

~~17871~~  
F. Aubépart

# THESE

présentée par

**Christian BLANES**

Ingénieur E.N.S.P.M.

pour obtenir le titre de DOCTEUR  
DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE  
(arrêté ministériel du 23 novembre 1988)  
Spécialité : Signal, Image, Parole

\*\*\*\*\*

## GUIDAGE VISUEL D'UN ROBOT MOBILE AUTONOME D'INSPIRATION BIONIQUE

**2ème partie : Implémentation opto-électronique et réalisation du prototype**

\*\*\*\*\*

Soutenue le 12 juillet 1991 devant le jury :

MM. J. CROWLEY           Président  
P. COIFFET  
N. FRANCESCHINI  
J. HERAULT  
G. SALVINI

Thèse préparée au sein du laboratoire de  
Neurocybernétique du C.N.R.S., UPR 27, Marseille.



# THESE

présentée par

**Christian BLANES**

Ingénieur E.N.S.P.M.

pour obtenir le titre de DOCTEUR

DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

(arrêté ministériel du 23 novembre 1988)

Spécialité : Signal, Image, Parole

\*\*\*\*\*

## GUIDAGE VISUEL D'UN ROBOT MOBILE AUTONOME D'INSPIRATION BIONIQUE

**2ème partie : Implémentation opto-électronique et réalisation du prototype**

\*\*\*\*\*

Soutenue le 12 juillet 1991 devant le jury :

MM. J. CROWLEY           Président

P. COIFFET

N. FRANCESCHINI

J. HERAULT

G. SALVINI

Thèse préparée au sein du laboratoire de  
Neurocybernétique du C.N.R.S., UPR 27, Marseille.



# INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE GRENOBLE

46, avenue F. Viallet - 38031 GRENOBLE Cedex-  
Tél : 76.57.45.00

Année Universitaire 1989-90

Président de l'Institut  
Monsieur Georges LESPINARD

## PROFESSEURS DES UNIVERSITES

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



## CHERCHEURS DU C.N.R.S.

ALLEMANY	Antoine
ALLIBERT	Colette
ALLIBERT	Michel
ANSARA	Ibrahim
ARMAND	Michel
AUDIER	Marc
BERNARD	Claude
BINDER	Gilbert
BONNET	Roland
BORNARD	Guy
CAILLET	Marcel
CALMET	Jacques
CARRE	René
CHATILLON	Christian
CLERMONT	Jean-Robert
COURTOIS	Bernard
DAVID	René
DION	Jean-Michel
DRIOLE	Jean
DURAND	Robert
ESCUDIER	Pierre
EUSTATHOPOULOS	Nicolas
FRUCHARD	Robert
GARNIER	Marcel
GLANGEAUD	François
GUELIN	Pierre
HOPFINGER	Emile
JORRAND	Phillippe
JOUD	Jean-Charles
KAMARINOS	Georges
KLEITZ	Michel
KOFMAN	Walter
KRAKOWIAK	Sacha
LANDAU	Ioan
LEJEUNE	Gérard
LEPROVOST	Christian
MADAR	Roland
MERMET	Jean
MEUNIER	Jacques
MICHEL	Jean-Marie
NAYROLLES	Bernard
PEUZIN	Jean-Claude
PIAU	Monique
RENOUARD	Dominique
SENATEUR	Jean-Pierre
SIFAKIS	Joseph
SIMON	Jean-Paul
SUERY	Michel
TEODOSIU	Christian
VACHAUD	Georges
VAUCLIN	Michel
VENNEREAU	Pierre
VERJUS	Jean-Pierre
WACK	Bernard
YONNET	Jean-Paul



**SITUATION PARTICULIERE**

**PROFESSEURS D'UNIVERSITE**

**DETACHEMENT**

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

**SURNOMBRE**

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

**PERSONNES AYANT OBTENU LE DIPLOME  
D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES**

BECKER	M.	DANES	F.	GHIBAUDO	G.	MULLER	J.
BINDER	Z.	DEROO	D.	HAMAR	S.	NGUYEN TRONG	B.
CHASSERY	J.M.	DIARD	J.P.	HAMAR	R.	NIEZ	J.J.
CHOLLET	J.P.	DION	J.M.	LACHENAL	D.	PASTUREL	A.
COEY	J.	DUGARD	L.	LADET	P.	PLA	F.
COLINET	C.	DURAND	M.	LATOMBE	C.	ROGNON	J.P.
COMMAULT	C.	DURAND	R.	LE HUY	H.	ROUGER	J.
CORNUEJOLS	G.	GALERIE	A.	LE GORREC	B.	TCHUENTE	M.
COULOMB	J.L.	GAUTHIER	J.P.	MADAR	R.	VINCENT	H.
COURNIL	M.	GENTIL	S.	MEUNIER	G.	YAVARI	A.R.
DALARD	F.						



**PERSONNALITES AGREES A TITRE PERMANENT  
A DIRIGER DES TRAVAUX DE RECHERCHE**

<u>ENSEEG</u>	HAMMOU MARTIN-GARIN SARRAZIN SIMON	Abdelkader Régina Pierre Jean-Paul
---------------	---	---

<u>ENSERG</u>	BOREL	Joseph
---------------	-------	--------

<u>ENSIEG</u>	DESCHIZEAUX GLANGEAUD PERARD REINISCH	Pierre François Jacques Raymond
---------------	--	--

<u>ENSHMG</u>	ROWE	Alain
---------------	------	-------

<u>ENSIMAG</u>	COURTIN	Jacques
----------------	---------	---------

<u>C.E.N.G.</u>	CADET COEURE DELHAYE DUPUY JOUVE NICOLAU NIFENECKER PERROUD PEUZIN TAIEB VINCENDON	Jean Philippe Jean-Marc Michel Hubert Yvan Hervé Paul Jean-Claude Maurice Marc
-----------------	--	--

Laboratoires extérieurs :

<u>C.N.E.T.</u>	DEVINE GERBER MERCKEL PAULEAU	Rodericq Roland Gérard Yves
-----------------	--	--------------------------------------



## **REMERCIEMENTS**

Ce mémoire présente la part la plus importante des travaux de recherche que j'ai effectués au Laboratoire de Neurocybernétique du C.N.R.S., Marseille.

Je remercie Monsieur Nicolas Franceschini, Directeur de Recherche au C.N.R.S., pour m'avoir accueilli dans son équipe.

Pour avoir bien voulu apporter leur caution scientifique à ce travail en acceptant de faire parti du jury de Thèse, je remercie Messieurs :

- Philippe Coiffet, Directeur de Recherche au C.N.R.S. / Centre de Robotique Intégrée d'Ile de France (Paris).
- James Crowley, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Jeanny Hérault, Professeur à l'Université J. Fourier de Grenoble.
- Georges Salvini, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille.

Mes remerciements vont à tous ceux, qui par leur aide ou leur sympathie m'ont permis de mener à bien ce travail, en particulier : M. André, J. Creuzet, A. Garbail, P. Girault, N. Martin, S. Picaud, J. Piton, C. Raybier, J. Roumieu, A. Totin et A. Yvinec.

Je tiens à témoigner ma profonde reconnaissance à ma famille, ma compagne et tous mes amis pour leur patience et pour le soutien qu'ils ont su m'apporter ...



## **AVANT-PROPOS**

Ce projet est le fruit d'un travail commun, effectué par J.M. Pichon et C. Blanes et présenté sous la forme de deux mémoires séparés mais indissociables.

Le plan de ce travail, réparti à travers ces deux Thèses, est le suivant :

### ***Thèse J.M. Pichon***

#### ***1ère partie : Principes et simulation du robot***

- Chapitre I : Introduction générale (commune aux deux mémoires).
- Chapitre II : Principes du système visuel du robot basé sur la détection locale du mouvement. Méthodes de simulation.
- Chapitre III : Analyse d'un Détecteur Élémentaire de Mouvement : performances et limites.
- Chapitre IV : L'oeil-DEM complet: architecture et performances.
- Chapitre V : L'oeil-DEM appliqué à l'évitement d'obstacles : analyse comportementale du robot.
- Chapitre VI : Discussion et perspectives.
- Annexe : La Mouche (commune aux deux mémoires).

### ***Thèse C. Blanes***

#### ***2ème partie : Implémentation opto-électronique et réalisation du prototype***

- Chapitre I : Introduction générale (commune aux deux mémoires)
- Chapitre II : Problèmes liés à la conception et la réalisation du prototype de robot mobile autonome et de son architecture parallèle.
- Chapitre III : Principes et réalisation d'un Détecteur Élémentaire de Mouvement, clef du système visuel du robot.
- Chapitre IV : Construction du système visuel du robot.
- Chapitre V : Implémentation du système de navigation du robot selon une architecture parallèle de réseaux analogiques.
- Chapitre VI : Le prototype du robot.
- Chapitre VII : Conclusion.
- Annexe : La Mouche (commune aux deux mémoires).



## **SOMMAIRE**

Liste des abréviations, définitions et notations .....	17
Chapitre I .....	21
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	
I.1. Situation et objectifs du projet .....	25
I.2. Bref tour d'horizon sur la recherche en robotique mobile .....	28
I.2.1. Les capteurs et l'aspect sensoriel en robotique mobile .....	29
I.2.2. Le système de navigation d'un robot mobile .....	30
I.2.3. Les projets "complets" de RMAs.....	32
I.2.4. Conclusion .....	34
Chapitre II .....	35
<b>PROBLEMES LIES A LA CONCEPTION ET A LA REALISATION DU PROTOTYPE DE ROBOT MOBILE AUTONOME ET DE SON ARCHITECTURE PARALLELE</b>	
II.1. Pourquoi un prototype .....	39
II.2. L'architecture parallèle du prototype .....	40
II.2.1. Traitement parallèle du signal : une approche bionique .....	40
II.2.2. Architecture parallèle embarquée .....	41
II.3. Choix technologiques pour la réalisation du prototype .....	41
II.3.1. La technique "électronique analogique" .....	41
II.3.2. La technologie C.M.S. (Composants pour Montage en Surface) .....	41
II.3.3. L'optique composée de mini-lentilles .....	42
II.4. Solutions bioniques d'interactions parallèles .....	42
II.4.1. Des neurones aux modélisations électroniques .....	43
II.4.2. Interactions parallèles par propagation dans des réseaux de résistances .....	45
a. Réseau échelle de résistances .....	45
b. Réseau échelle bouclé de résistances .....	47
II.4.3. Interactions parallèles par propagation dans des réseaux à diodes .....	49
a. Détecteur de minimum à diodes.....	49
b. Détecteur de maximum à diodes .....	49
c. Réseau échelle à diodes pour propagation unilatérale .....	52
d. Réseau échelle à diodes pour propagation bilatérale .....	54
e. Réseau échelle bouclé à diodes .....	54

Chapitre III .....	57
<b>PRINCIPES ET REALISATION D'UN DETECTEUR ELEMENTAIRE DE MOUVEMENT, CLEF DU SYSTEME VISUEL DU ROBOT</b>	
III.1. Généralités sur la réalisation du système visuel .....	61
III.1.1. Performances souhaitées.....	61
III.1.2. Solution retenue.....	61
III.1.3. Méthodes de travail.....	61
III.2. Implémentation d'un Détecteur Élémentaire de Mouvement : D.E.M. ....	62
III.2.1. Configuration de base du D.E.M.....	62
a. Rôle et principe de fonctionnement .....	62
b. Contraintes liées au système embarqué .....	63
c. Synoptique de traitement : étages du D.E.M. opto-électronique .....	64
III.2.2. Dispositif expérimental de test des D.E.M.s .....	66
III.2.3. Extraction de fronts de contraste.....	69
a. Système optique.....	69
b. Photodétection .....	74
c. Filtrage temporel linéaire.....	87
d. Filtrage non-linéaire en amplitude et génération d'impulsion normée .....	94
III.2.4. Signal caractérisant le retard.....	97
a. Génération d'une fonction Retard d'allure exponentielle décroissante retardé.....	98
b. Multiplication : échantillonnage par détection de minimum .....	103
c. Mélange par détection de maximum .....	105
III.2.5. Récapitulatif et performances .....	107
III.2.6. Implémentation d'un D.E.M. bi-directionnel .....	111
a. Principe .....	111
b. Description du circuit.....	111
Chapitre IV .....	115
<b>CONSTRUCTION DU SYSTEME VISUEL DU PROTOTYPE DE ROBOT</b>	
IV.1. Système sensoriel du robot : la vision .....	119
IV.2. L'oeil D.E.M. : optique composée, proximètre, réseau de D.E.M.s .....	119
IV.2.1 Architecture de l'oeil .....	119
a. Cahier des charges .....	119
b. Solution retenue .....	120
IV.2.2. Réalisation électronique d'un réseau de D.E.M.s .....	122
a. Module élémentaire .....	122
b. Carte mère .....	126
IV.2.3. Réalisation optique .....	128
a. Champ visuel latéral : optique composée .....	128
b. Champ visuel frontal : proximètre .....	131
IV.2.4. Récapitulatif et performances .....	133

IV.3. Le détecteur de cible du robot .....	133
IV.3.1. Cahier des charges .....	133
IV.3.2. Réalisation optique .....	135
IV.3.3. Réalisation électronique .....	137
Chapitre V .....	143
<b>IMPLEMENTATION DU SYSTEME DE NAVIGATION DU ROBOT SELON UNE ARCHITECTURE PARALLELE DE RESEAUX ANALOGIQUES</b>	
V.1. Stratégie de navigation du robot .....	147
V.2. Principe de calcul parallèle de l'algorithme anticollision .....	148
V.2.1. Zone autorisée et zone interdite .....	148
V.2.2. Choix de la direction de braquage .....	148
V.3. Implémentation parallèle en réseaux analogiques de l'algorithme anticollision	
V.3.1. Position du problème .....	150
V.3.2. Principe général de l'implémentation parallèle du système anticollision .....	151
V.3.3. Architecture en réseaux implémentant l'algorithme anticollision .....	153
V.3.3. Electronique de la carte destinée au système anticollision .....	157
a. Périmètre de sécurité et visualisation : seuillage et LED .....	159
b. Propagation depuis la détection : réseau bouclé à diodes .....	160
c. Zone interdite, zone autorisée : seuillage .....	161
d. Propagation depuis la position du but : réseau échelle de résistances .....	162
e. Amplification analogique .....	163
f. Fusion multisensorielle par détection de minimum .....	163
g. Extraction spatiale de la direction à suivre : détecteur de maximum et comparateur .....	164
h. Valeur des angles gauche et droit : réseaux échelles de résistances .....	165
i. Angle en Volts et sens de rotation : détecteur de maximum et comparateur ...	166
j. Carte électronique du système anticollision .....	166
Chapitre VI .....	171
<b>LE PROTOTYPE DU ROBOT</b>	
VI.1. Système de locomotion .....	175
VI.1.1. Cahier des charges .....	175
VI.1.2. Description de la plate-forme mobile .....	175
a. Mécanique .....	175
b. Performances .....	178

VI.2. Commande en vitesse des moteurs du robot .....	178
VI.2.1. Stratégie de déplacement .....	178
VI.2.2. Asservissement en vitesse des moteurs du robot .....	180
VI.2.3. Interface entre le module anticollision et les moteurs de la plate-forme .....	182
a. Mise en marche : émetteur-récepteur radio-électrique .....	182
b. Carte asservissement robot .....	183
VI.3. Architecture mécanique du robot .....	186
Chapitre VII .....	189
<i>CONCLUSION</i>	
VII.1 Résumé des principaux dispositifs électroniques de la chaîne optomotrice du robot	
VII.1.1. Dispositif sensoriel (cf. Chapitres III et IV).....	193
VII.1.2. Dispositif anticollision (cf. Chapitre V) .....	194
VII.1.3. Dispositif de locomotion (cf. Chapitre VI).....	194
VII.2. Aspects liés à la conception et à la réalisation du prototype .....	194
VII.2.1. Aspect détection du mouvement : mesure de vitesse angulaire .....	194
VII.2.2. Aspect optique.....	195
VII.2.3. Aspect traitement parallèle : interconnexion, fusion multisensorielle .....	196
VII.2.4. Aspect énergétique .....	196
VII.2.5. Aspect intégration des divers sous-systèmes .....	197
Annexe .....	199
<i>LA MOUCHE</i>	
A.1. Ce qui fait l'intérêt de la mouche .....	203
A.2. L'appareil visuel de la mouche .....	204
A.2.1. Introduction .....	204
A.2.2. L'échantillonnage de l'espace par l'ensemble cornée-rétine .....	205
A.2.3. Les unités de traitement .....	212
a. "Voir" en termes de réseaux .....	212
b. Les neurones détecteurs de mouvement de la lobula-plate .....	213
c. La lamina : une mise en forme de l'information .....	215
d. La medulla : le fossé qui sépare lamina et lobula .....	218
A.3. Des détecteurs élémentaires de mouvement .....	219

---

A.3.1. Des modèles pour mesurer le mouvement .....	219
A.3.2. Expériences sur un neurone détecteur de mouvement (H1) .....	222
a. L'adaptation de H1 en réponse au mouvement .....	223
b. La contribution de chaque corrélateur à la réponse de H1 .....	224
c. Caractéristiques dynamiques et câblages de chaque D.E.M. ....	224
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>227</b>



***LISTE DES ABREVIATIONS,  
DEFINITIONS ET NOTATIONS***

## *Abréviations*

C.M.S. : Composants pour Montage en Surface.

D.E.M. : Détecteur Élémentaire de Mouvement.

## *Définitions*

Oeil D.E.M. : Le système visuel principal, constitué de Détecteurs Élémentaires de Mouvement, qui permet au robot de détecter les obstacles sur les 360° du plan azimutal.

Détecteur de cible : Le système de vision additionnel permettant de détecter une cible (lampe) sur les 360° du plan azimutal.

Ommatidie : Module opto-électronique constituant l'une des voies d'entrée d'un D.E.M., à laquelle est associée un axe optique. L'angle entre deux ommatidies adjacentes est appelé "angle interommatidial".

Couronne : Disposition circulaire d'éléments colonnaires identiques *non interconnectés*.

Colonne : Ensemble d'éléments connectés entre plusieurs couronnes *concentriques*.

Réseau : Système périodique d'éléments identiques interconnectés latéralement

## *Notations*

$V_0$  : Vitesse linéaire (constante) de déplacement du robot.

$\Omega$  : Vitesse angulaire relative des points de contraste.

$D$  : Distance radiale des contrastes au dispositif de mesure.

$L_b$  : Largeur d'un objet dans le plan azimutal.

$m$  : Valeur du contraste ( $0 < m < 1$ ).

$D_f$  : Distance de mise au point d'un objet dans le plan.

$\Phi_{lent}$  : Diamètre de la lentille d'une ommatidie.

$f$  : Distance focale de la lentille d'une ommatidie.

$f/\Phi_{\text{lent}}$  : Ouverture relative ("f-number") de la lentille d'une ommatidie.

$\Phi_{\text{dia}}$  : Diamètre du diaphragme placé dans le plan focal d'une lentille, devant l'embouchure d'une fibre optique.

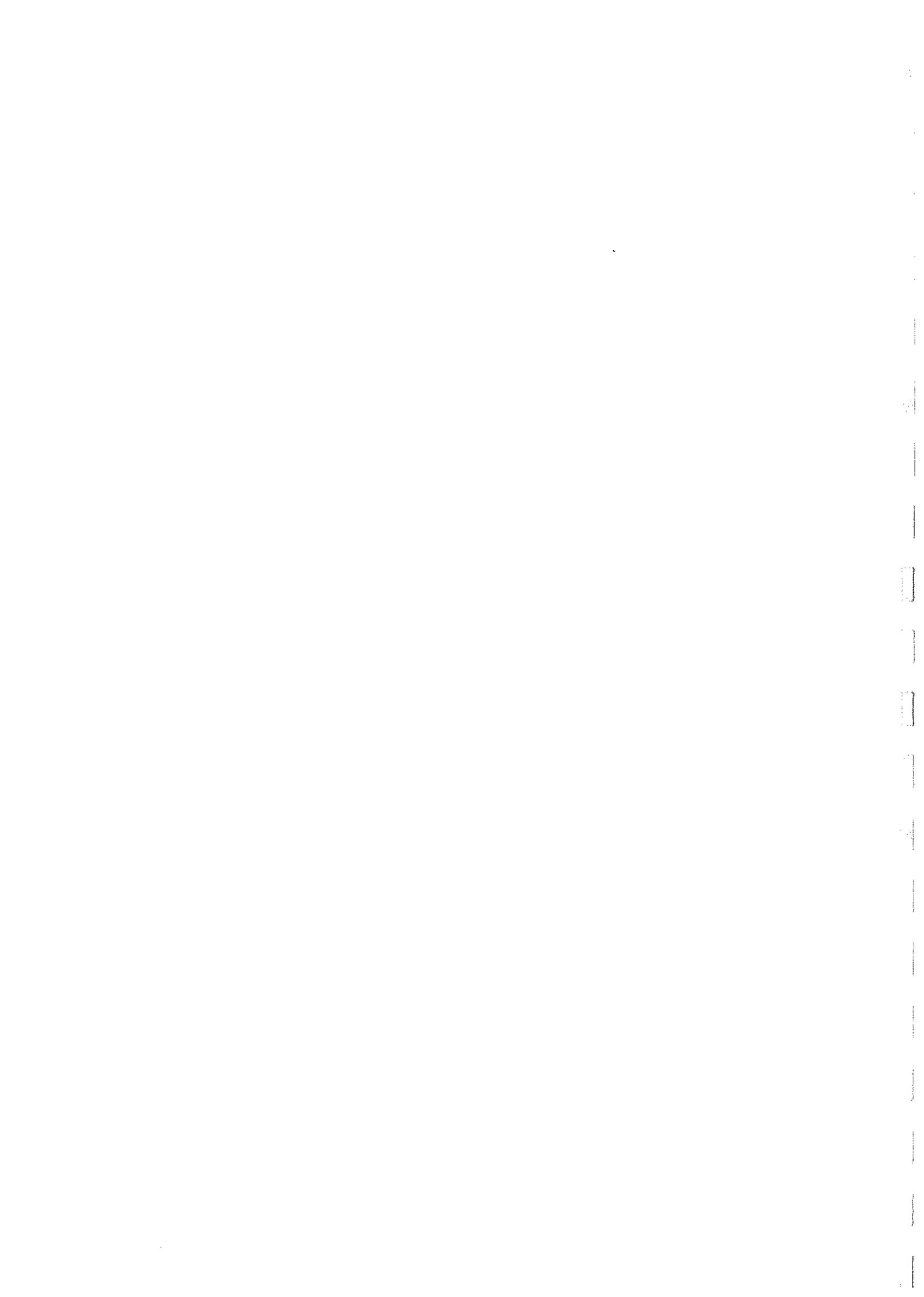
$\Phi_{\text{f-o}}$  : Diamètre d'une fibre optique.

$\Phi_{\text{pin}}$  : Diamètre de la surface active d'une photodiode PIN.

$\varphi$  : Angle polaire entre l'axe optique d'une ommatidie et la direction de déplacement du robot (ou du charriot) qui la porte.

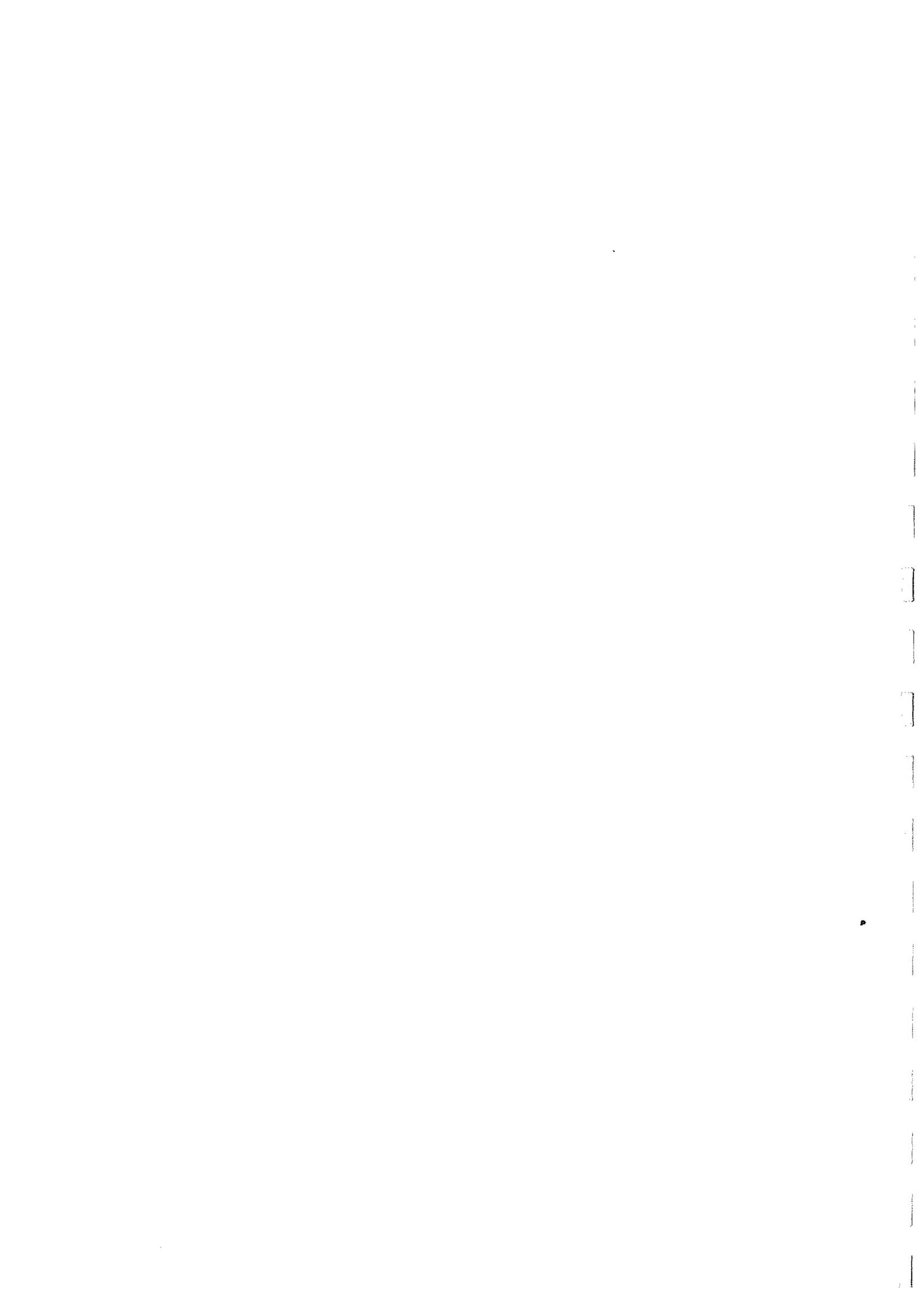
$\Delta\varphi$  : Angle interommatidial = Angle entre deux directions de visée adjacentes.

$\Delta\rho$  : Angle d'acceptance = Largeur à mi-hauteur du diagramme de sensibilité directionnelle d'une ommatidie.



***CHAPITRE I***

***INTRODUCTION GENERALE***



## I.1. Situation et objectifs du projet

## I.2. Bref tour d'horizon sur la recherche en robotique mobile

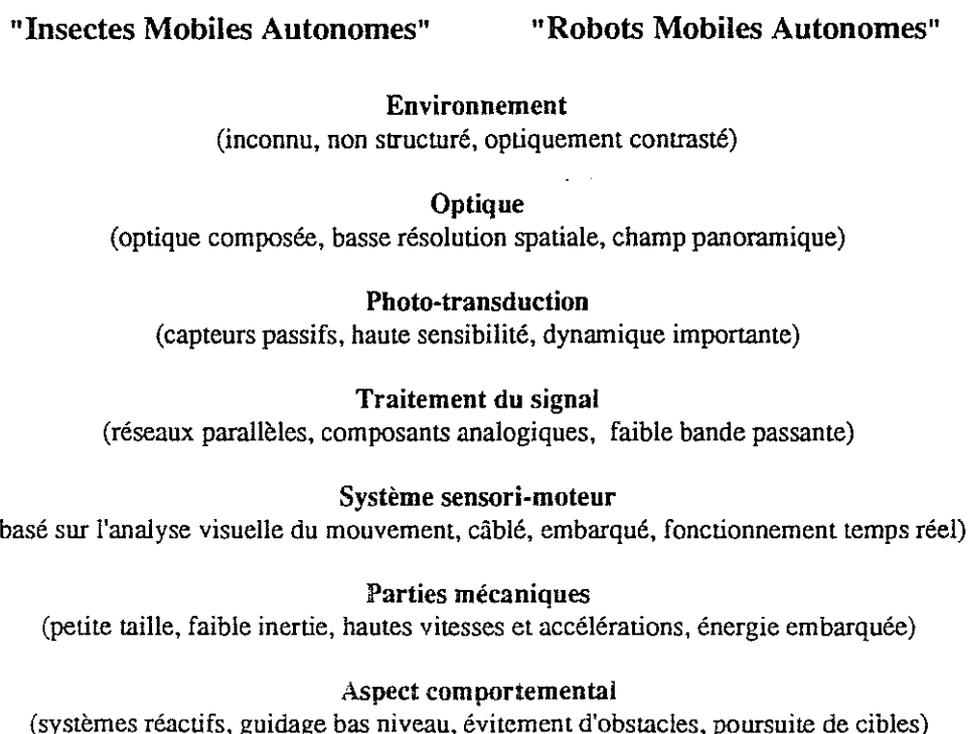
- I.2.1. Les capteurs et l'aspect sensoriel en robotique mobile
- I.2.2. Le système de navigation d'un robot mobile
- I.2.3. Les projets "complets" de RMAs
- I.2.4. Conclusion



## I.1. Situation et objectifs du projet

Depuis longtemps la nature nous fournit un certain nombre d'exemples de "*créatures mobiles autonomes*" sans qu'on y fasse nécessairement attention. Les *insectes* en particulier, avec leur petite taille, leur système nerveux "relativement" simple et leurs acrobaties impressionnantes, en sont sans doute la meilleure illustration. Pour se déplacer rapidement dans des environnements hautement complexes et imprévisibles, les insectes résolvent des problèmes de *vision bas niveau*, réputés ardues en robotique, tel le problème d'éviter les collisions ou de manoeuvrer rapidement parmi des obstacles inconnus. Et la manière dont les insectes procèdent retient d'autant plus l'attention que leur oeil utilise une mosaïque de *photorécepteurs passifs* échantillonnant le monde visuel de manière plus que *rudimentaire*. Dans ces conditions, pourquoi ne pas tenter d'appréhender certains problèmes "bas niveau" de la robotique mobile en s'inspirant des créatures biologiques ?

Une telle *approche bionique* présente tout d'abord l'avantage d'être validée au *plan comportemental* par les performances optomotrices des insectes, que les robots mobiles actuels sont encore loin d'avoir atteintes. D'autre part, elle reste *réaliste* dans la mesure où les principes de *traitement du signal* mis en oeuvre dans le système visuel des insectes (et plus particulièrement dans celui de la *mouche*) sont partiellement connus et décrits tant au plan fonctionnel qu'au plan du câblage neuronal (pour une récente revue cf. Stavenga et Hardie, 1989 ; Annexe) .



**Fig.I-1** : Liste des caractéristiques bioniques résumant le contexte du projet

Bien que fortement inspiré par la biologie, le projet de robot mobile autonome présenté ici ne doit pas pour autant être considéré comme une modélisation rigoureuse de la circuiterie neuronale de la mouche. Il est destiné plutôt à servir *d'outil expérimental* pour analyser les bases du *contrôle optomoteur bas-niveau* d'une créature mobile dans des situations réalistes et complexes. Contrairement aux plus classiques "approches calculatoires" de la vision (synthèse : Marr, 1982; Ullman, 1986) la principale contrainte ici est la *faisabilité technologique* de la chaîne sensori-motrice *complète* assurant de manière autonome le guidage du robot (Pichon et al., 1989). Une telle contrainte impose en particulier de développer *simultanément* la partie sensorielle et la partie motrice du système parce que (et cela va apparaître clairement dans ce travail) ces deux parties *interagissent* fortement. Le mot "faisabilité" n'a de sens que s'il est défini en association avec une liste de contraintes réalistes. Dans le contexte biologique de ce travail, cette liste a été établie à partir des propriétés essentielles qui caractérisent les insectes et elle est résumée à la Fig.I-1. Cette liste couvre de nombreux domaines, qui font appel aussi bien à de la technologie (optique, architecture électronique, mécanique), à du traitement de signal (vision, analyse du mouvement, filtrage spatio-temporel) qu'à l'organisation des couches de contrôle du système de navigation du robot (gestion des tâches de bas niveau, algorithmes de navigation). Dans le cadre de ce travail, cet ensemble de contraintes doit seulement être interprété comme une base de départ mettant l'accent sur l'*aspect multidisciplinaire* très spécifique au domaine de la robotique mobile.

Plus précisément, les propriétés dictées par le système nerveux de la mouche et retenues ici pour la construction du robot sont les suivantes:

-L'analyse visuelle du mouvement

L'objectif ici est de développer le système de guidage du robot sur la seule base de *l'analyse visuelle du mouvement*, une faculté qui joue un rôle fondamental dans les systèmes visuels biologiques (rev. Götz, 1968; Ullman, 1981; Nakayama, 1985; Hildreth et Koch, 1987). Bien que cette perception du mouvement commence à être reconnue comme essentielle dans les processus de guidage des animaux (synthèse récente : Warren et Wertheim, 1990), les détails du feed-back visuo-moteur sous-jacent au contrôle de la navigation sont encore loin d'être compris. L'analyse visuelle du mouvement semble en tout cas bien adaptée à la famille des créatures *mobiles* qui sont, par définition, "construites" pour se déplacer relativement à leur environnement.

-L'utilisation de Détecteurs Élémentaires de Mouvement (DEMs)

Tout le traitement visuel du mouvement va être effectué par un réseau unique constitué d'une centaine de DEMs opto-électroniques. Or ces DEMs sont très fortement inspirés, tant au niveau de leur principe *fonctionnel* qu'au niveau de leur câblage, de détecteurs de

à demander

mouvement neuroniques dont le principe a été finement caractérisé chez la mouche (cf. Annexe; Reichardt, 1969; Buchner, 1984; Franceschini et al., 1989). Ce sont d'ailleurs ces micro-circuits neuronaux qui ont constitué le point de départ de toute cette étude.

#### -Une optique composée

Le système visuel du robot va respecter une caractéristique typique de l'oeil des insectes, qui est l'utilisation d'une optique composée. En dehors de son aspect fondamentaliste, ce choix présente l'avantage :

-de pouvoir fabriquer un oeil à champ panoramique ( $360^\circ$  dans le plan azimutal) sur un principe homogène pour toutes les directions de l'espace, à savoir une lentille et un photorécepteur pour toute direction de visée.

-de pouvoir régler indépendamment (donc éventuellement de façon différente) les caractéristiques optiques dans chacune des directions de visée de l'oeil. Ce deuxième point est d'ailleurs bien illustré par l'exemple de la mouche, où la partie frontale de l'oeil est équipée de lentilles (facettes) de diamètre et de distance focale plus importants que dans la partie latérale (cf. Annexe).

#### -Une résolution spatiale relativement faible

L'oeil composé du robot va faire appel à une *centaine* de directions optiques seulement pour échantillonner quasiment les  $360^\circ$  du plan azimutal. Cette résolution grossière est celle qui caractérise l'oeil de la mouche domestique où le pas de l'échantillonnage angulaire se situe entre  $1^\circ$  et  $3^\circ$ . Cette contrainte est relativement peu habituelle en visionique où la tendance est au contraire d'augmenter la résolution spatiale afin de diminuer statistiquement l'effet des problèmes de correspondance (Bolles et al., 1987).

Par contre, étant donné que chaque direction optique correspond à une maille d'un réseau câblé de DEMs chargé du traitement du signal visuel, "faible-résolution" est synonyme *d'économie* pour les architectures parallèles câblées derrière l'optique et impliquées dans l'ensemble de la chaîne sensori-motrice. On est donc devant un concept, là encore peu habituel (surtout en réseaux de neurones), qui impose un parallélisme non pas *massif*, mais au contraire *"parcimonieux"*. Hormis sa valeur biologique, cette contrainte présente des avantages évidents au plan robotique, tant au niveau technologique (miniaturisation par exemple) qu'au niveau coût.

#### -Une chaîne optomotrice "réflexe" implémentée en réseaux parallèles analogiques

Toute la chaîne de guidage bas niveau du robot va reposer sur une architecture organisée en deux *réseaux parallèles*, traitant le signal sous forme *analogique* : un réseau de DEMs qui constituera la partie sensorielle proprement dite et un second réseau qui, en interagissant le réseau de DEMs avec les moteurs du robot, contrôlera la navigation bas-niveau de ce dernier. Ce principe de réseaux parallèles et analogiques répond à une caractéristique

→ demander

assez générale des systèmes biologiques, qui se retrouve plus particulièrement dans le système nerveux de la mouche, où pratiquement toute l'information visuelle est traitée dans trois principales couches périphériques câblées derrière l'optique. Celles-ci se présentent sous la forme de réseaux de neurones "analogiques", réseaux cristallins et connectés entre eux de façon rétinotopique dans des structures appelées ganglions optiques (cf. Annexe).

#### -Un comportement réactif

La chaîne optomotrice est ici spécifiquement développée pour conférer au robot un comportement *bas-niveau* qui, dans le cadre de ce projet, va se limiter à un déplacement à *haute vitesse* dans un environnement *inconnu*, tout en évitant les collisions avec d'éventuels obstacles. L'efficacité d'un tel comportement *réactif* repose sur des réflexes optomoteurs "intelligents" qui, d'une part sont *décentralisés* (pas de raisonnement "haut niveau"), d'autre part au plan traitement du signal minimisent le nombre d'étapes de traitement. Ce choix est complètement validé par l'exemple de la mouche qui réussit à voler à 3m/s alors même que les moto-neurones commandant les muscles des ailes, des pattes et de la tête sont séparés de la matrice de photorécepteurs par seulement 6-7 *synapses* (une synapse étant représentative d'une étape élémentaire dans le traitement du signal) (Strausfeld, 1989).

Toutes les propriétés énumérées ci-dessus constituent un ensemble de caractéristiques apparemment fondamentales pour la survie des créatures mobiles vivantes. Le défi que nous avons tenté de relever dans le cadre de ce projet a donc été de développer un prototype de robot mobile autonome en adoptant un compromis entre ces contraintes bioniques d'origine conceptuelle, et d'autre part les contraintes liées aux technologies aujourd'hui disponibles.

Cette approche bionique est une voie de la robotique mobile (Meyer et Wilson, 1991) qui, si elle est relativement *nouvelle*, ne remet pas en question pour autant les autres approches plus traditionnelles dont elle se veut au contraire *complémentaire*.

### I.2. Bref tour d'horizon sur la recherche en robotique mobile

Les Robots Mobiles Autonomes (RMA) (pour une revue complète cf. Giralt, 1987) sont nés avec la robotique dite de troisième génération et sont donc des machines capables avant tout de réaliser le lien entre *perception* et *action*. Par définition le comportement d'un RMA n'est pas explicitement programmé à l'avance : il doit pouvoir se reconfigurer au gré des tâches à effectuer et *s'adapter* en temps réel à toute modification imprévue du monde qui l'entoure. Ce qui paraît caractériser le plus un RMA c'est son pouvoir *d'interaction* avec l'environnement très complexe dans lequel il évolue, ainsi que son haut degré d'autonomie opérationnelle et décisionnelle.

L'intelligence requise par un RMA pour effectuer sa tâche se répartit entre la perception (fusion des informations délivrées par les multiples capteurs, modélisation, représentation), la navigation (architectures de locomotion, contrôle des mouvements, raisonnement géométrique ou cinématique), la décision (choix de but, contrôles d'exécution d'action) et éventuellement l'apprentissage.

Dans ce qui suit nous allons illustrer, à travers un certain nombre de travaux, les aspects qui nous intéressent le plus dans le cadre de ce projet, à savoir l'aspect purement sensoriel (capteurs) et la navigation bas-niveau, et pour terminer présenter les projets de RMAs "complets" les plus connus (au moins historiquement).

### 1.2.1. Les capteurs et l'aspect sensoriel en robotique mobile

De manière générale, les capteurs servent à l'acquisition de données tridimensionnelles et sont soit actifs (émetteurs-récepteurs à ultrasons, ou infrarouge, télémètre laser, à temps de vol ou à lumière structurée), soit passifs (capteurs visuels de tout type, caméras C.C.D., barrettes de photodiodes, etc.).

Les émetteurs-récepteurs à ultrasons (les sonars) peuvent effectuer des estimations en distance (par mesure du temps de vol) allant de quelques dizaines de centimètres à une dizaine de mètres avec une précision de 2 à 3 %. Afin d'assurer l'échantillonnage sur 360° dans le plan azimutal, ils sont disposés généralement en ceinture sur le robot (Bauzil et al., 1981). Les difficultés liées à l'emploi de sonars sont les réflexions spéculaires sur les surfaces lisses, les échos multiples, la diaphonie, l'ouverture angulaire relativement large du cône d'émission et de réception, et leur lenteur (due à la vitesse de propagation du son) qui limite la vitesse de balayage (une seconde au moins pour une ceinture de 24 senseurs).

Les dispositifs à infrarouge sont généralement utilisés soit sous forme de proximètres (Kanade et Asaka, 1981; Moser et Everet, 1989), soit sous forme de balises (émettrices) disposées dans l'environnement et susceptibles d'être détectées par des récepteurs disposés à bord du robot, permettant à ce dernier de "recaler" sa trajectoire (cf. le robot sentinelle de la compagnie Denning aux USA).

La télémétrie laser repose sur l'utilisation d'un émetteur de lumière structurée tel qu'un faisceau ponctuel, ou une nappe, ou encore un motif en forme de grille rayonnant vers la scène à analyser, et est généralement associée à une caméra située à une distance connue de la source émettrice ( cf. la caméra ERIM du projet ALV, Hebert, 1986).

La vision passive représente une part importante de la télémétrie 3D utilisée en robotique mobile. Au plan matériel, elle repose le plus souvent sur des caméras CCD. Les "chips" CCD se présentent sous la forme de matrices dont la résolution peut aller aujourd'hui jusqu'à 4000x4000 pixels ou de barrettes linéaires pouvant comporter jusqu'à 4096 pixels.

Le principe de vision-3D passive le plus connu est la stéréovision (Horn, 1986) et repose sur une opération de triangularisation sur deux images prises depuis des positions différentes. Une telle opération peut être réalisée soit à l'aide de deux caméras (stéréo-vision binoculaire) soit à l'aide d'une seule caméra (stéréo-mouvement). La stéréo-vision repose la plupart du temps sur l'extraction et la "mise en correspondance" de primitives, qui sont généralement des segments linéaires, horizontaux et verticaux (Ayache et Faugeras, 1987).

La vision dynamique (Si Ahmed, 1986; Garnousset, 1986) repose sur l'analyse d'une séquence d'images rapprochées dans le temps provenant d'une même caméra (flux optique; Gibson, 1958). C'est sans doute le domaine le plus complexe de la vision, car l'extraction de signaux relatifs au flux optique sert à caractériser en trois dimensions non seulement la géométrie (cf. stéréo-mouvement, ci-dessus), mais également la cinématique du monde environnant (Nagel, 1986).

### I.2.2. Le système de navigation d'un robot mobile

Dans la littérature classique, le problème de la navigation est souvent formulé comme un problème de planification de trajectoire orientée vers un but, problème où la représentation de l'environnement à partir des informations sensorielles apparaît comme essentielle. La navigation peut être soit prédéterminée (la planification est effectuée avant que robot n'entame son mouvement) soit réactive (la modification de la trajectoire s'effectue en temps réel au cours du déplacement, à partir du feed-back sensoriel). De la même manière la navigation peut faire appel :

-soit à des méthodes globales fondées sur une prospection de l'espace libre à partir d'une représentation sur les obstacles connus.

-soit à des méthodes locales telles que les champs de potentiels (Khatib, 1986) : ces méthodes font appel aux senseurs externes et proprioceptifs du robot.

La description qui suit (d'après Mataric, 1990) présente quelques travaux relatifs à la représentation de l'environnement et à la planification de trajectoires pour un robot mobile.

#### Modèles multiniveaux de l'environnement

- Chatila et Laumond (1985) proposent un modèle de représentation de l'environnement structuré en trois niveaux : géométrique, topologique et sémantique.

L'avantage d'un modèle du monde avec plusieurs niveaux est qu'il offre différents types d'information auxquels on peut, selon le besoin, accéder indépendamment par différentes parties du système de contrôle du robot et vérifier sa cohérence. La contrepartie de cette approche est l'augmentation de la complexité lors de la remise à jour de ces modèles.

– Un autre exemple de modélisation multiniveau est proposé par Elfes (1986). Cette modélisation est formulée selon trois axes: un "axe d'abstraction" basé sur un modèle topologique des obstacles, un "axe géographique" qui regroupe des vues locales de l'environnement, et un "axe résolution" (sorte de zoom) qui accroît ou diminue le niveau de détail selon la vitesse imposée pour le traitement des informations.

#### Remise à jour des modèles de l'environnement

– Crowley (1985) propose une méthode de réactualisation de l'environnement basée sur deux modèles : un modèle global et un modèle local composite. Le modèle global est acquis pendant une phase d'apprentissage et est mémorisé une fois pour toutes. Le modèle local composite est réactualisé à chaque instant à partir du modèle global et des données sensorielles prélevées pendant le déplacement du robot. La navigation repose sur le modèle composite qui permet notamment au robot de se localiser dans l'espace.

– Dans le même domaine, Drumheller (1987) s'intéresse à une méthode d'auto-localisation basés sur une comparaison entre les données (prétraitées) fournies par des sonars et un modèle de l'environnement fourni a priori. Il montre entre autres que cette méthode de localisation reste valable même avec des données sensorielles bruitées.

#### Systèmes réactifs

– Payton (1988) suggère une méthode basée sur une "fonction coût". L'environnement est modélisé sous la forme d'une grille formée de cellules et le but est défini a priori. Une recherche préalable permet de définir pour chaque cellule une fonction coût. La génération de la trajectoire vers le but consiste ensuite pour le robot à suivre le chemin qui, à chaque instant, minimise la fonction coût.

– Le travail décrit par Arkin (1987) présente un autre exemple d'une approche combinant les techniques locales et globales pour le choix d'une trajectoire. Le système qu'il propose est divisé en trois niveaux hiérarchiques: la planification, la navigation, et le pilotage. La planification consiste à interpréter les commandes de haut-niveaux et à fixer les critères de la mission. La navigation effectue les tâches classiques de planification de trajectoire. Le pilotage est responsable de l'exécution de chaque segment de la trajectoire. Le pilote gère de manière répartie plusieurs tâches en utilisant pour chacune d'elles des modules spécialisés. Chaque module génère de façon concurrente un champ de potentiel généralisé, et leurs sorties sont fusionnées sous la forme d'un vecteur résultant.

– Connell (1989) propose pour le système de contrôle d'un robot mobile (Herbert) une architecture répartie, qui fait appel à un traitement décentralisé. Un tel système ne construit

pas de représentation spatiale de l'environnement, et ne mémorise pas non plus ses trajectoires. C'est Brooks (1986) qui le premier a proposé ce modèle d'architecture répartie ("subsumption architecture") organisée hiérarchiquement en couches concurrentes, chaque couche étant responsable d'un comportement individuel avec un niveau de priorité qui lui est propre.

### I.2.3. Les projets "complets" de RMAs

Les premiers RMAs "complets" (au sens de "réellement construits") sont apparus dans les années 1960, notamment avec le robot "Shakey" (1968-1973) développé au Stanford Research Institute (Nilsson, 1969). D'une hauteur de 1.5m, il possédait deux roues motrices et deux roues folles, l'une à l'avant, l'autre à l'arrière. Son système de perception était une caméra TV associée à des détecteurs de proximité (tactiles). Il était relié par une liaison radio à un ordinateur central. Le système décisionnel était organisé en plusieurs niveaux, dont les plus bas commandaient les senseurs et effecteurs et assuraient la navigation. Le modèle de navigation utilisait une grille dont les noeuds représentaient les obstacles agrandis de la taille du robot, et dans laquelle étaient repérées la position du centre du robot et celle de son but.

On peut citer également le projet "Stanford Cart" (Moravec, 1983), qui a également débuté à cette époque (1966-1980) à l'Université de Stanford. Il possédait quatre roues manoeuvrant comme une voiture et pesait 100kg. Il était équipé d'une seule caméra et était relié à un ordinateur par une liaison radio. C'est l'un des premiers projets à avoir utilisé la vision, qui reposait ici sur une mesure stéréoscopique effectuée soit en déplaçant la caméra (robot arrêté) soit au cours du mouvement même du robot. Le système décisionnel s'intéressait uniquement au problème de vision et de navigation. Son traitement d'image nécessitait environ 10 à 15 minutes pour effectuer tous les 75cm une nouvelle représentation 3D de l'environnement.

Le projet suivant fut "Jason" (1970-1975), construit à l'Université de Berkeley (Coles et al., 1975). Il pesait plus de 130kg pour une hauteur de 1,20m et était équipé d'un bras manipulateur. Il possédait deux roues motrices à l'arrière et une roue folle à l'avant. Au niveau perception, il utilisait des proximètres à infrarouge et ultrasonores. Comme "Shakey" il était relié à un ordinateur central par un ombilical hertzien. Son système décisionnel se composait de deux générateurs de plans, le premier ordonnant les processus, le second tenant compte de l'environnement et des informations incertaines. Là encore, la navigation reposait sur un modèle géométrique de grille représentant la position et les dimensions des obstacles, agrandies de la moitié de la taille du robot.

Le robot "Rover" d'exploration de la planète Mars (1975-1979) a été développé par le "Jet Propulsion Laboratory" (Thomson, 1977). L'objectif de ce projet était de construire un robot mobile capable de fonctionner dans un environnement réaliste et sans intervention de l'homme. Il se résumait à une petite voiture à quatre roues motrices, équipée essentiellement d'un bras manipulateur, d'un télémètre laser et d'une caméra stéréoscopique. Il possédait des mini-calculateurs embarqués et était relié à un ordinateur central par radio. Le système de contrôle principal contrôlait à bord plusieurs processus (vision, navigation, manipulation). La navigation reposait, là encore, sur une grille construite à partir des données stéréométriques.

"Hilare" est un robot mobile français (Chatila, 1981) développé depuis 1977 au LAAS du CNRS (Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes de Toulouse). A l'origine, sa plate-forme mobile comportait deux roues motrices à l'arrière et une roue folle à l'avant. Pour la perception, il était équipé d'une caméra vidéo, d'un télémètre laser, d'une ceinture de 14 émetteurs-récepteurs à ultrasons, et d'un dispositif lui permettant de se repérer par rapport à des balises infrarouges disposées dans l'espace. Son premier objectif concernait la navigation, qui faisait appel à un modèle géométrique de l'environnement directement fourni par les capteurs, transformé ensuite en un modèle topologique décrivant les obstacles au sol. Le projet a été constamment enrichi et aujourd'hui "Hilare II" et "Hilare Junior" assurent sa descendance, l'accent étant mis sur une programmation au niveau tâche et sur la fusion multisensorielle.

Depuis le début des années 1980, le nombre de projets en robotique mobile s'est accru considérablement de sorte qu'il est impossible de continuer la liste historique commencée ci-dessus. Nous ne citerons que les plus connus, en nous intéressant plus particulièrement aux projets qui incorporent la vision :

- le projet "ALV" (Autonomous Land Vehicle) impliquant plusieurs universités américaines et la firme Martin Marietta, portait sur la perception de scènes naturelles (vision et caméra laser) et l'architecture logicielle de planification et de contrôle du mouvement (Dunlay, 1987).
- le projet "NavLab" de CMU (Carnegie Mellon University; Thorpes et al., 1987)
- le projet allemand VaMors de véhicule autonome : ce véhicule atteint près de 100km/h dans un environnement très spécifique sur une autoroute (Dickmans et Graefe, 1988). Le VaMors utilise de la vision dynamique avec essentiellement une caméra TV monoculaire pour contrôler son déplacement (en fait, une seconde caméra de distance focale différente, permet d'affiner la vision autour d'un point).
- le nouveau projet de "Mars Rover" du JPL et de CMU, dont l'objectif est l'envoi d'un véhicule sur Mars dans les années 2000.
- plusieurs projets japonais, qui ont vu le jour de 1983 à 1990 dans le cadre du programme "Advanced Robot Technology" du MITI.

et récemment trois projets européens (Giralt, 1990), assez appliqués, qui reflètent peut-être la tendance actuelle :

- Le projet MITHRA portant sur le développement de robots mobiles de télésurveillance.

