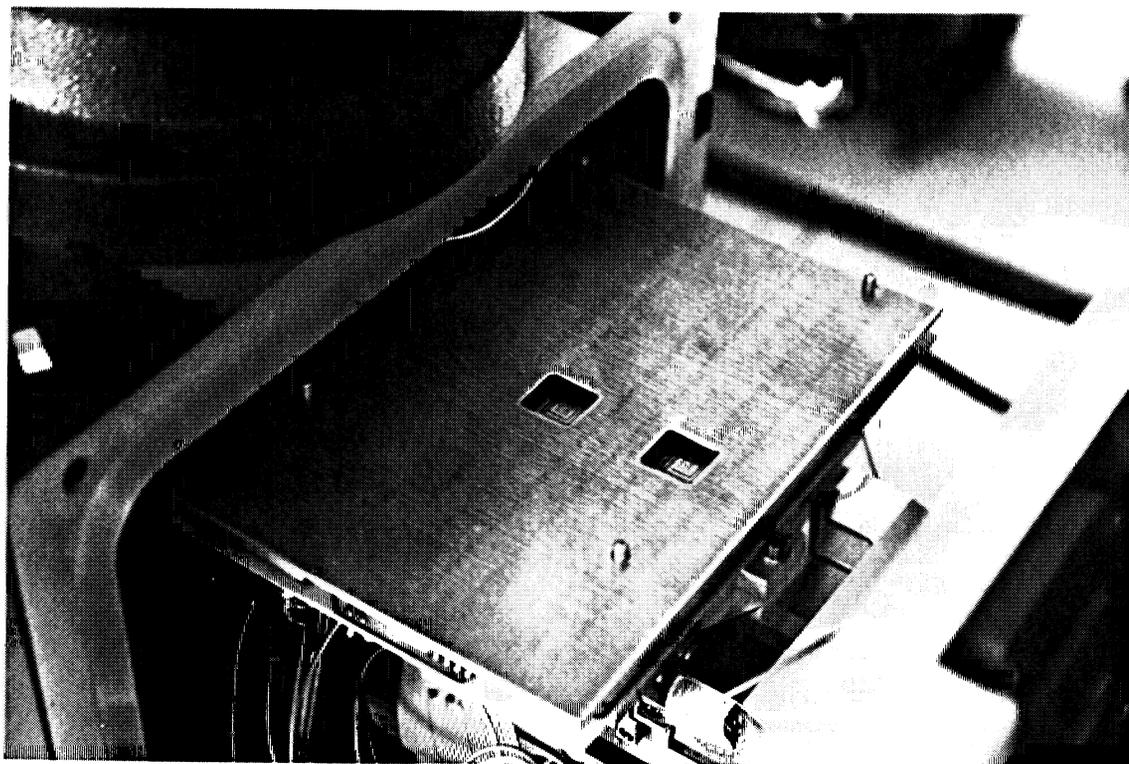
**Figure V.26** Calcul de la dimension du pixel



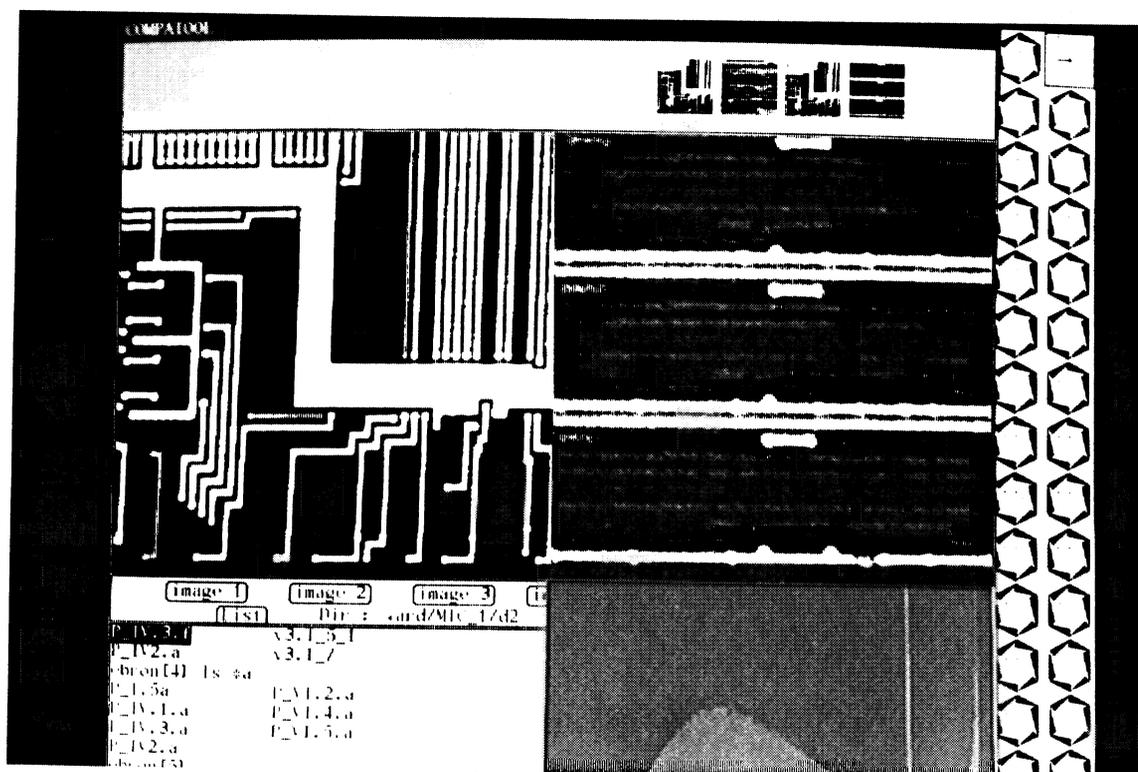
**Photo V.1** Le testeur à faisceau d'électrons : CAMECA ST15



**Photo V.2** Chambre à vide et carte de conditionnement



**Photo V.3** Blindage de la carte de conditionnement



**Photo V.4** Interface graphique - COMPATOOLS



**CHAPITRE VI**  
**APPLICATION AUX**  
**MICROPROCESSEURS 68000**

TROISIEME PARTIE

---

**ETUDE EXPERIMENTALE**



## VI APPLICATION AUX MICROPROCESSEURS MC68000

### VI.1 Présentation de l'étude

Le but de cette expérimentation est de caractériser les performances de notre logiciel de comparaison automatique d'images dans des conditions réelles d'analyse de défaillances de circuits à structure inconnue.

Notre étude s'est orientée vers l'analyse du microprocesseur 68000, dont la complexité et le niveau d'intégration font un cas idéal pour l'expérimentation de notre outil automatique.

L'analyse de défaillances de microprocesseurs requiert une stratégie de test (cf. figure VI.1) comportant 3 grandes étapes [CON90] :

- le test fonctionnel qui permet d'isoler par test externe l'instruction manifestant la défaillance [VEL89a] et [VEL89b] ;

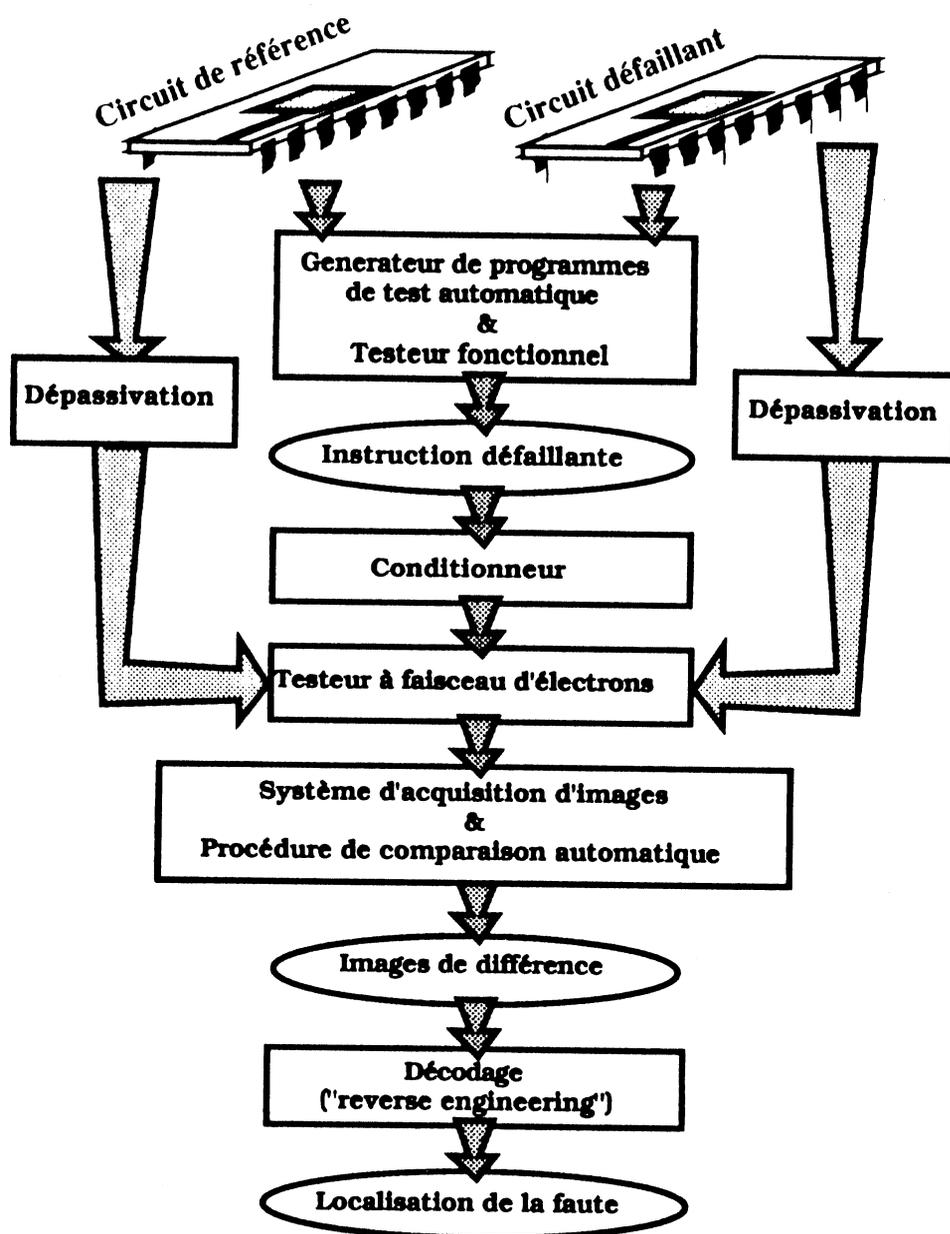
- l'extraction des différences de contraste, afin de localiser en surface la manifestation du défaut. Cette étape permet de réduire la zone d'analyse pour la localisation physique du défaut ;

- la localisation physique du défaut ; cette dernière étape doit permettre de localiser le défaut lorsque celui-ci est enterré. Cette étape nécessite donc une procédure de décodage ("reverse engineering") pour remonter à la source de la défaillance.

La mise en œuvre d'une telle étude s'intègre dans une procédure qui dépasse les techniques d'imageries développées dans le cadre de cette thèse. Aussi, pour mener à bien ce travail, nous avons réuni toutes les compétences utiles grâce à une étroite collaboration avec les laboratoires :

- \* LGI/UGM-IMAG pour le test fonctionnel ;
- \* ESTE-Barcelone pour le conditionnement des circuits.

Ce chapitre se compose de 3 parties. Une première partie présente le test fonctionnel et les outils mis en œuvre pour déterminer l'instruction défaillante [VEL90]. La seconde partie présente les études de cas menées au cours de ces expérimentations. Enfin, une dernière partie analyse les résultats de superposition et propose des solutions pour augmenter la fiabilité de la comparaison automatique.



**Figure VI.1** Stratégie globale d'analyse de défaillances de microprocesseurs

## VI.2 Test fonctionnel de microprocesseurs

L'objet de ce paragraphe est de présenter brièvement la méthode et l'équipement de test utilisés dans le cadre de nos expérimentations pour déterminer les instructions manifestant les défaillances.

Cette présentation n'étant pas exhaustive, nous conseillerons au lecteur de se reporter aux articles [THA75], [CHI76], [LIN80], [ROB80],

[SU81], [ANN75], [BEL82], et [SUS83] pour avoir une vision plus complète de ce domaine du test.

### VI.2.1 Génération de programmes de test

La méthode de test présentée par [BEL84] consiste à générer un programme de test à partir d'une description fonctionnelle du microprocesseur, déduite du manuel utilisateur. Cette méthode, adaptée à l'étude de circuits à structure inconnue, utilise un test par "identification", qui vise à identifier le fonctionnement correct du circuit par comparaison à ses spécifications.

Un générateur automatique de programmes de test **GAPT** (Génération Automatisée de Programmes de Test) a donc été défini pour activer quasi-exhaustivement les fonctions du circuit à tester. Ce système, présenté en figure VI.2, génère les programmes à partir d'une description de haut niveau du microprocesseur.

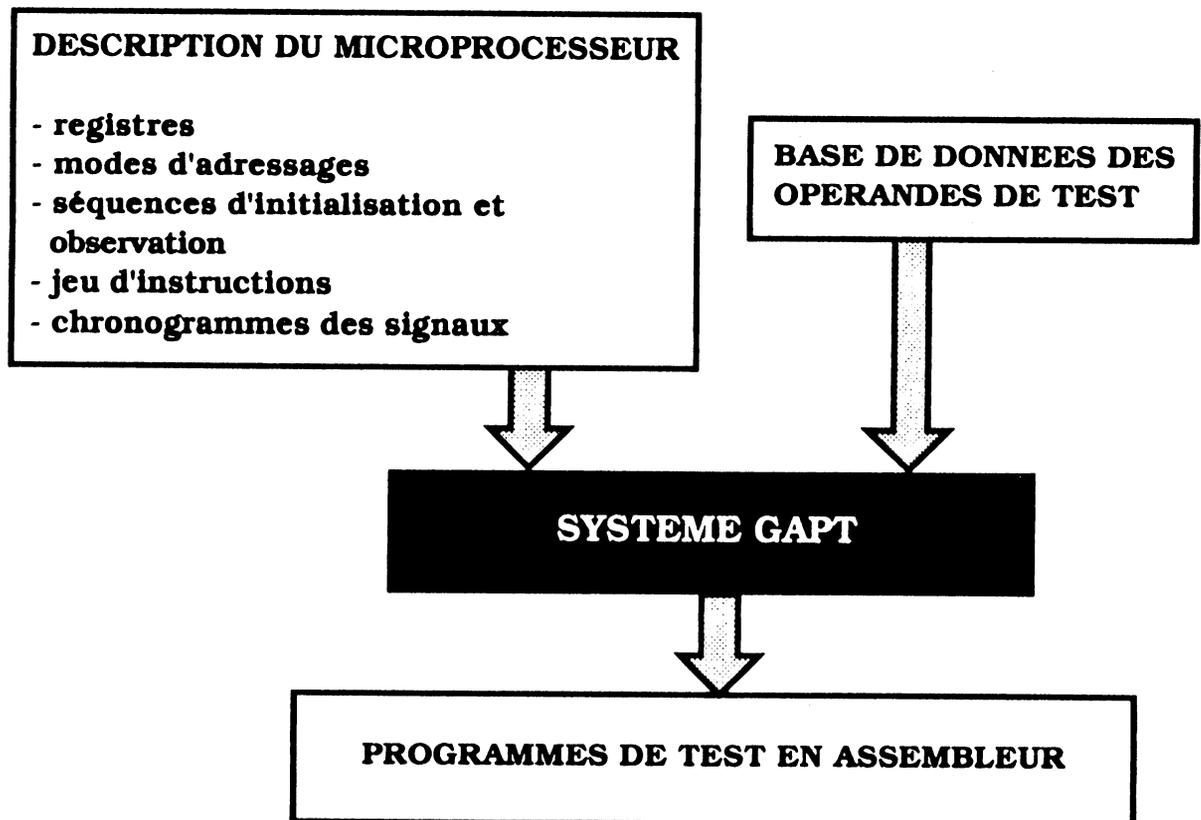


Figure VI.2 Système GAPT

Les programmes de test générés sont composés d'un ensemble de modules élémentaires de la forme :

- \* initialisation ;
- \* activation (instruction et éventuellement signal) ;
- \* observation.

L'initialisation et l'observation sont des séquences d'instructions, respectivement de type LOAD et STORE, qui permettent d'accéder aux registres internes du microprocesseur.

Au niveau de l'activation, on vérifie que :

- \* les blocs fonctionnels qui doivent être activés le sont correctement ;
- \* les blocs fonctionnels qui ne doivent pas être activés ne le sont pas.

