

N° d'ordre : 243

50376
1980
34

50376
1980
34

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR - INGÉNIEUR
SPÉCIALITÉ : AUTOMATIQUE

par

Pierre BONNET
INGÉNIEUR - I.S.E.N.

**"MIRAGE AUTOMATIQUE
D'AMPOULES INJECTABLES"**



Soutenue le 28 avril 1980 devant la commission d'Examen :

MM. Pierre VIDAL	Président et Rapporteur
M. NOUGARET	Examineur
Lucien POVY	Examineur
C. LESPAGNOL	Invité
Mlle N. BARRET	Invitée

A V A N T - P R O P O S

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Automatique de l'Université des Sciences et Techniques de LILLE I.

Nous adressons notre plus grande reconnaissance à Monsieur le Professeur VIDAL qui a bien voulu nous accueillir au sein de son laboratoire. Que Monsieur VIDAL veuille bien accepter nos remerciements pour avoir dirigé nos recherches et pour l'honneur qu'il nous fait en assurant la présidence de notre jury.

Que Monsieur NOUGARET, Professeur au Laboratoire d'Automatique de GRENOBLE, trouve ici l'expression de notre profonde gratitude pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à nos travaux en acceptant de participer à notre jury de thèse.

Que Monsieur POVY, Maître de conférence à l' EUDIL, trouve ici notre reconnaissance pour la confiance qu'il nous accorde en participant à notre commission d'examen.

Nous remercions vivement Monsieur LESPAGNOL, Professeur à la Faculté de Pharmacie de LILLE II , qui a été à l'origine de nos travaux.

Nos remerciements vont également à Mademoiselle BARRET, Directrice des Laboratoires SCHERING, pour l'aide qu'elle nous a apportée en ouvrant les portes de son entreprise.

Que soient enfin remerciés tous les membres du laboratoire d'Automatique et plus spécialement ceux qui ont collaboré à la réalisation de cet ouvrage.

- TABLE DES MATIERES -
- : -

CHAPITRE I. : LE MIRAGE ET SES SOLUTIONS

I.1. - Définition du mirage et sa nécessité

- Existence de particules
- Effet de ces particules
- Nécessité du mirage
- Critère de mirage

I.2. - Le mirage manuel

- La technique du mirage manuel
- Les avantages et ses défauts
- Mirage par machine transfert

I.3. - Les machines automatiques

- Machine STRUNCK
- Machines AUTOSKAN et BREVETTI

I.4. - Principe proposé

- Analyse optique
- Principe d'une analyse fractionnée
- Elimination de l'influence des défauts extérieurs de l'ampoule.
- Architecture

I.5. - CONCLUSION

CHAPITRE II. : DEVELOPPEMENT DU PRINCIPE OPTIQUE

II.1. - Le système de balayage

- Caractéristiques du système optique
- Réalisation

II.2. - La matrice de détection

- L'image d'une particule et sa traduction électrique
- Réalisation de la matrice

II.3. - CONCLUSION

CHAPITRE III. : COMMANDE DE LA MACHINE PAR MICROPROCESSEUR

III.1. - Le cahier des charges et sa représentation

- Spécification de l'automatisme
- Représentation du cahier des charges

III.2. - Etude et réalisation d'un contrôleur

- Caractéristiques du contrôleur
- Réalisation à partir d'un microprocesseur

III.3. - L'échange des informations entre la matrice et le microprocesseur

- Contraction des informations
- Les différents modes d'échange
- Réalisation de l' A.D.M.

III.4. - CONCLUSION

CHAPITRE IV. : ETUDE THEORIQUE DE LA RECONNAISSANCE DES PARTICULES

IV.1. - Recherche du seuil optimal de détection

- Probabilité d'éclairement
- Seuil optimal
- Conséquences

IV.2. - Les méthodes de comparaison d'images

- Les méthodes de classification des formes
- Les méthodes de reconnaissance directe
 - . Corrélation
 - . Distance Euclidienne
 - . Algorithme de détection séquentielle

IV.3. - Application de la corrélation à la recherche des particules

- Discrétisation spatiale
- Quantification des niveaux d'intensité lumineuse

IV.4. - Conclusion

CHAPITRE V. : ETUDE EXPERIMENTALE DE LA MACHINE

V.1. - Protocole expérimental

V.2. - Expérimentation du capteur

- Probabilité d'éclairement
- Fidélité du capteur

V.3. - valeur expérimentale de la corrélation

V.4. - Détection pratique des particules

V.5. - Conclusion

- I N T R O D U C T I O N -

La consommation grandissante de médicaments ainsi que la recherche d'une qualité sans cesse améliorée des produits conduisent les industriels de la pharmacie à repenser le problème du contrôle du produit fini ; le cas particulier des ampoules injectables utilisées dans le domaine médical repose sur une opération fondamentale qu'est le mirage, c'est-à-dire l'inspection "visuelle" des ampoules.

Jusque ces dernières années, cette opération était presque exclusivement manuelle, avec tous les inconvénients qui en résultaient, tant sur le plan de la formation et de la disponibilité du personnel que celui de la qualité contestable du travail.

Progressivement, nous voyons apparaître des machines susceptibles de résoudre ce problème : ce furent d'abord des machines dites semi-automatiques, supprimant les manipulations mais n'éliminant en rien les défauts inhérents au mirage manuel, puis quelques prototypes de machines entièrement automatiques. Ce n'est que très récemment que ces prototypes ont pu être rendus opérationnels, sans pour autant être satisfaisants en tout point.

Cette étude a donc pour objet la réalisation d'une machine de mirage automatique d'un principe différent de ceux utilisés jusqu'alors et faisant appel aux progrès les plus récents de l'optique et de l'électronique, en particulier les lasers et les microprocesseurs.

Le mémoire retrace les étapes qui nous ont amenés à la réalisation d'un prototype à vocation industrielle. Après avoir défini les exigences du mirage, nous étudierons le développement du principe proposé. Les grands éléments de cette machine, c'est-à-dire l'optique du balayage, le micro-processeur et ses programmes de traitement sont les points particuliers que nous étudierons.

Bien que les résultats obtenus soient actuellement insuffisants, ils nous laissent espérer parvenir à automatiser complètement le mirage des ampoules pharmaceutiques, tâche qui nous a été confiée.

CHAPITRE UN

---oo0oo---

LE MIRAGE - SES SOLUTIONS

CHAPITRE I

LE MIRAGE, SES SOLUTIONS -

Avant de décrire le principe de fonctionnement de l'appareil réalisé, il convient en premier lieu de définir les raisons qui déterminent le pharmacien à rechercher les particules dans les solutés injectables puis d'analyser les différentes solutions qui sont proposées. A cet effet, nous pouvons ranger les méthodes existantes en deux grandes classes :

- le mirage "manuel", c'est-à-dire sans aucune détection autre que le système visuel humain, mirage pouvant être amélioré par la suppression de la manutention des ampoules ;*
- le mirage automatique ou semi-automatique où la qualité de la détection n'est pas liée à un opérateur.*

Le but essentiel de ce chapitre est de passer en revue les méthodes existantes afin de les comparer entre elles et de mieux cerner les solutions proposées pour le système de détection décrit dans ce mémoire.

I.1. Définition du mirage et sa nécessité

I.1.1. Existence de particules

La première raison de la recherche des particules dans les solutions injectables est liée à l'existence même de ces particules car il n'est pas possible d'envisager une méthode de fabrication qui pourrait garantir une pureté absolue du liquide (1).

Parmi les sources possibles de contamination, nous pouvons rencontrer en général :

- morceau de métal, de plastique, de caoutchouc provenant des cuves de mélange .

- fibres de différentes natures : amiante, cellulose... qui sont employées dans les filtres ;
- cristaux de différentes natures ;
- éclats de verre à l'intérieur des ampoules ;
- particules de charbon (ou de matière charbonnée) se formant lors de la soudure des ampoules ;
- matériel amorphe de natures diverses : insectes, cheveux, squames.

Si certaines sources de contamination peuvent être éliminées par un travail soigné dans des conditions favorables (salles hors poussière, vêtements antistatiques...), il n'en est pas de même pour beaucoup d'autres : impuretés se trouvant dans l'ampoule avant son remplissage qu'un lavage même énergique ne peut totalement éliminer. En particulier, les débris de verre, dont la présence dans l'ampoule est liée à la technique de fabrication de cette dernière ainsi qu'à la casse éventuelle dans les machines transfert, ont la propriété de se coller sur les parois sous l'effet de la tension superficielle de l'eau.

La présence de particules dans les ampoules peut donc être réduite mais pas totalement éliminée de façon sûre et il convient donc de s'attarder sur les conséquences possibles liées à ces particules.

I.1.2. Effet de ces particules

Le principal effet à mentionner est celui consécutif à l'injection de particules dans le système sanguin des patients (2).

De nombreuses études ont prouvé que des accidents vasculaires sont provoqués par l'apparition d'un nodule au niveau de la particule étrangère pouvant obstruer les vaisseaux sanguins. Ce phénomène a été observé sur des fibres dont la taille est de l'ordre de 20 μ m de diamètre et 100 μ m de long. Certains auteurs pensent que des particules de taille inférieure à celle des vaisseaux capillaires soit 7 à 15 μ m sont sans conséquence sur l'organisme humain. Toutefois des études ont montré que même pour les très petites particules, les risques d'accidents augmentent avec la concentration en contaminants. La nature même de la particule joue un rôle dans la gravité de la réaction, une nocivité toute particulière ayant été constatée pour les silicates (l'amiante par exemple).

Il est à remarquer également qu'il est difficilement acceptable commercialement de tolérer des impuretés (même non nocives) que l'utilisateur pourrait découvrir à l'oeil nu dans les solutions, il s'agit par exemple des éclats de verre dont la taille est telle qu'il leur est impossible de pénétrer dans la seringue.

I.1.3. Nécessité du mirage

Nous venons de voir quelles sont les conséquences de la présence de particules dans les solutés injectables et de montrer qu'il est indispensable de s'assurer de la pureté des produits finis.

Cette nécessité d'un caractère moral pour le fabricant est d'ailleurs corroborée par la législation actuelle qui précise que "les solutions injectables préparées à l'avance doivent être limpides et un examen visuel réalisé dans les meilleures conditions d'observation ne devra pas permettre de déceler la présence de particules en sus pension". Il est à noter que le pouvoir de résolution de l'oeil n'est que de 40 μ et que ce texte de loi est moins contraignant que les études menées dans ce domaine. Certaines pharmacopées tiennent compte des résultats précédents et fixent une taille et un nombre maximum par unité de volume, mais sans préciser la méthode de détection.

Nous voyons donc qu'il est indispensable pour l'industriel de s'assurer de la pureté des produits qu'il fabrique.

I.1.4. Critères de mirage

De ce qui précède, nous pouvons définir les critères essentiels qu'il convient de retenir pour le mirage :

+ analyse de tous les récipients, étant donné que la notion de rejet d'une ampoule est liée à la présence d'une seule particule et non à une concentration moyenne en impureté. Une méthode statistique de test sur lot est donc à proscrire car si elle permet de définir une qualité moyenne du lot, c'est-à-dire dans notre cas présence ou non de particules dangereuses, elle ne permet pas de s'assurer de la qualité individuelle de chaque constituant du lot ;

+ analyse du produit fini, c'est-à-dire avec bouchon s'il s'agit d'un flacon, ou soudure pour une ampoule étant donné que les origines de la contamination sont aussi bien liées à la solution elle-même qu'au récipient

ainsi qu'à son moyen de fermeture. Ceci élimine les nombreuses méthodes de recherche de particules dans les solutions telles que "Coulter Counter", filtration sur membrane puis observation sur microscope qui ne pourraient être employées qu'avant remplissage du récipient ou de façon statistique après destruction du système de fermeture ;

+ limite de détection au moins égale à 10μ , car la limite légale de 40μ est peu satisfaisante sur le plan scientifique. Il est à noter que la détection des particules de 40μ doit se faire avec une probabilité voisine de 100% alors que pour de très petites impuretés, on peut tolérer une fiabilité moins grande, les risques encourus étant moins prononcés ;

+ opération de nature industrielle. Il faut comprendre sous cette notion que le mirage doit se faire avec un investissement raisonnable, une cadence en rapport avec les techniques actuelles de production, une efficacité à 100% aussi bien dans le temps que dans la qualité ;

+ "adaptabilité" de la machine aux variations de productions. Le passage d'un type de flaconnage à un autre doit se faire avec le minimum de modifications et de réglages.

Ces critères constituent les impératifs du mirage. Toutefois, il est à noter que l'industriel demande bien souvent au mirage d'effectuer un contrôle complet du produit qui peut présenter les défauts supplémentaires suivants :

- aspect de la solution incorrect de par sa couleur, éventuellement provoqué par la dissolution d'un corps étranger ;
- remplissage incomplet suite à une défaillance de la machine de remplissage ;
- fermeture défectueuse : soudure mal réalisée, blessante ou charbonnée, sertissage du bouchon mal effectué ;
- mauvaise présentation extérieure du récipient : imprimerie, tâches d'encre, rayure importante du verre.

De ce qui précède, il est important de remarquer que la base du mirage est constituée par la recherche des particules au sens où nous venons de le définir mais qu'un certain nombre de contrôles vient compléter cette opération ; il conviendra d'en tenir compte lors de l'élaboration d'une méthode de mirage.

I.2. Le mirage manuel

Nous nous attarderons tout particulièrement sur cette méthode qui semble présenter peu d'intérêt mais il ne faut pas oublier qu'elle constitue actuellement la technique de travail la plus répandue dans l'industrie et qu'elle sert de base de comparaison pour les autres principes de réalisation.

I.2.1. Technique du mirage manuel (3)

La technique de base est très simple : un opérateur saisit l'ampoule manuellement, la place devant une source de lumière diffuse et homogène et observe le contenu de l'ampoule. L'utilisation d'une source ordinaire permet de mettre particulièrement en évidence les particules de verre. Une difficulté se présente lorsque la particule est proche de la paroi de l'ampoule mais peut être résolue par agitation du liquide.

Afin de visualiser correctement les autres types d'impuretés, on a recours à des filtres polarisants qui éliminent les réflexions gênantes sur les parois. Au cours des agitations, il peut se former des bulles d'air et seule une attention soutenue permet de les distinguer des particules.

Un traitement simultané de plusieurs ampoules (5 en moyenne) augmente sensiblement la cadence sans pour autant entraîner un rythme de travail excessif et le débit atteint 800 ampoules par heures pour des ampoules de 20cc.

I.2.2. Ses avantages et ses défauts

Le principal avantage du mirage manuel est de ne pas nécessiter de matériel coûteux pour sa mise en oeuvre, exception faite d'un local adapté à cette opération, c'est-à-dire d'une lumière très atténuée. De plus le personnel requis est peu spécialisé à priori mais par contre il est très entraîné. On remarque que l'inspection manuelle de l'ampoule est effectuée par cette méthode de façon complète et qu'elle est sûre si elle est correctement menée ; en cas de doute, il est très facile pour l'opérateur de s'attarder et de parfaire son diagnostic.

Ses inconvénients sont très nombreux : on remarque principalement que la qualité du travail est directement liée à l'opérateur et qu'elle présente de ce fait un caractère très subjectif dans l'appréciation de la transparence de soluté. Si l'acuité générale de l'opérateur vient à baisser, il est

vraisemblable que la discrimination est moins bonne. Parmi les causes de diminution d'attention, nous pouvons citer en premier lieu la fatigue oculaire qu'il est possible d'atténuer par des repos intermédiaires au prix d'une baisse du rendement journalier. Néanmoins cette fatigue lorsqu'elle présente un caractère répété a aussi pour conséquence une perte définitive de vision allant jusqu'à deux dixièmes après plusieurs années de travail.

Il est à remarquer également que cette technique nécessite de nombreuses manipulations des ampoules prises dans les bacs, retournement, essuyage si besoin est, entraînant une perte de temps de 20 à 50 %. C'est une des raisons pour lesquelles on a vu apparaître des machines transfert dont le rôle est d'automatiser la manipulation des ampoules.

I.2.3. Mirage par machine transfert

La technique de travail est très voisine d'une machine à l'autre. Les ampoules sont mises en rotation rapide puis arrêtées brusquement de façon à ce que le liquide reste en rotation. Les ampoules sont alors amenées devant le système d'observation qui se compose d'une source de lumière et généralement d'une loupe grossissante avec filtre polarisant. L'opérateur observe le liquide en rotation et détermine si l'ampoule est à rejeter ou non. Afin d'augmenter le débit, plusieurs ampoules (3 ou 5) sont amenées devant l'opérateur qui dispose d'un clavier pour sélectionner le rejet.

Nous voyons que les problèmes liés au mirage manuel ne sont pas résolus par une telle méthode mais plutôt aggravés par le caractère routinier de l'opération qui s'effectue à cadence élevée et qui demande une attention encore plus soutenue. De plus le passage sur une telle machine des ampoules exclut toute observation de l'aspect du contenant, en particulier des soudures, qui demande de ce fait un contrôle supplémentaire en fin de chaîne.

En résumé, on constate que le mirage faisant appel à un opérateur humain comme élément fondamental de la détection est très subjectif, peu rapide et fatiguant, que la mécanisation du transfert n'apporte pratiquement pas d'améliorations et qu'il devient tous les jours plus impératif de se tourner vers des solutions entièrement automatisées.

I.3. Les machines automatiques

Les machines de mirage entièrement automatiques ont pour but de

résoudre le problème du mirage sans aucune intervention humaine. Elles doivent donc prendre en charge la manutention et l'inspection des ampoules.

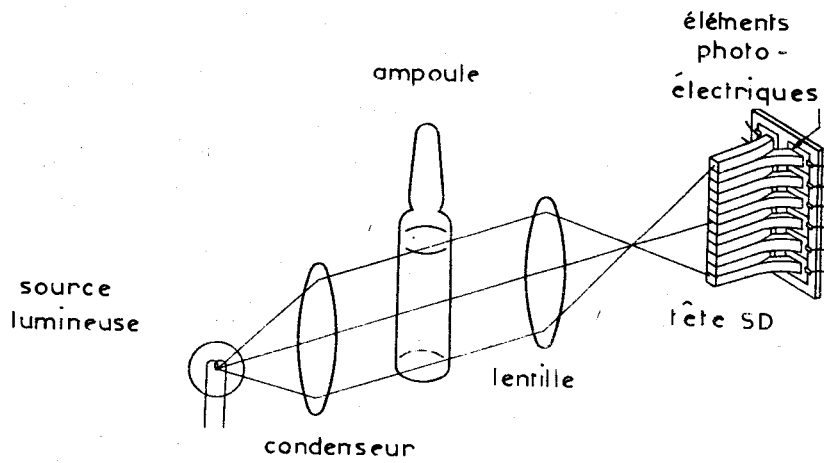
La manutention a déjà trouvé solution dans les machines semi-automatiques et l'idée de base reste la même pour les machines entièrement automatiques actuelles. Les ampoules sont véhiculées par un convoyeur et mises en rotation rapide puis arrêtées devant le poste d'inspection. De cette façon les particules sont encore en mouvement dans le liquide lorsque le récipient est fixe, ce qui résout le problème de la discrimination des impuretés internes et des défauts externes à l'ampoule.

La solution apportée à la détection des impuretés diffère profondément suivant les machines actuellement proposées. C'est pourquoi nous nous attarderons sur le système de détection des machines Strunck puis Autoskan.

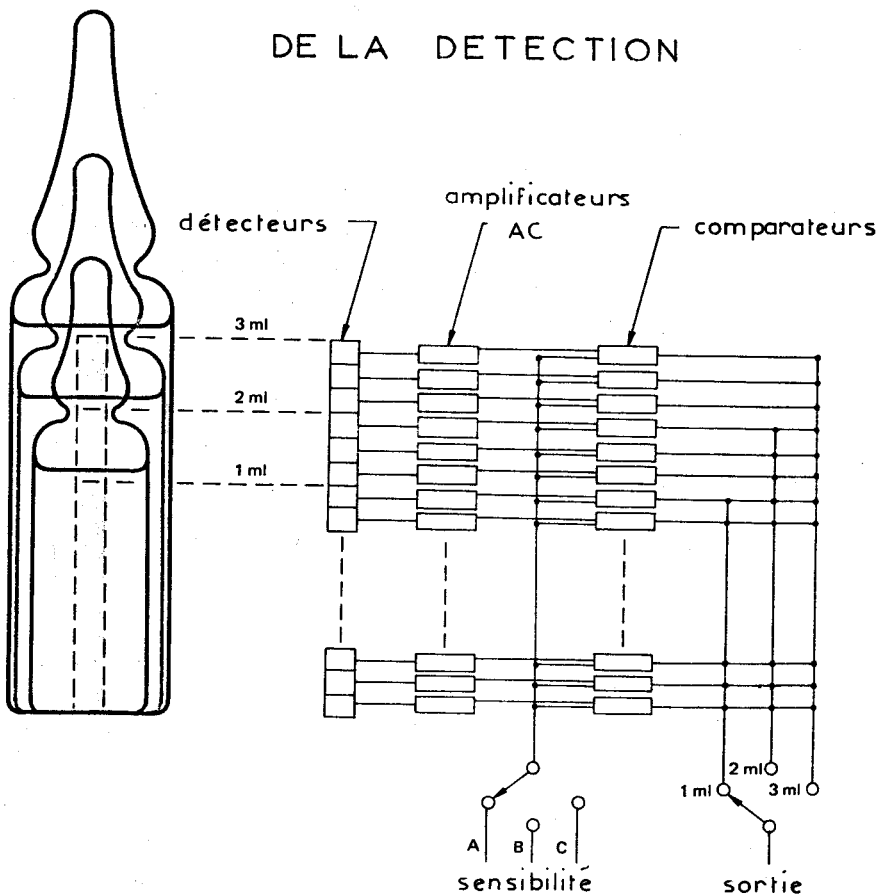
I.3.1. Machine Strunck

La figure I-1 donne un aperçu du montage utilisé. L'ampoule est fortement éclairée par un faisceau plat parallèle à son axe. La détection lui-même se compose d'un objectif et d'une ligne d'éléments photosensibles parallèle aussi à l'axe de l'ampoule. De ce fait chaque élément "voit" un petit parallépipède de l'ampoule, passant par son axe et si l'une particule vient à franchir le pinceau, la lumière reçue par l'un des éléments subit une variation. Chaque détecteur est suivi d'un amplificateur à courant alternatif, de façon à n'amplifier que les variations, et d'un comparateur dont on peut régler le seuil de sensibilité. L'utilisateur choisit la hauteur sur laquelle se fait la détection ainsi que le seuil du comparateur en fonction des ampoules à contrôler.

En vue d'améliorer la fiabilité de la détection, chaque ampoule subit deux inspections, avec rotation entre les deux passages.



PRINCIPE DE LA DETECTION



MACHINE STRUNCK

Figure I-1



Les résultats fournis par le constructeur sont les suivants (ampoule de 2 ml sans inscriptions) :

Seuil de sensibilité

	A	B	C
> 300 μ	99%	99%	98%
100-200	97%	96%	92%
60-80	80%	20%	0
20-40	2%	0	0
< 20 μ	0	0	0

taille des particules

% de rejet

Figure I-2
Résultats de la machine Strunck

La machine étant réglée au maximum de sensibilité, seulement 2 % des ampoules contenant des impuretés de l'ordre de 40 μ ont été rejetés ; de même pour les particules de grande taille (100-200 μ), 3 % n'ont pas été détectés. La mauvaise fiabilité et la faible sensibilité de la machine sont liées essentiellement, d'une part, au détecteur lui-même qui ne fait pas une analyse très détaillée de l'ampoule, d'autre part, à la difficulté d'amplifier les variations avec un grand gain sans entraîner de fausses détections sur les parasites.

Il est à noter que pour des ampoules imprimées les résultats seraient encore plus mauvais par suite de l'obstruction de nombreux détecteurs par les inscriptions.

La fiabilité réduite de cette machine, ainsi que sa difficulté d'adaptation aux différentes dimensions de flaconnage font qu'il est difficile d'accepter cette machine en milieu industriel.

I.3.2. Machines Autoskan et Brevetti

La conception est voisine pour les deux machines et nous ne les dissociérons pas. Ici encore, l'ampoule est éclairée par une forte source lu-

mineuse mais sur toute sa surface (voir fig. I-3). Une caméra de télévision prend une première image qui sert de référence puis 16 autres. La comparaison des images par ordinateur permet de déterminer si des particules se trouvent en mouvement dans l'ampoule; la détection effectuée ainsi n'est pas gênée par les défauts de surface ou les inscriptions. L'analyse est donc beaucoup plus fine que dans le cas précédent.

Brevetti apporte une amélioration sensible en considérant une image type de l'ampoule standard et en comparant l'image de référence de chaque ampoule au type standard. Cette opération a pour but d'éliminer les ampoules qui ont un défaut d'aspect ou bien une impureté fixée sur la paroi interne de l'ampoule. Etant donné les importantes variations de géométrie des ampoules, seuls les gros défauts sont détectés par ce principe. La recherche des petites particules contenues dans le liquide se fait de la même façon que par la machine Autoskan.

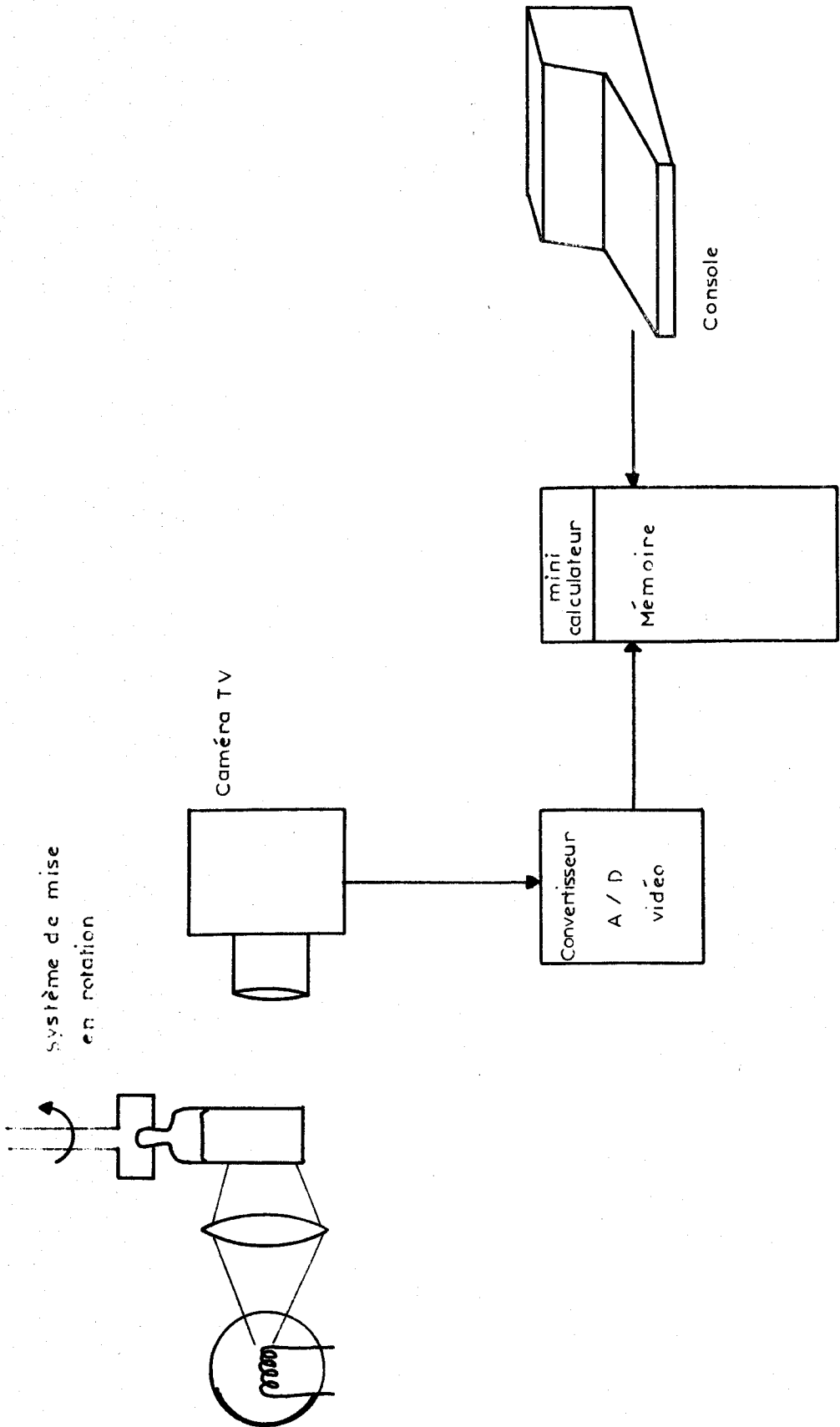
Les deux machines peuvent par ailleurs détecter les ampoules vides ainsi que des ampoules incomplètement remplies.

Les performances annoncées par les constructeurs assurent une limite de détection de l'ordre de 15μ avec un débit horaire de 3 000 ampoules. La fiabilité de la détection n'est pas précisée mais la méthode laisse espérer un niveau industriel de reproductibilité de l'inspection.