- le projet VAP/RISP (Véhicule Automatique Planétaire / Robots d'Intervention sur Site Planétaire). A l'instar du "Mars Rover" il a pour objectif la construction d'un robot destiné à l'exploration de la planète Mars.

- le projet AMR (Advanced Mobile Robot) portant sur la conception de robots mobiles avancés destinés à l'intervention dans les domaines de la sécurité civile (Lacombe et Deplante, 1991).

Ces trois projets mettent l'accent sur les applications potentielles des robots mobiles pouvant être utilisés dans des domaines aussi variés que :

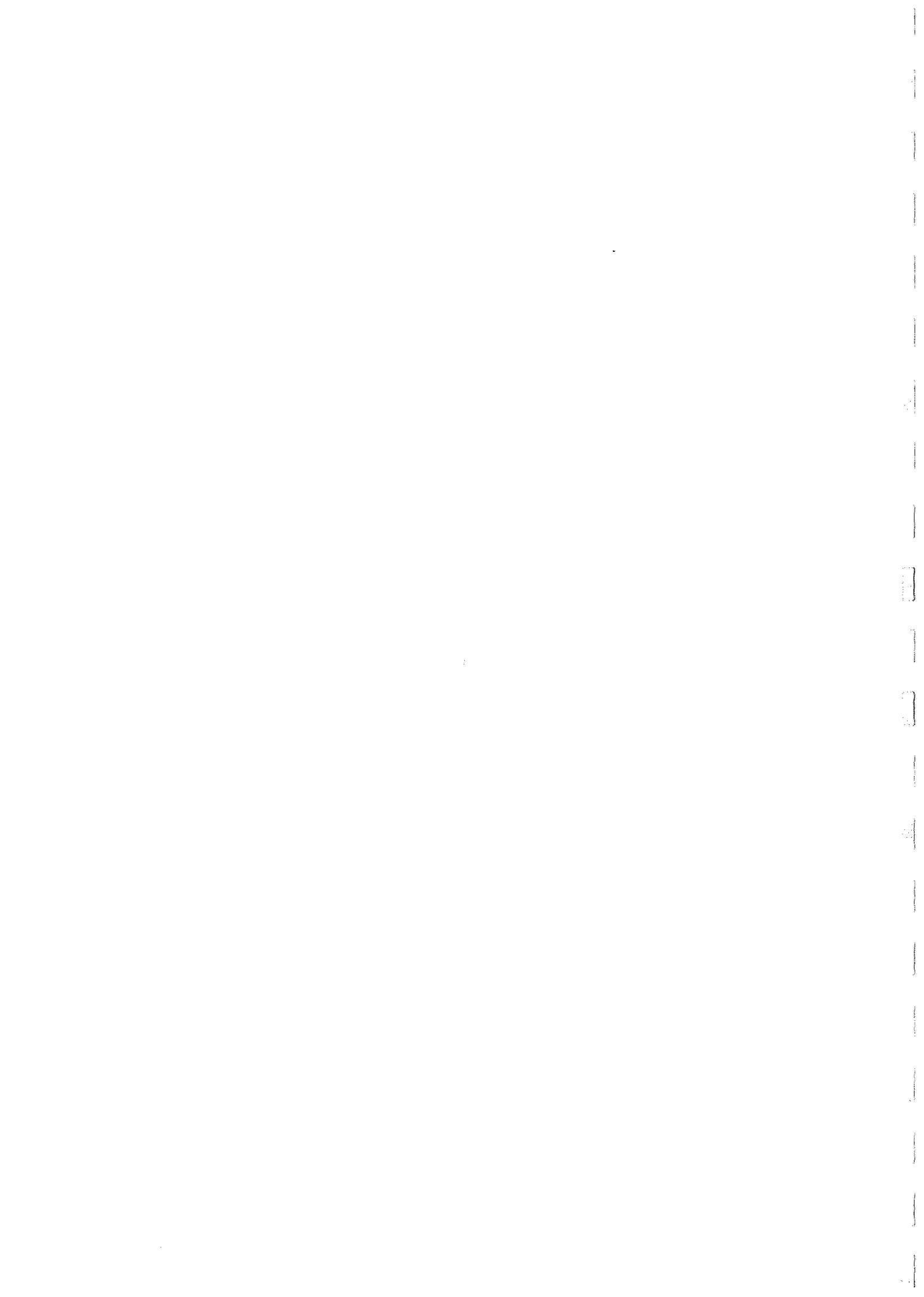
- le transport (industrie automobile, aéronautique);
- l'agriculture
- le service (nettoyement, milieu hospitalier, convoyage en milieu industriel,...)
- la sécurité (robots sentinelles, rondiers,...)
- les milieux hostiles ou réputés impénétrables (espace, milieux marins, nucléaire, défense,...)

#### I.2.4. Conclusion

Pour conclure ce bref tour d'horizon et revenir à des concepts plus fondamentaux, il est clair que plusieurs approches ou "écoles" coexistent dans le domaine international de la robotique mobile autonome et de l'intelligence artificielle qui lui est associée. Dans le cadre de notre projet inspiré par la biologie, on retiendra plus particulièrement l'approche de Brooks, connue également sous le nom d'approche "insecte artificiel" (Brooks et al., 1990). En fait, l'expression "insecte artificiel" évoque essentiellement "*l'aspect miniaturisation*", "*l'aspect robot réactif*" et l'aspect "*population de robots*" mais ne caractérise pas obligatoirement des réalisations neuromimétiques.

## ***CHAPITRE II***

***PROBLEMES LIES A LA CONCEPTION ET A LA REALISATION  
DU PROTOTYPE DE ROBOT MOBILE AUTONOME  
ET DE SON ARCHITECTURE PARALLELE***



## II.1. Pourquoi un prototype

## II.2. L'architecture parallèle du prototype

II.2.1. Traitement parallèle du signal : une approche bionique

II.2.2. Architecture parallèle embarquée

## II.3. Choix technologiques pour la réalisation du prototype

II.3.1. La technique "électronique analogique"

II.3.2. La technologie C.M.S. (Composants pour Montage en Surface)

II.3.3. L'optique composée de mini-lentilles

## II.4. Solutions bioniques d'interactions parallèles

II.4.1. Des neurones aux modélisations électroniques

II.4.2. Interactions parallèles par propagation dans des réseaux échelles de résistances

a. Réseau échelle de résistances

b. Réseau échelle bouclé de résistances

II.4.3. Interactions parallèles par propagation dans des réseaux à diodes

a. Détecteur de minimum à diodes

b. Détecteur de maximum à diodes

c. Réseau échelle à diodes pour propagation unilatérale

d. Réseau échelle à diodes pour propagation bilatérale

e. Réseau échelle bouclé à diodes



Ce mémoire présente la conception et la réalisation du prototype et de son architecture parallèle. Il traite, de ce fait, de l'aspect technologique et de l'expérimentation dans des conditions réelles. Il valide concrètement les principes de vision et de navigation qui gouvernent le robot. Ces derniers ont été simulés sur ordinateur jusqu'au niveau cinématique et sont présentés dans la Thèse de J.M. Pichon.

## II.1. Pourquoi un prototype

Rappelons que l'objectif de l'ensemble du projet est d'abord de montrer que la détection visuelle du mouvement relatif permet, dans certaines conditions, d'estimer la position des objets dans l'environnement (cf. Chap.III). L'étape suivante est de montrer qu'un œil entier organisé en un réseau de détecteurs de mouvement (cf. Chap.IV) est suffisant au "guidage bas niveau" d'un robot mobile (cf. Chap.V).

Cette approche s'écarte d'emblée de l'utilisation de détecteurs "actifs" de type sonar, laser ou radar nécessitant tous l'émission d'un signal à partir du robot. Au contraire, nous avons opté pour une détection "passive", à l'instar des systèmes visuels animaux qui n'exigent aucune émission de la part du mobile et ne basent leurs calculs que sur les contrastes produits sur les objets par une source "auxiliaire" (soleil, lune, lampes artificielles stationnaires...). La solution choisie est d'autant plus intéressante pour un robot mobile *autonome* que la consommation de capteurs visuels "passifs" est inférieure à celle de détecteurs "actifs".

L'objectif ici est de construire un système de guidage opto-électronique léger (quelques kg) qui, embarqué sur une plate-forme mobile déjà existante (diamètre 30cm, hauteur 15cm, masse 10kg) permettrait à l'ensemble de se déplacer rapidement (50cm/s) et de façon autonome, dans un environnement optiquement contrasté et inconnu.

Le prototype du robot devra répondre à deux critères fondamentaux :

- 1- évoluer de manière totalement autonome sans aucun "ombilical", ni énergétique, ni informationnel (câble ou émetteur-récepteur hertzien le reliant à une centrale de calcul);
- 2- être doté d'un pouvoir de décision en temps réel donnant la priorité à l'évitement d'obstacles.

Il devra, entre autres, pouvoir présenter deux niveaux hiérarchiques de comportement :

- 1- errer sans but en évitant les obstacles.
- 2- se diriger vers un but (matérialisé par une lampe, fixe ou mobile, toujours visible depuis le robot), en donnant priorité à l'évitement d'obstacles.

La réalisation de ce prototype a pour rôle non seulement de prouver la faisabilité technologique du système complet, mais aussi de mettre en évidence tous les problèmes propres à un véhicule réel, qui n'ont pu être incorporés à la simulation par suite de leur complexité. Par exemple, la simulation du comportement sensori-moteur du robot, bien qu'elle prenne en compte les paramètres *cinématiques* du véhicule (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.V), ne va pas jusqu'à modéliser ses paramètres *dynamiques* ni certaines perturbations réelles telles que l'adhérence au sol, les vibrations mécaniques, la mauvaise géométrie du sol,... Un second problème, difficile à aborder en simulation, regroupe tous les problèmes d'éclairage naturel (très large gamme de luminance, éclairage non uniforme, présence de sources ponctuelles, ombres, lumière papillotante, changement brusque de luminosité,....).

Bien évidemment, il faut éviter que la technologie du prototype n'introduise des problèmes additionnels venant se cumuler aux problèmes conceptuels, suffisamment complexes, de la chaîne sensori-motrice. Cette remarque est d'autant plus justifiée dans le cas d'un robot mobile dont l'électronique est difficilement accessible lorsqu'il est en mouvement. Dans un tel cas, on ne peut qu'observer la qualité de sa trajectoire.

## II.2. Architecture parallèle du prototype

### II.2.1. Traitement parallèle du signal : une approche bionique

Le point de départ de l'ensemble du projet a été de construire la partie visuelle du robot sur la base de Détecteurs Élémentaires de Mouvement (D.E.M.), eux-mêmes inspirés de ceux de la mouche (cf. Annexe). Ces D.E.M.s constituent la maille de base d'un réseau parallèle. Ils convergent vers une sortie motrice unique, à travers un autre réseau parallèle implémentant l'algorithme anticollision. Ainsi, l'électronique de la chaîne opto-motrice est entièrement parallélisée depuis les photocapteurs pour se terminer par un signal de commande unique du moteur de direction. L'une des originalités propres à sa réalisation est qu'elle rappelle, tant au niveau de son câblage qu'au niveau de son traitement de signal, des processus rencontrés dans certains systèmes vivants. En outre, des problèmes d'interconnexion massive liés au traitement parallèle ont été résolus par une approche pluridisciplinaire du problème, en transcrivant en une autre technologie (électronique) certains concepts neurophysiologiques du traitement de signal tels que propagation, ramification, réseaux, etc..

### II.2.2. Architecture parallèle embarquée

Comme nous le verrons par la suite, le traitement du signal effectué par le système sensori-moteur du prototype est organisé en une centaine de "colonnes", chacune d'elles étant "alimentée" par une direction d'échantillonnage de l'environnement. Cette architecture traite *en parallèle* tous les signaux visuels.

Contrairement à une architecture qui comporterait une seule chaîne de traitement recevant ses entrées séquentiellement, ici, cette même chaîne se retrouve dans chaque "colonne". Aussi pour pouvoir embarquer sur la plate-forme mobile le système parallèle complet, il est impératif de minimiser dans chacune des colonnes :

- le *nombre d'étages de composants*, afin de réduire l'encombrement et la masse (diminuant par là-même l'inertie du système visuel embarqué);
- la *consommation*, en implémentant le maximum d'étages avec des composants électroniques passifs, et en sélectionnant des composants actifs à faible consommation;
- le *coût*.

### II.3. Choix technologiques pour la réalisation du prototype

#### II.3.1. La technique "électronique analogique"

Si la puissance de certains calculateurs numériques peut aujourd'hui conférer à un robot mobile la faculté de réagir quasiment en temps réel, ce n'est pas la voie que nous avons empruntée. Nous avons choisi un traitement parallèle réalisé par la juxtaposition de modules câblés en électronique analogique, et ce pour les raisons suivantes :

- la philosophie de notre approche bionique est de reproduire, aussi fidèlement que possible, jusque dans leurs structures, certains traitements parallèles connus, efficaces et bien éprouvés sur des systèmes vivants;

- l'électronique analogique apparaît comme une solution bien adaptée à la reproduction de systèmes neuronaux. Elle restitue un traitement du signal à maints égards homologue aux systèmes biologiques (cf. §II.4.). Cette technique traite directement des signaux électriques variant continûment dans le temps. Elle permet d'optimiser le rapport entre la complexité du calcul et celle du circuit : des étages "astucieux" faisant appel à des structures bas niveaux et à des composants non linéaires, peuvent résoudre efficacement des opérations de traitement.

#### II.3.2. La technologie C.M.S. (Composants pour Montage en Surface)

Sans parler de l'intégration analogique qui n'était ni nécessaire, ni envisageable ici, la technologie C.M.S. s'avère particulièrement adaptée au matériel embarqué. Elle présente les avantages suivants par rapport à la technologie classique :

- le report à plat des composants permet d'éliminer tout fil de connexion, supprimant par là-même certaines inductances et capacités parasites et conduisant à une résistance mécanique importante (vibrations et chocs);

- la faible dimension des composants conduit à un faible encombrement et à un degré d'intégration élevé. Cette miniaturisation se répercute non seulement sur la taille des cartes imprimées (baisse de 30 à 50%), mais aussi sur leur masse. La miniaturisation apportée par cette technique a été tout juste suffisante pour la réalisation du prototype;

- les caractéristiques des composants C.M.S. sont identiques à celles des composants classiques. Ainsi, la maquette d'un circuit peut faire appel à des composants classiques, plus facilement utilisables, qui se retrouvent en version miniaturisée C.M.S. sur le circuit définitif;

- malgré son degré d'intégration, cette technologie reste suffisamment "flexible" pour qu'on puisse envisager d'effectuer des réglages de dernière minute sur la circuiterie finale par l'intermédiaire, notamment, de micro-potentiomètres (tâche qui serait plus difficile voire impossible sur des circuits hybrides, des A.S.I.C.s ou des circuits intégrés).

### II.3.3. L'optique composée de mini-lentilles

Nous avons opté pour un réseau de mini-lentilles, chacune d'elles étant associée à une direction d'échantillonnage, reproduisant par là-même une coupe horizontale de l'oeil composé de la mouche (cf. Annexe, §A.2.).

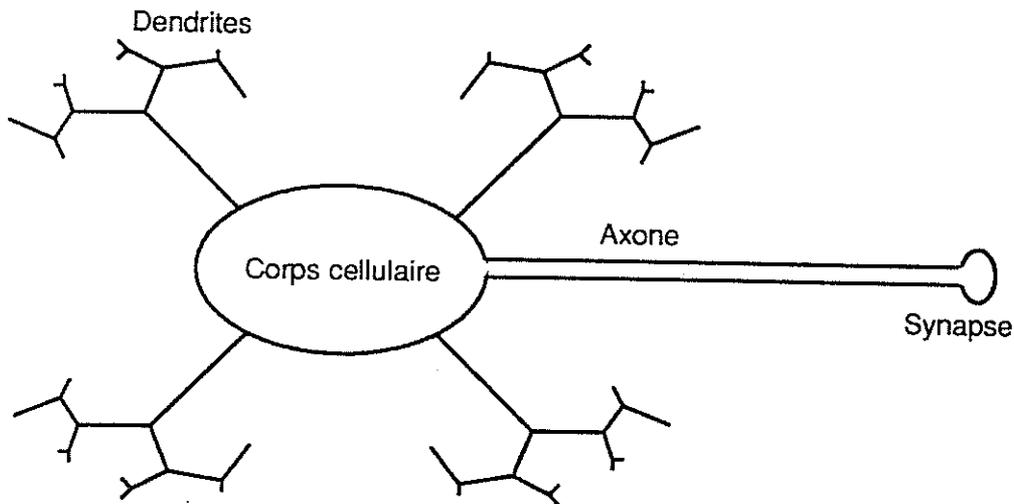
### II.4. **Solution bionique d'interactions parallèles par propagation**

Un des problèmes technologiques posés par le traitement parallèle réside précisément dans la réalisation du mélange des signaux de sortie de nombreux modules évoluant simultanément. Sur le robot, l'architecture du système sensoriel présente en sortie deux réseaux parallèles d'une centaine de signaux chacun, disposés circulairement (cf. Chap.IV) et devant fusionner au niveau des entrées d'un autre réseau réalisant l'algorithme de navigation (cf. Chap.V). L'un de ces signaux peut, soit être uniquement connecté à ses deux voisins adjacents, soit avoir des répercussions sur plusieurs autres pour le fonctionnement de l'algorithme.

Nous montrons à la fin de ce chapitre que ce problème peut être abordé comme un problème de propagation de courant dans un système isotrope. Cette approche est dictée par le résultat de recherches neurophysiologiques sur la propagation du courant dans les branches dendritiques d'un neurone jusqu'à son corps cellulaire, recherches décrites en particulier par Rall depuis 1959. Certains de ces résultats nous ont conduits à envisager des principes de propagation utilisables en électronique.

### II.4.1. Des neurones aux modélisations électroniques

Nous rappelons ici quelques propriétés du traitement de signal dans les systèmes vivants dotés d'un système nerveux.



**Fig.II-1** : Croquis des principales parties d'un neurone (d'après Hoppenstead, 1990).

L'élément de base des systèmes nerveux qui joue un rôle fonctionnel dans le traitement et la transmission des données, est la cellule nerveuse ou neurone. Un neurone "classique" est constitué d'un corps cellulaire dont les excroissances appelées dendrites se ramifient à l'entour, et d'un long prolongement, l'axone, qui véhicule les signaux (Fig.II-1). La forme de chaque type neuronal dépend du traitement de signal qu'il est susceptible d'effectuer. Cajal a mis en évidence, il y a une centaine d'années, la variété de forme des neurones. A l'instar de toute autre cellule, le neurone possède les constituants habituels : noyau, mitochondries, etc... La membrane cellulaire isole le milieu intérieur du milieu extérieur. Tous deux présentent des concentrations ioniques différentes qui sont responsables de la différence de potentiel membranaire (le "potentiel de repos" du neurone), l'intérieur étant électriquement négatif par rapport à l'extérieur. Une des caractéristiques du neurone est sa propriété d'excitabilité : les multiples réceptions de signaux chimiques et électriques sur ses dendrites et son corps cellulaire entraînent une dépolarisation ou une hyperpolarisation du corps cellulaire. La transformation des signaux chimiques sous forme de différences de potentiel (d.d.p.) sur la membrane est effectuée au niveau de points de jonction entre neurones, appelés synapses. Enfin, à la suite d'un calcul algébrique issu de combinaisons des différents signaux électriques reçus sur la membrane neuronale, la dépolarisation du corps cellulaire peut aussi, si elle est suffisante pour atteindre un seuil, déclencher un potentiel d'action (impulsion nerveuse ou "spike"). Le déclenchement peut être considéré comme une loi de type "tout ou rien" résultant

d'une sommation spatio-temporelle des potentiels membranaires. La génération de ce potentiel, dont l'amplitude est de l'ordre de 100mV, a lieu en un endroit du corps cellulaire appelé renflement ou bosse axonique (axon hillock), transition entre le corps cellulaire et l'axone. Le potentiel d'action se propage et se conserve sans atténuation le long de l'axone jusqu'à la terminaison axonique du neurone. Il déclenche au niveau de ses terminaisons la libération d'un médiateur chimique, le neuromédiateur, qui affecte la différence de potentiel membranaire d'autres neurones dits "post-synaptiques", assurant ainsi la poursuite du traitement du signal. Hodgkin et Huxley (1952) ont établi des équations traduisant les mécanismes biophysiques de ce fonctionnement en exprimant le passage sélectif des ions à travers des "canaux membranaires" dont la perméabilité peut varier avec le temps et la d.d.p. membranaire. C'est un ensemble de quatre équations aux dérivées partielles, non linéaires. Trois d'entre elles concernent les courants ioniques de sodium, de potassium et de chlore. L'autre est l'équation de conservation du courant total (loi d'Ohm locale).

La d.d.p. membranaire du corps cellulaire conditionne la fréquence d'émission des potentiels d'action qui sont assimilables à des impulsions binaires véhiculées dans un câble, l'axone. Le déclenchement a lieu lors du dépassement du seuil d'excitation membranaire (5 à 10mV). La fréquence des potentiels d'action est, en première approximation, proportionnelle au logarithme du potentiel somatique. Ainsi, le corps cellulaire est assimilable à un convertisseur tension-fréquence (VCO) capable de transformer N signaux d'entrées (N peut aller jusqu'à 10000!), inhibiteurs ou excitateurs (c'est-à-dire négatifs ou positifs), correspondant à N synapses actives, en un signal de sortie unique, modulé en fréquence. Les neurones ont aussi la possibilité de réaliser sur leurs signaux d'entrée non seulement des opérations linéaires (amplifications, filtrages temporels, moyennage spatial,...) mais bien souvent aussi des opérations non linéaires (compression d'amplitude, redressement, expansion,...), par exemple grâce à la présence de conductances adaptatives dans la membrane post-synaptique. Multiplicité des entrées, variabilité des synapses, sommation spatiale pondérée par la distance entre la synapse et la bosse de l'axone, modulation de la fréquence de sortie des potentiels d'action, sont là quelques propriétés du neurone qui en font un composant extrêmement puissant, souvent plus proche d'un "microprocesseur analogique" que d'un composant électronique simple.

Chacune des entrées pré-synaptiques d'un même neurone est représentable électroniquement par une liaison à diode ne transmettant que les signaux positifs (Lewis, 1968). Or, on sait qu'un ensemble de diodes interconnectées peut réaliser des fonctions logiques telles que des circuits ET, OU, NON-OU, NON-ET. Nous décrivons ici comment des circuits électroniques basés sur des réseaux de résistances et de diodes permettent de réaliser simplement une interaction entre divers signaux *analogiques* évoluant en parallèle, à l'instar des nombreux signaux nerveux alimentant un arbre dendritique.

II.4.2. Interactions parallèles par propagation dans des réseaux échelles de résistances

II.4.2.a. Réseau échelle de résistances

La décroissance dite *électrotonique* d'un courant dans une fibre neuronale de diamètre constant peut être modélisée par la propagation d'un signal dans un réseau de résistances appelé réseau échelle (Fig.II-2).

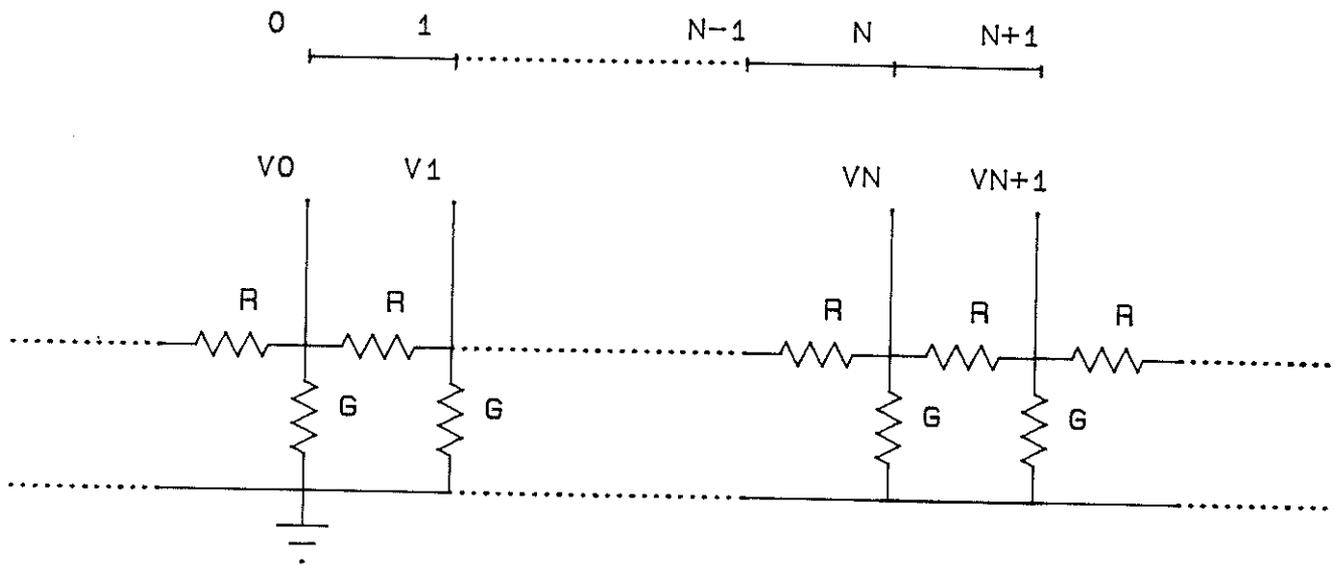


Fig.II-2 : Réseau échelle de résistances.

Les résistances R correspondent à la résistance axiale du cytoplasme par longueur unitaire, et les conductances G représentent la conductance de fuite à travers la membrane par longueur unitaire. Le couple [R ; G] constitue une maille du réseau échelle de résistances.

Si un potentiel  $V_0$  est généré à une extrémité de la chaîne, le potentiel recueilli à une position  $x$  de l'entrée s'exprime par (Mead, 1989) :

$$V = V_0 \cdot e^{-\alpha \cdot |x|} = V_0 \cdot e^{-(1/L) \cdot |x|} \tag{II.1}$$

où  $\alpha$  est la constante d'espace et L la longueur caractéristique ou longueur de diffusion de la chaîne :

$$\alpha = 1/L = (R \cdot G)^{1/2} \tag{II.2}$$

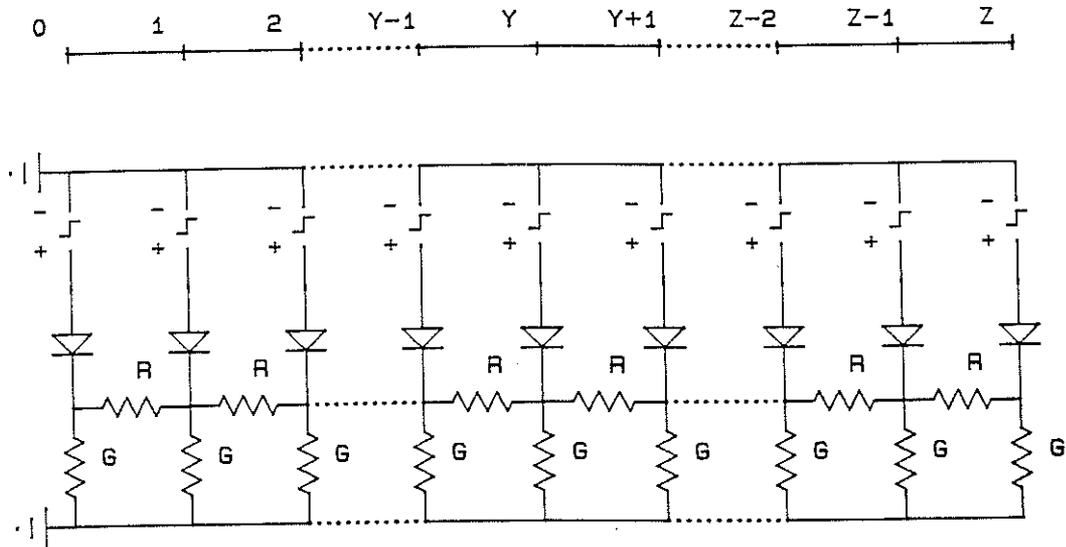
Dans la structure électronique série d'un tel réseau échelle de résistances (maille [R ; G]), toute source de tension  $V_0$  appliquée au premier noeud ( $x=0$ ) se voit décroître exponentiellement de noeud en noeud. Ainsi, la tension  $V_n$  enregistrée sur un noeud situé à  $n$  sections du premier s'exprime par (Mead, 1989) :

$$V_n = \gamma^n \cdot V_0 \quad \text{avec} \quad \gamma = V_1/V_0 = 1 + 1/(2 \cdot L^2) - 1/[L \cdot (1 + 1/(4 \cdot L^2))]^{1/2} \quad (\text{II.3})$$

et  $L = (R \cdot G)^{-1/2}$

De même que dans les propriétés neuronales décrites en (II.4.1), la décroissance de la tension dépend du produit  $R \cdot G$ .

Cette structure peut être aussi utilisée avec plusieurs sources connectées individuellement en chaque noeud par l'intermédiaire d'une diode qui se comporte comme un interrupteur (Fig.II-3).



**Fig.II-3** : Connexion de plusieurs sources aux noeuds d'un réseau échelle de résistances par l'intermédiaire de diodes.

Dans une telle configuration, si les sources imposent aux  $z$  noeuds du réseau soit une valeur  $V_0$ , soit une valeur nulle, la tension  $V_z$  au bout du réseau s'exprime par :

$$V_z = \gamma^{(z-Y)} \cdot V_0 \quad (\text{II.4})$$

avec  $\gamma$  identique à l'expression établie en (II.3)

et  $Y$  position du dernier noeud présentant une tension  $V_0$ .

Il est à noter que, dans le cas d'une seule source d'amplitude  $V_0$ , la décroissance exponentielle est identique de part et d'autre du noeud source. Ainsi, deux noeuds symétriques par rapport au noeud source présentent la même valeur. C'est ce type de structure, avec toute la richesse de ses interconnexions massives, qui sera utilisé pour implémenter sous une forme purement parallèle l'algorithme anticollision (cf. §V.3.).

#### II.4.2.b. Réseau échelle bouclé de résistances

En conservant toujours la même structure, il est possible d'obtenir un réseau échelle bouclé de résistances en connectant le dernier noeud au premier (Fig.II-4).

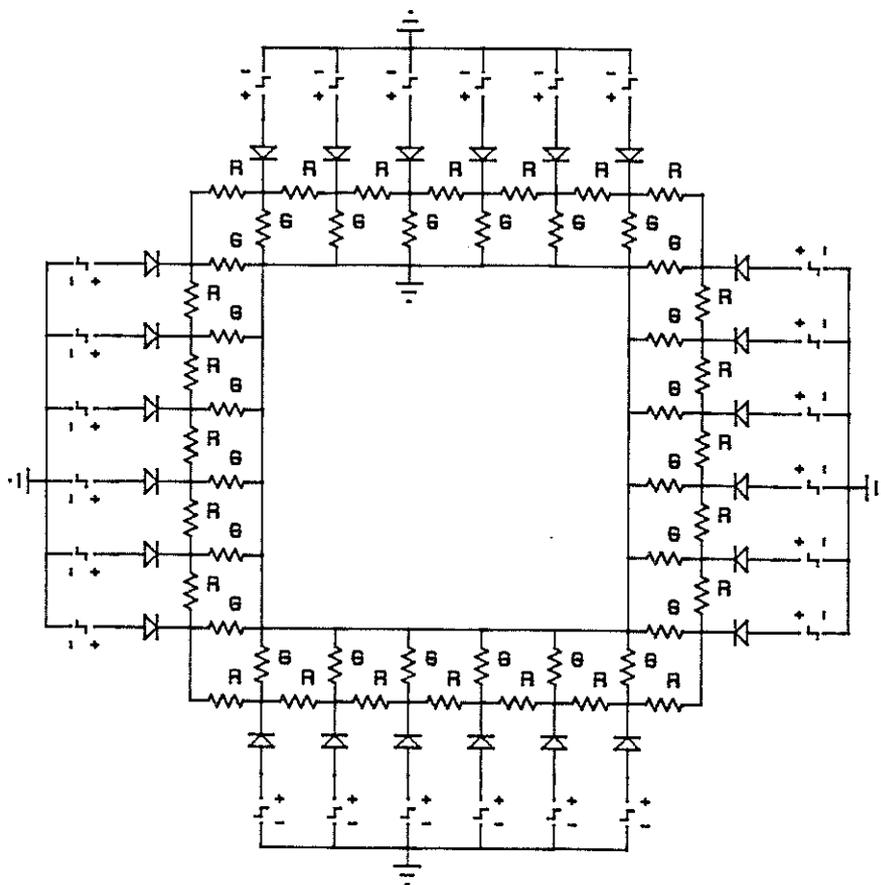


Fig.II-4 : Connexion de plusieurs sources aux noeuds d'un réseau échelle bouclé de résistances par l'intermédiaire de diodes.

Admettons qu'une seule source soit connectée à un tel réseau échelle bouclé (maille [R;G]) comportant  $n$  noeuds. Cette source se comporte comme un générateur de courant qui induit une propagation bi-latérale de part et d'autre de ce noeud. Le signal évolue en respectant en tout noeud le principe de superposition *algébrique* des courants selon leur sens de propagation dans le réseau. Ainsi, les tensions de part et d'autre du noeud source sont identiques à celles obtenues de part et d'autre d'une source placée au *milieu* d'un réseau échelle *non-bouclé* de résistances (maille [R ; G]) ayant :

- si  $n$  est impair,  $n$  noeuds;
- si  $n$  est pair,  $(n+1)$  noeuds dont  $(n-1)$  correspondent respectivement à une maille [R ; G], et dont deux correspondent à une maille de résistance R et de conductance  $(G/2)$ ; chacune des deux mailles [R ; G/2] est disposée à une extrémité du réseau.

Il découle que deux noeuds symétriques par rapport au noeud source présente encore la même tension. Ainsi, si le noeud source est considéré comme origine, la tension est une fonction paire de  $x$ .

De même que dans la propriété neuronale traduite par l'équation (II.1), la décroissance de la tension dans ce réseau échelle bouclé dépend du produit  $R.G$  (Fig.II-5).

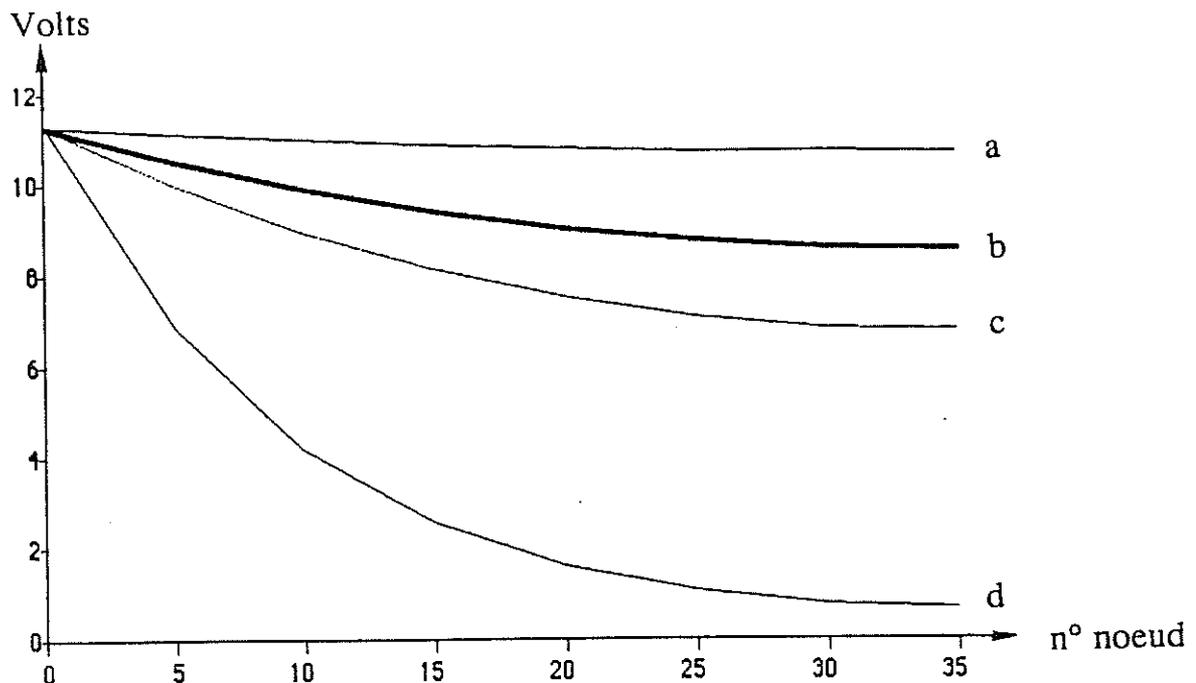


Fig.II-5 : Valeur de la tension aux noeuds d'un réseau échelle bouclé de résistances de 70 mailles [R ; G], identique à celui de la structure de la Fig.II-4. Une seule source (12Volts) est connectée ici au noeud 0 par l'intermédiaire d'une diode. Valeur du couple  $(R, 1/G)$  : a)  $R=10\Omega$  et  $1/G=100k\Omega$  ; b)  $R=50\Omega$  et  $1/G=100k\Omega$  ; c)  $R=100\Omega$  et  $1/G=100k\Omega$  ; d)  $R=1k\Omega$  et  $1/G=100k\Omega$

Comme en l'absence de source ce réseau est parfaitement isotrope, tout noeud peut être exploité comme entrée et la tension évolue alors de noeud en noeud selon l'expression établie en (II.3). Ce type de structure sera également utilisé dans le câblage du système anticollision (cf. §V.3.).

#### II.4.3. Propagation dans des réseaux à diodes

Nous montrons maintenant que des structures similaires à celles des réseaux échelles présentés précédemment, mais réalisés avec des composants passifs non-linéaires tels que des diodes, offrent des propriétés particulièrement intéressantes pour le traitement parallèle.

##### II.4.3.a. Détecteur de minimum à diodes

Un circuit analogique "détecteur de minimum" entre deux signaux est réalisable très simplement au moyen de deux diodes et d'une résistance (Fig.II-6). Il permet de ne retenir, à tout instant, que le plus petit des signaux analogiques présents sur ses deux entrées. Ce principe peut être étendu à N entrées.

Le fonctionnement de ce circuit est illustré à la Fig.II-7 où l'on a considéré deux entrées arbitraires. On note qu'à chaque instant c'est le minimum des deux signaux d'entrée qui apparaît en sortie, quelles que soient leurs valeurs.

##### II.4.3.b. Détecteur de maximum à diodes

Un classique circuit "OU" à diodes (Fig.II-8) permet d'assurer une "détection de maximum" entre plusieurs signaux d'entrées analogiques susceptibles de varier continûment dans le temps. Deux signaux d'entrée de forme arbitraire (Fig.II-9-a) permettent d'illustrer le fonctionnement de ce circuit économique (habituellement utilisé en tout ou rien) dont la sortie (Fig.II-9-b) suit en effet à chaque instant la valeur *maximale* de ses entrées. Le principe de fonctionnement peut être étendu à N entrées.

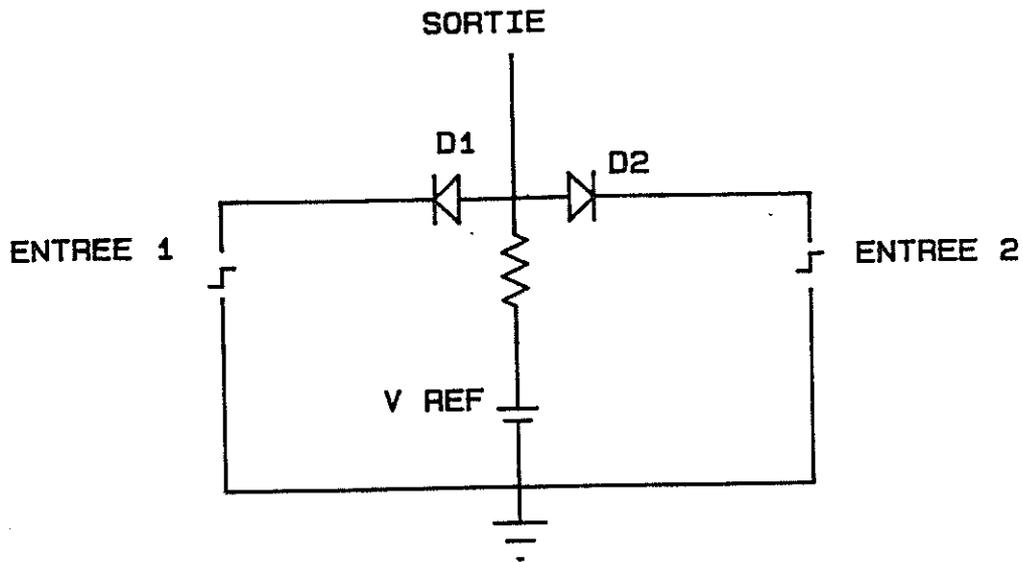


Fig.II-6 : Circuit électronique réalisant la détection de minimum de deux signaux analogiques pouvant varier de manière continue.

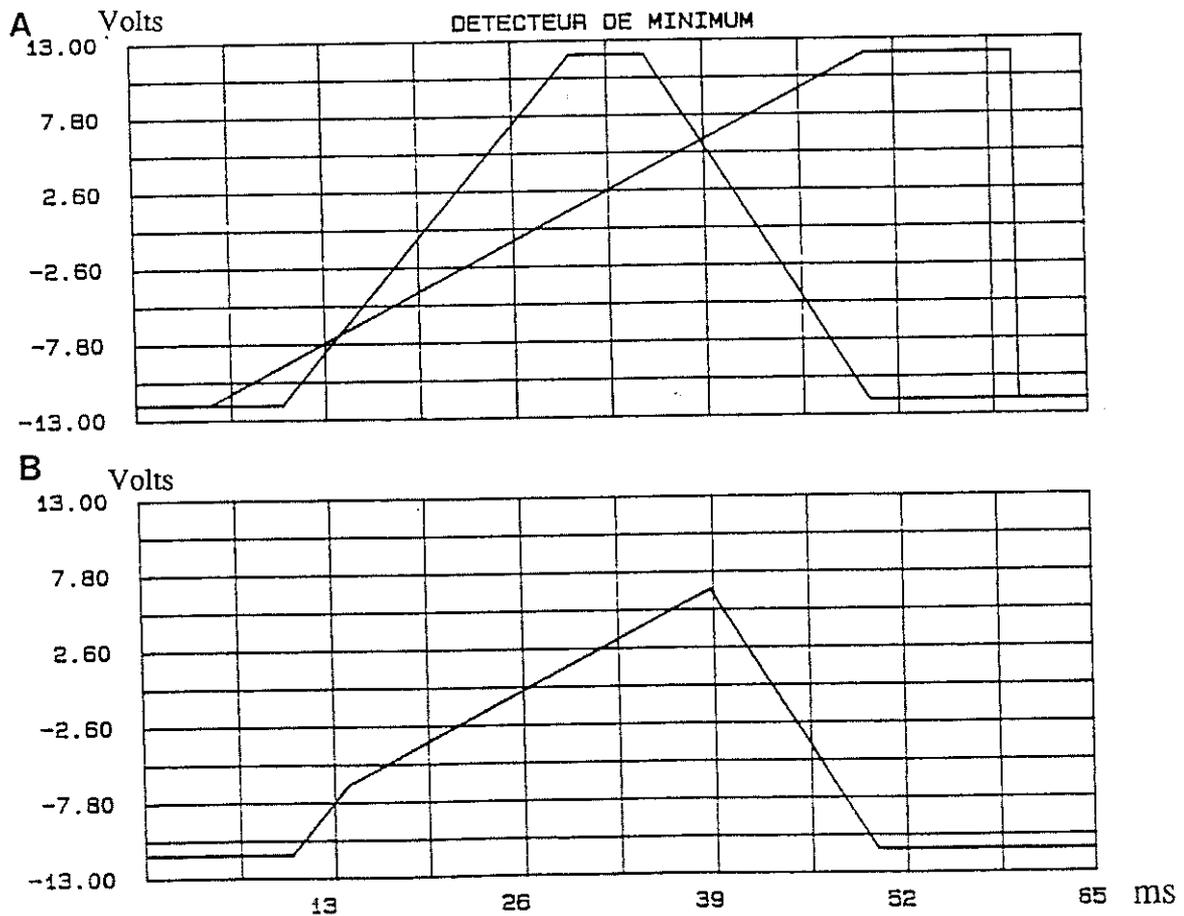


Fig.II-7 : Analyse par CAO du fonctionnement du détecteur de minimum à diodes (Fig.II-6).

A : Signaux d'entrées 1 et 2 de forme trapézoïdale; B : Signal de sortie ( $V_{ref}=12\text{Volts}$ )

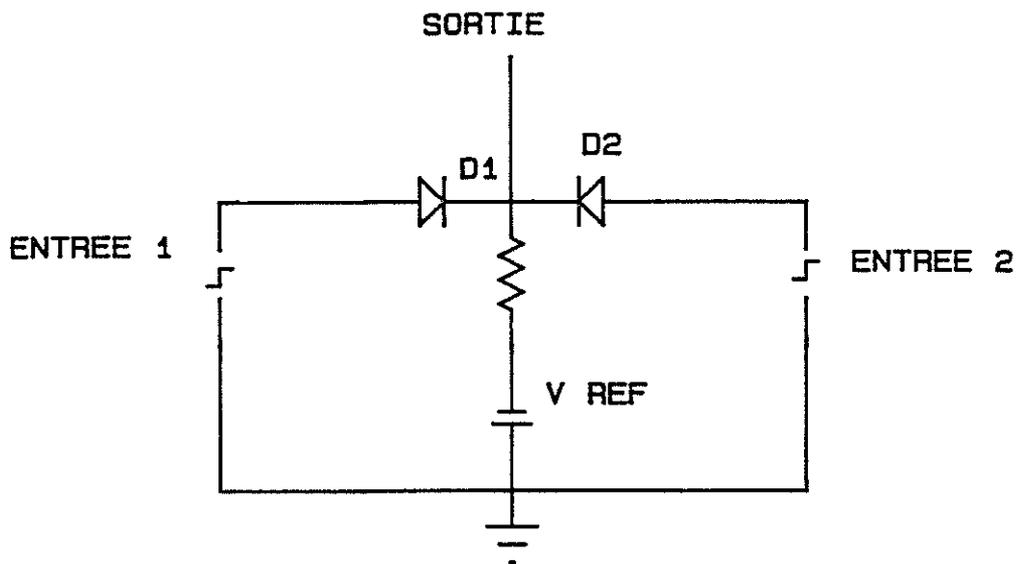


Fig.II-8 : Circuit électronique du "détecteur de maximum".

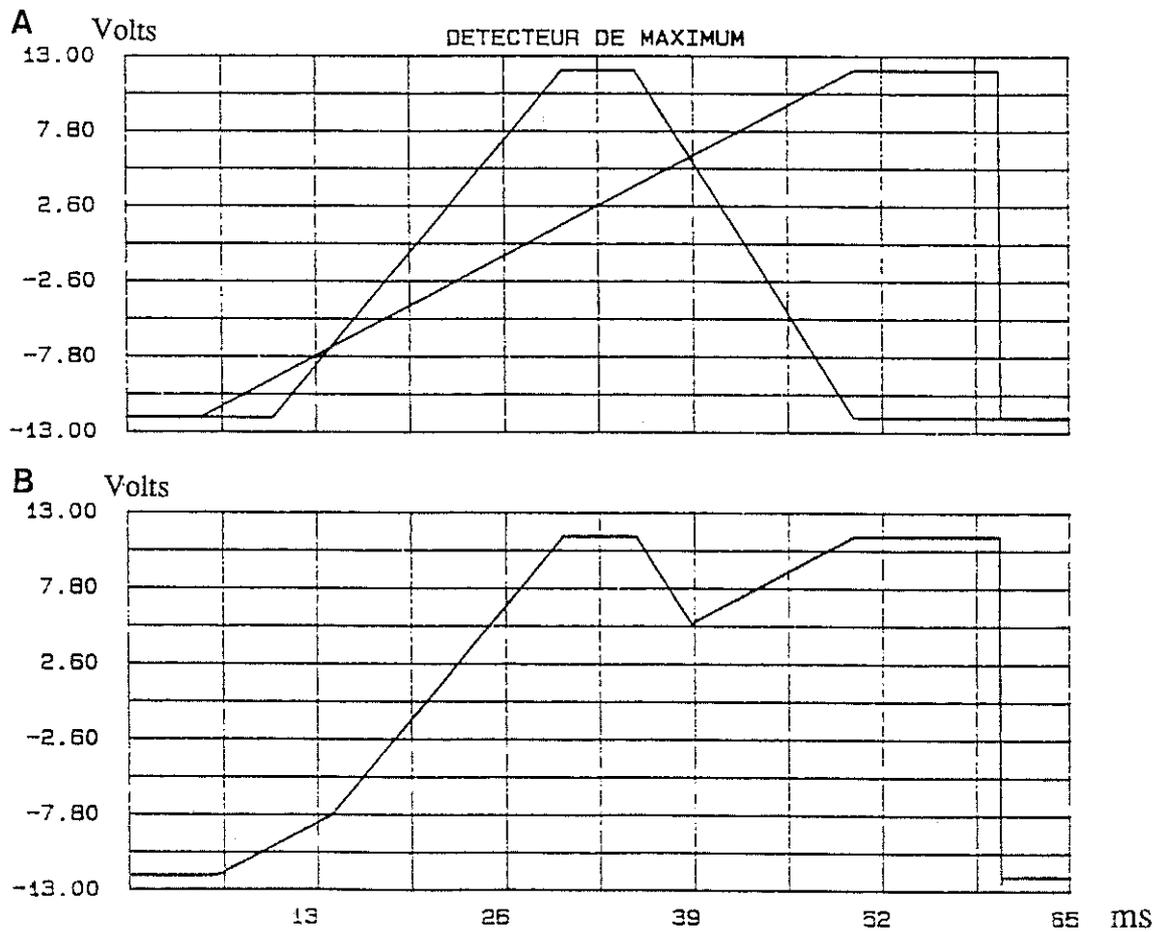


Fig.II-9 : Analyse par CAC du fonctionnement d'un "détecteur de maximum" (Fig.II-8).

A : Signaux d'entrées 1 et 2 de forme trapézoïdale; B : Signal de sortie ( $V_{ref} = -12$  Volts).

## II.4.3.c. Réseau échelle à diodes pour propagation unilatérale

En s'inspirant de la configuration de base du réseau échelle de résistances, mais en remplaçant les résistances axiales par des diodes, toutes orientées dans le même sens, on réalise un réseau échelle à diodes (Fig.II-10).

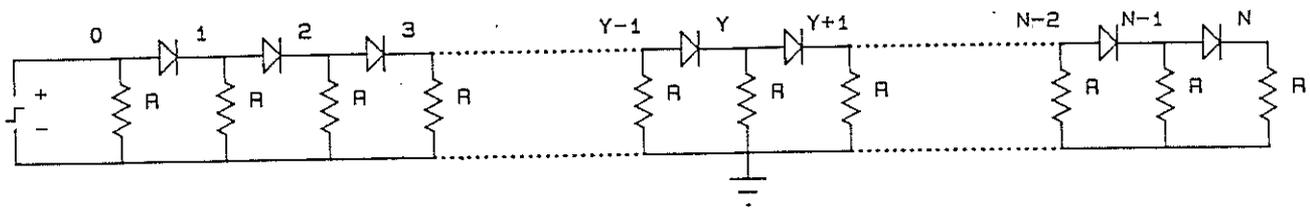


Fig.II-10 : Réseau échelle à diodes.

Si une source est placée à l'une des extrémités, il est possible d'obtenir une décroissance de noeud en noeud avec un taux de décroissance  $V_d$  constant, égal à la tension de coude d'une diode. Ainsi, un réseau en échelle de diodes permet de produire une décroissance non pas *exponentielle*, comme c'était le cas pour le réseau échelle de résistances (Fig.II-5), mais *linéaire*. Il est à noter qu'une source positive placée à l'une des extrémités délivre la même propagation, au signe près, qu'une source négative de même valeur placée à l'autre extrémité.