Pour cela, on initialise tous les registres internes du microprocesseur de telle sorte que :

- \* les registres "cible" des opérations effectuées aient leur valeur modifiée ;
- \* les registres non utilisés aient une valeur différente des registres utilisés ;

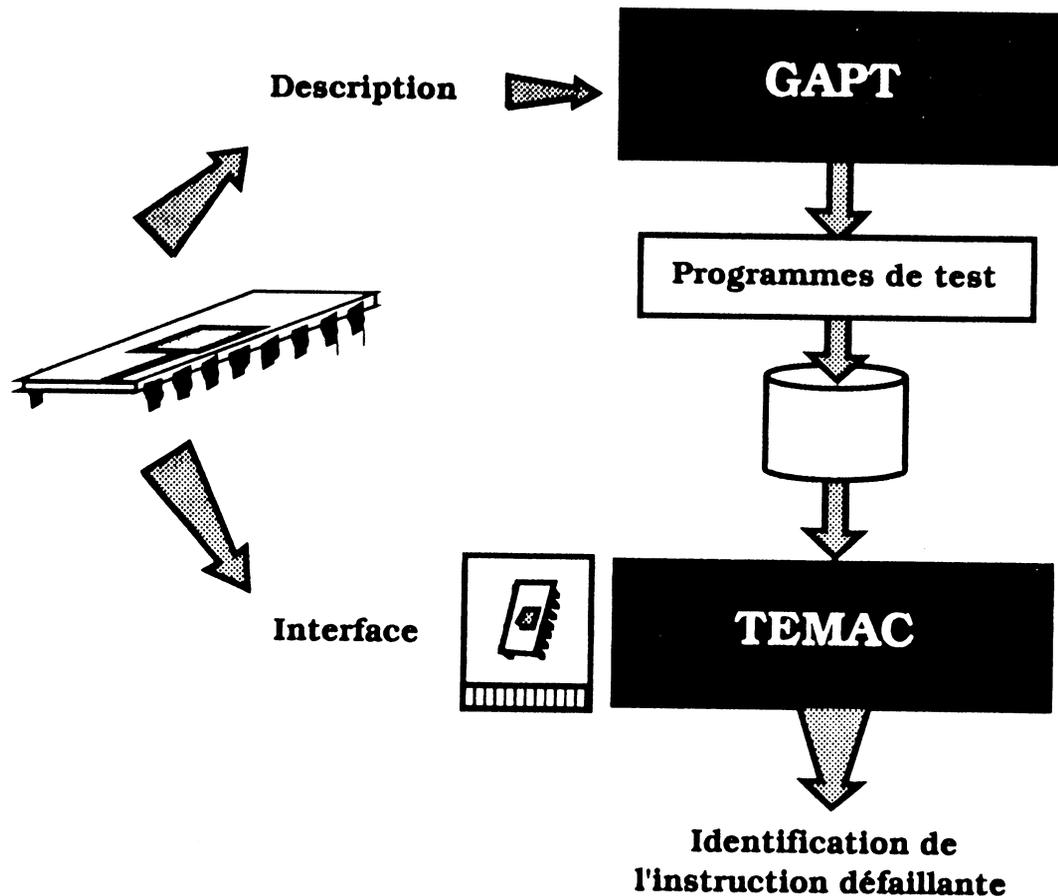
En conséquence, l'observation consiste à stocker en mémoire tous les registres internes.

Un aspect itératif a été ajouté au module élémentaire pour prendre en compte le grand nombre d'activations associées à chaque code mnémotique ( ADD, SUB, MOVE,... ). En effet, une instruction donnée peut, dans certains cas, être définie pour différentes tailles (octet, mot, mot long), différents modes d'adressage,... Ces combinaisons doivent donc être toutes activées à partir du mnémotique de base.

Finalement, on remarque que les modules élémentaires ont tous une même structure se prêtant bien à la génération automatique des programmes de test. Ceux-ci, générés par GAPT, sont réalisés en langage d'assemblage pour utiliser au mieux les possibilités d'itération sur les instructions, et assurer une portabilité des programmes.

### VI.2.2 Le testeur fonctionnel - TEMAC

Le testeur fonctionnel **TEMAC** a été conçu pour appliquer les programmes générés par GAPT (figure VI.3). Il fonctionne au niveau des instructions (et non au niveau du cycle d'horloge) et ne mémorise que les mots mémoires que le microprocesseur doit recevoir.



**Figure VI.3** Chaîne de test GAPT/TEMAC

Ce testeur est commandé par un micro-ordinateur qui gère le séquençement du test par :

- \* chargement de la mémoire de test ;
- \* lancement de l'exécution du programme de test ;
- \* comparaison des résultats obtenus à des résultats de référence.

Les résultats d'observation sont obtenus par des registres de signature. Des signatures de référence sont comparées à ces résultats pour détecter les instructions défaillantes au niveau de chaque module élémentaire.

## **VI.3 Etude de cas**

### **VI.3.1 Généralités**

La validation expérimentale a été menée sur des microprocesseurs MC68000 dont les défaillances ont été créées artificiellement : les défauts ont été réalisés par tir laser en coupant des connexions à la surface du composant. L'objectif de notre analyse fut donc de localiser ces défauts par application de notre méthodologie d'analyse de défaillances.

Il est évident que l'analyse de tels circuits est grandement facilitée par le fait que le défaut est localisé à la surface du circuit, ne nécessitant, dans ce cas, aucune étape de décodage pour sa mise en évidence (cf. figure VI.1).

Malgré cette simplification, cette étude a permis de caractériser pleinement nos techniques d'imagerie dans des conditions réelles d'observation.

Avant de décrire les résultats de nos expériences, il nous faut présenter le contexte de mise en œuvre ainsi que les caractéristiques techniques des circuits étudiés dans le cadre de ces expérimentations.

#### **A - Caractéristiques des circuits**

Concernant les circuits, compte tenu de sa complexité, notre choix s'est porté sur le microprocesseur 68000 fabriqué en seconde source par la firme THOMSON. Nous avons donc travaillé sur des circuits, de technologie HMOS (NMOS grille poly de 3,5  $\mu\text{m}$ ), qui occupent une surface totale de 44,3 mm<sup>2</sup> avec des connexions en surface de 3  $\mu\text{m}$  de largeur.

Notre connaissance de l'architecture interne s'est limitée à l'organisation topologique des principaux blocs fonctionnels (partie opérative, contrôle de l'ALU, ROM, ...). Cette information élémentaire est vite apparue indispensable pour se repérer dans un circuit aussi complexe. Dans le cas de circuits à structure inconnue, la topologie générale peut être obtenue par un décodage grossier au microscope optique. Pour notre analyse, nous avons utilisé le plan de masse, présenté en figure VI.4, issu des travaux réalisés par [BOS80] et [OBR82].

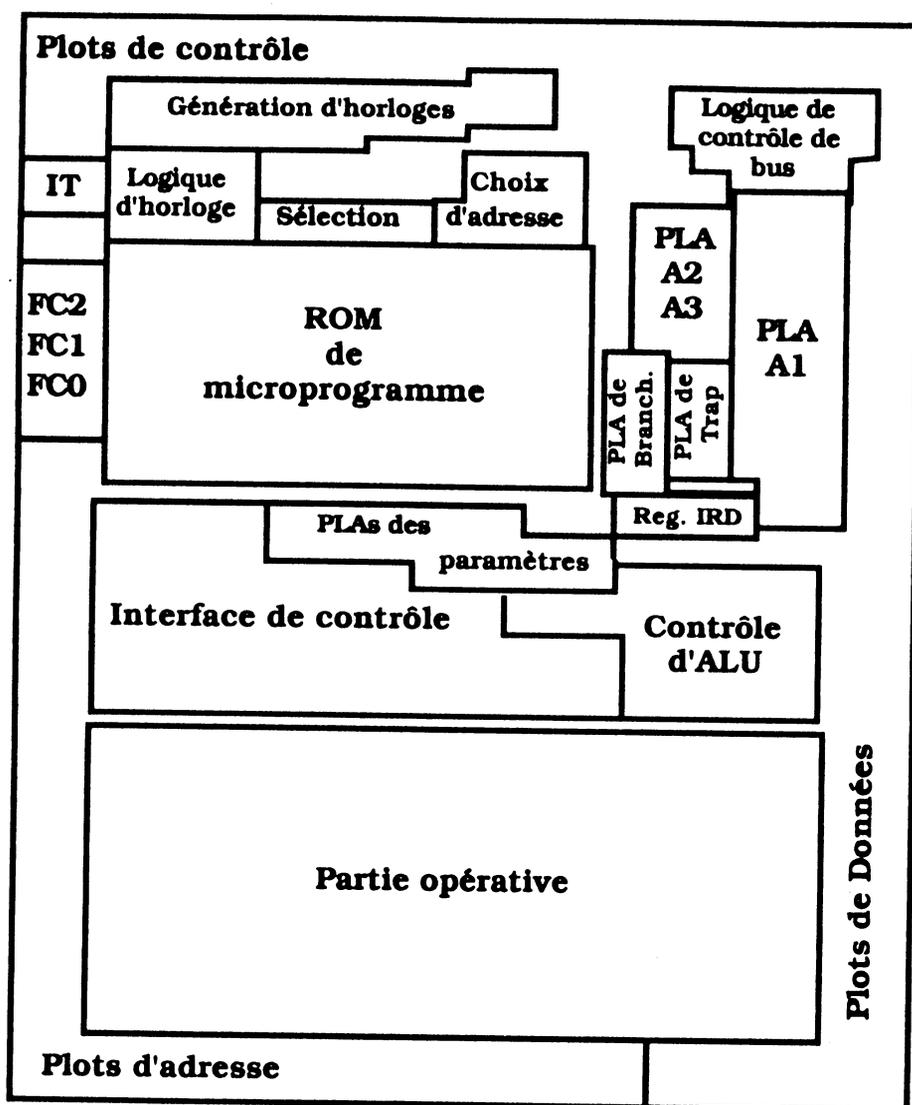


Figure VI.4 Topologie du microprocesseur 68000

## B - Caractéristiques de l'observation en microscopie électronique

La nature séquentielle des circuits nous impose de travailler en mode dynamique. Nous avons donc observé le fonctionnement interne du microprocesseur en mode stroboscopie de faisceau.

Le signal de synchronisation, indispensable à ce type d'observation, est généré par un comparateur qui détecte le passage du programme de test par une adresse fixe (cf. chapitre V, §V.1.4). Ce système de synchronisation impose une construction de programmes de test qui boucle à une adresse fixe. Ainsi, la structure générale d'un programme de test doit impérativement prendre la forme suivante :

§ Adresse "instruction défailante"  
Jump § Adresse

Au niveau de la configuration de la colonne, la formation des images a été réalisée en stroboscopie de faisceau avec les paramètres suivants :

- énergie de faisceau : 1 Kev ;
- courant de faisceau : 1 nA ;
- largeur de l'impulsion de faisceau : 100 ns ;

Par ailleurs, le grandissement de l'image a été fixé à une valeur de 366. Il correspond à une dimension de pixel de 0,5 µm (6 pixels pour des largeurs de connexion de 3µm).

### C - Caractéristiques liées à l'imagerie

La capacité mémoire et le temps d'exécution d'une analyse sont les 2 caractéristiques importantes pour la mise en œuvre de nos techniques d'imagerie [CON89a].

La capacité mémoire est une grandeur qui dépend directement du nombre d'images étudiées au cours d'une analyse. Ce nombre est déterminé à partir de la formule suivante :

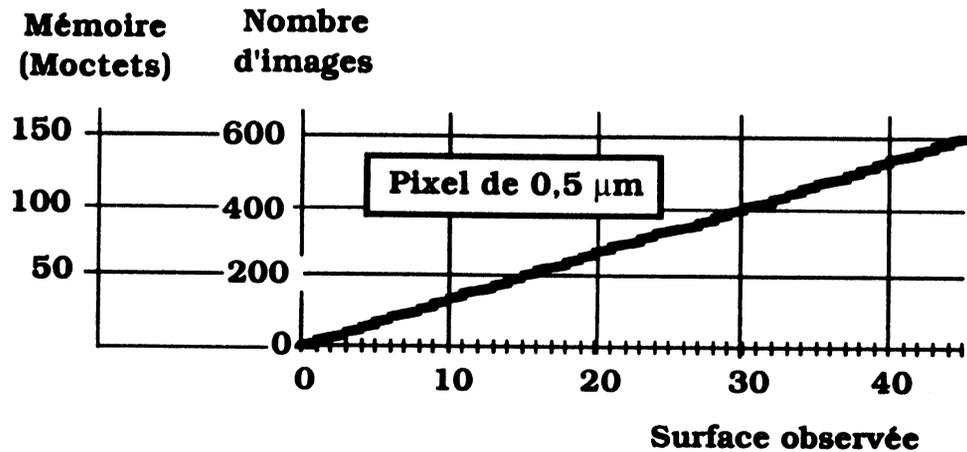
$$N = \frac{S}{U^2 \cdot NBI}$$

Dans laquelle **S** représente la surface observée, **U** la taille du pixel et **NBI** le nombre de pixels par image.

La figure VI.5 montre la courbe représentant le nombre d'images en fonction de la surface observée ; la taille du pixel a été fixée dans cette représentation à 0,5 µm ce qui correspond au rapport de la largeur des connexions, évaluée à 3 µm sur le MC68000, sur la dimension du motif élémentaire fixée à 6 pixels (cf. chapitre IV, §IV.4).

D'après cette courbe, nous constatons que le nombre d'images, nécessaires pour couvrir la totalité du circuit, est de l'ordre de 600 pour une seule zone d'observation. Ce nombre doit être multiplié par 3 dans le cas d'une analyse complète qui comprend :

- la zone d'observation pour le circuit défaillant ;
- la zone d'observation pour le circuit de référence ;
- la zone d'observation pour les images de différence



**Figure VI.5** Capacité mémoire et nombre d'images en fonction de la surface observée

La capacité de mémorisation de notre station de test est limitée à 1200 images (cf. chapitre V ,§V.1.2). Elle ne permet donc pas de travailler sur l'ensemble du circuit qui nécessiterait environ 1800 images (3 zones de 600 images). Face à ce problème, nous avons étudié ce circuit en le partitionnant en plusieurs zones d'observation d'une centaine d'images. Il est évident que l'augmentation de la mémoire de masse aurait permis de travailler sur l'ensemble du circuit.

Au niveau temporel, on peut évaluer le temps d'une analyse, pour un nombre d'images donné, en évaluant le temps moyen de comparaison pour un couple d'images. Ce temps moyen doit prendre en compte d'une part l'acquisition du couple d'images et d'autre part l'opération élémentaire de comparaison.

La valeur du temps d'acquisition en stroboscopie dépend de la durée de la séquence de test et du nombre de trames moyennées, si l'image est améliorée par intégration. Son expression est la suivante :

$$T_{\text{acquisition}} = N_p \cdot T_s \cdot N_t$$

Dans laquelle **T<sub>s</sub>** représente la durée de la séquence de test, **N<sub>t</sub>** le nombre de trames moyennées et **N<sub>p</sub>** le nombre de pixels par image.

L'optimisation de ce temps, qui consiste à réduire la durée d'analyse, nécessite de travailler avec une durée de séquence de test la plus petite possible. Pour cela, on cherchera d'une part à travailler à la fréquence d'horloge microprocesseur maximale qui permet de manifester la défaillance, et d'autre part à réduire au maximum le nombre d'instructions composant la séquence de test. En ce qui concerne le nombre d'intégrations, celui-ci a été fixé à 10 trames. Il correspond à la valeur optimale précédemment caractérisée au chapitre IV, §IV.2.1. Dans ces conditions, ce temps évolue en moyenne entre 30 s et 1 mn selon la durée de la séquence de test.

Pour ce qui est de l'opération élémentaire de comparaison, ce temps a été évalué en moyenne à 40 secondes dans notre environnement de test. Le détail des temps élémentaires mis en jeu dans ce calcul est présenté dans le tableau de la figure VI.6 ; les relevés ont été réalisés pour chaque opération élémentaire de la procédure de comparaison (développée uniquement en langage C).

Ces temps, obtenus sur notre station de travail SUN 3/160, peuvent être améliorés en utilisant une station plus puissante. Nous avons effectué les mêmes tests sur la station à architecture RISC qui doit équiper la version commerciale du testeur ST15. Les résultats donnent dans cette configuration un temps moyen de comparaison de 13 secondes.

Au delà de cette amélioration, ces temps peuvent être encore considérablement réduits par l'utilisation de processeurs cablés. Cette aspect matériel ne peut être négligé dans un milieu industriel, qui requiert une parfaite optimisation des temps d'analyse. Aussi, notre procédure de comparaison d'images, qui doit équiper la version industrielle des testeurs CAMECA, devra être impérativement intégrée sur des cartes dédiées aux traitement d'images.

D'après ces constatations, on peut évaluer, sur notre station de test, à 2 mn 40 s le temps moyen de comparaison d'un couple d'images (2 acquisition de 1mn + 1 comparaison de 40s). Ainsi, on peut estimer le temps d'analyse d'une centaine d'images (zone d'observation classique) à une demi-journée (environ 4 heures d'analyse). Une présentation plus précise sera donnée dans la suite pour chaque cas d'étude.