Nous voyons que les machines bâties sur ce principe sont assez performantes. Toutefois, il est à noter que leur prix de revient est très élevé, puisqu'elles comprennent de nombreux éléments onéreux : caméra de télévision, convertisseur analogique-digital vidéo, mémoire de masse pour le stockage des images vidéo, ordinateur. Brevetti envisage de limiter l'investissement en n'utilisant qu'un seul ordinateur pour gérer trois machines mais une telle solution ne peut trouver de débouchés que pour les productions très importantes (10 000 amp/h).

1.4. Principe proposé

La solution que nous proposons repose sur le même principe physique que celui du mirage manuel : la déviation d'un rayonnement lumineux par les corps étrangers contenus dans le liquide. L'application du principe retenue, qui a pour but de mettre en évidence la présence de particule, conduira



MACHINES AUTOSKAN et BREVETTI

Figure I-3



à la mise au point d'un capteur dont la fonction sera de traduire en informations logiques les informations lumineuses issues de l'ampoule.

I.4.1. Analyse optique

La détection a pour base la perturbation du trajet de rayons lumineux par les particules.

Une particule dite opaque a pour propriété de ne pas être traversée par les rayons : généralement, une partie de la lumière est absorbée mais le reste est réfléchi de façon diffuse, c'est-à-dire en rayonnant dans toutes les directions de l'espace. La répartition spatiale de l'énergie réfléchie n'est pas homogène, en particulier pour un objet sphérique, le maximum d'énergie est renvoyée dans une direction faisant un angle de 30° avec l'axe du faisceau incident. Cette valeur ne saurait être prise de façon intrinsèque car les particules opaques ne sont généralement pas sphériques.

Par contre, si la particule est transparente, il y a transmission d'une partie de l'énergie incidente avec déviation par suite des propriétés de réfraction du matériau.

En résumé, nous constatons que les particules, qu'elles soient transparentes ou opaques ont pour effet de provoquer une déviation partielle d'un faisceau d'analyse, propriété également utilisée pour le mirage manuel. Ce phénomène dépend peu de la longueur d'onde du rayonnement et ce sont essentiellement des considérations techniques qui sont déterminantes dans son choix.

I.4.2. Principe d'une analyse fractionnée

Il est à remarquer que la taille des particules à détecter est très petite devant le volume de l'ampoule. Il nous faut donc rejeter toute solution qui ferait l'analyse globale de l'ampoule (cellule photo-électrique par exemple), les variations induites par les particules étant négligeables devant le signal représentatif de l'ensemble de l'ampoule.

Nous avons donc recours à une analyse fractionnée de l'ampoule permettant de détailler les phénomènes optiques au niveau de chaque élément de volume choisi. Ceci conduit à détecter plus facilement la moindre déviation des rayons incidents.

Pour réaliser cette division du volume de l'ampoule, deux solutions s'offrent :

- soit éclairer la totalité du volume de façon convenable, former l'image globale de ce volume et l'analyser en détail, opération qui peut être faite par une caméra de télévision. Cette dernière balaye avec un fin pinceau d'électrons l'image formée sur sa surface sensible. Ce principe est celui des machines Autoskan et Brevetti. Nous avons vu qu'il conduit à un traitement sur ordinateur très lourd.
- soit envoyer des rayons lumineux sur une fraction très réduite du volume de l'ampoule, rechercher les perturbations créées sur les rayons incidents et balayer ainsi le volume de l'ampoule. C'est la méthode que nous avons retenue car elle permet d'effectuer une analyse beaucoup plus fine de chaque volume élémentaire compte tenu que nous obtenons une image complète de ce volume.

De façon pratique, nous envoyons un fin pinceau de lumière selon un diamètre de l'ampoule et observons les modifications du trajet des rayons. Un système de balayage en hélice permet d'analyser l'ensemble du volume de l'ampoule.

I.4.3. Elimination de l'influence des défauts extérieurs de l'ampoule

Nous venons de montrer que la présence d'une impureté dans le volume provoque une déviation du faisceau d'analyse mais ceci est insuffisant pour envisager un mirage automatique des ampoules. Nous devons tenir compte de la présence des raies et des défauts géométriques sur la surface extérieure de l'ampoule qui provoquent des déviations semblables à celles d'une particule.

L'élimination matérielle de ces raies n'est pas possible aussi bien après leur apparition qu'au niveau de leur formation car elles proviennent généralement de la manipulation des ampoules par les machines-transfert.

Pour distinguer les raies, les impuretés, nous nous servons d'une propriété simple : les raies sont fixes alors que les impuretés sont mobiles dans la solution.

D'où la technique de travail retenue : nous effectuons un premier balayage de l'ampoule que nous appelons "mirage". Au cours de ce mirage, toutes les déviations du faisceau d'analyse sont enregistrées avec leur position respective par rapport à l'ampoule. Après agitation de l'ampoule (modification

de la position des particules dans le volume de l'ampoule), nous effectuons un deuxième balayage appelé "contre-mirage". En comparant les déviations obtenues lors du mirage et du contre-mirage, il est bien évident que celles qui sont dues aux raies sont identiques en forme et en position, alors que celles dues aux impuretés ont changé de position et de forme.

Il est à noter que l'opération de contre-mirage a pour effet secondaire d'augmenter la fiabilité de la détection des particules car elle permet d'obtenir une nouvelle détection pour chaque particule tout en assurant l'élimination des déviations dues aux raies.

I.4.4. Architecture générale de la machine

La mise en oeuvre du principe que nous venons de voir conduit à la structure générale de la machine présentée sur le schéma (I-4), qui montre deux grandes parties dans cet ensemble :

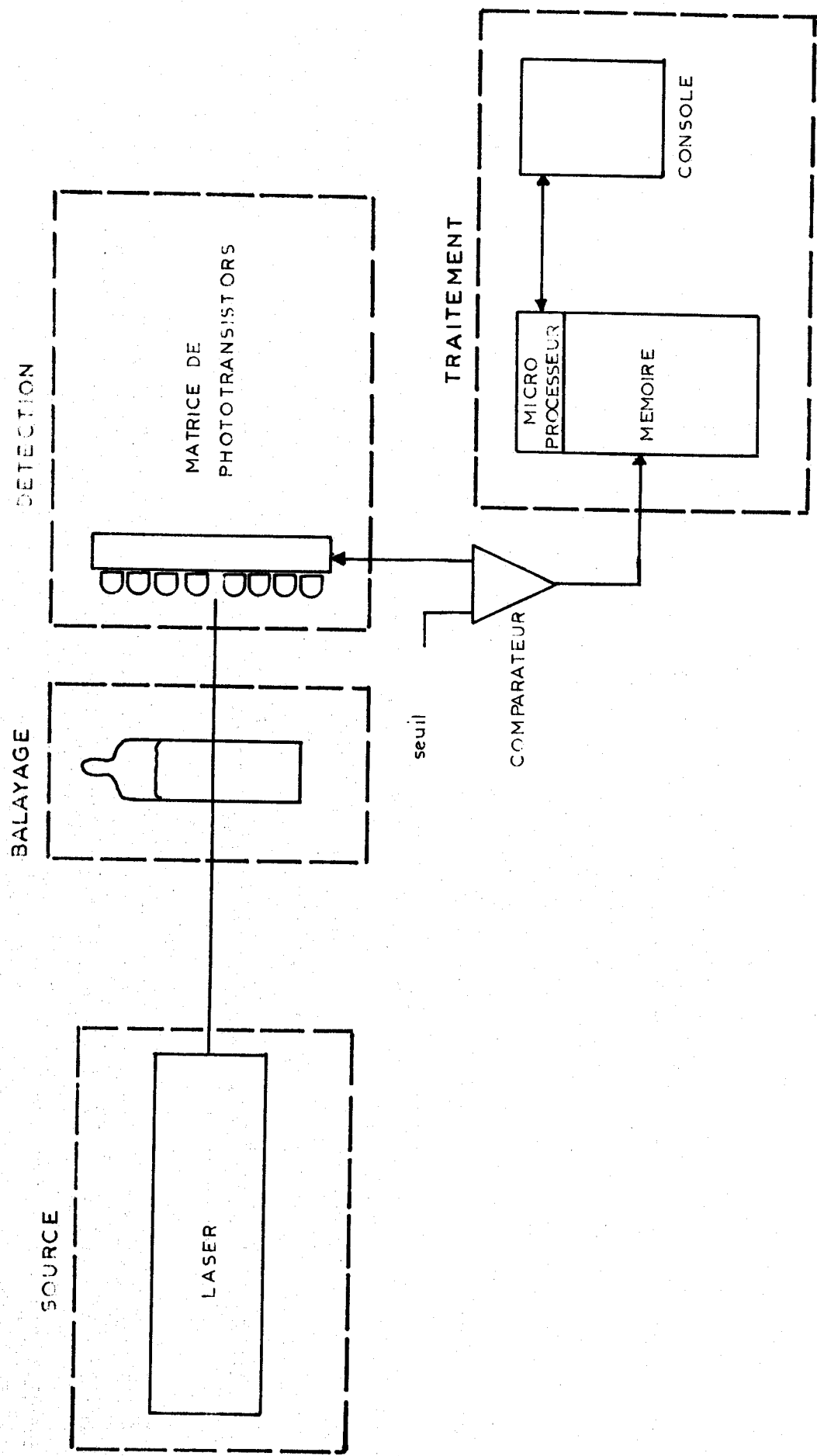
- Le détecteur optique dont le rôle consiste à analyser le volume complet de l'ampoule par balayage. Il comprend essentiellement la source lumineuse, le système de balayage et de manutention de l'ampoule et le détecteur photoélectrique qui transforme les informations lumineuses en informations logiques utilisables par l'unité de traitement.

Le développement de cette partie de la machine fait l'objet du chapitre deux.

- L'unité de traitement, à base de microprocesseur, qui est l'outil permettant d'effectuer la comparaison entre le mirage et le contre-mirage.

Les problèmes généraux de structure du microprocesseur, le "Hardware" ainsi que les traitements annexes de contrôle de la machine sont traités au chapitre trois. Le chapitre quatre est axé sur la reconnaissance des particules à partir des images formées par le capteur.

En résumé, la technique que nous avons retenue pour le contrôle des ampoules repose sur l'analyse fractionnée de l'ampoule obtenue par balayage du volume complet au moyen d'un fin pinceau de lumière et sur l'adoption du système "mirage-contre mirage" pour assurer la détection des particules indépendamment de l'état extérieur de l'ampoule.



SCHEMA DE PRINCIPE

Figure I-4



I.5. Conclusion

Cette rapide étude du mirage des ampoules pharmaceutiques nous a permis de préciser les principes des solutions à y apporter. Nous avons vu que cette opération d'inspection des ampoules présente un caractère indispensable pour le fabricant en raison des risques encourus par l'utilisateur. Le mirage manuel ne peut donner satisfaction essentiellement en raison de son caractère peu fiable et de la fatigue qu'il entraîne. Les solutions automatisées mises sur le marché sont soit insuffisantes, soit répondent aux exigences du problème au prix d'un investissement important.

La solution que nous développerons dans les chapitres ultérieurs a l'avantage de reposer sur un principe physique très simple ; sa mise en oeuvre tant sur le plan optique qu'électronique conduisent à un compromis performance-coût très favorable qui rend cette machine acceptable en milieu industriel.

CHAPITRE DEUX

---oo0oo---

DEVELOPPEMENT

DU PRINCIPLE OPTIQUE

CHAPITRE DEUX

- DEVELOPPEMENT DU PRINCIPE OPTIQUE -

Au cours de ce chapitre, nous nous proposons de préciser les éléments fondamentaux qui interviennent dans la construction de la partie optique de la machine de mirage, c'est-à-dire le système de balayage et le photo-détecteur qui forment l'outil de base de cette machine. Nous étudierons les caractéristiques à retenir pour chacun de ces éléments et nous verrons comment elles ont été obtenues sur notre prototype. Nous terminerons ce chapitre par une étude sur la nature de images reçues par ce capteur et par leur conversion en images numériques.

II.1. Le système de balayage

Le système de balayage a pour fonction d'étendre le principe élémentaire d'analyse du chapitre I au volume complet de l'ampoule, il convient de rappeler que cette machine est à vocation industrielle, c'est-à-dire capable de traiter des productions d'au moins 1 000 ampoules par heure et de détecter des particules de quelques dizaines de microns. Cet élément est fondamental dans le choix des solutions retenues pour sa construction.

II.1.1. Caractéristiques du système optique

Nous nous attachons à étudier ici les paramètres de la source lumineuse et du système de balayage.

a) *Source*

Le choix de la source lumineuse est très important dans la réalisation de la machine, car toute altération de ses performances entrainera un défaut de contrôle des ampoules ce qui n'est pas admissible industriellement.

Parmi les paramètres caractéristiques de la source, le plus important qui se dégage est le diamètre d du faisceau, qui définit la dimension du volume élémentaire analysé. En effet, il détermine la sensibilité de la machine : plus le faisceau d'analyse est fin, plus la dimension relative d'une particule est grande. Il est toutefois inutile de rechercher un diamètre plus réduit dès lors que la machine détecte les plus petites particules admissibles. En contrepartie de la sensibilité, le volume élémentaire contrôlé étant d'autant plus petit, le temps d'analyse s'allonge et le choix de la taille du faisceau résulte d'un compromis entre sensibilité et cadence de la machine.

Les autres paramètres présentent un caractère moins fondamental. Ils doivent seulement être choisis en accord avec les autres éléments constitutifs de la machine. Nous pouvons citer en particulier :

- longueur d'onde, dans la gamme de réception du photodétecteur
- puissance suffisante par rapport à la sensibilité du détecteur
- facteurs industriels, à savoir fiabilité, robustesse et absence de réglage
- forme du faisceau (de préférence parallèle pour éliminer tout problème de focalisation).

Il convient donc d'étudier les autres éléments du système optique pour fixer son choix sur la source.

b) Balayage

Nous venons de voir que le volume élémentaire analysé est fonction de la dimension du faisceau. Toutefois, nous avons négligé l'effet de lentille cylindrique de l'ampoule qui modifie la forme du faisceau lors de sa traversée diamétrale de l'ampoule.

Les calculs (annexe I) montrent que l'axe du faisceau perpendiculaire à celui de l'ampoule subit une modification suivant la loi :

$$d' = d \times \frac{n_2}{n_1} \quad n_2 \text{ étant l'indice du liquide}$$

L'axe parallèle à celui de l'ampoule ne subit pas de modification. Il en résulte qu'un faisceau de section circulaire ressort au niveau de l'ampoule avec une section elliptique. Toutefois, pour les indices couramment rencontrés, l'effet de lentille est négligeable à l'intérieur de l'ampoule.

En conséquence, il suffit de faire un demi-tour de l'ampoule pour analyser un disque ayant comme hauteur le diamètre du faisceau d'analyse.

Si h est la hauteur à mirer, l'hélice de mirage comprend donc $\frac{h}{2d}$ rotations.

En consacrant un temps T à l'opération d'analyse, la vitesse relative de rotation faisceau-ampoule est :

$$\Omega = \frac{h}{2dT} \text{ en tr/s}$$

Cette vitesse de rotation ainsi que la taille du faisceau d'analyse déterminent le temps de présence maximum d'une information lumineuse sur le photodétecteur. Cette information peut correspondre à une raie sur la surface de l'ampoule ou à une particule dans le liquide.

Si D est le diamètre de l'ampoule, le temps de présence minimum de la particule dans le faisceau sera (cas où la particule est voisine de la paroi) de :

$$t = \frac{d}{V_{\text{radiale}}} = \frac{d}{2\pi\Omega \cdot D/2} = \frac{2d^2 T}{\pi D h}$$

Ce résultat, ainsi que les précédents nous montrent que les caractéristiques des divers éléments de ce capteur sont directement liées à la sensibilité de la machine que nous désirons obtenir.

II.1.2. Réalisation

L'idée de base qui nous a guidés lors de la réalisation de cet ensemble est de construire un appareil industriel, c'est-à-dire un appareil où la fiabilité et la robustesse sont les exigences fondamentales de la conception.

a) Source lumineuse

Les considérations que nous avons vues précédemment sur la source lumineuse montrent que les sources classiques, c'est-à-dire lampes à incandescence ou tubes à décharge répondent très mal au problème.

Parmi les défauts que nous pouvons leur imputer, nous remarquons :

- étendue de la source très importante
- spectre de rayonnement large, en particulier dans l'infra-rouge
- durée de vie insuffisante
- nombreux réglages de convergence pour obtenir un faisceau parallèle.

Nous avons choisi d'utiliser un Laser Helium-Néon 0,5 mW source monochromatique et à faisceau de sortie parallèle par nature même, sans aucun réglage. La longueur d'onde correspond au maximum de sensibilité des photodétecteurs à base de silicium.

La dimension du faisceau est fixée pour un modèle donné de Laser. Elle est de 0,8 mm pour celui que nous utilisons, valeur qui donne expérimentalement de bons résultats pour la sensibilité de la machine.

b) Système de balayage

Les caractéristiques sont définies par l'application de la relation du paragraphe (II.1.1.) avec les données suivantes :

- $d = 0,8$ mm
- $h = 7$ cm pour les ampoules de 10 ml
- $T = 1$ s ce qui permet de faire le contrôle complet de l'ampoule en 4 s environ, soit un débit de 1 000 ampoules par heure.

Nous obtenons :

$$\Omega = 2\ 700\ \text{t/min}$$

Cette vitesse de rotation interdit toute solution où le mouvement de rotation serait donné à un ensemble important, par exemple Laser ou détecteur. De même, une telle vitesse ne peut être donnée à l'ampoule en raison du phénomène de cavitation du liquide qui rend impossible l'analyse.

Il faut donc nous orienter vers une solution où la rotation n'est donnée qu'au faisceau d'analyse, la source et le détecteur restant statiques.

Ce résultat est obtenu par un jeu de miroirs sur lesquels se réfléchissent le faisceau incident et le faisceau de sortie de l'ampoule. Cet ensemble de miroirs est mis en rotation à la vitesse requise par un moteur électrique (figure II-1).

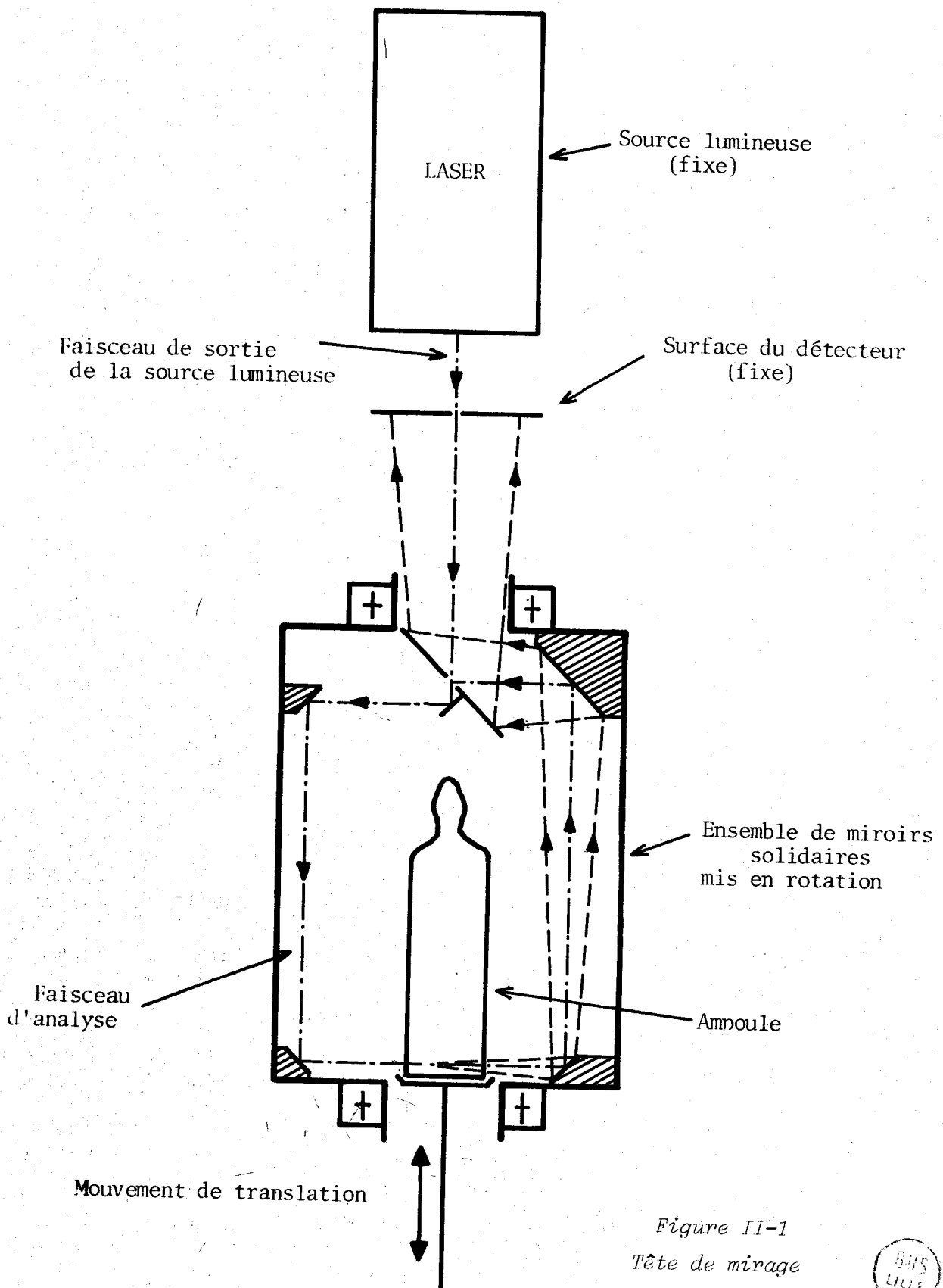
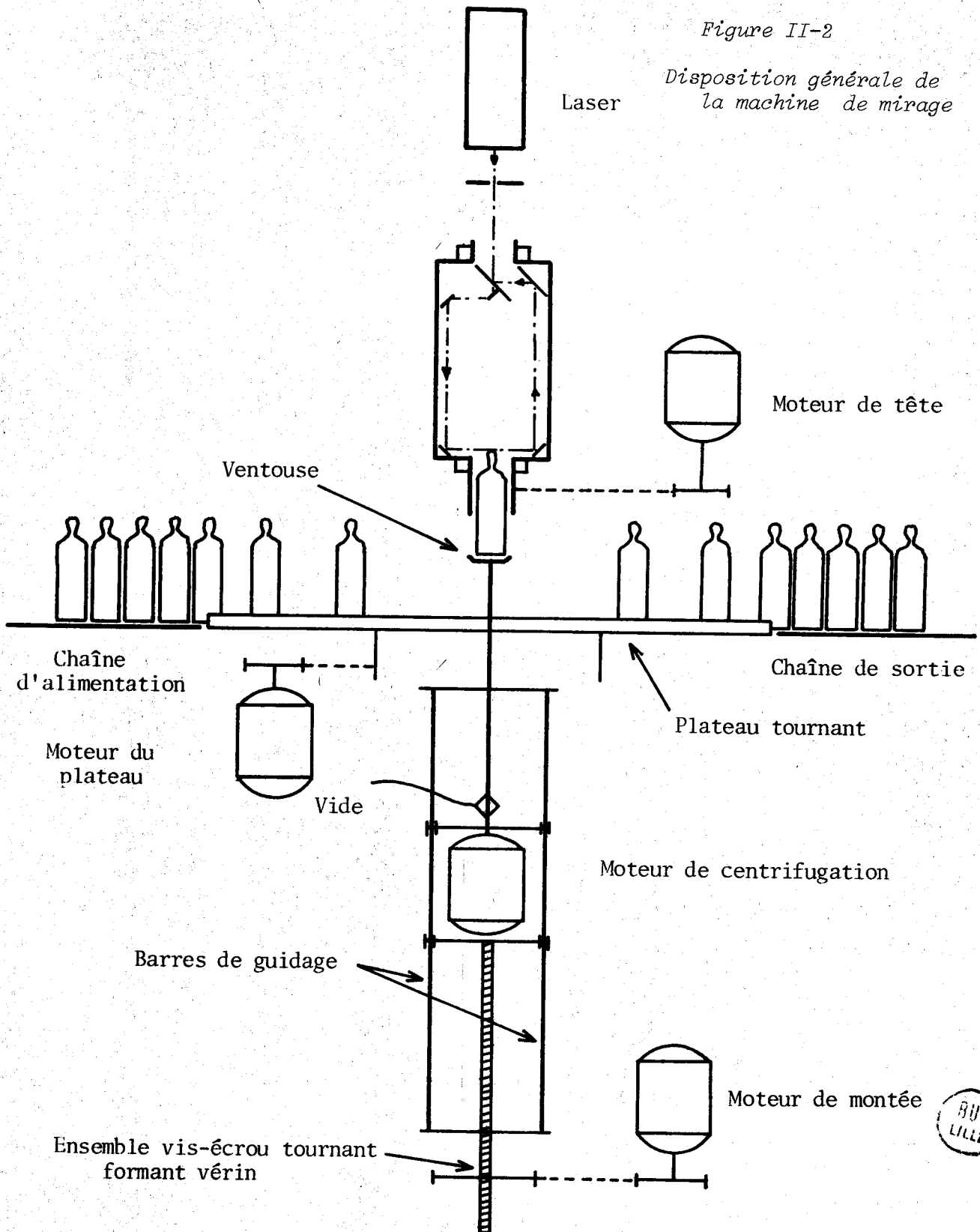


Figure II-1
Tête de mirage





L'hélice de balayage se fait en composant le mouvement de rotation du faisceau avec un mouvement de translation donné à l'ampoule. Ce dernier n'affecte en rien la position du liquide dans l'ampoule et de ce fait ne provoque pas de perturbation parasite de la détection.

Cette combinaison de mouvements permet donc de réaliser un balayage hélicoïdal de l'ampoule à très grande vitesse avec le maximum d'éléments statiques.

c) Opérations complémentaires du balayage

La méthode que nous avons retenue pour le balayage nous offre des solutions très avantageuses pour le fonctionnement général de la machine. En effet, l'ampoule étant maintenue par une simple ventouse pneumatique, il est aisé d'engager et de dégager l'ampoule dans la tête par le même mécanisme de translation que celui du balayage. Il suffit de prévoir une course supplémentaire de vérin égale à la hauteur de l'ampoule.

Nous avons vu que la technique de contrôle des ampoules repose sur la mobilité des particules dans cette dernière et qu'entre le mirage et le contre-mirage une agitation de l'ampoule assurait le brassage des impuretés. Cette opération est obtenue par mise en rotation rapide de l'ampoule sur elle même, ce qui crée le phénomène de cavitation du liquide. Un brusque arrêt de cette rotation fait que le liquide plaqué sur les parois retombe alors que le centre de l'ampoule se remplit. On observe ainsi un mouvement de convection interne à l'ampoule qui entraîne les particules même les plus lourdes vers le milieu du volume.

Pour obtenir cet effet, la tige de sortie du vérin de translation a été munie d'un moteur. La figure II-2 donne un aperçu de l'ensemble tel qu'il a été réalisé.

On remarquera que la structure générale de la machine autorise une cadence importante. En effet, l'ampoule amenée sous la tête de mirage est prise par la ventouse et engagée dans la tête ; simultanément la première centrifugation est faite, et l'ampoule se trouve prête au mirage lorsqu'elle arrive à hauteur du faisceau d'analyse. Nous obtenons ainsi un très bon enchaînement des opérations qui minimise les pertes de temps, malgré une simplicité relative de construction.

Ce système de balayage est donc en mesure d'analyser à haute vitesse le volume de l'ampoule par faisceau Laser. Il convient maintenant d'étudier

le photo-détecteur, c'est-à-dire l'élément qui transforme les informations lumineuses issues de ce capteur en informations électriques.

II.2. La matrice de détection

Le capteur photosensible est un élément fondamental de l'appareillage, son rôle consistant à traduire les déviations du faisceau d'analyse en informations exploitables par le calculateur chargé de détecter les particules par le biais du contre-mirage. Avant de présenter la réalisation pratique de cet élément, il convient d'étudier la nature des informations à traiter.

II.2.1. L'image d'une particule et sa traduction électrique

a) Matrice

Reprenons le principe de détection que nous proposons. L'expérience élémentaire de la figure II-3 permet de mettre en évidence le phénomène.