Si la source est insérée en un point situé le long de la chaîne, la propagation ne s'effectue que d'un côté, selon le signe de la source, et le sens de polarisation des diodes.

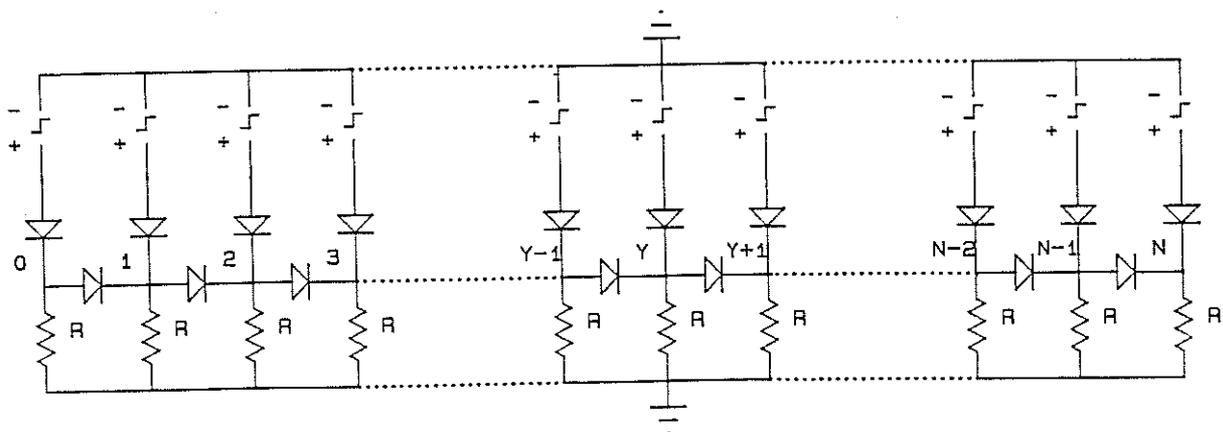


Fig.II-11 : Connexions de plusieurs sources en parallèle par l'intermédiaire de diodes aux noeuds d'un réseau échelle à diodes.

Si plusieurs sources sont connectées au réseau par l'intermédiaire de diodes (Fig.II-11), leurs effets se combinent en respectant le principe de superposition *non-linéaire* suivant : le potentiel résultant en chaque noeud correspond au maximum entre les valeurs générées *indépendamment* par les sources (Fig.II-12).

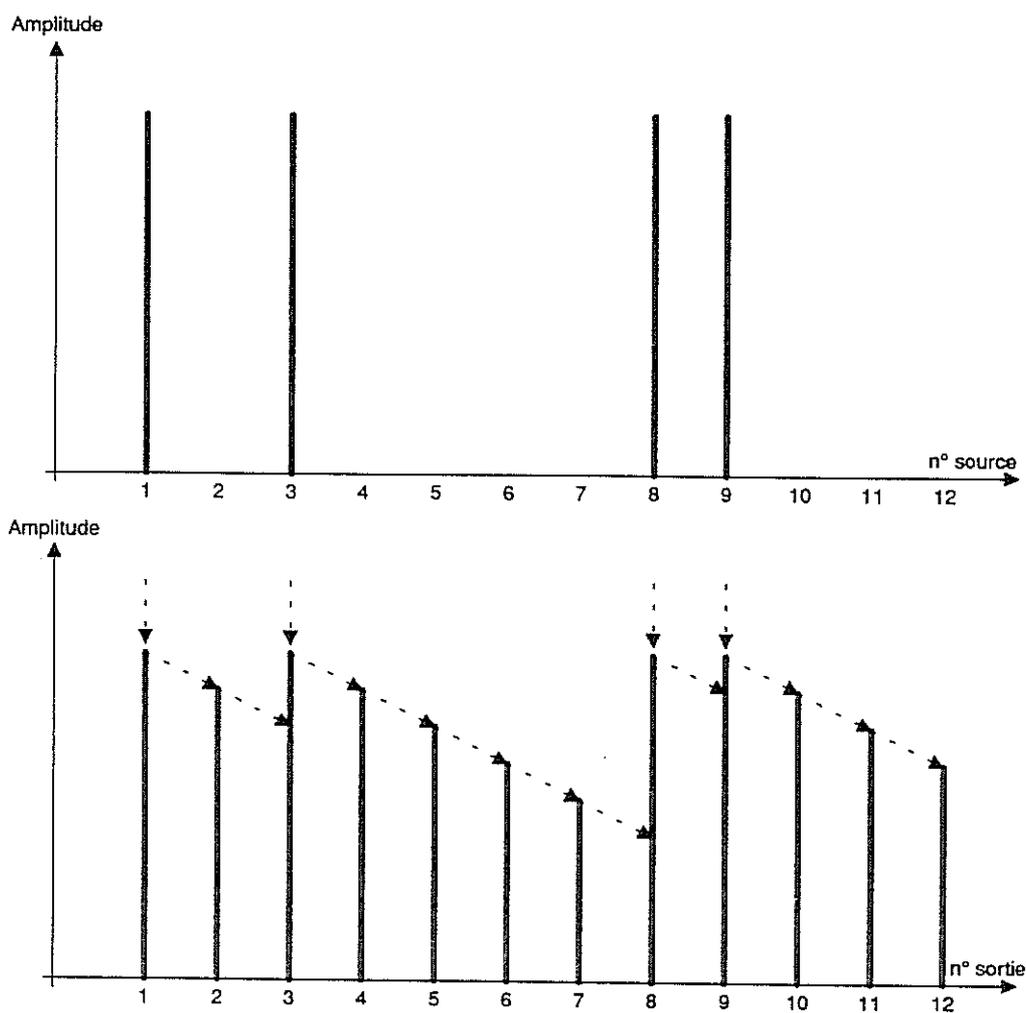


Fig.II-12 : Exemple de propagation dans un réseau échelle à diodes (Fig.II-11) ayant 12 noeuds d'entrée.

#### II.4.3.d. Réseau échelle à diodes pour propagation bilatérale

On peut obtenir ce type de propagation dans les deux sens du réseau, si l'on adjoint entre chaque noeud une diode orientée en sens inverse de la précédente (Fig.II-13).

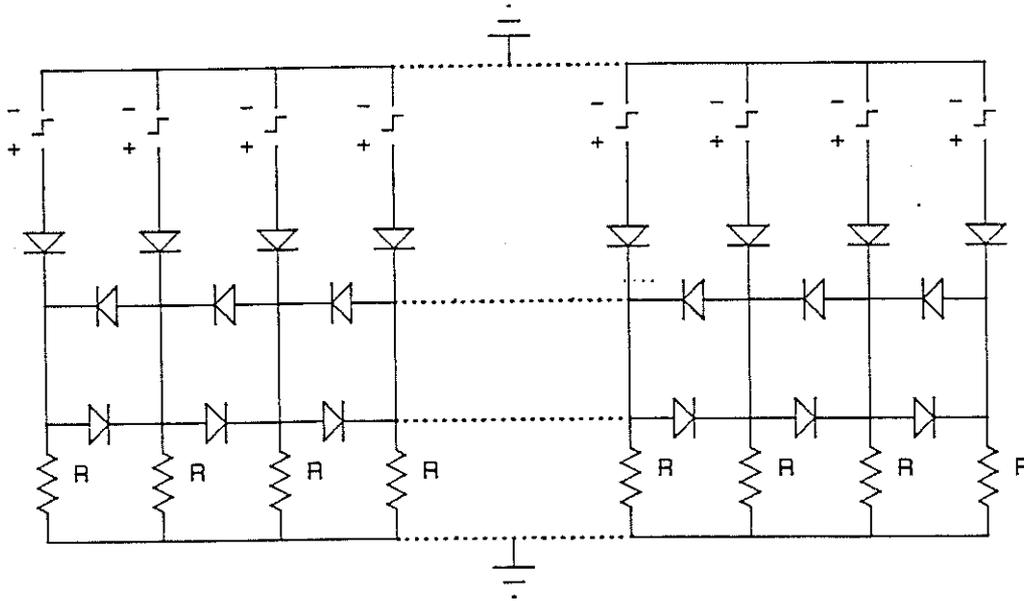


Fig.II-13 : Réseau linéaire à diodes montées tête-bêche.

Dans ce type de réseau, la propagation de signal, due à une seule source, s'effectue de manière identique *bi-latéralement* autour du noeud source, quelle que soit sa position dans le réseau.

Lorsque plusieurs sources sont connectées en divers noeuds, le signal respecte le principe de superposition non-linéaire suivant : le potentiel résultant en chaque noeud correspond au maximum entre les valeurs générées *indépendamment* par les sources.

#### II.4.3.e. Réseau échelle bouclé à diodes

Un bouclage du réseau permet d'obtenir un "réseau échelle bouclé à diodes tête-bêche" (Fig.II-14).

En tout noeud d'un tel réseau bouclé la combinaison des signaux s'effectue de la même manière que dans le réseau ouvert (Fig.II-15). La différence d'amplitude du signal d'un noeud à l'autre est constante quel que soit le nombre de sources connectées.

L'utilisation précise des différents types de réseau qui viennent d'être présentés dans ce paragraphe sera illustrée au chapitre V qui décrit le système anticollision du robot.

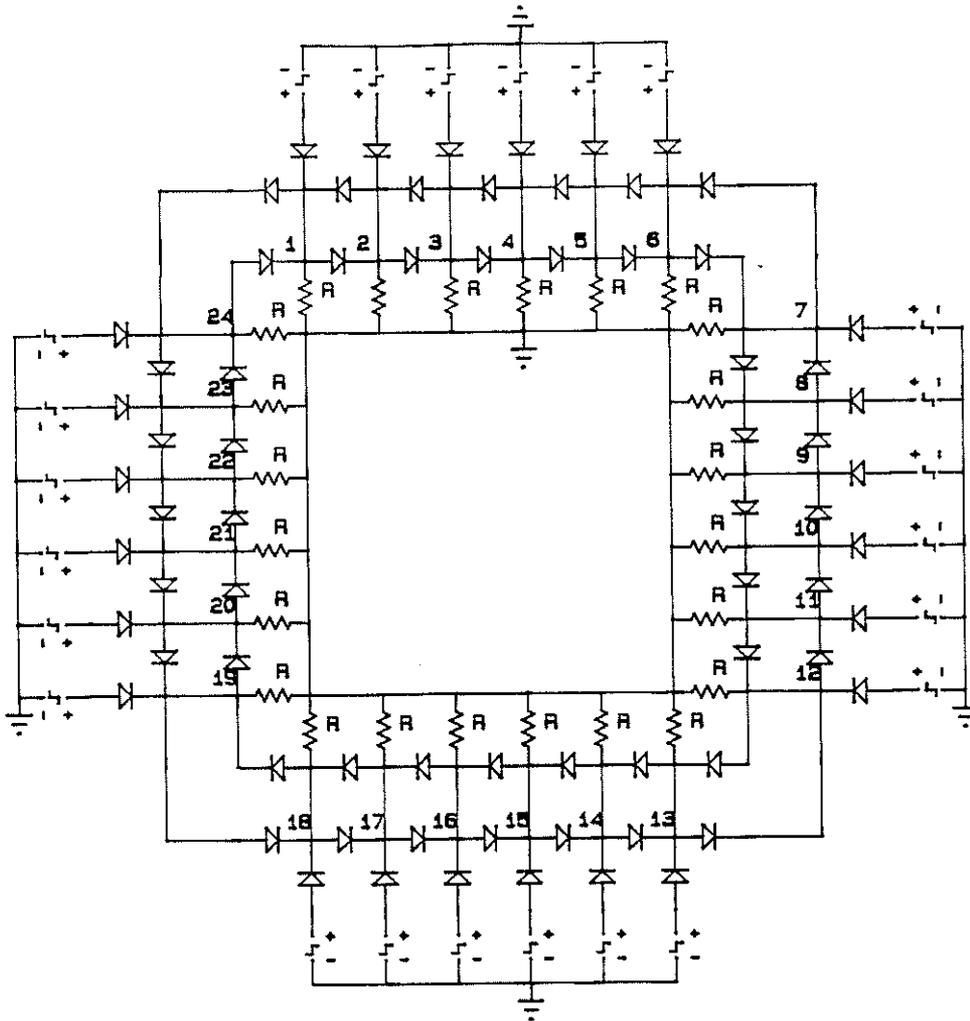


Fig.II-14 : Connexions de plusieurs sources en parallèle par l'intermédiaire de diodes aux noeuds d'un réseau échelle bouclé de diodes montées tête-bêche.

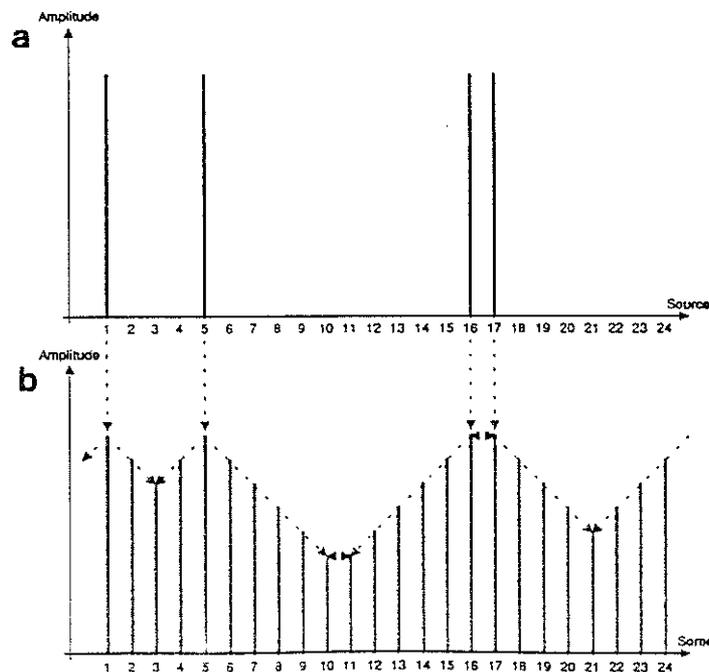
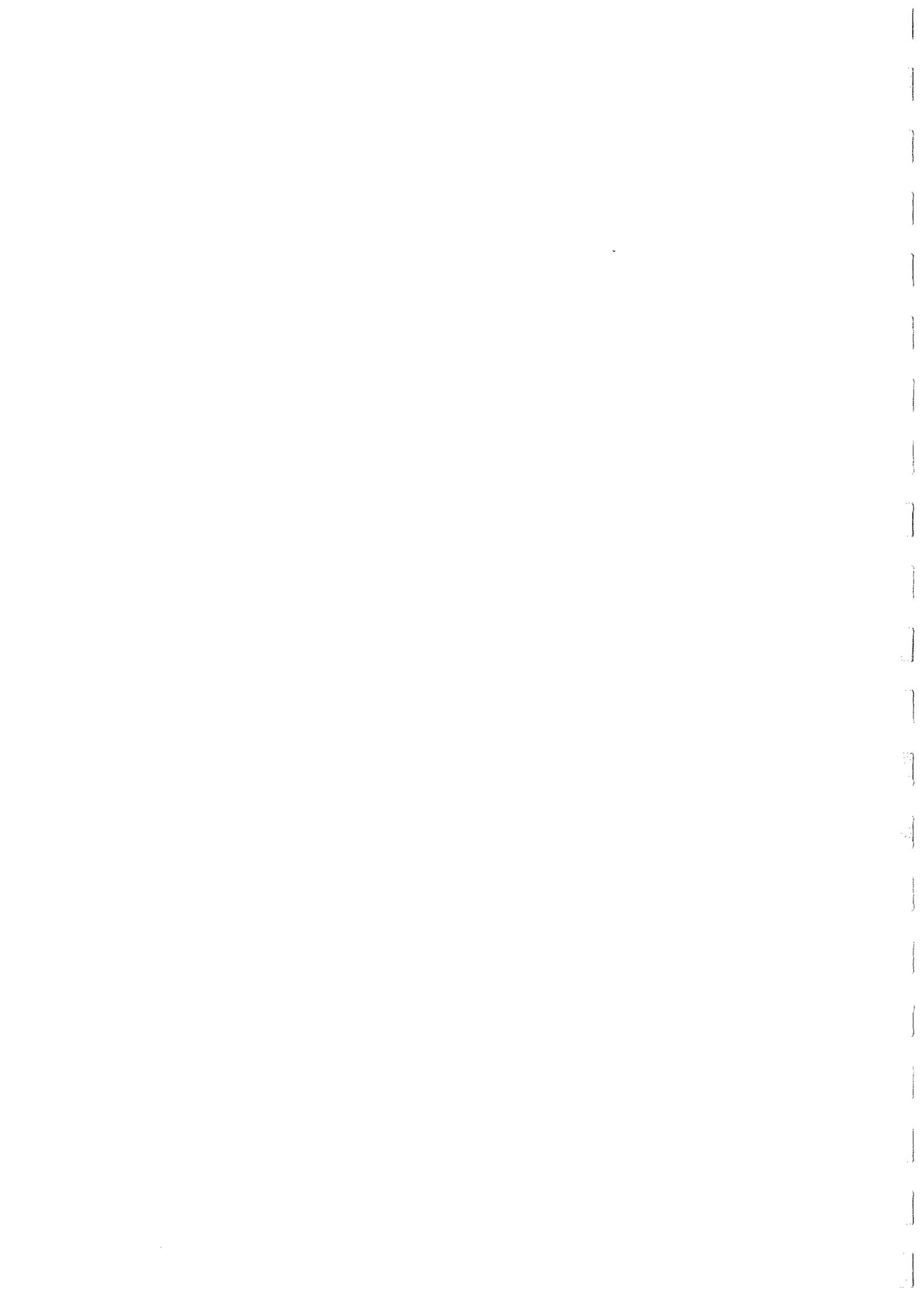


Fig.II-15 : (b) Valeur des signaux présents aux 24 noeuds du réseau bouclé à diodes tête-bêche de la Fig.II-14 pour les 24 signaux d'entrée représentés en (a).



## ***CHAPITRE III***

***PRINCIPES ET REALISATION DU DETECTEUR DE MOUVEMENT,  
CLEF DU SYSTEME VISUEL DU ROBOT***



Chapitre III .....

**PRINCIPES ET REALISATION DU DETECTEUR DE MOUVEMENT,  
CLEF DU SYSTEME VISUEL DU ROBOT**

**III.1. Généralités sur la réalisation du système visuel**

III.1.1. Performances souhaitées

III.1.2. Solution retenue

III.1.3. Méthodes de travail

**III.2. Implémentation d'un Détecteur Élémentaire de Mouvement : D.E.M.**

III.2.1. Configuration de base du D.E.M.

a. Rôle et principe de fonctionnement

b. Contraintes liées au système embarqué

c. Synoptique de traitement : étages du D.E.M. opto-électronique

III.2.2. Dispositif expérimental de test des D.E.M.s

III.2.3. Extraction de fronts de contraste

a. Système optique

b. Photodétection

c. Filtrage temporel linéaire

d. Filtrage non-linéaire en amplitude et génération d'impulsion normée

III.2.4. Signal caractérisant le retard

a. Génération d'une fonction Retard d'allure exponentielle décroissante retardée

b. Multiplication : échantillonnage par détection de minimum

c. Mélange par détection de maximum

III.2.5. Récapitulatif général et performances

III.2.6. Implémentation d'un D.E.M. bi-directionnel

a. Principe

b. Description du circuit



### III.1. Généralités sur la réalisation du système visuel

#### III.1.1. Performances souhaitées

Les performances recherchées pour le système visuel doivent permettre au robot de fonctionner :

- de manière totalement autonome, sans aucun ombilical, ni énergétique, ni informationnel;
- à une vitesse de 50cm/s (éventuellement ajustable entre 25cm/s et 100cm/s);
- à l'intérieur d'une pièce ou d'un couloir, éclairé soit en lumière naturelle, soit en lumière artificielle et pouvant admettre des variations d'éclairage de deux décades;
- dans un environnement où tous les objets présentent une texture faite de bandes verticales de largeur  $L_b$  aléatoire mais bornée par valeur supérieure ( $L_b < 30$  cm);
- avec une sensibilité au contraste qu'on essayera de maximiser dans la suite de ce travail et qui conditionnera en particulier la limite de finesse de la texture.

#### III.1.2. Solution retenue

L'un des objectifs de ce projet est la réalisation proprement dite d'un système visuel opto-électronique embarqué permettant de détecter et de caractériser la position d'éventuels obstacles dans le plan azimutal. La principale contrainte liée à la réalisation d'un tel système réside dans le fait qu'il doit fonctionner de façon totalement autonome et être embarqué sur une plate-forme mobile de petite taille. Ce système visuel exploite le déplacement du robot en *translations élémentaires* effectuées à vitesse constante  $V_0$  pour apprécier la distance des obstacles. La solution retenue repose sur le traitement parallèle de signaux délivrés par de nombreux Détecteurs Élémentaires de Mouvement (D.E.M.), chacun d'eux scrutant une région locale du champ visuel. Ces D.E.M.s s'inspirent en partie de résultats d'expériences électrophysiologiques effectuées au laboratoire sur le système visuel de la mouche (cf. Annexe, §A.3.2.).

#### III.1.3. Méthodes de travail

Le principe des D.E.M.s a été testé en simulation (cf. Thèse Pichon, Chap.III). On s'intéresse ici à leur implémentation, qui fait appel à des composants opto-électroniques réels. Ce travail s'est effectué en respectant les étapes suivantes :

- 1) développement des parties optiques et photoréceptrices;
- 2) développement par C.A.O. de la partie électronique proprement dite, en parallèle avec la réalisation de maquettes en composants électroniques traditionnels;

-3) transposition des maquettes en une implémentation finale réalisée en une technologie C.M.S. : achat des composants C.M.S. et sous-traitance de leur montage sur circuit imprimé multicouche.

L'étude a donc permis de mettre au point, dans un premier temps, un modèle de D.E.M. opto-électronique fiable et léger, destiné à être reproduit N fois pour constituer un réseau d'une centaine de D.E.M.s identiques assurant un échantillonnage basse résolution de l'espace visuel autour du robot sur près de 360° (champ visuel azimutal).

La plupart des enregistrements présentés dans ce chapitre correspondent à des signaux réels (ceux provenant de simulation par C.A.O. seront précisés).

### III.2. Implémentation d'un Détecteur Élémentaire de Mouvement : D.E.M.

#### III.2.1. Configuration de base du D.E.M.

##### III.2.1.a. Rôle et principe de fonctionnement

Le rôle d'un D.E.M. est de mesurer la vitesse angulaire  $\Omega$ , liée au mouvement relatif d'un front de contraste, vitesse qui, sous certaines conditions, peut servir à estimer la distance radiale D de ce dernier. Cette estimation en distance est essentiellement basée sur un principe de stéréo-mouvement, appliqué à un senseur en mouvement et résumé par la formule :

$\Omega = \sin(\varphi) \cdot V / D$ , où V est la vitesse linéaire *instantanée* du senseur, et  $\varphi$  l'angle entre la direction du mouvement et celle dans laquelle le contraste est détecté (Whiteside et Samuel, 1970).

Cette formule (correspondant à un senseur théorique) a été, dans le cadre de ce projet, adaptée (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.II) à un senseur réalisable technologiquement, un D.E.M.. Ce dernier utilise deux directions de visée *distinctes* dans l'espace, concourantes en un point O et séparées angulairement par un angle  $\Delta\varphi$  (appelé angle interommatidial par analogie avec la mouche, cf. Annexe, §A.2.2.). Dans ce cas réaliste, le principe de stéréo-mouvement se formalise de la façon suivante :

$$\Omega_m = [\sin(\varphi - \Delta\varphi) \cdot \Delta\varphi / \sin(\Delta\varphi)] \cdot V_o / D$$

où  $\Omega_m$  est la vitesse angulaire *moyennée* localement par le D.E.M.,  $\varphi$  est l'orientation angulaire du D.E.M. par rapport au mouvement et  $V_o$  est la vitesse *moyenne* de translation (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.II).

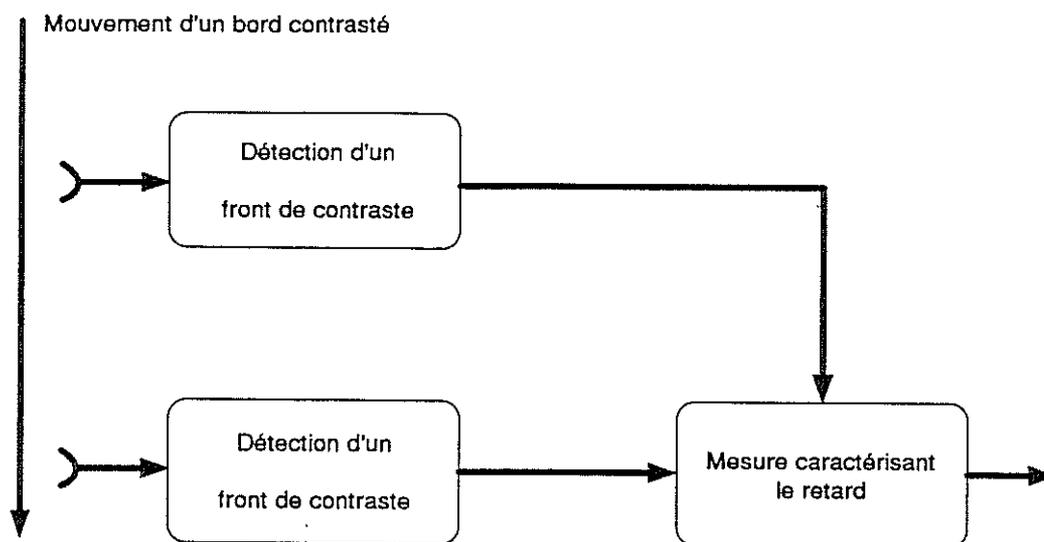


Fig.III-1 : Synoptique de principe du D.E.M.

Le principe de fonctionnement du D.E.M. retenu se résume à délivrer un signal caractérisant le retard  $\Delta t = \Delta \varphi / \Omega_m$  entre les deux détections successives du même front de contraste passant devant deux directions de visée adjacentes (Fig.III-1).

Un D.E.M. étant sensible au mouvement *relatif* entre lui-même et son entourage, on peut en décrire le principe en supposant le D.E.M. fixe et l'objet contrasté mobile. Ainsi, lors du passage d'un objet contrasté dans son champ de vision local, le D.E.M. effectue :

- une détection des fronts de contraste apparaissant successivement sur chacune de ses deux voies : réalisation d'un dispositif opto-électronique délivrant un signal dont les variations d'amplitude sont liées temporellement au passage de l'objet, plus particulièrement à son bord d'attaque et à son bord de fuite s'il s'agit d'un objet étendu;

- une mesure caractérisant la distance de l'objet par rapport au détecteur : le même front de contraste étant détecté successivement sur les deux voies du D.E.M., le temps qui sépare ces deux détections est lié à la vitesse angulaire relative  $\Omega$  (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.II). D'un point de vue pratique, la détection d'un contraste sur la première voie déclenche une fonction variant de façon monotone qui est échantillonnée lors de la détection du même contraste par la deuxième voie; cette méthode, qui s'inspire des propriétés des D.E.M.s de la mouche (cf. Annexe, §A.3.2.) fait d'ailleurs que le D.E.M. est à sens unique et qu'il ne délivre donc pas de réponse pour le sens "non préféré".

#### III.2.1.b. Contraintes liées au système embarqué

Destinés à être embarqués, les D.E.M.s doivent satisfaire à un certain nombre de contraintes propres au robot (cf. §II.3.) et doivent fonctionner :

- pour une certaine gamme de vitesses de déplacement;
- dans une certaine gamme d'angles entre la direction de déplacement et la direction de visée du capteur;
- pour une certaine gamme de luminances;
- pour une certaine gamme de contrastes, avec, en particulier, la possibilité de détecter un faible contraste à une luminance moyenne élevée;
- dans un seul sens de déplacement appelé "sens préféré";
- en restant immunisé, d'une part vis-à-vis d'un bruit synchrone (tel qu'un flash ou une lumière papillotante susceptible d'activer simultanément les deux voies du D.E.M.), d'autre part vis-à-vis des perturbations engendrées par l'électromécanique de bord ou par le rayonnement du secteur à l'entour.

### III.2.1.c. Synoptique de traitement : étages du D.E.M. opto-électronique

L'étude conceptuelle d'un D.E.M. a été menée de manière interactive avec sa réalisation, en tenant compte de critères de parcimonie, miniaturisation, économie, légèreté, puisque chaque module devait être réalisé en N exemplaires. Il fallait éviter de concevoir un modèle trop théorique, impossible à construire ou à répliquer avec la technologie actuelle ou ne répondant pas à certains impératifs technologiques (par exemple, circuit trop volumineux pour être embarqué en cent exemplaires; cf. §II.3.). Certaines impossibilités technologiques nous ont parfois conduits à changer de solution. A titre d'exemple, un traitement précoce des signaux visuels basé sur le calcul d'une différentielle spatiale réalisée de proche en proche sur une centaine de directions de visée avait été envisagé. Cette solution a dû être écartée car elle nécessitait l'utilisation de cent photodiodes entièrement appareillées.

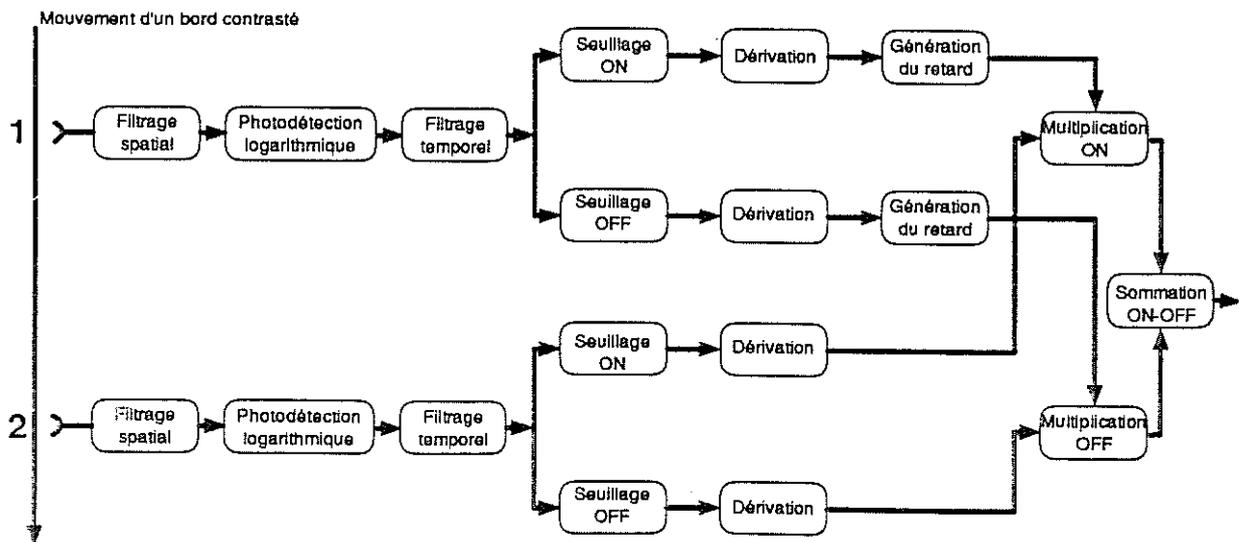


Fig.III-2 : Synoptique de traitement du D.E.M.

La Fig.III-2 illustre le synoptique de traitement général du D.E.M. Elle montre d'abord le traitement de signal réalisé de façon identique sur chacune des 2 voies pour détecter successivement un même front de contraste :

- un dispositif optique assure un filtrage spatial passe-bas et canalise sur une fibre optique un signal lumineux recueilli dans une direction de l'espace;
- une photodétection logarithmique réalise une compression d'amplitude;
- un filtrage temporel de type passe-haut permet d'extraire la composante dynamique significative du passage du front de contraste de l'image initiale; grâce à la conversion logarithmique qui le précède, il délivre un signal de sortie quasiment indépendant de la lumière ambiante, et la composante continue de son signal d'entrée, correspondant à la valeur moyenne de l'intensité lumineuse, est éliminée; en réalité, c'est un filtrage passe-bande qui est réalisé, la partie passe-bas additionnelle servant à atténuer les bruits d'image induits par les vibrations électromécaniques de bord ainsi que les perturbations éventuelles apportées par le secteur (50Hz) et par l'éclairage artificiel de l'environnement (100Hz);
- sur chaque voie les fronts de contraste clair-sombre, appelés ON, et sombre-clair, appelés OFF, sont traités *séparément*; pour ce faire, un dédoublement des voies permet d'activer en parallèle deux circuits à seuil à hystérésis qui basculent sélectivement, l'un au passage d'un front de contraste ON, l'autre au passage d'un front de contraste OFF, réalisant par là-même un filtrage non-linéaire en amplitude;
- sur chacune de ces voies, une dérivation déclenche une impulsion normalisée au passage d'un front de contraste.

La Fig.III-2 montre ensuite la partie du traitement relative à la mesure proprement dite de la vitesse angulaire  $\Omega$  du front de contraste. Cette mesure est effectuée à partir des deux impulsions normalisées successives, obtenues sur chacune des deux voies lors de la détection du passage d'un contraste de même polarité (ON ou OFF) :

- sur la voie 1 dédoublée, toute impulsion génère une fonction dite de "Retard", d'allure exponentielle décroissante retardée;
- l'équivalent d'une multiplication analogique est effectué entre les voies 1 et 2 (de manière identique entre les aiguillages associés respectivement aux ON et OFF). Ainsi par exemple, lorsqu'un front de contraste ON en mouvement est détecté sur la voie 1, il déclenche une fonction Retard. Lorsque ce même front de contraste arrive devant la direction de visée de la voie 2, sa détection déclenche une impulsion qui vient échantillonner l'amplitude de la fonction Retard grâce à l'aiguillage ON associé. Il en est de même lorsqu'un front de contraste OFF se déplace devant les deux directions de visée, mais c'est alors le deuxième aiguillage de chaque voie qui prendra en charge la détection du mouvement.
- une sommation analogique regroupe les sorties associées aux ON et OFF et délivre un signal dont l'amplitude varie avec la distance de détection du front de contraste.

Une description plus détaillée du fonctionnement du D.E.M. permettra d'expliquer le rôle de chaque étape de traitement, ainsi que le choix et le fonctionnement des circuits qui lui sont associés (cf. §III.2.3. et §III.2.4.).

#### Remarques :

D'autres solutions opto-électroniques que celle retenue ici ont été envisagées pour fabriquer un détecteur de mouvement directionnel (Blanes, 1986). Certaines pourraient sans doute présenter des performances supérieures. Mais rappelons que la philosophie de cette étude, inspirée des mécanismes observés sur le vivant et en particulier chez la mouche, repose non pas sur la réalisation d'un D.E.M. isolé qui présenterait des performances exceptionnelles (en particulier de précision) mais plutôt sur celle d'un oeil entier, composé d'une mosaïque de D.E.M.s adjacents, légers et bon marché, chacun doté d'une précision modeste (cf. §III.2.5.) l'ensemble étant suffisant pour guider une plate-forme mobile.

#### III.2.2. Dispositif expérimental de test des D.E.M.s

La Fig.III-3-A représente le dispositif expérimental mis au point pour tester la réponse d'un photocapteur et d'un D.E.M. dans les conditions d'utilisation réelles.

Le D.E.M. étudié est monté sur un chariot dont le déplacement linéaire est assuré par un servomécanisme de vitesse mettant en oeuvre :

- un rail en alliage léger, de 4 mètres de long, disposé horizontalement à 50 centimètres du sol et pouvant pivoter autour d'un axe vertical;
- un chariot (supportant le D.E.M.) monté sur 3 roulements à billes de support et trois galets à billes latéraux;
- un moteur d'entraînement à une extrémité du rail;
- un potentiomètre 15 tours de type "servo" à l'autre extrémité;
- un câble de traction du chariot.

Ce dispositif permet de faire avancer un D.E.M. en translation à une vitesse constante  $25\text{cm/s} < V_0 < 100\text{cm/s}$  devant un panorama statique constitué de bandes de hauteur un mètre, de largeur  $L_b$  et de contraste  $m$  variables, maintenues verticalement sur le sol, parallèles entre elles et disposées aléatoirement à différentes profondeurs  $D < 2,50\text{ m}$ .

Trois paramètres caractérisant la position des capteurs opto-électroniques du D.E.M. sont réglables dans ce dispositif (Fig.III-A) :

- leur position radiale (1 et 2 à la Fig.III-3-A);
- l'écart angulaire  $\Delta\phi$  (angle interommatidial) entre les directions de visée des capteurs;

- l'orientation angulaire  $\varphi$  de l'ensemble par rapport à la direction de déplacement (Fig.III-3-B).

La Fig.III-4-A montre l'empilement sur le chariot des supports de trois capteurs opto-électroniques permettant le test de deux D.E.M.s (Fig.III-4-B).

Un câble souple permet de véhiculer les signaux issus des capteurs vers une console de réception et d'analyse des signaux.

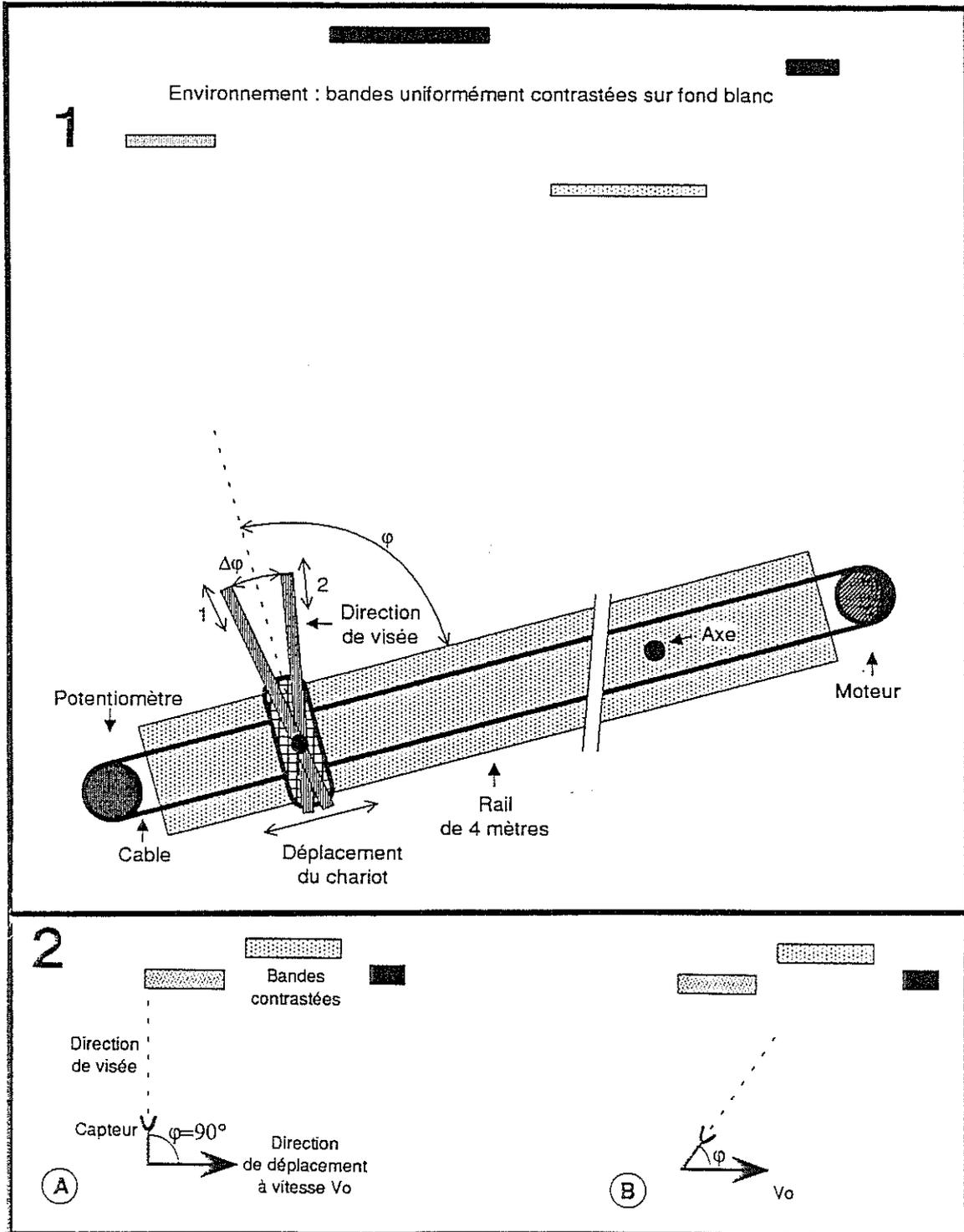


Fig.III-3 : 1) Dispositif expérimental de test des D.E.M.s; 2) Réglage de l'angle  $\varphi$  entre la direction de déplacement ( $V_0$ ) et la direction moyenne de visée d'un D.E.M. : A)  $\varphi=90^\circ$  et B)  $\varphi=45^\circ$ .

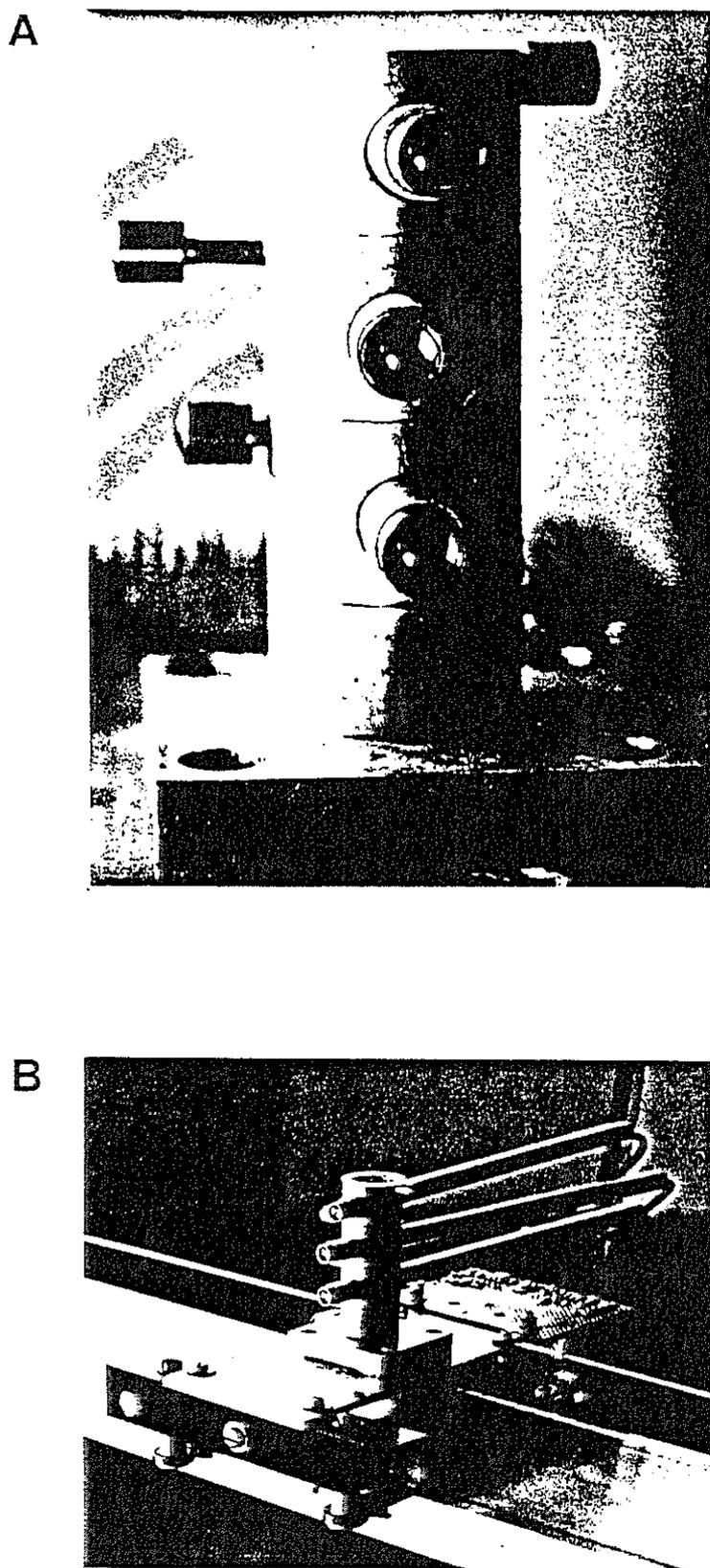


Fig.III-4 : A) Empilement de 3 capteurs opto-électroniques assurant un échantillonnage visuel dans 3 directions de l'espace; B) Chariot du dispositif expérimental de test de D.E.M.s (Fig.III-3).

### III.2.3. Extraction de fronts de contraste

La chaîne d'entrée, appelé *ommatidie* par analogie avec le système visuel de la mouche (cf. Annexe, §A.2.2.), est identique sur chacune des deux voies d'un D.E.M.. Son rôle est d'échantillonner l'espace visuel pour en extraire un signal significatif du passage d'un front de contraste dans son champ visuel local.

Cette opération dépend de plusieurs paramètres interagissant simultanément sur l'entrée photonique : la lumière ambiante, la direction relative de l'angle de visée par rapport à la direction du déplacement (caractérisée par l'angle  $\varphi$ ), la direction du déplacement (direction du rail) par rapport au plan des bandes-objets, le module de la vitesse de déplacement (chariot)  $V_0$ , la distance radiale de détection  $D$ , la taille de l'objet (notamment sa largeur  $L_b$ ) et la valeur de son contraste  $m$  par rapport au "fond" de la scène.

Le signal en sortie de cette opération se présente sous la forme d'une impulsion, normée en amplitude, déclenchée pour chaque front de contraste détecté (Fig.III-5).

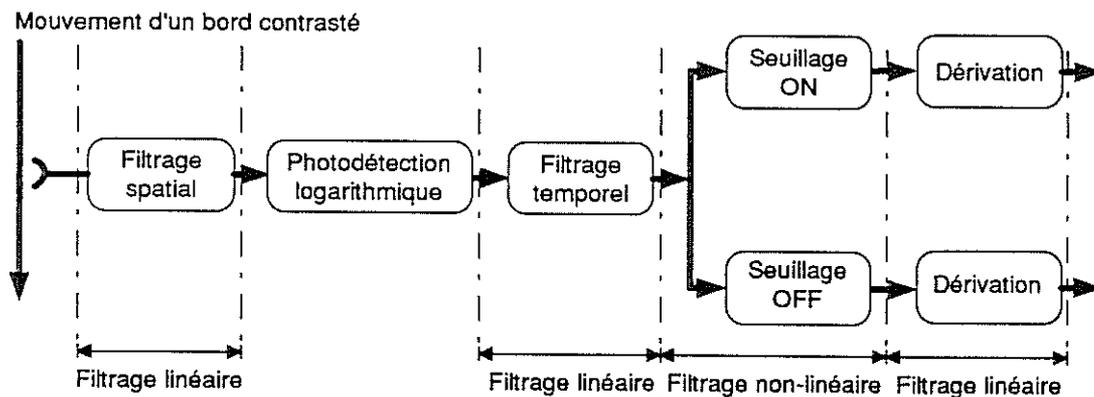


Fig.III-5 : Synoptique de l'extraction d'un front de contraste.

#### III.2.3.a. Système optique

Le traitement le plus précoce réalise sur chacune des voies d'un D.E.M. un *filtrage spatial*. L'ajustement de ce filtrage doit pouvoir éventuellement varier avec l'orientation du D.E.M. (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.IV).

Un D.E.M. échantillonne l'espace selon deux axes optiques sécants, espacés d'un angle interommatidial  $\Delta\varphi$  (Fig.III-6). Comme dans l'oeil composé des insectes, on a retenu ici l'emploi d'une lentille pour chaque direction de visée dans l'espace. Le filtrage spatial réalisé

dépend de l'ouverture angulaire du champ visuel qui, comme le montre la Fig.III-6, dépend de la largeur de la surface photosensible dans le plan focal.

En fait, le champ visuel d'une ommatidie s'exprime à la manière du "diagramme de sensibilité angulaire" d'une antenne (Franceschini, 1975). Sa largeur à mi-hauteur  $\Delta\phi$ , ici de l'ordre du degré, caractérise l'ouverture et surtout le filtrage (passe-bas) des fréquences spatiales (Götz, 1965). La forme précise du diagramme de sensibilité angulaire est également conditionnée par les aberrations optiques de la lentille, aberrations sphériques et chromatiques notamment.

Toute lentille mince est caractérisée par son diamètre  $\Phi_{\text{lent}}$  et sa distance focale  $f$ . Le quotient de ces 2 paramètres  $f/\Phi_{\text{lent}}$ , appelé *ouverture relative* ("f-number"), est un paramètre essentiel car il conditionne l'éclairement dans le plan focal (éclairement exprimé en Lux ou en photons/sec/m<sup>2</sup>). Ainsi, si un certain éclairement est nécessaire dans le plan focal, il peut être obtenu par des lentilles de diamètres différents, pourvu que le rapport  $f/\Phi_{\text{lent}}$  reste constant. Tout récepteur placé dans le plan focal où règne un éclairement donné, devra avoir une surface collectrice minimale pour délivrer un signal supérieur au bruit. Cette surface minimale impose, par voie de conséquence, une limite à la finesse du diagramme de sensibilité angulaire donc une limite aux fréquences spatiales susceptibles d'être transmises par un tel récepteur/lentille.

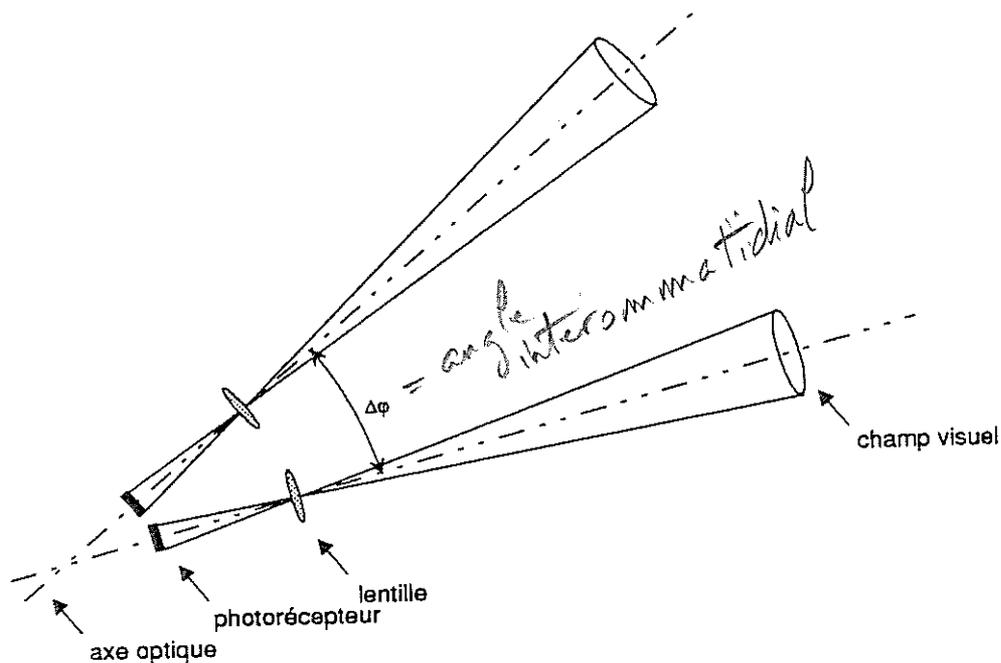


Fig.III-6 : Echantillonnage spatial sur les deux directions de visée d'un D.E.M. dans le plan azimuthal.

Plusieurs séries d'enregistrements de courbes de la sensibilité directionnelle ont été effectuées afin de caractériser l'évolution géométrique et énergétique liée au positionnement d'un récepteur de lumière dans le plan image d'une lentille de distance focale  $f$ . Elles avaient

pour but de mettre en évidence certaines propriétés (en particulier la sensibilité à la défocalisation) dont il importait tenir compte lors du choix des lentilles du système de vision du robot.