OPERATION	Temps élémentaire (seconde)	Nombre d'appels	Temps total (seconde)
Chargement de l'image	2,5	2	5
Copie d'une image (en mémoire centrale)	1,5	2	3
Lissage	4	2	8
Seuillage automatique	2	2	4
Elimination des artéfacts	1,5	2	3
Extraction des contours	2	2	4
localisation des coins	1	2	2
calcul du décalage	< 0,1	1	< 0,1
Translation	0,5	1	0,5
Différence (inversion +somme)	4,5	1	4,5
Stockage sur disque	1,5	1	1,5
<b>Temps total de comparaison</b>			<b>35,5</b>

**Figure VI.6** Temps de comparaison d'un couple d'image

### VI.3.2 Premier cas d'étude

Dans ce premier cas d'étude, le test fonctionnel a mis en évidence un problème au niveau de l'instruction **move**. La défaillance se manifestait, lors de l'exécution de l'instruction "move.a data, a4", par une instabilité de la donnée placée dans le registre destination (registre adresse).

Nous avons donc appliqué la séquence de test :

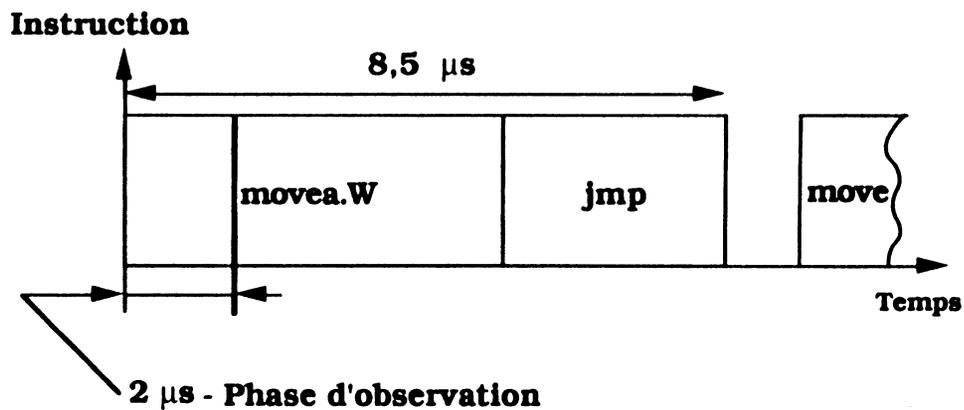
```

§adr1    move.w data, a4
           jmp §adr1

```

avec une fréquence d'horloge de 2 Mhz.

L'observation en mode stroboscopie de faisceau a été réalisée pour une phase d'observation de 2  $\mu$ s, sur une durée de cycle de 8,5  $\mu$ s (cf. figure VI.7).



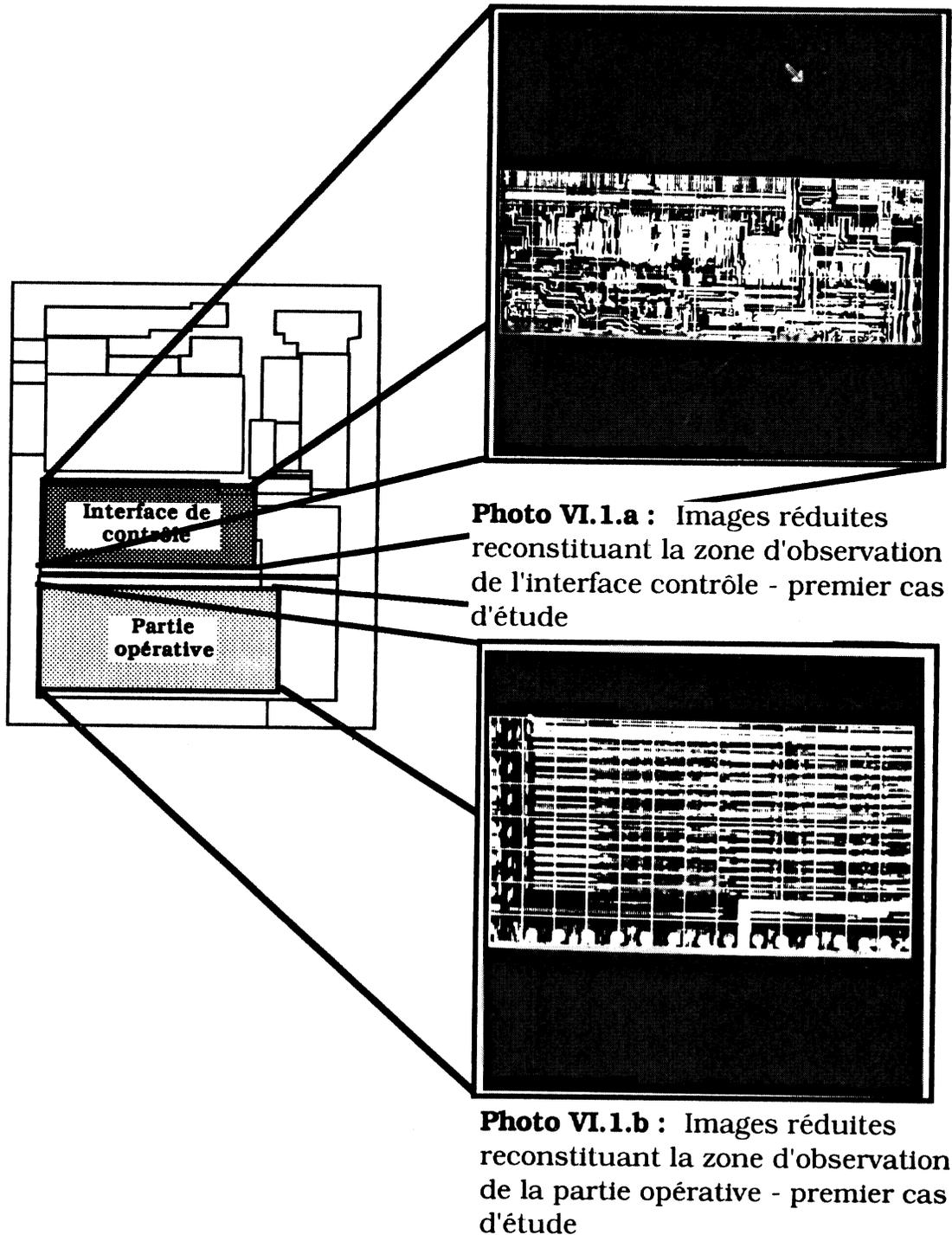
**Figure VI.7** Description temporelle de la séquence de test - premier cas d'étude

Les caractéristiques liées à l'observation sont regroupées dans le tableau présenté en figure VI.8.

Zone d'observation	Nombre d'images	Surface couverte	Temps d'analyse		
			Acquisition	Comparaison	total
Partie opérative	91	6 mm <sup>2</sup>	1 h 10 mn	1 h	2 h 10 mn
Interface contrôle	65	4 mm <sup>2</sup>	50 mn	45 mn	1 h 35 mn

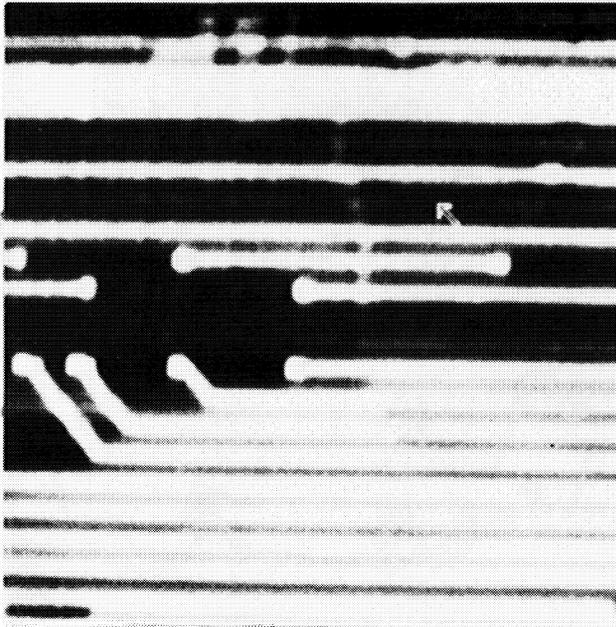
**Figure VI.8** Caractéristiques liées à l'observation du premier cas d'étude

La recherche du défaut a nécessité 2 observations successives couvrant dans un premier temps la partie opérative (80% de la surface) et dans un deuxième temps l'interface contrôle (cf. figure VI.9). Le défaut a été localisé au niveau de l'interface de contrôle. Les photos VI.2.a, b, et c présentent les différences de contraste de potentiel dues à la coupure d'une connexion par tir laser.

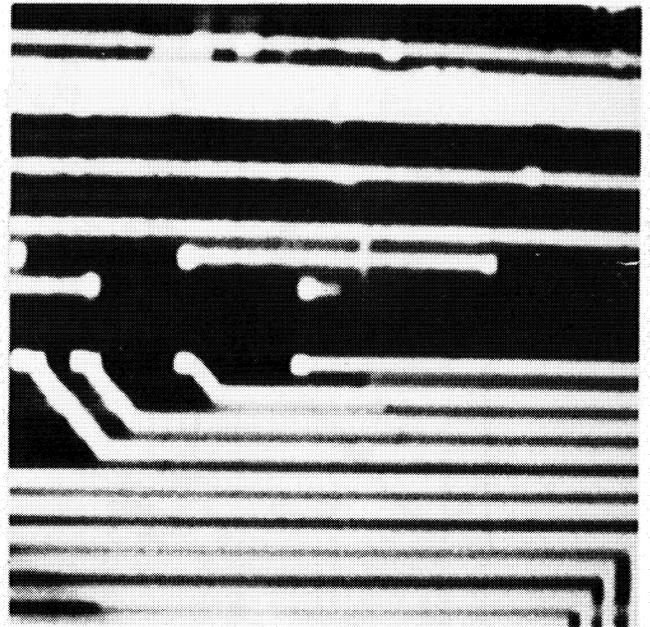


**Figure VI.9** Présentation des zones d'observations - premier cas d'étude

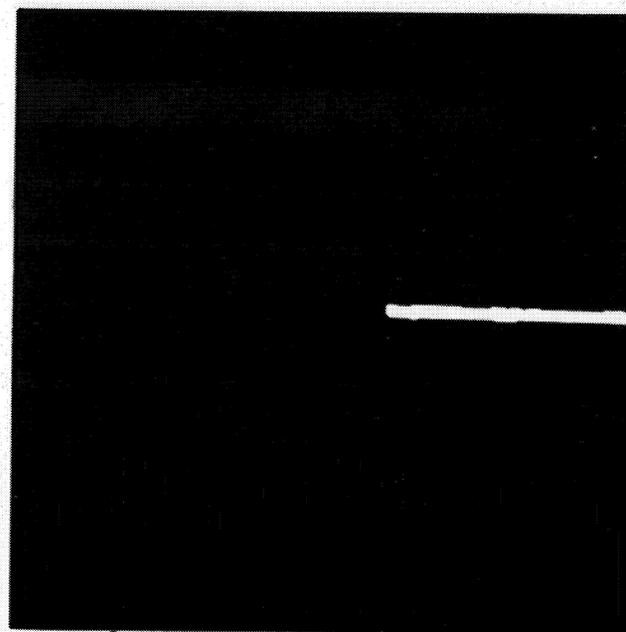
**Visualisation du défaut - premier cas d'étude**



**Photo VI.2.a** Image du circuit de référence



**Photo VI.2.b** Image du circuit défaillant



**Photo VI.2.c** Image de différence - vue du défaut

### VI.3.2 Second cas d'étude

Le test fonctionnel a donné l'instruction de chargement d'une adresse effective, notée lea ("load effective address"), comme défaillante. Le problème se manifestait par le collage d'un bit à "0" au niveau du registre destination (registre d'adresse).

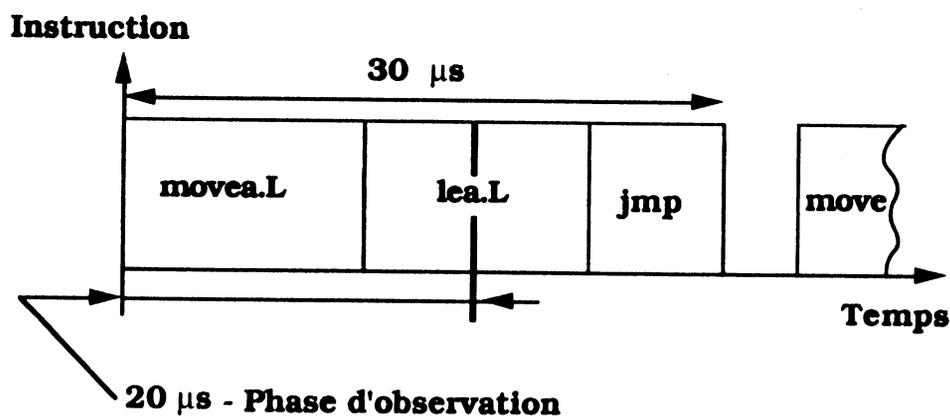
Pour mettre en évidence ce défaut, nous avons construit la séquence de test suivante :

```

§adr1          movea.l adr, a0
                  lea.l d(a0), a1
                  jmp §adr1

```

Ce défaut a été observé à la fréquence maximale de 1 Mhz ; au-delà, le circuit n'était plus fonctionnel. Dans ces conditions, l'observation a été réalisée avec une séquence de test de 30 $\mu$ s. Le délai d'observation, choisi au niveau de l'instruction "lea", a été fixé à 20  $\mu$ s (cf. figure VI.10).



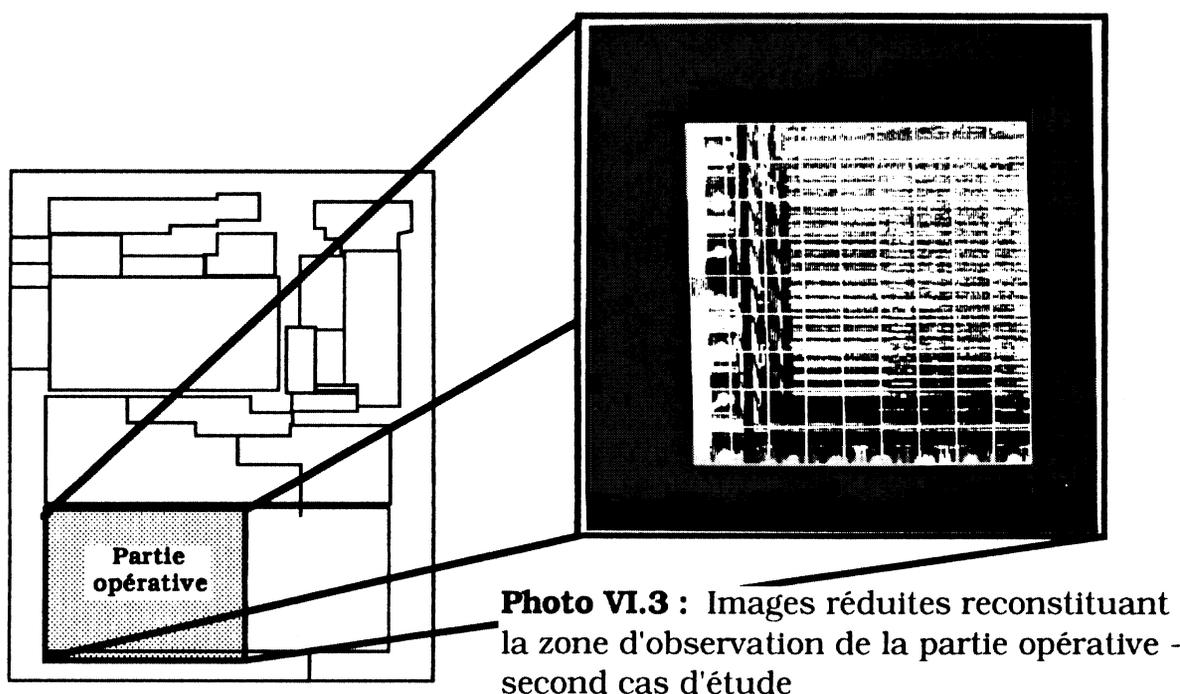
**Figure VI.10** Description temporelle de la séquence de test - second cas d'étude

Les résultats de l'observation sont présentés dans le tableau suivant (cf. figure VI.11) :

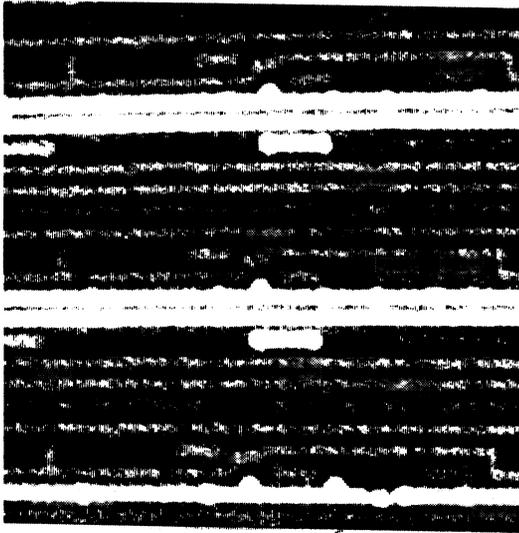
Zone d'observation	Nombre d'images	Surface couverte	Temps d'analyse		
			Acquisition	Comparaison	total
Partie opérative	81	5,3 mm <sup>2</sup>	3 h 30 mn	1 h	4 h 30 mn

**Figure VI.11** Caractéristiques liées à l'observation du second cas d'étude

Pour cette analyse, le défaut a été localisé sur la partie opérative avec une seule zone d'observation (cf. figure VI.12 et photo VI.3). Comme dans le cas précédent, les photos VI.4.a, b, et c mettent en évidence la défaillance.