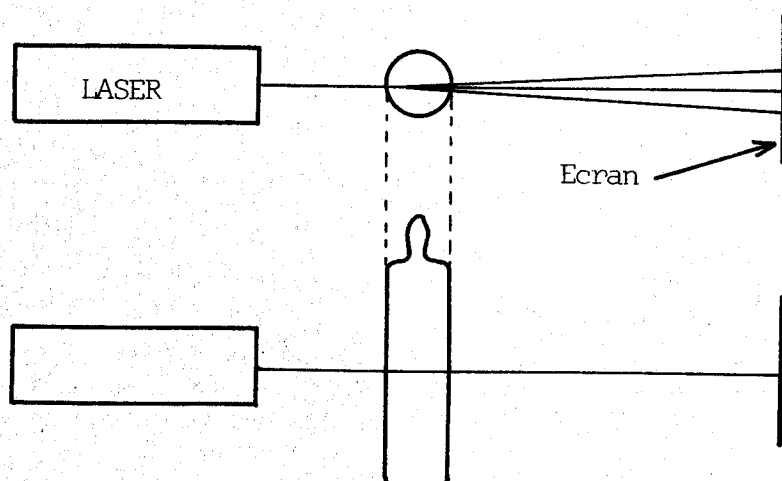
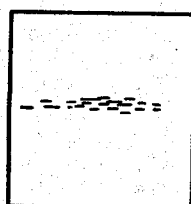


Figure II-3

Observation de la traversée du faisceau sur un écran

L'observation du phénomène sur un écran (équivalent à la surface du détecteur) donne les résultats suivants :

sans particule



avec particule

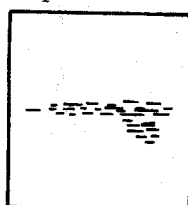


Figure II-4

Effet d'une particule sur le faisceau d'analyse

Nous retrouvons d'abord l'image du faisceau incident déformé par son passage au travers de l'ampoule (annexe 1). Si une particule (ou une raie) se trouve dans le faisceau d'analyse, nous observons une image formée par les rayons déviés.

Il est à remarquer que l'intensité de l'"image" de la particule est très faible devant celle du faisceau incident. Ceci nous conduit à éliminer une solution où le capteur serait une simple cellule mesurant la quantité de lumière relative au faisceau incident.

De même, il nous est impossible de mesurer directement la quantité de lumière propre à la particule en masquant l'image du faisceau incident car la position de ce dernier, fonction des imperfections de la forme géométrique de l'ampoule est par conséquent souvent instable au cours d'un balayage complet.

Le capteur doit donc fournir deux informations : l'intensité de la lumière (ou la quantité de lumière) ainsi que la forme géométrique de l'image. Ceci peut être obtenu grâce à une matrice d'éléments photosensibles.

La qualité de la prise d'information, appelée généralement définition de l'image, est fonction du nombre d'éléments de cette matrice. Dans notre cas particulier où le but de la prise d'information est de comparer mirage et contre-mirage et non d'analyser la forme, il n'est pas besoin d'un nombre de points élevé. En effet, même si les formes réelles des images sont traduites de façon grossière, nous pourrions évaluer leur ressemblance sans difficulté.

b) Echantillonnage de la mesure

Une matrice photosensible est un ensemble de détecteurs élémentaires. Pour avoir une prise d'information cohérente, il faudrait mesurer le niveau d'éclairement de chacun des points de la matrice à des intervalles de temps très inférieurs au temps de présence de la particule défini en (II.1.1.). Ceci conduit à un traitement parallèle de la matrice, avec mise en oeuvre d'un matériel important et à un nombre de mesures considérable pour une ampoule.

La mesure instantanée de l'intensité peut être remplacée par une mesure de la quantité de lumière reçue pendant un intervalle de temps donné qui peut dépasser le temps de présence de la particule dans le faisceau. Si on suppose le temps d'intégration de l'intensité suffisamment long, l'information donnée par le capteur correspond à la quantité de lumière totale émise

par la particule. De ce fait, il n'y a aucune perte d'information par échantillonnage quelle que soit la période choisie. Il en résulte une diminution importante du nombre de mesures effectuées au cours d'un mirage donc de la mémoire de stockage, et la matrice peut être balayée de façon sérielle. Toutefois, l'allongement de la période d'échantillonnage conduit à une dégradation du rapport signal utile/bruit par intégration de la lumière parasite. Le meilleur choix correspond à une période de l'ordre du temps de présence de la particule, valeur pour laquelle l'information utile est maximale.

c) Digitalisation de la mesure

Il est à remarquer que le facteur intensité ou quantité de lumière déviée a peu d'importance en lui-même. Ce qui caractérise essentiellement une déviation est son existence même, c'est-à-dire la réception de lumière par certains éléments. Nous pouvons considérer qu'il y a présence de lumière sur un élément si l'éclairement dépasse un certain seuil ; l'ensemble des éléments éclairés donne la forme de la déviation.

Ceci conduit à digitaliser l'information lumineuse sur deux niveaux par un comparateur avec seuil. Outre sa simplicité, cette méthode a pour avantage de réduire à sa valeur minimum le débit d'informations issues de la matrice, ainsi que la taille mémoire nécessaire au stockage.

La valeur à adopter pour le seuil est peu critique, étant donné que notre méthode s'appuie sur la comparaison des images entre mirage et contre-mirage. Un seuil trop bas donne des images davantage bruitées et augmente les risques d'erreurs d'analyse, alors qu'un seuil trop haut diminue la sensibilité aux petites particules. Une étude approfondie de la valeur du seuil est menée au chapitre IV.

En résumé, l'étude du capteur photosensible nous montre que cet élément doit être matricé, c'est-à-dire capable de reconnaître sommairement une forme lumineuse. Les considérations de nature même de ces formes et de leur rapidité d'apparition nous amènent à rechercher une solution qui minimise le volume des informations à traiter par le calculateur.

II.2.2. Réalisation de la matrice

a) Élément de base

La matrice est réalisée à partir de phototransistors. La technique d'utilisation, inspirée de celle des matrices Réticon, conduit à une solution

très simple dont le principe consiste à mesurer la décharge de la capacité parasite de l'élément photosensible par le courant dû à la lumière.

En effet la perte de charge instantannée de la capacité parasite est donnée par :

$$dq = I_{\lambda} dt \quad I \text{ courant créé par la lumière}$$

La perte de charge au bout d'un temps T est donc :

$$Q = \int_0^T I_{\lambda} dt$$

ce qui conduit à une diminution de potentiel

$$\Delta V = \frac{1}{c} \int_0^T I_{\lambda} dt \quad c \text{ capacité parasite}$$

La décharge de la capacité parasite est donc proportionnelle à la quantité de lumière reçue ce qui réalise directement l'intégration de l'éclairement instantané.

b) Mise en oeuvre

Il suffit de disposer d'un élément de commutation pour assurer la recharge de la capacité du phototransistor à un potentiel donné. Nous utilisons le montage suivant :

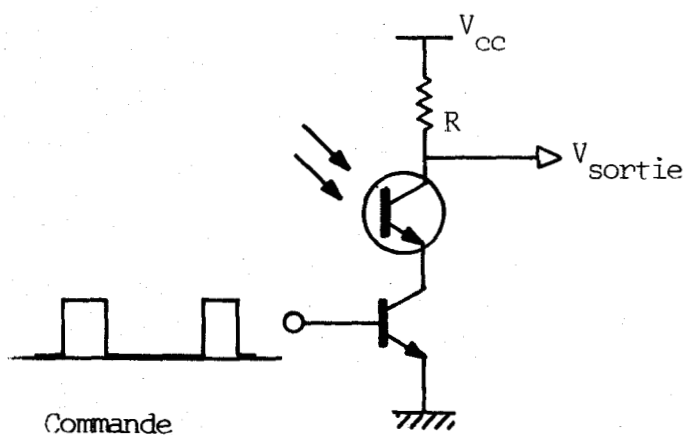


Figure II-5

Montage élémentaire d'un phototransistor

La charge de la capacité se fait ici au travers d'une résistance R. Lorsque le transistor de commande passe en conduction, il apparaît sur la résistance un pic de tension égal à la décharge du phototransistor, donc à la quantité de lumière reçue depuis la précédente recharge.

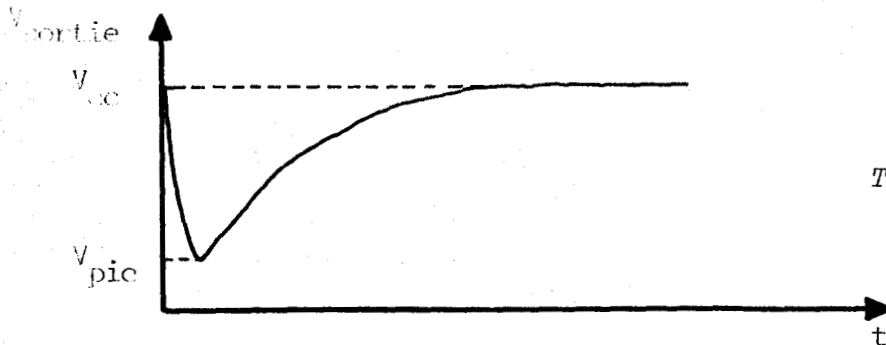


Figure II-6

Tension de sortie du phototransistor

Il suffit de comparer V_{pic} à un seuil pour obtenir l'information digitale recherchée, c'est-à-dire la présence d'un éclairage suffisant sur le phototransistor.

On remarque que l'opération de recharge demande un certain temps, pendant lequel le phototransistor devient "aveugle". Ce temps est fonction des valeurs des éléments physiques du circuit ; il peut être minimisé, mais pas annulé complètement. Nous verrons qu'il est peu gênant dans le fonctionnement de la matrice.

c) Matrice d'éléments

Pour faciliter les échanges avec le microprocesseur, nous avons retenu une structure de base de 8 x 8 éléments. La forme géométrique est un carré, mais peut être modifiée pourvu qu'elle puisse se ramener à une structure de 8 lignes de 8 phototransistors.

Chaque ligne analysée en parallèle fournit un mot de 8 bits correspondant aux sorties des comparateurs. Cette structure ne demande qu'un câblage restreint (8 fils de sélection de ligne et 8 fils de sortie) avec une vitesse de balayage élevée (32 μ s max dans notre réalisation) compatible avec le temps de présence d'un éclairage.

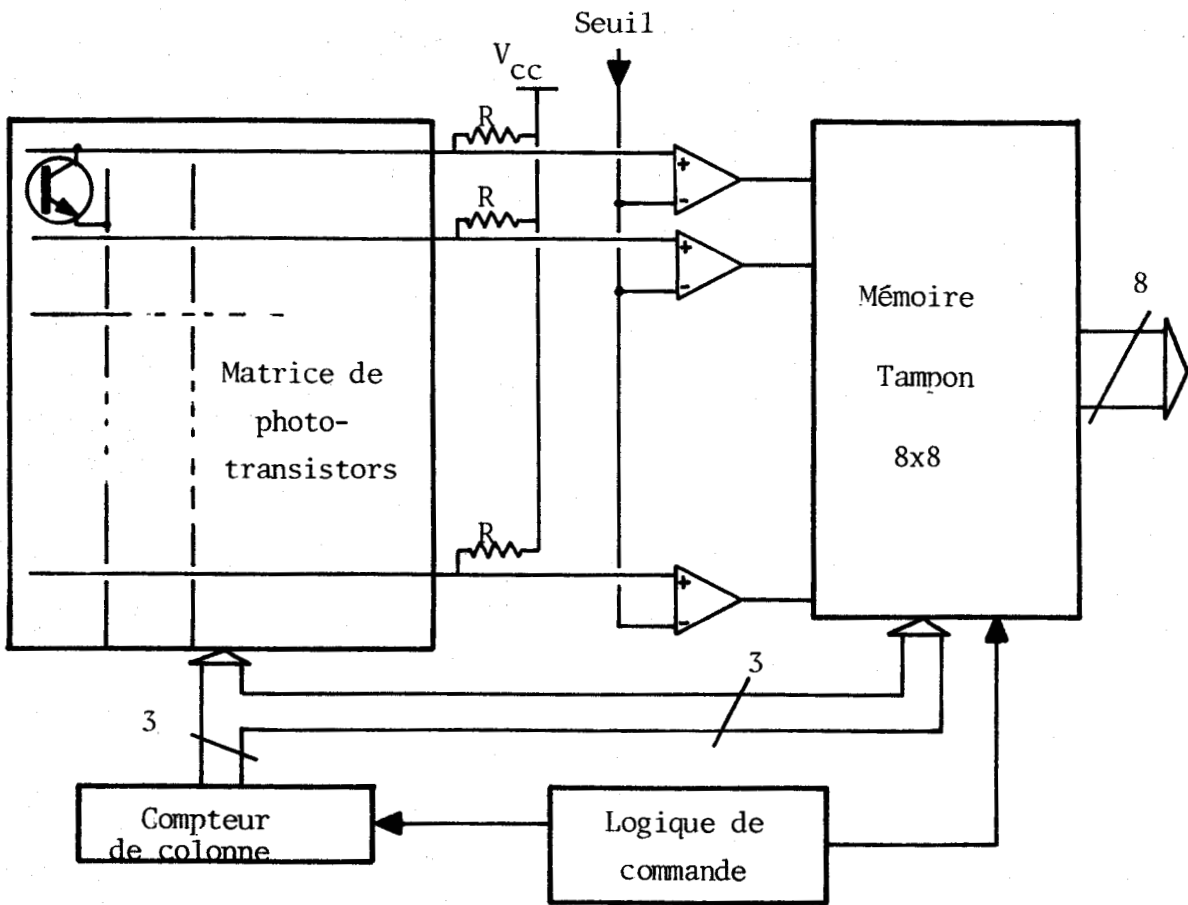


Figure II-7

Schéma de principe de la matrice de détection

Le phénomène de masquage des éléments au cours de la recharge est peu sensible dans la prise d'information. En effet, la recharge se fait pour une ligne à la fois, soit 1/8 de la surface sensible ; à la vitesse maximale de scrutation, c'est-à-dire lorsque le temps d'analyse d'une ligne est égal au temps de recharge, les 7/8 de la matrice sont actifs. De ce fait, à aucun moment la matrice n'est complètement aveugle ; il en résulte que nous obtenons une transcription aussi complète que possible de la déviation lumineuse, même à vitesse maximale.



La mémoire tampon a un double rôle :

- mémoriser le basculement du comparateur qui se fait sur pic de recharge
- reconstituer l'image fournie séquentiellement par la matrice en vue de son acquisition par l'unité de traitement.

Le contenu de la mémoire est donc l'image simplifiée de la déviation du faisceau d'analyse, les points éclairés étant représentés par des "1" et les autres par des "0", représentation qui s'avère suffisante grâce à la technique du mirage et du contre-mirage.

11.3. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenter les éléments optiques développés pour mettre en oeuvre la détection des particules. A chaque pas de cette étude, nous avons recherché des solutions efficaces à notre problème, l'efficacité se traduisant par un maximum de performances en rapidité et en précision de détection tout en veillant à la simplicité générale, garantie d'une fiabilité nécessaire en milieu industriel. C'est ainsi que nous avons retenu une source de lumière indérèglable, un système de balayage hélicoïdal de l'ampoule avec peu de pièces en mouvement, un enchaînement des opérations éliminant les pertes de temps ainsi qu'un photodétecteur de mise en oeuvre simple.

Nous disposons ainsi d'un capteur capable d'analyser une ampoule par faisceau Laser et de fournir les résultats sous forme digitale. Cet ensemble ne peut suffire au contrôle d'une ampoule, essentiellement parce que la décision du rejet est prise après comparaison du mirage et du contre-mirage. C'est là qu'intervient le travail du microprocesseur, dont nous allons étudier les diverses fonctions dans le chapitre suivant.

CHAPITRE TROIS

---oo0oo---

COMMANDE DE LA MACHINE

PAR MICROPROCESSEUR

CHAPITRE TROIS

COMMANDE DE LA MACHINE

PAR MICROPROCESSEUR

Le chapitre précédent nous a conduit à la réalisation d'un système d'analyse de l'ampoule. Il est bien évident que cet ensemble ne peut se suffire à lui-même. Il comporte un certain nombre d'éléments mécaniques (moteurs, vérin, électrovanne) dont il faut assurer le contrôle au cours des différentes phases de l'analyse de l'ampoule. L'étude détaillée du cahier des charges avec ses spécifications technologiques et opérationnelles commença ce chapitre. Il nous conduira à la recherche des capteurs qui nous renseigneront sur l'état de la machine et à la traduction sous forme d'un graphe des évolutions du système. Nous verrons ensuite comment nous avons pu résoudre ce problème d'automate par l'emploi d'un microprocesseur. Ceci nous conduira à préciser quels ont été les développements d'un microprocesseur Intel 8080 dans cette optique d'utilisation. La dernière partie s'attachera à présenter la méthode d'échange entre la matrice et la mémoire du microprocesseur.

Nous disposerons alors d'une machine automatique d'analyse ; la décision de rejet pourra se faire ensuite à partir des images stockées dans la mémoire du microprocesseur, indépendamment de la phase d'analyse de l'ampoule. Ceci fera l'objet d'un chapitre ultérieur.

III.1. Le cahier des charges et sa représentation

La machine, telle que nous l'avons conçue au chapitre II, assure à la fois les opérations de manutention de l'ampoule et d'analyse. Les éléments qui la constituent forment ce que nous appellerons la partie opérative de l'ensemble. C'est le processus à automatiser.

L'organe de commande, qui a pour noyau un microprocesseur, est donc l'automatisme qui élabore en sortie les ordres destinés au processus et les signaux de visualisation en fonction des comptes rendus venant du processus et des consignes extérieures qu'il reçoit en entrée (fig. III-1). Le mode d'échange entre les deux systèmes se fait uniquement au moyen de signaux logiques.

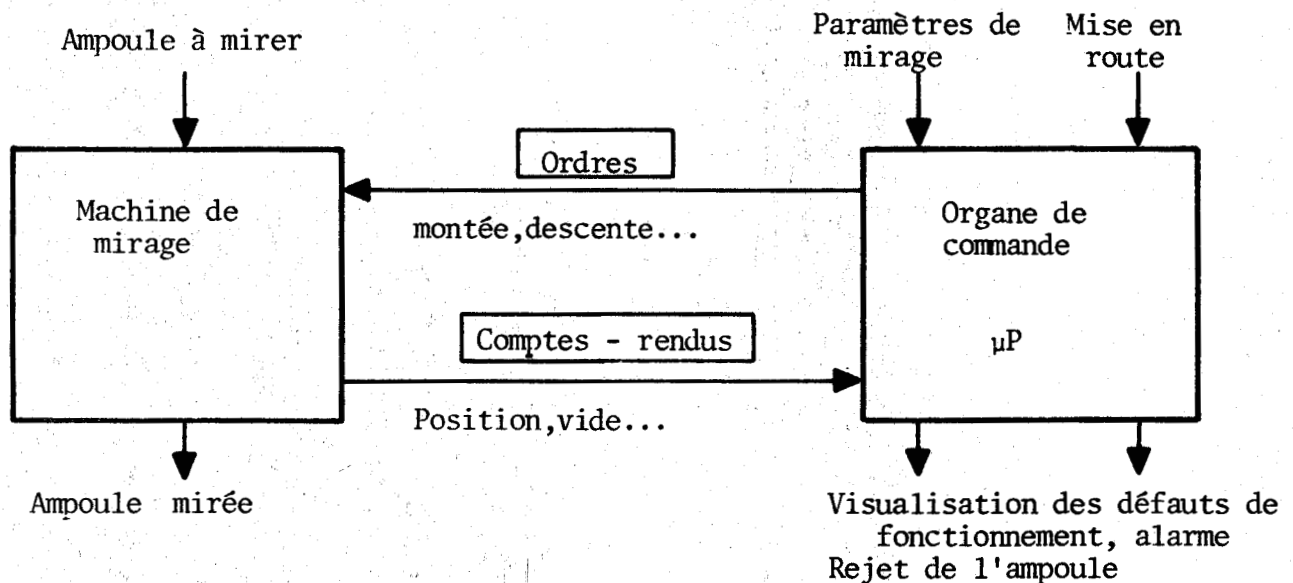


Figure III-1

Commande de la machine de mirage par automate de contrôle

Le cahier des charges que nous allons définir décrit le comportement général de la machine, avec les particularités technologiques et d'environnement qui nous sont demandées (1).

III.1.1. Spécifications de l'automatisme

a) Spécifications fonctionnelles

Afin d'envisager une commande des différents organes constituant la machine de mirage, il conviendrait tout d'abord d'en préciser la partie opérative.

La machine complète doit comprendre les éléments relatifs aux mouvements mécaniques de l'ampoule ainsi que le système optique d'analyse (c'est-à-dire le faisceau de balayage et la matrice photosensible).

Au sens où nous l'entendons, la partie opérative se compose de tous les éléments mécaniques c'est-à-dire :

- le vérin qui donne le mouvement de translation
- le moteur de centrifugation
- la ventouse de maintien de l'ampoule

Il est bien évident qu'il faut y inclure tous les capteurs dont le choix sera fait grâce aux spécifications.

La partie opérative étant définie, il convient de décrire les différentes phases mécaniques du mirage d'une ampoule.

La figure III-2 résume les opérations que nous avons à réaliser. L'ampoule est introduite manuellement sous la tête de mirage (1), car dans le cadre d'un prototype, le système d'alimentation automatique par plateau distributeur n'a pas été réalisé. L'absence de ce mécanisme ne remettant pas en cause le cycle de travail, il en sera fait abstraction au cours de cette étude.

Une fois l'ampoule en place sur la ventouse, l'opérateur demande le départ de cycle qui débute par le maintien de l'ampoule grâce au vide (2).

L'ampoule est ensuite amenée dans le guidage inférieur de la tête (3) ; la centrifugation est alors actionnée (4), elle a pour effet de créer un mouvement de cavitation dans le liquide et de mettre en suspension les particules. Après un temps d'arrêt au bout duquel la surface du liquide est revenue au repos, on atteint la phase du mirage (5) pendant laquelle il y a stockage des images fournies par la matrice.

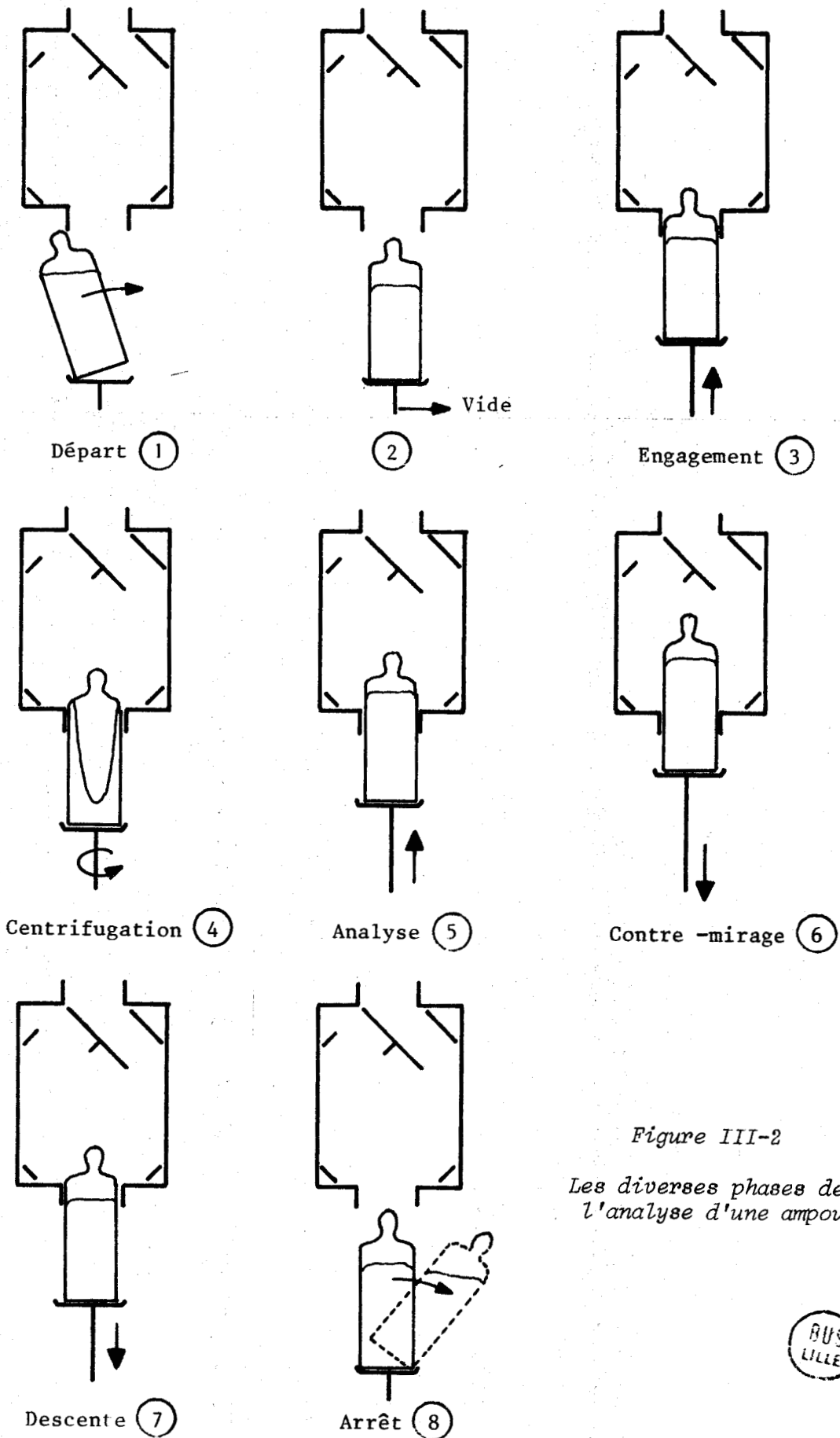


Figure III-2
Les diverses phases de
l'analyse d'une ampoule

BUS
LILLE

Une fois l'analyse terminée, nous engageons le contre-mirage (6) avec stockage des images. Il ne reste plus qu'à descendre l'ampoule (7) pour la dégager après arrêt du vide (8).

Dans le cas d'une alimentation automatique, il suffit de commander l'avance du plateau distributeur à ce niveau. A ce stade, nous disposons de tous les renseignements nécessaires en fonctionnement de la machine. Il convient toutefois de préciser les paramètres propres au milieu industriel dans lequel cette machine va évoluer ; c'est le rôle des spécifications opérationnelles qui vont être étudiées ci-dessous.

b) Spécifications opérationnelles

Elles ont trait au suivi du fonctionnement de l'automatisme, c'est-à-dire aux exigences concernant l'équipement une fois mis en exploitation.

Le premier caractère demandé à la machine est constitué par sa fiabilité de fonctionnement, ainsi que par l'absence de pannes dangereuses.

En conséquence, il faut envisager les fonctionnements anormaux qui conduisent généralement à une utilisation dangereuse de la machine ou à sa détérioration.

Les principales pannes que nous pouvons noter sont :

- erreur de position du vérin pouvant conduire au blocage du moteur et à sa destruction. De plus, si le vérin dépasse une certaine hauteur, il y a risque d'écrasement de l'ampoule dans la tête, avec les conséquences qui peuvent en résulter (projection d'éclats de verre, salissure des miroirs) ;
- absence de vide, soit au démarrage, soit en cours de fonctionnement pouvant provoquer la rupture de l'ampoule.

Les remèdes que nous pouvons apporter à ces pannes pour les rendre non-dangereuses sont les suivants :

- équipement du vérin de capteurs de fin de course à action prioritaire sur l'automatisme ;
- contrôle de présence du vide par pressostat ; toute défaillance du vide est ainsi détectée, qu'elle provienne d'un défaut d'application de l'ampoule sur la ventouse, d'une rupture de tuyauterie ou d'une panne du générateur de vide ;

- moteur d'entraînement de la tête de mirage commandable par l'automatisme de façon à l'arrêter dès la détection d'un défaut de fonctionnement quelconque ;
- signalement par voyants des pannes et redémarrage du cycle autorisé par commande manuelle.

Munie de ces sécurités, nous pouvons espérer que les pannes les plus courantes ne feront que provoquer l'arrêt de la machine sans conséquence irréparable.

Le deuxième aspect du fonctionnement général de cette machine est lié à la nécessité d'une grande souplesse d'utilisation, en particulier l'adaptation de la machine aux différentes formes de conditionnement (ampoules de 1 à 20 ml).

Si le changement de taille d'ampoule requiert quelques modifications mécaniques (ventouse, guides d'ampoule), il est impératif que l'automatisme n'en soit que faiblement affecté. Le début et la fin du mirage sont définis par la hauteur du liquide dans l'ampoule ; de même pour limiter les pertes de temps sur les petites ampoules, nous sommes amenés à déplacer le vérin à grande vitesse dans les zones non critiques. Il en résulte que les divers ordres de commande du vérin dépendent de la taille de l'ampoule. Nous avons donc intérêt à ce que ces niveaux soient repérés dynamiquement par codage numérique de la position du vérin et comparaison à des valeurs préaffichées. Ainsi l'adaptation avec divers conditionnements se fait par simple modification des consignes fixées par l'opérateur.

Le troisième caractère que doit présenter cet automatisme est la modularité et la possibilité d'évolution de la machine. La maintenance ainsi que les modifications du cycle de mirage doivent être facilités et cet aspect sera déterminant pour le choix du contrôleur.