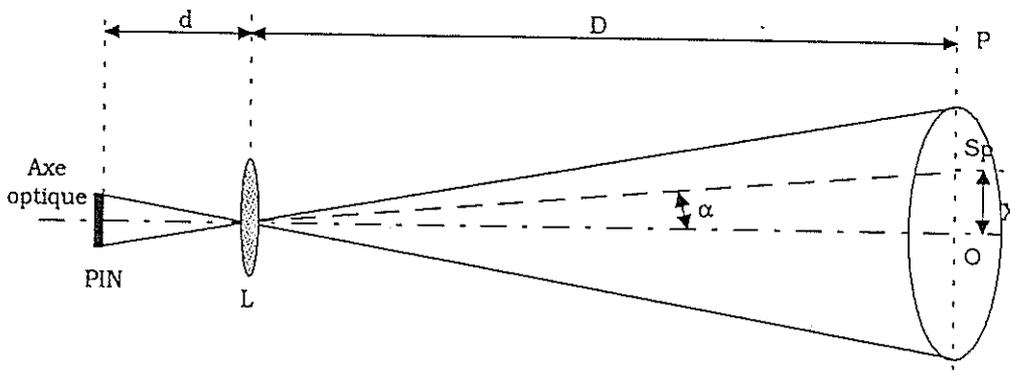


Fig.III-7 : Principe de mesure de la sensibilité directionnelle de l'ensemble photodiode-lentille.

La Fig.III-7 illustre le principe de mesure du diagramme de sensibilité angulaire d'un ensemble photodiode-lentille. Une photodiode de type PIN (cf. §III.2.3.b.), ayant une surface photosensible circulaire de diamètre  $\Phi_{pin}=1\text{mm}$  est placée sur l'axe optique et au voisinage du foyer d'une lentille de diamètre  $\Phi_{lent}=30\text{mm}$  et de distance focale  $f=50\text{mm}$ . Une vis micrométrique permet d'ajuster avec précision son positionnement axial d. Une source dite ponctuelle  $S_p$  située à une distance  $D=185\text{cm}$ , est déplacée perpendiculairement à l'axe optique. La source étant ponctuelle, la forme à proprement dite du photocapteur n'intervient pas : seule la longueur de l'axe azimutal photosensible balayé par la lampe intervient. Dans ces conditions, le signal S, délivré par le photodétecteur (linéaire) en fonction du temps t, donne l'allure de la courbe de sensibilité angulaire. En effet, à vitesse lente et constante  $V_o$ , le paramètre temps, est équivalent à un paramètre angulaire pour de petits angle  $\alpha$  :

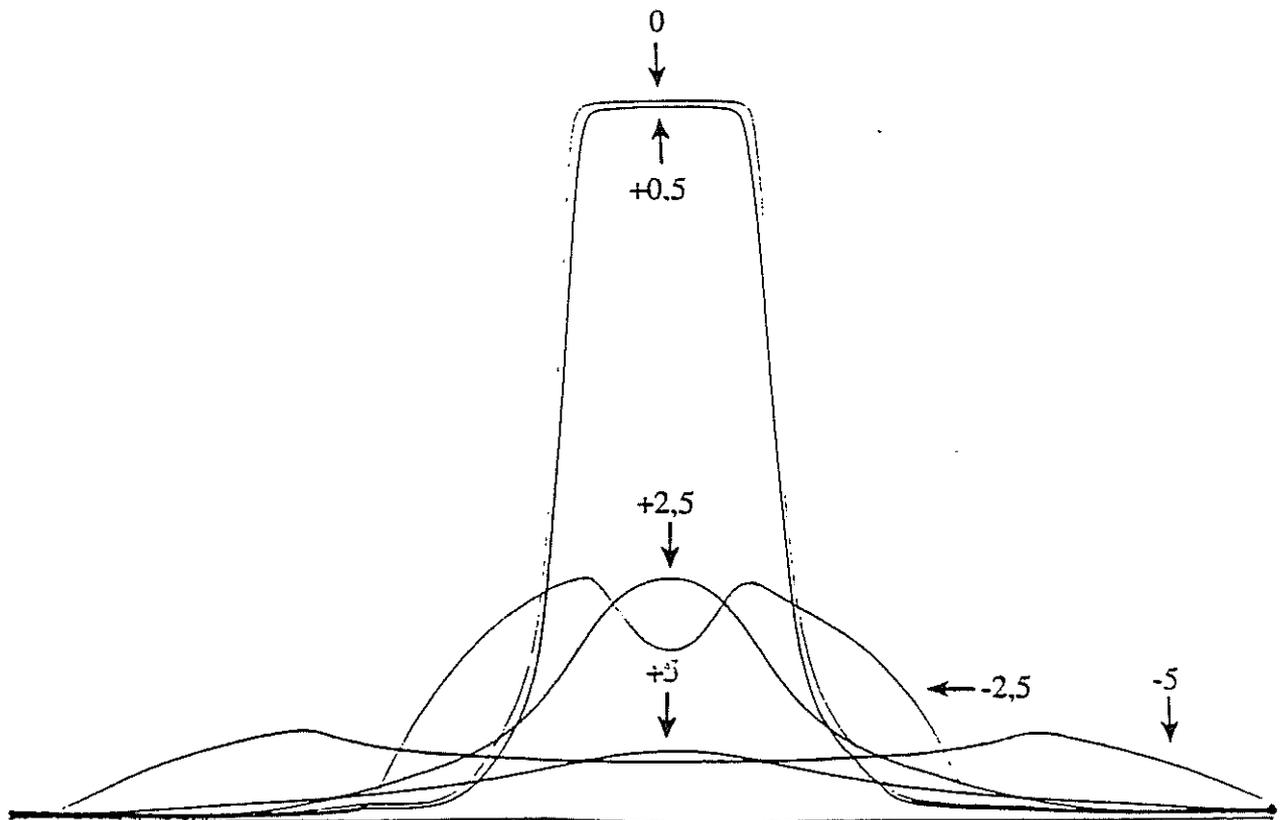
$$S = f(t) \quad t = X / V_o \quad \tan(\alpha) = X / D$$

Pour  $\alpha$  petit,  $\tan(\alpha) = \alpha \quad S = f(\alpha \cdot D / V_o) \equiv f(\alpha)$  (III.1)

*soit  $X = \alpha \cdot D$  d'où si  $V_o$  lent (petit) devant  $D$*

La Fig.III-8 illustre le changement de forme et d'amplitude du diagramme de sensibilité angulaire en fonction du degré de défocalisation. Ces courbes montrent que tout positionnement du récepteur de part et d'autre du plan focal entraîne un élargissement du diagramme de sensibilité directionnelle.

La Fig.III-9 illustre, par une autre série de mesures effectuées dans les mêmes conditions expérimentales (Fig.III-7), l'allure de la sensibilité angulaire selon le degré de défocalisation, mais ici les courbes sont normalisées, pour mieux apprécier le changement de largeur angulaire.

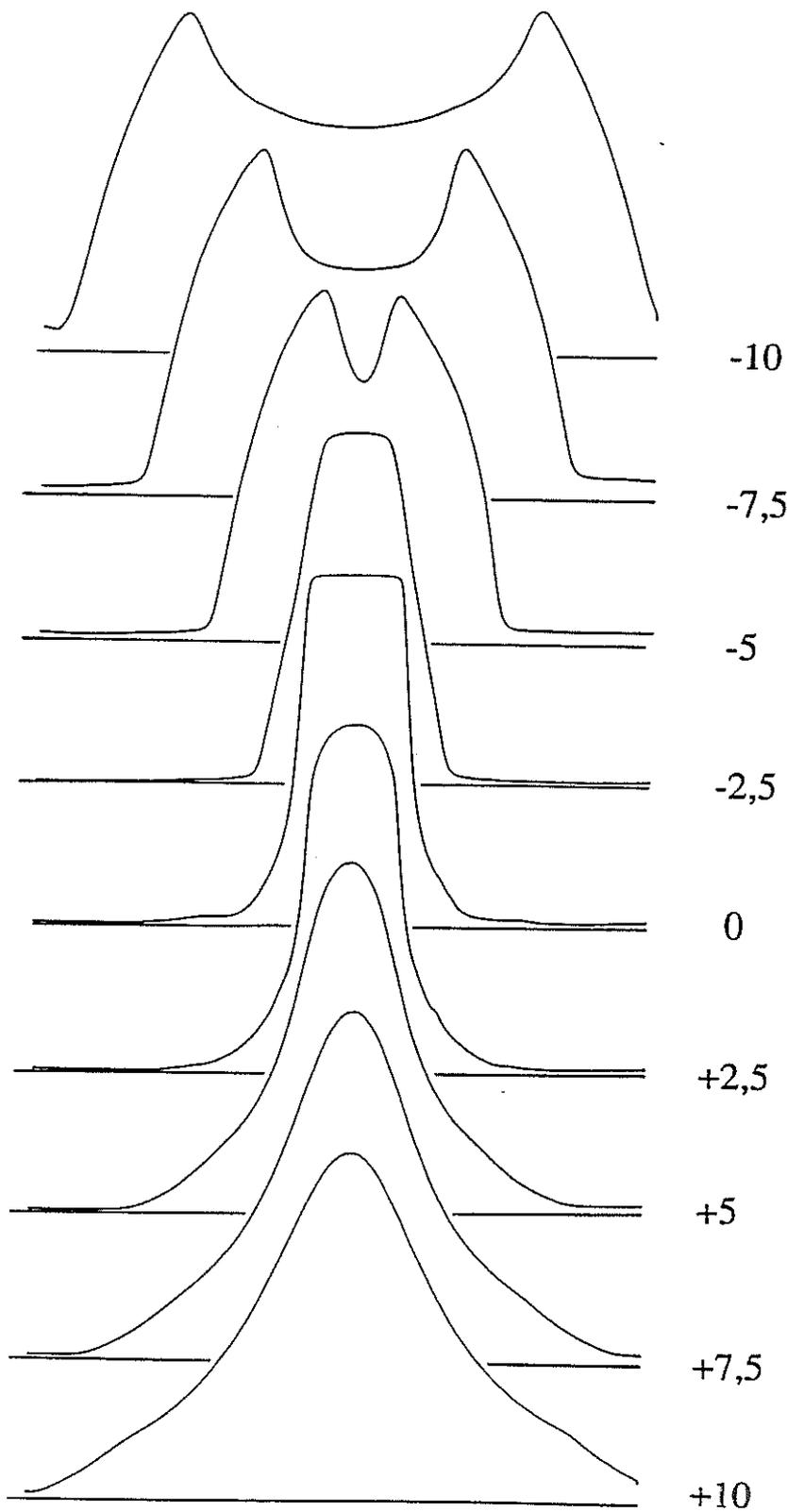


**Fig.III-8** : Forme et amplitude du diagramme de sensibilité angulaire d'un ensemble lentille/photodiode selon le degré de défocalisation. Paramètres expérimentaux (Fig.III-7) :  $\Phi_{\text{ent}}=3\text{cm}$   $f=5\text{cm}$   $D=185\text{cm}$ . Photocapteur circulaire de diamètre 1mm (Photodiode PIN). Photodétection linéaire. Défocalisation de part et d'autre du plan focal par pas de 2,5mm (une défocalisation de signe (-) signifie que le photocapteur est situé entre la lentille et son plan focal).

#### Résultats et conclusions :

Ces résultats sont à rapprocher des travaux de Horn (1974) qui décrivent les propriétés d'une image défocalisée et les effets de l'aberration sphérique. Il est intéressant de rappeler que :

- lorsque la défocalisation a lieu en avant du plan focal, un minimum d'énergie est localisé au centre du diagramme de sensibilité (Fig.III-9);
- lorsque la défocalisation a lieu en arrière du plan focal, un maximum d'énergie est localisé au centre du diagramme de sensibilité, et la forme du diagramme plus ou moins gaussienne (Fig.III-9);
- la défocalisation entraîne dans tous les cas une perte d'énergie transmise (Fig.III-8).



*Capteur  
à l'arrière  
de la lentille*

*Capteur  
vers la lentille*

Fig.III-9 : Forme et amplitude du diagramme de sensibilité angulaire de l'ensemble lentille/photodiode selon le degré de défocalisation. Courbes normalisées. Conditions expérimentales identiques à celle de la Fig.III-8.

Cette série de mesures a permis de caractériser les variations d'énergie liées à la défocalisation et de noter que les angles d'acceptance  $\Delta\rho$  varient de manière monotone avec la distance  $d$  séparant le plan focal du plan où était positionné le photodétecteur. Alors que toute défocalisation (positive) fixe en fait une nouvelle distance de mise au point  $D_f$ , on en déduit que pour un positionnement axial donné du capteur, la forme du diagramme de sensibilité angulaire varie avec la distance.

De toutes ces mesures, il est possible de conclure que l'ajustement de la largeur à mi-hauteur,  $\Delta\rho$ , est finement réglable par défocalisation mais que cet ajustement se fait au détriment de l'énergie recueillie au niveau d'un photodétecteur. Par ailleurs, un tel procédé permet de réaliser un filtrage spatial d'allure quasi-gaussienne si l'on positionne le photodétecteur au delà du plan focal. Cette forme joue, en effet, un rôle important dans les performances du D.E.M. (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.III).

### III.2.3.b. Photodétection

Cet étage doit permettre de transformer le passage d'un front de contraste dans le champ optique de l'ommatidie en un signal électrique dont les caractéristiques dynamiques doivent être indépendantes de la lumière ambiante (dans une gamme de luminosité de 2 décades).

#### Couplage opto-électronique d'une ommatidie d'un D.E.M.

Le système de réception adopté est constitué par un photodétecteur (photodiode PIN) disposé derrière une lentille. Un tel système permet, comme nous l'avons vu, de réaliser un filtrage spatial par réglage de la défocalisation (cf. §III.2.3.a).

En réalité, ce n'est pas le détecteur lui-même qui est placé au voisinage du plan focal de la lentille, mais plutôt l'embouchure d'une fibre optique plastique qui guide le signal jusqu'au photodétecteur. Cette façon de procéder a permis en effet de blinder plus facilement l'ensemble des photodétecteurs d'entrée, en les regroupant en un même lieu, et de résoudre des problèmes d'encombrement liés à l'architecture du système d'échantillonnage complet du robot, qui nécessite une centaine de direction de visée (cf. §IV.1.). Avec un tel dispositif optique, le filtrage spatial peut être ajusté par défocalisation de la fibre optique (cf. §II.2.3.a). Afin d'étendre encore la gamme de réglage de l'angle d'acceptance  $\Delta\rho$ , un microdiaphragme de forme variable est inséré derrière la lentille, solidaire de l'extrémité de la fibre optique (Fig.III-10). Ainsi est-il possible, en utilisant des diaphragmes rectangulaires de largeurs diverses, d'obtenir un filtrage spatial d'allure quasi rectangulaire, de largeur  $\Delta\rho$  désirée.

Ce récepteur ainsi "préfocalisé" doit permettre de détecter le mouvement relatif d'un front de contraste dans une direction de l'espace.

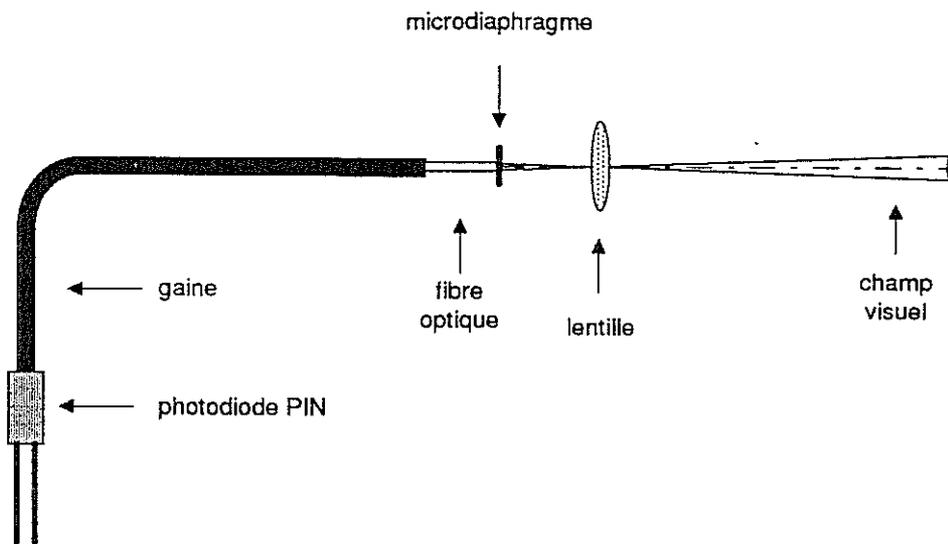


Fig.III- 10 : Couplage opto-électronique d'une ommatidie d'un D.E.M.

#### Le contraste d'un objet

Le contraste d'un objet est, pour un spectre d'illumination donné, une grandeur propre à l'objet, indépendante de la lumière ambiante. La Fig.III-11 illustre la transition entre deux plages d'intensité différentes  $I_{max}$  et  $I_{min}$ . Le contraste  $m$  s'exprime par :

$$m = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$$

$$m = (2 \cdot \Delta I) / (2 \cdot I) = \Delta I / I \quad (\text{III.2})$$

$I$  représente la luminance moyenne  $(I_{max} + I_{min}) / 2$

$\Delta I$  la "modulation"  $(I_{max} - I_{min}) / 2$ .

Ce concept de "contraste" est donc équivalent au concept de "taux de modulation" en électronique, mais il est défini sur un signal variant avec l'espace et non pas avec le temps.

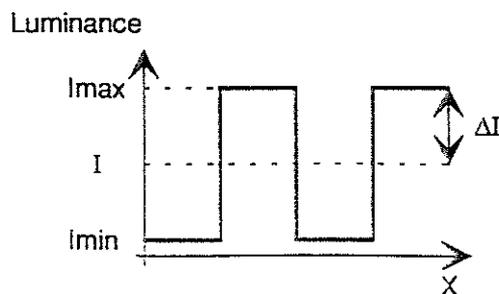


Fig.III-11 : Définition d'un contraste :  $m = \Delta I / I = \text{contraste}$

Lors du passage d'un contraste devant le photodétecteur, le signal brut délivré comprend deux composantes : l'une correspondant à la composante dynamique (qualifiée d'utile), l'autre relative à la lumière ambiante. Désirant extraire le signal utile dans une large gamme de luminances, le mode de photodétection logarithmique (utilisé dans les ommatidies de la mouche) a été retenu. D'une part il assure une compression d'amplitude du signal issu du photodétecteur, d'autre part il délivre un signal dont la composante dynamique est une constante, fonction uniquement du contraste (indépendante de la luminance). En effet, au passage d'un front de contraste  $m$ , de "modulation"  $\Delta I$ , à une luminance moyenne  $I$ , la variation de luminance liée à la transition entre les deux plages d'intensité s'exprime par :

$$\ln(I - \Delta I) - \ln(I + \Delta I) = \ln[(I - \Delta I) / (I + \Delta I)] = \ln[(1 - m) / (1 + m)] \quad (\text{III.3})$$

Cette variation ne dépendant que du contraste  $m$ , propre à l'objet, la sortie est constante, quelle que soit l'intensité moyenne  $I$ , ce qu'illustre graphiquement la Fig.III-12..

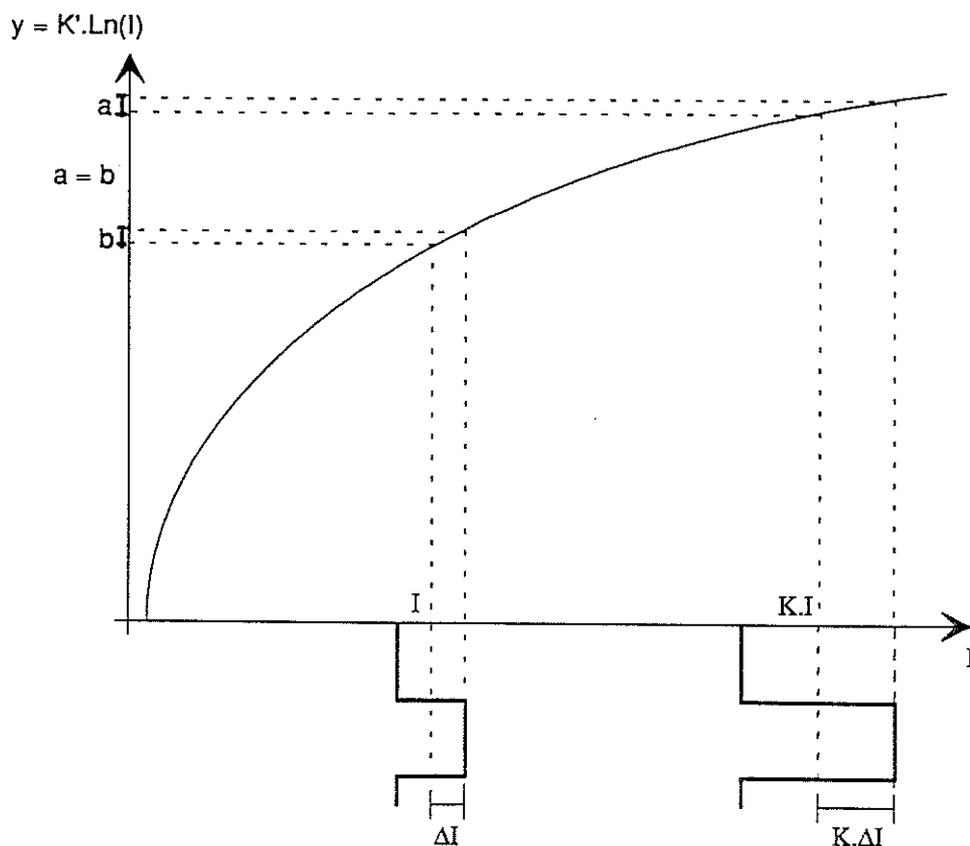


Fig.III-12 : Détection logarithmique d'un front de contraste.

Dans notre étude, un front de contraste est défini comme maximal lorsqu'il correspond à une plage noire sur fond blanc. Les mesures effectuées avec une photodiode en mode linéaire des intensités réfléchies par ce noir et ce blanc ont montré que le contraste maximal est proche de  $m=0,7$ .

### Photodiode PIN

La photodétection est réalisée par des photodiodes de type PIN. Sensibles dans le visible et l'infra-rouge, elles génèrent moins de bruit que les phototransistors à faible signal et sont plus stables. Leur temps de réponse, de l'ordre de la nano-seconde est plus que suffisant ici. Plusieurs types ont été préalablement sélectionnés en fonction de leur détectivité, de leur sensibilité et de leur coût, puis passés aux tests. D'utilisation courante, ce type de composant présente l'avantage d'être disponible chez de nombreux fabricants, sous de multiples caractéristiques techniques et physiques, y compris optique comme celui décrit à la Fig.III-10

### Photodétection logarithmique

La photodétection logarithmique est réalisée par un circuit électronique (Fig.III-13) dont la caractéristique entrée/sortie s'exprime par (Gage et al., 1977) :

$$V_{out} = (1 + R_1/R_2) \cdot (kT/e) \cdot \ln(1 + I_p/I_s) \quad (III.4)$$

$I_p$  : courant de photoconduction

$I_s$  : courant de saturation inverse

$kT/e = 25mV$

$R_1, R_2$  : résistances

Dans les conditions d'utilisation,  $(I_p / I_s) \gg 1$  et ainsi,  $V_{out} = K \cdot \ln(I_p)$  (III.5)

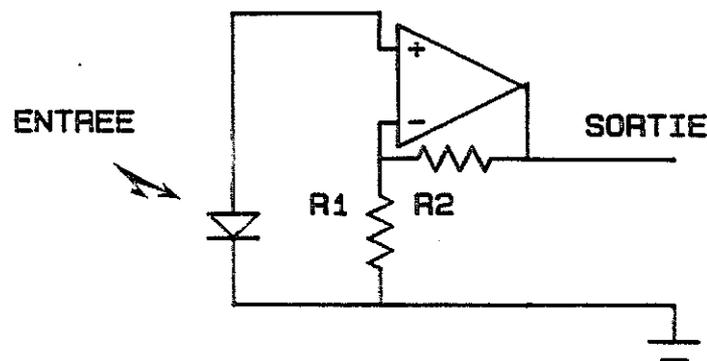


Fig.III-13 : Circuit électronique de l'étage de photodétection logarithmique.

Pour caractériser d'une part le fonctionnement d'une photodiode PIN dans ce mode de photodétection, d'autre part la variabilité du signal de sortie d'un lot de photodiodes de même type, plusieurs photodétecteurs ont été placés successivement derrière le même système lentille+ fibre optique (Fig.III-10). La Fig.III-14 montre leurs réponses enregistrées pour une série de luminances, en intercalant des filtres neutres de densité optique croissante devant la lentille. Rappelons que la "densité optique" d'un filtre est le cologarithme de son facteur de transmission. La linéarité observée sur cette échelle semi-logarithmique témoigne de la réponse quasi logarithmique des détecteurs. Il est intéressant de noter qu'un tel système délivre une sortie moyenne appréciable ( $0,1 \text{ Volts} < V < 4 \text{ Volts}$ ) dans une gamme étendue de luminance, voisine de 3 décades. Toutefois, pour une même lentille, une même luminance, un même circuit électronique, 2 photodiodes distinctes choisies au hasard délivrent des signaux qui diffèrent par leur pente et par leur décalage vertical. Par ailleurs, on constate, au cours du temps, des fluctuations sur la réponse d'un même capteur, à cause notamment de la température. Ceci souligne la quasi impossibilité d'obtenir deux photodiodes appareillées, comme c'est d'ailleurs le cas dans les systèmes biologiques où deux capteurs voisins ne sont pas rigoureusement identiques.

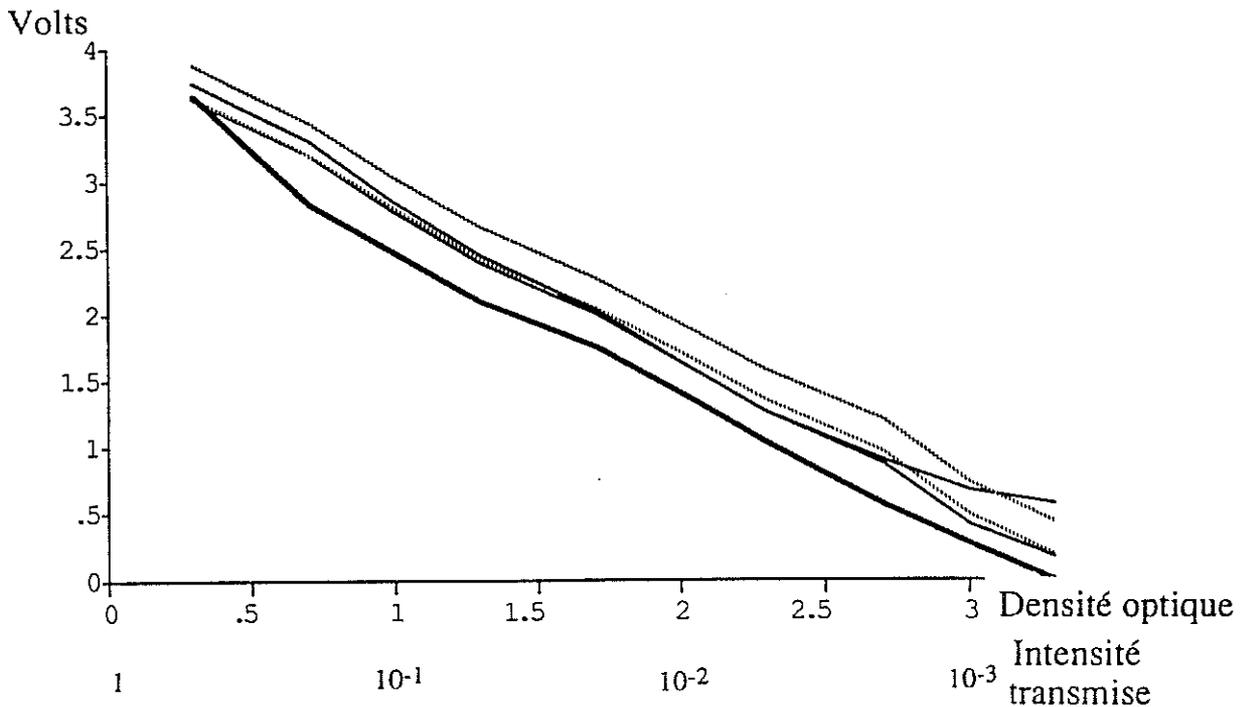


Fig.III-14 : Variabilité de la réponse de quatre photodiodes PIN en mode logarithmique (Fig.III-13).

Une série de tests a été effectuée en plaçant ce système de détection sur le dispositif expérimental (Fig.III-3), dans des conditions proches de celles qu'il aurait sur le robot (cf. §III.2.2.). Le microdiaphragme monté en bout de fibre est ici circulaire, de diamètre  $\Phi_{\text{dia}}=0,4\text{mm}$ , la lentille de distance focale  $f=20\text{mm}$  et de diamètre  $\Phi_{\text{lent}}=10\text{mm}$ .

Une expérience a permis de caractériser la réponse impulsionnelle spatiale du système pour différentes distances de détection. La Fig.III-15 montre l'allure des signaux issus du photodétecteur logarithmique tels qu'ils ont été enregistrés lors d'un passage à vitesse faible et constante  $V_0$ , devant une lampe à filament vertical de hauteur 5cm (toujours supérieure à celle du champ visuel), disposée à une distance  $D$  variant de 20cm à 210cm par pas de 10cm.

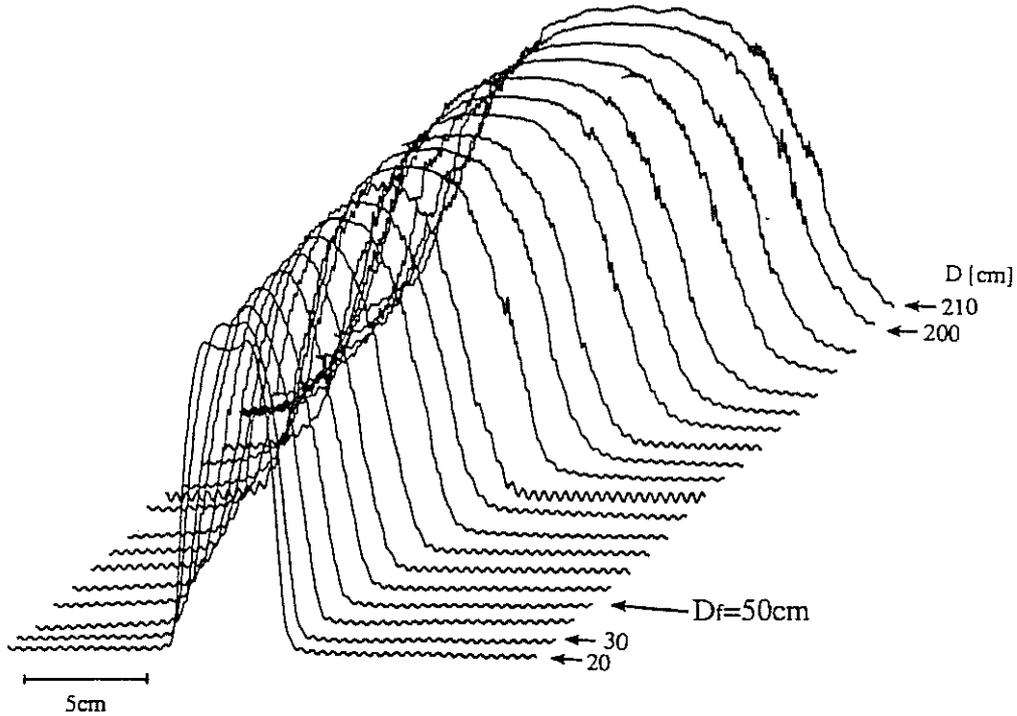
On note que l'utilisation du diaphragme *circulaire*, une fois focalisé pour une certaine distance  $D_f > 25.f$ , permet d'obtenir des réponses d'allure quasi-gaussienne pour des distances  $D$  au delà de  $D_f$  tout en respectant les lois de l'optique géométrique. Pour des distances plus petite que  $D_f$ , on note que les réponses présentent un minimum d'énergie au centre du diagramme (comme à la Fig.III-9).

Les Fig.III-16 et 17, réalisées avec le même dispositif, illustrent les réponses du photodétecteur logarithmique pour des focalisations à deux distances successives lors d'un passage devant une bande noire de largeur "infinie" (échelon), disposée perpendiculairement à l'axe optique, à différentes profondeurs  $D$  allant de 20cm à 250cm par pas de 10cm.

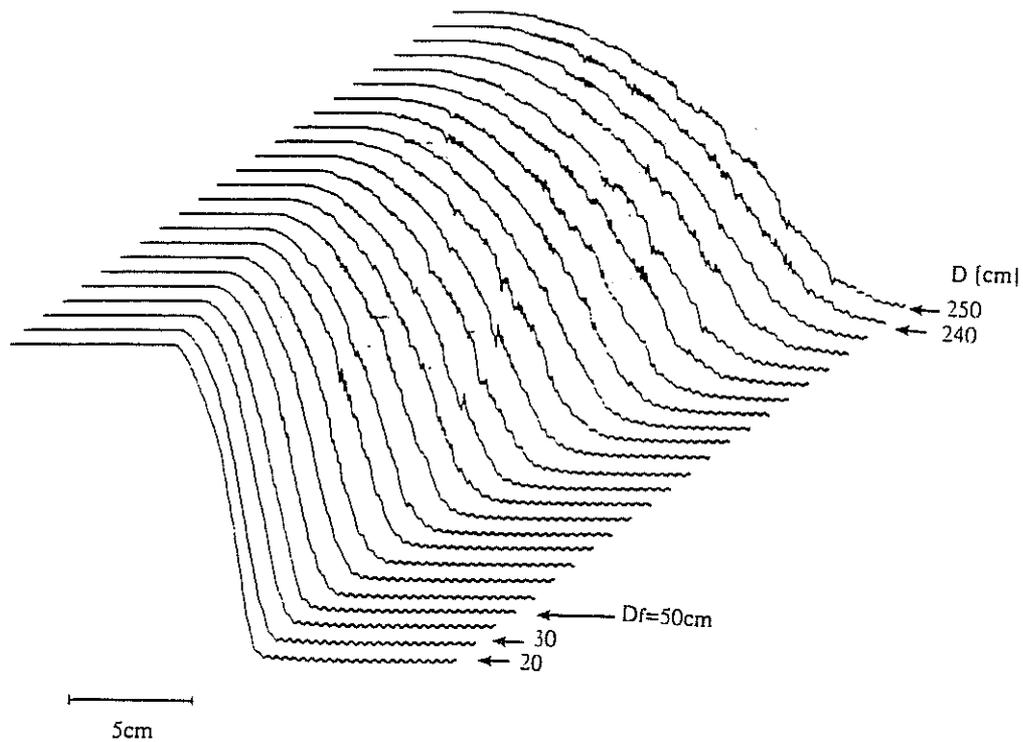
On note à la Fig.III-16 que la largeur de la réponse indicielle évolue de manière monotone avec la distance de détection. On note à la Fig.III-17 que, quelle que soit la distance  $D_f$  de mise au point du diaphragme, la pente du signal décroît de manière monotone avec la distance  $D$ , et que la pente est d'autant plus grande que la distance de focalisation  $D_f \gg f$  est réalisée pour un objet éloigné.

La Fig.III-18, réalisée avec le même dispositif opto-électronique, montre l'influence de la largeur de l'objet détecté à une distance  $D$  sur l'amplitude de la réponse recueillie. Ces enregistrements ont été faits à vitesse constante  $V_0$  en utilisant toujours la même valeur de contraste  $m=0,7$ . Les signaux issus de la photodétection logarithmique ont été enregistrés lors d'un passage devant des bandes contrastées de largeurs  $L_b$  différentes, placées à une même distance  $D$ , et ce pour plusieurs distances  $D$ .

Il est possible d'en conclure que la pente de la composante dynamique du signal de sortie est d'autant plus faible que la distance de détection  $D$  est plus grande (comme à la Fig.III-17), et qu'à une distance donnée  $D$ , la pente ne dépend pas de la largeur  $L_b$  de l'objet. On note par ailleurs qu'à une distance  $D$ , l'amplitude croît de manière monotone avec la largeur de la bande, jusqu'à ce que l'objet couvre entièrement l'angle d'acceptance, auquel cas la réponse sature. Ainsi, la variation d'amplitude recueillie dépend de la largeur de l'objet et de sa distance de détection.



**Fig.III-15** : Sensibilité directionnelle (normalisée) pour des distances  $D$  allant de 20 à 210cm par pas 10cm.  $Df=50$ cm.  $\Phi_{\text{dia}}=0,4$ mm.  $\Phi_{\text{leni}}=10$ mm et  $f=20$ mm.  $\varphi=90^\circ$ . Lampe à filament vertical de hauteur 5cm. Photodétecteur logarithmique.



**Fig.III-16**: Réponse indicielle spatiale (normalisée) pour des distances  $D$  allant de 20 à 250cm par pas de 10cm. Bande noire sur fond blanc  $m=0,7$  (échelon).  $Df=50$ cm.  $\Phi_{\text{dia}}=1$ mm.  $\Phi_{\text{leni}}=10$ mm et  $f=20$ mm.  $\varphi=90^\circ$ . Photodétection logarithmique. Evolution de la sensibilité angulaire.

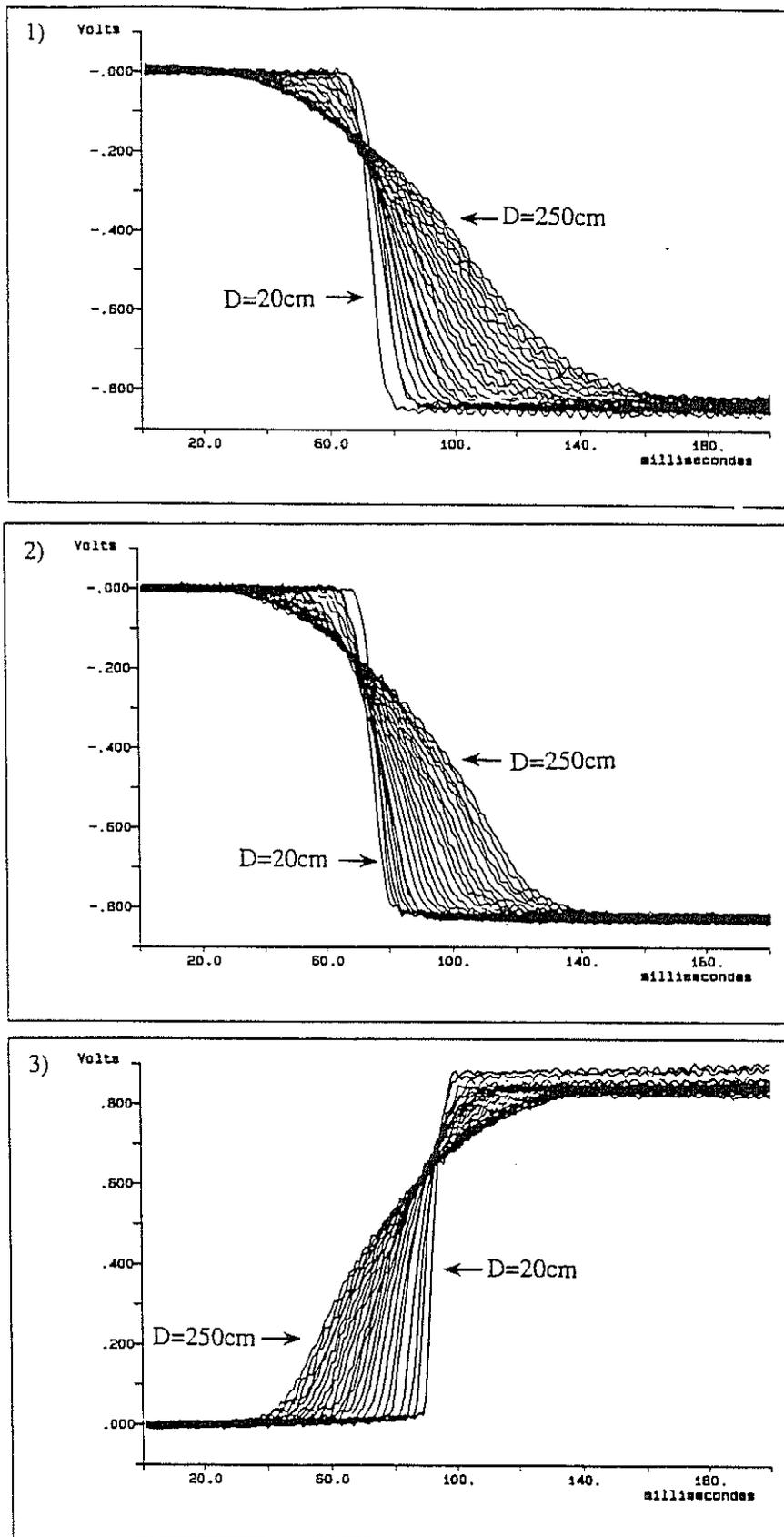
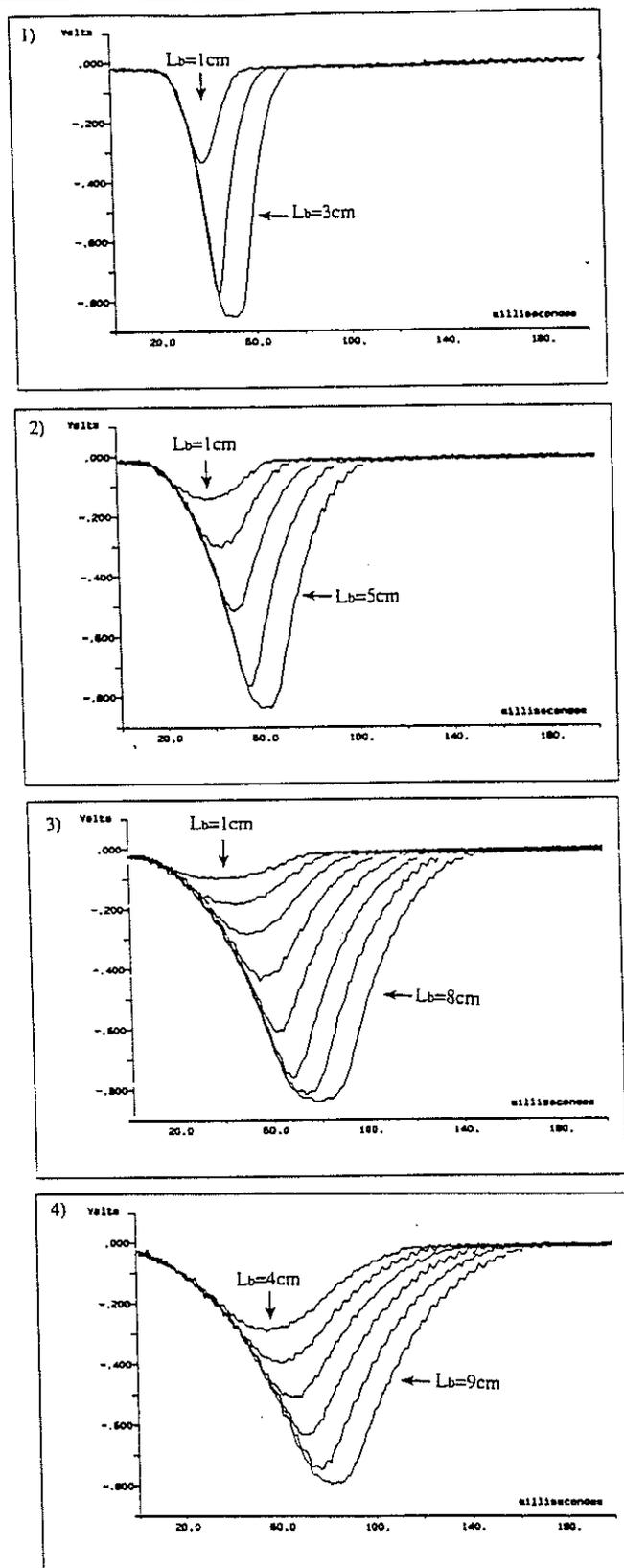


Fig.III-17 : Réponse indicielle à des distances  $D$  allant de 20 à 250cm par pas de 10cm.  $\Phi_{\text{dis}}=1\text{mm}$ ,  $\Phi_{\text{mi}}=10\text{mm}$ ,  $f=20\text{mm}$ ,  $\varphi=90^\circ$ . Photodétection logarithmique. Evolution de la sensibilité angulaire.

- 1) Bande noire sur fond blanc  $m=0,7$ .  $\Delta f=20\text{cm}$
- 2) Bande noire sur fond blanc  $m=0,7$ .  $\Delta f=150\text{cm}$
- 3) Bande blanche sur fond noir  $m=0,7$ .  $\Delta f=150\text{cm}$ .



**Fig.III-18** : Réponses de l'ommatidie lors de son passage devant des bandes noires sur fond blanc ( $m=0,7$ ), de largeur  $L_b$  variable, et situées à plusieurs distances  $D$ .  $D_f=150\text{cm}$ .  $\Phi_{\text{dia}}=0,4\text{mm}$ .  $\Phi_{\text{lent}}=10\text{mm}$  et  $f=20\text{mm}$ .  $\varphi=90^\circ$ . Photodétecteur logarithmique identique à celui des Fig.III-15, III-16 et III-17

- 1) Largeurs  $L_b$  allant de 1cm à 3cm par pas de 1cm.  $D=50\text{cm}$ .
- 2) Largeurs  $L_b$  allant de 1cm à 5cm par pas de 1cm.  $D=100\text{cm}$ .
- 3) Largeurs  $L_b$  allant de 1cm à 8cm par pas de 1cm.  $D=150\text{cm}$ .
- 4) Largeurs  $L_b$  allant de 4cm à 9cm par pas de 1cm.  $D=200\text{cm}$ .

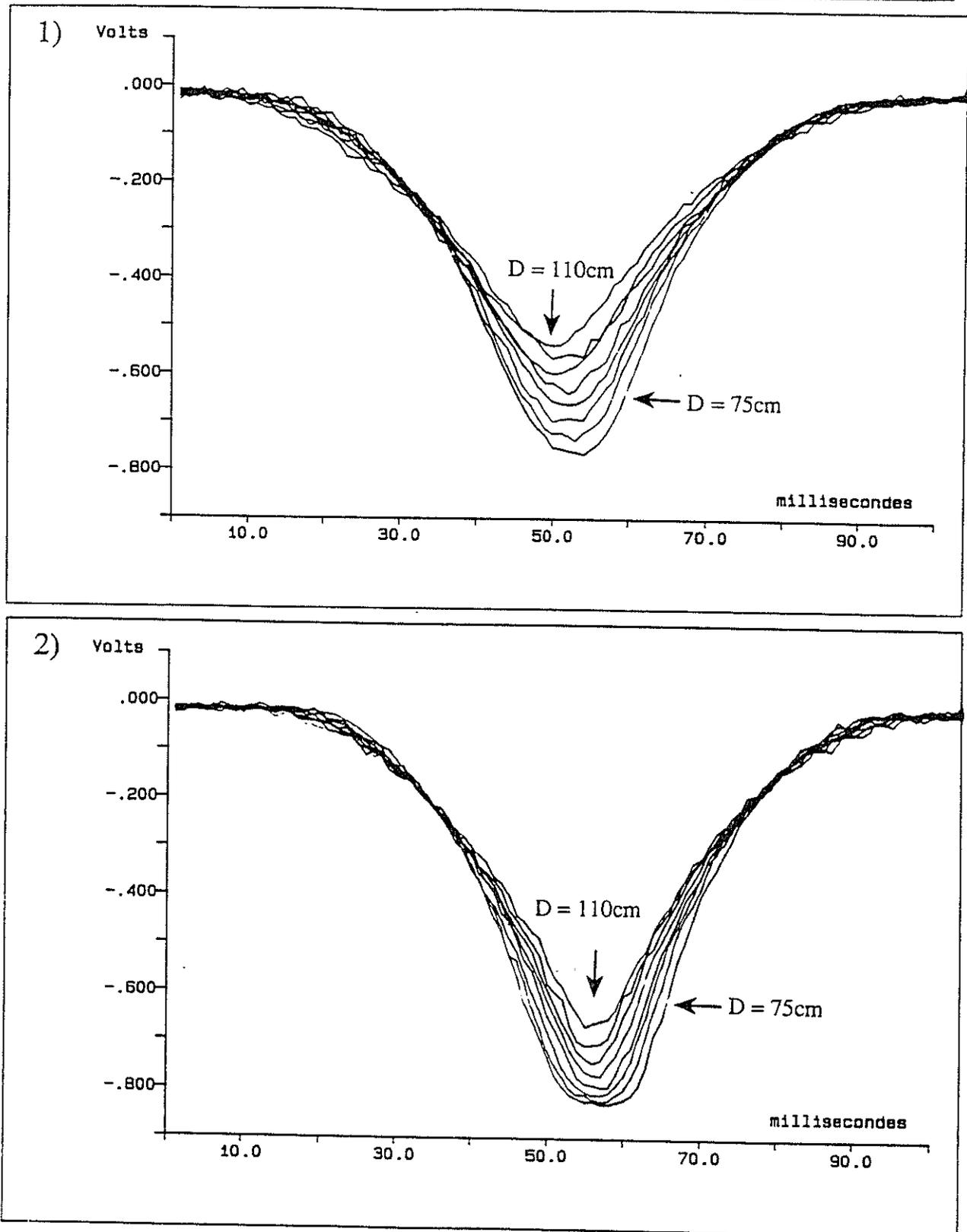


Fig.III- 19 : Réponses à des photodétections successives d'une même bande noire sur fond blanc ( $m=0,7$ ), de largeur  $L_b=4\text{cm}$ , située à plusieurs distances  $D$  allant de  $75\text{cm}$  à  $110\text{cm}$  par pas de  $5\text{cm}$ .  $\Phi_{\text{dia}}=0,4\text{mm}$ .  $\Phi_{\text{lent}}=10\text{mm}$  et  $f=20\text{mm}$ .  $\varphi=90^\circ$ . Photodétecteur logarithmique identique à celui des Fig.III-15, III-16, III-17 et III-18.

1)  $Df=20\text{cm}$ .

2)  $Df=150\text{cm}$ .

La Fig.III-19, réalisée dans les mêmes conditions, permet de comparer l'influence sur la détection, de la focalisation  $D_f$  et de la distance  $D$  pour une bande de largeur  $L_b$  constante ne couvrant pas entièrement l'angle d'acceptance  $\Delta\rho$ .

On note que les variations d'amplitude détectées sont d'autant plus importantes que la distance de mise au point  $D_f$  se rapproche de l'infini. Lorsque  $D_f$  diminue, les réponses s'affaiblissent en s'élargissant : la pente diminue et l'angle d'acceptance  $\Delta\rho$  augmente (comme illustré précédemment Fig.III-8).

Aux vues des résultats précédents, il semblerait que la détection d'un déplacement, à vitesse constante  $V_0$ , d'un unique front de contraste avec un seul photodétecteur suffirait pour en définir la distance  $D$  grâce à une mesure de la *pente* du signal. Cependant comme la pente du signal varie également avec la valeur  $m$  du contraste, cette affirmation n'est vraie que pour des contrastes déterminés et connus à l'avance. Elle ne peut donc être appliquée ici puisque le robot doit évoluer dans un environnement où par définition les contrastes sont aléatoires et inconnus. La réalisation d'un D.E.M. à partir de deux ommatidies permet de retrouver un signal relatif à la distance d'un front de contraste, et ce indépendamment de la valeur de ce dernier : il détecte sur chacune de ses deux voies un même panorama à deux instants successifs, puis effectue une mesure caractérisant le retard. Ainsi, la mesure n'est pas faite directement lors de la détection, mais découle de la détection successive du même panorama par chacune des deux directions de visée.

#### Limites de fonctionnement du couplage : lentille - diaphragme - photodétecteur logarithmique

Afin de définir les limites de fonctionnement du couplage optique associé à la photodétection logarithmique, l'extrémité d'une fibre plastique de diamètre  $\Phi_{f.o}=1\text{mm}$  et de longueur 30cm, est couplée à une photodiode PIN, ayant une surface photosensible de diamètre  $\Phi_{pin}=1\text{mm}$ . L'autre extrémité est placée derrière un diaphragme circulaire de diamètre  $\Phi_{dia}$  variable, lui-même focalisé derrière une lentille de diamètre  $\Phi_{lent}=5\text{mm}$  et de distance focale  $f=10\text{mm}$ . On constate que lors d'une utilisation en lumière ambiante, ce dispositif ne fonctionne correctement en mode logarithmique que si :

$$\Phi_{dia} > 0,4\text{mm}$$

En dessous de ce diamètre, la photodétection n'est plus logarithmique.