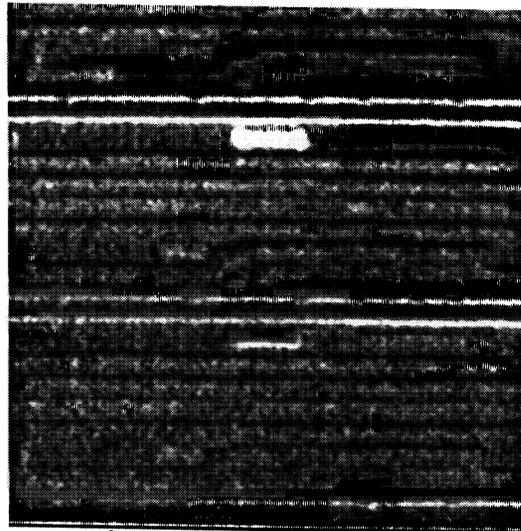
**Figure VI.12** Présentation de la zone d'observation - second cas d'étude

**Visualisation du défaut - second cas d'étude**

**Photo VI.4.a** Image du circuit de référence



**Photo VI.4.b** Image du circuit défaillant



**Photo VI.4.c** Image de différence - vue du défaut

## **VI.4 Analyse des résultats de comparaison**

Les études de cas précédentes ont permis d'évaluer les performances de notre procédure de comparaison automatique. A cette fin, les incidents de superposition ont été identifiés et analysés afin d'élaborer des solutions pour augmenter la fiabilité de notre outil.

### **VI.4.1 Définition des incidents de superposition**

Avant de présenter les résultats de comparaison, il est important de définir les incidents qui peuvent entraîner une erreur de superposition. La superposition automatique par la méthode des coins peut être perturbée par 3 problèmes :

- l'analyse de motifs strictement rectilignes (horizontaux ou verticaux) pour lesquels l'absence de coin rend impossible le recalage ;
- la faible qualité du contraste qui induit des erreurs de seuillage automatique perturbant ainsi la détection des coins ;
- les écarts en translation supérieurs au champ de recalage (cf. chapitre IV, §IV.7) qui ne permet plus de mettre en correspondance des motifs identiques ;

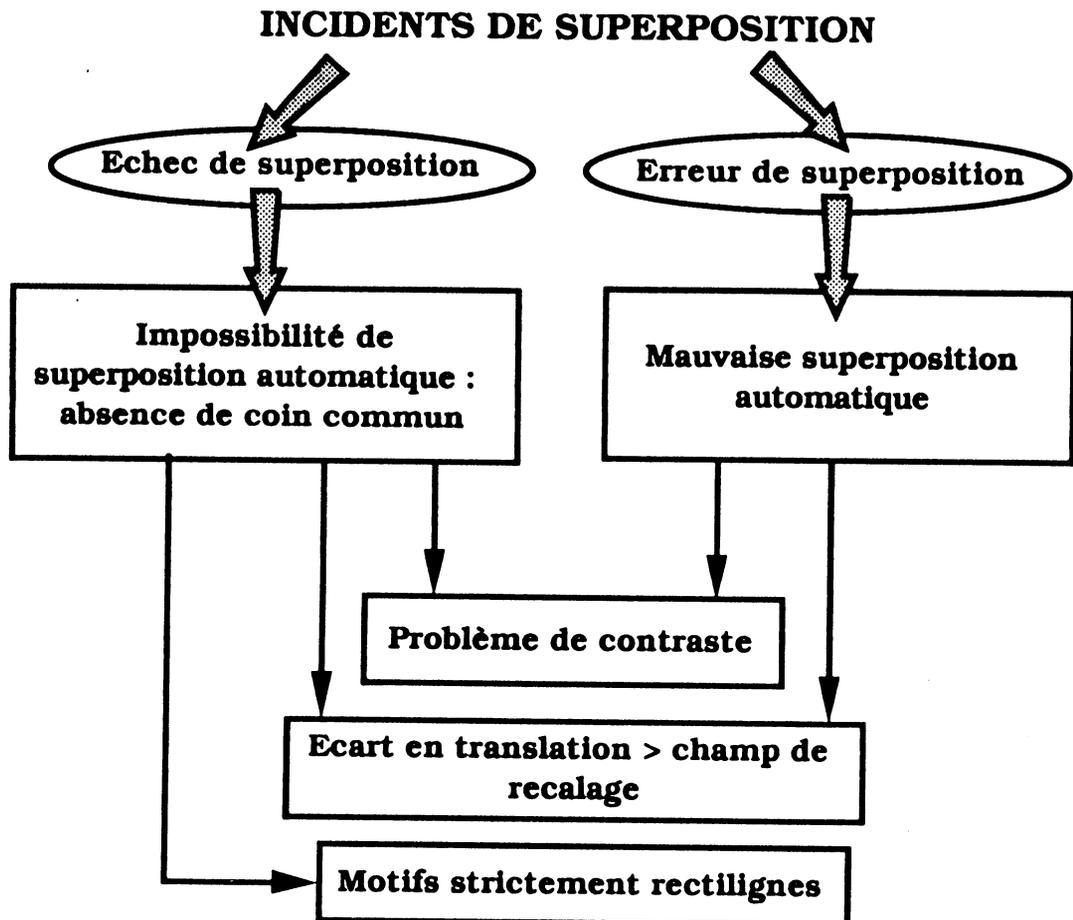
Ces problèmes peuvent induire deux types d'incidents (cf. figure VI.13) :

- "l'échec de superposition" qui traduit, par l'absence de coin commun (entre les images à comparer), l'impossibilité de calculer les écarts en translation ; ce type d'incident est issu d'une des trois causes précédemment définies.

- "l'erreur de superposition" qui représente les incidents dus à un calcul erroné des écarts en translation ; il a pour origine les problèmes de contraste ou les écarts en translation supérieurs au champ de recalage.

Contrairement à l'erreur de superposition, l'échec offre l'avantage de pouvoir être automatiquement détecté grâce à l'historique des opérations d'imagerie (cf. chapitre V, §V.2.2.1.A). En effet, cet historique regroupe en particulier le paramètre caractérisant le nombre de coins communs : l'échec est déterminé lorsque ce paramètre est nul.

Nous verrons par la suite que certains de ces échecs peuvent alors être éliminés automatiquement par une correction *a posteriori*, augmentant ainsi la fiabilité de nos comparaisons.



**Figure VI.13** Classification des incidents de superposition

#### VI.4.1 Présentation des résultats de comparaison

L'analyse des résultats a été menée à partir de l'historique généré par le logiciel de comparaison (cf. chapitre V, §V.2.2.1.A). Cet historique regroupe pour chaque comparaison les paramètres suivants :

- les seuils de binarisation de chaque image à comparer ;
- le nombre de coins détectés ;
- le nombre de coins communs utilisés pour le calcul du décalage ;
- la valeur en pixels des écarts en translation .

Cette information a donc été relevée pour chacune des 3 zones analysées précédemment (partie opérative du premier cas d'étude, interface de contrôle du premier cas d'étude et partie opérative du second cas d'étude). Ces résultats sont présentés en annexe III sous forme de tableaux.

A partir de ces données, nous avons dressé un bilan des incidents de superposition. Le tableau présenté en figure VI.14 présente ce bilan ; il s'accompagne d'une cartographie des incidents, présentée en figure VI.15.

Au vu de ces résultats, on constate que le taux de réussite varie fortement selon la zone étudiée : entre 65% et 99%. Les incidents les plus fréquents sont liés soit à la présence de motifs strictement rectilignes, soit à des problèmes de contraste.

Les motifs rectilignes ont été particulièrement rencontrés sur les zones couvrant les parties opératives. En effet, l'architecture de la partie opérative de ce microprocesseur présente en surface de nombreuses connexions horizontales qui conduisent inmanquablement à un échec de superposition (cf. photo VI.5.b).

Les problèmes de contraste ont été principalement constatés sur les images représentant les plots du circuit (cf. photo VI.5.a). Dans ce cas, l'incident de superposition est dû à une erreur de seuillage : ces images présentent un contraste topographique très marqué sur les parties arrondies de la soudure et du fil ; cette variation de contraste fausse l'opération de seuillage automatique par l'introduction, sur l'histogramme, d'un nouveau pic qui est interprété comme le niveau logique "0" ; après seuillage, l'image binaire donne alors une information incohérente qui peut conduire soit à un échec de superposition (absence de coins communs), soit à une erreur de superposition (listes de coins incohérentes).

A l'exception des plots, un seul problème de contraste a été constaté. Il est apparu sur une image (cf. photo VI.5.c) présentant un ensemble de connexions parallèles portées au niveau logique "0". Ce phénomène s'explique par un effet de proximité important qui a perturbé la distribution des niveaux de gris ; le seuillage automatique n'a donc pas réussi à extraire proprement le niveau "0" de l'image issue du circuit défaillant (cf. annexe III, tableau 2, image 2) ; cette erreur de seuillage a entraîné une erreur de superposition.

Zone d'observation	Nombre d'images	Echecs de superposition			Erreurs de superposition		Taux de réussite
		Motifs rectiligne	Problèmes de contraste	Ecart > champ de recalage	Problèmes de contraste	Ecart > champ de recalage	
Partie opérative - premier cas d'étude	91	5	7	0	5	0	81%
Interface contrôle - premier cas d'étude	65	0	0	0	1	0	99%
Partie opérative - second cas d'étude	81	14	11	0	3	0	65%

**Figure VI.14** Bilan des incidents de superposition

**Légende :**

Echecs de superposition : absence de coin



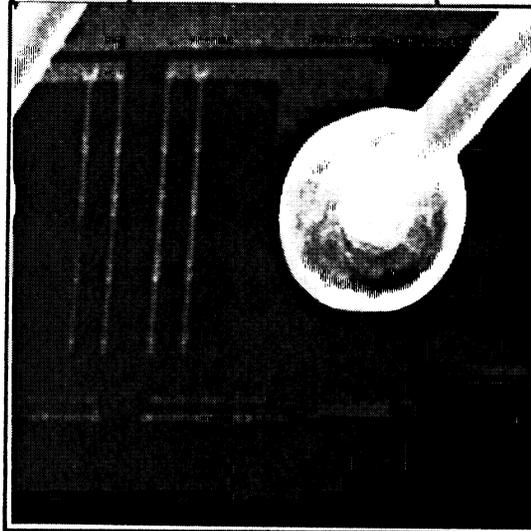
Echecs de superposition : problème de contraste



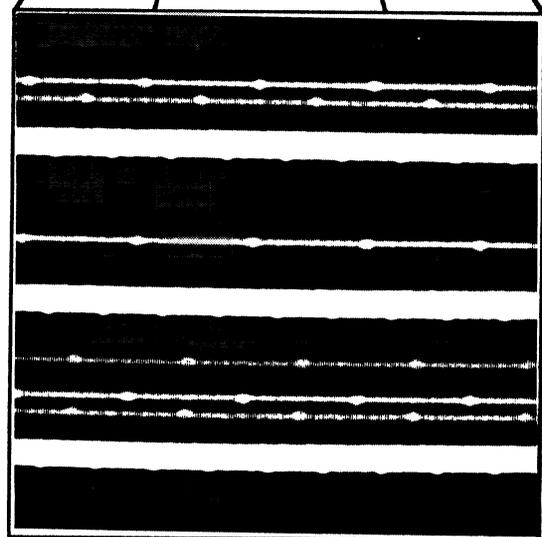
Erreurs de superposition : problème de contraste

a

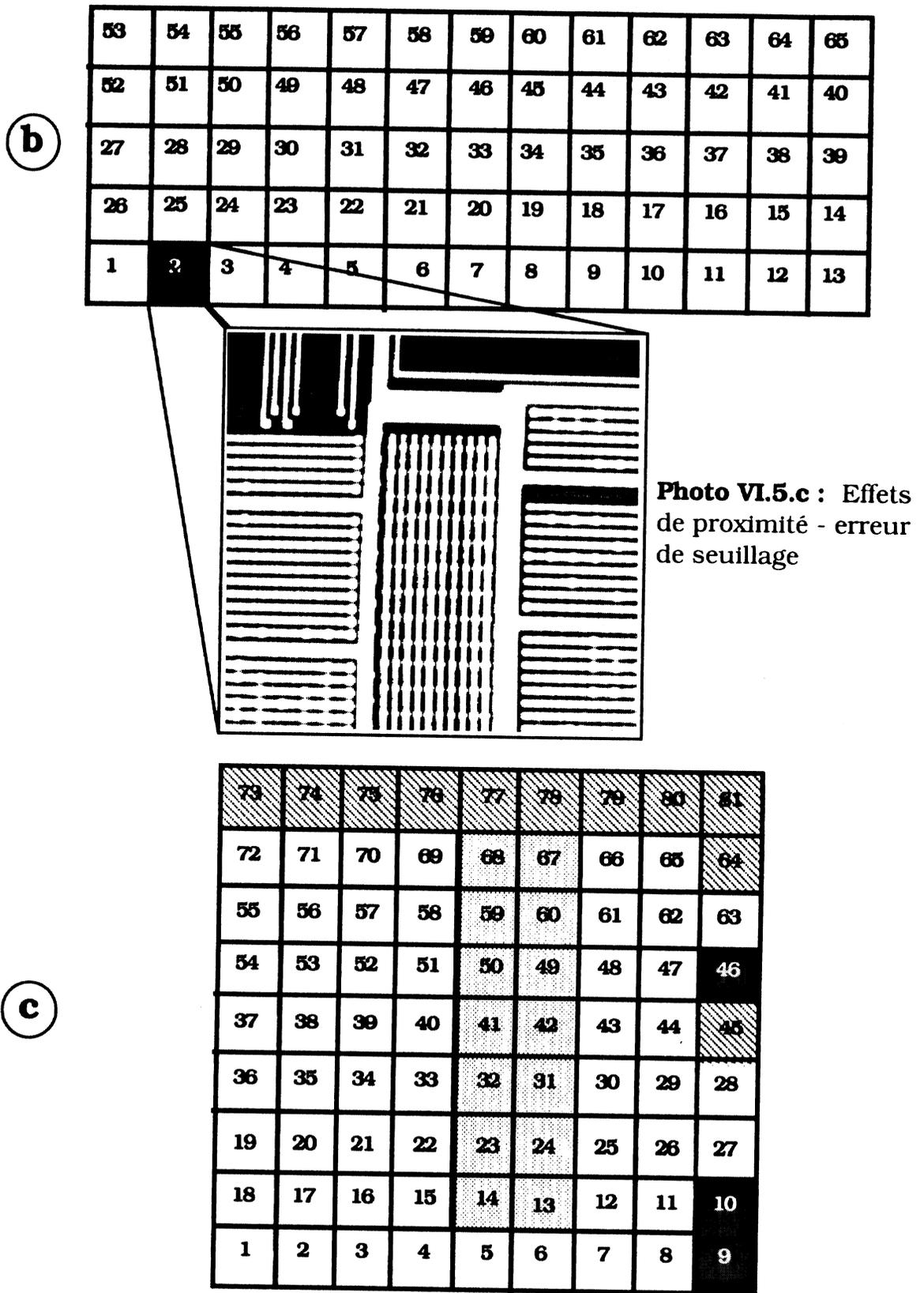
79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91
78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66
53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40
27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13



**Photo VI.5.a :** Vue des plots  
- problème de contraste



**Photo VI.5.b :** motifs horizontaux  
- absence de coins



**Figure VI.15** Cartographie des incidents de superposition - a partie opérative du premier cas d'étude - b interface de contrôle du premier cas d'étude - c partie opérative du second cas d'étude

A l'exception de ces incidents de superposition, la mise en correspondance a été réalisée avec une précision de  $\pm 1$  pixel : l'erreur est inhérente au contraste topographique qui perturbe l'extraction des objets et, par la suite, la position réelle des coins (cf. chapitre IV, §IV.4). Malgré ce problème, les images de différence offrent suffisamment d'information pour caractériser correctement les différences de contraste.