Au cours de cette étude du problème d'automatisation du processus de mirage, nous venons de voir qu'il est nécessaire, d'une part, d'assurer le fonctionnement de base de la machine et d'autre part, de respecter les exigences du milieu industriel dans lequel cet ensemble sera inséré. Ceci nous conduit à utiliser des capteurs et des organes de commande qui aillent dans le sens de ces exigences ; c'est ce que nous allons préciser dans les spécifications technologiques.

c) Spécifications technologiques

Devant les différentes technologies rencontrées sur le marché, nous avons choisi de n'utiliser que des éléments compatibles TTL, les plus courants. Ainsi tous les signaux sont ramenés aux niveaux (0-5V). Ce choix va dans le sens que nous avons précisé précédemment, c'est-à-dire standardisation et facilité de maintenance.

De ce fait, les commandes fournies par le contrôleur sont en logique (0-5V) ; des interfaces sont prévues entre chaque organe et le contrôleur, avec isolation optique des commandes pour éliminer tout parasite de couplage. Les commandes sont activées par un niveau 1 de façon à éviter toute action en cas de rupture de la liaison contrôleur-partie opérative.

Pour les capteurs que nous avons à implanter sur le processus, nous appliquons le même principe : toute panne doit amener le système dans une situation non dangereuse. L'emploi de barrières optiques infra-rouge pour les butées haute et basse répond à ce besoin. Tout défaut dans un tel capteur (poussière, arrêt de la diode émettrice, rupture d'un fil) conduit à provoquer la même mise en arrêt de la machine que le franchissement de la barrière. Pour le contrôle de la présence du vide, la même technique de travail est adoptée. De telles solutions permettent de garantir toute sécurité en cas de panne d'un actionneur ou d'un capteur, ce qui est demandé en particulier dans les spécifications opérationnelles.

L'ensemble des spécifications, qu'elles concernent le fonctionnement de base de cette machine ou des particularités technologiques ou d'environnement, nous permettent de préciser avec exactitude les divers paramètres entrant en considération dans la réalisation de cet automatisme. Toutefois, ces paramètres d'origines parfois très diverses, peuvent être formulés à l'aide l'outil de représentation qu'est le GRAFCET.

III.1.2. Représentation du cahier des charges

A partir des éléments que nous venons de donner, nous pouvons décrire de façon schématique le fonctionnement de cet automatisme. L'outil que nous utiliserons est le GRAFCET, graphe de commande Etape-Transition (1,2).

a) Définition

Le fonctionnement d'un automatisme peut être représenté graphiquement par un ensemble d'étapes et de transitions orientées.

- étape : Une étape ou place correspond à une situation dans laquelle l'automatisme ne change pas d'état, correspondant généralement à des sorties stables, même si ses entrées varient.

Une étape peut être soit active (marquée) si on s'y trouve effectivement, soit inactive. Il y a toujours au moins une étape activée dans un automatisme, parfois plusieurs (évolutions simultanées). On représente une étape par un cercle, en notant les sorties activées. Une transition permet de passer d'une étape à la suivante ; la réceptivité d'une transition est la condition logique de transition.

- Une transition est validée si la ou les étapes qui la précèdent sont activées. Lorsque la transition se fait, les étapes qui la suivent sont activées et les étapes qui la précèdent sont désactivées.

Lors de la mise sous tension de l'automate, toutes les étapes doivent être désactivées sauf une qui est appelée étape initiale (notée par un astérisque).

Avec cette représentation, nous pouvons décrire le fonctionnement de cet automatisme, en tenant compte des diverses sécurités que nous avons définies lors de l'étude générale de la machine.

Etant donné que les transitions sont essentiellement fonction des entrées du contrôleur, il serait bon de préciser le symbolisme d'écriture des capteurs ainsi que des actionneurs.

b) Codification des entrées et sorties

Le paragraphe II.1.1. nous a conduit à prévoir sur le prototype un certain nombre de capteurs ou d'actionneurs pour assurer le fonctionnement de base de la machine et les sécurités.

Nous pouvons résumer l'ensemble de ces desideratas sur le schéma de la figure III-3.

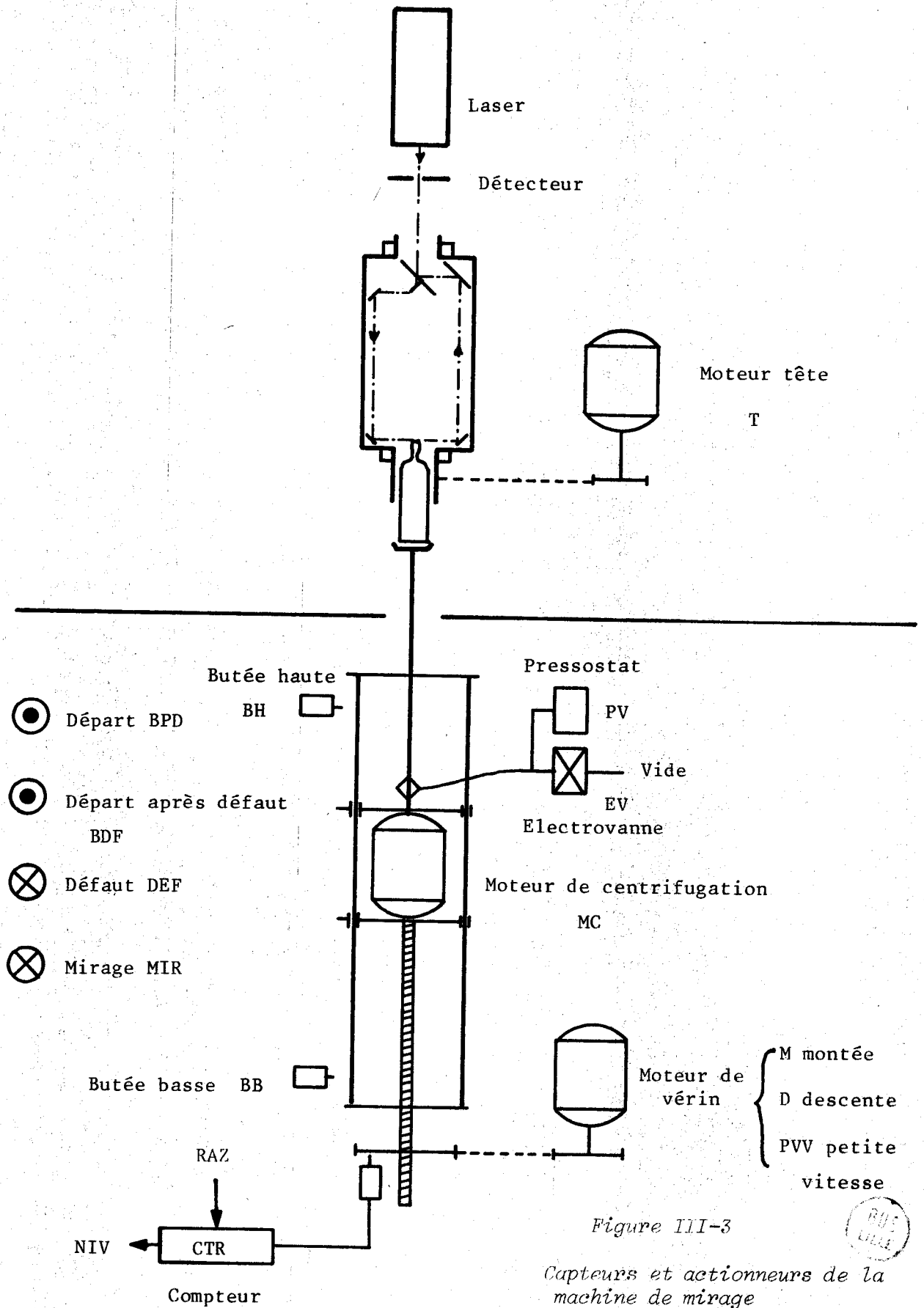


Figure III-3

Capteurs et actionneurs de la machine de mirage

Les actions possibles sur le système sont les suivantes :

- moteur tête T, permettant l'arrêt du balayage en cas de détection de défaut ;
- moteur centrifugation MC ;
- moteur de vérin à 2 vitesses et 2 sens de rotation, montée M, descente D, et petite vitesse en approche PVV ;
- électrovanne commandant la fixation de l'ampoule par ventouse EV
- signalisation d'un défaut quelconque par le voyant DEF ;
- signalisation du mirage MIR signal qui sera réutilisé par le système d'acquisition des données.

Les capteurs que nous avons prévus sont :

- compteur fournissant la position numérique du vérin NIV ;
- pressostat PV ;
- bouton poussoir de départ de cycle de mirage BPD
- butées de dépassement de la course normale du vérin BH et BB ;
- bouton poussoir de remise en marche après défaut BDF.

Dans le souci d'alléger la description, nous n'avons pas tenu compte du fait que certaines informations étaient des "0" logique au repos pour améliorer la sécurité de fonctionnement de l'ensemble (voir spécifications opérationnelles et technologiques). Nous considérerons que le "1" logique correspond à l'état "actionné" du capteur.

Remarquer que l'information NIV n'est pas un signal logique mais un mot à plusieurs bits. Ce facteur a son importance pour le choix de l'automate.

Il nous est possible maintenant de décrire le fonctionnement complet de l'automate.

c) Graphe de l'automate

Pour simplifier la description, certaines transitions ont été notées NIV_i ; elles correspondent aux différentes valeurs que doit prendre le compteur NIV pour engager les phases suivantes. Nous avons vu que ces valeurs dépendent directement du type d'ampoule traitée et qu'elles sont données sous forme de paramètres extérieurs par l'utilisateur de la machine. Une transition de ce type est franchie lorsque le compteur NIV prend la valeur préaffichée NIV_i . Cette technique permet l'adaptation de l'automate aux divers flaconnages.

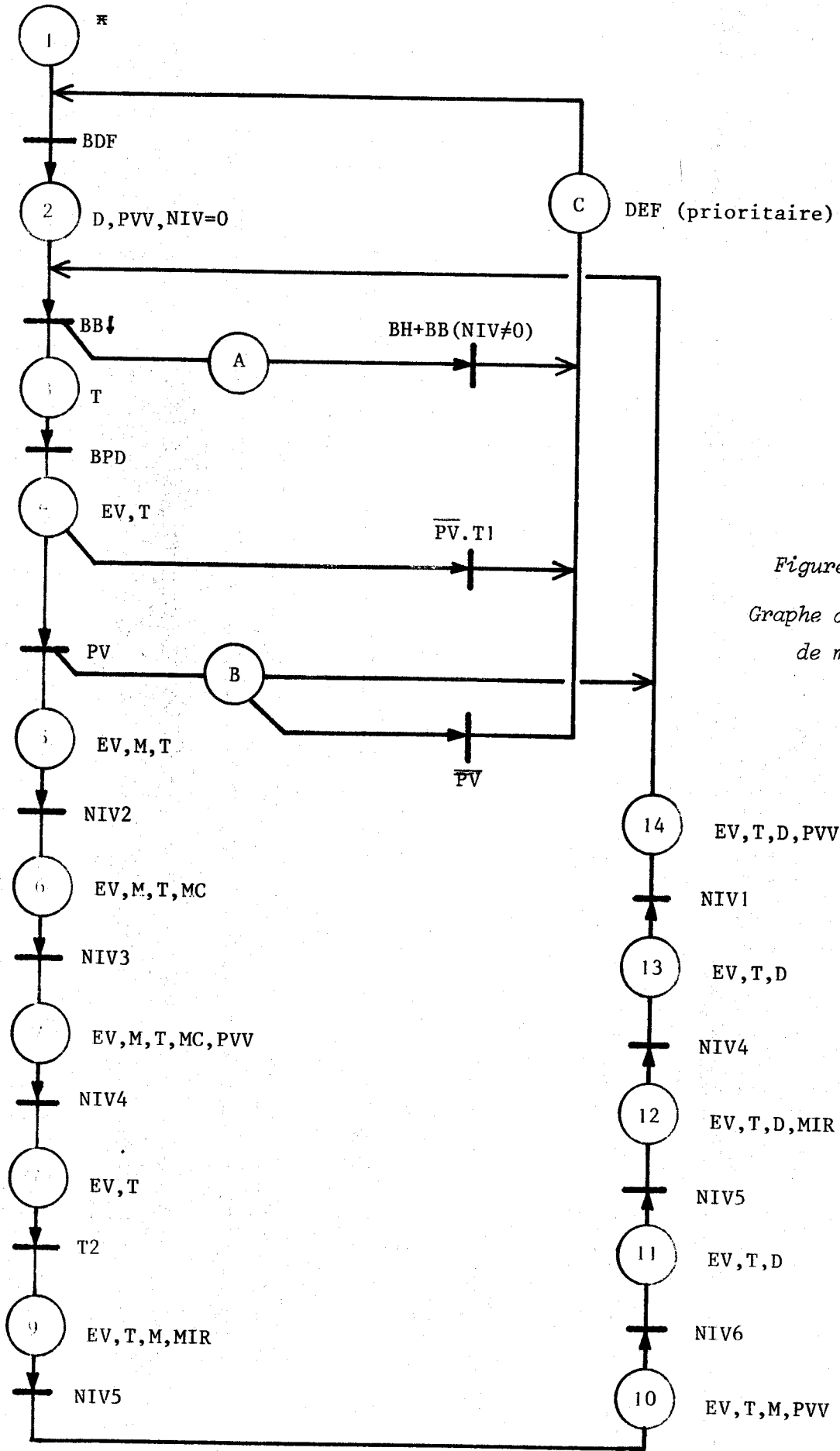


Figure III-4
 Graphe de la machine
 de mirage



De même les temporisations sont fixées extérieurement pour ajuster au mieux le temps de centrifugation et de repos à la nature du liquide.

Il est à noter qu'une seule étape est active dans le graphe, mis à part les étapes A et B qui correspondent à l'activation des sécurités de l'automatisme.

L'étape C joue un rôle particulier de par son caractère prioritaire : son activation (en cas de fonctionnement anormal), provoque la désactivation de tout autre étape, ce qui a pour conséquence indirecte d'arrêter toute action. La machine ne peut être relancée qu'après intervention, le cycle débutant par la mise en condition initiale.

La description de l'évolution de cette machine nous a permis de résumer sur la figure III-4 la majorité des spécifications que nous avons évoquées au cours de cette étude du cahier des charges.

C'est à partir des éléments de ce graphe que nous étudierons le contrôleur capable d'assurer le fonctionnement de la machine.

III.2. Etude et réalisation d'un contrôleur

La fonction du contrôleur est de réaliser matériellement le "programme" à suivre de la machine, tel qu'il vient d'être décrit. Il doit donc être capable d'assurer toutes les tâches nécessaires au fonctionnement de la machine, sachant que les développements ultérieurs de ce travail peuvent conduire à des modifications. C'est pourquoi, cet automate est du type programmable, réalisé autour d'un microprocesseur d'un modèle quelconque à priori afin de respecter ainsi les exigences de souplesse et de modularité demandées à la réalisation.

III.2.1. Caractéristiques du contrôleur

Les différentes tâches que le contrôleur doit réaliser dans l'application sont les suivantes :

- acquisition des entrées logiques provenant des divers capteurs ;
- exécution de fonctions logiques ET, ou complément ;
- fonction de temporisation interne du système ;

- comptage d'impulsions, qui permettrait de supprimer le compteur d'impulsion donnant la position du vérin NIV ;
- affectation aux sorties des valeurs provenant d'un traitement logique ;
- possibilité de variables internes.

Ces diverses fonctions sont celles que l'on rencontre couramment sur un automate programmable. Les modèles disponibles actuellement sont peu adaptés au problème. Tout d'abord, leur capacité d'Entrées/Sorties est beaucoup trop forte pour l'application considérée ; de plus leur langage et leur structure permettent de traduire facilement les schémas à relais mais très lourdement les réseaux de Pétri(3). Se rabattre sur une réalisation câblée enlève toute souplesse à cet automate.

C'est pourquoi nous avons préféré réaliser l'automate programmé. Deux principes nous ont guidés lors de sa conception :

- La résolution de notre problème est facilitée si le graphe de fonctionnement de la machine peut être programmé directement sans passer par une phase de synthèse qui conduit à un ensemble d'équations combinatoires sans rapport direct avec le processus.
- Le microprocesseur, sous employé pour cette tâche, est utilisé pour d'autres travaux (traitement des images). Il convient toutefois de ne pas allonger démesurément le temps consacré au contrôle de l'automate. Au lieu de faire une exploration systématique des programmes, technique des automates actuels, seuls les points sensibles (ceux susceptibles d'évolution) sont examinés.

De ce fait, l'automate reste très proche du problème à traiter, tant par son utilisation que par son mode de travail interne. Ce caractère ainsi que sa réalisation sur la base d'un microprocesseur standard font qu'il est parfaitement possible d'envisager son utilisation dans une autre application.

III.2.2. Réalisation du contrôleur à partir d'un microprocesseur

Dans la réalisation de ce contrôleur, nous pouvons distinguer deux parties fondamentalement différentes : tout d'abord, il faut définir le support matériel de cette réalisation, c'est-à-dire le microprocesseur et ses éléments périphériques, puis décrire la technique de programmation qui a été adoptée.

a) Le "Hardware"

Devant l'évolution technologique rapide de ces dernières années, nous avons voulu que n'importe quel microprocesseur puisse servir de base à cet automate.

Nous sommes partis d'une structure très classique (figure III-5).

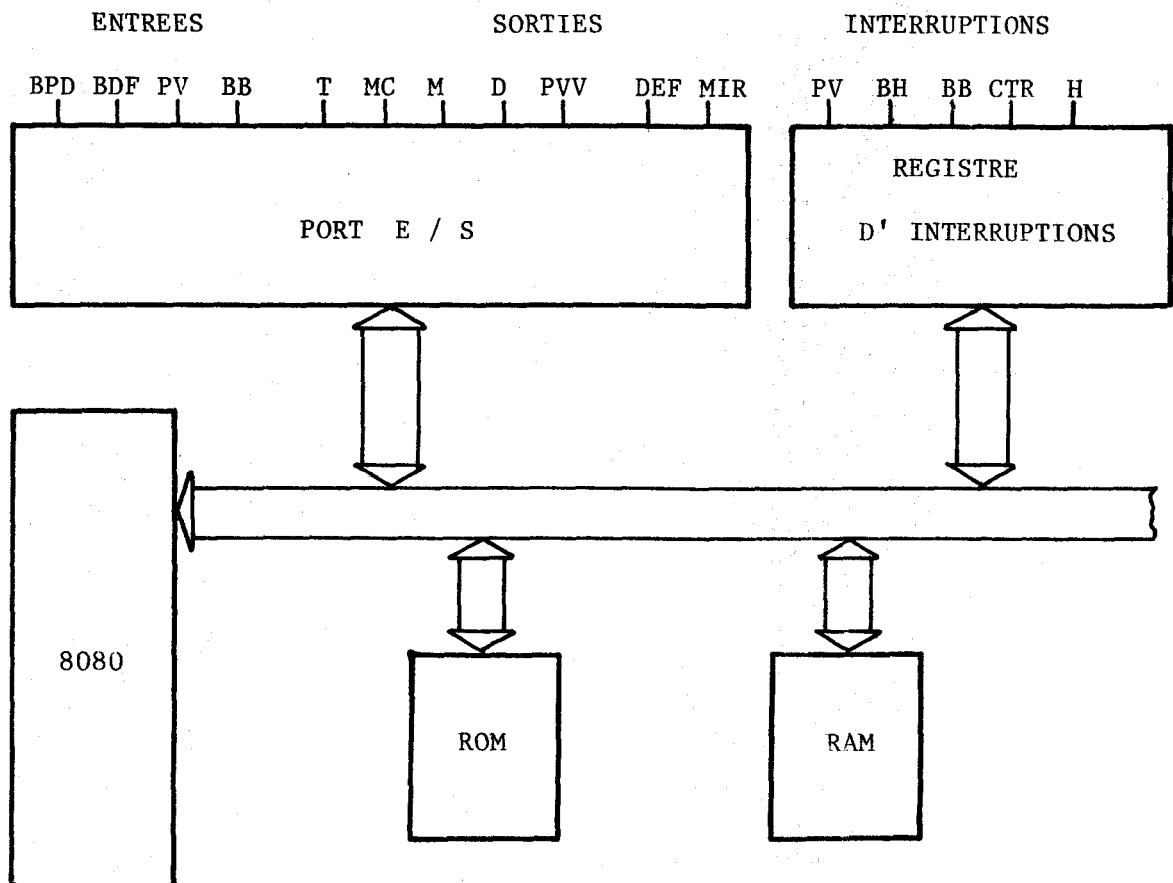


Figure III-5

Structure du microprocesseur utilisé en automate de contrôle

La particularité d'adaptation à notre problème réside au niveau de l'échange des informations avec l'extérieur que nous avons divisé en deux classes : les informations normales de fonctionnement de la machine transitent par un port entrée/sortie, c'est-à-dire sous contrôle du programme, alors que les informations relatives à la sécurité sont branchées en interruption du processeur. Ceci permet de traduire au niveau même du câblage leur action prioritaire sur le programme principal. Par le biais du masquage des interruptions, il est possible de simuler les places A et B du graphe du système (page qui correspondent à l'activation des sécurités. De ce fait, le graphe se ramène à un graphe d'état où une seule place à la fois est activée dans le fonctionnement normal de la machine, ce qui simplifie la programmation.

Nous profitons des possibilités offertes par le registre d'interruption pour gérer le comptage des impulsions du capteur de vérin, ce qui supprime le compteur extérieur donnant l'information NIV.

Le signal H joue un rôle particulier dans cette réalisation : cette horloge externe a pour fonction essentielle de rappeler périodiquement le programme "Automate", le microprocesseur traitant d'autres problèmes entre temps.

La mémoire reprogrammable PROM contient le programme d'évolution de l'automate, tandis que la mémoire vive RAM, non spécialisée, permet de stocker les variables de toute nature : compteurs, temporisations, variables internes, position de la place activée dans le graphe... ceci sans limitation de dimension.

Cette structure pouvant se trouver sur un calculateur quelconque, nous voyons qu'il est possible de l'appliquer à un problème plus vaste sans équipements particuliers autres que des ports Entrée/Sortie. Un microcalculateur monocarte, type SBC 80/20 dispose de tous les éléments que nous venons d'énumérer et serait donc utilisable sans aucun travail de "Hardware". C'est l'un des intérêts de la solution présentée .

b) Le "Software"

La programmation se divise en deux parties essentielles. Tout d'abord celle que l'utilisateur de l'automate ne voit pas, qui permet de transformer le microprocesseur en automate et ce que l'utilisateur doit programmer, à priori avec un langage simple, pour traduire le graphe du système.

De façon générale, un graphe d'état est une succession de places et de transition (figure III-6).

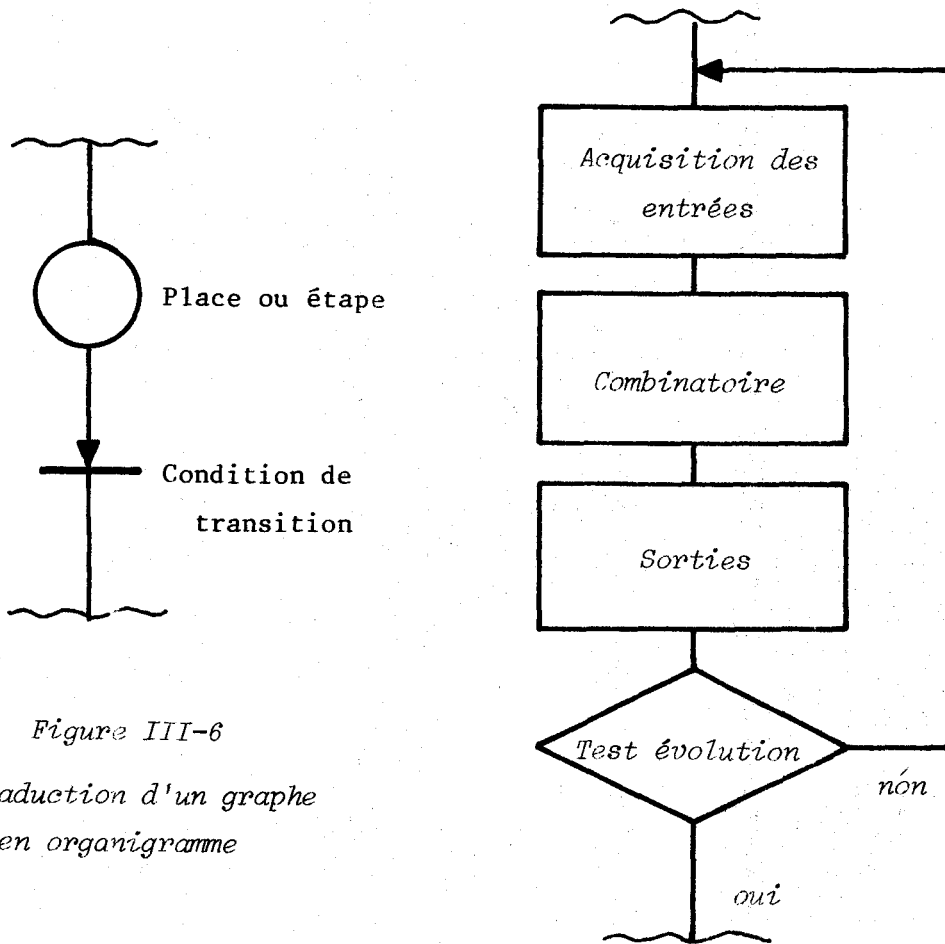


Figure III-6
Traduction d'un graphe
en organigramme

La traduction en langage informatique se fait sans difficulté (4). Une telle stratégie de travail a pour inconvénient de bloquer le calculateur sur cette tâche et de ne pas être applicable à un graphe à marquage multiple. Nous pouvons adapter cet organigramme à ce que nous recherchons : le traitement en temps partagé.

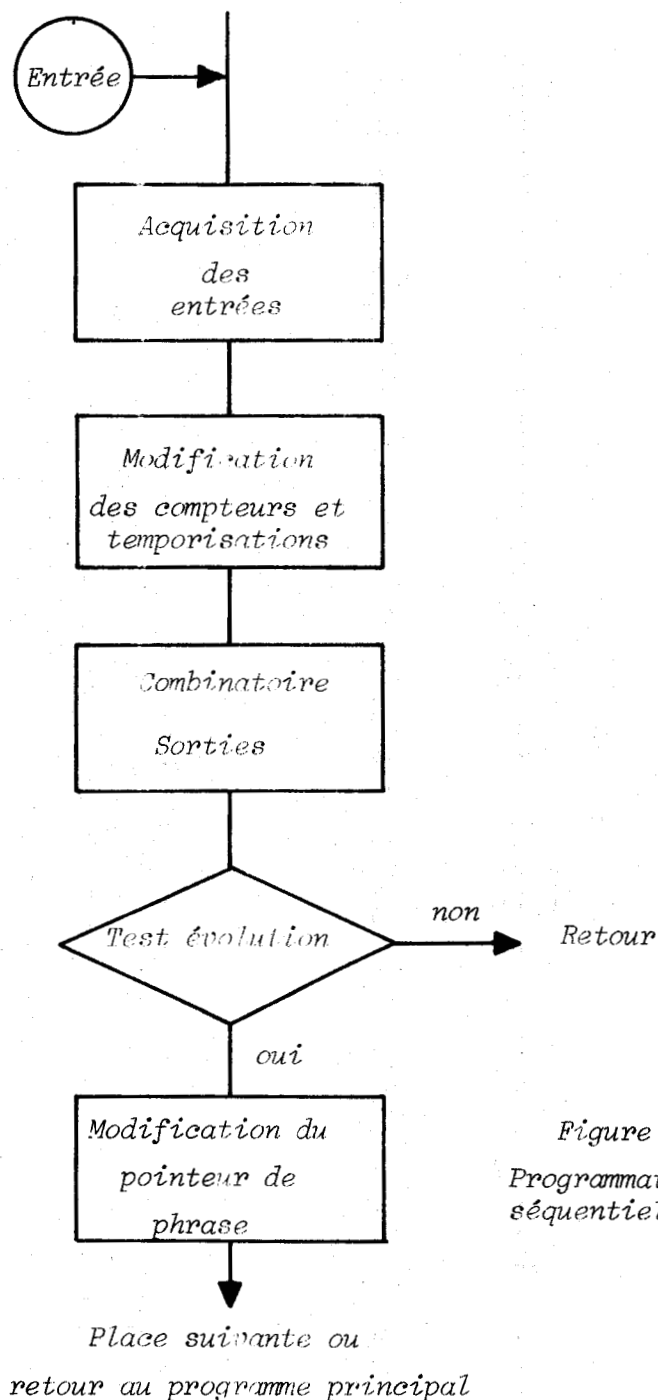


Figure III-7
Programmation d'un automate séquentiel sur calculateur



Nous considérons que le graphe traduit en organigramme est un sous-programme à entrée et sortie variables. L'appel de ce sous programme se fait grâce à l'interruption de l'horloge H. Nous avons donc un traitement cyclique du programme. Lors d'une interruption de l'unité centrale par H, le sous-programme "automate" est lancé au point d'entrée conservé en mémoire à cet effet. Le traitement des entrées et sorties est effectué, puis le test qui peut conduire à un résultat négatif. Dans ce cas, il y a retour au programme principal (traitement des images) sans modificateur du point d'entrée. Il en résulte que lors de l'appel suivant de l'horloge, il y a, de nouveau, acquisition des entrées et calcul des sorties. Nous pouvons ainsi traiter les problèmes où les sorties sont fonction des entrées et de l'état du processus (machine de Moore) ; le nombre d'états, donc de places est ainsi réduit fortement dans ce type de machine. Lorsque le test d'évolution est positif, il y a modification du point d'entrée de sous-programme et traitement de la place suivante, ou bien retour au programme principal. Ceci permet de corriger facilement un graphe dans lequel on désire rajouter une ou plusieurs places.