D'un point de vue énergétique, eu égard aux photodiodes PIN utilisées, il s'avère nécessaire qu'une inéquation (III.6) établie empiriquement soit vérifiée :

$$(\Phi_{lent} / f) \cdot (\Phi_{dia} / \Phi_{pin})^2 > 0,08 \quad \text{(III.6)}$$

Le rapport  $\Phi_{lent} / f$  est l'inverse de l'ouverture relative de la lentille, et  $(\Phi_{dia} / \Phi_{pin})^2$  caractérise le rapport des surfaces du diaphragme et de la photodiode.

On peut généraliser l'inégalité précédente pour un diaphragme de surface  $S_{\text{dia}}$ . Cette inéquation prend alors la forme :

$$(\Phi_{\text{lent}}/f) \cdot [S_{\text{dia}}/(\pi \cdot (\Phi_{\text{pin}}/2)^2)] > 0,08 \quad (\text{III.7})$$

#### Paramètres du dispositif optique retenu pour une ommatidie d'un D.E.M.

Le système d'échantillonnage visuel complet (destiné à être implémenté sur la plateforme mobile) nécessite une centaine de D.E.M.s (cf. §IV.1.). Nous rappelons que cette solution impose le positionnement d'une centaine de dispositifs opto-électroniques identiques sur le robot. Les composants du dispositif optique du D.E.M. servant d'éléments de base du système de vision ont été choisis en accord avec l'architecture de l'oeil composé (cf. §IV.1.) :

- une lentille de diamètre  $\Phi_{\text{lent}}=5\text{mm}$  et de distance focale  $f=8,5\text{mm}$ ;
- un couplage par fibre optique plastique de diamètre  $\Phi_{\text{f-o}}=1\text{ mm}$  et de longueur 30cm;
- un diaphragme rectangulaire de largeur  $L_{\text{dia}}=0,2\text{mm}$  et de hauteur  $H_{\text{dia}}=1\text{mm}$  ( $S_{\text{dia}}=0,2\text{mm}^2$ ) placé dans le plan focal, contre l'embouchure de la fibre optique;
- une photodiode PIN de surface photosensible circulaire de diamètre  $\Phi_{\text{pin}}=1\text{mm}$ .

Avec ce dispositif, la condition empirique (III.7) se trouve vérifiée :

$$(\Phi_{\text{lent}}/f) \cdot [S_{\text{dia}}/(\pi \cdot (\Phi_{\text{pin}}/2)^2)] = (5/8.5) \cdot [(0,2)/(\pi \cdot (1/2)^2)] = 0,15 > 0,08$$

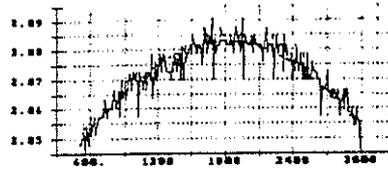
Une série d'enregistrements de la courbe de sensibilité angulaire a été faite avec ce dispositif optique final, placé sur le dispositif expérimental (Fig.III-3), pour une distance de mise au point  $D_f=20\text{cm}$  du diaphragme rectangulaire. Ces photodétections logarithmiques ont été obtenues pour une direction de visée perpendiculaire au déplacement ( $\varphi=90^\circ$ ), lors du passage à vitesse constante  $V_0$  devant une lampe à filament vertical de hauteur 5cm à différentes distances  $D$ . La Fig.III-20 montre ces enregistrements ainsi qu'une approximation gaussienne de chaque courbe. Ces courbes d'approximation ont été établies d'après la formule

$$F(t) = G \cdot \exp[-0,5 \cdot (t-A)^2 / (\sigma^2)] + h \quad (\text{III.8})$$

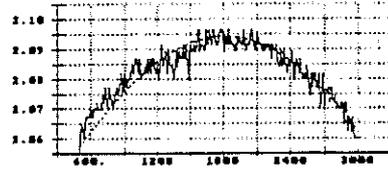
$G, A, h$  : constantes;  $t$  : temps

Dans cette équation,  $\sigma$  est une approximation de la largeur à mi-hauteur de la réponse impulsionnelle (assimilée à une gaussienne) pour une distance donnée ( $\sigma=\Delta\rho/2,35$ ; cf. Thèse J.M. Pichon). Ces courbes confirment que  $\sigma$  est proportionnel à la distance  $D$  :  $\sigma = K \cdot D$  ( $K=10\text{ms/cm}$ ). En d'autres termes, l'ouverture angulaire de l'ommatidie peut être approximée par un cône centré sur la lentille : cela montre qu'une défocalisation, comme c'est le cas dans cet exemple, n'entraîne pas de distorsion notable de la forme du cône d'acceptance de l'ommatidie.

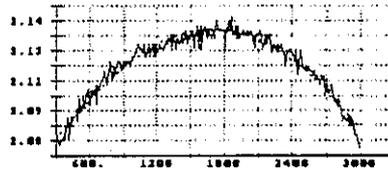
D = 225cm  
 $\sigma \approx 2250$



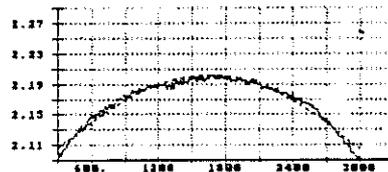
D = 200cm  
 $\sigma \approx 2000$



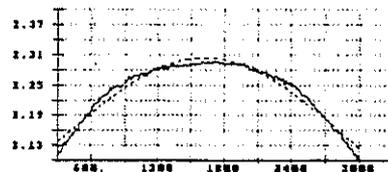
D = 175cm  
 $\sigma \approx 1850$



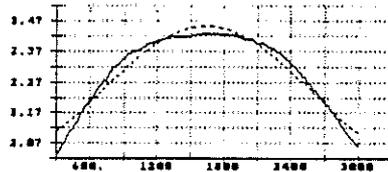
D = 150cm  
 $\sigma \approx 1548$



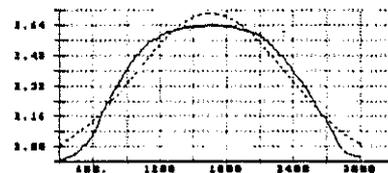
D = 125cm  
 $\sigma \approx 1272$



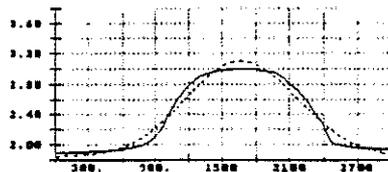
D = 100cm  
 $\sigma \approx 954$



D = 75cm  
 $\sigma \approx 675$



D = 50cm  
 $\sigma \approx 497$



**Fig.III-20** : Caractérisation de la sensibilité angulaire de l'ommatidie : approximation gaussienne de la réponse impulsionnelle de l'ommatidie pour différentes distances D allant de 50cm à 225cm par pas de 25cm. Lampe à filament vertical de hauteur 5cm.  $L_{dia}=0,2mm$  et  $H_{dia}=1mm$ .  $\Phi_{ent}=5mm$  et  $f=8,5mm$ .  $Df=20cm$ .  $\varphi=90^\circ$ . Photodétecteur logarithmique identique à celui des Fig.III-15, 16, 17, 18 et 19.

$$F(t) = G \cdot \exp[-0,5 \cdot (t - A)^2 / (\sigma^2)] + h \quad (h=1,9) \quad G, A, h : \text{constantes}; \quad t : \text{temps}$$

### Résumé :

L'échantillonnage visuel dans une direction de l'espace est réalisé par un dispositif optique constitué d'un diaphragme, de dimensions modifiables selon la demande, placé à l'extrémité d'une fibre optique dans un plan voisin du plan focal d'une lentille. Cet ensemble permet de réaliser un filtrage spatial de caractéristique connue, le diagramme de sensibilité directionnelle étant voisin d'une gaussienne. L'autre extrémité de la fibre optique est couplée à une photodiode PIN assurant une photodétection logarithmique. Ainsi, lors du passage d'un front de contraste, la composante dynamique du signal de sortie correspond au signal utile (contraste) et la composante continue à la luminance, et ce dans une gamme de trois décades de luminance.

#### III.2.3.c. Filtrage temporel linéaire

La détection du mouvement relatif d'un front de contraste apparaît comme la composante dynamique du signal de sortie de l'étage de photodétection logarithmique.

Afin de ne conserver que le signal utile, relatif au contraste, il est nécessaire de s'affranchir de la composante continue du signal. Dans le cas du D.E.M. simulé, deux types de solutions ont été analysés et comparés : une différentielle spatiale du premier ordre et une différentielle temporelle correspondant à une dérivée "pure" du premier ordre (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.III). Ici, la solution faisant appel à une différentielle spatiale locale a été rejetée, à cause du problème d'appareillement des photodiodes évoqué au paragraphe précédent (cf. Fig.III-14). Ce problème empêche en effet d'anihiler *pour toute luminance*, l'offset qui apparaît lorsque l'on soustrait les signaux issus de deux ommatidies adjacentes.

En conséquence, seule la solution de la différentielle temporelle a été retenue. Contrairement à la simulation, une dérivée pure n'est bien évidemment pas envisageable, notamment du fait de la présence des bruits hautes fréquences. L'équivalent de cette dérivée temporelle est assurée ici par un filtre linéaire passe-bande divisé en :

- un filtre passe-haut du premier ordre, pour éliminer le continu; sa fréquence de coupure (appelée F1 dans la suite) est réglable autour de 20Hz; un potentiomètre permet d'ajuster la partie passe-haut sans modification des caractéristiques du passe-bas qui suit;
- un filtre passe-bas du troisième ordre, pour éliminer les perturbations dues au rayonnement 50Hz du réseau, au 100Hz de la lumière artificielle et aux bruits électromécaniques; sa fréquence de coupure (appelée F2 dans la suite) est de l'ordre de 30Hz.

Ici, un tel filtre est réalisé uniquement sur la base de composants passifs (résistances, capacités). La difficulté liée à ce choix réside dans un compromis sur la valeur de ces composants passifs permettant d'assurer un relatif isolement entre eux. Le même filtrage temporel pourrait être évidemment réalisé de manière active sur la base d'amplificateurs

opérationnels. Il faut cependant noter que ces derniers ont besoin d'être "de bonne qualité" pour éviter des problèmes de décalage ou de dérive. En conséquence, cette solution a été écartée car elle ne répond pas à notre cahier des charges qui vise l'utilisation de composants d'usage courant (et à bas prix, cf. §II.3.).

La Fig.III-21 représente le circuit électronique retenu, dont la fonction de transfert s'exprime par :

$$S/e = p/(p+\omega_1) \cdot \omega_2/(p+\omega_2) \cdot \omega_3/(p+\omega_3) \cdot \omega_4/(p+\omega_4) \quad (\text{III.9})$$

$$\omega_1 = 1/R_1C_1 \quad \omega_2 = 1/R_2C_2 \quad \omega_3 = 1/R_3C_3 \quad \omega_4 = 1/R_4C_4 \quad \omega_2 = \omega_3 = \omega_4$$

L'utilisation de composants de valeur standard se traduit par :

$$F_1 = 16\text{Hz} \quad F_2 = F_3 = F_4 = 28,5\text{Hz}$$

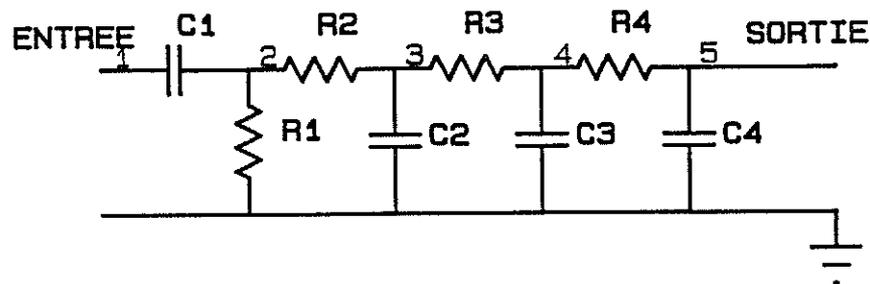


Fig.III-21 : Circuit électronique du filtre passe-bande réalisé à base de composants passifs.

La Fig.III-22 montre la réponse en fréquence de ce filtre passe-bande (gain, phase).

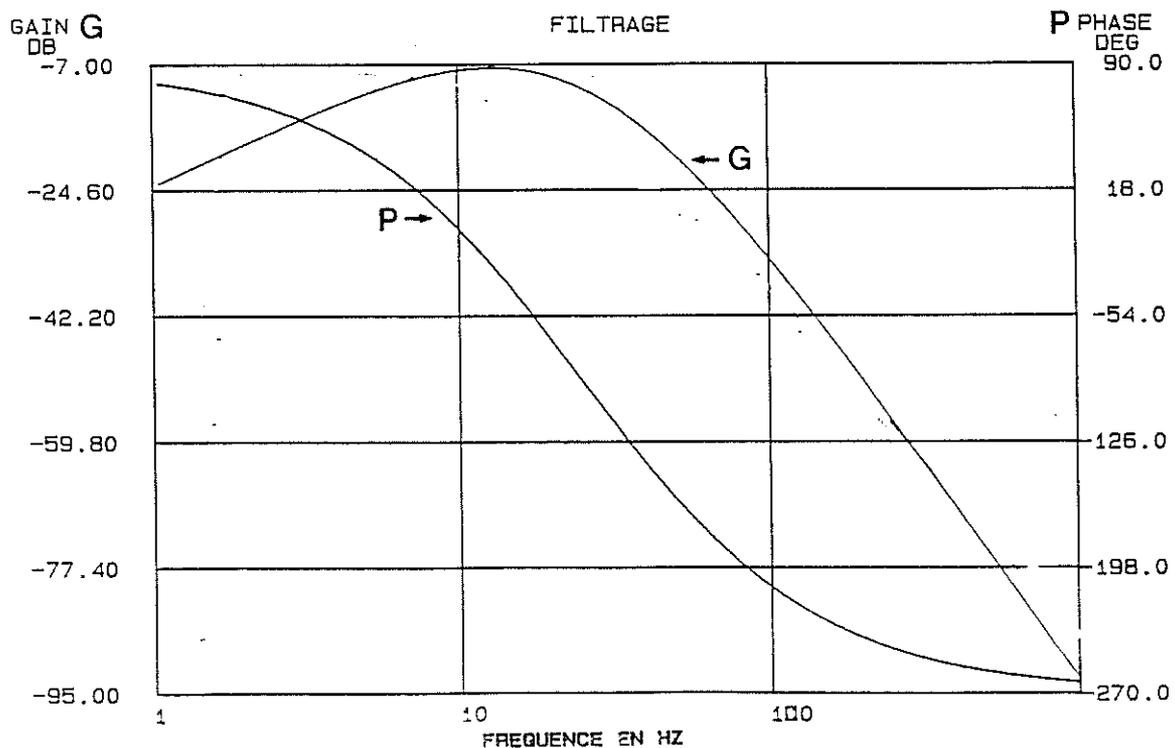


Fig.III-22 : Diagramme de Bode (gain et phase) du filtre passe-bande (résultats obtenus par C.A.O.).

La Fig.III-23 montre la réponse indicielle obtenue en chacune des mailles 2, 3, 4, 5 du filtre. La partie passe-bas introduit un déphasage et une atténuation du signal utile. Ce déphasage, qui se traduit par un retard de la réponse à un créneau, n'interfère pas sur la mesure effectuée par un D.E.M., parce qu'il est identique sur les 2 voies et que le principe de mesure ne repose que sur la détection d'un retard *entre* ces 2 voies.

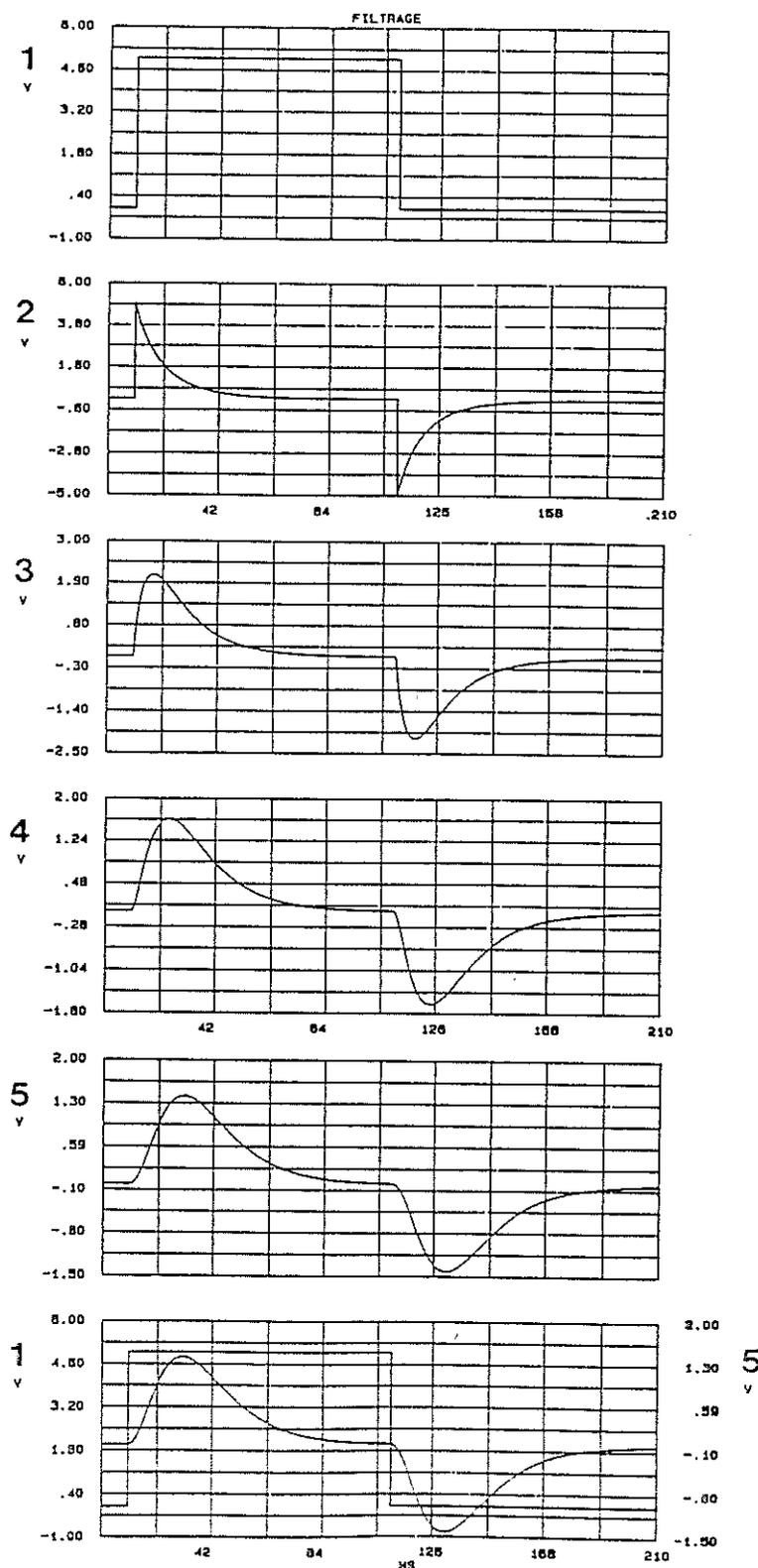
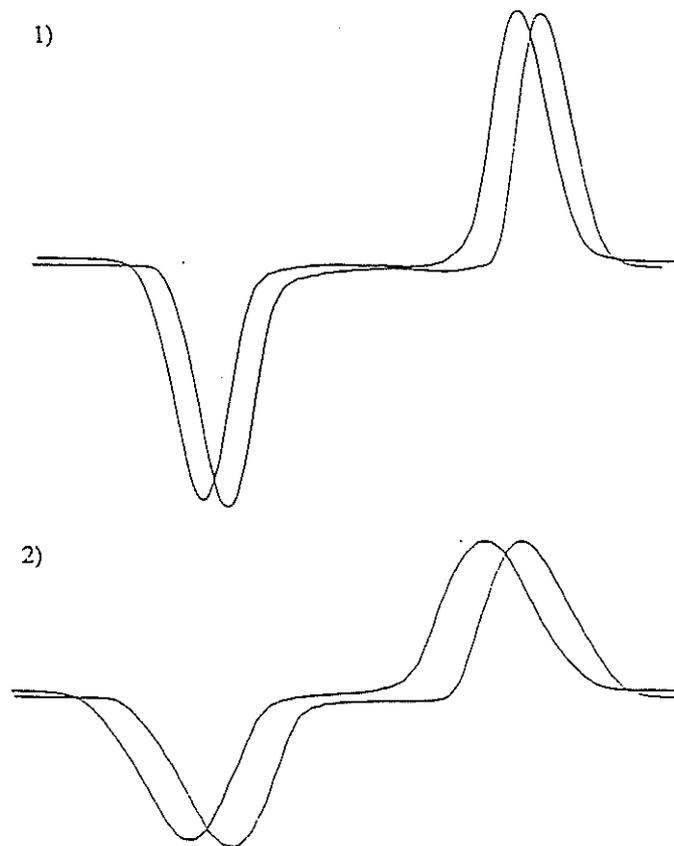


Fig.III-23 : Réponses du filtre temporel linéaire à une entrée en créneau aux noeuds 2, 3, 4, 5 de la Fig.III-21 (résultats obtenus par C.A.O.).

L'effet de ce filtrage, sur des signaux visuels réels, a été mis en évidence en utilisant le dispositif expérimental de la Fig.III-3. Deux ommatidies sont testées ici dans la configuration du D.E.M. effectivement retenue pour le robot. Elles sont déplacées à une vitesse  $V_0=50\text{cm/s}$  devant une bande noire sur fond blanc de largeur constante  $L_b=35\text{cm}$  et de contraste  $m=0,7$  placée à différentes distances  $D$ . L'angle interommatidial  $\Delta\varphi$  est de  $6^\circ$ . L'angle entre la direction de l'axe interommatidial et la direction de déplacement est de  $\varphi=90^\circ$ .

La Fig.III-24 montre la réponse de ces deux ommatidies. Elle montre que, quelle que soit la distance  $D$  de la bande, les signaux en sortie de ce filtrage passe-bande présentent un déroulement temporel semblable et sont uniquement retardés l'un par rapport à l'autre, comme il se doit.

L'amplitude du signal filtré représente la pente du signal en sortie des photodiodes. En conséquence, et cela est confirmé par les 2 exemples de la Fig. III-24, cette amplitude décroît lorsque la distance  $D$  de détection augmente. On notera la valeur minimale du bruit affectant le signal à une distance d'un mètre de la bande noire.



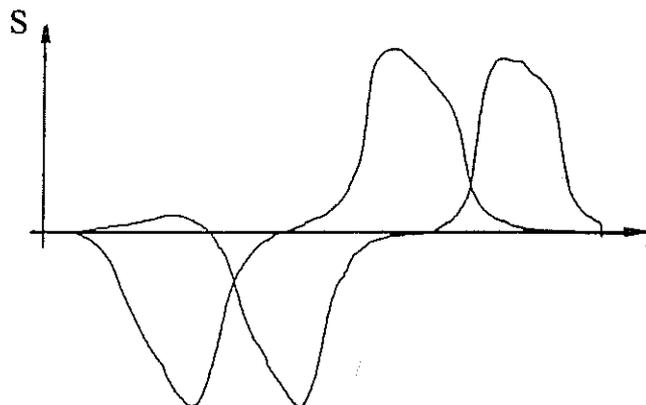
**Fig.III-24** : Réponses de deux ommatidies d'un D.E.M. après filtrage spatial (passe-bas), détection logarithmique et filtrage temporel (passe-bande) pour différentes distances  $D$  de détection d'une bande noire sur fond blanc  $L_b=35\text{cm}$  et  $m=0,7$ . Angle interommatidial  $\Delta\varphi=5,74^\circ$ .  $\varphi=90^\circ$ . Vitesse de déplacement relatif  $V_0=50\text{cm/s}$ . Sur les courbes, variation maximale d'amplitude  $\Delta V$  et décalage temporel  $\Delta t$  des signaux recueillis sur les deux ommatidies.

1)  $D=50\text{cm}$   $\Delta V=\pm 300\text{mV}$   $\Delta t=100\text{ms}$

2)  $D=100\text{cm}$   $\Delta V=\pm 150\text{mV}$   $\Delta t=200\text{ms}$

Situation "extrême" de détection sur le robot

Les deux ommatidies qui correspondent à la situation "extrême" de détection sur le robot (cf. §IV.1.1.b.) concernent le D.E.M. le plus frontal, ayant un angle interommatidial  $\Delta\varphi=1,25^\circ$ , dont l'axe interommatidial fait un angle  $\varphi=13^\circ$  avec la direction de déplacement. La Fig.III-25 montre leurs signaux après filtrage spatial (passe-bas), détection logarithmique et filtrage temporel (passe-bande). Les détections sont faites lors du passage devant une bande noire sur fond blanc,  $m=0,7$  et  $L_b=50\text{cm}$ , parallèle à la direction de déplacement, à une distance radiale  $D=250\text{cm}$ , et pour une vitesse  $V_0=50\text{cm/s}$ . Dans ces conditions extrêmes, l'amplitude des signaux filtrés n'est que de  $\pm 30\text{mV}$ . Leurs décours temporels sont semblables et sont retardés de  $500\text{ms}$ , comme attendu.



**Fig.III-25** : Réponse des deux ommatidies du D.E.M. le plus frontal du robot, après filtrage spatial (passe-bas), détection logarithmique et filtrage temporel (passe-bande) lors de leur passage devant une bande noire sur fond blanc ( $m=0,7$  et  $L_b=50\text{cm}$ ) située à une distance radiale  $D=250\text{cm}$ . Angle interommatidial  $\Delta\varphi=1,25^\circ$ .  $\varphi=13^\circ$ . Vitesse de déplacement relatif  $V_0=50\text{cm/s}$ . Variation maximale d'amplitude détectée ici :  $\Delta V=\pm 30\text{mV}$ , et retard temporel entre les courbes  $\Delta t=500\text{ms}$ .

Exemple de filtrage spatio-temporel par défocalisation du diaphragme

Afin d'illustrer l'effet du filtrage spatio-temporel obtenu par défocalisation du diaphragme ( $D_f=20\text{cm}$ ) du dispositif optique retenu pour les D.E.M.s du robot, des enregistrements ont été effectués lors du déplacement à vitesse constante ( $V_0=50\text{cm/s}$ ) d'une seule ommatidie devant une mire, perpendiculaire à son axe et parallèle à son déplacement ( $\varphi=90^\circ$ ). Cette mire est constituée de 3 bandes noires sur fond blanc ( $m=0,7$ ), de largeur  $L_b=5\text{cm}$ , espacées de  $5\text{cm}$ , et situées à une distance  $D=50\text{cm}$ . La Fig.III-26 montre les signaux en divers noeuds du filtre temporel (Fig.III-21) pour plusieurs passages successifs devant la même mire. Cet exemple illustre plusieurs points :

- le signal (1) après filtrage spatial (passe-bas) est bruité par le  $100\text{Hz}$  des lampes fluorescentes éclairant la pièce;

- le signal (2) issu du passe-haut linéaire temporel élimine la composante continue de (1), mais accentue la fluctuation à 100Hz due à la lumière artificielle;
- les signaux (3), (4), et (5) montrent l'effet de passe-bas temporels linéaires de différents ordres (1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup>);
- le signal (5) issu du passe-bas du troisième ordre peut être considéré comme sensiblement identique à celui de (2) mais non-bruité par l'effet du 100Hz lumineux;
- les signaux (2), (3), (4), et enfin (5) font ressortir de plus en plus clairement le début et la fin de la mire, qui génèrent tous deux un signal d'amplitude élevée, tandis que le signal correspondant aux autres bandes de la mire se voit fortement atténué.

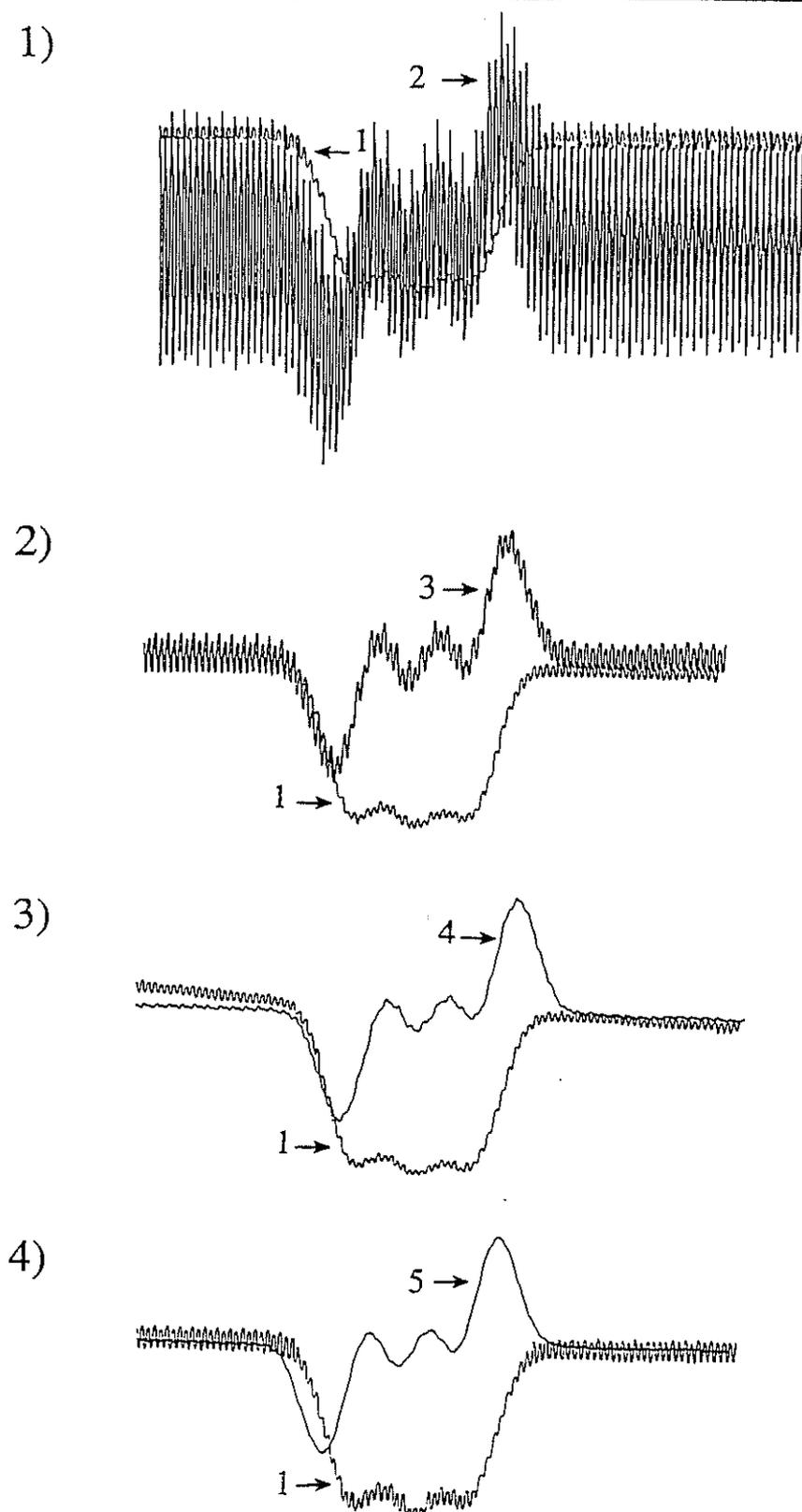
Une mire constituée de N bandes identiques à celles-ci et pareillement espacées délivrerait les mêmes variations d'amplitude que celles présentées ici, accentuant ainsi le début et la fin de la mire. Ce type de filtrage peut permettre d'effectuer une discrimination entre les bords et la partie centrale d'une mire périodique en rejetant les fréquences spatiales les plus hautes, susceptibles de générer des problèmes de correspondance (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.III).

#### Résumé :

Nous avons placé après la photodétection logarithmique, un filtre temporel passif de type passe-bande qui délivre un signal de sortie de composante continue nulle et dont les variations d'amplitude sont significatives du déplacement relatif d'un front de contraste. Le déroulement temporel de ces variations d'amplitude dépend de la valeur du front de contraste  $m$ , de l'angle  $\varphi$  entre la direction de visée et le déplacement, et de la distance de détection  $D$  et de la vitesse du mouvement relatif.

#### Remarque :

Une variation temporelle d'intensité lumineuse (lumière papillotante) sur l'entrée d'une ommatidie, peut se transmettre à travers le filtre (Fig.III-26) entraînant une réponse, équivalente à celle produite par un contraste en mouvement. Comme les deux voies d'un D.E.M. seront activées simultanément par une telle lumière papillotante, il est nécessaire que, comme cela a pu être montré chez la mouche (cf. Annexe, §A.3.2.c.), la mesure caractérisant le retard entre les 2 voies soit rendue insensible à leur activation simultanée (cf. §III.2.4.a.).



**Fig.III-26** : Décours temporel des signaux aux divers noeuds du filtre temporel (Fig.III-21) lors du déplacement d'une ommatidie devant un panorama constitué de trois bandes verticales noires sur fond blanc,  $m=0,7$  et  $L_b=5\text{cm}$ , espacées de  $5\text{cm}$ , perpendiculaires à l'axe de visée et parallèles au déplacement  $\varphi=90^\circ$ . Vitesse de déplacement relatif  $V_o=50\text{cm/s}$ . Eclairage artificiel (lampes fluorescentes) perturbant le signal photoélectrique. Filtrage spatial (passe-bas) par défocalisation du diaphragme ( $D_f=20\text{cm}$ ) du dispositif optique retenu pour les D.E.M.s du robot. Variation maximale d'amplitude  $\Delta V$ .

- 1) sortie noeud 1 :  $\Delta V=600\text{mV}$ ; sortie noeud 2 :  $\Delta V=\pm 250\text{mV}$
- 2) sortie noeud 1 :  $\Delta V=600\text{mV}$ ; sortie noeud 3 :  $\Delta V=\pm 170\text{mV}$
- 3) sortie noeud 1 :  $\Delta V=600\text{mV}$ ; sortie noeud 4 :  $\Delta V=\pm 160\text{mV}$
- 4) sortie noeud 1 :  $\Delta V=600\text{mV}$ ; sortie noeud 5 :  $\Delta V=\pm 150\text{mV}$

### III.2.3.d. Filtrage non-linéaire en amplitude et génération d'impulsion normée

La dernière étape de l'extraction d'un front de contraste consiste à générer une impulsion normée liée à la détection après avoir réalisé un filtrage non-linéaire en amplitude permettant de traiter indépendamment les fronts de contraste ON et OFF.

Cette étape nécessite un dédoublement des voies. Cette idée de séparation des voies ON et des voies OFF, qui conduit à réaliser un double D.E.M., a été dictée par la mouche qui semble le réaliser (cf. Annexe, §A.3.2.c.).

Après filtrage spatio-temporel, le signal issu d'une ommatidie lors de la détection du mouvement relatif d'une bande présente un caractère biphasique (cf. Fig.III-24 et III-25) :

- un front de contraste ON (défini précédemment comme une transition blanc-noir) se traduit par un signal négatif en sortie du filtrage;
- un front de contraste OFF (défini précédemment comme une transition noir-blanc) se traduit par un signal positif en sortie du filtrage.

Une variation d'amplitude de ce signal ne correspondra à un front de contraste effectif que si elle est supérieure à un niveau de bruit. De ce fait, la prochaine étape de traitement de ce même signal va nécessiter une opération de filtrage en amplitude : toute variation d'amplitude supérieure à un seuil déclenchera un signal de sortie calibré.

Pour ce faire, la sortie du filtre alimente en parallèle deux circuits à *seuil à hystérésis* (Fig.III-27) consacrés respectivement à la discrimination ON ou OFF. Un tel circuit est sensible à deux seuils de basculement, haut  $V_H$  et bas  $V_L$ , autour d'une valeur de référence  $V_{ref}$ , séparés par une largeur d'hystérésis  $V_{hy}$  dont la valeur est supérieure à l'amplitude du bruit maximal sur le signal d'entrée. Il bascule d'un niveau bas  $V_L$  à un niveau haut  $V_H$ . Il évite les déclenchements intempestifs inhérent à un circuit à simple seuil, et améliore par là-même le rapport signal-sur-bruit.

Ce circuit est caractérisé par :

- 1) ses deux seuils de basculement, haut  $V_H$  et bas  $V_L$  :

$$V_H = V_{ref} + R_1/(R_1+R_2) \cdot (V_h - V_{ref}) \quad V_L = V_{ref} + R_1/(R_1+R_2) \cdot (V_l - V_{ref}) \quad (III.10)$$

- 2) son hystérésis  $V_{hy}$  :  $V_{hy} = R_1/(R_1+R_2) \cdot \Delta V \quad (III.11)$

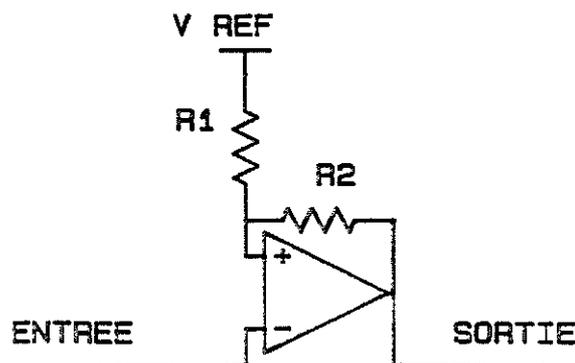


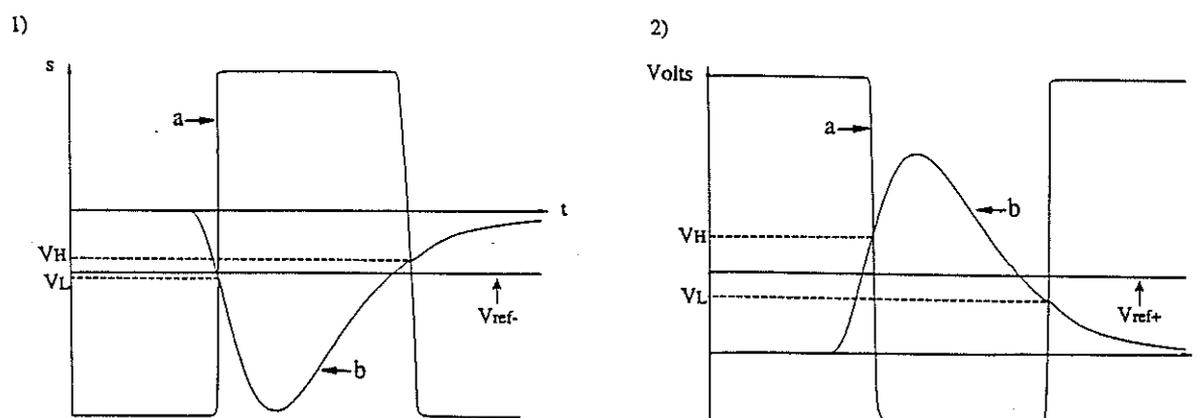
Fig.III-27 : Circuit électronique de l'étage de seuil à hystérésis.

La largeur de l'hystérésis est réglable en agissant sur  $R_1$ , le niveau de seuil en agissant sur  $V_{ref}$ . Ce type de circuit permet donc de régler indépendamment le seuil de déclenchement et la largeur de son hystérésis.

Les fronts de contraste ON sont sélectionnés au dessus d'une tension de référence [ $V_{ref.ON} < 0$ ] et les OFF pour [ $V_{ref.OFF} > 0$ ].

La Fig.III-28 montre le basculement des sorties de deux circuits à seuil à hystérésis en réponse à un créneau d'entrée positif ou négatif ayant subi l'effet du filtrage passe-bande décrit précédemment. Ces réponses montrent le seuil haut  $V_H$  et le seuil bas  $V_L$  de part et d'autre de la tension de référence  $V_{ref}$ , et la largeur d'hystérésis  $V_{hy}$ .

De même, la Fig.III-29 montre des enregistrements de signaux visuels réels, après photodétection logarithmique, filtrage spatio-temporel et seuillage à hystérésis. Ils ont été encore réalisés avec le dispositif expérimental de la Fig.III-3, lors du déplacement d'une ommatidie retenue pour les D.E.M.s du robot, regardant une bande noire sur fond blanc,  $m=0,7$  et  $L_b=40\text{cm}$ , perpendiculaire à son axe de visée et parallèle au déplacement  $\phi=90^\circ$ , placée à  $D=250\text{cm}$ , pour une vitesse de déplacement relatif  $V_o=50\text{cm/s}$ .



**Fig.III-28** : Réponses temporelles illustrant le déclenchement du circuit à hystérésis pour un créneau d'entrée positif ou négatif ayant subi l'effet du filtrage passe-bande (Fig.III-21). Variation maximale d'amplitude  $\Delta V$  et largeur temporelle des créneaux  $\Delta t=100\text{ms}$ .  $V_H$  : seuil haut.  $V_L$  : seuil bas

1) Seuillage ON. Tension de référence :  $V_{ref.ON}=-20\text{mV}$ .

a) sortie du circuit à seuil à hystérésis

b) entrée du circuit à seuil à hystérésis (sortie du filtre temporel) ( $\Delta V=-60\text{mV}$ )

1) Seuillage OFF. Tension de référence :  $V_{ref.OFF}=+25\text{mV}$

a) sortie du circuit à seuil à hystérésis

b) entrée du circuit à seuil à hystérésis (sortie du filtre temporel) ( $\Delta V=+60\text{mV}$ )

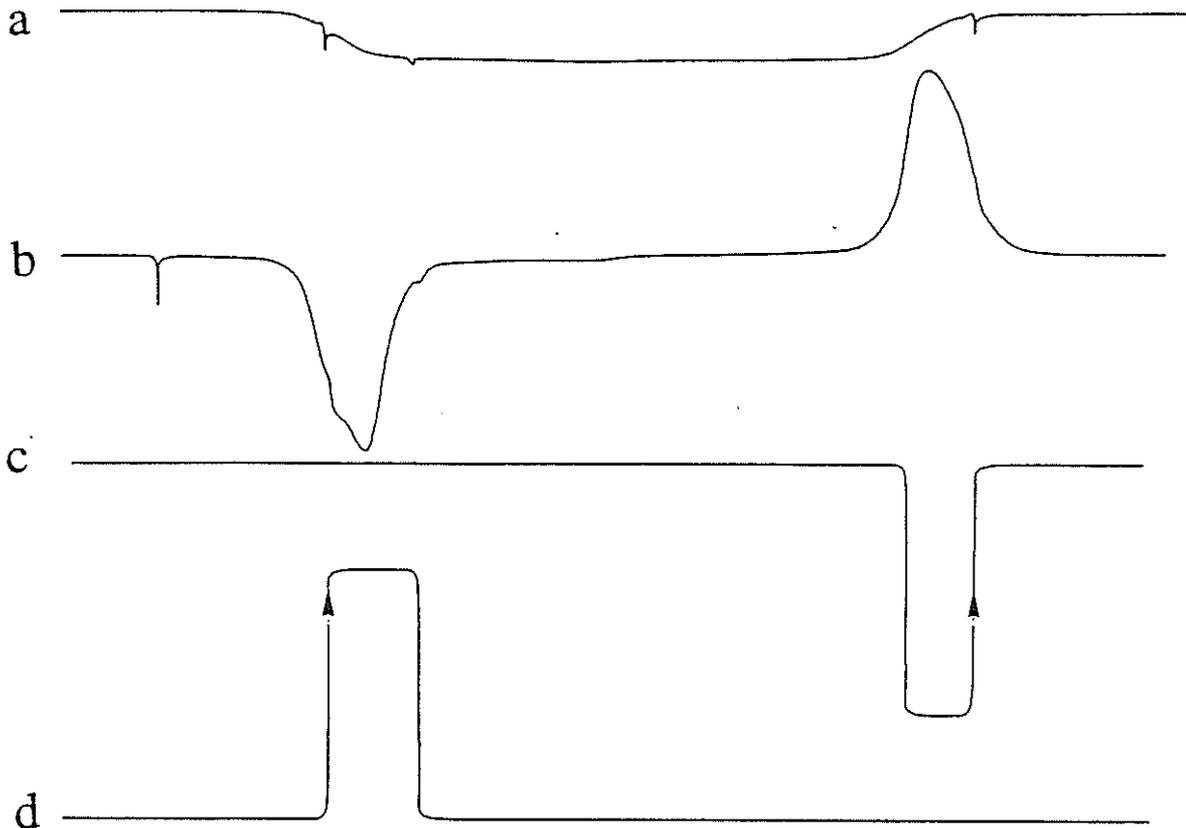


Fig.III-29 : Réponses temporelles en divers points du circuit d'extraction de front de contraste lors du mouvement relatif, à une vitesse  $V_0=50\text{cm/s}$ , d'une bande noire sur fond blanc,  $L_b=40\text{cm}$  et  $m=0,7$ , placée à une distance  $D=250\text{cm}$  devant une ommatidie ( $\varphi=90^\circ$ ). Les flèches représentent la transition d'un niveau bas vers un niveau haut du signal de sortie du circuit à hystérésis. Variation maximale d'amplitude  $\Delta V$  et largeur temporelle du créneau de l'enregistrement d)  $\Delta t=100\text{ms}$ .

- a) sortie de l'étage de photodétection logarithmique ( $\Delta V=500\text{mV}$ )
- b) sortie du filtre temporel ( $\Delta V=\pm 60\text{mV}$ )
- c) sortie de l'étage du seuil à hystérésis OFF ( $\Delta V=\pm 11\text{V}$ )
- d) sortie de l'étage du seuil à hystérésis ON ( $\Delta V=\pm 11\text{V}$ )

Comme on le verra ci-dessous (cf. §III.2.4.a), le signal utile à prendre en compte pour réaliser une mesure avec un D.E.M. est lié au point de basculement du circuit à hystérésis et non pas à la durée de son basculement. De ce fait, seule la composante dynamique *initiale* de ce signal sera récupérée par une opération de "dérivation" réalisée simplement par un filtrage passe-haut de très faible constante de temps ( $C_1R_1$  à la Fig.III-30). Seules les impulsions *positives* issues de ce filtre seront exploitées (représentées par une flèche sur la Fig.III-29). On notera que, pour les détections de contraste OFF, bien que l'impulsion positive en question soit décalée d'une durée dépendant de la largeur de l'hystérésis (car liée au basculement montant du circuit à hystérésis) elle peut être considérée comme significative. En effet, ce décalage se retrouve de manière identique sur les deux voies du D.E.M. et n'influence donc pas de manière néfaste la mesure du *retard* entre les deux détections.

### Résumé :

A la suite du filtre passe-bande, un dédoublement des voies assure la séparation des fronts ON et des fronts OFF qui correspondent à la détection de plages plus claires ou plus sombres. Sur chacune de ces deux voies, la génération d'une impulsion normée liée au passage d'un front de contraste est réalisée par un circuit à hystérésis suivi d'un filtre passe-haut qui ne récupère que le transitoire positif du basculement.

Il est important de souligner ici, et cela est montré dans la Thèse de J.M. Pichon, (Chap.III) que la valeur du seuil est un paramètre à part entière dans la chaîne de filtrage de l'ommatidie. En optimisant son ajustement en fonction du facteur de recouvrement angulaire du D.E.M., (défini comme le rapport entre l'angle d'acceptance  $\Delta\rho$  et l'angle interommatidial  $\Delta\phi$ ) on peut éliminer des problèmes de correspondance issus de certains positionnements de contrastes dans l'espace. Par exemple, dans le cas de la mire périodique décrite à la Fig.III-26, il suffit de régler le seuil au dessus de la valeur du signal correspondant au "régime permanent" (bandes centrales de la mire) pour discriminer seulement le début et la fin de la mire.

Pour le D.E.M. destiné à équiper le robot, les seuils de déclenchement sont ajustés de façon à augmenter au maximum la sensibilité au contraste du système. Pour cela, une largeur minimale d'hystérésis de l'ordre de 20mV et des tensions de référence de l'ordre de  $\pm 10$ mV ont été définies à la suite de tests de réglage. Ainsi, apparaît la limite de détection. Elle correspond aux conditions expérimentales de la Fig.III-25, à savoir : un D.E.M. dont la première direction de visée fait un angle de  $\phi=13^\circ$  avec la direction de déplacement, une vitesse de déplacement de  $V_0=50$ cm/s, un front de contraste de valeur maximum provenant d'une bande placée à une distance  $D=250$ cm et de largeur suffisante pour assurer un recouvrement complet du champ de vision d'un photodétecteur.

#### III.2.4. Signal caractérisant le retard

Cet étage sert à exploiter le retard temporel  $\Delta t$  correspondant aux passages successifs du même front de contraste devant les deux voies d'un D.E.M.. On rappelle (cf. §III.2.1.a.) que c'est la mesure de ce  $\Delta t = \Delta\phi / \Omega_m$  qui permet d'estimer la vitesse angulaire relative moyenne  $\Omega_m$  d'un contraste détecté, elle-même inversement proportionnelle à la distance radiale  $D$  de ce contraste. Pour réaliser cette mesure, les axes optiques des deux ommatidies sont espacés angulairement d'un angle  $\Delta\phi$  et leur axe interommatidial fait un angle  $\phi$  avec la direction de déplacement, comme dans les conditions expérimentales décrites à la Fig.III-3.

### III.2.4.a. Génération d'une fonction Retard d'allure exponentielle décroissante retardée

La mesure du retard  $\Delta t$  aurait pu résulter de la génération sur la voie 1 d'un signal croissant avec le temps et de sa lecture sur la voie 2. Cette génération peut être celle d'un signal en rampe issu d'un intégrateur. Dans ce cas, s'il est nécessaire d'avoir un taux de croissance suffisamment important (afin de bénéficier d'une précision de mesure suffisante), le fonctionnement de ce type de circuit est limité par le temps au bout duquel l'amplitude du signal de sortie atteint la saturation. De plus, le signal de sortie ne se réinitialise pas de lui-même après son déclenchement. Ainsi, l'utilisation d'un tel circuit pourrait introduire des erreurs de mesure sur le D.E.M. En effet, des signaux erronés pourraient provenir de l'activation successive des deux voies par deux contrastes *différents*. Par ailleurs, une fois la saturation atteinte, la mesure n'a plus de valeur car elle n'est plus proportionnelle au temps  $\Delta t$ .

Notre source d'inspiration, les D.E.M.s de la mouche (cf. Annexe, §A.3.2.), nous a incités à générer à la sortie du circuit à hystérésis de la voie 1 un signal  $S$  dont l'amplitude varie de façon inversement proportionnelle au temps :  $S = K/t$  ( $K$  : constante). Un tel signal généré sur la voie 1 présente l'avantage de se réinitialiser de lui-même. La réalisation d'une telle fonction nécessiterait, en toute rigueur, un décours temporel "hyperbolique". Toutefois, dans le cadre de cette application, il suffit de créer un signal décroissant de manière monotone en fonction du temps. C'est la raison pour laquelle a été réalisée une fonction dont le décours temporel est une "exponentielle décroissante", plus simple à réaliser qu'une hyperbole. Ainsi, toute détection d'un front de contraste sur la voie 1 déclenche une "exponentielle décroissante". Ce déclenchement doit s'effectuer en respectant deux propriétés supplémentaires :

-1) être redéclenchable à tout instant : dans un environnement où les objets sont nombreux, deux fronts de contraste peuvent être détectés sur une même voie dans un intervalle de temps inférieur au temps nécessaire à la réinitialisation de la fonction. Dans ce cas, le second déclenchement de la fonction devra générer un signal rigoureusement identique au premier, et surtout ne pas se sommer au premier, ceci pour qu'on puisse effectuer des mesures de retard  $\Delta t$  à tout instant (même si une nouvelle détection survient alors que la fonction précédente n'est pas encore réinitialisée).

-2) être déclenché après un retard pur initial : pour éviter la détection intempestive d'un bruit lumineux synchrone (lumière papillotante), se traduisant par l'activation simultanée des voies 1 et 2, un retard a dû être intercalé avant la génération de la fonction exponentielle décroissante sur la voie 1, l'ensemble créant par là-même une fonction dite "d'allure exponentielle décroissante retardée" appelée : fonction Retard. La durée du retard initial doit être supérieure à celle de l'impulsion issue de la détection sur la voie 2. Ainsi évite-t-on

l'apparition d'un signal de sortie en réponse à deux impulsions *synchrones* sur les deux voies et réalise-t-on un détecteur de mouvement *pur*.