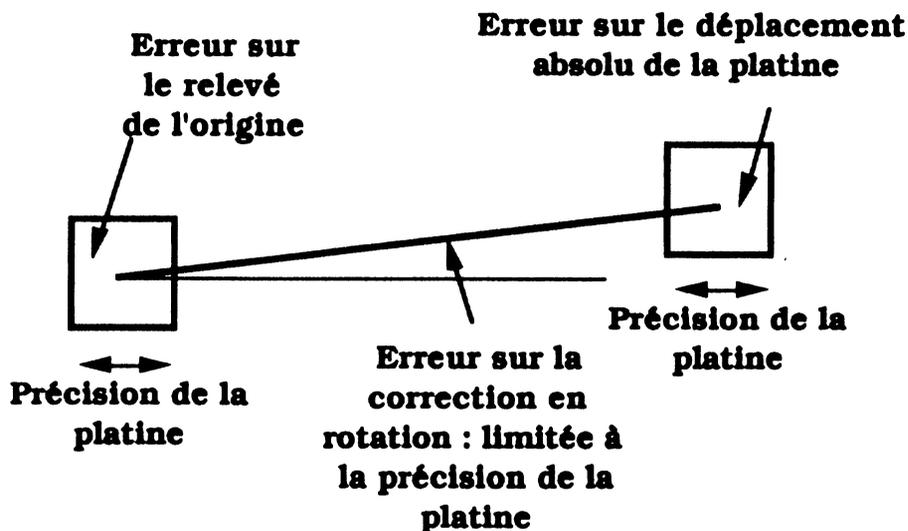
Par ailleurs nous avons constaté, dans la majorité des cas, des écarts en translation variant de  $\pm 3$  pixels. Ces écarts caractérisent l'erreur de déplacement entre l'image issue du circuit de référence et celle issue du circuit défaillant. Pour cette étude, l'erreur de déplacement peut être évaluée à  $\pm 1,5 \mu\text{m}$  (pixel de  $0,5 \mu\text{m}$ ).

Ce résultat peut s'expliquer par le cumul de 3 erreurs de même importance (cf. figure VI.16) :

- l'erreur sur le relevé de l'origine de la zone d'observation, limité par la précision de la platine ( $\pm 0,5 \mu\text{m}$ ).

- l'erreur sur le positionnement de la platine calculé par rapport à l'origine de la zone ; comme précédemment, elle dépend de la précision de la platine ( $\pm 0,5 \mu\text{m}$ ).

- l'erreur issue des corrections des différences de rotation (cf. chapitre II, §II.3.2.1.B); elle est généralement limitée à la précision de la platine ( $\pm 0,5 \mu\text{m}$ ).



**Figure VI.16** Les erreurs de déplacement

Toutefois, nous avons constaté des écarts en translation allant jusqu'à  $\pm 10$  pixels (soit  $\pm 5 \mu\text{m}$ ) qui ne peuvent s'expliquer uniquement par l'interprétation précédente. Ce problème ponctuel semble être distribué de façon aléatoire dans la zone d'observation. Il peut s'expliquer par une dégradation de la précision de la platine, due à une instabilité au niveau de l'indexation du positionnement.

Au cours de nos analyses, ces problèmes n'ont pas perturbé notre procédure de comparaison, car l'absence de structures redondantes nous a permis de fixer un rayon d'action égal à la distance du pas entre connexions (cf. chapitre IV, §IV.7). Cette valeur, estimée pour notre grandissement à 12 pixels, a toujours été supérieure aux erreurs maximales de déplacement.

D'après les résultats précédents, il est aisé de constater que l'application de cette procédure à des technologies plus fines nécessite une plus grande précision de platine.

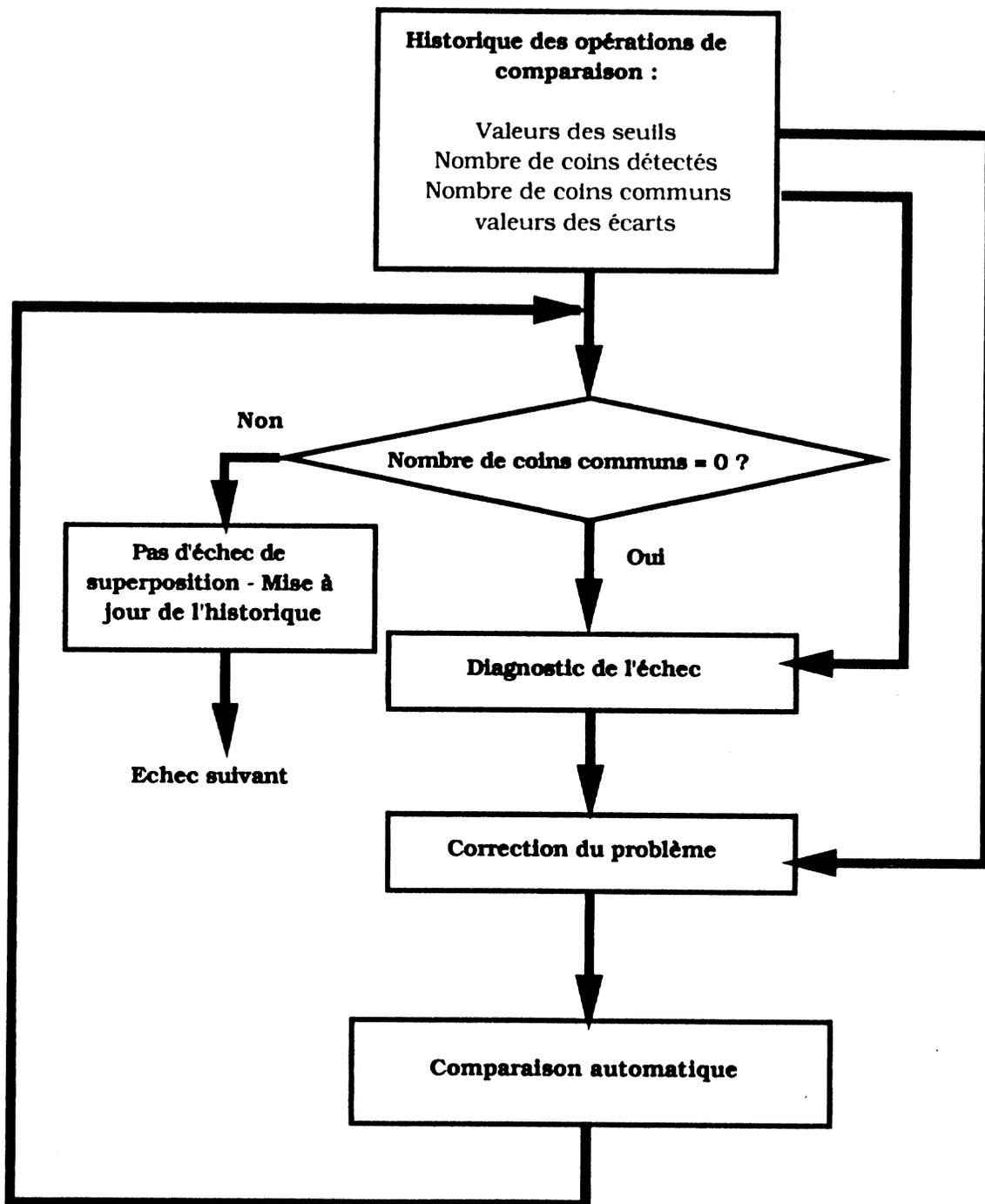
En valeur absolue, nous pouvons évaluer la précision de platine, dans le cas le plus défavorable (cas de motifs redondants), au tiers de la moitié du pas entre connexions : cette règle assure une erreur de déplacement inférieure ou égale au champ de recalage. Ainsi, pour les technologies récentes dont le pas entre connexions avoisine  $2\mu\text{m}$ , l'utilisation de notre procédure de comparaison nécessite une précision de platine proche de  $\pm 0,3 \mu\text{m}$ .

#### **VI.4.3 Vers une correction automatique des échecs de superposition**

Dans l'état actuel, l'automatisation de la procédure de comparaison n'offre pas une fiabilité parfaite. Néanmoins, nous pouvons tenter d'augmenter son taux de réussite en éliminant automatiquement les échecs de superposition (qui sont les seuls à pouvoir être détectés facilement).

Pour cela, nous proposons une procédure de correction qui s'appuie sur l'historique des opérations de comparaison. Cette procédure, dont l'algorithme est présenté en figure VI.17, repose sur un diagnostic qui permet de définir une solution adaptée à chaque type d'incident **[CON89a]**.

Dans la suite de ce paragraphe, nous présenterons tout d'abord le principe du diagnostic. Puis nous proposerons des solutions pour s'affranchir de ces échecs. Enfin nous appliquerons cette correction automatique aux études de cas précédentes.



**Figure VI.17** Procédure de correction automatique des échecs de superposition

## **A - Diagnostic des échecs de superposition**

A partir de l'historique des opérations de comparaison, nous pouvons concevoir une procédure qui permet d'identifier le problème (contraste, motifs rectilignes ou écarts supérieurs au champ de recalage) à la base de l'échec.

Cette procédure peut être menée de la façon suivante :

**Pour** chaque échec **faire**

**Pour** les 2 images à comparer (référence et défaillante) **faire**

Si le seuil est incorrect

**Alors problème de contraste**

Si le seuil est correct

et le nombre de coins est nul

**Alors problème de motifs rectilignes**

Si le seuil est correct

et le nombre de coins est non nul

**Alors pas de problème identifié**

**Fp**

**Si** aucun problème identifié pour le couple d'images

**Alors problème d'écart en translation > champ de recalage**

**Fp**

Le nombre de coins étant directement accessible au niveau de l'historique, il est clair que la réussite d'un tel diagnostic repose uniquement sur la définition du critère de validité du seuil.

A première vue, il semble impossible d'évaluer la qualité d'une opération de seuillage sans l'intervention de l'utilisateur. En effet, le seuil est une valeur qui dépend de la qualité du contraste ; il est donc difficilement prévisible car le contraste de l'image peut être dégradé d'une image à l'autre par plusieurs facteurs :

- les effets de proximité ;
- la contamination ;
- les phénomènes de charge dus à une dépassement incomplète.

Néanmoins, une solution basée sur des statistiques peut être envisagée pour définir un intervalle de validité. En effet, l'historique des comparaisons,

présenté en annexe III, montre qu'à l'issue d'une comparaison automatique, la valeur des seuils semble assez peu dispersée autour de la valeur moyenne (cf. figure VI.18).

Zone d'observation	Seuil moyen		Ecart type	
	Circuit de référence	Circuit défaillant	Circuit de référence	Circuit défaillant
Partie opérative - premier cas d'étude	209	195	20	35
Partie contrôle - premier cas d'étude	182	186	24	30
Partie opérative - second cas d'étude	185	204	45	31

**Figure VI.18** Seuil moyen et écart type pour chaque cas d'étude

Ces constatations nous ont amenés à proposer un critère de validité du seuil défini à l'aide de la moyenne et de l'écart type  $\sigma$ , calculés, pour une zone d'observation donnée, à partir de l'ensemble des seuils issus de l'historique des opérations de comparaison. Le critère peut s'énoncer comme suit :

**"un seuil est considéré comme valide si sa valeur est comprise dans un intervalle d'amplitude  $2\sigma$ , centré sur sa moyenne"**

Toutefois, cette approche reste assez simpliste. Un nombre plus important d'expérimentations devrait permettre dans le futur d'affiner la définition de ce critère.

### **B - Correction des échecs de superposition**

A partir du diagnostic, nous pouvons proposer des solutions adaptées uniquement aux problèmes du contraste et des motifs rectilignes. Le cas des écarts en translation supérieurs au champ de recalage n'a pas été traité, car à l'issue de l'échec de comparaison nous ne disposons d'aucune

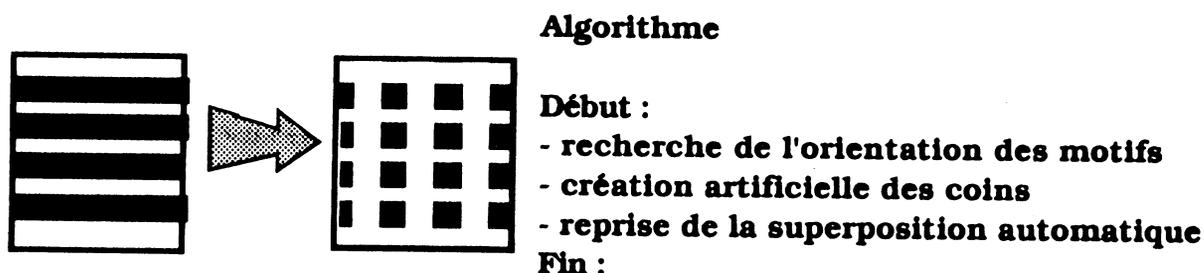
information pour résoudre ce problème. Il est évident que, dans ce cas, la solution doit intervenir avant l'étape de comparaison, par l'utilisation d'une platine suffisamment précise.

**- solution au problème de contraste**

Pour ce problème, nous proposons une solution statistique qui découle du critère de validité des seuils précédemment défini. La solution consiste alors à forcer les seuils non valides à la valeur du seuil moyen, issue de l'historique des comparaisons.

**- solution au problème des motifs rectilignes**

Pour résoudre ce problème nous pouvons introduire des coins artificiels en coupant la structure régulière en des endroits connus de l'image (cf. figure VI.19). Cette opération doit être réalisée de façon identique sur les 2 images à comparer.



**Figure VI.19** création artificielle de coins

Une fois ces coins créés, la superposition automatique permet alors de recalibrer les images dans la direction perpendiculaire aux motifs. Cette méthode est simple à mettre en œuvre et nécessite peu de traitements supplémentaires.

**C - Application aux études précédentes**

Cette correction a donc été appliquée aux échecs issus des analyses précédentes. Le diagnostic a été réalisé manuellement pour chaque échec de superposition ; les figures VI.20 et VI.21 donnent pour chaque échec le résultat du diagnostic et évalue la possibilité d'une correction automatique.

N° Image	Seuil réf.	Val. du seuil € [189, 229]	Seuil Déf.	Val. du seuil € [160, 230]	Nb de coins	Problème	Diagnostic Automatique	Correction Automatique
16	210	oui	186	oui	0	Motifs rect.	bon	possible
37	212	oui	188	oui	0	Motifs rect.	bon	possible
39	220	oui	239	non	4	Contraste (plot)	mauvais	impossible
40	239	non	242	non	2	Contraste (plot)	mauvais	impossible
42	207	oui	199	oui	0	Motifs rect.	bon	possible
63	200	oui	173	oui	0	Motifs rect.	bon	possible
65	177	oui	243	non	9	Contraste (plot)	mauvais	impossible
68	205	oui	193	oui	0	Motifs rect.	bon	possible
79	182	non	224	oui	14	Contraste (plot)	mauvais	impossible
80	178	oui	60	non	14	Contraste (plot)	mauvais	impossible
82	141	oui	207	oui	25	Contraste (plot)	mauvais	impossible
90	201	non	69	non	17	Contraste (plot)	mauvais	impossible

**Figure VI.20** Correction automatique des échecs de superposition - premier cas d'étude - partie opérative

N° Image	Seuil Réf.	Val. du Seuil € [189, 229]	Seuil Déf.	Val. du Seuil € [160, 230]	Nb de Coins	Problème	Diagnostic Automatique	Correction Automatique
13	213	oui	224	oui	0	Motifs rect.	Bon	possible
14	209	oui	223	oui	0	Motifs rect.	Bon	possible
23	207	oui	224	oui	0	Motifs rect.	Bon	possible
24	211	oui	226	oui	0	Motifs rect.	Bon	possible
31	203	oui	219	oui	0	Motifs rect.	Bon	possible
32	198	oui	215	oui	0	Motifs rect.	Bon	possible
41	197	oui	215	oui	0	Motifs rect.	Bon	possible
42	187	oui	209	oui	0	Motifs rect.	Bon	possible
45	225	oui	79	non	29	Contraste (plot)	mauvais	impossible
49	190	oui	206	oui	0	Motifs rect.	Bon	possible
50	197	oui	208	oui	0	Motifs rect.	Bon	possible
59	185	oui	188	oui	0	Motifs rect.	Bon	possible
60	180	oui	195	oui	3	Motifs rect.	mauvais	impossible
64	144	oui	126	non	5	Contraste (plot)	mauvais	impossible
67	196	oui	201	oui	1	Motifs rect.	mauvais	impossible
68	200	oui	205	oui	0	Motifs rect.	Bon	possible
73	175	oui	237	oui	9	Contraste (plot)	mauvais	impossible
74	181	oui	229	oui	15	Contraste (plot)	mauvais	impossible
75	158	oui	234	oui	17	Contraste (plot)	mauvais	impossible
76	182	oui	232	oui	10	Contraste (plot)	mauvais	impossible
77	172	oui	237	non	7	Contraste (plot)	mauvais	impossible
78	1	non	235	oui	0	Contraste (plot)	mauvais	impossible
79	1	non	231	oui	0	Contraste (plot)	mauvais	impossible
80	1	non	134	oui	0	Contraste (plot)	mauvais	impossible
81	207	oui	92	oui	27	Contraste (plot)	mauvais	impossible

**Figure VI.21** Correction automatique des échecs de superposition - second cas d'étude - partie opérative

D'après ces résultats, nous constatons que les problèmes de motifs rectilignes peuvent, dans la majorité des cas (à l'exception de 2 cas), être corrigés automatiquement.