Les temporisations se traitent sans difficulté : l'intervalle de scrutation du graphe étant fixé par l'horloge H, une temporisation se fait par un simple compteur (case mémoire) que l'on décrémente à chaque passage. La fin de temporisation est signalée par le passage à zéro du compteur.

Cette technique peut être appliquée à une machine dont le fonctionnement se ramène à un ensemble de graphes d'états ; à chaque impulsion d'horloge, il y aura autant d'appel de sous-programmes que de graphes marqués. L'application à un graphe à marquage multiple devient plus délicate : en plus de la table des places marquées, il faut prévoir une pile annexe permettant le stockage temporaire des places à marquer, et une pile de démarquage.

Le traitement du graphe que nous venons d'exposer est de ce fait "intelligent" : il ne traite que la place activée, ou la suite de places en cas de transitions successives. Il prend donc le minimum de temps. Chaque place peut être aisément modifiée, implantée là où on le désire en mémoire, sans respecter l'ordre du graphe à priori.

c) Utilisation

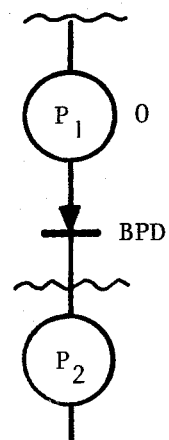
Après avoir mis en forme le cahier des charges et obtenu le graphe du système, l'utilisateur doit programmer le problème sur l'automate. Sa tâche est facilitée si le langage de l'automate est très proche de la conception.

Un langage évolué doit pouvoir traduire les éléments du graphe : place, actions même conditionnelles, compteurs, temporisations, conditions d'évolution et places à marquer en cas d'évolution. Généralement, ces éléments sont regroupés en une phrase standard, que l'on rentre dans l'automate par une console spécialisée.

Une telle évolution n'est pas nécessaire dans notre application, étant donné que son ampleur est très limitée. La programmation se fait directement en langage machine, mais en respectant la phrase de base (fig. III-7) par nature même de la méthode de traitement que nous avons retenue.

Les exemples suivants illustrent les diverses instructions sur 8080 Intel qui sont employées pour les fonctions de l'automate.

<u>EX 1</u> :	MVIA "0" OUT PORTA IN PORTB ANI PB ₂ RZ LXI H "P2" SHLD PAUTO RET	Affectation des valeurs en sortie Acquisition des entrées Test sur le bit 2 (BPD) Modifier le pointeur de place (PAUTO)
---------------	---	---



Dans cet exemple, les actions sont inconditionnelles ; il est sans importance de les exécuter avant ou après l'acquisition des sorties.

EX 2 : Traitement d'une temporisation

+ chargement du compteur (à effectuer avant de passer dans la boucle de temporisation)

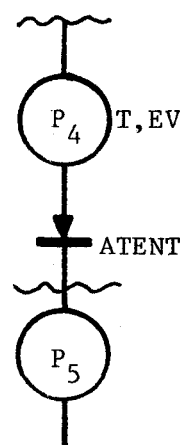
LDA "ATENT" Charger l'accumulateur du contenu de la mémoire
 STA "CTEMPS" ATENT et le transférer dans le compteur CTEMPS

+ boucle d'attente

MVIA "T, EV" Affectation des valeurs en sortie
 OUT PORTA

LXI H "CTEMPS" Décrémentation du compteur
 DCR M jusqu'à zéro
 RNZ

LXI H "P5" Modification du pointeur de
 SHLD "PAUTO" phrase PAUTO
 RET

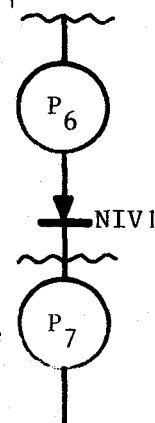


EX 3 : Transition sur paramètre extérieur

Ces transitions sont celles du type : compteur = valeur fixée
 Le compteur (mémoire) est noté CTRA et la valeur NIV1

LXI H "CTRA" Pointer le compteur
 LDA "NIV1" Charger l'accumulateur de la
 CMPM valeur de NIV1
 RNC Comparer

LXI H "P7" Modification du pointeur de phrase
 SHLD "PAUTO" PAUTO



Ces trois exemples nous montrent que le graphe se transpose sans difficulté sur le microprocesseur. Les cas particuliers correspondant aux sécurités et à l'initialisation de l'automate se traitent tout aussi facilement, la différenciation se faisant au niveau de l'adresse d'implantation de la phrase (zones réservées aux interruptions).

En conclusion, l'utilisation d'un microprocesseur pour contrôler les évolutions de la machine s'avère très positif sur plusieurs points :

- il présente tous les avantages de l'automate programmable, c'est-à-dire souplesse de modification et mise en oeuvre aisée pour les problèmes de grande dimension ;
- sa programmation est très proche du graphe du système, donc de la pensée du concepteur, sans pour autant faire appel à une console de programmation ;
- le modèle de microprocesseur est peu critique dans cette utilisation et sa configuration très standard.

Outre ces divers avantages, la structure du système que nous proposons permet d'utiliser le microprocesseur pour la recherche des particules à partir des images fournies par la matrice.

La troisième partie de ce chapitre décrit le système d'échange entre la matrice et le microprocesseur qui ne rentre pas dans le cadre général de l'automate mais dont le fonctionnement est activé au cours de l'analyse de l'ampoule par le système de balayage.

III.3. L'échange des informations entre la matrice et le microprocesseur

Le transfert, qui a lieu pendant les phases de mirage et de contre-mirage se fait sous contrôle de l'automate. C'est pourquoi, nous avons inclus son étude dans celle de la commande générale de la machine par microprocesseur.

Une brève étude du problème va montrer que le volume des informations à stocker doit être réduit et que le système doit être très rapide. Ceci conduira à la réalisation d'un échange par accès direct mémoire.

III.3.1. Contraction des informations

Les déviations sont captées par une matrice 8x8 suivie d'une mémoire tampon. A priori, nous devons transférer le contenu de cette mémoire dans celle du microprocesseur pour chaque image, c'est-à-dire toutes les 32 μ S environ lors d'une vitesse d'analyse maximale. De plus, le nombre total d'images obtenues pour un mirage complet est donné par le rapport (surface extérieure

de l'ampoule/surface du faisceau) ; il est de l'ordre de 10 000 environ pour les ampoules de grandes dimensions. Il nous faut donc disposer d'une mémoire de l'ordre de 80 k octets ce qui est considérable.

Il nous faut donc contracter les informations dans deux buts : diminuer le nombre d'échanges, donc le temps d'occupation du microprocesseur et diminuer la place mémoire occupée par le stockage des images.

L'étude expérimentale des images obtenues montre que peu d'images contiennent des déviations, les autres étant entièrement noires. Il est donc possible de superposer un certain nombre d'images sans pour autant obtenir une image entièrement blanche.

Si la superposition se fait pendant un certain temps, l'image obtenue correspond à celle d'une "tranche" de l'ampoule. Le nombre d'image est ainsi réduit, et de plus il n'est plus nécessaire de connaître la position géométrique exacte du faisceau par rapport à l'ampoule. Seule l'information de hauteur est utile ; or on possède déjà cette information par le biais du compteur NIV qui commande certaines fonctions de l'automate.

En résumé, il reste à conserver en mémoire une seule image par tranche d'ampoule qui correspond à la superposition de toutes les images élémentaires fournies par la matrice pendant cette période. La nature particulière des informations utiles aura une influence directe sur le mode d'échange matrice-mémoire du microprocesseur.

III.3.2. Les différents modes d'échange

Les deux techniques principales d'échange avec un calculateur sont :

- le mode type périphérique
- le mode type accès direct-mémoire (ADM)

En mode périphérique, l'échange se fait sous contrôle du calculateur par programme. Le calculateur doit donc faire l'entrée d'une ligne de la matrice, faire la superposition avec la ligne de l'image en cours de contraction et ranger cette nouvelle ligne en mémoire. Cette suite d'opérations doit être appliquée aux huit lignes de la matrice, pour chaque image fournie par cette dernière. Or les impératifs du capteur sont de travailler à une vitesse

de l'ordre de $32\mu\text{s}$. Il nous faut donc faire l'acquisition et le rangement en mémoire d'une image complète dans ce laps de temps. Ceci est impossible à réaliser avec un microprocesseur type 8080.

En mode accès direct mémoire, le calculateur ne fait que contrôler le lancement de l'échange, qui est effectué par une logique câblée. Ce type d'échange est beaucoup plus rapide, le calculateur ne sollicitant le périphérique pour en obtenir les informations. Il reste toutefois à faire la superposition après chaque échange ; le temps de calcul lié à cette opération est encore loin d'être négligeable.

Nous avons donc décidé de faire la superposition des images correspondant à une tranche de l'ampoule par un système logique extérieur au microprocesseur, l'échange se faisant toujours par accès direct. Cette solution a l'avantage de requérir le minimum de temps de blocage de l'unité centrale, ce qui permet d'éliminer toute saturation de temps traitement.

III.3.3. Réalisation de l'ADM

Le schéma d'ensemble du système d'échange est donné par la figure III-8. La structure de la mémoire tampon a été modifiée de façon à superposer les images, ce qui correspond à une opération logique "ou" entre la sortie et l'entrée de la mémoire. Le "ET" interposé dans la sortie permet d'effacer la mémoire ; en réalité, la liaison sortie-entrée est coupée, la mémoire prend donc la valeur issue du comparateur seule, c'est le début d'une nouvelle image contractée. Cette solution permet d'effacer la mémoire sans pour autant qu'il y ait absence de stockage pendant cette opération ; il en résulte qu'à aucun moment il n'y a de perte d'informations issues de la matrice.

Pour effectuer l'accès direct en mémoire, il faut fournir à la mémoire l'adresse de rangement et la valeur de la donnée. Des amplificateurs "3 états" assurent l'attaque des bus pendant que l'unité centrale est en "Hold" (gel). Un échange ADM se compose de huit écritures en mémoire, à l'adresse définie par le compteur de ligne pour la partie la plus basse de l'adresse et par les registres pour la partie la plus haute. Les registres fournissent donc l'adresse de début de l'image. Ils sont chargés par programme, ce qui permet de choisir la zone mémoire de stockage des images.

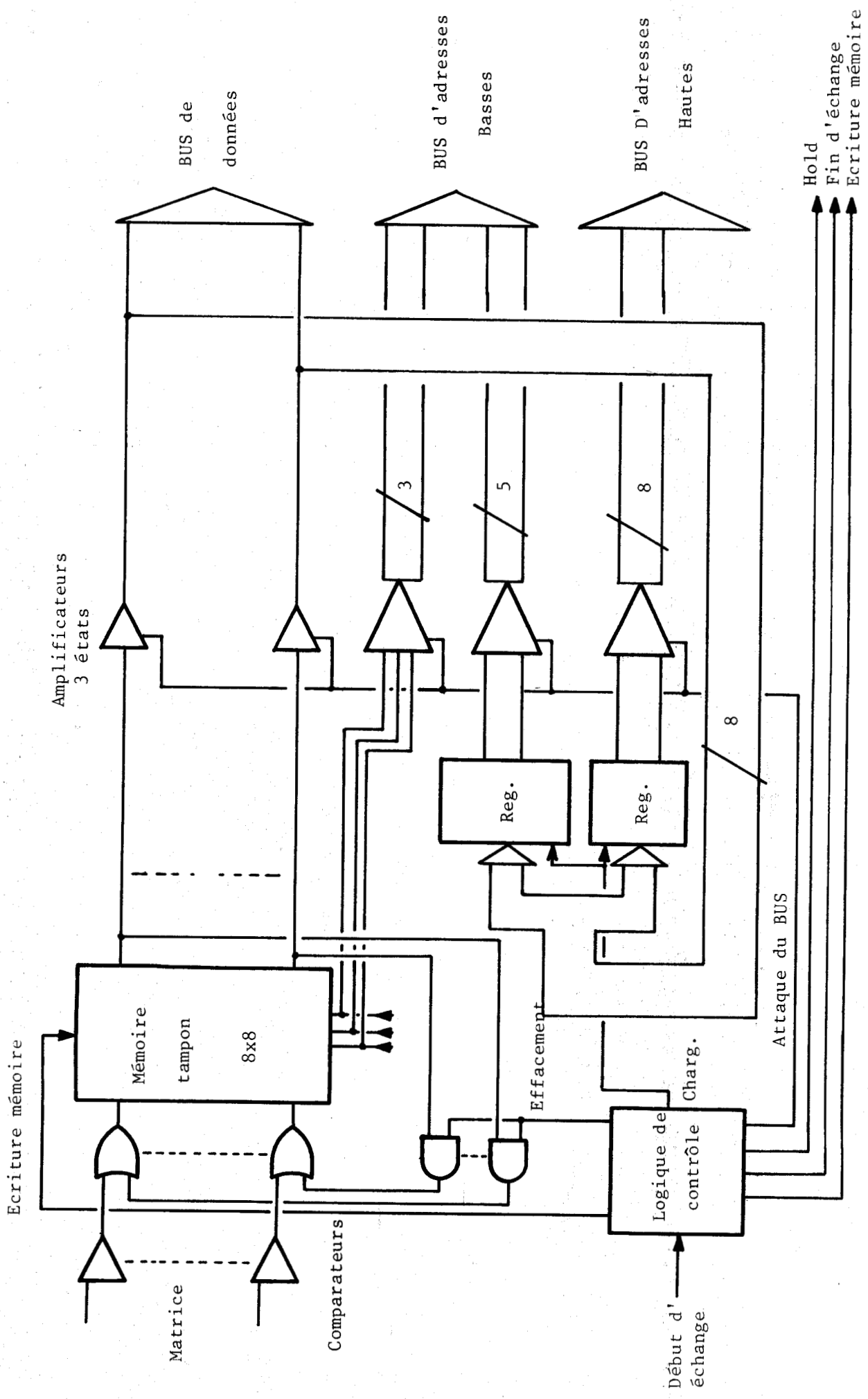


Figure III-8
Entrée des informations de la matrice par ADM



Le fonctionnement général de l'échange peut se résumer ainsi :

- le début d'échange se fait sur commande du capteur de niveau qui incrémente également le compteur NIV
- l'échange n'est déclenché que si on est dans une phase d'analyse (MIR = 1)
- le signal de Départ d'Echange est donné à l'ADM, ce qui a pour effet de geler le microprocesseur
- l'ADM charge en mémoire les huit lignes de l'image contractée et rend la main au microprocesseur
- l'ADM efface la mémoire tampon, pendant que le microprocesseur change les registres Adresse pour l'échange suivant
- reprise du programme qui a été interrompu par le signal NIV.

Le temps pris par l'échange est fonction directe de la vitesse de balayage de la matrice étant donné que l'horloge de cadencement de l'échange est celle de balayage ; il est donc de l'ordre de $32\mu\text{S}$, vitesse que nous avons retenue pour nos essais.

Pour un nombre d'images contractées de l'ordre d'une centaine, ceci conduit à un temps d'occupation de 5mS alors que la phase d'analyse dure une seconde ; ce temps est donc négligeable.

La solution que nous venons de présenter pour le dispositif d'échange conserve donc les spécifications générales de réalisation de cette machine : fiabilité, en éliminant tout risque de perte d'information, efficacité, par une vitesse de travail élevée tout en utilisant des solutions simples (monoprocasseur).

III.4. Conclusion

L'utilisation d'un microprocesseur pour les diverses tâches relatives au fonctionnement de cette machine s'avère très efficace. Tout d'abord nous disposons de ce fait de tous les avantages d'un système programmé : possibilité de modification et d'évolution, souplesse de conception. De plus, les solutions auxquelles nous avons fait appel n'utilisent pas de propriétés spécifiques à un modèle donné de microprocesseur, laissant donc libre choix au modèle. Enfin, le fonctionnement complet est assuré par un seul microproces-

seur, avec indépendance relative des tâches. La réalisation se trouve donc simplifiée au maximum, d'où une meilleure fiabilité pour un moindre coût.

Le même microprocesseur va servir de calculateur de traitement. En effet, après un cycle complet d'analyse, nous disposons des images relatives au mirage et au contre-mirage. La distinction entre les raies de l'ampoule et les particules du liquide se fait par comparaison entre mirage et contre-mirage. Cette tâche, que nous étudierons au cours du chapitre suivant, sera confiée au microprocesseur, justification supplémentaire du choix que nous avons effectué.

CHAPITRE QUATRE

---oo0oo---

RECONNAISSANCE DES

PARTICULES

CHAPITRE QUATRE

RECONNAISSANCE DES PARTICULES

INTRODUCTION

Nous avons étudié dans les deux chapitres précédents les éléments qui entrent dans la réalisation pratique de la machine de mirage et qui forment un capteur au sens large du terme. La sortie de ce capteur se compose de deux séries d'images binaires de 8 x 8 points provenant du mirage et du contre mirage de l'ampoule.

Le problème que nous abordons dans ce chapitre peut être illustré par l'exemple suivant :

- soient deux images, correspondant à la même zone d'analyse de l'ampoule, telles qu'elles sont fournies par le microprocesseur.

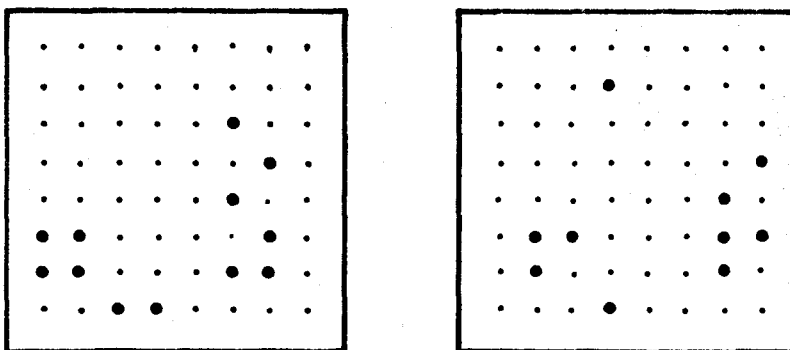


Figure IV-1

Exemple d'images du
mirage et du contre-
mirage.

Les deux images sont-elles identiques, c'est-à-dire correspondent-elles à la même déviation lumineuse ou non ? - C'est la question à laquelle nous tentons de répondre dans ce chapitre. Une réponse positive nous permettrait de conclure

à la présence d'une raie, alors que le cas inverse mettrait en évidence une particule.

Pour parvenir à ce résultat, les points essentiels de notre démarche sont les suivants :

- a) - Recherche du seuil optimal de conversion digitale des images, à partir de leur étude statistique, en vue d'obtenir la meilleure qualité possible de prise d'information.
- b) - Etude des diverses méthodes classiques pour effectuer la comparaison entre mirage et contre-mirage, et sélection de la méthode la plus adaptée à notre étude.
- c) - Approche théorique de la corrélation d'image dans le cas discret, conduisant à une évaluation des risques d'erreurs de reconnaissance.

IV.1 - RECHERCHE DU SEUIL OPTIMAL DE DETECTIONIV.1.1 - Probabilité d'éclairement

Au cours de l'analyse de l'ampoule, l'essentiel des déviations enregistrées correspond aux raies de la surface de l'ampoule ; de plus, le nombre d'ampoules contenant des impuretés est faible (2 à 3 % couramment). Vis-à-vis de la recherche des particules, nous pouvons dire que les raies représentent un bruit par rapport aux particules.

Pour caractériser la loi probabiliste de l'éclairement d'un point x_{ij} de la matrice, nous pouvons poser à priori les hypothèses suivantes :

- * $p [\text{éclairement}] \geq 0$ par définition
- * $p [e = 0] = 0$ il existe en effet toujours une faible déviation partielle du faisceau, ne serait-ce que par diffusion
- * $p [e = \text{intensité de la source}] = 0$ il n'y a en effet aucune chance que le faisceau d'analyse soit complètement dévié sur un élément

Il en résulte que $p(e)$ doit physiquement suivre une loi en cloche ; devant la nature du phénomène, il est raisonnable d'approximer cette loi par une courbe gaussienne (fig. IV.2), bien que ceci ne soit pas valable pour les petites valeurs de $p(e)$.

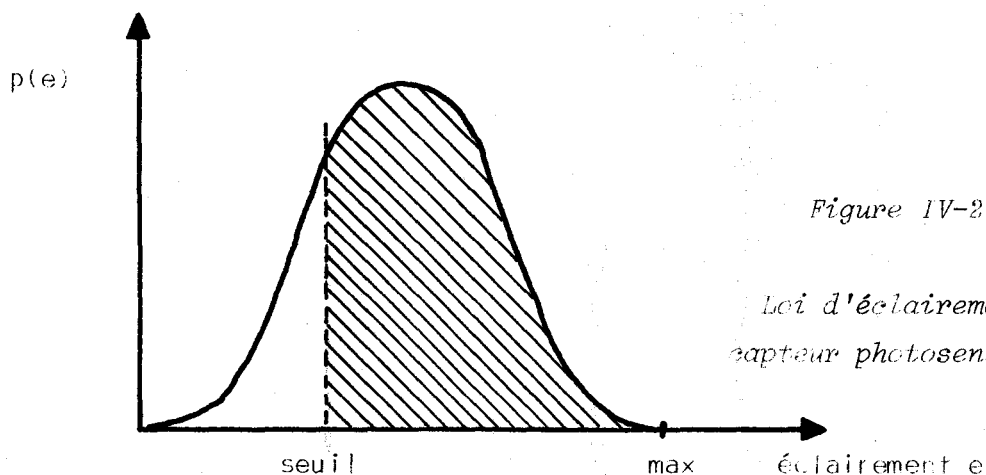


Figure IV-2
Loi d'éclairement du capteur photosensible

IV.1.2 - Seuil optimal

Le problème consiste à déterminer le seuil optimal S du comparateur qui convertit l'information lumineuse reçue par chaque point de la matrice en information digitale. Aussi, une mauvaise adaptation de ce seuil peut conduire à un fonctionnement défectueux de la machine.

En effet, si le seuil est placé trop haut, les informations lumineuses des petites particules sont notées "0", c'est-à-dire comme l'absence de déviation et il ne peut y avoir détection des petites particules dans ces conditions. Si le seuil est réglé trop bas, nous observons un phénomène de masquage des informations des particules par celles des raies qui sont les plus nombreuses statistiquement. L'approche théorique de ce problème permet de déterminer le seuil optimal, c'est-à-dire celui pour lequel nous obtenons le minimum de masquage.

Nous venons de voir que la densité d'éclairement relatif aux raies s'écrit :

$$P(e_r) = \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(e_r - \mu_r)^2}{2 \sigma_r^2}}$$

Nous pouvons écrire la même relation pour les particules, soit μ_p la moyenne de l'éclairement due aux particules et σ_p son écart-type :

$$P(e_p) = \frac{1}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(e_p - \mu_p)^2}{2 \sigma_p^2}}$$

Nous pouvons dire qu'il y a risque d'erreur lorsque l'éclairement dû à une particule est en dessous du seuil ou bien lorsque l'éclairement des raies est au dessus du seuil (risque de masquage d'une petite particule).

$$P_{\text{erreur}} = P_p \cdot \text{prob}(e_p < S) + P_r \cdot \text{prob}(e_r > S)$$

P_p et P_r étant respectivement les probabilités à priori de présence d'une particule et d'une raie (supposées indépendantes).

Le calcul du minimum se mène d'une façon analogue à celle proposée par GONZALEZ (1).

$$P(\text{erreur}) = P_p \int_0^S p(e_p) de + P_r \int_s^{\text{max}} p(e_r) de$$

Le minimum sera obtenu pour $\frac{\partial Pe}{\partial S} = 0$ (en dérivant suivant le théorème de LEIBNITZ).

$$\frac{\partial Pe}{\partial S} = P_p [p(e_p)]_{e=S} - P_r [p(e_r)]_{e=S}$$

ce qui donne :

$$P_r [p(e_r)]_{e=S} = P_p [p(e_p)]_{e=S}$$

En appliquant ce résultat à des densités gaussiennes, nous obtenons après simplification une équation de la forme :

$$AS^2 + BS + C = 0$$

avec :

$$A = \sigma_p^2 - \sigma_r^2$$

$$B = 2(\mu_p \sigma_r^2 - \mu_r \sigma_p^2)$$

$$C = \mu_r^2 \sigma_p^2 - \mu_p^2 \sigma_r^2 + 2\sigma_r^2 \sigma_p^2 \text{Log}\left(\frac{P_p \sigma_p}{P_r \sigma_r}\right)$$

La résolution de cette équation demande la connaissance des moyennes et écarts-types des densités de probabilité des raies et des particules.

Des simplifications peuvent être effectuées en posant quelques hypothèses supplémentaires :

- tout d'abord, les phénomènes de déviation par une particule et de déviation par une raie présentent des caractéristiques physiques voisines. On peut donc supposer qu'en particulier les écarts-types de l'intensité des raies et des particules sont du même ordre de grandeur.

Ceci nous conduit à n'avoir qu'une seule solution pour S.

$$S = \frac{\mu_p + \mu_r}{2} + \frac{\sigma^2}{\mu_p - \mu_r} \text{Log} \left[\frac{P_p}{P_r} \right]$$

Si nous admettons qu'il a presque toujours une raie au même endroit qu'une particule, nous obtenons :

$$S = \frac{\mu_p + \mu_r}{2}$$

- l'hypothèse de l'identité des caractéristiques des raies et des particules peut être étendue à la moyenne des éclairements reçus par la matrice. Il en résulte que :

$$S = \mu \text{ éclairement}$$

Il n'y a plus lieu, dans ces conditions, de distinguer l'origine de la déviation pour déterminer le seuil optimal.

IV.1.3 - Conséquences

L'approche théorique que nous venons de mener, conduit à une valeur optimale du seuil de conversion dont la détermination n'est qu'approximative.

Le choix que nous avons fait de convertir les images en binaire entraîne une première conséquence au niveau de chaque point de la matrice :

- si nous supposons que $S \approx \mu_r \approx \mu_p$, 50 % des déviations dues aux particules sont inférieures au seuil, ce qui veut dire qu'elles sont notées "0", équivalent à l'absence de particules. Il en est de même pour les raies, bien que le phénomène ne présente pas d'inconvénient a priori. Il ne faut pas pour autant en déduire que la machine risque de ne pas détecter 50 % des particules. Ce que nous venons d'affirmer est valable au niveau de chaque point de la matrice. Or un faisceau dévié peut frapper plusieurs points de la matrice, dont certains avec un niveau d'éclairement supérieur au seuil de quantification. La présence de la déviation est donc bien notée par ces derniers points.

Il en résulte une conséquence importante pour la suite de nos travaux :

- l'image binaire d'une raie ou d'une particule ne reproduit pas directement la forme générale de la déviation ; elle ne fait que la schématiser,

les parties ou points de niveau inférieur au seuil étant absentes dans l'image donnée par la matrice.

En conclusion, nous pouvons dire que la valeur optimale du seuil analogique nous permet d'obtenir les meilleures images numériques des déviations, mais que les images ne peuvent être considérées comme la reproduction parfaite des déviations. Ce dernier élément est déterminant dans le choix de la méthode de comparaison du mirage et du contre-mirage.

IV.2 - LES METHODES DE COMPARAISON D'IMAGES

L'un des buts recherchés par les méthodes de reconnaissance des formes est de pouvoir mesurer la ressemblance ou l'identité entre deux images. Les méthodes visant à établir une classification des images ne peuvent être appliquées à notre problème et c'est pourquoi nous nous orientons vers les méthodes de reconnaissance directe des images.

IV.2.1 - Les méthodes de classification des formes

Les méthodes de reconnaissance permettent généralement d'obtenir une classification des formes observées. Dans notre cas par exemple, nous pouvons classer les images en deux catégories : images avec particules et images sans particules. Pour parvenir à ce résultat, on définit généralement un ensemble de caractéristiques pour les formes, et une distance entre les images observées et les formes de référence de chaque classe. Le choix des caractéristiques est souvent guidé par une optimisation de la séparation entre classe. La classification elle-même est fréquemment probabiliste ; nous pouvons citer les stratégies de BAEYES, du maximum de vraisemblance, du plus proche voisin, de MAHALANOBIS qui utilise une distance probabiliste.

Toutes ces techniques font appel à une connaissance à priori du système, en particulier des probabilités d'apparition de chaque classe, la valeur moyenne de chaque caractéristique dans la classe considérée, etc...