Le retard  $\Delta t$  pour un D.E.M. du robot est fixé par :

- les paramètres  $\varphi$  et  $\Delta\varphi$  choisis pour la distribution angulaire en gradient des D.E.M.s du système visuel (cf. §IV.2.1.);
- la vitesse  $V_0$  de déplacement de l'oeil D.E.M. (cf. §IV.1.);
- la distance radiale  $D$  de détection.

Le retard maximal considéré correspond à une mesure effectuée par un D.E.M. latéral d'angle interommatidial  $\Delta\varphi=5,74^\circ$ , pour un déplacement perpendiculaire à l'axe interommatidial ( $\varphi=90^\circ$ ), à une vitesse relative  $V_0=50\text{cm/s}$ , devant un bord de contraste (bande noire sur fond blanc, contraste  $m=0,7$ ) d'une largeur couvrant tout le champ visuel ( $L_b=12\text{cm}$ ), et à la distance extrême  $D=250\text{cm}$ . Dans ces conditions, les signaux issus des deux ommatidie du D.E.M. sont identiques et sont retardés de  $\Delta t=500\text{ms}$  [ $\Delta t=(D/2).\tan(\Delta\varphi/2)/V_0$ ], temps correspondant à la durée maximale du signal de la fonction Retard sur la voie 1.

L'usage d'un filtre *non-linéaire* va permettre de remplir toutes ces conditions. Nous allons examiner ici successivement ses divers éléments (Fig.III-30).

Ce circuit ne fait intervenir que des composants passifs. Il permet de générer, à partir du front montant du créneau issu du circuit à seuil à hystérésis un signal dont l'amplitude décroît, après un certain retard pur, selon une loi approximativement exponentielle. Cette fonction présente la particularité d'être réarmable sur toute nouvelle transition montante et insensible à toute transition descendante du signal d'entrée.

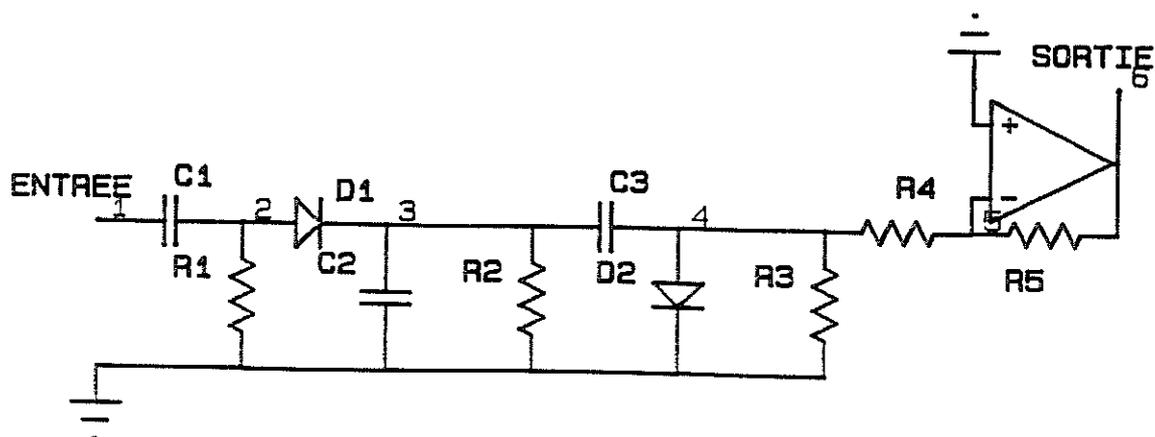


Fig.III-30 : Circuit électronique du filtre non linéaire de la fonction Retard.

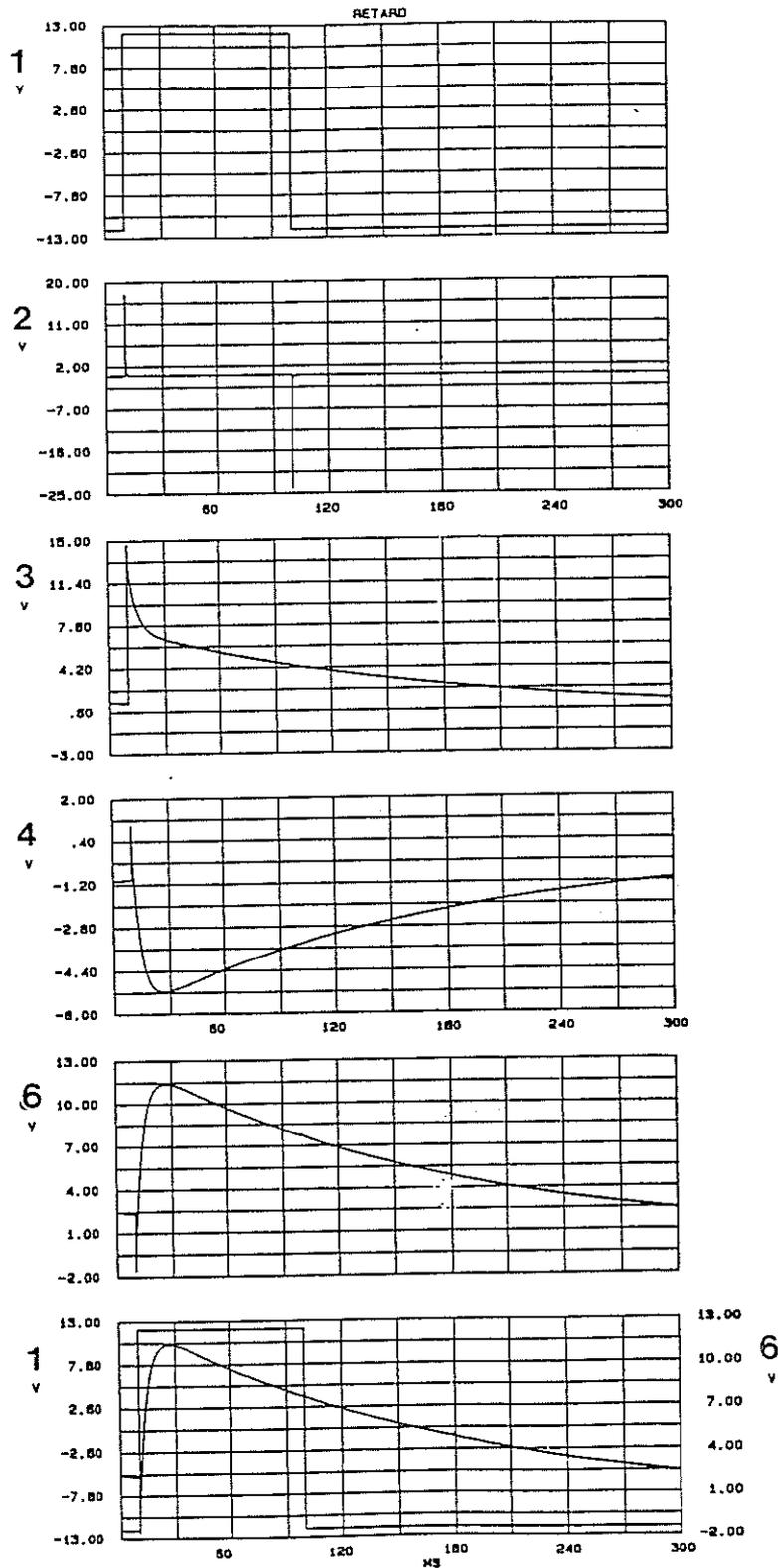


Fig.III-31 : Chronogramme (analyse par C.A.O.) des signaux aux divers noeuds du filtre non linéaire (Fig.III-30).

Le chronogramme de la Fig.III-31 montre l'évolution du signal depuis le créneau de sortie du circuit à seuil à hystérésis. Le fonctionnement de ce filtre peut se décrire de la façon suivante en faisant référence à ses divers noeuds (Fig.III-30) :

- lors d'une transition du signal d'entrée (Fig.III-31-1), C1 se charge rapidement avec une constante de temps voisine de  $T1 = R1.C1$  (Fig.III-31-2);

- lors d'une transition positive issue de C1-R1, la diode D1, polarisée par R2, est passante; elle charge instantanément la capacité C3; ce faisant, elle permet à la tension du noeud 4 d'atteindre de manière transitoire la tension de coude (0,6Volts) de la diode D2;

- lorsque le signal au noeud 3 décroît, sa décroissance est fixée principalement par R2.C2; simultanément, le signal au noeud 4 (limité en valeur positive par la diode D2) qui devrait décroître essentiellement avec la constante de temps R3.C3 moins rapidement que celui du noeud 3, suit les variations du noeud 3; ainsi, une tension négative apparaît en 4;

- au noeud 3, la décroissance du signal est due jusqu'à T principalement à R2.C2 et ensuite principalement à R3.C3 (Fig.III-31-3);

- Au point 4, la décroissance du signal en valeur négative est imposée jusqu'à T par R2.C2 principalement et ensuite sa croissance est imposée par R3.C3 principalement (Fig.III-31-4);

- lors d'une transition négative issue de C1-R1, correspondant à une transition descendante du signal d'entrée, la diode D1 est bloquée; elle évite des effets de sommation sur la suite du circuit.

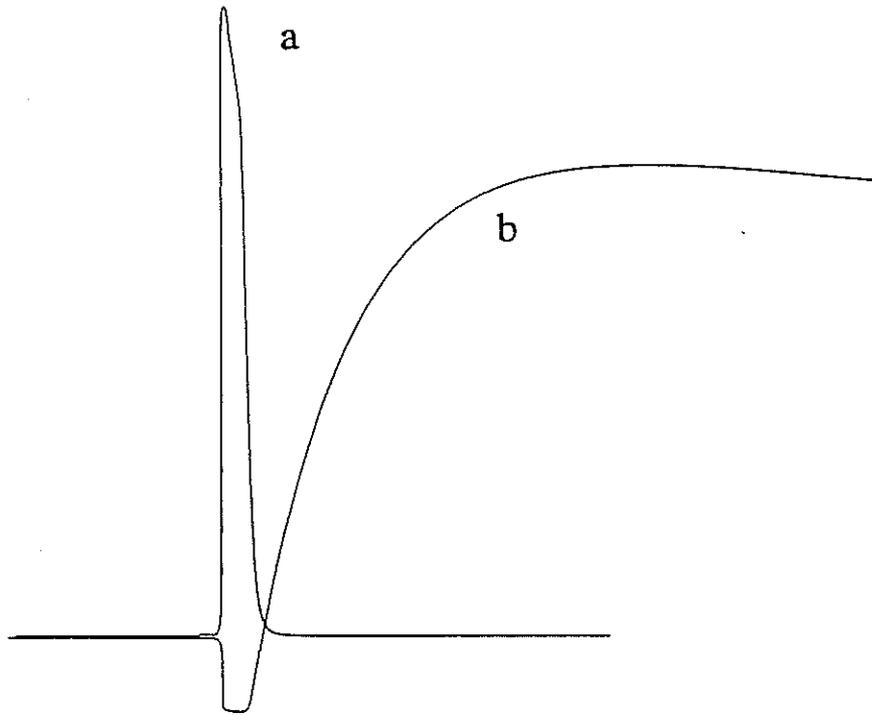
En sortie, un amplificateur opérationnel monté en inverseur assure adaptation d'impédance, amplification, et inversion de polarité du signal (Fig.III-31-6), qui est ainsi adapté à l'étage de détection de minimum qui va suivre.

Le retard initial correspond au temps durant lequel le signal est négatif (Fig.III-32). Il précède l'allure exponentielle recherchée correspondant à la décroissance du signal positif. Sa durée est supérieure à celle de l'impulsion normée, issue de la détection d'un front de contraste sur la voie 2 du D.E.M., et qui est utilisée pour la mesure caractérisant le retard entre deux détections successives d'un front de contraste sur les deux voies (cf. §III.2.4.b; Fig.III-32). De ce fait, le D.E.M. est immunisé contre les flashs synchrones et lumières papillotantes activant simultanément ses voies 1 et 2 et ne correspondant pas au passage d'un front de contraste réel.

La Fig.III-33 montre qu'avec ce circuit une nouvelle fonction Retard, identique à la première, peut être déclenchée avant les 500ms nécessaires à l'évanouissement de la première lorsqu'un nouveau contraste est détecté. Ceci est possible grâce à la charge de la capacité C3 du filtre non linéaire (Fig.III-30), à travers D1 et D2, et au verrouillage par D2 de la tension au noeud 4 à une valeur voisine de zéro. Ceci permet d'éviter la sommation de signaux d'entrée successifs.

*à 2, pour un contraste la retransmission  
de la voie 1 pendant le temps nécessaire*

*Amplitude de la propagation de la diode*

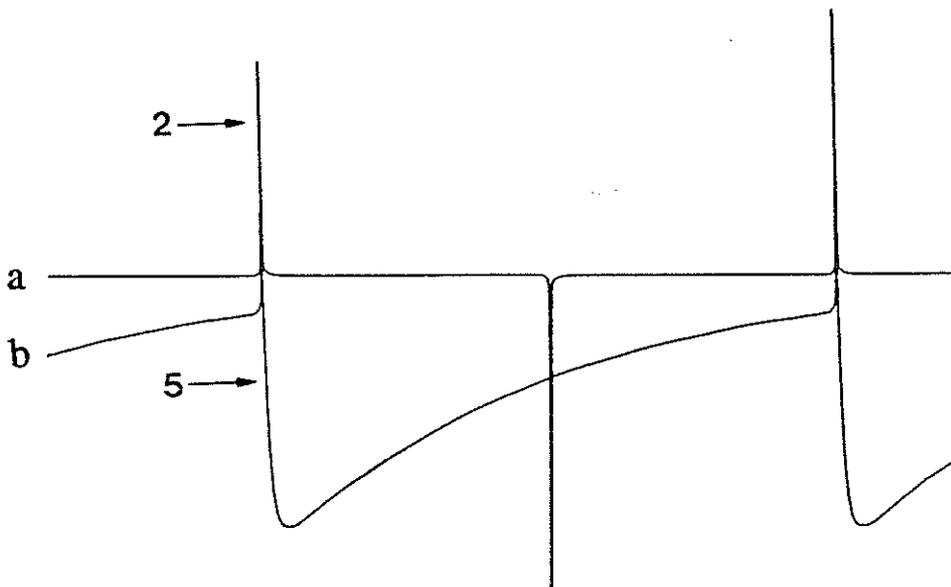


**Fig.III-32** : Détection synchrone d'un front de contraste sur les deux voies d'un D.E.M.

Réponses temporelles caractérisant le retard initial de la fonction Retard du filtre non linéaire de la voie 1 (Fig.III-30) par rapport à la sortie de l'impulsion normée générée par la voie 2. Temps entre le déclenchement de la fonction retard et le début de la décroissance  $\Delta t=20\text{ms}$ . Largeur de l'impulsion  $\Delta t=1,5\text{ms}$ . Variation maximale d'amplitude  $\Delta V$ .

a) entrée au noeud 2 du filtre non linéaire (Fig.III-30) correspondant à la sortie de l'extraction de front de contraste de la voie 2 ( $\Delta V=+15/0V$ ).

b) sortie au noeud 6 du filtre non linéaire ( $\Delta V=+11V/-1,5V$ ).



**Fig.III-33** : Décours temporel des signaux mesurés aux noeuds 5 et 2 du filtre non linéaire (Fig.III-30) lorsque deux fronts de contraste se succèdent sur la même voie 1 d'un D.E.M. avant que la première fonction Retard n'ait eu le temps de s'évanouir. Temps entre les deux déclenchements de la fonction retard  $\Delta t=400\text{ms}$ .

a) Sortie au noeud 2 du filtre passe-haut placé en sortie du circuit à seuil à hystérésis ( $\Delta V=\pm 9V$ )

b) Sortie au noeud 5 du filtre non linéaire ( $\Delta V=0,6V/-2V$ ).

Résumé :

La fonction Retard, qui va servir à caractériser le retard  $\Delta t$  entre les signaux détectés sur les deux voies adjacentes, est réalisée par un filtre non linéaire délivrant un signal d'allure exponentielle décroissante retardée. Elle est déclenchable et réarmable par tout basculement montant du circuit à seuil à hystérésis qui précède.

### III.2.4.b. Multiplication : échantillonnage par détection de minimum

L'étape suivante consiste à échantillonner la valeur de la fonction Retard de la voie 1 au moment où le *même* front de contraste est détecté sur la voie 2.

Pour ce faire, un "calculateur" ultra rapide et ultra économique basé sur l'utilisation des propriétés non linéaires des diodes a été utilisé apportant une solution à base de composants uniquement passifs. Un circuit analogique "détecteur de minimum" a été réalisé très simplement au moyen de deux diodes et d'une résistance (Fig.III-34). Comme on l'a vu en II.4.3.a., il permet de ne retenir, à tout instant, que le plus petit de deux signaux analogiques présents sur ses deux entrées.

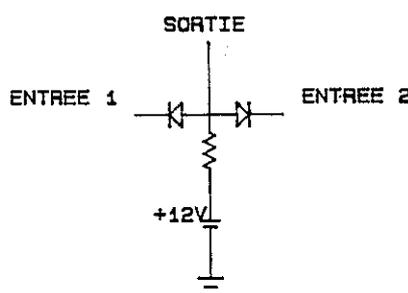


Fig.III-34 : Circuit électronique d'échantillonnage par détection de minimum.

Le déroulement temporel des signaux peut se décrire de la sorte :

- en l'absence d'impulsion positive sur la voie 2, le signal de valeur nulle ou négative de cette voie est d'amplitude inférieure à celui de la voie 1, sauf durant le temps relatif à la variation d'amplitude négative (retard) de la voie 1 précédant la décroissance d'allure exponentielle positive; ainsi dans ces conditions, le signal de sortie est négatif ou nul;

- lorsqu'une impulsion positive est présente sur la voie 2, son amplitude est toujours supérieure à celle du signal de la voie 1; ainsi apparaît durant l'impulsion même, un signal de sortie de valeur correspondant à celle de la voie 1. C'est à dire que l'impulsion permet d'échantillonner le signal de la voie 1, réalisant ainsi une sorte de "multiplication" élémentaire (cf. Fig.III-2).

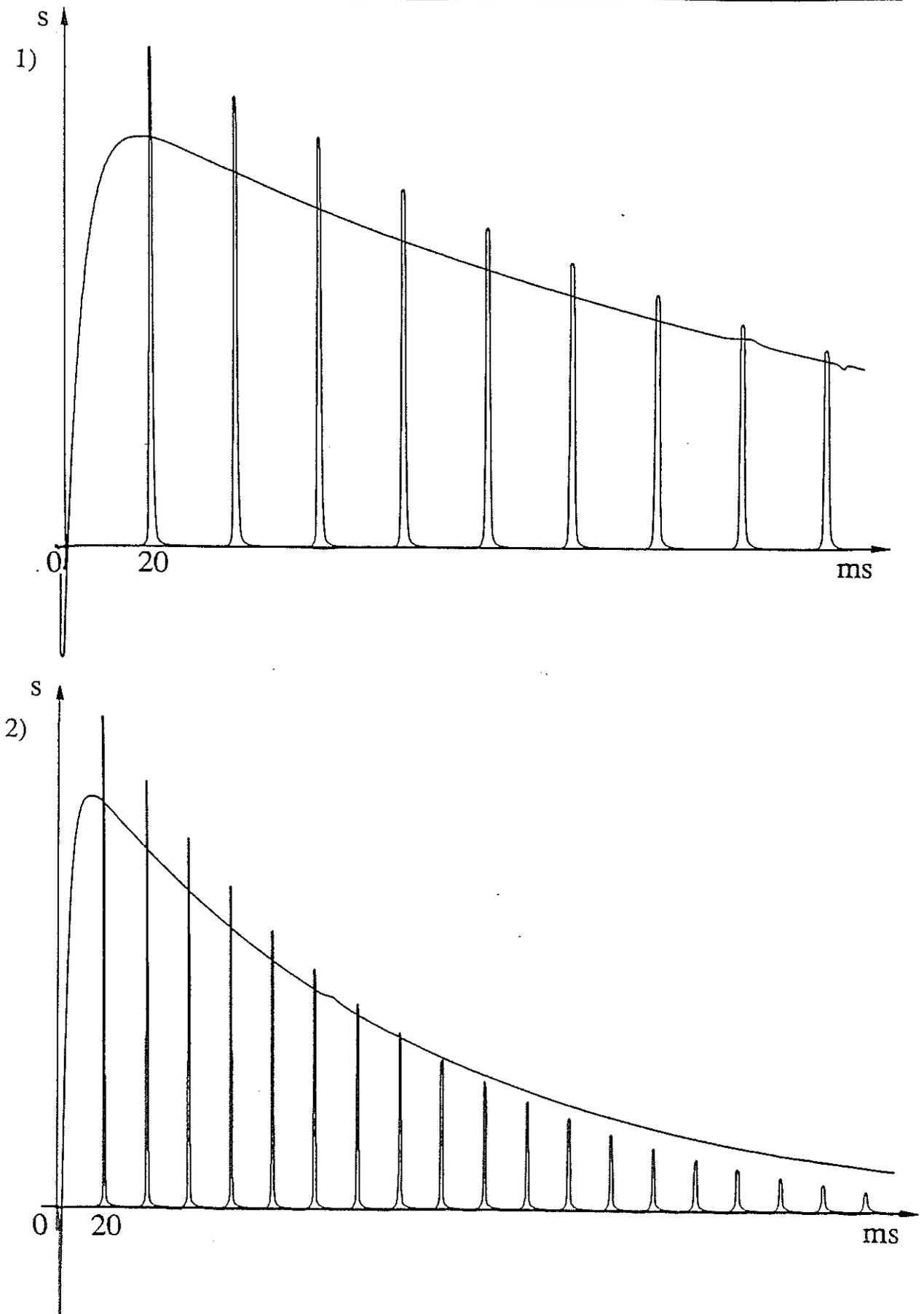


Fig.III-35 : Enregistrements successifs des impulsions de sortie de la multiplication ON d'un D.E.M. (Fig.III.2), en faisant varier le retard  $\Delta t$  entre les détections sur ces deux voies.  $\Delta t$  croissant par pas de 20ms. Variation maximale d'amplitude de la fonction Retard  $\Delta V=6V/-2V$ . Amplitude maximale de l'impulsion :  $\Delta V=9V$ . 1)  $T < 200ms$  et 2)  $T < 500ms$

La Fig.III-35 montre la sortie de la multiplication ON lors de la stimulation des deux voies d'entrée du D.E.M. par des créneaux de plus en plus déphasés. On note que la sortie de cet étage suit une décroissance d'allure comparable à celle de la fonction Retard. L'absence de conformité rigoureuse entre les deux décroissances provient de la chute de potentiel dans la diode du détecteur de minimum et d'un gain en sortie. Cette différence de décalage temporel ne compromet pas le fonctionnement du D.E.M., car on a vu que le principe de mesure repose sur un signal de sortie décroissant de manière monotone avec le déphasage entre les deux voies.

#### Résumé :

Pour mesurer le retard entre les détections successives liées au passage d'un même front de contraste devant les deux directions de visée 1 et 2 d'un D.E.M. (cf. Fig.III-1), la fonction Retard de la voie 1 est échantillonnée par la voie 2. Comme on l'a vu auparavant (cf. III.2.3.d.), la détection de contraste est dédoublée de manière précoce pour prendre en compte *séparément* les fronts ON et les fronts OFF. Le circuit d'échantillonnage est donc lui aussi dédoublé, un front ON sur la voie 2 venant échantillonner la fonction Retard générée sur la voie 1 par ce même front ON et par lui seul. Il en est de même pour les fronts OFF. C'est un circuit de "détection de minimum" à diodes qui assure cet échantillonnage des fronts ON; il en va de même pour les fronts OFF (cf. Fig.III-2). A ce stade, chaque D.E.M. délivre séparément deux signaux caractérisant le Retard lié au passage devant ses deux voies d'un même front de contraste, l'un ON, l'autre OFF.

#### III.2.4.c. Mélange par détection de maximum

Les détections de passage de fronts de contraste ON et OFF permettent toutes deux des mesures indépendantes, mais non redondantes de la position relative d'un objet (qui possède en général un bord d'attaque et un bord de fuite). Leurs signaux de mesure vont être mélangés a posteriori, délivrant ainsi un signal de mesure unique, indépendant de la nature ON ou OFF du front de contraste.

C'est encore un circuit à diodes qui va assurer cette opération de sommation. Elle est réalisée par une détection de maximum grâce à un circuit "OU" à diodes (Fig.III-36). Comme on l'a vu en II.4.3.b., la sortie de ce circuit suit à chaque instant la valeur maximale des deux entrées.

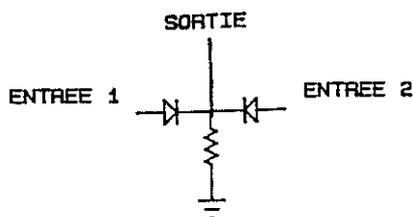


Fig.III-36 : Circuit électronique du détecteur de maximum.

De même que pour la Fig.III.35, la Fig.III.37 montre le signal de sortie de l'étage de sommation ON-OFF (Fig.III-2) lors de la stimulation des deux voies d'entrée du D.E.M. par des créneaux de plus en plus déphasés. Les remarques faites à la Fig.III-35 restent valables ici. On note que pour un même déphasage l'amplitude de sortie est identique pour les signaux associés aux ON et OFF.

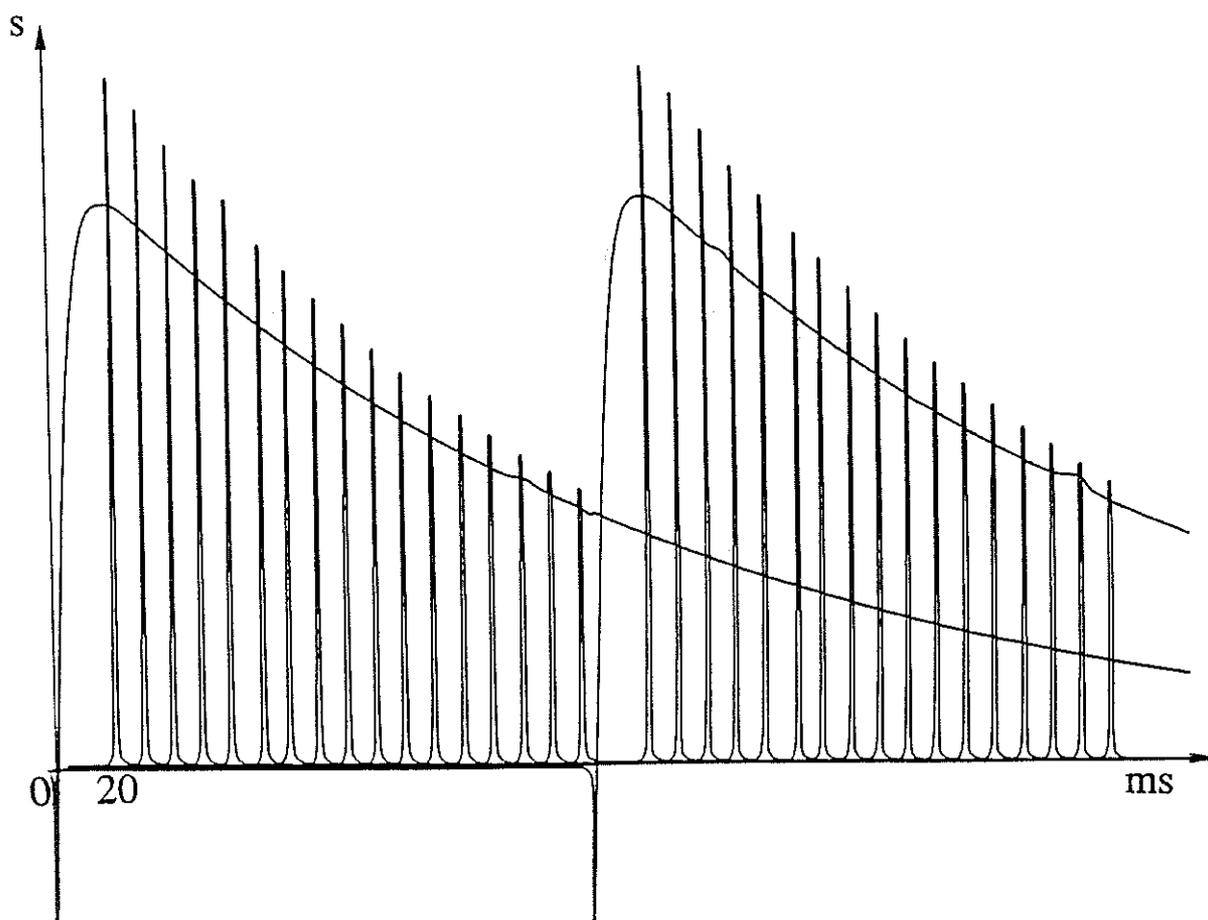


Fig.III-37 : Enregistrements successifs des impulsions de sortie de la sommation ON-OFF d'un D.E.M. (Fig.III-2), en faisant varier le retard  $\Delta t$  entre les détections sur ces deux voies.  $\Delta t$  croissant par pas de 10ms. Variation maximale d'amplitude de la fonction Retard  $\Delta V = 6V / -2V$ . Amplitude maximale de l'impulsion :  $\Delta V = 9V$ .

### III.2.5. Récapitulatif général et performances

Nous avons mis au point un capteur opto-électronique qui, une fois en mouvement délivre un signal caractérisant la vitesse angulaire relative  $\Omega$  des contrastes présents dans l'espace. Son principe, basé sur la détection du mouvement, s'effectue en détectant le passage successif d'un front de contraste devant deux directions de visée adjacentes. Sur chacune des deux voies, la chaîne d'entrée permet de transformer un signal photonique en un signal électrique lié uniquement au passage du front de contraste. Elle est réalisée par la mise en série d'un filtre spatio-temporel linéaire, suivi d'un dédoublement en deux filtres non-linéaires, montés en parallèle et permettant de traiter séparément les transitions ON et OFF. Ces filtres, réglables individuellement, permettent d'échantillonner visuellement l'espace, en tenant compte des variations des différents paramètres (luminance, distance  $D$ , azimuth  $\varphi$ , vitesse de déplacement  $V_0$ , valeur du contraste  $m$ ). La mesure, à proprement dite, caractérisant la vitesse angulaire  $\Omega$  de l'objet est obtenue à partir d'une fonction décroissante du temps séparant les détections d'un même front de contraste sur chaque aiguillage ON ou OFF des voies 1 et 2. Pour cela, toute détection sur la voie 1 génère une fonction dite "Retard", d'allure exponentielle décroissante retardée grâce à un filtre non-linéaire. Ensuite, la détection du même front de contraste sur la voie 2 échantillonne la valeur de cette fonction. Les mesures correspondant aux ON et OFF sont faites indépendamment l'une de l'autre et convergent ensuite vers une sortie unique où elles sont sommées (cf. Fig.III-2).

La Fig.III-38 montre l'ensemble du circuit dont nous venons de décrire pas à pas les étapes de traitement.

La Fig.III.39 présente un chronogramme récapitulatif montrant le décours temporel des signaux en divers noeuds du circuit.

Des enregistrements ont été réalisés avec le dispositif expérimental (cf. Fig.III-3) lors du passage d'un D.E.M. à une vitesse  $V_0=50\text{cm/s}$  devant un bord noir sur fond blanc, de contraste  $m=0,7$ , de largeur  $L_b$  infinie (échelon), disposée à différentes distances  $D$ . L'axe interomatidial du D.E.M. était perpendiculaire à la direction de déplacement ( $\varphi=90^\circ$ ; cf. Fig.III-4). La Fig.III-40 montre l'amplitude du signal de sortie (échantillonné-bloqué) du D.E.M. pour différentes distances de détection  $D$ .

La précision du D.E.M. a été évaluée par d'autres enregistrements, identiques aux précédents, mais effectués lors de plusieurs passages à une même distance  $D$ . Pour une distance  $D<150\text{cm}$ , on a observé une variabilité de l'ordre de  $\pm 6\%$  sur le retard qui sépare les impulsions générées sur chacune des deux voies; elle peut atteindre  $\pm 10\%$  à  $D=250\text{cm}$ . Cette variabilité est inhérente au basculement du circuit à seuil à hystérésis et elle affecte la

précision du signal de sortie du D.E.M. dont les variations d'amplitude sont de l'ordre de  $\pm 1\%$  à  $D=50\text{cm}$  et atteignent  $\pm 10\%$  à  $D=150\text{cm}$ .

Le fonctionnement d'un D.E.M. est dépendant des limites de détection des fronts de contraste. On a montré que pour une vitesse de déplacement  $V_0=50\text{cm/s}$ , on détecte un front de contraste  $m=0,7$  dans une gamme de luminance de trois décades, selon un axe optique faisant un angle  $\varphi=13^\circ$  avec la direction de déplacement, jusqu'à une distance  $D=250\text{cm}$  (égale à 16 fois le rayon physique du robot et de son oeil : cf. §IV.1.3.a.). Par ailleurs, la mesure caractérisant le temps  $\Delta t$  séparant la détection d'un même front de contraste sur les deux voies est limitée par la fonction Retard qui termine sa décroissance d'allure exponentielle retardée au bout de 500ms. Ce temps d'évanouissement permet une mesure de la distance radiale d'un objet jusqu'à  $D=250\text{cm}$ , à une vitesse de  $V_0=50\text{cm/s}$ , avec un D.E.M. orienté perpendiculairement à la direction de déplacement relatif d'un front de contraste ( $\varphi=90^\circ$ ) et ayant un angle interommatidial de  $\Delta\varphi=5,74^\circ$ .

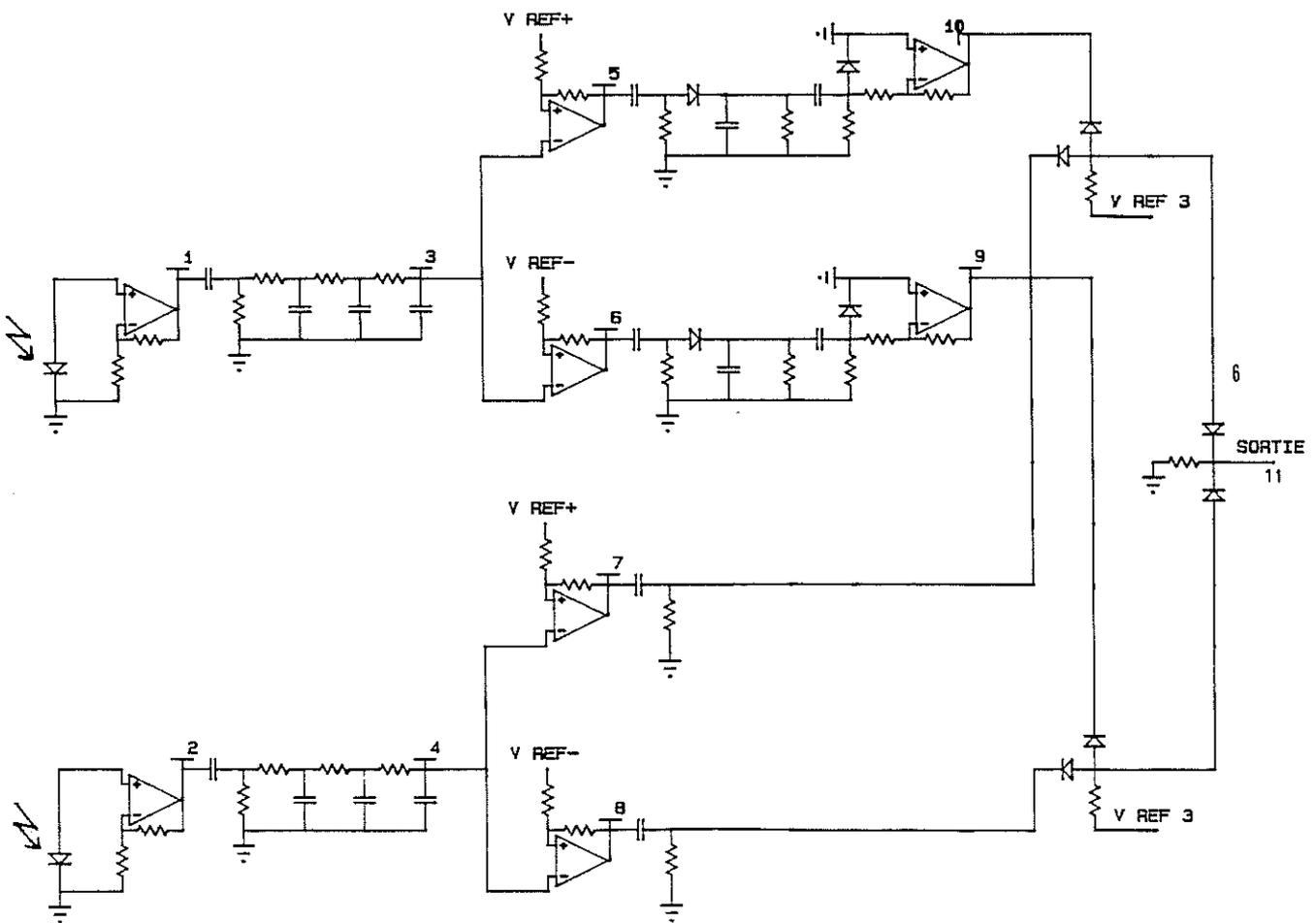
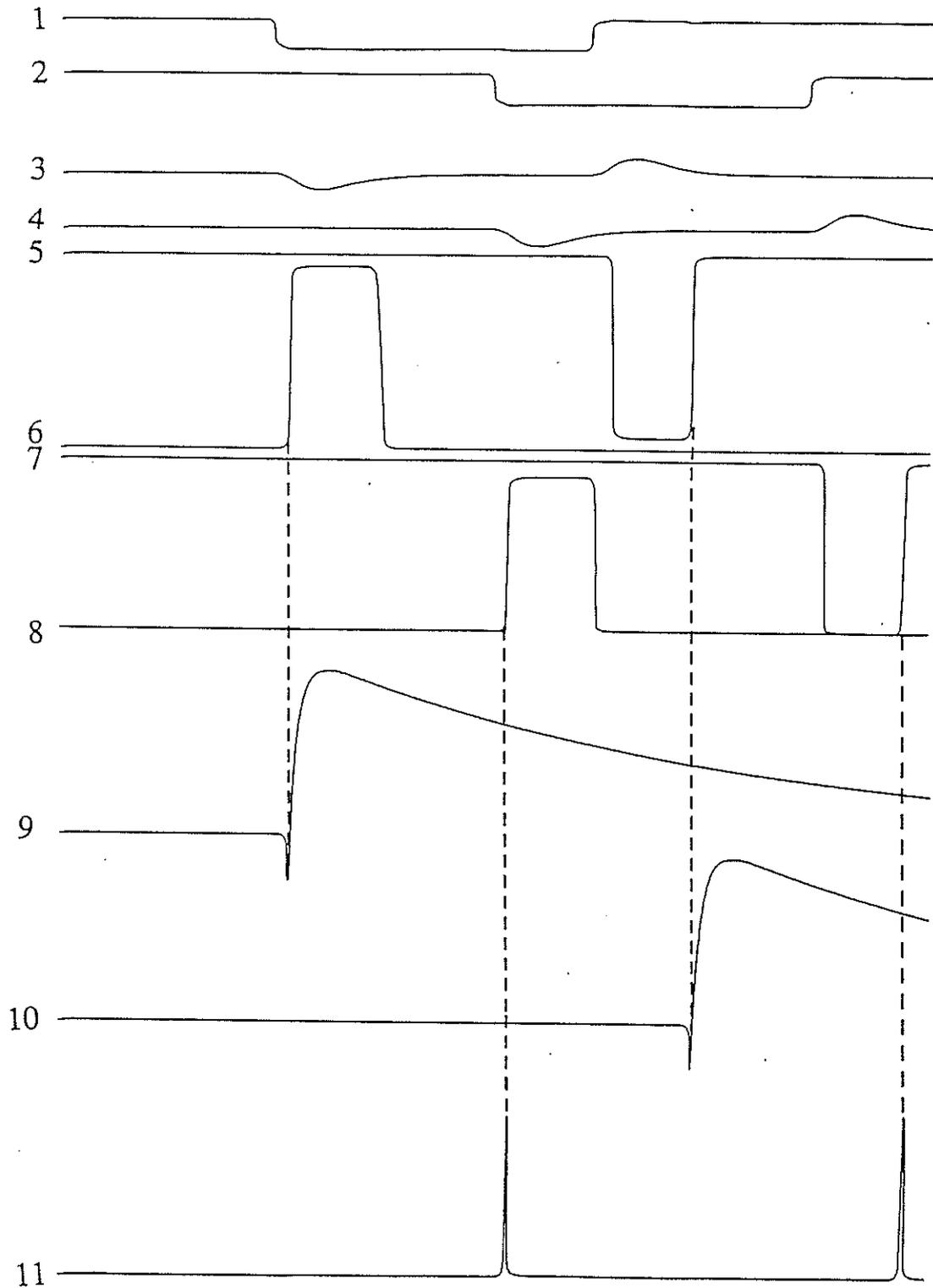


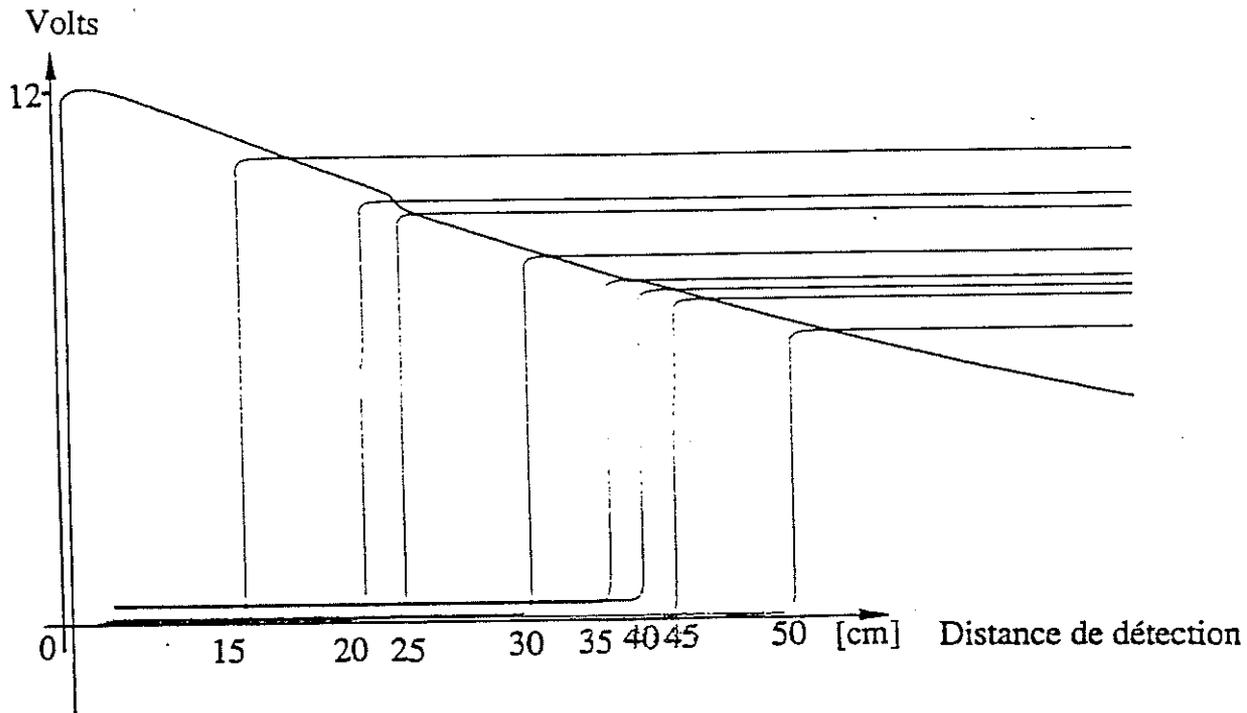
Fig.III-38 : Circuit électronique final du D.E.M.



**Fig.III-39** : Signaux mesurés en plusieurs noeuds du circuit du D.E.M. stimulé artificiellement par 2 créneaux d'entrée aux noeuds 1 et 2 (Fig.III-38) de largeur temporelle  $\Delta t = 150$  ms. Variation maximale d'amplitude  $\Delta V$ .

- 1) et 2) Sorties de l'amplificateur logarithmique d'entrée ( $\Delta V = 370$  mV)
- 3) et 4) Sorties du filtre passe-bande ( $\Delta V = \pm 110$  mV)
- 5) et 6) Sorties des étages de seuillage à hystérésis ON et OFF de la voie 1 ( $\Delta V = \pm 11$  V)
- 7) et 8) Sorties des étages de seuillage à hystérésis ON et OFF de la voie 2 ( $\Delta V = \pm 11$  V)
- 9) et 10) Sorties des filtres non linéaires des ON et OFF de la voie 1 ( $\Delta V = +6$  V /  $-2$  V)
- 11) Sortie du D.E.M. ( $\Delta V = +6$  /  $0$  V)

1)



2)

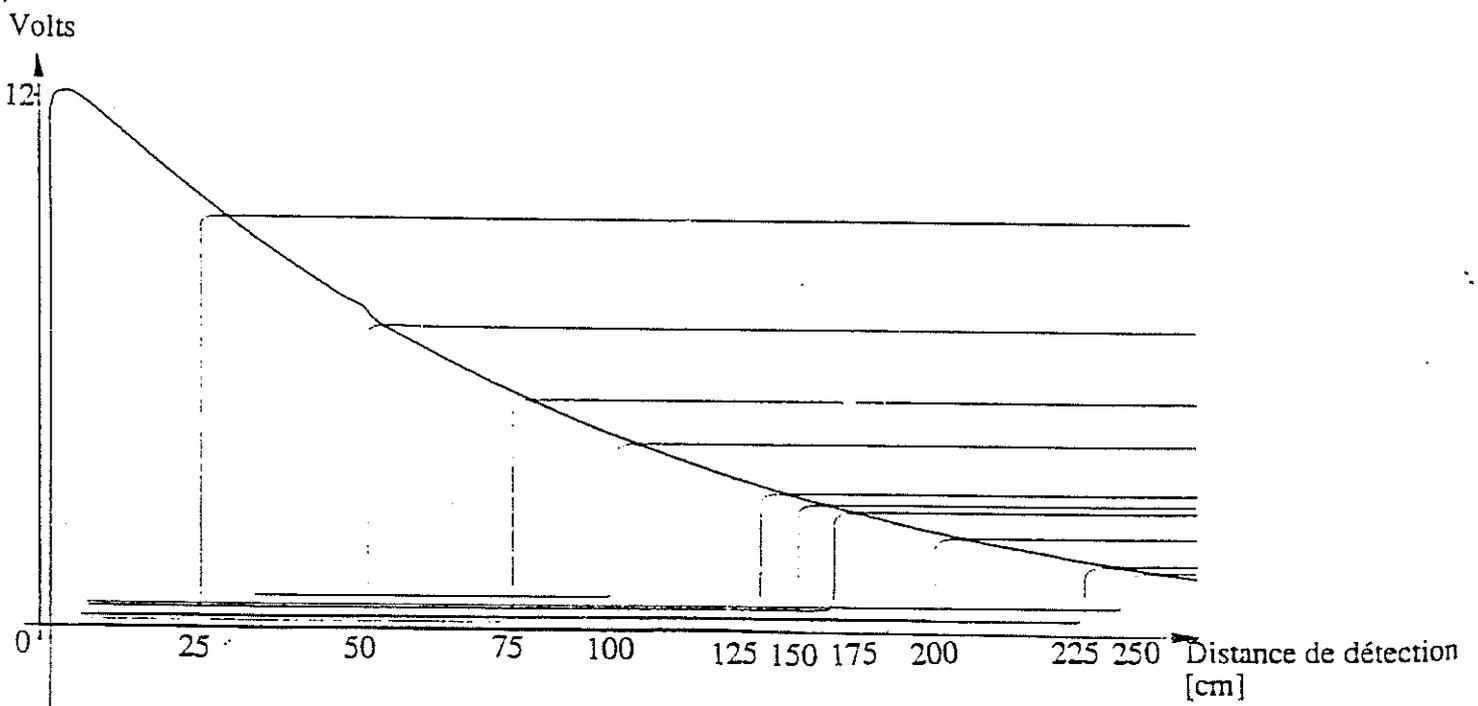


Fig.III-40 : Réponses temporelles de la sortie d'un D.E.M. (échantillonnée-bloquée) pour différentes distances de détections  $D$ . Variation maximale d'amplitude de l'échantillonnage  $\Delta V=9V$ . Amplitude maximale de l'exponentielle  $\Delta V=6V$ . 1)  $D < 50cm$  et 2)  $D < 250cm$ .

### III.2.6. Implémentation d'un D.E.M. bidirectionnel

Le D.E.M. décrit précédemment effectue une mesure de distance  $D$  par détection du mouvement relatif entre le robot et son entourage uniquement dans un sens de déplacement. Or, dans un environnement dynamique, les déplacements relatifs capteur/environnement peuvent se produire dans les deux sens, ce qui nécessiterait deux détecteurs de sens opposés. De ce fait, nous avons mis au point un D.E.M. bidirectionnel.

#### III.2.6.a. Principe

Le principe de fonctionnement du D.E.M. bidirectionnel repose en partie sur celui de deux D.E.M.s unidirectionnels câblés en sens opposés (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.III). Il comprend trois directions de visées  $[i-1 / i / i+1]$  consécutives (Fig.III-41). Deux D.E.M.s unidirectionnels (+) et (-) utilisent respectivement les directions  $i-1$  et  $i+1$  comme voie 1 et en commun la direction centrale  $i$  comme voie 2. Deux mesures sont donc faites simultanément lors de la détection sur la direction centrale  $i$ , quel que soit le sens du déplacement. Il a été montré que c'est la plus grande valeur délivrée par ces deux D.E.M.s qui donne un signal caractérisant la distance radiale  $D$  d'un front de contraste et son sens relatif de déplacement.

#### III.2.6.b. Description du circuit

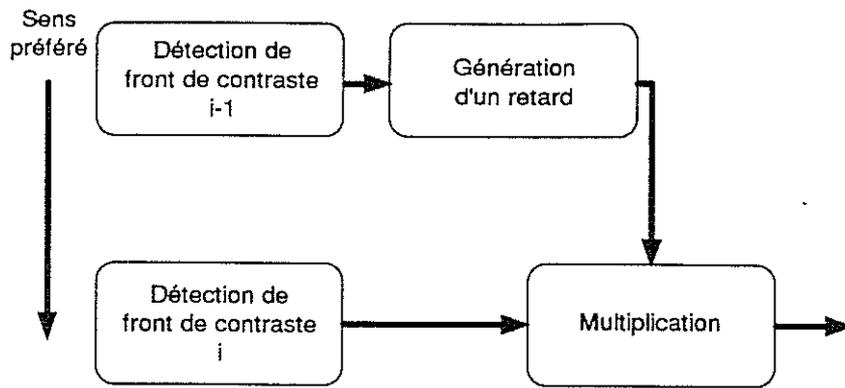
La Fig.III-42 représente le synoptique de traitement du D.E.M. bidirectionnel. Lors de la détection d'un front de contraste sur la voie 2 (voie "centrale"), deux D.E.M.s délivrent deux sorties (Somme ON-OFF) associées respectivement à deux sens de déplacement opposés. Seul le signal de sortie d'amplitude la plus élevée est à prendre en considération pour caractériser la vitesse angulaire du front de contraste en mouvement. En outre, c'est le détecteur qui l'a délivré qui détermine le sens du déplacement relatif.

Un détecteur de maximum à diodes (cf. §II.4.3.b.) réalise une sélection en amplitude sur ces deux signaux (Fig.III-42-Maximum).

Pour avoir le sens de déplacement, une simple comparaison de ces deux mêmes signaux, par l'intermédiaire d'un amplificateur opérationnel monté en comparateur, fournit un signal bipolaire dont le signe renseigne sur le sens du mouvement (Fig.III-42-Comparaison).

#### Remarque :

Dans toute la suite de l'exposé, c'est cette configuration de "D.E.M. bidirectionnel" qui sera sous-entendue chaque fois qu'il sera question de D.E.M..