A l'opposé, les problèmes de contraste localisés sur les plots n'ont pu être diagnostiqués correctement car le critère de validité du seuil n'était pas adapté à ce type d'image. Ce phénomène s'explique par le fait que ces images présentent un contraste fortement perturbé par la topographie (plot, fil et soudure) qui donne en moyenne un seuil beaucoup plus faible qu'une image de contraste de potentiel classique : nos observations montrent que pour ces images le seuil moyen évolue autour de 100, contre 190 pour une image de contraste classique.

Néanmoins, nous ne devons pas attacher trop d'importance au problème des plots car ces images apportent peu d'information sur la structure interne du circuit. Ce problème peut donc être contourné en excluant les plots de la zone d'observation.

<b>Zone d'observation</b>	<b>Taux de réussite initial</b>	<b>Taux de réussite initial après correction automatique</b>	<b>Taux de réussite initial après correction automatique sans les plots</b>
<b>Partie opérative - premier cas d'étude</b>	<b>81%</b>	<b>86%</b>	<b>100%</b>
<b>Partie opérative - second cas d'étude</b>	<b>65%</b>	<b>80%</b>	<b>98%</b>

**Figure VI.22** Estimation de la fiabilité après correction automatique des échecs de superposition

Finalement, le tableau présenté en figure VI.22, montre que cette première approche peut fournir un apport de fiabilité non négligeable. Il semble donc que cette ébauche de correction apporte une solution aux échecs de superposition. Toutefois, un nombre de cas plus important devra être traité pour valider pleinement cette correction automatique.

## VI.5 Conclusion

L'étude expérimentale menée sur le microprocesseur 68000 nous a permis de caractériser la procédure de comparaison automatique sur un circuit à structure complexe.

Dans la majorité des cas, la superposition automatique par la méthode des coins s'avère bien adaptée aux images des circuits intégrés. Toutefois, la fiabilité de cette opération est perturbée par 2 problèmes principaux :

- l'observation des motifs strictement rectilignes, pour lesquels l'absence de coins rend impossible l'opération de recalage ;
- l'observation des plots dont le contraste topographique ne permet par une détection correcte des coins.

Nous avons proposé une procédure automatique pour éliminer *a posteriori* ces incidents de superposition. Cette procédure semble très prometteuse pour l'élimination des problèmes dus aux motifs rectilignes. Une expérimentation plus poussée devrait permettre, dans un proche avenir, d'affiner cette procédure pour fournir un outil de superposition offrant une fiabilité parfaite.

Au niveau matériel, plusieurs améliorations sont souhaitables. Tout d'abord, il convient d'augmenter la précision de la platine à  $\pm 0,3 \mu\text{m}$  pour adapter la procédure automatique de comparaison aux circuits fortement intégrés, dont le pas entre connexions est proche de  $2 \mu\text{m}$ .

Par ailleurs, une mémoire de masse plus importante est nécessaire pour travailler sur des zones d'observation couvrant l'ensemble du circuit.

Enfin, les opérations d'acquisition et de superposition peuvent être optimisées au niveau temporel. En stroboscopie de faisceau, le temps d'acquisition peut être réduit par la technique de multi-échantillonnage (cf chapitre I, §I.4.2). Cette technique semble être une voie intéressante car elle offre une observation complète dans le temps, qui permet de pallier l'absence de stratégie pour le choix de la phase d'observation. Toutefois, pour notre procédure, cette technique peut devenir prohibitive au niveau de la mémoire de masse car elle doit être menée sur un ensemble d'images adjacentes.

Pour ce qui est des temps de superposition, ces derniers peuvent être optimisés en intégrant nos opérations d'imagerie (actuellement développées en langage C) sur des processeurs cablés.



## **CONCLUSION**



## CONCLUSION

Les travaux présentés dans cette thèse ont porté sur l'automatisation des techniques de localisation de défauts dans le cadre de l'analyse de défaillances de circuits intégrés à structures inconnues. Les résultats de cette étude ont été utilisés pour le développement du logiciel de comparaison d'images COMPATOOLS. Conçu dans le cadre d'une collaboration avec la société CAMECA, ce logiciel a été implanté sur le testeur prototype CAMECA ST15 dans le but de réaliser un système intégré et automatique d'analyse de défaillances de circuits VLSI par faisceau d'électrons, destiné à un public non spécialiste. Pour cette raison, un effort particulier a été porté sur l'ergonomie de l'interface utilisateur.

Les principaux problèmes posés par l'automatisation des techniques de localisation se situent essentiellement au niveau des différences d'alignement entre les images à comparer. Ces problèmes ont été résolus par les opérations suivantes :

- pour l'alignement en rotation, nous avons retenu une solution logicielle évitant le recours à un système complexe de correction mécanique.

- pour l'alignement en translation, nous avons recherché une solution basée sur l'analyse des traits caractéristiques de l'image et plus particulièrement sur la détection des coins. Dans ce but, une approche à base de segmentation a été élaborée pour les images en contraste de potentiel. Elle offre des résultats satisfaisants dès lors que l'étape de segmentation s'est déroulée correctement. Les cas d'échec de cette étape ayant pour source une erreur de seuillage, des techniques de détection en niveaux de gris pourraient permettre de s'affranchir de ce problème. Néanmoins, une étude préalable de faisabilité devra être effectuée pour caractériser leur efficacité sur des images en contraste de potentiel.

Au niveau logiciel, nous avons mis en œuvre une interface graphique permettant de gérer et de comparer un ensemble d'images adjacentes couvrant la totalité du circuit, où une large partie lorsque les possibilités de stockage des images sont limitées.

Bien qu'il soit dédié à l'analyse de défaillances, ce programme est, par sa structure modulaire et par ses opérations d'imagerie, un système ouvert qui peut être adapté à d'autres applications du test par faisceau d'électrons.

Par exemple, une extension permettant d'effectuer des comparaisons d'images sur un même circuit, a déjà été réalisée pour étudier le fonctionnement interne d'un microprocesseur 8086 [SKA90] dans le but de caractériser sa sensibilité au rayonnement d'ions lourds (étude menée pour le compte du Centre National d'Etudes Spatiales). Cette nouvelle procédure pourra également être directement utilisée pour la localisation de défauts en limites de fonctionnement.

Par ailleurs, et concernant l'application mise au point de prototypes, il sera possible de récupérer les techniques d'alignement d'images pour assurer la superposition des images microscopes avec le dessin des masques.

Dans l'état actuel, le logiciel est opérationnel et équipe dès à présent la version industrielle des testeurs CAMECA.

Des développements restent toutefois nécessaires pour améliorer les performances de l'outil. Du côté logiciel, la fiabilité des traitements devra être augmentée par la mise en œuvre de la procédure, de correction automatique des échecs de superposition, proposée au chapitre VI. Du côté matériel, il est souhaitable, d'une part d'augmenter la précision de platine pour rendre opérationnel ce système sur des circuits fortement intégrés, et d'autre part d'optimiser les temps d'analyse en transférant les opérations d'imagerie sur des processeurs cablés.

L'aboutissement de ce travail a permis de passer d'une station de test de 1ère génération (cf. figure C.1), offrant des automatismes de base (contrôle du mouvement objet, contrôle de la carte d'acquisition, ...) à un système de 2ème génération (cf. figure C.2) qui permet d'extraire automatiquement les différences de fonctionnement entre 2 circuits. A ce stade de développement, on peut envisager des systèmes de 3ème génération (cf. figure C.3) plus puissants, qui participeront à l'élaboration du diagnostic de localisation. Dans ce contexte, la tâche de l'analyste pourra être réduite en automatisant l'interprétation des images de différence à l'aide de techniques de reconnaissance des formes. Par la suite, ces informations alliées aux résultats du test fonctionnel, pourront permettre d'élaborer des stratégies intelligentes d'aide au diagnostic de localisation.

### Evolution des systèmes intégrés d'analyse de défaillances de circuits VLSI par faisceau d'électrons

<b>Images numériques</b>	<b>Images vidéo</b>	<b>Vecteurs de test</b>
<b>Système d'acquisition du signal</b>	<b>Testeur à faisceau d'électrons</b>	<b>Système de conditionnement électrique</b>
<b>Système de traitement informatique</b>		

Figure C.1 - 1ère génération

<b>Alignement automatique</b>	<b>Images numériques</b>	<b>Images vidéo</b>	<b>Vecteurs de test</b>
<b>Système de traitement d'images</b>	<b>Système d'acquisition du signal</b>	<b>Testeur à faisceau d'électrons</b>	<b>Système de conditionnement électrique</b>
<b>Comparaison automatique d'images</b>			
<b>Système de traitement informatique</b>			

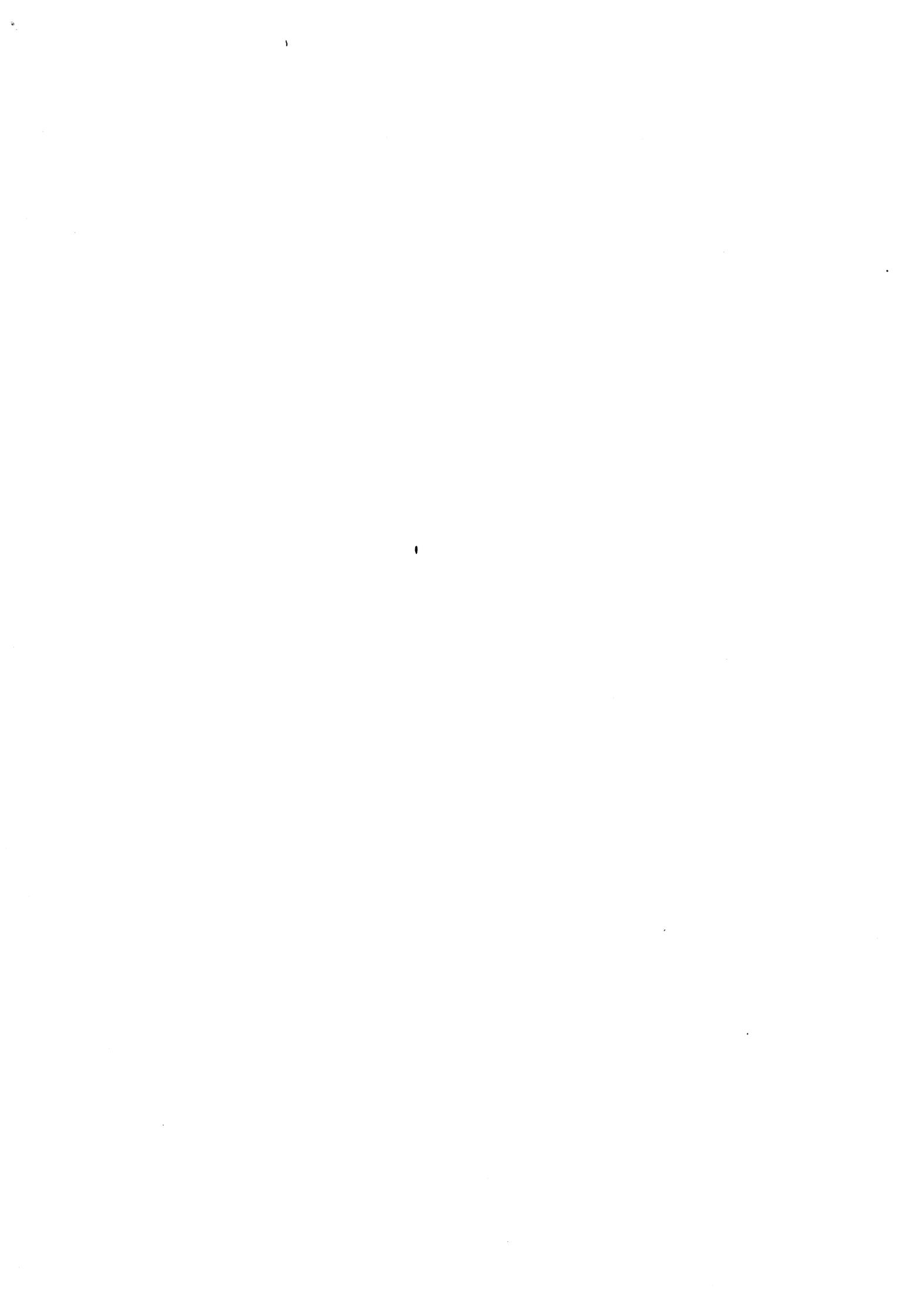
Figure C.2 - 2ème génération

<b>Interprétation automatique des images de différence</b>	<b>Alignement automatique</b>	<b>Images numériques</b>	<b>Images vidéo</b>	<b>Vecteurs de test</b>	<b>Résultats du test fonctionnel</b>
	<b>Système de traitement d'images</b>	<b>Système d'acquisition du signal</b>	<b>Testeur à faisceau d'électrons</b>	<b>Système de conditionnement électrique</b>	
	<b>Comparaison automatique d'images</b>				
<b>Aide au diagnostic de localisation</b>					
<b>Système de traitement informatique</b>					

Figure C.3 - 3ème génération



**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**



## TRAITEMENT DES IMAGES

- [BEA78]** P. R. Beaudet.  
"Rotationally Ivariant Image Operator".  
IJCPR - 78, pp 579-572
- [BES88]** J. E. Besancon  
"Vision par ordinateur en deux ou trois dimensions".  
Edition EYROLLES 1988.
- [BLJ81]** A. Bijaoui.  
"Image et information"  
Introduction au traitement numérique des images.  
Edition MASSON. 1981.
- [CAN83]** J. F. Canny.  
"Finding edges and Lines in Images"  
Masters thesis. Massachussetts Institute of Technology. 1983
- [FRE77]** H. Freeman.  
"Analysis of line drawings".  
Digital image processing and analysis. Noordhoff-Leyden. Edited  
by J.C. Simon and A. Rosenfeld. 1977.
- [GOS89]** A. Goshtasby.  
"Correction of Image Deformation from Lens Distortion Using  
Bezier Patches". Computer vision, graphics, and image  
processing **47**,385-394. 1989.
- [HUE88]** A. Huertas & R. Nevlatia.  
" Detecting buildings in aerial images".  
Computer vision, graphics, and image processing **41**,131-152.  
1988.
- [KIT82]** L. Kitchen, A. rosenfeld.  
"Gray level corner detection".  
Pattern Recognition Lett **1**. 1982, 95-102
- [KUN81]** M. Kunt.  
"Traitement numérique des signaux".  
Traité d'électricité d'electronique et d'électrotechnique publié  
sous la direction de jacques Neiryck.  
Edition DUNOD. 1981.
- [MED87]** G. Medioni & Y. Yasumoto.  
"Corner detection and curve representation using cubic B-  
spines". Computer vision, graphics, and image processing **39**,  
267-278. 1987.

- [MUB84]** M. A. Shah & R. Jain.  
"Detecting time varying corners".  
Computer vision, graphics, and image processing **28**, 345-355.  
1984.
- [NAG82]** H. Nagel, W. Enkelmann.  
"Investigation of second order greyvalue variations to estimate  
corner point displacements". IEEE CVPR1982, pp 768/773.
- [PAP65]** A. Papoulis.  
"Probability, random variables and stochastic Processes".  
Editions Mac Graw-Hill, New-york. 1965.
- [POS87]** J.-G. Postaire.  
"De l'image à la decision".  
Analyse des images numériques et théorie de la décision.  
DUNOD informatique. 1987.
- [PRA78]** W. K. Prat.  
"Digital Image Processing".  
John wiley & Sons, Inc. 1978.
- [WES78]** J. S. Weszka.  
"A survey of theshold selection techniques"  
Computer vision, graphics, and image processing **7**, 259-265.  
1978.
- [YOK86]** N. Yokobori, P. Yeh, A. Rosenfeld.  
"Selective geometric correction of images"  
Computer Vision and pattern Recognition - 1986 - pp 530/533.
- [ZUC76]** S.W. Zucker.  
"Algorithms for image segmentation".  
Digital Image Processing and Analysis.  
Nato Advanced Study Institute Bonas France 1976.  
Edited by J.C. Simon and Rosenfeld.
- [ZUN83]** O. A. Zuniga. R.M. Haralick.  
"Corner detection using the facet model".  
IEEE CVPR1983, pp 30/37.