Le problème étudié ne présente aucun des caractères nécessaires à ces stratégies. Rien ne permet de différencier physiquement la déviation due à une raie de celle due à une particule, encore moins de préciser une caractéristique de ces formes : le niveau d'éclairement est le même, la position géométrique aléatoire, la dimension de la déviation ne dépend que de la taille de la particule. Le seul renseignement que nous possédons est l'éclairement moyen de chaque point de la matrice, qui est une information locale et non de forme.

Il en résulte que la classification des images par de telles méthodes n'est pas possible.

Nous devons donc nous limiter aux méthodes de reconnaissance directe, ne possédant comme information que le couple d'images du mirage et du contre-mirage. La reconnaissance directe se fait généralement à partir de la fonction de corrélation entre les deux images, dont nous allons étudier les propriétés et avantages dans le paragraphe suivant.

IV.2.2 - Les méthodes de reconnaissance directe

Les méthodes de reconnaissance directe peuvent se classer en deux grands groupes :

- celles qui mesurent la ressemblance entre deux images, dont la base est souvent la corrélation
- celles qui mesurent l'écart entre deux images ; nous pouvons citer la distance euclidienne et l'algorithme de détection séquentielle de similarité (S.S.D.A).

De nombreux auteurs ont déjà étudié ces méthodes (1) à (8).

a) - Corrélation

On considère qu'une image I est caractérisée par sa fonction d'intensité lumineuse (x, y)

Dans le cas général, la fonction de corrélation entre deux images I_1 et I_2 caractérisées par les fonctions d'intensité $I_1(x, y)$ et $I_2(x, y)$ s'exprime :

$$R(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_1(x, y) \times I_2(x - a, y - b) dx dy$$

a et b sont les paramètres d'une translation plane entre les deux images. $R(a, b)$ présente l'inconvénient de dépendre directement des niveaux moyens d'intensité de chacune des images. Il est possible de normaliser la fonction de corrélation en la divisant par l'énergie de chacune des images.

$$r(a, b) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_1(x, y) I_2(x - a, y - b) dx dy}{\left[\iint I_1^2(x, y) dx dy \right]^{1/2} \left[\iint I_2^2(x - a, y - b) dx dy \right]^{1/2}}$$

Si pour la translation (\hat{a}, \hat{b}) , les deux images sont parfaitement superposables, on obtient $r(\hat{a}, \hat{b}) = 1$. Dans tous les autres cas $0 \leq r(a, b) \leq 1$ pour les valeurs de $I \geq 0$.

Ce coefficient traduit donc la ressemblance entre les images, en présentant un maximum pour la meilleure concordance. Toutefois certains types d'images pouvant donner des pics de corrélation ne correspondant pas à une bonne ressemblance au sens visuel, aussi, ce phénomène limite l'utilisation de la corrélation.

Son principal avantage est d'être très peu sensible à la présence de bruit. C'est pourquoi elle peut donner de bons résultats dans notre cas, où la discrétisation de l'intensité lumineuse introduit un bruit de quantification important.

- Discrétisation spatiale

Dans notre cas, les images sont définies à partir de points discrets (les phototransistors de la matrice) et la définition s'étend facilement à ce cas.

$$r(p, q) = \frac{\sum_{m=1}^K \sum_{n=1}^L f_1(m, n) f_2(m - p, n - q)}{\left[\sum_{m=1}^K \sum_{n=1}^L f_1^2(m, n) \right]^{1/2} \left[\sum_{m=1}^K \sum_{n=1}^L f_2^2(m - p, n - q) \right]^{1/2}}$$

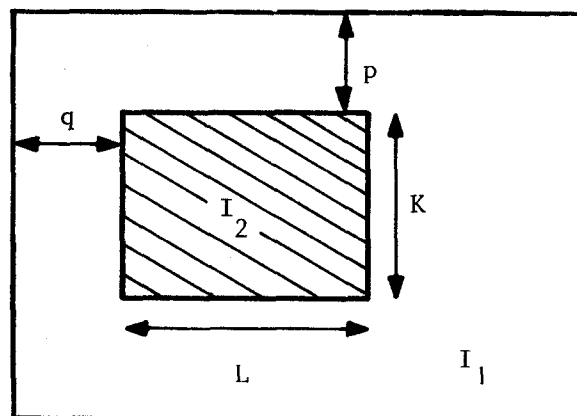


Figure IV.3

Il est bien évident que la taille des images est limitée et que l'image I_2 que l'on désire comparer à une portion de I_1 doit être incluse dans I_1 pour que le calcul soit possible. Dans le cas où I_2 sortirait du cadre de I_1 , il suffirait de prendre la zone commune comme aire de référence.

- Discrétisation des niveaux d'intensité

Nous avons choisi le quantifieur suivant :

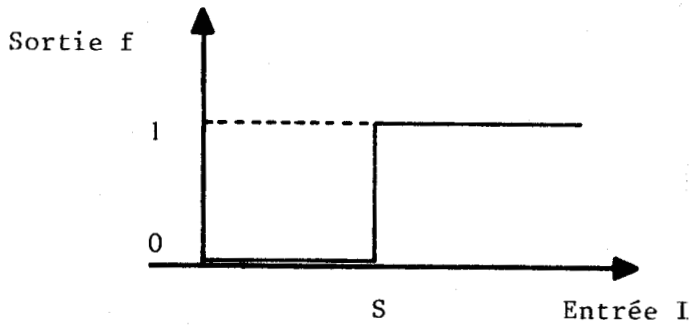


Figure IV-4

Quantifieur de l'intensité lumineuse

Avec un tel corrélateur, le produit $f_1 \cdot f_2$ ne peut prendre que la valeur 0 ou 1. (Fig. IV.5.(a)) :

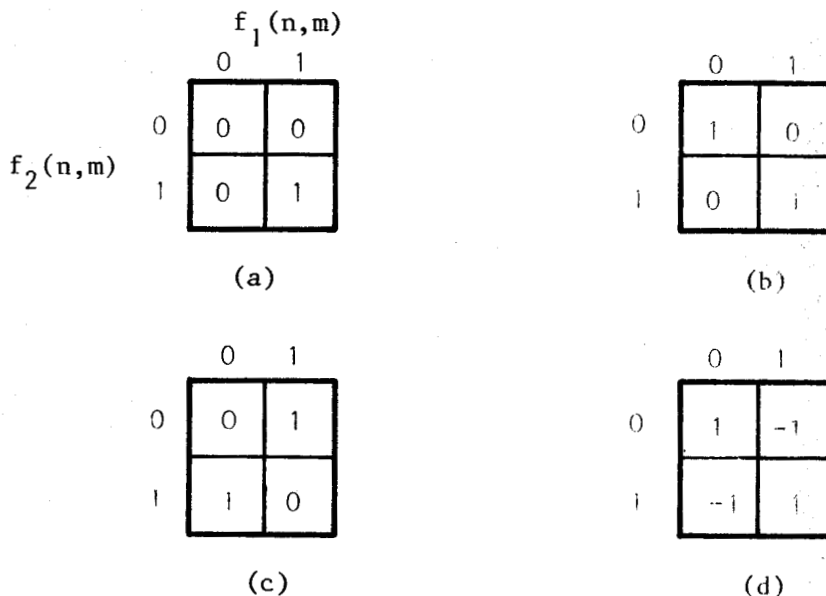


Figure IV-5

Fonctions de corrélation

On peut remarquer que le couple (0, 0) qui correspond à 2 points identiques noirs donne 0 comme produit de corrélation. Ce phénomène est dû essentiellement aux valeurs adoptées pour le codage des deux niveaux d'intensité lumineuse. On peut éliminer cet inconvénient en définissant un produit de corrélation différent (Fig. IV.5.(b)), ou bien en modifiant le codage des niveaux (-1 et +1 par exemple). Ce corrélateur est beaucoup plus intéressant car la normalisation de $R(p, q)$ se ramène au coefficient constant $1/KL$, ce qui simplifie considérablement les calculs pour obtenir $r(p, q)$.

b) - Distance Euclidienne

Une image digitalisée spatialement peut être considérée comme un vecteur colonne de dimension $K.L$.

Dans ces conditions, on peut définir la distance (Euclidienne par exemple) entre deux vecteurs représentatifs d'images à comparer :

$$d = \left\{ \sum_{m=1}^K \sum_{n=1}^L \left[I_1(m, n) - I_2(m, n) \right]^2 \right\}^{1/2}$$

d traduit la dissemblance entre deux images ; cette grandeur n'est pas normée ce qui peut poser des difficultés pour se servir de d comme mesure de la dissemblance. De manière analogue à la corrélation, il est possible d'introduire une translation (p, q) en vue de déterminer la position optimale donnant la meilleure ressemblance (minimum de d).

On remarque que la distance élémentaire entre deux points d'images binaires (Fig. IV.5.(b)) n'est rien d'autre que le complément de la corrélation. Il en résulte que le reproche de sensibilité au bruit que l'on fait souvent à la distance Euclidienne est éliminé dans le cas d'application. La sensibilité est la même que celle de la corrélation. Les résultats obtenus par cette méthode seront donc identiques en tous points à ceux de la corrélation ; c'est pourquoi nous n'avons pas envisagé l'utilisation de cette méthode sur notre machine de mirage.

c) - Algorithme de détection séquentielle

Le principe de travail est le même que pour la distance Euclidienne, avec une

une fonction de base plus simple.

$$D = \sum_{m=1}^K \sum_{n=1}^L |I_1(m, n) - I_2(m, n)|$$

Il est évident que dans le cas binaire, la fonction de base donne les mêmes résultats que pour la distance Euclidienne (Fig. IV.5.(c)) et que cette méthode ne donne pas d'information supplémentaire dans notre cas particulier.

En conclusion, nous remarquons que les diverses méthodes donnent des résultats équivalents pour la recherche des particules à partir de la machine conçue antérieurement. La corrélation, avec normalisation, donne une mesure de la ressemblance, alors que les autres méthodes fournissent simplement un résultat relatif entre deux images. C'est pourquoi la corrélation retient tout particulièrement notre attention et mérite une étude plus approfondie.

IV.3 - APPLICATION DE LA CORRELATION A LA RECHERCHE DES PARTICULES

Nous désirons identifier les images du mirage et du contre-mirage par couple. Pour obtenir ce résultat, on fait la corrélation des deux images de chaque couple. Soit r la valeur obtenue.

si $r > t$ on considère que les deux images sont identiques
si $r < t$ il y a présence d'une particule, ce qui conduit au
rejet de l'ampoule.

La valeur du seuil t peut être déterminée expérimentalement à partir d'une étude statistique de r pour des ampoules sans particules.

Toutefois, les choix technologiques que nous avons faits viennent perturber ce schéma de travail.

En effet, comme nous allons le montrer, la discrétisation spatiale des images ainsi que la traduction de l'intensité en deux niveaux tendent à diminuer la qualité de la reconnaissance par augmentation de la dispersion des valeurs de r . Le choix de la valeur de t devient plus difficile, allant même jusqu'à impossibilité de définir une valeur satisfaisante.

Pour mettre en évidence ces phénomènes, il convient de séparer les effets de la discrétisation spatiale et de la quantification des niveaux lumineux.

IV.3.1 - Discrétisation spatiale

L'image de la déviation du faisceau d'analyse est à priori une grandeur continue. Entre le mirage et le contre-mirage, les imprécisions mécaniques de l'ensemble peuvent provoquer un léger décalage de l'image par rapport à la matrice. La matrice échantillonne ces images à partir d'un élément de base caré, dans la mesure où on peut admettre que les éléments sensibles sont jointifs. Suivant la valeur du glissement et sa direction, les images résultantes peuvent être modifiées ou non. Ceci conduit à une dégradation de la fonction de corrélation.

Ce phénomène a été démontré par MILSON & RAO (7).

Rappelons brièvement les résultats qu'ils ont obtenus :

$$\text{Soit } g(a, b) = \int_0^y \int_0^x I(x, y) I(x - a, y - b) dx dy$$

La fonction d'autocorrélation continue d'une image I, ce qui est équivalent à la corrélation entre deux images parfaitement identiques ; elle permet de mettre en évidence les modifications apportées par l'échantillonnage spatial.

On peut montrer qu'au voisinage du pic de corrélation g^* obtenu pour la meilleure correspondance des images ($a = 0$ et $b = 0$), la fonction d'autocorrélation est symétrique et monotone décroissante. (Fig. IV.6)

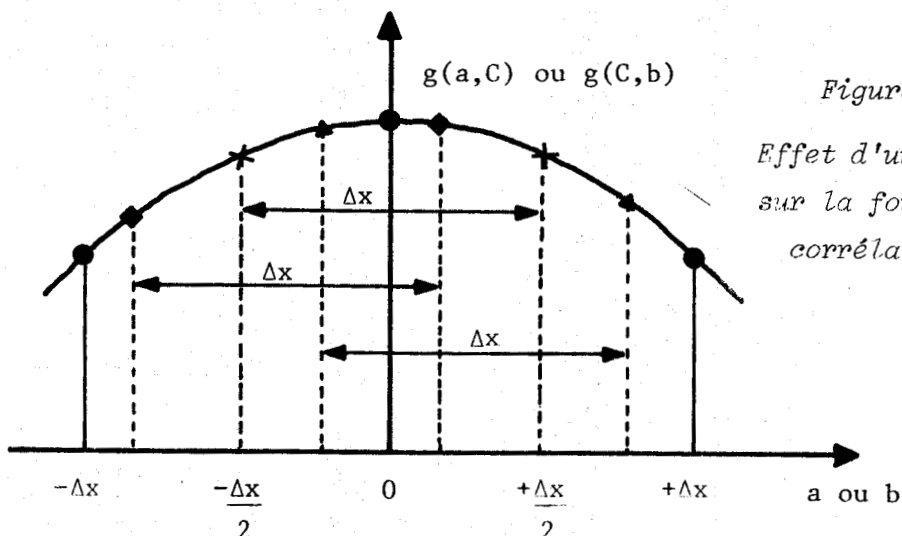


Figure IV-6

Effet d'un déplacement sur la fonction de corrélation

Soit $r(p, q)$ la fonction de corrélation discrète, définie au paragraphe IV.2.2. -a).

Si on suppose qu'il y a une translation (a, b) entre les deux images identiques, $r(p, q)$ ne peut être égal à g^* que si la translation (a, b) est égale à $(p \Delta x, q \Delta y)$. De façon générale, on a :

$$r(p, q) \leq g^*$$

Le cas le plus défavorable correspond à une translation $(\pm \frac{\Delta x}{2}, \pm \frac{\Delta y}{2})$ pour laquelle la valeur de r s'éloigne le plus de g^* .

On remarque de plus qu'il n'y a plus de valeur maximale pour $r(p, q)$ (voir Fig. IV.6), ce qui conduit à l'impossibilité de déterminer une correspondance optimale des images.

La discrétisation spatiale, qui est importante dans notre cas où le nombre de points d'échantillonnage est réduit, introduit donc une dégradation de la valeur du coefficient de corrélation même pour de faibles déplacements d'images.

IV.3.2 - Quantification des niveaux

Par la quantification de la quantité de lumière reçue à deux niveaux, nous avons vu que le coefficient de corrélation prend une forme simple (Paragraphe IV.2.2). Il est bien évident que cette simplification entraîne une dispersion plus forte du coefficient, ce qui risque de provoquer de fausses alarmes, ou des erreurs de reconnaissance.

L'approche de ce problème peut se faire de plusieurs façons, dont en particulier :

- évaluation directe de σ_r , dispersion du coefficient de corrélation
- évaluation des risques d'erreur de reconnaissance.

a) - Détermination de σ_r

Nous pouvons reprendre les calculs de BOLAND (2) en les transposant.

Pour des images non corrélées, on obtient :

$$\mu_r = 0,5$$

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{4N} \quad N \text{ étant le nombre de points de la matrice.}$$

Dans notre application, $N = 64 \rightarrow \sigma_r = \frac{1}{16} \approx 0,066$

Cette valeur est assez faible, ce qui donne peu de risques de fausses détections pour $t > \mu_r + n \sigma_r$.

Dans le cas pratique, les images même supposées différentes ne sont jamais complètement décorréliées. Pour des images faiblement corrélées, BOLAND a montré que :

$$\sigma_r = \frac{\pi}{2 \sqrt{N}} = 1,54 \cdot \frac{1}{16} \approx 0,1$$

L'évaluation de la dispersion de r devient plus grande.

La figure IV.7 représente la probabilité d'erreur de reconnaissance en fonction de t , pour la valeur de σ_r que nous venons de déterminer.

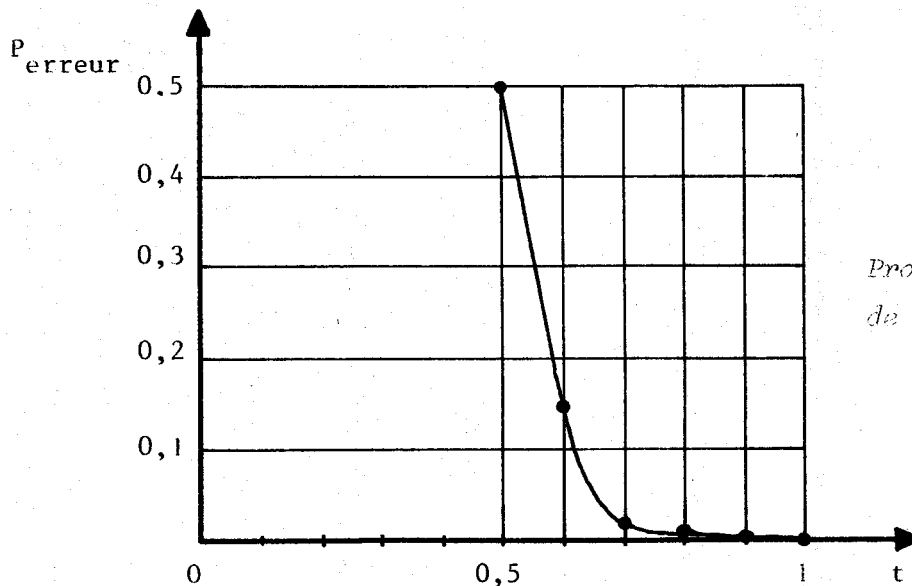


Figure IV-
Probabilité d'erreur
de reconnaissance

Pour $t = \mu + 2 \sigma$, $P(\text{erreur}) = 2 \%$

$t = \mu + 3 \sigma$, $P(\text{erreur}) = 0,2 \%$

A partir d'une telle valeur, la probabilité de déclarer identiques deux images différentes devient très faible.

b) - Risque d'erreur de reconnaissance.

L'étude de σ_r nous a permis d'évaluer la valeur moyenne du coefficient de corrélation pour des images différentes.

On peut se poser le problème d'une manière voisine, en considérant une image de référence dont on soit sûr qu'elle ne corresponde pas à l'image à comparer et en évaluant la probabilité qu'elles soient prises pour identiques. VANDERBRUG & ROSENFELD (8) ont déjà étudié ce problème.

Reprenons rapidement leur étude.

Soit U l'ensemble des points de l'image à tester qui sont à 1.
 Z l'ensemble des points à 0.

Posons $N_U(1)$ l'ensemble des points à 1 de l'image à tester qui correspondent à un point à 1 de la référence.

$N_Z(0)$ les points à 0 qui correspondent à un point à 0 de la référence.

La fonction de corrélation (Fig. IV.5.b) s'écrit :

$$r = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^K \sum_{n=1}^L I_1(m, n) I_2(m, n) \quad N = KL$$

$$= \frac{1}{N} [N_U(1) + N_Z(0)]$$

Distribution de r

Soit p la probabilité pour un point de la référence d'être à 1, et q celle d'un point de l'image à comparer.

La probabilité que les points de la référence soient à 1 parmi les N suit une loi binômiale de moyenne Np et d'écart type $\sqrt{Np(1-p)}$. Pour des valeurs de Np suffisantes, on peut approcher cette loi par la loi normale.

En supposant que l'échantillon est suffisamment grand, nous pouvons établir une loi de distribution de r .

Comme les images sont supposées non corrélées, nous pouvons dire que $N_U(1)$ suit une loi normale de moyenne Npq et d'écart-type $\sqrt{Nqp(1-p)}$

De même $N_Z(0)$ suit une loi normale de moyenne $N(1-q)(1-p)$ et d'écart-type $\sqrt{N(1-q)(1-p)p}$

Si deux variables aléatoires X et Y suivent des lois $\mathcal{N}(\mu_x, \sigma_x)$ et $\mathcal{N}(\mu_y, \sigma_y)$, la somme $X + Y$ suit la distribution

$$\mathcal{N}(\mu_x + \mu_y, \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2})$$

donc $r = \frac{1}{N} (N_U(1) + N_Z(0))$ suit la distribution normale :

$$\mathcal{N}(-p + 2pq + 1 - q, \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}})$$

- Evaluation du risque d'erreur de reconnaissance

Deux images sont déclarées identiques si r est supérieur à un seuil t . Dans le calcul que nous venons de faire, les images sont supposées non corrélées, donc différentes. Si $r > t$ pour ces images, il y a erreur de reconnaissance.

$$P(\text{erreur}) = P(r > t) = 1 - P(r < t)$$

Comme r suit une loi normale, le résultat est obtenu directement en utilisant la fonction de répartition normale Φ

$$P(\text{erreur}) = 1 - \Phi\left(\frac{t - (1 - p - q + 2pq)}{\sqrt{\frac{p(1-p)}{N}}}\right)$$

Dans le cas du réglage optimal du seuil de digitalisation, $p = q = \frac{1}{2}$

La figure IV.8 décrit la probabilité d'erreur de reconnaissance en fonction de t et de N

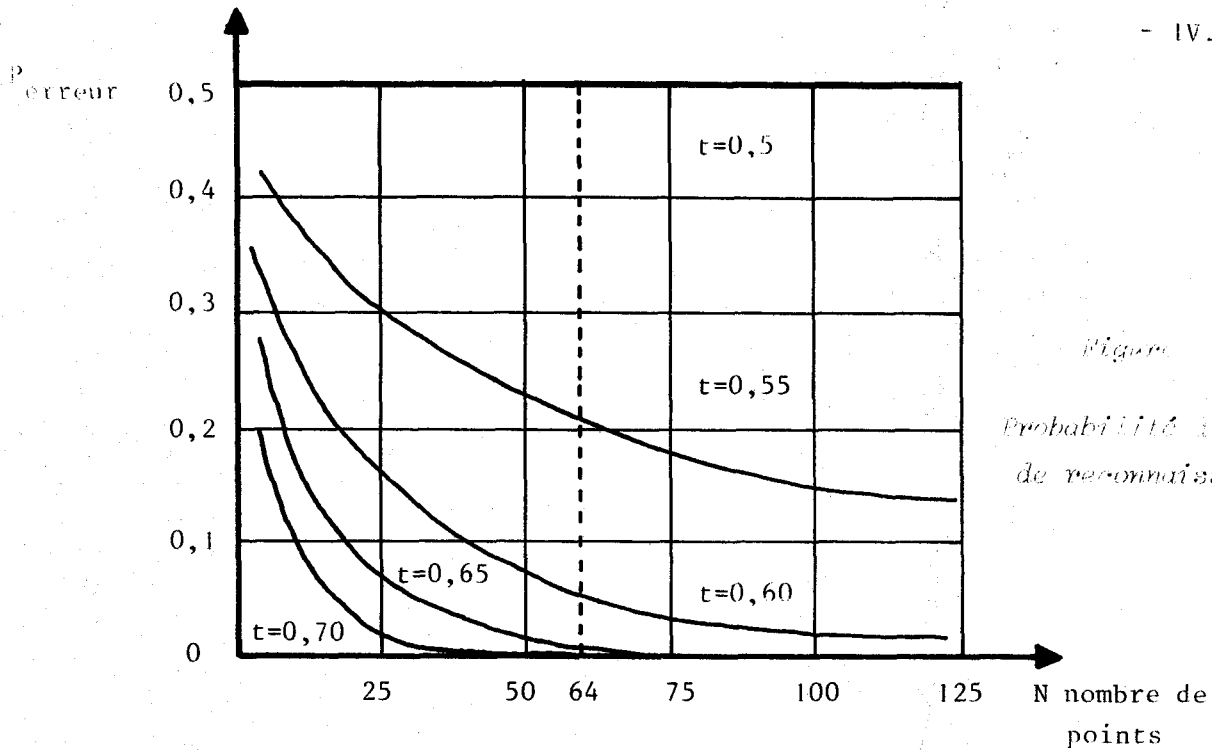


Figure 7-8
Probabilité d'erreur
de reconnaissance

On remarque que pour $N = 64$, les résultats sont comparables à ceux fournis par le calcul direct de σ_r , bien qu'ils laissent prévoir une probabilité d'erreur plus faible.

Cette étude de $r(p, q)$ pour des images différentes nous permet de déterminer la valeur de r ainsi que sa dispersion σ_r . Elle nous montre que le choix de t , seuil au delà duquel les images sont déclarées identiques, influe directement sur le taux d'erreur de reconnaissance.

Les effets de la discrétisation du niveau d'intensité lumineux sont à rajouter aux effets de la discrétisation spatiale qui tendent à diminuer r pour des images identiques.

L'effet de la quantification de niveau ne peut être étudié sur le plan théorique pour des images identiques. En effet, si les images sont supposées parfaitement identiques, il est évident que $r = 1$ et $\sigma_r = 0$, ce qui supprime à priori les erreurs de reconnaissance.

Cette hypothèse est peu vraisemblable et il est à prévoir que la valeur de r est liée essentiellement à la fidélité du capteur, facteur purement expérimental. C'est pourquoi seul le risque de confusion d'images différentes peut être étudié théoriquement.

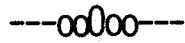
IV.4 - CONCLUSION

L'étude statistique de la quantité de lumière reçue nous a permis de définir un seuil optimal pour chaque point de la matrice, égal à la moyenne de l'éclairement. Ce résultat correspond au maximum de la quantité d'information binaire obtenue après discrétisation. Dans ces conditions, nous pouvons espérer obtenir la meilleure image possible, c'est-à-dire celle qui met en évidence au mieux les particules.

Parmi les techniques de reconnaissance directe des particules, la corrélation se révèle être une méthode efficace. Son utilisation très simple dans notre cas, se réduit à comparer la valeur du coefficient de corrélation à un seuil. Les effets de la discrétisation spatiale et de la quantification de niveau nous permettent de fixer ce seuil en fonction du taux d'erreurs de reconnaissance à atteindre.

L'étude expérimentale de cette méthode qui fait l'objet du chapitre suivant va nous permettre de compléter ces résultats théoriques.

CHAPITRE CINQ



ETUDE EXPERIMENTALE DE

LA MACHINE

CHAPITRE CINQ

=====

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA MACHINE

Au cours du chapitre précédent, nous avons été amenés à avancer certaines hypothèses sur les images données par le capteur pour en déduire un fonctionnement optimal de la machine et pour aborder le problème de la qualité de la détection des particules. L'expérimentation du capteur nous permet de vérifier le respect de ces hypothèses et de compléter les résultats que nous avons obtenus.

Après avoir défini les conditions expérimentales des mesures, nous procéderons aux manipulations suivantes :

- mesure de l'éclairement de la matrice par variation du seuil de quantification.
- évaluation de la fidélité du capteur.
- mesure du coefficient de corrélation pour des déviations identiques.

Nous terminerons ce chapitre par l'étude des possibilités d'utilisation industrielle de cette machine.

V.1 - PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Les expériences sont menées sur la machine de mirage elle-même, placée dans des conditions favorables pour la mise en évidence des divers phénomènes que nous désirons observer. Il est important cependant que les conditions soient proches de l'utilisation normale de cette machine, afin de pouvoir extrapoler les résultats obtenus pour la détection des particules.

Les divers paramètres de réglage de la machine que nous pouvons préciser sont les suivants :

- Paramètres mécaniques

- La vitesse de rotation du faisceau est maximale, soit 2700 t/mn environ ; elle permettrait de donner une cadence de mirage de 1000 ampoules de 10 cm^3 à l'heure.

- La vitesse de translation est diminuée afin d'obtenir une image des raies la plus complète possible et éliminer toute forme d'échantillonnage par un balayage hélicoïdal non jointif.

- Paramètres optiques

- Vitesse de balayage de la matrice : après de nombreux essais, nous avons obtenu une vitesse de balayage de $32 \mu\text{s}$ qui permet de travailler dans une gamme acceptable pour le seuil de quantification. Cette valeur est très inférieure au temps de présence de la particule ($350 \mu\text{s}$) qui semblait suffisante. Nous pouvons donc considérer que la prise d'information est instantanée.

- Nombre de "tranches" d'observation de l'ampoule ramené à 11, pour limiter le volume des données à traiter et à éditer. La dimension importante de chaque tranche, qui produit une intégration numérique au niveau de la mémoire de superposition, explique la vitesse de balayage de matrice élevée pour obtenir un nombre de point à "1" correct.