Synoptique de principe du D.E.M. unidirectionnel

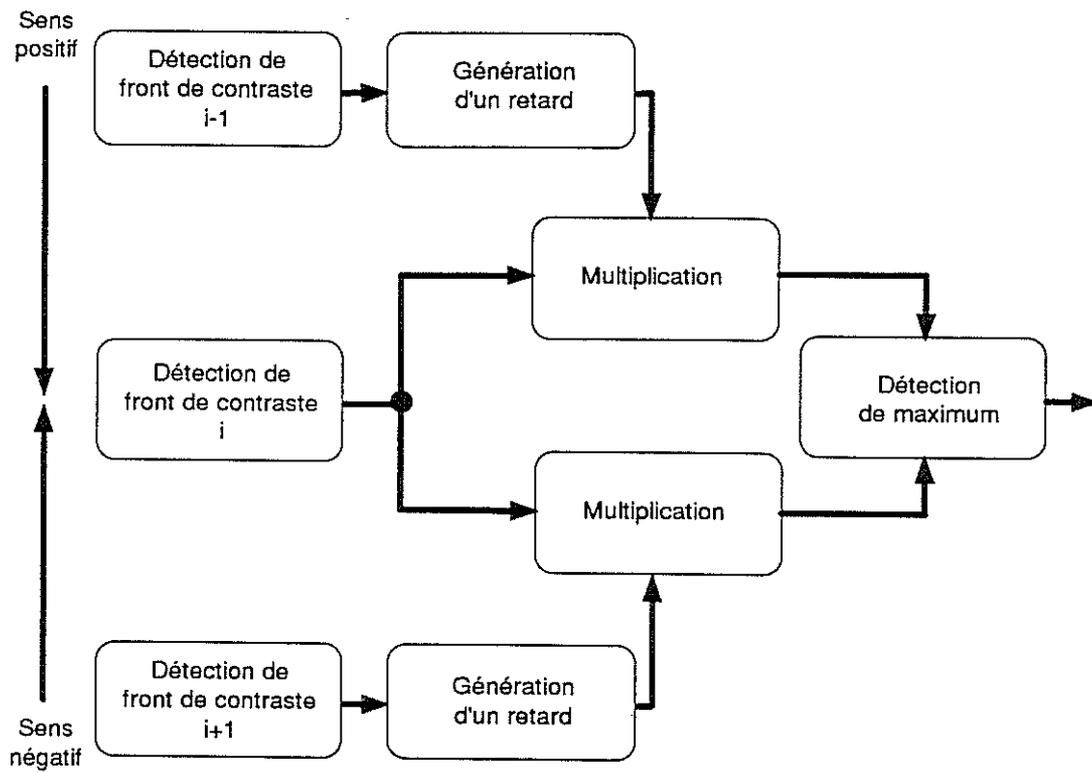


Fig.III-41 : Synoptique de principe du D.E.M. bidirectionnel.

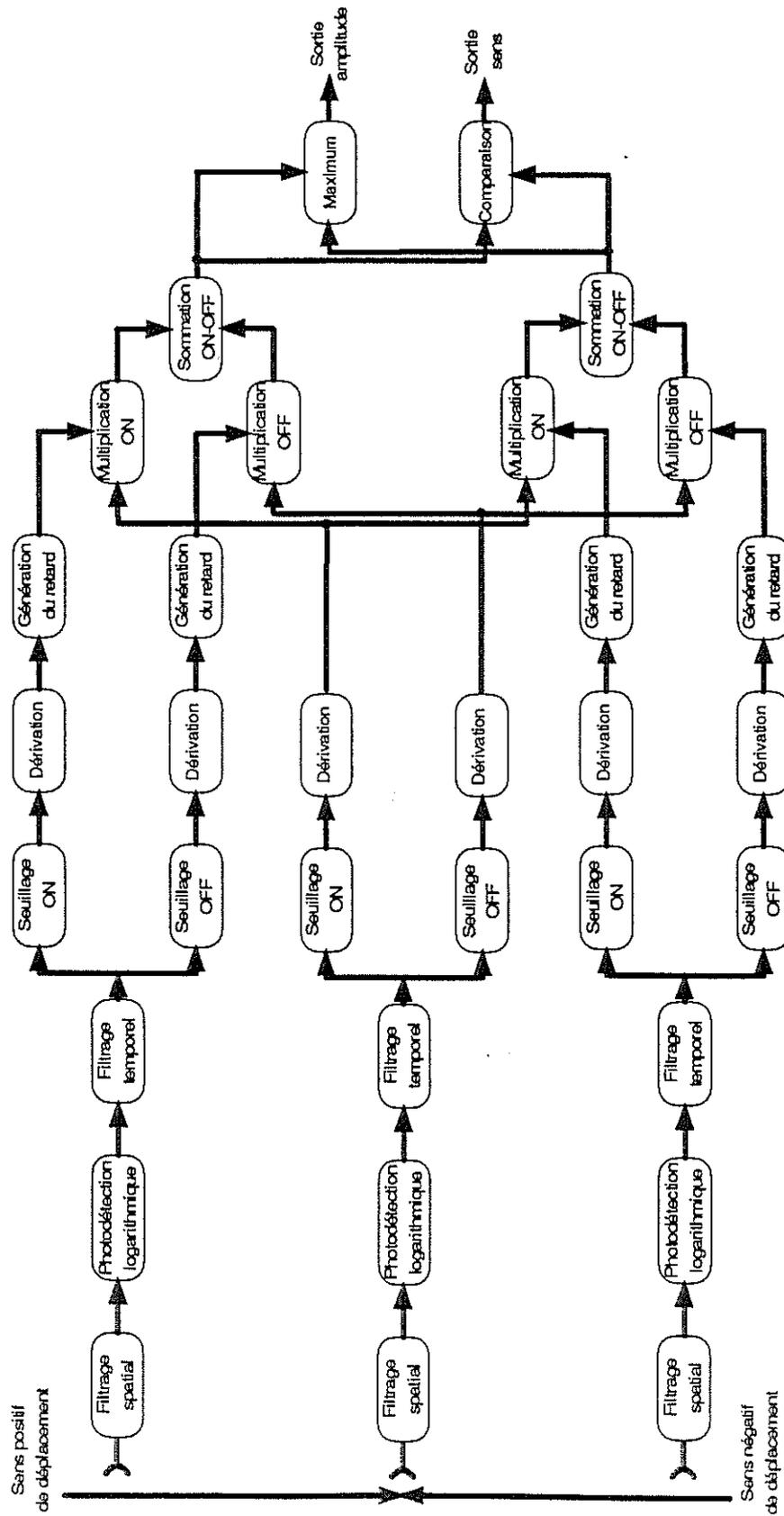
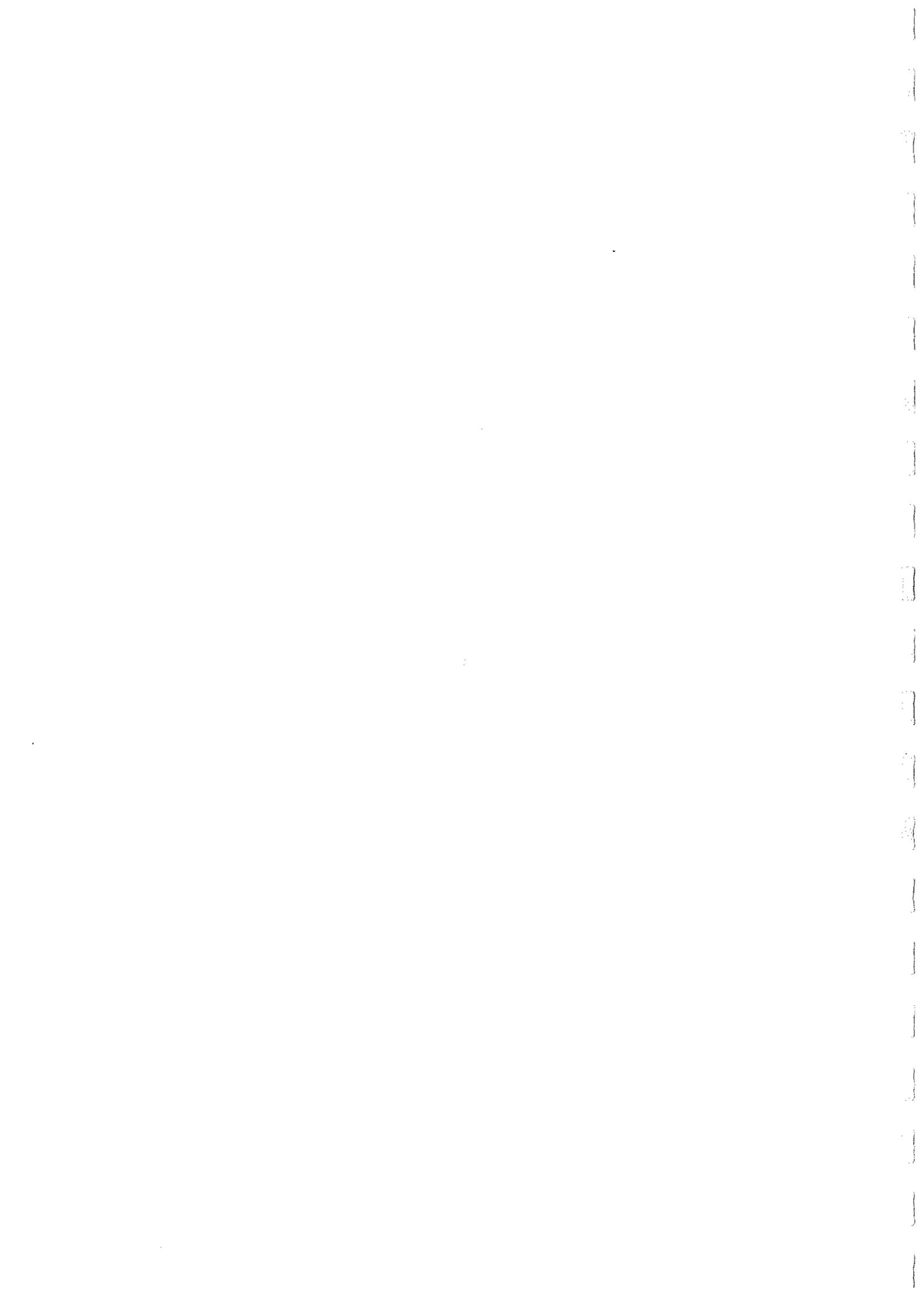


Fig. III-42 : Synoptique de traitement du D.E.M. bidirectionnel.



***CHAPITRE IV***

***CONSTRUCTION DU SYSTEME VISUEL  
DU PROTOTYPE DE ROBOT***



**IV.1. Système sensoriel du robot : la vision**

**IV.2. L'oeil D.E.M. : optique composée, proximètre, réseau de D.E.M.s**

IV.2.1. Architecture de l'oeil

a. Cahier des charges

b. Solution retenue

IV.2.2. Réalisation électronique d'un réseau de D.E.M.s

a. Module élémentaire

b. Carte mère

IV.2.3. Réalisation optique

a. Champ visuel latéral : optique composée

b. Champ visuel frontal : proximètre

IV.2.4. Récapitulatif et performances

**IV.3. Le détecteur de cible**

IV.3.1. Cahier des charges

IV.3.2. Réalisation optique

IV.3.3. Réalisation électronique

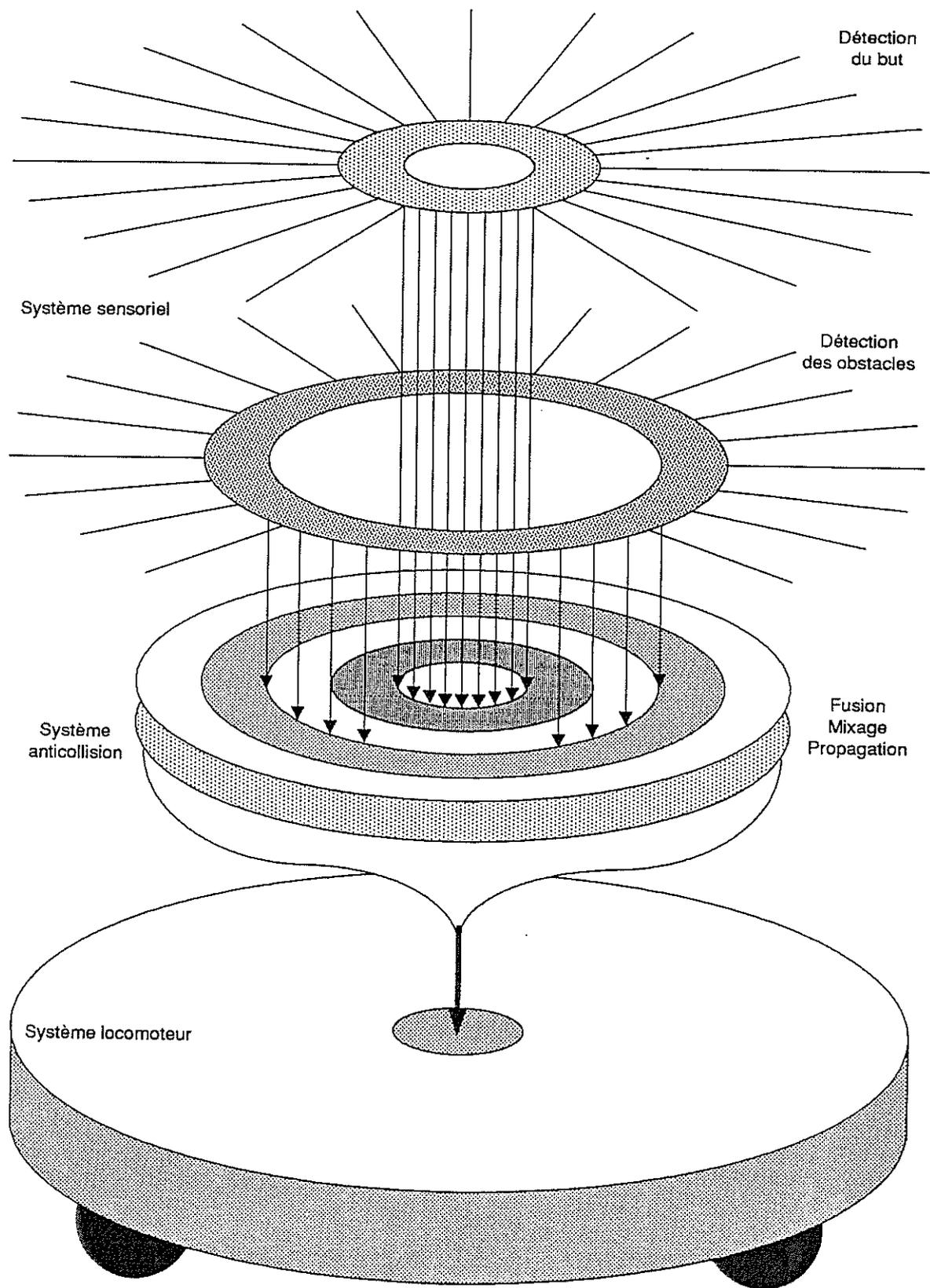


Fig.IV-1 : Les trois principaux systèmes (sensoriel, anticollision, de locomotion) du robot mobile.

Ce chapitre présente la construction du système visuel spécifique, appelé "oeil D.E.M.", assurant la détection des obstacles lors du déplacement du robot dans un environnement inconnu. Par ailleurs, il présente un système visuel annexe, totalement indépendant du précédent, qui a été développé pour localiser la direction du but (source lumineuse).

#### IV.1. Système sensoriel du robot : la vision

Lorsqu'un animal se déplace, il utilise un ou plusieurs de ses sens (olfactif, tactile, électrique, auditif, visuel) pour ne pas heurter les objets. Si de plus il cherche à atteindre un but (nourriture, proie, gîte, femelle, etc.), il doit être en mesure de le localiser. S'il n'a aucune connaissance préalable de son environnement et de la position de son but, il va le plus souvent errer jusqu'à le détecter. C'est alors qu'il essaiera de l'atteindre le plus rapidement possible tout en évitant de heurter les éventuels obstacles.

Dans le cas présent, le système sensoriel du robot est constitué de deux systèmes visuels *indépendants* :

- un système appelé "oeil D.E.M." assure la détection des obstacles. Il prélève les informations nécessaires à la "survie" du robot dès lors que ce dernier est en déplacement;
- un autre oeil appelé "détecteur de cible" détermine en permanence la position du but, matérialisé par une lampe, qui est *toujours visible* au dessus des obstacles.

Les signaux issus de ces deux systèmes visuels convergent alors vers un réseau implémentant un algorithme anticollision dans lequel ils sont combinés de manière à extraire un unique signal de commande du moteur de direction de la plate-forme (Fig.IV-1).

#### IV.2. L'oeil D.E.M. : optique composée, proximètre, réseau de D.E.M.s

##### IV.2.1. Architecture de l'oeil D.E.M.

##### IV.2.1.a. Cahier des charges

C'est une centaine de D.E.M.s identiques qui constituent l'oeil composé assurant la détection des objets dans l'environnement du robot. Comme on l'a décrit précédemment (cf. III-2.), la mesure de la vitesse angulaire relative des fronts de contraste permet d'apprécier la distance radiale  $D$  des obstacles dans les conditions suivantes :

- l'environnement présente une texture constituée de bandes verticales de largeur aléatoire  $L_b < 30\text{cm}$ , présentant par rapport à l'arrière-plan un contraste lui aussi aléatoire mais de valeur  $m > 0,15$  (cette limite correspond à une valeur de contraste à peu près 5 fois plus faible que celle d'une bande noire sur fond blanc  $m=0,7$ );

- le robot se déplace par pas élémentaires rectilignes de longueur 10cm à une vitesse constante  $V_0=50\text{cm/s}$ ;

Tout obstacle ayant, durant cette translation élémentaire, franchi un "cercle de sécurité" de rayon 50cm autour du robot devra avoir été repéré par au moins un D.E.M. (cf. §V.1);

- l'oeil, qui est polarisé, est solidaire des roues directrices du robot, de telle sorte que sa partie frontale se trouve toujours orientée dans le sens du déplacement.

#### IV.2.1.b. Solution retenue

L'échantillonnage azimutal sur  $360^\circ$ , permettant de détecter les objets autour du robot, fait appel à deux sous-systèmes visuels complémentaires. Ils reposent tous deux sur la détection du mouvement. Le champ visuel de l'un couvre une zone frontale, celui de l'autre une zone latérale. La Fig.IV-2 résume l'architecture complète des directions de visée de cet oeil D.E.M., par rapport à la configuration de la Fig.IV-2. Des contraintes techniques relatives au positionnement des lentilles associées aux directions de visée latérales (cf. IV.2.3.a.) ont conduit à réduire de quelques degrés, la largeur du système couvrant le champ latéral et d'étendre d'autant celle du système frontal.

\* pour les deux zones latérales, dont le champ visuel s'étend de  $\varphi=13^\circ$  à  $\varphi=167^\circ$  de part et d'autre de l'axe de l'oeil, les axes de visée des D.E.M.s concourent au centre du robot. Rappelons qu'il doivent être positionnés dans le plan azimutal, suivant une distribution angulaire en gradient (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.IV). Cette organisation permet d'échantillonner deux portions de cercle symétriques par rapport à l'axe de déplacement du robot. Le gradient d'échantillonnage est calculé de telle sorte que, au cours de la translation élémentaire, tout contraste situé en deçà du rayon de sécurité a nécessairement coupé 2 axes de visées adjacents, entre lesquels un D.E.M. est câblé. 46 directions d'échantillonnage couvrent chacun des deux hémichamps latéraux;

\* pour la zone frontale, limitée par  $|\varphi| < 113^\circ$ , une sorte de "proximètre" (Fig.IV-2) reposant encore sur une organisation de D.E.M.s, permet de détecter un contraste entrant dans le rayon de sécurité. Il assure un échantillonnage sur deux portions du cercle de vision symétriques par rapport à l'axe de déplacement du robot par deux architectures identiques. Chacune de ces architectures est constituée par des D.E.M.s dont les axes de visée sont encore positionnés dans le plan azimutal et suivent également un principe de distribution angulaire en gradient. Les axes de visée appartenant à chacun de ces deux proximètres, concourent en un point qui ne coïncide pas avec le centre du robot. Les deux points associés respectivement aux deux demi-zones frontales sont disposés symétriquement par rapport à l'axe de

déplacement du robot : celui de gauche assure une détection frontale droite, celui de droite une détection frontale gauche. Comme c'était le cas pour la détection latérale, le gradient d'échantillonnage est calculé ici de telle sorte que tout contraste pénétrant en deçà du rayon de sécurité durant la translation élémentaire, coupe nécessairement 2 axes de visée adjacents, entre lesquels est encore câblé un D.E.M.. Chacune des deux zones frontales met en oeuvre dix directions d'échantillonnage.

En conclusion, l'oeil D.E.M. embarqué sur le prototype comprend 112 directions de visée, 92 consacrées à la vision latérale et 20 consacrées au proximètre frontal.

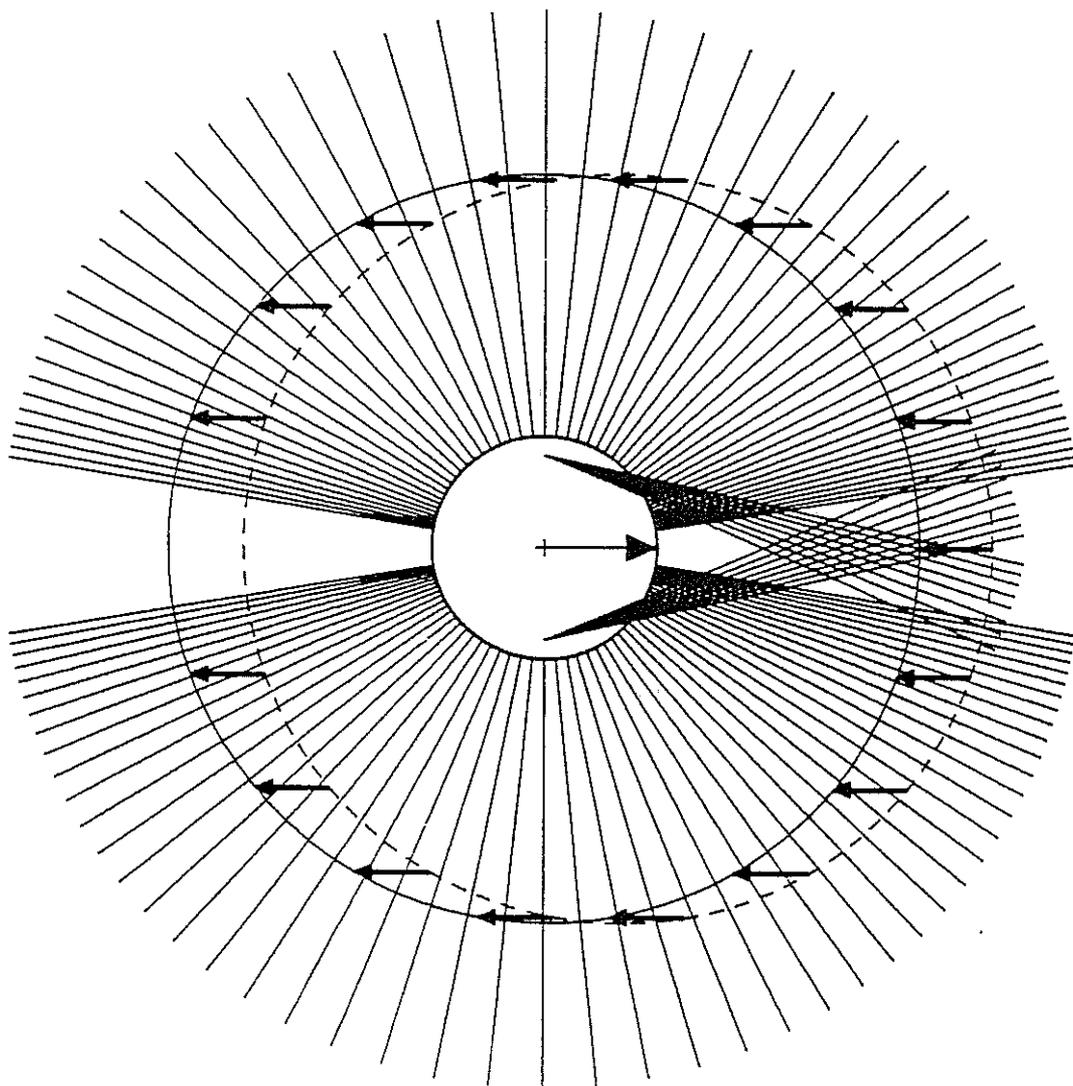


Fig.IV-2 : Architecture optique de l'oeil D.E.M. (d'après Thèse Pichon, Chap.IV).

IV.2.2.a. Module élémentaire

L'architecture de l'oeil D.E.M. fait appel à une couronne constituée d'une centaine de D.E.M.s bidirectionnels consécutifs. Comme on l'a vu en §III.2.6., chacun d'eux nécessite trois directions de visée : le D.E.M. (i) utilise l'entrée (i) comme entrée centrale et les entrées (i-1) et (i+1) comme entrées latérales. Ainsi, une même direction de visée (i) sert non seulement d'entrée centrale du D.E.M. (i), mais aussi d'entrée latérale au D.E.M. (i-1) et au D.E.M. (i+1) (Fig.IV-3).

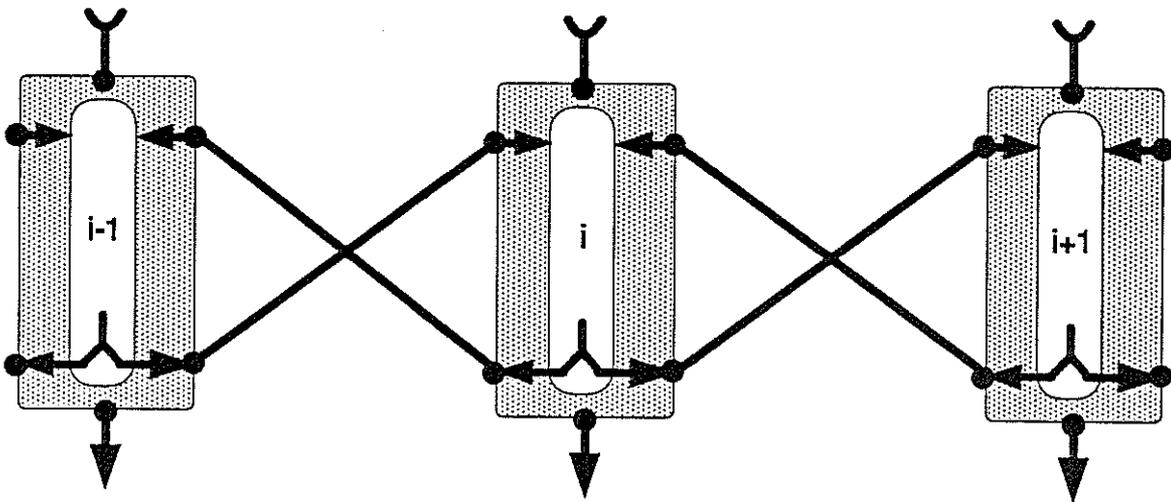


Fig.IV-3 : Schéma des connexions nécessaires pour le câblage d'un D.E.M. (i) associé à la direction de visée (i).

Cette caractéristique va permettre de mettre en commun certains étages de traitement (par exemple l'extraction de front de contraste, cf. §III.2.3.) entrant dans la réalisation des trois D.E.M.s consécutifs, permettant ainsi de réduire le nombre de composants total. Ceci conduit à la réalisation d'un module élémentaire (i) associé à une direction de visée (i), qui, une fois connecté latéralement aux modules (i-1) et (i+1), permet de délivrer la sortie du D.E.M. (i) et une des voies latérales du D.E.M. (i-1) et du D.E.M. (i+1).

Par ailleurs, toutes les connexions latérales (entrées/sorties) sont doubles, car elles participent aux traitements séparés ON et OFF de chaque D.E.M. (Fig.IV-4).

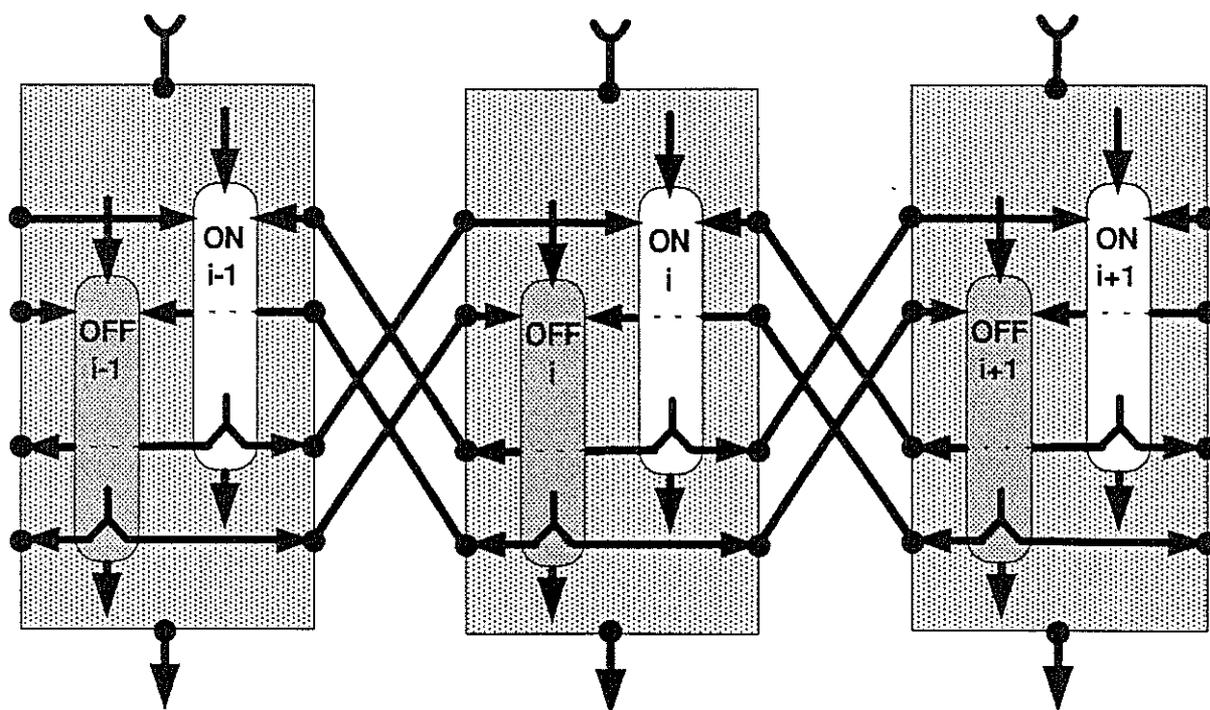


Fig.IV-4 : Schéma des connexions entre les modules élémentaires câblés derrière chaque direction de visée (i), avec le dédoublement des voies ON et OFF.

Le traitement effectué par un D.E.M. (cf. Fig.III.42) conditionne le traitement du module élémentaire (i) (Fig.IV-5) :

- une extraction de front de contraste suivie en parallèle de deux générations de "Retard" délivrant respectivement les sorties ON(i) et OFF(i) destinées aux connexions latérales vers les modules (i-1) et (i+1);
- cette même extraction de front de contraste sert de voie centrale au D.E.M. (i) qui nécessite 4 connexions latérales d'entrées avec les sorties ON(i-1), OFF(i-1), ON(i+1) et OFF(i+1) provenant des modules (i-1) et (i+1).

Dans un environnement stationnaire, seules les sorties correspondant à un sens de détection sont utilisables. Une opération de mixage entre la sortie en amplitude et celle du sens va permettre de les sélectionner. Un circuit de détection de minimum à diodes (cf. §II.4.3.a.) réalise cette opération, et délivre une sortie unique de détection du mouvement d'un front de contraste dans un seul sens dit "positif".

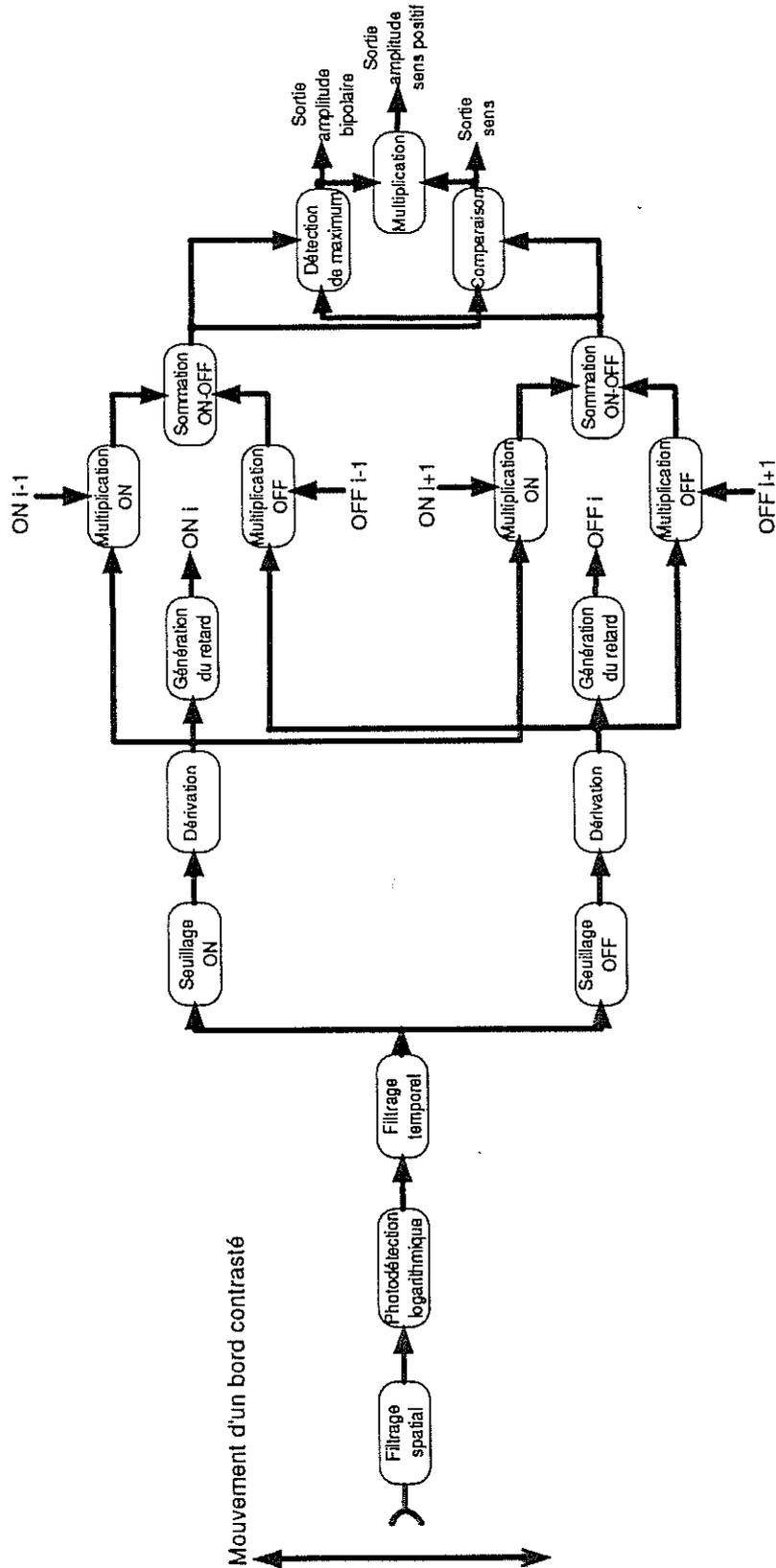
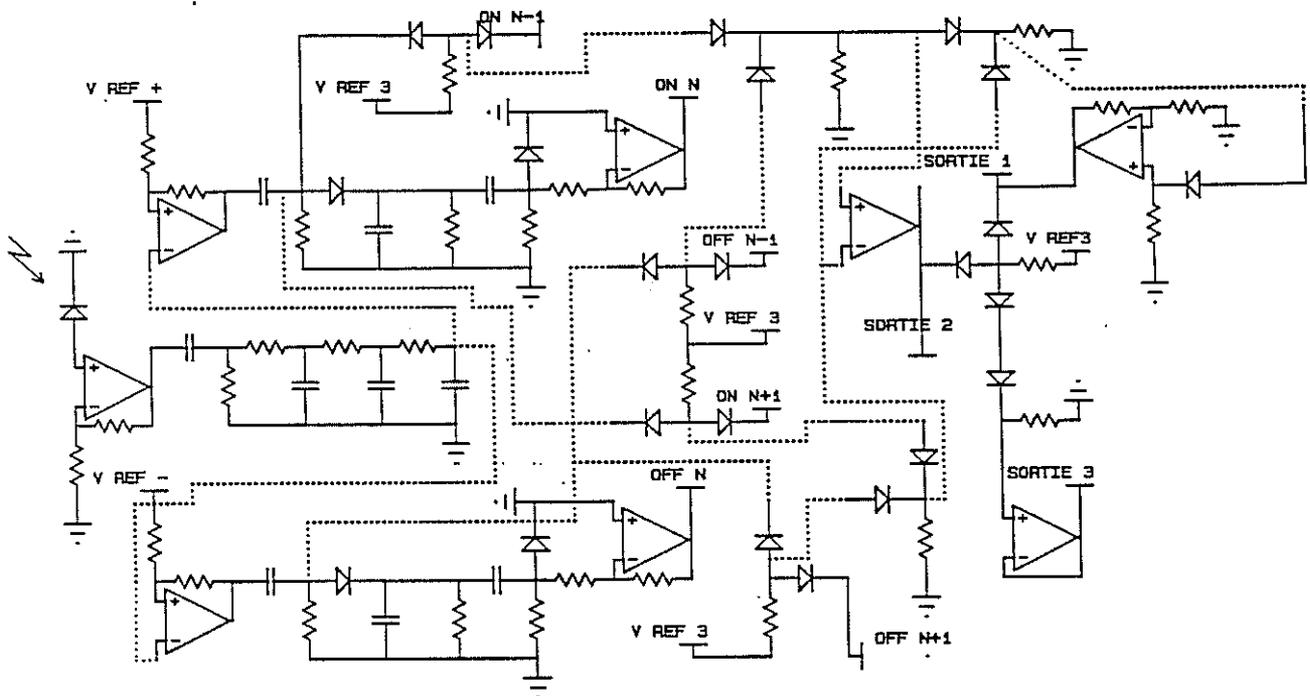


Fig.IV-5 : Synoptique de traitement d'un module élémentaire (i).

Afin de pouvoir régler les différents paramètres d'un D.E.M., le circuit électronique de chaque module élémentaire (Fig.IV-6) comporte sept potentiomètres permettant de régler :

- le gain de la photodétection logarithmique d'entrée (variable de 1 à 4);
- la constante de temps du filtre temporel (passe-haut de constante de temps  $\tau < 22\text{ms}$ );
- la largeur de l'hystérésis ( $hy_1$ ) associée au OFF;
- la normalisation en amplitude de la fonction Retard associée au OFF;
- la largeur de l'hystérésis ( $hy_2$ ) associée au ON;
- la normalisation en amplitude de la fonction Retard associée au ON;
- le gain de sortie.



**Fig.IV-6** : Circuit électronique d'un module élémentaire.  $V_{ref+}$ ,  $V_{ref-}$ ,  $V_{ref3}$  sont des tensions de référence. ON (N) et OFF (N) sont les sorties de connexions latérales vers les modules adjacents. ON(N-1), OFF(N+1), OFF(N-1) et OFF(N+1) sont les entrées des modules adjacents. SORTIE 1, 2 et 3 sont les sorties (amplitude bipolaire, sens, et amplitude sens positif).

Afin de disposer d'une batterie de D.E.M.s interchangeables, nous avons câblé chaque circuit sur une mini-carte individuelle. Pour un gain de place et de poids, ces modules sont enfichés verticalement sur une "carte-mère" assurant leur alimentation et leurs interconnexions.

L'implémentation du module a été faite essentiellement en composants C.M.S., afin de respecter le cahier des charges décrit en §II.3.. Une implantation double face, sur un circuit imprimé d'épaisseur 0,4 mm, a permis de réduire la taille d'une carte à 50x24mm<sup>2</sup> et sa masse à 6 grammes (Fig.IV-7)).

La position de certains composants sur la carte a été imposée au routeur. Notamment, un connecteur mâle (T1) à 12 broches assure à la fois les connexions électriques et le maintien mécanique sur la carte-mère. Sur la partie supérieure, un connecteur femelle à 5 broches (T2) permet la connexion électrique et mécanique de la photodiode et des fils de sortie correspondant aux 3 sorties d'un même D.E.M..

#### IV.2.2.b. Carte-mère

Le rôle de cette carte est de maintenir mécaniquement 112 cartes élémentaires et d'établir leurs interconnexions. C'est une couronne dont l'axe vertical est coaxial à celui de la couronne optique de l'oeil composé (cf. §IV.1.3.). Une fibre optique amène à chaque carte le signal lumineux de la facette correspondante.

Pour des raisons d'encombrement, nous avons choisi de positionner en quinconce sur les rayons de 2 couronnes concentriques, des connecteurs femelles associés aux connecteurs T1 (Fig.IV-7). Ces connecteurs T1 permettent d'alimenter les cartes élémentaires, d'aiguiller les 2 tensions de références communes à tous les circuits à hystérésis, enfin d'établir les connexions latérales entre les cartes. Un connecteur d'entrée sert à alimenter et à conduire les tensions de références sur la carte-mère depuis une carte dite "carte d'asservissement" (décrite au §III.2.2.), qui porte également les régulateurs de tensions.

La couronne de la carte-mère a été réalisée sur circuit imprimé multi-couches (six couches). Ses dimensions ont pu être ramenées à un diamètre externe de 22cm et interne de 13cm.

Le réseau électronique modulaire complet de l'oeil D.E.M., pouvant connecter 128 modules élémentaires, est contenu dans un volume de diamètre externe 22cm, interne 13cm et de hauteur 5cm (Fig.IV-8).

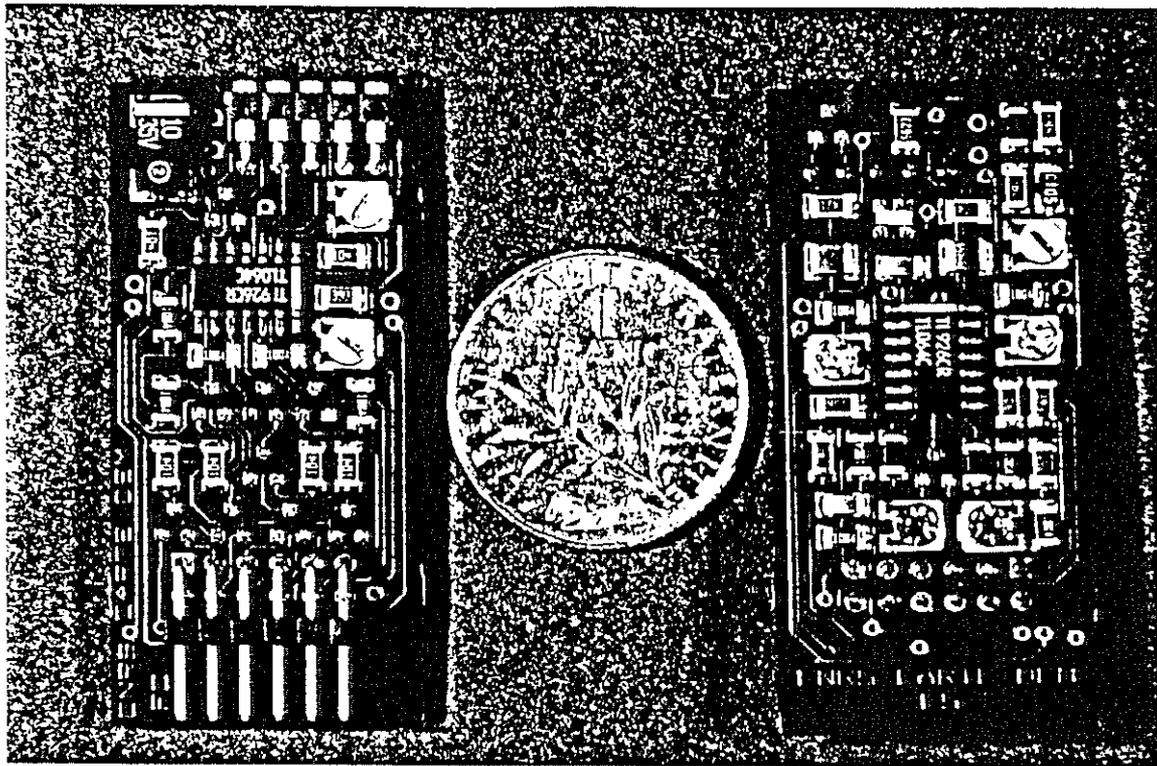


Fig.IV-7 : Deux faces de la carte du module élémentaire (élément de base du réseau de l'oeil D.E.M.)

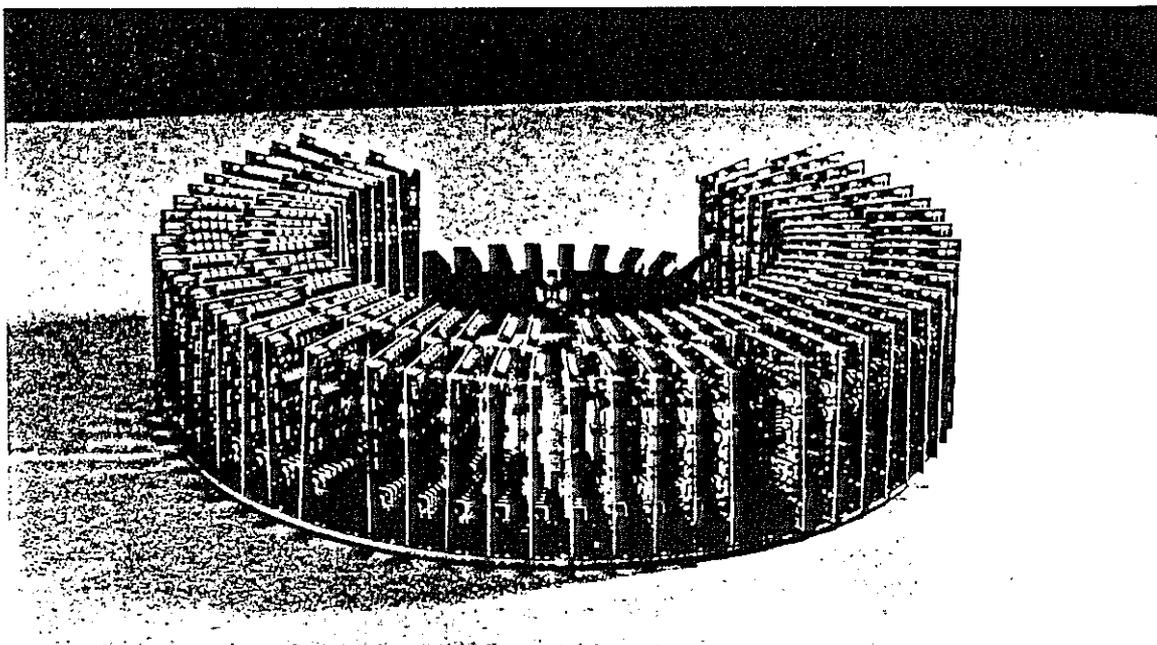


Fig.IV-8 : Réseau électronique de l'oeil D.E.M. assurant la détection des obstacles sur 360°. Positionnement en quinconce des cartes de module élémentaire sur la carte mère.

### IV.2.3. Réalisation optique

#### IV.2.3.a. Champ visuel latéral : optique composée

Nous nous sommes fixés, comme diamètre maximal, de la couronne supportant les 96 facettes des D.E.M.s (cf. Fig.IV-2), celui de la plate-forme mobile. Cette architecture optique est composée de mini-lentilles, dans le plan focal desquelles se trouve un diaphragme intercallé devant l'embouchure d'une fibre optique.

Les lentilles choisies sont du type plan convexe, de diamètre utile  $\Phi_{\text{lent}}=5\text{mm}$  (5,45mm hors tout), d'épaisseur 3mm, et de distance focale  $f=8,5\text{mm}$ . Le diaphragme est un porte-objet de microscopie électronique. Il est en cuivre, de forme circulaire (diamètre 3mm), d'épaisseur 0,05mm et possède une ouverture rectangulaire, centrée et aux bords francs, de largeur  $L_{\text{dia}}=0,2\text{mm}$  et de hauteur  $H_{\text{dia}}=1\text{mm}$ . Son positionnement précis devant une fibre optique plastique de diamètre  $\Phi_{f-o}=1\text{mm}$  (gainée à 2,2mm), est assuré par un épaulement pratiqué dans un tonnelet en P.V.C. (Fig.IV-9). Chaque tonnelet, de forme cylindrique (diamètre 3,4mm, longueur 8mm) est percé axialement de part en part ( $\phi=1\text{mm}$ ) pour recevoir la fibre optique, maintenue en place à la colle cyano-acrylate. Une mèche américaine spécialement taillée, montée sur un tour d'horloger a permis de fraiser l'épaulement destiné à recevoir le microdiaphragme en assurant une concentricité à 1/100 mm par rapport au diamètre extérieur. Une erreur de 0,1mm de positionnement latéral du diaphragme, dans le plan focal de la lentille, se traduirait par un décalage de l'axe de visée de  $0,67^\circ$ , décalage inacceptable vis-à-vis de l'angle interommatidial  $\Delta\phi$ , surtout dans la partie antérieure de l'oeil ( $\Delta\phi=1^\circ$ ). Les retombées d'une telle erreur seraient catastrophiques pour les mesures d'un D.E.M. (qui ne seraient plus calibrées) et pour l'échantillonnage visuel autour du robot, qui présenterait des zones non détectées.

Une seconde mèche américaine a permis de fraiser d'un seul tenant le logement de la facette et du tonnelet support de la fibre optique, en assurant leur parfaite concentricité. Cette mèche permet de réaliser un épaulement de 3mm de profondeur ajusté au diamètre hors tout de la lentille (5,5 mm), suivi d'un alésage de 5mm sur une profondeur de 10mm, suivi encore d'un alésage de profondeur 4mm destiné à recevoir le tonnelet (Fig.IV-10). L'épaisseur totale de la couronne en PVC dans laquelle sont fraisées toutes les ommatidies est donc de 17mm.

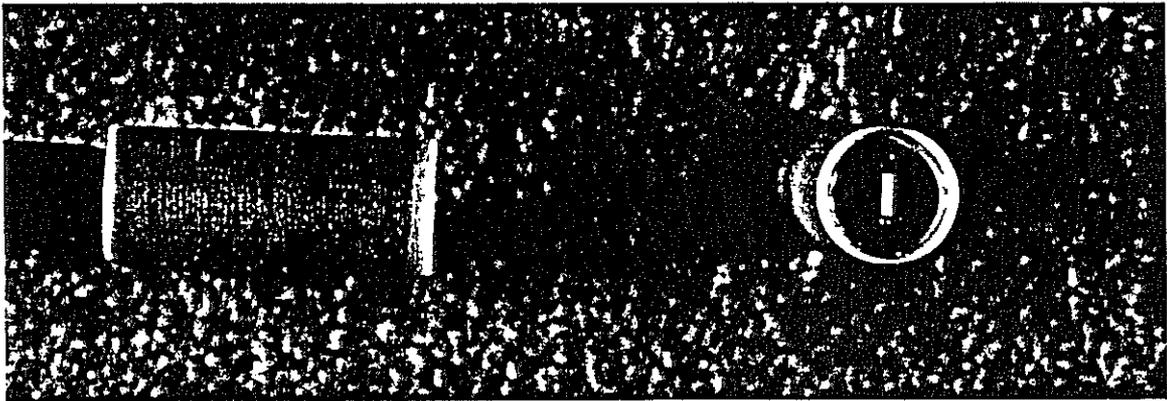
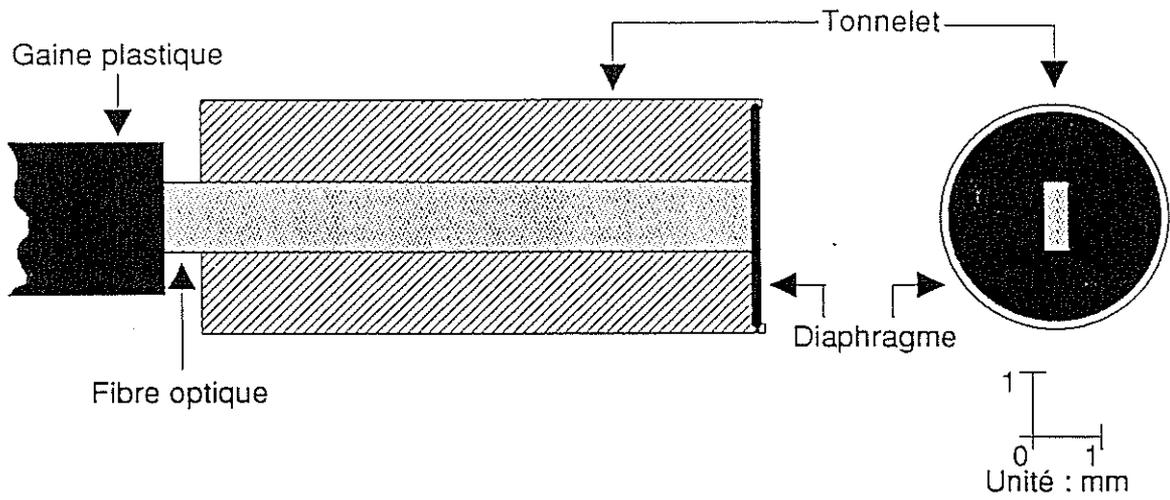


Fig.IV-9 : Schéma et photo du positionnement de la fibre optique et du diaphragme dans le tonnelet.