### TEST PAR FAISCEAU D'ELECTRONS

- [BAI82]** G. Baille, B. Courtois, J. Laurent.  
"Analyse de défaillances de VLSI par microscope électronique".  
Congrès AFCET. 1982. Lille.
- [BAI84]** G. Baille  
"Testeur logique de circuits intégrés". Rapport technique. TIM3-  
IMAG. Grenoble 1984.
- [BER85]** L. Bergher  
"Analyse de défaillances de circuits VLSI par microscopie  
électronique".  
1985, Thèse de Docteur-Ingénieur, INPG Grenoble.
- [BER86]** L. Bergher, J. Laurent, B. Courtois, J.P. Collin.  
Towards automatic failure analysis of complex ICs through E-  
beam testing. International Test Conference 1986. Washington  
USA.
- [BOU87]** G. Bourgeon.  
"Electron beam tester, a tool for VLSI component analysis".  
Microelectronic Engineering, Special issue on Electron &  
Optical beam testing of integrated circuits. 1987. Grenoble,  
FRANCE.
- [CAB89]** J. Cabestany, B. Courtois, J. Laurent, D. Conard.  
"Techniques per l'analisi del funzionamento de circuits  
integrats emprant microscopia electronica"  
Trobades Cientifiques de la Mediterranea. Menorca, ESPAGNE.  
1989.
- [COL87]** J.P. Collin, J.L Pellissier.  
"An industrial experience of integrated circuit failure analysis  
using e-beam testing. European"  
First conference on electron and optical beam testing of  
integrated circuits 1987. Grenoble, FRANCE.
- [COL89]** J.P. Collin, D. Conard, B. Courtois, P. Denis, D. Savart  
"Failure analysis using E-beam".  
Invited paper. 2nd European Conference on electron and optical  
beam testing of integrated circuits. Duisburg 89, R.F.A. Duisburg  
89, R.F.A.
- [CON87]** S. Concina, N. Richardson  
"workstation-driven E-beam prober". International Test  
Conference 1987 Washington USA.
- [CON88a]** D. Conard  
Rapport technique n°2 - Contrat CAMECA - Février 88

- [CON88b]** D. Conard  
Rapport technique n°3 - Contrat CAMECA - Juillet 88
- [CON88c]** D. Conard  
Rapport technique n°4 - Contrat CAMECA - Novembre 88
- [CON89a]** D. Conard  
Rapport technique n°5 - Contrat CAMECA - Juin 89
- [CON89b]** D. Conard , B. Courtois  
"Failure analysis using E-beam : A fully automatic process".  
4th International Conference Quality in Electronic Components.  
Bordeaux 89, FRANCE.
- [CON90]** D. Conard, J. Laurent, R. Velazco, H. Ziade, J. Cabestany, F. Sala.  
"Automatics tools for microprocessor failure analysis"  
International Conference on Microelectronics - Damascus, Syria.  
October 1990.
- [EVE60]** T. E. Everhart, Thornley  
"Wide Band Detector for Microampere Low Energy Electron  
Currents" - J. Sci Instrum. - 37 - pp 246/348 - 1960.
- [FON78a]** G. Fontaine.  
"Emission électroniques et contrastes"  
Microanalyse et microscopie électronique à balayage. Ecole d'été  
de St-Martin-d'hères, septembre 1978 - pp 39/75.  
Les Editions de Physique.
- [FON78b]** G. Fontaine.  
"Optique électronique"  
Microanalyse et microscopie électronique à balayage. Ecole d'été  
de St-Martin-d'hères, septembre 1978 - pp 13/33.  
Les Editions de Physique.
- [FRO87]** J. Frosien, E. plies  
"High performance electron optical column for testing ICs with  
submicrometer design rules"  
First conference on electron and optical beam testing of  
integrated circuits. pp 163-172. 1987. Grenoble, FRANCE.
- [GIR88]** D. Giraud  
Rapport de stage. CAMECA. Juin 88.
- [GOP77]** A. Gopinath  
"Estimate of minimum measurable voltage in the SEM"  
J. Phys. E. : Sci Instr 10, pp 911/913. 1977.
- [GOR85]** S. Gorlich, W. D. Herman, E. Kubalek.  
"Basic investigation of capacitive coupling voltage contrast".  
Microcircuits Engineering 84 Berlin Academic press London  
(1985) pp. 451-460

- [GUI87]** I. Guiguet, M. Marzouki, B. Courtois.  
"An Integrated Debugging System Based on e-Beam Test".  
European Conference on electron and optical beam testing of  
integrated circuits 1987. Grenoble, FRANCE.
- [HAL89]** D. J. HALL, A. W. Sloman, G. S. Plows.  
"Rapid data acquisition for E-beam testing".  
International Test Conference 1989. Washington USA.
- [HEN87]** S. S. Henning, W. R. Knowles, G. S. Plows.  
"CAD system interface for a stand-alone e-beam tester".  
The Microelectronic Engineering Journal (Special Issue on  
Electron and Optical beam Testing of Integrated Circuits) 7, 2-  
4, 1987, 275-282.
- [HRE79]** J.J. Hren  
Ultramicroscopy **3**, 375. 1979
- [LAU84]** J. Laurent  
"Analyse de Circuits Intégrés par Microscopie Electronique".  
1984, Thèse de Doctorat, INPG Grenoble.
- [MAL87]** J. Maldonado.  
Etude et réalisation d'un système de traitement des images  
adapté à la microscopie électronique à balayage. Thèse de  
docteur-ingénieur. Institut National polytechnique de toulouse.  
1987.
- [MAR89]** M. Marzouki, B. Courtois  
"A. I. can help"  
European Test Conference, IEEE Computer Society Press.  
1989, PARIS. 184-191.
- [MAR90]** M. Marzouki, D. Conard, J. Laurent, B. Courtois  
"High level tools and methods for electron-beam debug and  
failure analysis of integrated circuits".  
Seminar on Intelligent Measurement Systems. Budapest - July  
1990
- [MAY84]** T.C.May, G.L. Scott, E.S. Meieran, P. Winer, V.R. Rao  
Dynamic fault imaging of VLSI random logic devices. 1984 apr.  
IEEE International Reliability Physics Symposium.
- [MEL88]** M. Melgara , M. Battu , P. Garino ,F. Boland , Dowe J., Marzouki  
M., Vernay Y.J.  
Automatic location of I.C. desing errors using an E-beam system.  
International Test Conference 1988. Washington USA.
- [MEN81]** E. Menzel, E. Kubalek.  
"Electron beam test techniques for integrated circuits".  
Scanning Electron microscopy - 1981 - pp 305/322 - SEM Inc.

- [MEN83a]** E. Menzel, E. Kubalek.  
Review - "Fundamentals of Electron Beam Testing of Integrated Circuits". SCANNING vol. 5, 103/122 - 1983. FCAM Publishing, Inc.
- [MEN83b]** E. Menzel, E. Kubalek.  
Review - "Secondary Electron Detection Systems for quantitative Voltage Measurement". SCANNING vol. 5, 49/69 - 1983. FCAM Publishing, Inc.
- [MEN89]** E. Menzel.  
"High speed dynamic fault imaging".  
2nd European Conference on electron and optical beam testing of integrated circuits. pp 81/86. Duisburg 89, R.F.A. Duisburg 89, R.F.A.
- [MUL71]** K. H. Muller.  
Optik 33, 296. 1971.
- [OZA86]** K. Ozaki, A. Ito, Y. Goto  
"Electron beam probing system with ultrahight time resolution"  
J. Vac. Sci. Technol. B5(1), Jan 1987, pp 84.
- [PEL89]** J.L. Pelissier, X. Flinois.  
"Fully-integrated dynamic fault imaging system for faillure analysis and performance enhancement of VLSI"  
European Test Conference, IEEE Computer Society Press. 1989, PARIS. 180-183.
- [PLI89]** E. Plies.  
"Electron-optical components for e-beam testing"  
Invited paper. 2nd European Conference on electron and optical beam testing of integrated circuits. Duisburg 89, R.F.A. Duisburg 89, R.F.A.
- [REI89]** W. Reiners.  
"Fundamentals of electron beam testing via capacitive coupling voltage contrast".  
2nd European Conference on electron and optical beam testing of integrated circuits. pp 325/340. Duisburg 89, R.F.A. Duisburg 89, R.F.A.
- [SAL90]** F. Sala, D. Conard, J. Cabestany.  
"Uso de tecnicas de SEM para localizacion de fallos de funcionamiento en el microprocessador 68000"  
Comun. V Esc. Microelec. 179-180. Granada, ESPAGNA. 1990
- [SAL91]** F. Sala, J. Cabestany, D. Conard, J. Laurent, R. Velazco, H. Ziade.  
"E-beam testing for microprocessor failure location".  
European Test Conference. Munich 91.(à paraitre)

- [SAV87]** D. Savart, B. Courtois  
"Automatic failure analysis of VLSI circuits using e-beam test".  
European Conference on electron and optical beam testing of  
integrated circuits 1987. Grenoble, FRANCE.
- [SAV90]** D. Savart  
"Analyse de défaillances de circuits VLSI par microscopie  
électronique".  
1990, Thèse de Docteur-Ingénieur, INPG Grenoble.
- [SKA90]** A. Skaf, H. Ait-Messaoud, J. Laurent, A. Guyot, B. Courtois  
"A contribution to the study of the MHS 8086 microprocessor in  
a hostile environment".  
The International Conference on Microelectronics. October 90.  
Damascus, Syria.
- [TAL89]** Ch.G. Talbot, G. Shaw.  
"Logic analyzer software for a multisampling e-beam prober".  
2nd European Conference on electron and optical beam testing  
of integrated circuits. pp 65/72. Duisburg 89, R.F.A. Duisburg  
89, R.F.A.
- [URA89]** K. Ura, H. Fujioka.  
"Electron Beam Testing"  
Advances in electronics and electron physics, Vol 73 - pp  
233/317 - 1989
- [VEL89a]** R. Velazco, D. Conard, A. Guyot, H. Ziade.  
"Coupling an E-beam system and a functional tester for  
programable I. C. failure analysis".  
4th International Conference Quality in Electronic Components.  
Bordeaux 89, FRANCE.
- [VEL89a]** R. Velazco, D. Conard, A. Guyot, H. Ziade.  
"Top down I.C. failure analysis using an E-beam system coupled  
to a functional tester". 2nd European Conference on electron  
and optical beam testing of integrated circuits . Duisburg 89,  
R.F.A.
- [WOL86]** E. Wolfgang  
"Electron beam testing"  
Microelectronic Engineering 4 (1986) 77-106  
North-Holland

### **TEST FONCTIONNEL DES MICROPROCESSEURS**

- [ANN75]** M. A. Annaratone, M. G. Sami.  
"An approach to functional testing of microprocessors".  
Fault Tolerant Computing Symposium - 1975.

- [BEL82]** Bellon C., & al.  
"Automatic generation of microprocessor test programs"  
19th Design Automatic Conference - Las Vegas, USA - 1982.
- [BEL84]** Bellon C., Velazco R.  
"Hardware and software tools formicroprocessor functional testing". ITC 84, Philadelphia (USA) October 1984.
- [CHI76]** A. C. Chiang, R. Mc Caskill.  
"Two new approches simplify testing of microprocessors".  
Electronics - January 1976.
- [LIN80]** N. G. Lin & al.  
"Testing the 8086".  
IEEE International Test Conference - Cherry Hill - USA. 1980
- [ROB80]** C. Robach, G. Saucier.  
"Microprocessor functional testing"  
IEEE International Test Conference - Cherry Hill - USA. 1980
- [SU 81]** S. Y. H. SU, Y. Hsieh.  
"Testing functional faults in digital systems described by register transfert language"  
Journal of digital systems - 1981.
- [SUS83]** A. K. Susskind.  
"Overview of microprocessor testing".  
IEEE International Conference on Computer Design ICCD - New-York, USA - 1983.
- [THA75]** S. Thatte, J. A. Abraham.  
"Test generation for general microprocessor architecture".  
Fault Tolerant Computing Symposium - 1975.
- [VEL90]** R. Velazco  
"Test et diagnostic des circuits intégrés programmable"  
Thèse de Doctorat d'état, INPG Grenoble. Novembre 1990.

#### **ARCHITECTURE DU MICROPROCESSEUR 68000**

- [BOS80]** A. Bosseboeuf.  
"Analyse du fonctionnement interne du MC 68000"  
Rapport de DEA, ENSIMAG, juin 1980.
- [OBR82]** M. Obresbska.  
"Etude comparative de différentes methodes de conception des parties contrôle des microprocesseurs"  
Thèse de docteur ingénieur - INPG - juin 1982.

**ANNEXES**



## ANNEXE I - PRECISION DE LA CORRECTION EN ROTATION PAR TRANSFORMATION DE COORDONNEES

La précision de la technique de correction par transformation de coordonnées est obtenue en différentiant l'expression :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{pmatrix}$$

dans laquelle  $\begin{pmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \end{pmatrix}$  représentent les coordonnées corrigées,  $\begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{pmatrix}$  les coordonnées théoriques et  $\theta$  l'angle de correction.

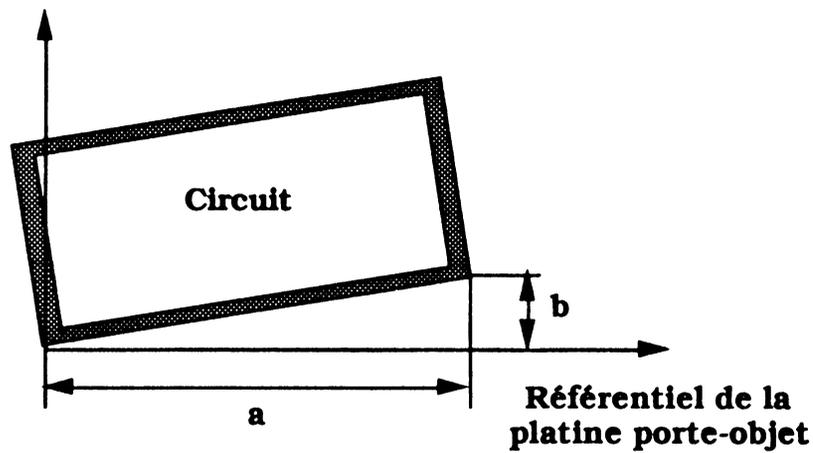
Ce calcul d'erreur (majoré par la valeur absolue), donne 2 équations :

$$\Delta (\mathbf{U}) = |\mathbf{X} d(\cos(\theta))| + |\mathbf{Y} d(\sin(\theta))| \quad (1)$$

et

$$\Delta (\mathbf{V}) = |-\mathbf{X} d(\sin(\theta))| + |\mathbf{Y} d(\cos(\theta))| \quad (2)$$

Dans ce calcul, l'angle de correction correspond à l'orientation du circuit par rapport au référentiel de la platine (cf. chapitre V, §V.3.2.1.B) ; il est déterminé par la mesure de 2 distances **a** et **b** (cf. figure A.1).