Pour garantir des statistiques valables, les mesures sont faites sur un grand nombre de cas. Nous avons utilisé 10 ampoules mirées chacune 2 fois, ce qui représente 220 images. Les 10 ampoules font partie d'une production normale et ne possèdent pas de défauts particuliers ; elles sont analysées sur toute leur hauteur.

Les mesures de fidélité et de corrélation se font sur des perturbations identiques : les raies sur les ampoules. Les conditions d'identité des déviations sont obtenues en supprimant toute rotation rapide de l'ampoule avant mirage afin de s'assurer qu'il n'y ait aucune particule en mouvement.

Les divers traitements des images fournies par le capteur se sont faits directement sur le microprocesseur de la machine. En particulier, les moyennes, les histogrammes et la cartographie de la matrice ont été obtenus par programmation. La conception de notre machine nous permet donc d'envisager aussi bien des mesures expérimentales que le traitement d'une production par simple modification des programmes de travail.

V.2 - EXPERIMENTATION DU CAPTEUR

V.2.1 - Probabilité d'éclairement de la matrice

L'optimisation de la qualité des images fournies par la matrice nous demande de connaître la moyenne de l'éclairement pour y placer le seuil de comparateurs. Cette moyenne peut être déterminée pour l'ensemble de la matrice pour un grand nombre d'images, c'est ce que nous appelons moyenne globale ; il convient toutefois d'affiner la mesure par la détermination de la moyenne locale au niveau de chaque point de la matrice. Il serait souhaitable également d'observer l'évolution de cette moyenne pour divers échantillons par le biais d'histogrammes.

a) - Moyenne globale

Soit e la quantité de lumière reçue par un point de la matrice. Si e est supérieur au seuil du comparateur, la valeur numérique x_{ij} du point considéré est donc 1.

Il en résulte que :

$$P(e > \text{seuil}) = \int_{\text{seuil}}^{\infty} p(e)de = \text{Prob} [x_{ij} = 1]$$

La probabilité globale d'éclairement de la matrice peut donc se définir par :

$$P_g[e > \text{seuil}] = \frac{1}{N} \sum_{i,j} [P x_{ij} = 1]$$

On approxime la probabilité P_g à la moyenne des observations sur un grand nombre d'images (220 dans notre expérience).

La fonction de répartition expérimentale est présentée Fig. V.1. Par dérivation graphique, nous obtenons la densité de probabilité d'éclairement global de la matrice (Fig. V.2).

On observe que cette courbe ne présente pas l'aspect d'une gaussienne, en particulier pour les faibles éclaircissements, comme nous l'avons remarqué au paragraphe IV.1.1. Toutefois, on peut considérer qu'elle s'en approche.

L'approximation peut se faire de deux manières différentes :

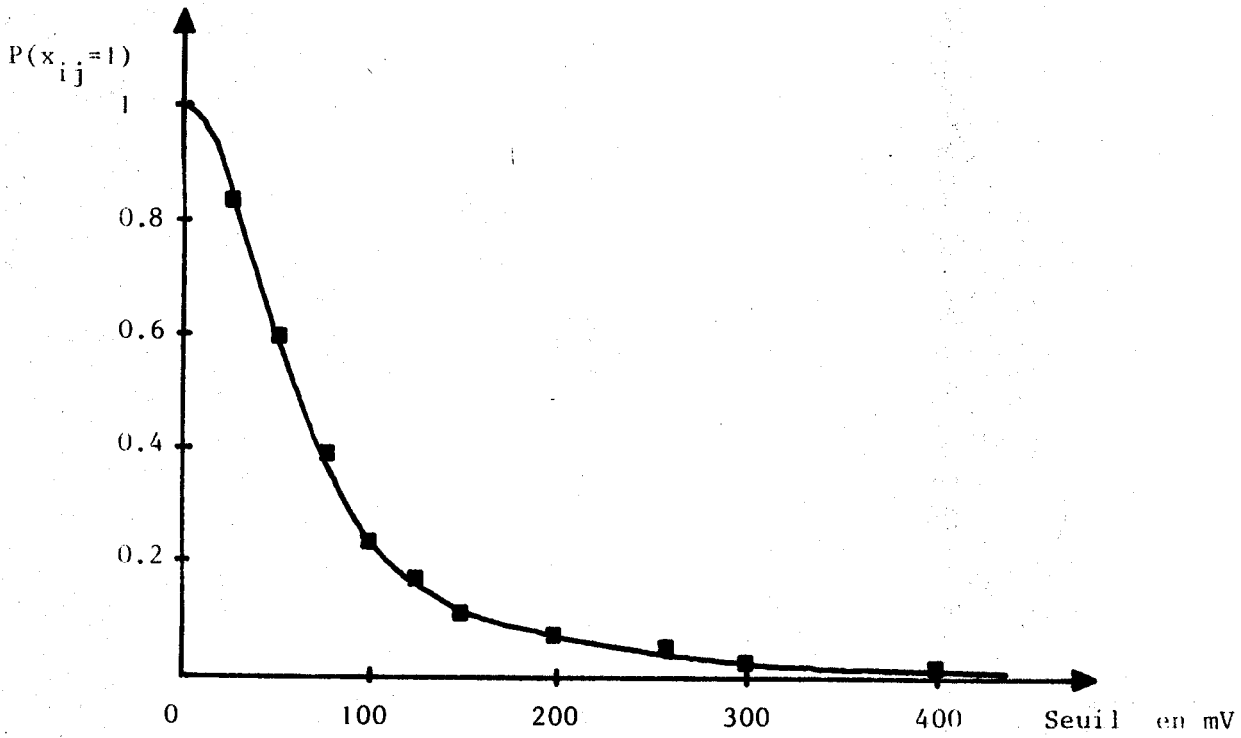


Figure V-1
Probabilité d'éclairement d'un point de la matrice

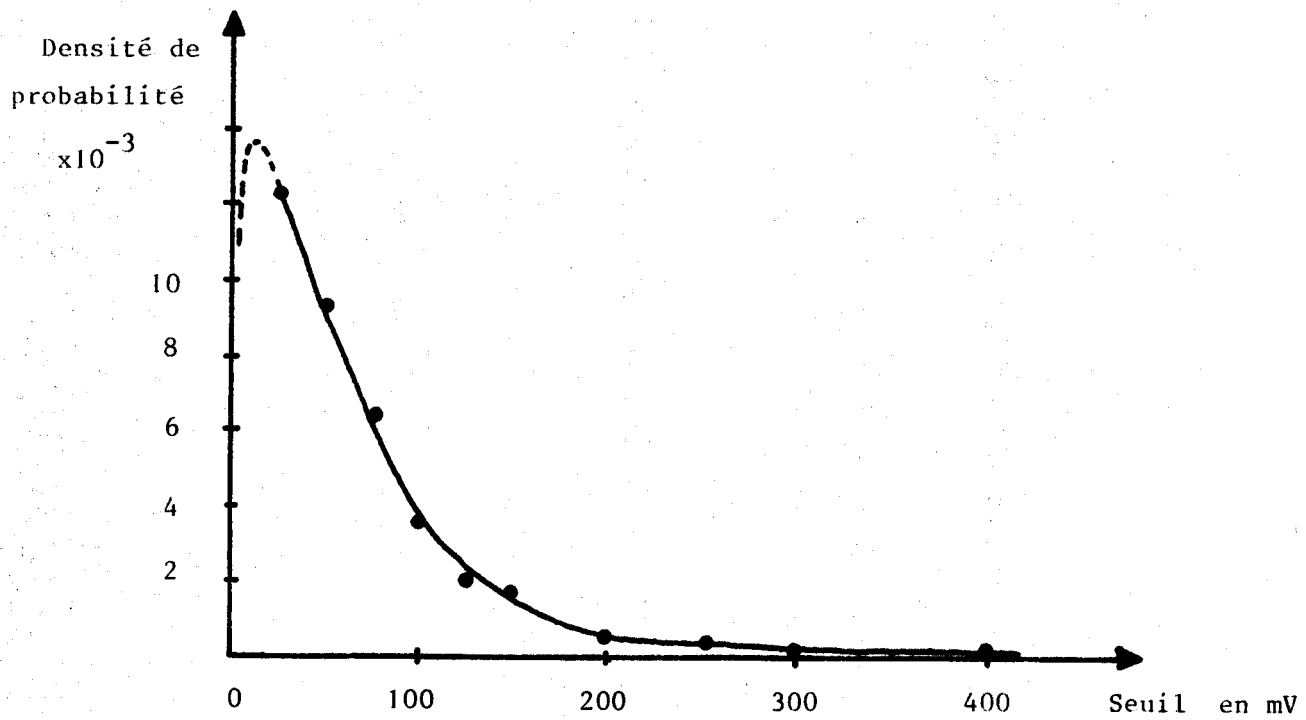


Figure V-2
Densité de probabilité d'éclairement



- soit faire coïncider le pic de la gaussienne avec le pic de la courbe expérimentale, ce qui donne les valeurs pour la gaussienne :

$$\mu = 20 \text{ mV} \quad \sigma = 18 \text{ mV}$$

Ceci introduit des valeurs importantes de probabilité pour des éclaircissements négatifs qui n'ont pas d'existence physique.

- soit considérer que la fonction de répartition vaut 0,5 pour la valeur μ . Dans ces conditions, nous obtenons :

$$\mu = 60 \text{ mV} \quad \sigma \text{ non déterminable}$$

Cette deuxième approximation reflète mieux la fonction expérimentale. Nous sommes donc placés dans le cadre de l'étude théorique menée au chapitre IV. La valeur optimale du seuil de numérisation de la quantité de lumière reçue est donc à priori 60 mV environ. C'est pour cette valeur que nous devrions obtenir la meilleure détection des particules.

b) - Moyenne locale

Pour déterminer la moyenne locale, il suffirait de reprendre l'étude précédente appliquée à chaque point de la matrice. Mais nous pouvons noter que si la somme des points suit une loi approximativement gaussienne, il est vraisemblable que chaque point suive la même loi (la réciproque est par ailleurs vraie). Il suffit donc de relever la moyenne d'éclairement $p[x_{ij} = 1]$ pour un seuil donné pour mettre en évidence les écarts d'éclairement entre chaque point. La cartographie de la matrice représentée ci-dessous a été relevée pour un seuil de 50 mV environ, qui donne une moyenne d'éclairement de 0,57 proche du seuil global optimal.

0,270	0,565	0,556	0,365	0,478	0,692	0,763	0,282
0,589	0,937	0,603	0,405	0,252	0,250	0,925	0,603
0,873	0,980	0,958	0,276	0,030	0,698	0,954	0,854
0,715	0,889	0,307	0,000	0,000	0,472	0,943	0,734
0,720	0,933	0,323	0,002	0,000	0,456	1,000	0,798
0,330	0,996	0,787	0,096	0,325	0,340	0,892	0,396
0,280	0,863	0,652	0,403	0,827	0,847	0,983	0,347
0,351	0,802	0,430	0,283	0,703	0,612	0,738	0,347

Figure V-3
Cartographie de
la matrice

On remarque que la moyenne locale est souvent très différente de la moyenne globale. On note toutefois la symétrie circulaire approximative des moyennes due à la structure de la machine.

Les écarts sont imputables à deux principaux facteurs :

- il existe une dispersion importante dans la sensibilité de chaque élément de la matrice, que la construction même de la machine ne permet pas de compenser.
- l'éclairement de la matrice n'est pas uniforme ; ceci laisse supposer que les images relatives aux raies ne sont pas distribuées spatialement de façon complètement aléatoire.

On peut noter que certains points ont une moyenne proche de 1 ; ils ne pourraient assurer la détection d'une particule par suite du phénomène de masquage. Par contre, d'autres points ont une moyenne très faible ; ils ont donc une faible probabilité d'appartenir à l'image d'une particule dont nous supposons la statistique voisine de celle d'une raie.

Pour obtenir une image optimale telle que nous l'avons définie, il conviendrait donc de pouvoir ajuster le seuil de numérisation pour chacun des points de la matrice et non pour l'ensemble.

c) - Dispersion des mesures

La moyenne a été établie pour un lot de 20 ampoules prises dans une production. Il pourrait arriver que certains lots comportent des ampoules faiblement rayées, ou l'inverse, ce qui demanderait de modifier le seuil suivant les lots.

Au niveau de notre expérimentation, l'éventualité d'une telle variation de la moyenne est mise en évidence par l'histogramme du nombre de points $[x_{ij} = 1]$ pour chaque image (Fig. V.4).

Il a été relevé pour un seuil de 25 mV, valeur inférieure au seuil moyen optimal, 75 mV proche de l'optimum et 400 mV. La dispersion des mesures est maximale au voisinage de 75 mV, le nombre de points à 1 variant de 0 à 55.

Une étude complémentaire faite sur chaque ampoule a montré que la moyenne des images peut varier entre 10 points à 1 et 30 environ.

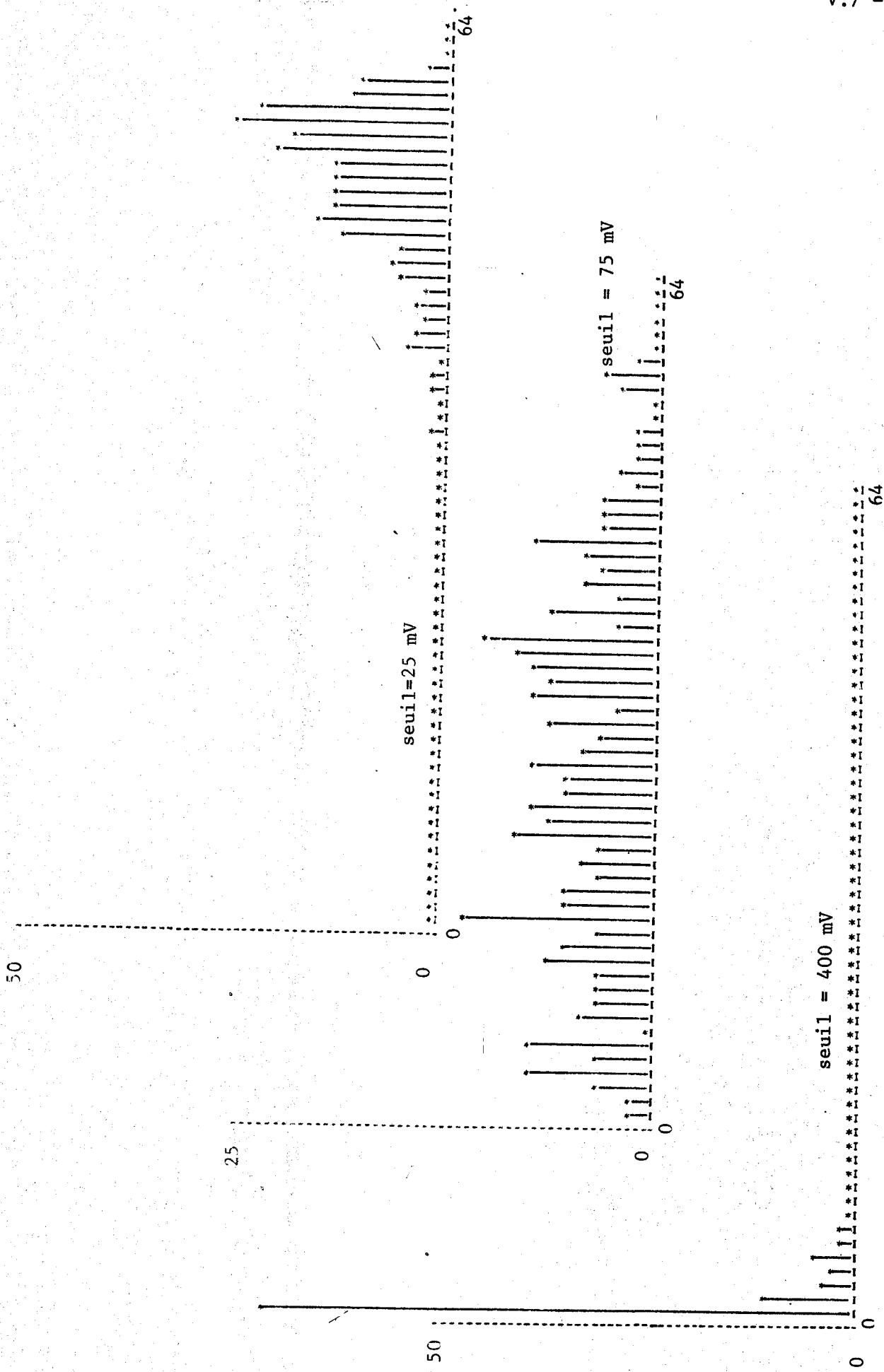


Figure V-4

Histogramme du nombre de points à "1" de la matrice



On note donc une grande dispersion de la moyenne d'éclairement, que ce soit au niveau de chaque image ou même d'une ampoule.

En résumé, nous pouvons dire que nous sommes placés dans les conditions théoriques prévues c'est-à-dire une fonction de répartition de la lumière gaussienne, mais qu'il existe une importante différence dans l'éclairement moyen d'un point à un autre de la matrice. De plus, certaines raies peuvent masquer complètement les éventuelles particules. C'est pourquoi le caractère optimal des images ainsi obtenues reste discutable.

V.2.2 - Fidélité du capteur

Par la fidélité, nous désirons évaluer la reproductibilité de la prise d'information faite par le capteur. Une même grandeur est toujours traduite électriquement de façon identique par un capteur parfait.

Dans notre étude, nous pouvons évaluer la fidélité grâce aux raies sur la surface des ampoules qui sont des éléments physiques constants devant donner naissance à des informations toujours identiques, en particulier au mirage et au contre-mirage.

Les différences entre les images peuvent être imputées à deux phénomènes :

- les défauts de positionnement mécanique de l'ampoule dans le système d'analyse
- les bruits lumineux parasites, amplifiés par la quantification à deux niveaux, pouvant provoquer le changement de 0 en 1 ou inversement.

Pour faire cette évaluation de la fidélité, il convient tout d'abord d'en définir une mesure puis de voir l'influence de chacune des sources d'erreurs sur sa valeur.

a) - Mesure de la fidélité

Soit N_{u1} le nombre de points à 1 de chaque image au mirage et N_{u2} le nombre de points à 1 au contre mirage de l'image correspondante.

Soit N_I le nombre de points à 1 qui se correspondent mutuellement.

La fidélité peut s'exprimer par :

$$f = \overline{m(f_i)} = \overline{m\left(\frac{2N_I}{N_{u1} + N_{u2}}\right)}$$

Ce coefficient peut prendre des valeurs comprises entre 0 et 1, cette dernière valeur correspondant à une identité totale des images, c'est-à-dire un capteur parfait.

b) - Fidélité de la matrice

Comme pour la corrélation, il est possible d'introduire une translation entre les images dans le calcul de f , permettant d'éliminer partiellement les effets des défauts de positionnement mécanique.

Pour chaque couple d'images, on recherche la valeur maximale de f_i pour des déplacements d'un pas en x ou y (translation $\pm \Delta x$, $\pm \Delta y$).

La courbe de f a été relevée pour différentes valeurs du seuil, c'est-à-dire pour divers nombres de points à "1" de la matrice (Fig. V.5).

Elle montre une très grande dispersion de f , pouvant atteindre des valeurs proches de 0,1 pour un seuil de 250 mV.

Au voisinage du seuil optimal, la fidélité n'est que de 80 % avec une dispersion de 17 %.

Ces valeurs montrent une mauvaise fidélité des mesures de lumière faites par la matrice.

c) - Défauts mécaniques

Les défauts de positionnement de l'ampoule entraînent une translation de l'image, que l'on peut mettre en évidence grâce au calcul du maximum de f .

Pour chaque calcul de f_i , nous notons s'il y a translation ou non, ce qui permet d'établir la probabilité d'apparition d'un déplacement en fonction du seuil (Fig. V.6).

Expérimentalement, on observe que la probabilité de déplacement calculée par

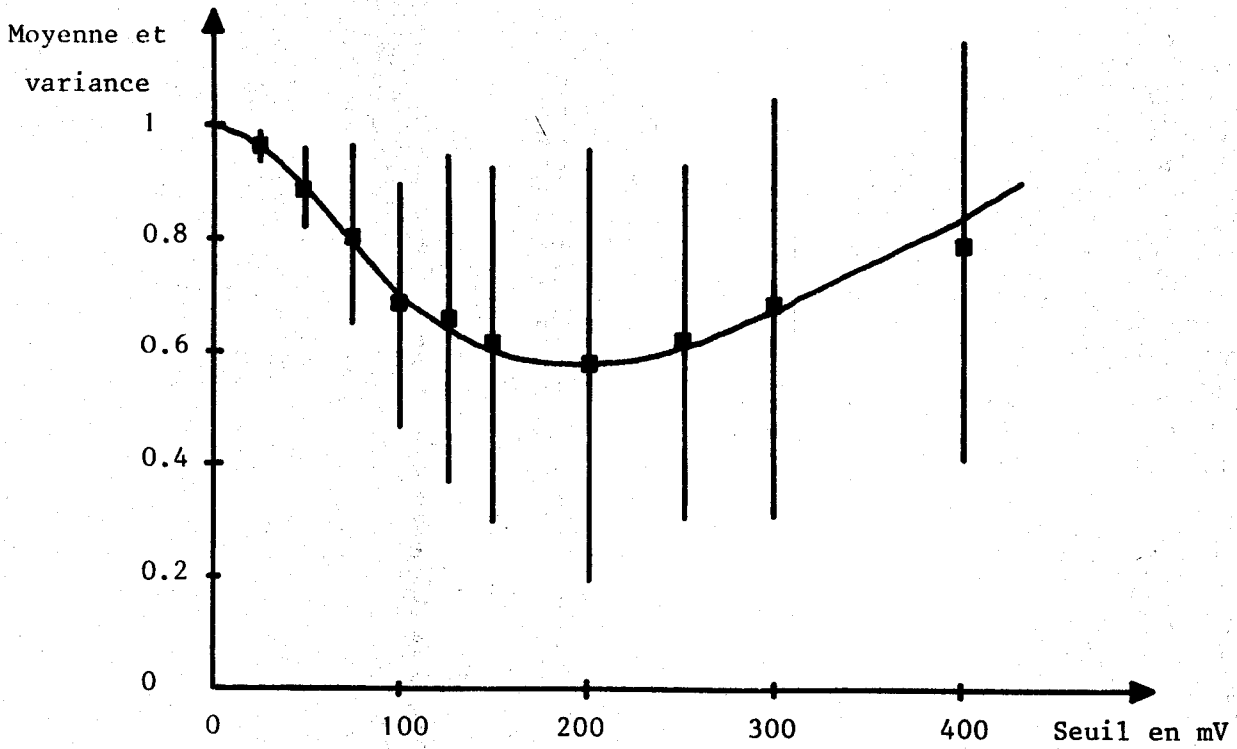


Figure V-
Mesure de la fidélité de la matrice

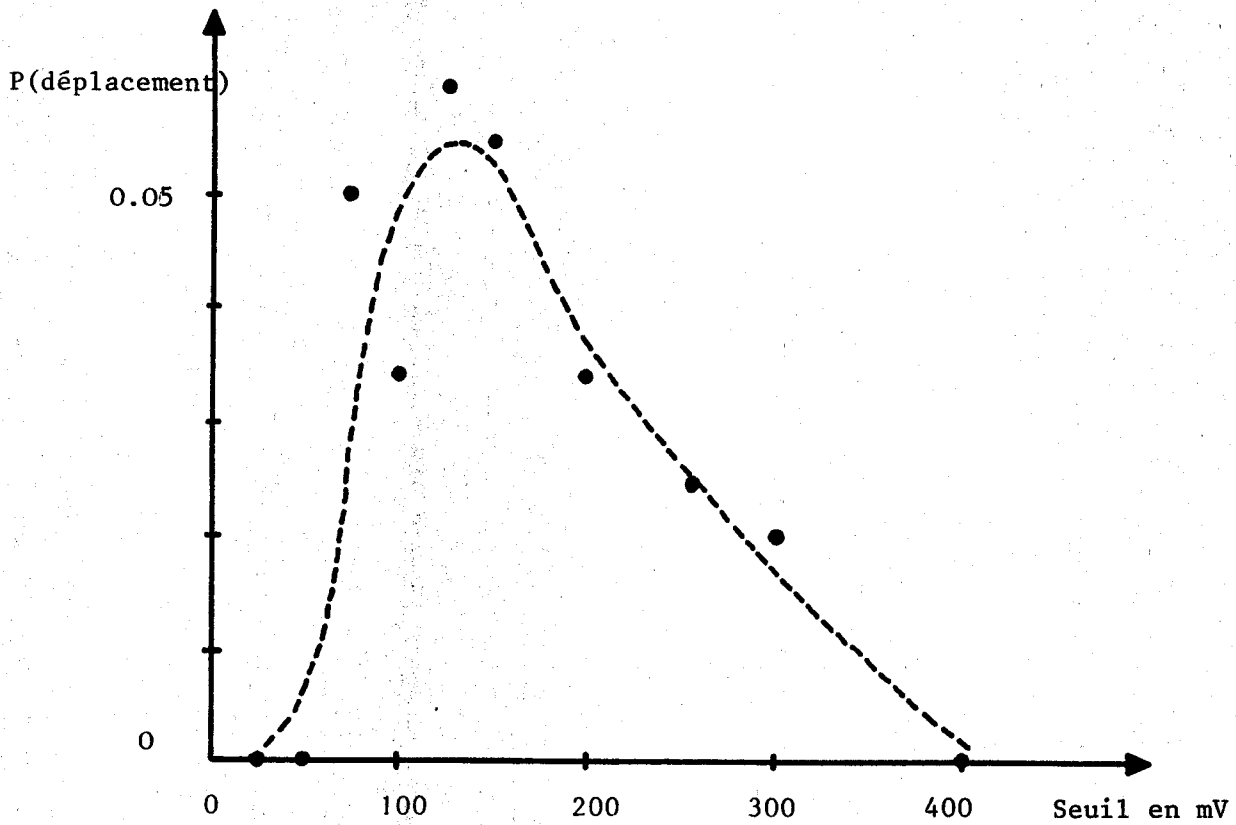


Figure V-6
Translations des images évaluées par la fidélité



notre méthode présente un maximum pour un seuil de 125 mV environ, alors que le seuil ne devrait pas intervenir dans cette probabilité.

En réalité, il est vraisemblable que le maximum de f_j , obtenu par translation des images, ne correspond qu'à un phénomène probabiliste lié à la mauvaise fidélité de la matrice. Pour des images ne comportant que quelques points à "1", la probabilité de meilleure correspondance par translation est faible, il en est de même pour les images définies par un grand nombre de points à "1".

Nous pouvons donc dire que la fidélité de ce capteur est faible, et qu'elle est liée essentiellement au manque de définition spatiale de la matrice et à la quantification à deux niveaux pour la quantité de lumière reçue. L'absence de réglage indépendant du seuil pour chaque point diminue la qualité probabiliste des images. C'est pourquoi il faut s'attendre à ce que les résultats de la corrélation soient médiocres.

V.3 - ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CORRELATION

La corrélation des images du mirage et du contre-mirage doit nous permettre de mettre en évidence la présence de particules. Son étude théorique a déterminé les risques de confusions d'images différentes, c'est-à-dire les risques de non détection d'une particule. Les mesures expérimentales faites sur la machine visent essentiellement à compléter ces résultats théoriques. En particulier, nous pouvons en déduire la valeur moyenne du coefficient de corrélation et sa dispersion pour des déviations à priori identiques à partir d'un grand nombre d'observations.

V.3.1. - Conditions de mesure

Les conditions d'expérimentation sont voisines de celles de la fidélité, les paramètres généraux étant ceux définis dans le protocole expérimental.

On considère que les raies sur la surface donnent au mirage et au contre-mirage des images voisines. Les différences qui peuvent apparaître sont le fait du manque de fidélité du capteur, dont les propriétés viennent d'être étudiées.

En premier lieu, nous relèverons l'influence de la fidélité sur la valeur moyenne du coefficient de corrélation $r(p, q)$ défini en IV.2.2, les valeurs de p et q étant déterminées pour obtenir le maximum de $r(p, q)$. Pour chaque couple

d'images, nous notons s'il y a translation afin d'en évaluer la probabilité, ainsi que la valeur de r pour en tracer l'histogramme.

V.3.2. - Valeur expérimentale de la corrélation

a) - Moyenne

La valeur moyenne présentée sur la figure V.7 montre une sensibilité particulière du coefficient de corrélation au seuil de quantification. Nous obtenons une valeur minimale de $\bar{r}(p, q)$ de l'ordre de 0,9 pour un seuil S de 60 mV environ.

Ce phénomène peut être expliqué grâce à nos résultats précédents :

Le seuil de 60 mV correspond à la valeur optimale pour laquelle la moyenne d'éclairément est 0,5, donnant la quantité maximale d'information pour chaque image. Pour ce seuil, le nombre moyen de points à 1 est $N/2$ (N nombre de points de la matrice). Le nombre des changements de 1 en 0 ou de 0 en 1 auxquels la corrélation est sensible, est statistiquement maximum pour de telles images.