**Figure A.1** Calcul de l'angle de correction

Cet angle étant généralement très petit (inférieur au degré), son cosinus et de son sinus peuvent être approximatés par les expressions suivantes:

$$\cos(\theta) = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (3)$$

et

$$\sin(\theta) = \frac{b}{a} \quad (4)$$

Avec une erreur sur la mesure des distances **a** et **b**, estimée à :

$$d(a) = d(b) = \text{précision du mouvement de la platine porte-objet}$$

les incertitudes sur les fonctions (3) et (4) sont les suivantes :

$$d(\cos(\theta)) = \frac{-b a^2 d(b) + a b^2 d(a)}{a^4} \quad (5)$$

et

$$d(\sin(\theta)) = \frac{-a d(b) + b d(a)}{a^2} \quad (6)$$

Dans le cas d'angles très faibles ( $b \ll a$ ), les expressions (5) et (6) peuvent être réduites à :

$$d(\cos(\theta)) = -\frac{b \, d(a)}{a^2} \quad (7)$$

et

$$d(\sin(\theta)) = \frac{d(a)}{a} \quad (8)$$

Finalement, en remplaçant (7) et (8) dans (1) et (2), la précision de la correction par transformation de coordonnées est donnée par les expressions :

$$\Delta U = \left( \frac{Xb}{a^2} + \frac{Y}{a} \right) d(a)$$

et

$$\Delta V = \left( \frac{Yb}{a^2} + \frac{X}{a} \right) d(a)$$



**ANNEXE II - LES FONCTIONS D'APPLICATION**

<b>FICHER</b>	<b>FONCTION</b>	<b>OPERATION</b>
affich.c	affich(im)	affichage de l'image im
afhisto.c	afhisto(im)	affichage de l'histogramme
aficone.c	aficone(im,px, py)	affichage de l'image réduite à la position (px,py)
aki.c	aki(size,nb)	acquisition d'une image de dimension size (256,512 ou 1024) moyennée sur nb trames
artefact.c	artefact(im,seg)	élimination des artéfacts de dimension seg pixels
autobina.c	autobina(im)	binarisation automatique
bina.c	bina(im,S)	binarisation au seuil S
coin.c	coin(im,seg, t_coin)	recherche des coins (tableau t_coin) sur des segments élémentaires de seg pixels
contour.c	contour(im)	extraction des contours

copy.c	copy(im1, im2)	copie du plan mémoire im1 dans le plan mémoire im2
copyasi.c	copyasi(imasi, im)	copie des données de la carte d'acquisition imasi dans le plan mémoire image im
correl.c	correl(im1, im3,im2, im4,seg)	superposition automatique des images im1 et im2 par la méthode des coins
decal.c	decal(im,dx,dy )	translation de l'image de dx et dy pixels
def_meb.c	def_meb(penv,p mr,...pmt,...)	définition des paramètres de microscopie de la structure environnement
def_pos.c	def_pos(penv, xor,...,xot,...)	définition des paramètres de topologie de la structure environnement
def_stat.c	def_stat(penv,f time,..)	définition des paramètres d'imagerie de la structure environnement
def_vect.c	def_vect(penv, vect,...)	définition des vecteurs de test de la structure environnement
diff.c	diff(im1,im2)	différence entre les images im1 et im2
egali.c	egali(im)	égalisation d'histogramme

et.c	et(im1,im2)	et logique entre les images im1 et im2
histo.c	histo(im)	histogramme de l'image im
icone.c	icone(im,gr, nvg)	réduction de l'image d'un facteur gr (nvg -> nb de niveaux de gris)
initasi.c	initasi()	initialisation de la carte d'acquisition d'images
initgris.c	initgris(pw,s)	initialisation du segment de couleur nommé "s" (pw -> pixwin de la fenêtre d'affichage)
initmem.c	initmem()	initialisation des 4 plans mémoire image
initst15.c	initst15()	initialisation de la liaison parallèle entre le TFE et la station de travail
inver.c	inver(im)	inversion de l'image
liss.c	liss(im)	amélioration de l'image par moyenne non pondérée des proches voisins
load_env.c	load_env(penv, d,s)	lecture de la structure environnement (d -> nom du catalogue envir., s -> nom du fichier env.)

loadzone.c	loadzone(d)	lecture du fichier zone (d - > nom du fichier zone)
mlinear.c	mlinear(x,y)	déplacement de la platine aux coordonnées (x,y)
msincos.c	msincos(x,y,z, Sin, Cos)	déplacement de la platine aux coordonnées (x,y,z), avec correction en rotation
makegrid.c	makegrid(ox, oy,a,b,w)	construction de la grille de la zone d'images réduites (ox,oy -> origine de la grille, a,b -> nb de ligne et de colonne, w -> pas de la grille
median.c	median(im)	filtre médian
ou.c	ou(im1,im2)	ou logique entre les images im1 et im2
sauve.c	sauve(d,s,im)	sauvegarde du plan mémoire image im dans un fichier nommé "d/s"
sauve_zone.c	sauve_zone(s,Z)	sauvegarde de la structure zone Z dans le fichier nommé "s"
save_env.c	save_env(s, penv)	sauvegarde de la structure environnement penv dans le fichier nommé "s"

setparaki.c	setparaki(penv)	lecture des paramètres d'imagerie de la structure environnement
setparameb.c	setparameb(penv, FCIR)	lecture des paramètres de microscopie de la structure environnement (FCIR -> indicateur de circuit : 0 -> référence, 1 -> test)
som.c	som(im1,im2)	addition des images im1 et im2
statcoin.c	statcoin(t_coin1, t_coin2, seg)	calcul du décalage (t_coin1, t_coin2 -> listes de coins à comparer, seg -> segment élémentaire)
tabpix.c	tabpix(s,im)	chargement d'un fichier image nommé "s" dans le plan mémoire im
xou.c	xou(im1,im2)	ou exclusif logique entre les images im1 et im2
zonaki.c	zonaki(penv,...)	acquisition des images de la zone d'observation
zonedif.c	zonedif(penv,...)	extraction de différences sur l'ensemble des images de la zone d'observation

zoom.c	zoom(im,x,y,g)	zoom de l'image im (x,y -> position de la partie de l'image agrandie, g -> facteur de grandissement)
--------	----------------	---

**ANNEXE III - RESULTATS DES OPERATIONS DE COMPARAISON  
AUTOMATIQUE D'IMAGES**

**PREMIER CAS D'ETUDE - ZONE COUVRANT LA PARTIE OPERATIVE**

N°	Seuil ref.	Seuil déf.	Nb coins	Coins com.	Ecart X	Ecart Y
1	172	143	80	48	2	-2
2	235	233	30	11	-1	-3
3	237	228	24	15	3	0
4	231	221	47	29	2	-5
5	236	232	28	14	2	0
6	230	227	32	19	-2	4
7	224	237	32	14	0	2
8	225	155	95	70	-4	1
9	236	236	26	24	1	-1
10	180	232	47	19	3	-2
11	221	200	12	7	5	-5
12	224	210	34	27	5	-2
13	239	220	8	2	-1	2
14	239	233	3	3	4	9
15	204	184	19	13	2	-2
16	210	186	0	0	0	0
17	219	210	77	67	3	2
18	223	219	25	24	3	2
19	217	215	58	46	-4	0
20	213	223	116	107	-3	-1
21	223	224	58	52	-3	-4
22	234	232	8	8	-3	-4
23	235	234	20	20	-3	-3
24	226	226	22	10	-3	-2
25	229	231	101	47	3	3
26	218	207	90	77	-2	-5
27	213	200	76	63	2	4
28	224	216	87	75	2	6
29	229	223	22	15	-1	-3
30	233	228	7	7	-3	-2
31	228	227	6	6	2	2
32	222	214	62	54	-3	-3
33	213	211	127	115	3	0
34	223	207	44	31	3	1
35	231	210	20	15	2	2
36	214	186	77	66	-2	0
37	212	188	0	0	0	0
38	209	180	8	6	-3	4
39	220	239	4	0	0	0
40	239	242	2	0	0	0
41	203	164	15	13	0	-1
42	207	199	0	0	0	0
43	208	179	66	62	-1	-3
44	220	203	24	19	-1	-4
45	209	202	43	32	2	1
46	205	197	118	113	-2	-5
47	208	199	62	56	0	5

48	220	201	8	8	-2	-4
49	220	225	11	10	-5	-2
50	208	207	18	15	-2	-4
51	208	213	70	54	1	5
52	202	191	55	50	0	5
53	194	176	67	64	0	-5
54	210	192	82	60	1	-5
55	209	185	11	10	1	-2
56	224	202	8	7	0	-1
57	220	195	10	6	-1	4
58	205	206	59	44	-2	10
59	199	179	126	115	-1	1
60	195	175	38	35	-1	1
61	213	184	27	24	0	3
62	199	170	73	72	1	-3
63	200	159	0	0	0	0
64	197	173	11	9	2	0
65	177	243	9	0	0	0
66	160	111	36	34	1	2
67	206	198	6	4	-2	-2
68	205	193	0	0	0	0
69	212	178	25	20	-3	4
70	215	207	31	17	-2	3
71	213	187	10	7	-2	0
72	204	207	41	30	2	-3
73	193	181	30	30	-2	2
74	218	172	9	8	-2	2
75	208	173	33	29	2	-4
76	185	155	6	4	-1	2
77	167	156	44	38	1	-5
78	184	179	31	29	-1	4
79	182	224	14	0	0	0
80	178	60	14	0	0	0
81	201	192	14	2	0	6
82	141	207	25	0	0	0
83	145	89	25	19	-1	3
84	138	92	15	15	-5	12
85	207	198	33	8	-8	-4
86	203	199	14	4	-8	3
87	201	196	19	5	-1	3
88	195	192	13	4	-3	-1
89	201	190	23	3	-2	1
90	201	69	14	0	0	0
91	206	202	17	5	5	0

<b>Moyenne</b>	209	195,549	35,022	26,5824	-0,3407	0,20879
----------------	-----	---------	--------	---------	---------	---------

<b>Ecartype</b>	20,912	35,3454	31,5401	28,5334	2,49987	3,42383
-----------------	--------	---------	---------	---------	---------	---------

**PREMIER CAS D'ETUDE - ZONE COUVRANT L'INTERFACE CONTROLE**

N°	Seuil ref.	Seuil déf.	Nb coins	Coins com.	Ecart X	Ecart Y
1	196	190	124	88	-2	1
2	204	70	45	2	-2	3
3	194	200	114	100	0	1
4	193	197	146	127	0	0
5	197	225	195	136	-1	2
6	205	226	200	135	-1	-1
7	198	227	203	148	-2	-1
8	208	227	341	281	-1	-2
9	208	143	123	55	-3	-2
10	213	228	207	174	-4	-2
11	222	231	248	185	-3	-4
12	216	227	296	219	-5	-5
13	216	218	297	249	-5	-8
14	197	176	82	69	-5	-5
15	202	191	195	178	4	2
16	198	206	198	195	2	1
17	196	187	129	117	2	1
18	122	133	151	122	2	1
19	190	201	238	213	2	0
20	197	197	199	184	1	1
21	193	213	258	249	1	-1
22	189	194	270	256	0	0
23	170	179	238	224	0	0
24	183	186	187	158	-1	0
25	187	192	212	182	-1	2
26	138	140	83	51	0	10
27	170	176	33	22	-2	-2
28	186	179	151	105	0	-1
29	186	210	145	123	1	2
30	179	196	64	44	0	2
31	99	115	11	7	-1	4
32	108	129	42	38	-1	-3
33	186	134	128	94	-1	-2
34	194	208	171	158	0	0
35	105	125	136	105	0	-1
36	191	125	88	63	0	3
37	195	198	149	134	0	1
38	189	191	123	110	-2	0
39	193	195	66	56	3	3
40	177	180	174	165	-2	-3
41	179	190	105	100	1	0
42	173	190	123	98	0	0
43	179	204	263	241	0	1
44	168	206	121	112	0	-2
45	189	198	219	190	-1	-1
46	189	196	117	101	0	1
47	188	203	168	157	-1	-3

48	184	187	86	69	0	-3
49	172	190	203	169	1	2
50	187	197	307	249	0	2
51	180	191	191	144	1	2
52	175	169	33	24	-2	-1
53	144	169	52	39	0	2
54	153	195	233	198	0	0
55	177	196	245	200	1	0
56	196	197	303	237	0	0
57	177	200	177	163	-1	2
58	183	188	155	126	-1	-2
59	182	206	241	220	-1	2
60	175	198	165	143	-1	1
61	182	199	143	125	-2	2
62	182	178	144	137	-1	2
63	187	175	85	78	0	2
64	170	183	100	92	-2	3
65	171	170	235	221	-2	0

<b>Moyenne</b>	<b>182,031</b>	<b>186,769</b>	<b>164,215</b>	<b>137,754</b>	<b>-0,5846</b>	<b>0,13846</b>
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

<b>Ecartype</b>	<b>24,3631</b>	<b>30,3566</b>	<b>76,0712</b>	<b>68,3781</b>	<b>1,72203</b>	<b>2,55488</b>
-----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

**SECOND CAS D'ETUDE - ZONE COUVRANT LA PARTIE OPERATIVE**

N°	Seuil ref.	Seuil déf.	Nb coins	Coins com.	Ecart X	Ecart Y
1	162	219	59	34	1	5
2	187	220	27	21	1	-1
3	183	223	38	31	0	-1
4	190	221	8	6	-1	-2
5	187	222	6	6	2	-5
6	193	224	8	6	-3	3
7	179	223	35	22	-5	2
8	172	196	69	23	0	-1
9	230	230	66	12	-8	10
10	171	185	28	6	-11	5
11	197	191	35	20	-1	-1
12	208	218	36	32	-1	-3
13	213	224	0	0	0	0
14	209	223	0	0	0	0
15	214	227	51	51	-2	-2
16	216	225	15	15	-1	-2
17	217	229	15	13	0	1
18	212	222	50	38	-1	-1
19	209	225	47	37	3	1
20	215	227	13	13	2	-2
21	210	224	21	21	0	-4
22	215	223	52	47	-2	-2
23	207	224	0	0	0	0
24	211	226	0	0	0	0
25	203	218	15	15	0	0
26	187	198	35	20	-3	2
27	164	174	38	11	2	1
28	87	122	20	8	-1	1
29	190	189	24	14	4	-1
30	199	207	7	6	-1	-1
31	203	219	0	0	0	0
32	198	215	0	0	0	0
33	204	212	51	43	5	3
34	207	219	23	17	-3	-1
35	213	226	7	7	-2	-1
36	207	220	27	24	-4	1
37	207	218	39	31	-2	1
38	211	220	10	9	0	-5
39	204	221	19	7	-3	-3
40	192	208	60	47	-3	0
41	197	215	0	0	0	0
42	187	209	0	0	0	0
43	196	212	24	19	0	0
44	174	171	55	17	1	-4
45	225	79	29	0	0	0
46	58	130	47	5	-12	4
47	222	170	53	3	1	-5

48	198	206	12	11	-2	4
49	190	206	0	0	0	0
50	197	208	0	0	0	0
51	192	198	46	44	-3	-4
52	201	212	17	15	0	-2
53	207	214	7	7	-1	-3
54	206	213	43	32	-2	2
55	221	206	36	29	-2	-2
56	202	204	8	8	1	-3
57	195	187	12	11	0	-6
58	194	195	53	44	3	7
59	185	188	0	0	0	0
60	180	195	3	0	0	0
61	178	200	11	10	0	0
62	166	187	28	20	-2	7
63	128	159	25	3	2	3
64	144	126	5	0	0	0
65	176	139	45	11	-3	2
66	194	210	10	7	-1	-6
67	196	210	1	0	0	0
68	200	205	0	0	0	0
69	206	214	10	8	10	-4
70	220	220	5	2	-12	7
71	220	205	14	3	0	-7
72	224	218	46	15	-1	-5
73	175	237	9	0	0	0
74	181	229	15	0	0	0
75	158	234	17	0	0	0
76	182	232	10	0	0	0
77	172	237	7	0	0	0
78	1	235	0	0	0	0
79	1	231	0	0	0	0
80	1	134	0	0	0	0
81	207	92	27	0	0	0

<b>Moyenne</b>	<b>185,679</b>	<b>204,062</b>	<b>22,0247</b>	<b>12,8025</b>	<b>-0,7531</b>	<b>-0,2222</b>
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

<b>Ecartype</b>	<b>45,2382</b>	<b>31,7523</b>	<b>19,5179</b>	<b>14,0182</b>	<b>3,06811</b>	<b>3,0249</b>
-----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	---------------





Grenoble, le 30 Janvier 1991

DÉPARTEMENT DES ÉTUDES DOCTORALES

Affaire suivie par  
Tél : 76.57.

N/Réf. :

Objet :

AUTORISATION de SOUTENANCE

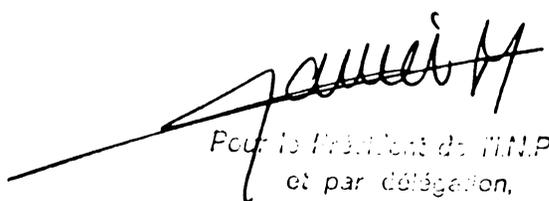
Vu les dispositions de l'arrêté du 23 Novembre 1988 relatif aux Etudes Doctorales  
Vu les rapports de présentation de :

- Monsieur CHION
- Monsieur CHEHIKIAN

Monsieur CONARD Didier

est autorisé(e) à présenter une thèse en soutenance en vue de l'obtention du diplôme  
de DOCTEUR de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE de GRENOBLE, spécialité :

"Microélectronique"

  
Pour le Président de l'IN.P.-G  
et par délégation,  
le Vice-Président  
M. GARNIER



## **RESUME**

Cette thèse présente l'étude et la réalisation d'un système automatique et intégré d'analyse de défaillances de circuits VLSI par faisceau d'électrons. Le principe d'analyse consiste à comparer les images représentant en contraste de potentiel le fonctionnement interne du circuit défaillant à celles d'un circuit de référence. L'application de cette technique de test à des circuits dont la structure détaillée est inconnue, a nécessité le développement d'un outil automatique permettant d'extraire les différences de contraste sur la totalité du circuit. L'automatisation s'est heurtée aux problèmes d'alignement entre les images à comparer. Une technique de reconnaissance des formes, basée sur la détection des coins, a été mise en œuvre pour s'affranchir de ces problèmes. Ces travaux ont été validés par une étude expérimentale menée sur des microprocesseurs 68000.

**Mots-clés :** circuits intégrés, analyse de défaillances, test par faisceau d'électrons, traitement d'images, reconnaissance des formes.