L'amélioration de $\bar{r}(p, q)$ pour les valeurs extrêmes du seuil n'est qu'apparente :

- pour $S < S$ optimal, le nombre de points à 1 est important, peu sujet aux variations ; les particules seraient masquées par les informations des raies et ne seraient pas détectées par corrélation.

- pour $S > S$ optimal, la sensibilité de la matrice est faible, les images sont définies par quelques points et le nombre de changements est réduit ; les particules ne seraient pas détectées par la matrice dans de telles conditions.

b) - Dispersion

La courbe V.7 laisse apparaître une variance de r assez faible et ne dépendant pas du seuil.

L'histogramme (Fig. V.9) est beaucoup plus représentatif de la dispersion de r . Pour le seuil optimal, elle est importante vers les valeurs faibles, pouvant donner des valeurs de r de l'ordre de 0,55.

Pour les seuils extrêmes (400 mV et 25 mV) on observe un regroupement des valeurs traduisant une dispersion plus faible.

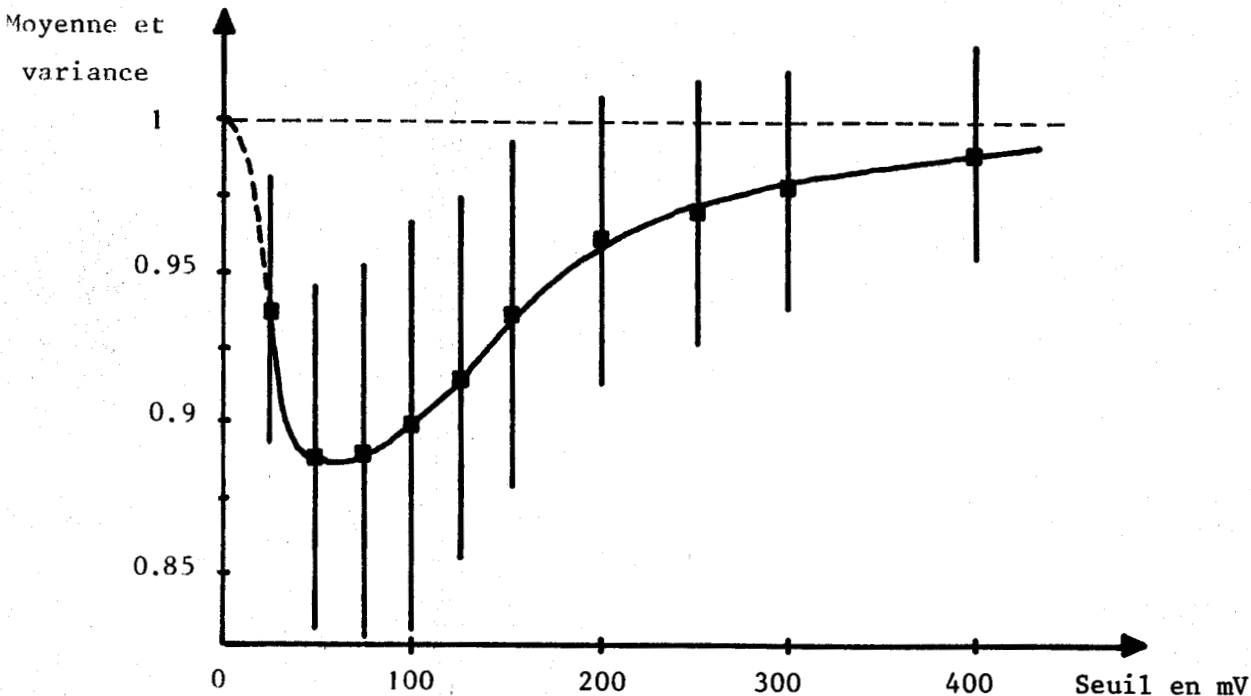


Figure V-7
Coefficient de corrélation pour des déviations identiques

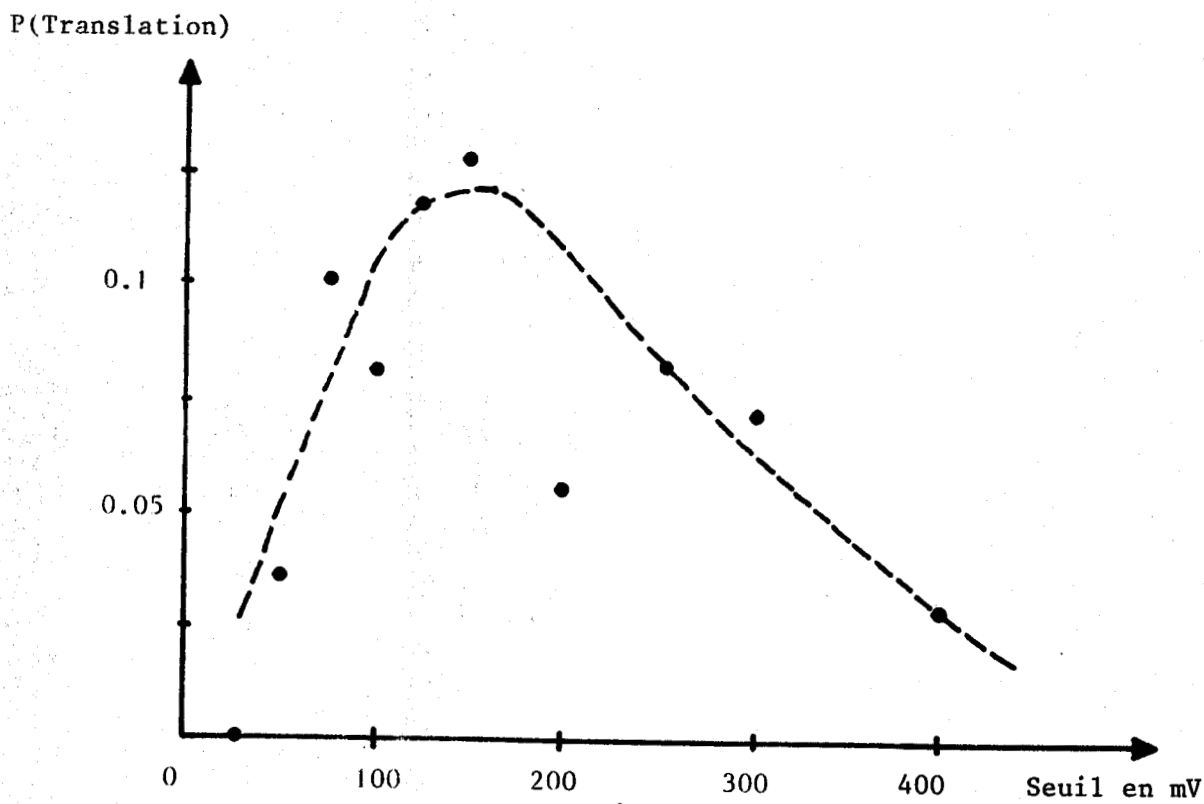
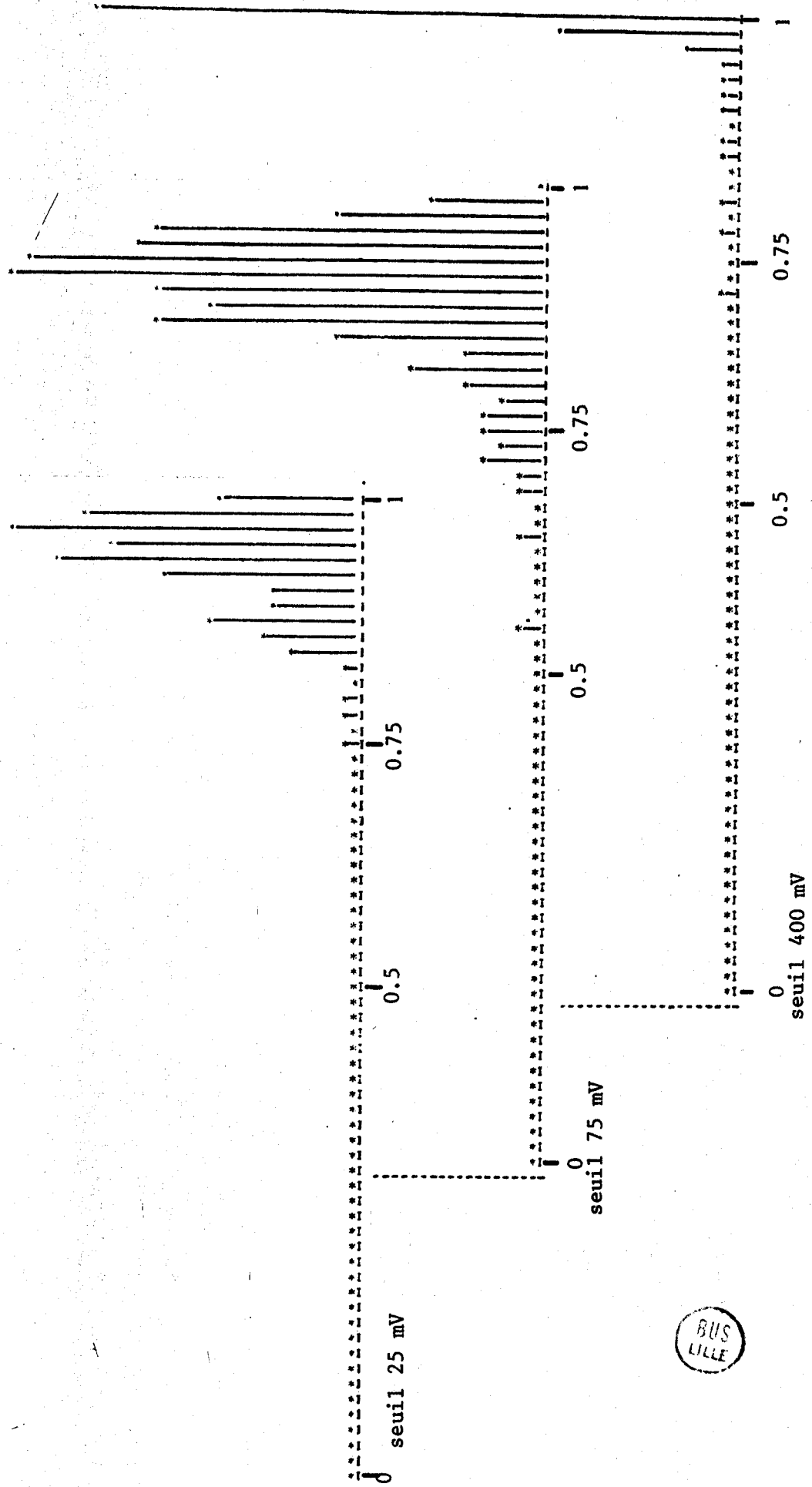


Figure V-8
Evaluation des translations d'images par la corrélation



Figure V-9
Dispersion du coefficient de corrélation
pour des déviations identiques



Ce phénomène, lié à l'amélioration apparente de \bar{r} et de la fidélité du capteur, n'est que le fait de la diminution de la dispersion du nombre de points à 1 de la matrice constatée en V.2.1. On ne peut donc parler de meilleurs résultats pour ces valeurs du seuil de quantification.

c) - Translation des images

Les résultats (Fig. V.8) sont voisins de ceux de la fidélité, avec une probabilité plus importante. L'origine de cette augmentation du nombre des cas de translation est la suivante :

lors du calcul de $r(p, q)$ pour des valeurs de p et q différentes de zéro, la translation (p, q) introduit une perte des points de l'image sur les bords, avec rentrée de "0" sur les bords opposés. Il arrive fréquemment que l'élimination de ces points donne une meilleure valeur de r .

L'étude théorique nous a montré que les faibles translations conduisent à une dégradation de la valeur de r ; de plus, l'expérimentation ne permet pas de mettre en évidence des translations de l'ordre du pas de la matrice. Il faut donc en conclure que les translations, si elles existent, ne sont que faibles et ne peuvent être corrigées par un déplacement (p, q) lors du calcul de r .

Cette étude expérimentale nous permet de dire que le coefficient de corrélation calculé pour des déviations identiques (les raies de l'ampoule) a une valeur faible, entachée d'une grande dispersion malgré les possibilités de correction des défauts mécaniques de la corrélation. Ce résultat est la conséquence directe du manque de fidélité intrinsèque de notre capteur.

V.4 - DETECTION PRATIQUE DES PARTICULES

Les conditions expérimentales des mesures que nous venons de faire sont proches des conditions de travail normales de la machine de mirage. Il conviendrait toutefois d'augmenter le nombre de tranches d'observation de l'ampoule afin de réduire les risques de masquage des particules par les raies, suite à une intégration sur une trop grande portion de l'ampoule. Une centaine de tranches d'observation, soit une hauteur de 0,7 mm par tranche pour les ampoules de 10 ml, semble être une valeur adaptée à la détection des plus petites particules.

Dans ce cadre de fonctionnement, il y a lieu de modifier la vitesse de balayage

de la matrice et le seuil de quantification optimal. Ces modifications ne devraient pas altérer nos résultats expérimentaux, en particulier pour la valeur du coefficient de corrélation sur des images identiques.

La détection des particules par corrélation se ramène donc à déterminer r , coefficient de corrélation obtenu entre mirage et contre-mirage pour chaque tranche d'observation et à le comparer à un seuil t .

Si $r > t$ les images sont identiques

Si $r < t$ les images sont différentes ; il y a une particule en cet endroit.

La valeur de t doit être fixée de façon à minimiser le risque de non-reconnaissance des particules et les fausses détections qui entraînent une perte de production.

La probabilité de fausse détection étudiée en V.3 peut être approximée par une loi normale avec $\mu = 0,885$ et $\sigma = 0,065$.

Les risques de non-reconnaissance des particules traités au chapitre IV suivent également une loi normale avec $\mu = 0,5$ et $\sigma = 0,062$.

Dans ces conditions d'approximation, nous avons porté sur le même graphe (V.10) les courbes représentatives des risques en fonction de t .

L'ampoule étant découpée en 100 tranches d'observation, une probabilité de fausse détection de 10^{-2} entraîne un rejet moyen à tort d'une ampoule sur deux. Les exigences industrielles ne permettent pas de tolérer plus de 1 % de rejet parasite de la production, ce qui conduit à un seuil $t = 0,65$.

Dans ces conditions, le taux de non-détection des particules n'est que de 1 %. Ces chiffres paraissent acceptables pour un fonctionnement normal de la machine.

En réalité, de tels résultats ne peuvent être atteints. Tout d'abord, la loi normale est peu représentative de la distribution de fausse détection. L'histogramme (Fig. V.9) nous montre que pour 4 images sur 220 le coefficient de corrélation a été inférieur à 0,65, soit 1 % des cas au lieu de 0,01 % prévus par la loi normale.

De plus, les travaux de BOLAND signalés en V.3.2 laissent prévoir une dispersion plus importante en cas de corrélation des images. Le caractère non uniforme de

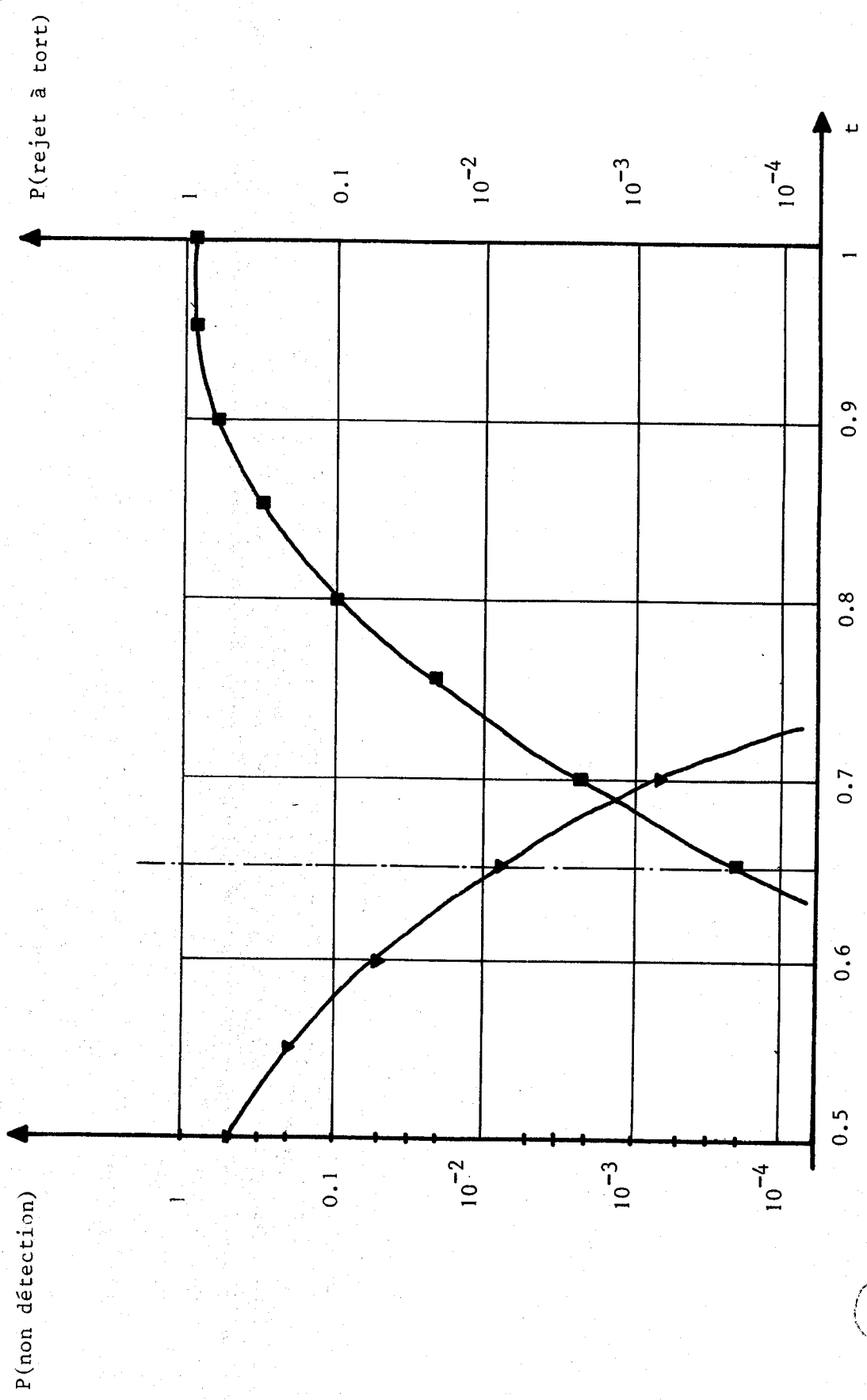


Figure V-10
Caractéristiques d'erreurs de la machine en fonction
du paramètre t



la moyenne locale (V.2.1) introduit une corrélation indirecte entre toutes les images. Il en résulte que les risques de non-détection sont beaucoup plus importants que ceux prévus par la courbe V.10.

Les essais pratiques de détection des particules s'avèrent délicats. En effet, il est difficile de déterminer si le rejet d'une ampoule provient d'une fausse détection ou effectivement de la détection d'une particule. C'est pourquoi, nous ne pouvons donner actuellement de résultats significatifs. Il est toutefois certain qu'il n'est pas possible d'obtenir une valeur de t qui puisse donner satisfaction en milieu industriel avec la machine telle qu'elle est.

V.5 - CONCLUSION

L'étude statistique de la quantité de lumière reçue par le capteur, nous a montré que l'hypothèse d'une loi Gaussienne est satisfaisante bien que la dispersion soit plus grande en réalité. De plus, nous avons constaté des différences importantes entre les moyennes de chaque point, ce qui remet en cause le caractère optimal des images obtenues.

La fidélité globale de ce capteur s'avère faible, principalement au niveau de la matrice dont le mode de fonctionnement introduit des erreurs de transcription des déviations du faisceau d'analyse.

Il en résulte que le coefficient de corrélation calculé sur des déviations identiques est faible et qu'il ne permet pas d'envisager une détection correcte des particules.

- C O N C L U S I O N G E N E R A L E -

Au cours de ce mémoire, nous nous sommes efforcés de dégager les étapes fondamentales qui nous ont permis de construire une machine de mirage d'ampoules automatique.

L'étude du problème et des solutions déjà apportées nous a amenés à choisir comme principe fondamental l'analyse fractionnée, complétée par la recherche des particules par comparaison.

Pour mettre en oeuvre ce principe, nous avons tout d'abord assuré la conception pratique d'une machine à vocation industrielle, c'est-à-dire rapide et fiable. Cet ensemble a donné toute satisfaction lors des essais ; il est toutefois possible d'y apporter des améliorations, en particulier en remplaçant certains miroirs par une fibre optique et en renvoyant l'image sur une matrice extérieure classique.

Le contrôle général de la machine par microprocesseur s'avère très efficace par sa rapidité de travail et sa souplesse. Ce dernier facteur a été très utile au cours de la mise au point et des essais, où de nombreuses modifications ont dû être apportées à l'enchaînement des opérations ainsi que dans les programmes de reconnaissance.

La recherche des particules par comparaison du mirage et du contre-mirage n'a pas donné les résultats espérés. La corrélation d'images, méthode dont l'utilisation est courante dans ce genre de problème, ne permet pas d'aboutir à une détection correcte des particules. Parmi les causes d'erreurs que nous avons pu constater, la plus importante semble être la faible qualité de la prise d'information.

Nos travaux ultérieurs vont donc porter sur trois points essentiels :

- recherche d'une méthode de comparaison adoptée à la qualité des images, faisant appel à l'information contextuelle de chaque point de l'image
- amélioration technologique du capteur, principalement la matrice de détection. Nous nous orienterons vers une réalisation en hybride qui diminuera la dispersion des caractéristiques et augmentera le rapport (surface sensible / surface totale)
- quantification de la quantité de lumière reçue sur plusieurs niveaux, afin de mieux définir la forme de la déviation.

L'utilisation conjointe de ces améliorations devrait permettre d'obtenir un fonctionnement correct de cette machine et de parvenir à son développement industriel aussi. C'est donc dans ce sens que nous orienterons nos recherches futures.

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

CHAPITRE I.

- (1) Détection des particules dans les solutés injectables
STP - n° 10 - Décembre 1973
- (2) M. ROLAND
Risques inhérents à l'administration des injectables
STP - n° 10 - Décembre 1973
- (3) G. CHILDS - Contrôle optique des solutés injectables
Rapport de commission STP.

CHAPITRE III.

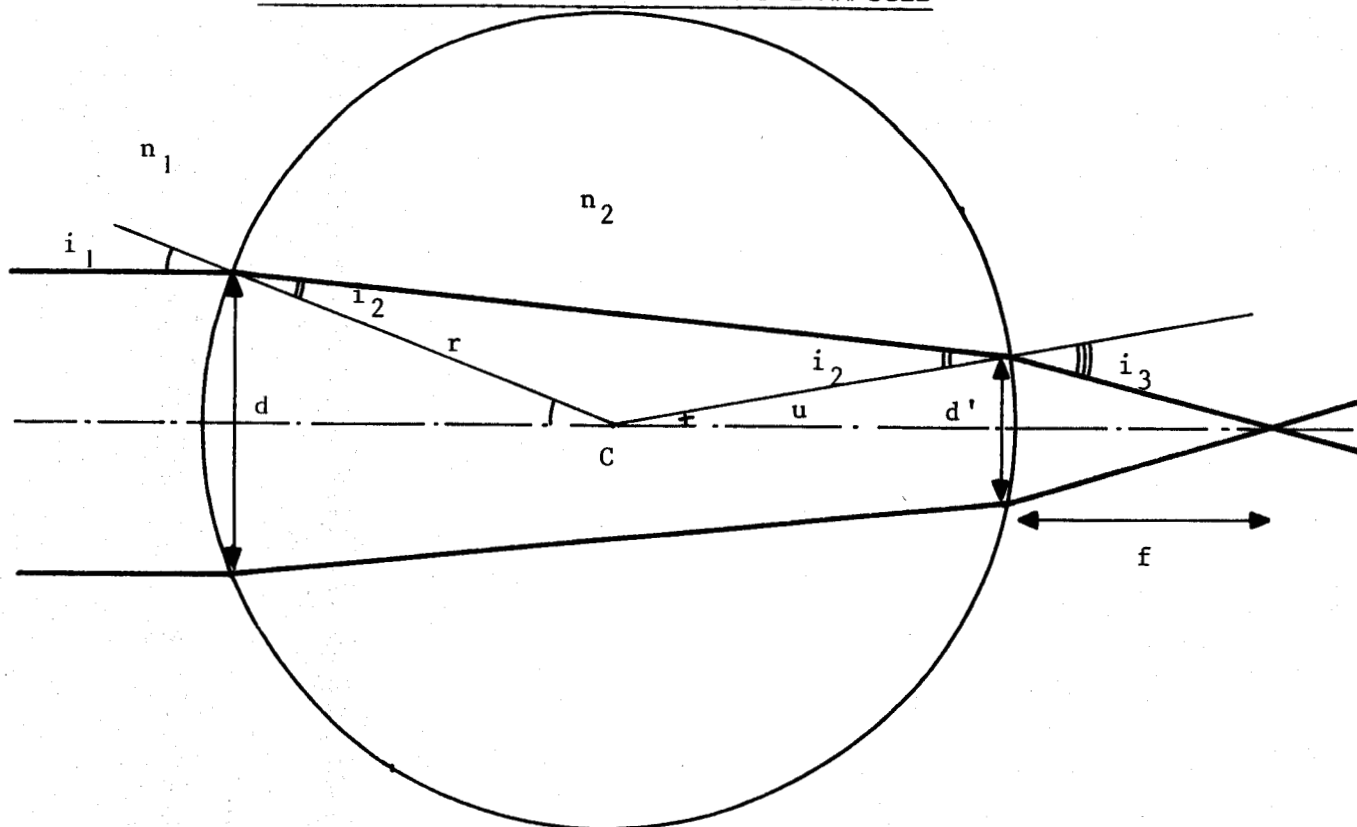
- (1) M. BLANCHARD
Rapport de la commission de normalisation de la représentation du cahier des charges d'un automatisme logique
Automatismes - Mars-Avril 1978
- (2) DACLIN & BLANCHARD
Synthèse des systèmes logiques
Collection Sup. Aero 1976
- (3) B. TACONET & B. CHOLLOT
Programmation du Grafcet sur automate à langage logique,
à relais ou booléen.
Automatismes - Janvier-Février 1979
- (4) M. BLANCHARD, V. FUERTES, J. GILLON, G. THUILLIER
Un automate programmable par réseau de Pétri.

CHAPITRE IV

- (1) GONZALEZ & WINTZ
Digital Image Processing Adison Wesley Publishing Company.
- (2) JOSEPH S. BOLAND
Design of a Correlator for Real-Time Video Comparisons I.E.E.E. Trans. Aerospace and Electronic Systems - Janvier 1979
- (3) ALBERT L. ZOBRIST
Building a distance Function for Gestalt Grouping, I.E.E.E. Trans. on Computers - Juillet 1975
- (4) GARETT, REACH & HIBBS
Detection Threshold Estimation for digital Area Correlation, I.E.E.E. Trans. on Systems, man and Cybernetics - Janvier 1976
- (5) WILLIAM PRATT.
Correlation Techniques of Image Registration, I.E.E.E. Trans. on Aerospace and Elec. Systems, - Mai 1974.
- (6) FARNEA & SILVERMAN
A class of Algorithms for Fast Digital Image Registration, I.E.E.E. Trans. on Computers - Fevrier 1972
- (7) MILSON & RAS
A Statistical model for machine print Recognition I.E.E.E. Trans. Computers
- (8) VANDERBRUG & ROSENFELD
Two Stage Template Matching, I.E.E.E. Trans. on Computers - April 1977

ANNEXE I.

CALCUL DU TRAJET DES RAYONS DANS L'AMPOULE



Au point d'entrée, nous pouvons écrire :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

$$\sin i_1 = \frac{d}{2r} \cdot \frac{1}{n_2}$$

$$\frac{d - d'}{2r} \approx \text{tg} (i_1 - i_2)$$

Si les angles sont petits, on peut simplifier l'écriture :

$$\begin{aligned} d - d' &\approx (i_1 - i_2) 2r \approx \left(\frac{d}{2r} - \frac{n_1}{n_2} \frac{d}{2r} \right) 2r \\ &\approx d \left(1 - \frac{n_1}{n_2} \right) \end{aligned}$$

$$d' = \frac{n_1}{n_2} d$$



$$n_1 \sin i_3 = n_2 \sin i_2 = n_1 \sin i_1$$

donc : $i_3 = i_1$

$$\frac{f}{d'/2} = 1/\text{tg}(i_3 - u) \approx 1/(i_3 - u) = 1/(i_1 - u)$$

$$\text{tg } u = \frac{d'}{2r}$$

donc : $f \approx \frac{d'}{2\left(\frac{d}{2r} - \frac{d'}{2r}\right)}$

$$f = \frac{r n_1}{n_2 - n_1}$$

A.N. $r = 1 \text{ cm}$ (ampoule de 20 ml)
 $n = 1,2$

Ceci donne : $d' = 0,81$
 $f = 5 \text{ cm}$