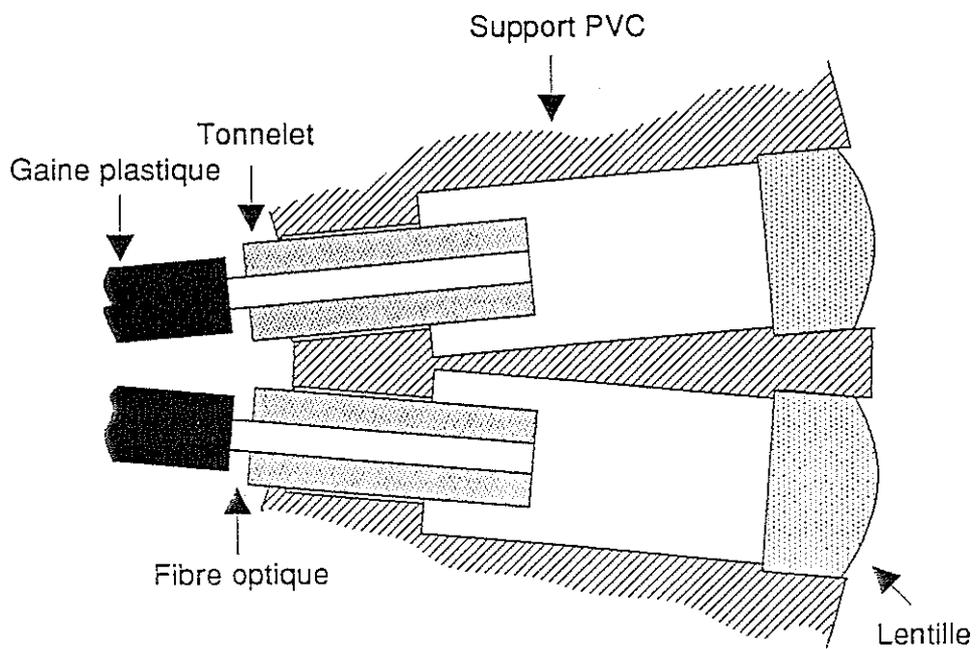


Fig.IV-10 : Schéma de positionnement : lentille+tonnelet dans PVC.

Le faible rayon (14cm) de la couronne d'une part, la dimension des modules lentille+tonnelet d'autre part, ne permettent pas de positionner ces derniers dans un même plan dans la zone la plus frontale, où ils doivent faire entre eux un angle interommatidial très faible (environ  $1^\circ$ ). Il a donc fallu les disposer en quinconce sur deux rangées superposées et espacées de 6mm pour les régions proches de l'axe frontal du système optique (Fig.IV-11).

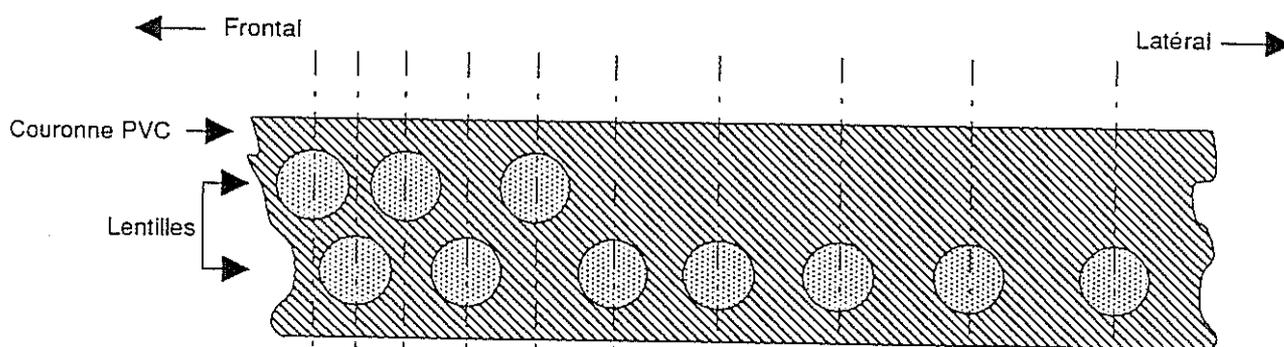


Fig.IV-11 : Schéma de la partie frontale de la développante de la couronne d'ommatidies montrant le gradient des angles interommatidiaux et la nécessité d'un dédoublement du plan azimuthal pour assurer la finesse de l'échantillonnage à l'avant de l'oeil.

L'environnement du robot, constitué de fronts de contraste verticaux et de hauteur couvrant largement le champ visuel de chaque ommatidie, autorise ce décalage vertical de quelques millimètres. Nous nous sommes limités à deux rangées. La première direction optique respectant à la fois la distribution en gradient adoptée et la contrainte d'une disposition en deux rangées est située à  $\phi=13^\circ$ . Une hauteur de 15mm devient donc nécessaire pour la couronne. La couronne support des ommatidies a été tournée dans un rondin en P.V.C. de diamètre 30cm. La précision requise entre les axes de visées ( $\pm 0,1^\circ$ ) exigeait pour la fabrication de cette couronne l'utilisation d'une platine support rotative graduée, montée sur une fraiseuse. C'est ainsi que 96 logements d'ommatidie ont été percés dans l'épaisseur de la couronne. Chacun d'eux a reçu sa mini-lentille et son tonnelet, équipé de son diaphragme et de sa fibre optique. L'ajustement optique final a été réalisé en projetant sur un écran externe l'image du diaphragme, grâce à un éclairage antidromique de la fibre optique, selon une méthode mise au point pour la mouche (Franceschini, 1975). La couronne (rayon externe 14cm, épaisseur 17mm, hauteur 15mm) a été alésée au maximum afin d'en diminuer la masse, préjudiciable à l'inertie, donc à l'accélération de rotation de l'oeil. Six vis de fixation assurent son positionnement sur un plateau (Fig.IV-13-A) solidaire des roues directrices du robot. Un tel dispositif optique, positionné à 15cm du sol (hauteur de la plate-forme), permet une détection des contrastes jusqu'à 250cm, sans que le champ vertical des ommatidies coupe le sol.

IV.2.3.b. Champ visuel frontal : proximètre

Le système optique des D.E.M.s du proximètre est constitué d'une seule lentille par hémichamp (gain de place et de poids). Dix directions de visée sont nécessaires derrière chacune des deux lentilles. Afin de conserver un angle d'acceptance  $\Delta\rho$  d'une valeur voisine de celles associées aux D.E.M.s latéraux, l'échantillonnage visuel associé à chaque direction de visée est réalisé par une fibre optique de diamètre  $\Phi_{f.o.}=1\text{mm}$ , focalisée directement, sans aucun diaphragme, derrière une lentille de diamètre  $\Phi_{\text{lent}}=23\text{mm}$  et de distance focale  $f=50\text{mm}$ . La condition énergétique (III.7.) établie pour un fonctionnement correct de la photodétection, est vérifiée :

$$(\Phi_{\text{lent}}/f) \cdot [S_{\text{dia}}/(\pi \cdot (\Phi_{\text{pin}}/2)^2)] = 0,48 > 0,08$$

Pour maintenir les fibres optiques dans le plan focal de la lentille, une rangée de trous, alésés au diamètre de la fibre optique  $\Phi_{f.o.}=1\text{mm}$ , a été percée sur un support circulaire en alliage léger de diamètre 23mm et d'épaisseur 3mm (Fig.IV-12). Leur espacement tient compte des directions optiques en gradient (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.IV) et de la distance focale de la lentille. Une douille permet de maintenir et de positionner la lentille et le support des fibres (Fig.IV-13-B). Un dispositif a été réalisé pour ajuster finement l'orientation angulaire de la douille sur le plateau du robot.

La Fig.IV-13-C illustre l'ensemble optique de l'oeil D.E.M., formé de l'oeil à facettes et des deux proximètres frontaux.

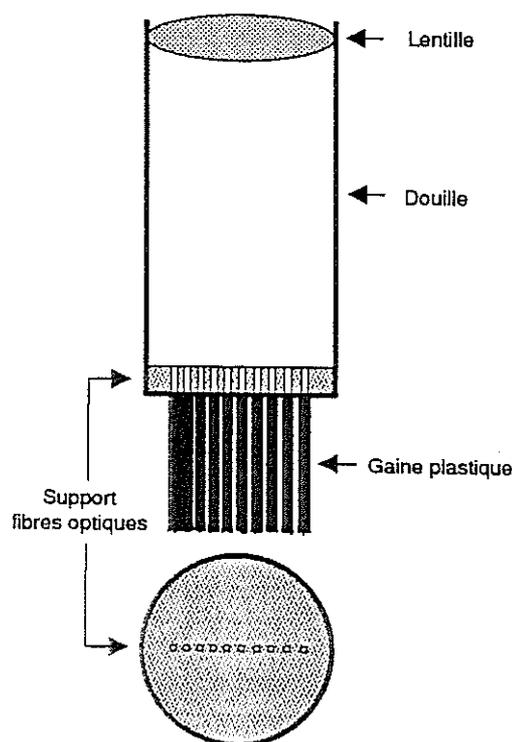


Fig.IV-12 : Schéma de l'optique du proximètre avec son gradient (photo) dans le plan focal.

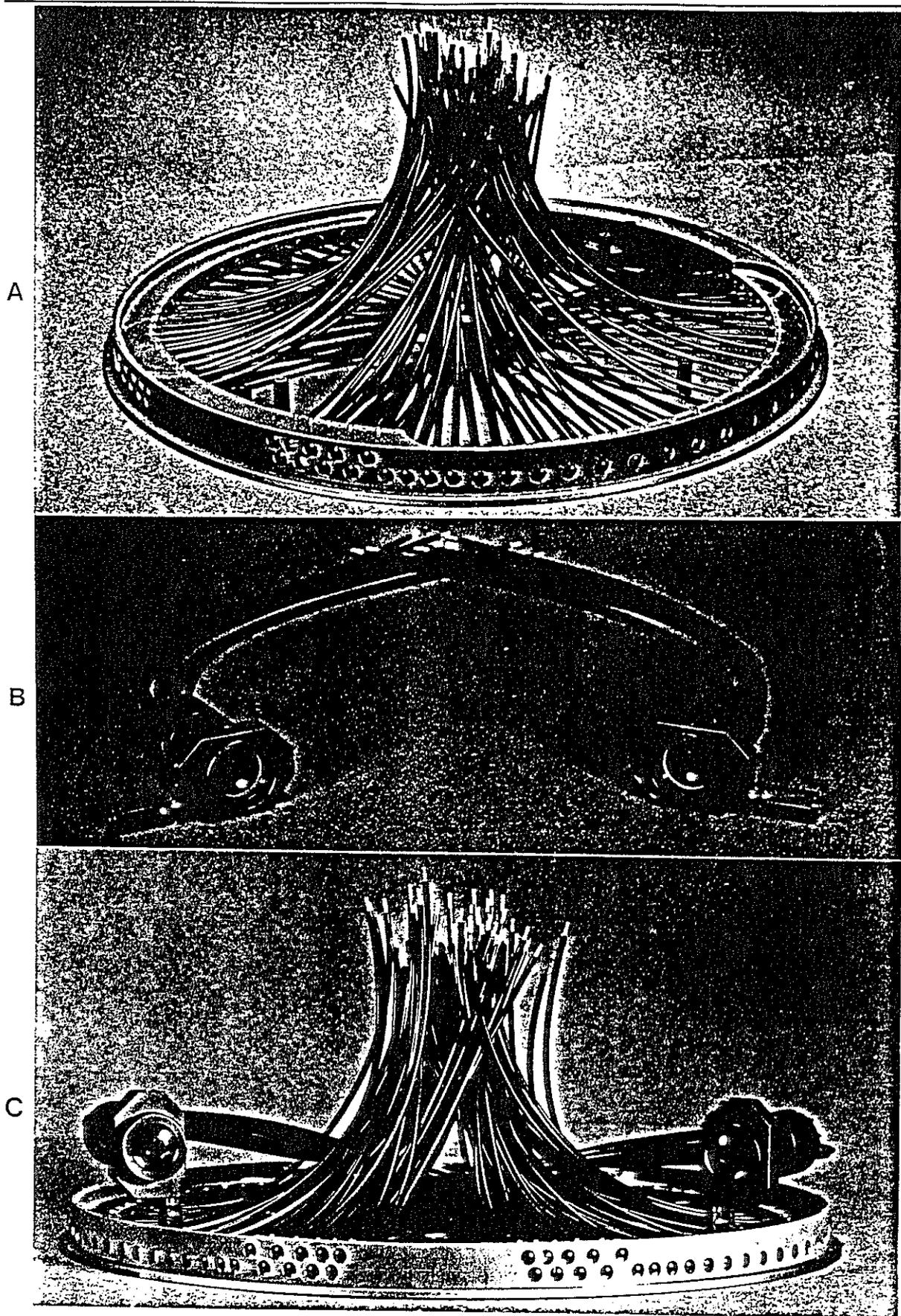


Fig.IV-13 : Système optique de l'oeil D.E.M. assurant un échantillonnage sur  $360^\circ$  d'un plan azimutal.

A) Optique composée de 96 mini-lentilles relatives au gradient latéral et reproduisant une coupe horizontale de l'oeil de la mouche. Derrière chaque mini-lentille, sont positionnés un tonnelet (Fig.IV-9) et une fibre optique. B) Optique du proximètre. Derrière chacune des deux lentilles sont disposées les fibres optiques selon un gradient qui assure l'échantillonnage frontal (Fig.IV-12). C) Système optique complet de l'oeil D.E.M. installé sur la plaque supérieure du robot, solidaire des trois roues directrices.

#### IV.2.4. Récapitulatif et performances

Le système visuel que nous venons de décrire, repose entièrement sur la détection du *mouvement relatif* des objets perçus par le robot, lorsqu'il est animé d'une vitesse constante. Il est réalisé de manière symétrique de part et d'autre d'un axe frontal, toujours orienté suivant la direction de déplacement car verrouillé aux roues directrices. Chaque hémichamp comprend deux organisations indépendantes suivant deux gradients de directions d'échantillonnage associés respectivement à une zone latérale s'étendant de  $13^\circ$  à  $167^\circ$  et à une zone frontale s'étendant de  $0^\circ$  à  $13^\circ$ . Le système optique latéral est une couronne de diamètre voisin de celui de la plate-forme. Il maintient les 96 supports optiques des ommatidies, réalisant par là-même un système multi-lentilles analogue à l'oeil composé de la mouche dans son plan azimutal. Le système frontal, par contre, comporte une seule lentille pour les 10 directions de visée d'un hémichamp. Derrière cette couronne d'ommatidies, des D.E.M.s délivrent des signaux caractérisant la vitesse angulaire des objets. Ils ont été réalisés à partir de modules opto-électroniques élémentaires, associés chacun à une direction de visée et implémentés sur un réseau de mini-cartes électroniques. Ces cartes sont enfichées verticalement sur une carte-mère en forme de couronne, qui assure leurs interconnexions latérales, essentielles pour le fonctionnement des D.E.M.s. La Fig.IV-14 montre l'ensemble de l'oeil D.E.M.. Dans la zone latérale, les limites de détection sont fixées par celles des D.E.M.s (cf. §III.2.5.). Dans la zone frontale, le système d'échantillonnage repose aussi sur des D.E.M.s, mais il se comporte comme un proximètre assurant une détection uniquement dans un rayon inférieur au rayon de sécurité, fixé à 50cm.

### IV.3. Le détecteur de cible du robot

#### IV.3.1. Cahier des charges

Le robot doit être capable d'atteindre un but qui sera matérialisé par une lampe placée au dessus des obstacles, et de la suivre s'il se déplace (comme la mouche mâle poursuivant la femelle, cf. Wehrhahn, 1982). Une seule cible à la fois est allumée dans l'environnement. Si elle s'éteint et qu'une autre s'allume ailleurs, le robot prend en chasse la dernière allumée.

Afin de réaliser cette tâche, le robot est équipé d'un système visuel auxiliaire appelé "Détecteur de cible". Ce dispositif opto-électronique permet à tout instant de détecter la lampe et d'en définir la direction azimutale par rapport à la direction de déplacement. Il est mécaniquement solidaire des trois roues directrices de la plate-forme, donc verrouillé au repère de la trajectoire. Il assure un échantillonnage spatial homogène sur  $360^\circ$ , selon 96 directions de visée azimutales originaires d'un même point. Il est isotrope, le pas de l'échantillonnage étant égal à :  $360/96=3.75$  (Fig.IV-15).

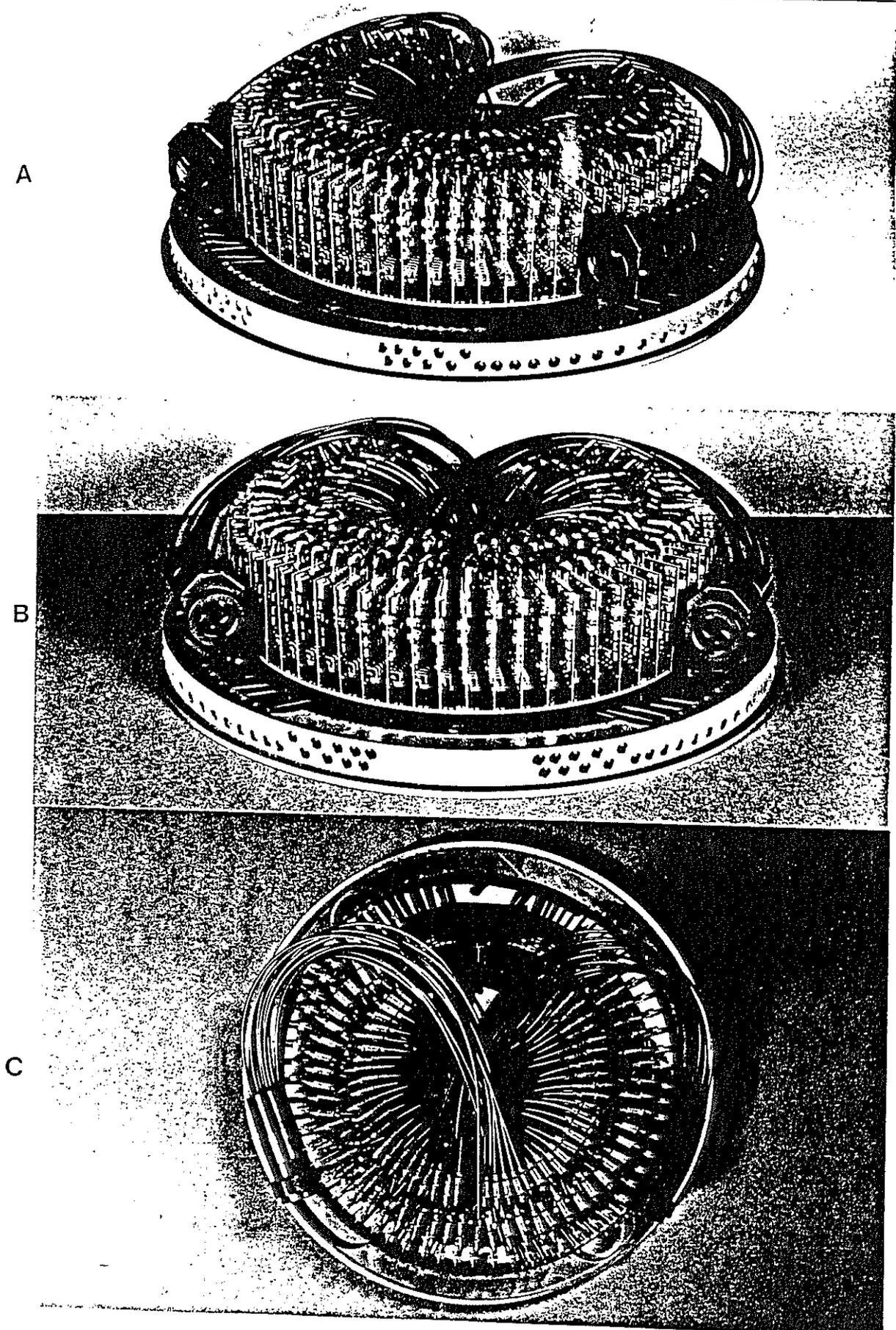
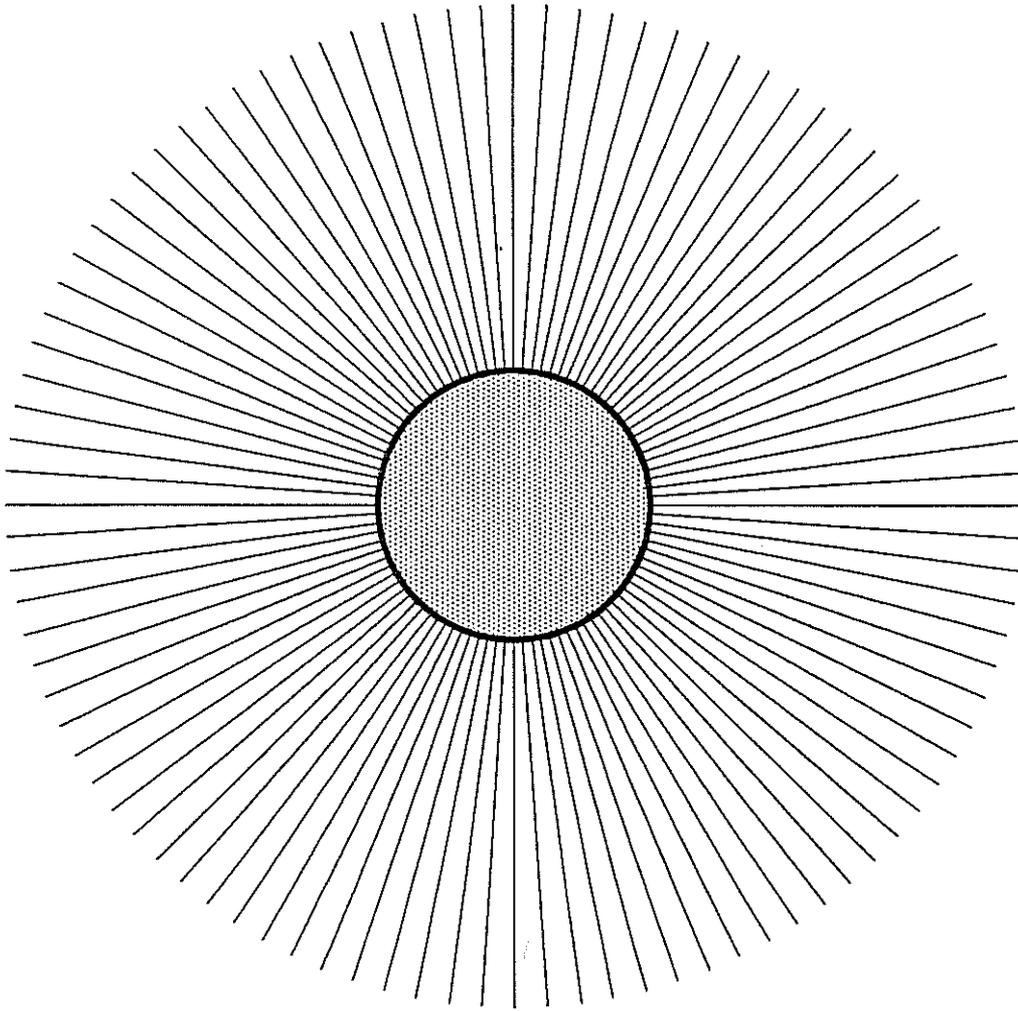


Fig.IV-14 : L'œil D.E.M. : Système visuel complet du prototype de robot mobile assurant la détection des obstacles sur les 360° du plan azimutal. A) Vue de côté; B) Vue de face; C) Vue de dessus.



**Fig.IV-15** : Les 96 directions de visée du détecteur de cible.

#### IV.3.2. Réalisation optique

La Fig.IV.16 schématise le support duodécagonal en alliage léger qui assure un positionnement précis, sur un cercle de douze objectifs miniatures de focale  $f=24\text{mm}$  permettant de couvrir un champ visuel de  $360^\circ$  autour d'un axe central vertical. Des cloisons en feutre noir isolent optiquement les 12 plans focaux les uns des autres. Elles évitent les "diaphonies" provoquées par la lumière pénétrant par les objectifs voisins. Un autre support duodécagonal, concentrique au précédent, reçoit sur chacune de ses faces une barrette de 8 photodiodes PIN venant occuper le plan focal de l'objectif correspondant (Fig.IV-21-A).

Ces pièces ont été tournées ou fraisées avec une précision de l'ordre du  $1/100$  de mm et de la minute d'angle. L'ensemble a été rendu compact et léger afin d'en diminuer l'inertie sachant qu'il est destiné à être placé à 30cm au dessus du robot et à tourner avec les roues directrices.

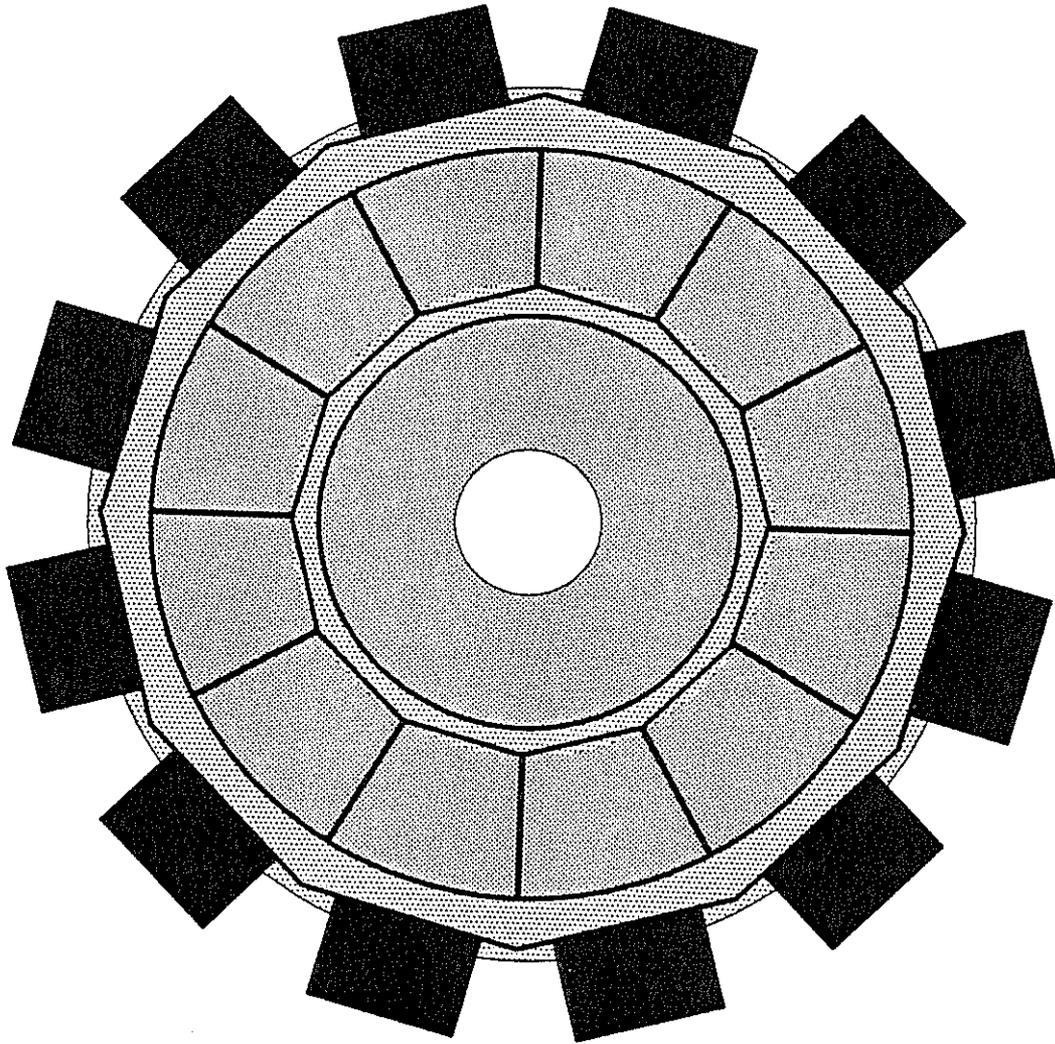
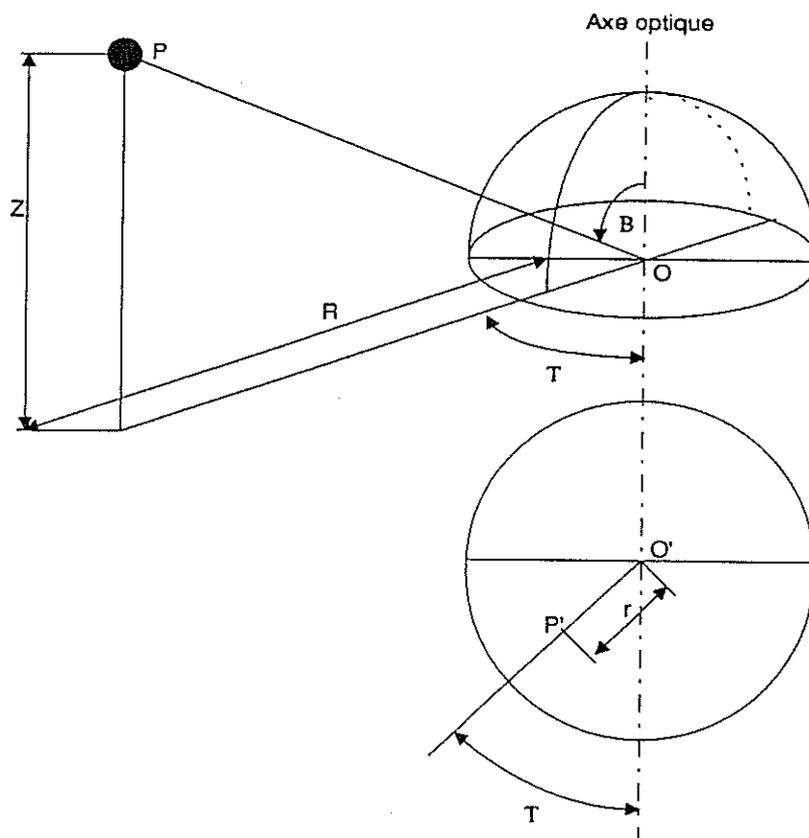


Fig.IV-16 : Croquis du support duodécagonal des 12 objectifs du détecteur de cible.

Remarques :

1) Ce dispositif de traitement parallèle a été retenu car il n'impose pas d'emblée de contrainte sur la vitesse du véhicule.

2) L'utilisation d'un seul objectif de type "fish-eye", dont certains ont la particularité de couvrir un champ de  $180^\circ$ , a été envisagée comme alternative. En orientant verticalement son axe optique, il est en effet possible de couvrir un panorama azimutal de  $360^\circ$ . Il suffit ensuite de disposer circulairement dans son plan focal une couronne de photodiodes afin d'échantillonner l'espace (Fig.IV-17). Cette solution a été écartée car elle nécessitait de faire réaliser une couronne de photodétecteurs suivant les spécifications requises et d'un coût très élevé.



**Fig.IV-17** : Projections géométriques et paramètres d'un objectif de type "fish-eye"  
(d'après Zuoliang L. Cao et al., 1986).

#### IV.3.3. Réalisation électronique

Le dispositif électronique du détecteur de cible aboutit à 96 fils de sortie associés individuellement à chacune des photodiodes. Lorsque la lampe symbolisant le but est détectée par l'une d'entre elles, la sortie correspondante bascule. Seule la *dernière* sortie activée est à l'état haut, car un processus de remise à l'état bas de l'ensemble du réseau intervient juste avant toute nouvelle transition d'une sortie. Par ailleurs, il est nullement nécessaire qu'il existe une continuité spatiale de détection angulaire entre deux détections successives. Quelle que soit la position de l'entrée activée, la sortie associée bascule. D'autre part, si la lampe vient à s'éteindre, la dernière sortie activée le reste jusqu'à ce qu'une nouvelle lampe s'allume.

D'un point de vue réalisation, le circuit est décomposé en douze modules identiques : un par système optique. Chacun d'eux est lui-même subdivisé en huit voies identiques : une par photodiode.

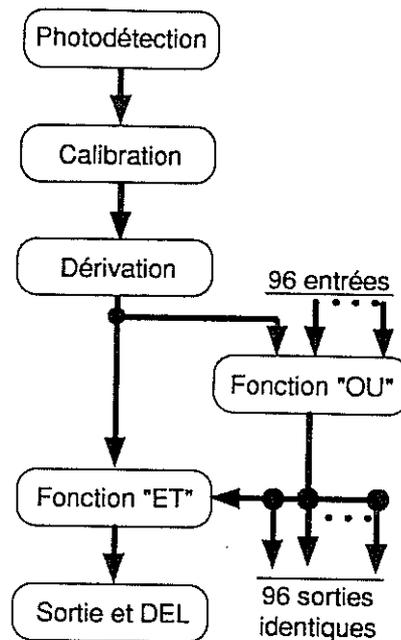


Fig.IV-18 : Synoptique d'une voie du détecteur de cible.

La Fig.IV-18 illustre le traitement du signal dont la Fig.IV-19 explicite l'une des 96 voies :

- photodétection : une photodiode (PIN I) est utilisée en mode photoconductif (R1); lorsque la lampe est détectée, le signal est positif; sinon, il est négatif;
- calibration : lors du passage par zéro du signal précédent, la sortie d'un comparateur (COMP) bascule;
- dérivation : un filtre passe-haut (C1-R2) permet de ne récupérer que les transitions du signal précédent;
- fonction "OU" : lorsqu'une impulsion positive arrive sur l'un des 96 étages précédents, elle apparaît en sortie d'un circuit "OU" à diodes (D1-R4; R4 n'apparaît pas sur la figure car elle est commune à toutes les voies, cf. Fig.IV-20);
- fonction "ET" : l'entrée D d'une bascule (BASC : type D, avec remise à zéro et réarmable sur front montant) est reliée à la sortie du filtre passe-haut tandis que l'entrée d'horloge CK est reliée au signal issu du circuit "OU"; lorsqu'une impulsion arrive en CK, si elle vient de cette voie, la sortie Q passe à l'état haut, sinon elle reste à l'état bas; Q représente l'une des 96 sorties;
- visualisation : la sortie Q précédente, lorsqu'elle est à l'état haut, active une diode électroluminescente de visualisation; une seule diode étant allumée à la fois, un circuit "OU" (96 LED-POT 2) sert de polarisation.

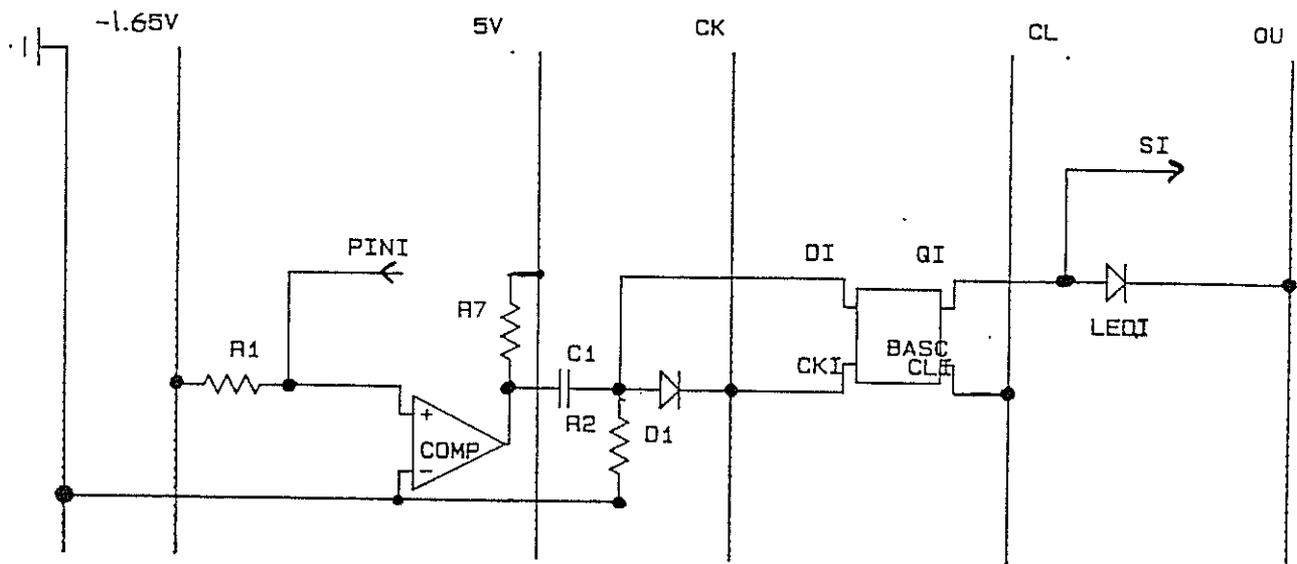


Fig.IV-19 : Circuit électronique d'une voie du détecteur de cible.

Comme cela est détaillé au chapitre suivant, le robot doit pouvoir fonctionner en mode errance, c'est-à-dire lorsqu'aucune consigne de but ne lui est fournie. Dans ce mode de fonctionnement, le détecteur de cible délivre au système anticollision une cible fictive localisée en permanence à l'avant du robot. Cette astuce permet de minimiser sans aucune opération additionnelle l'angle de braquage du robot en mode errance, car cette cible fictive l'oblige à aller droit devant lui. Pour ce faire, le système doit être insensible à la détection d'une lampe pour ne conserver qu'une sortie, toujours la même, à l'état haut. Un interrupteur manuel, agissant sur la remise à zéro des bascules, impose un état bas sur toutes les sorties sauf sur celle de la voie numéro 1, qui se voit imposer un état haut.

Le circuit électronique à 96 sorties (Fig.IV-20) peut être qualifié de parallèle. Il exprime instantanément (dans la limite de réponse des composants) la direction du but par la *position angulaire* de l'unique sortie passant à l'état haut.

Conformément au cahier des charges (cf. §II.3.2.), le circuit est réalisé en C.M.S.. Toujours poussés par un souci de minimisation du nombre de composants, le regroupement par huit voies nous a incités à utiliser des boîtiers de huit bascules de type classique. La carte finale, qui vient se loger sur le support optique (Fig.IV-21-B), est circulaire (diamètre 12cm, épaisseur 1,6mm, implantation de composants double face (Fig.IV-22)) et comporte en périphérie la couronne de 96 LEDs disposées individuellement selon la direction de visée de la cible détectée. Les 96 fils de sortie convergent à raison de 12 câbles à 8 fils vers une colonne centrale supportant l'ensemble du détecteur de cible.

La Fig.IV-21-C montre une vue de côté du détecteur de cible.

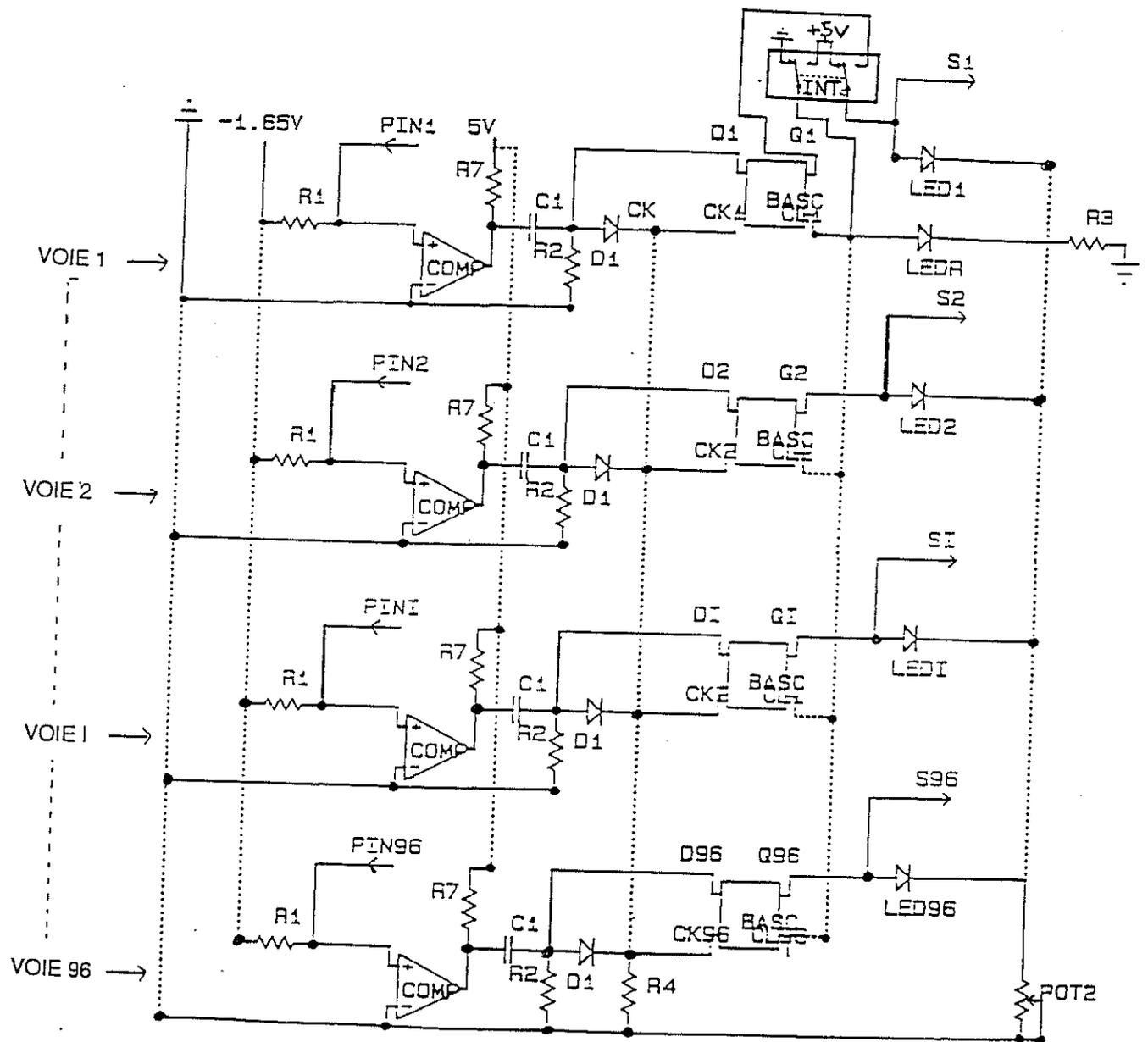


Fig.IV-20 : Circuit électronique des 96 voies identiques du détecteur de cible.

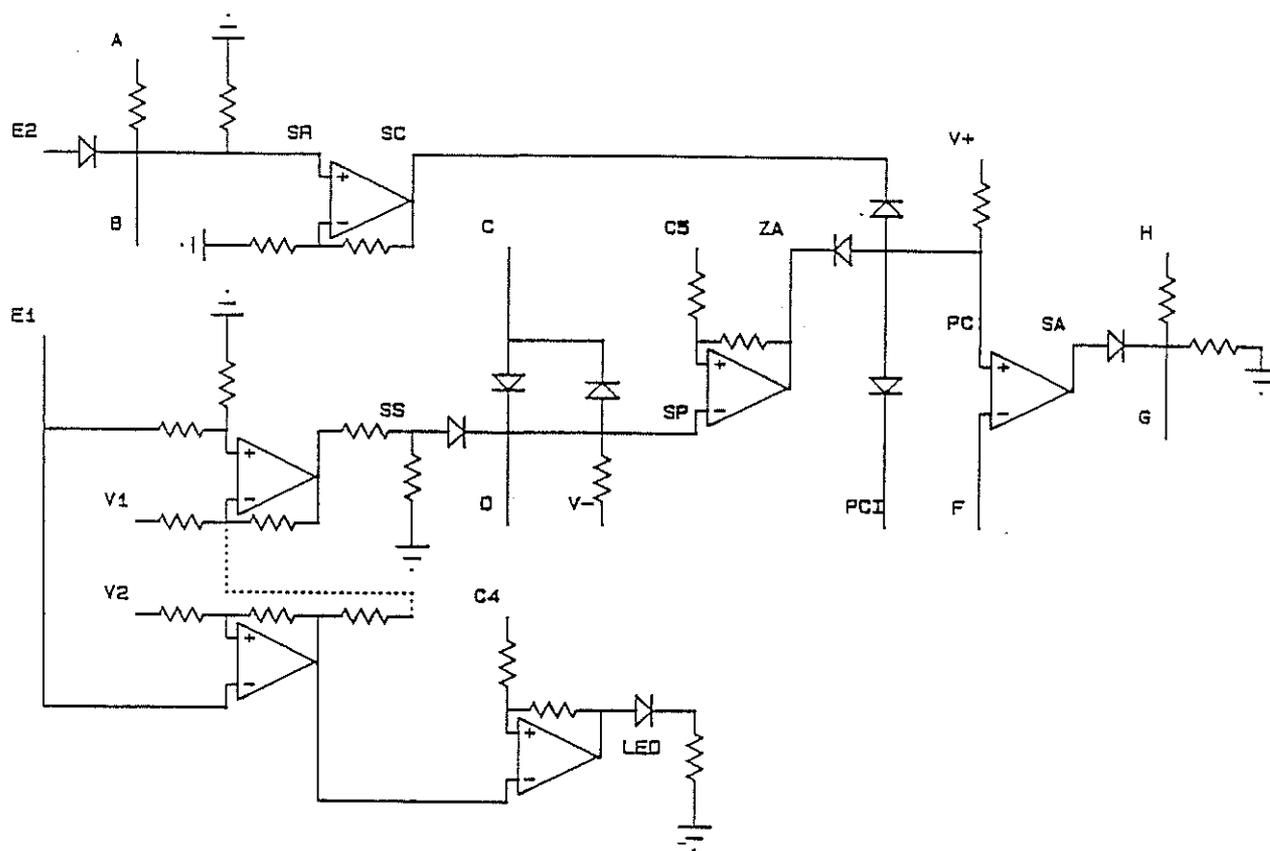
A

B

C

Fig.IV-21 : Détecteur de cible.

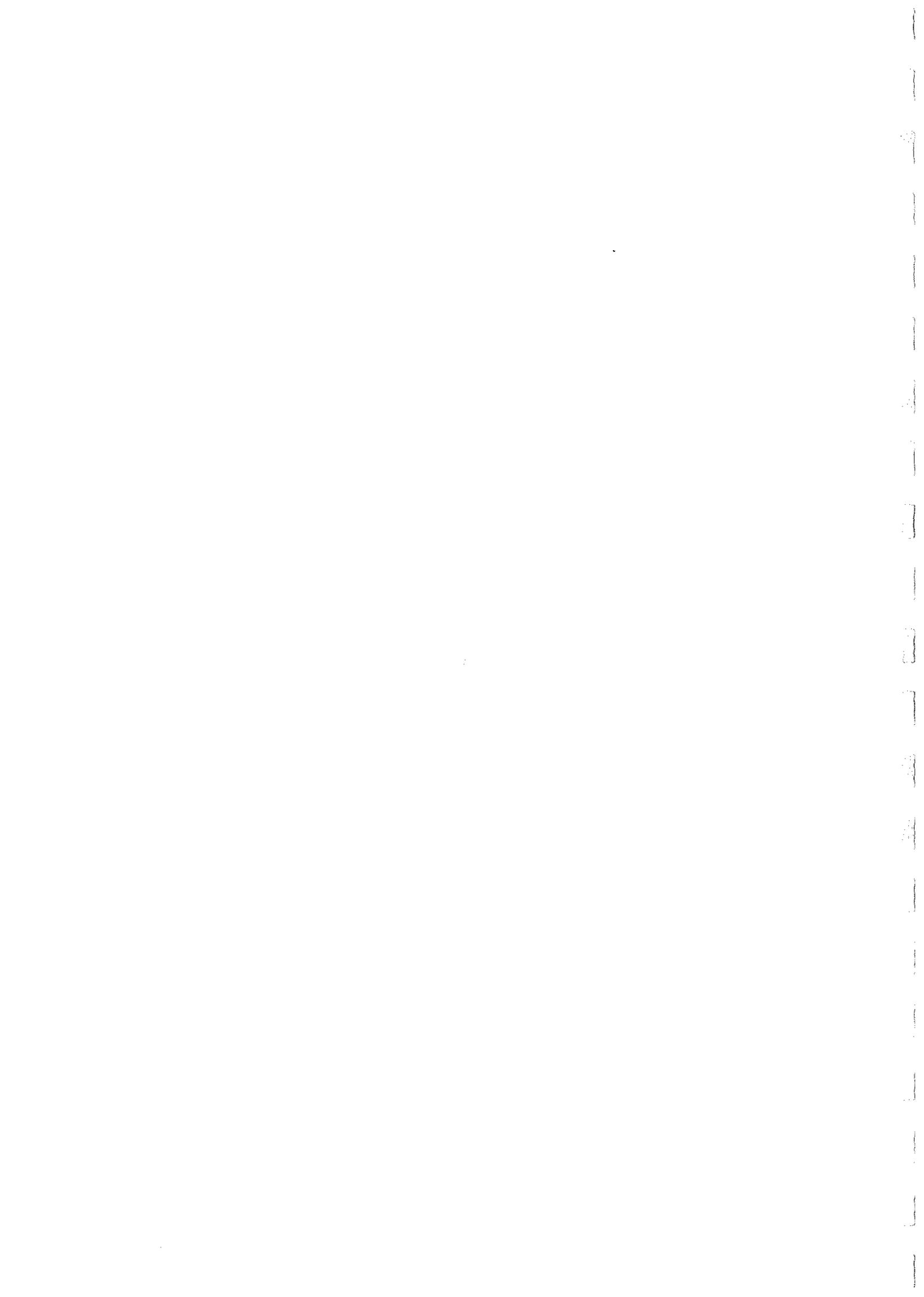
- A) Vue de l'optique (12 objectifs) et des barrettes de 8 photodiodes.
- B) Vue de dessus : carte électronique et douze objectifs.
- C) Vue de côté.



**Fig.V-17** : Circuit électronique d'une colonne (I) de l'algorithme de navigation. E1 est connectée à la sortie du D.E.M. échantillonnant la même direction  $\alpha$  que celle provenant du détecteur de cible qui est connectée à l'autre entrée E2. V+, V-, V1, V2, V3, C4, C5 sont des tensions de référence. A, C et H sont connectés respectivement à B, D et G de la voie (I-1). B, D et G sont connectés respectivement à A, C et H de la voie I+1. Tous les points E sont reliés. Le point F est unique.

## *CHAPITRE V*

### *IMPLEMENTATION DU SYSTEME DE NAVIGATION DU ROBOT SELON UNE ARCHITECTURE PARALLELE DE RESEAUX ANALOGIQUES*



## V.1. Stratégie de navigation du robot

## V.2. Principe de calcul parallèle de l'algorithme anticollision.

V.2.1. Zone autorisée et zone interdite

V.2.2. Choix de la direction de braquage

## V.3. Implémentation parallèle en réseaux analogiques de l'algorithme anticollision

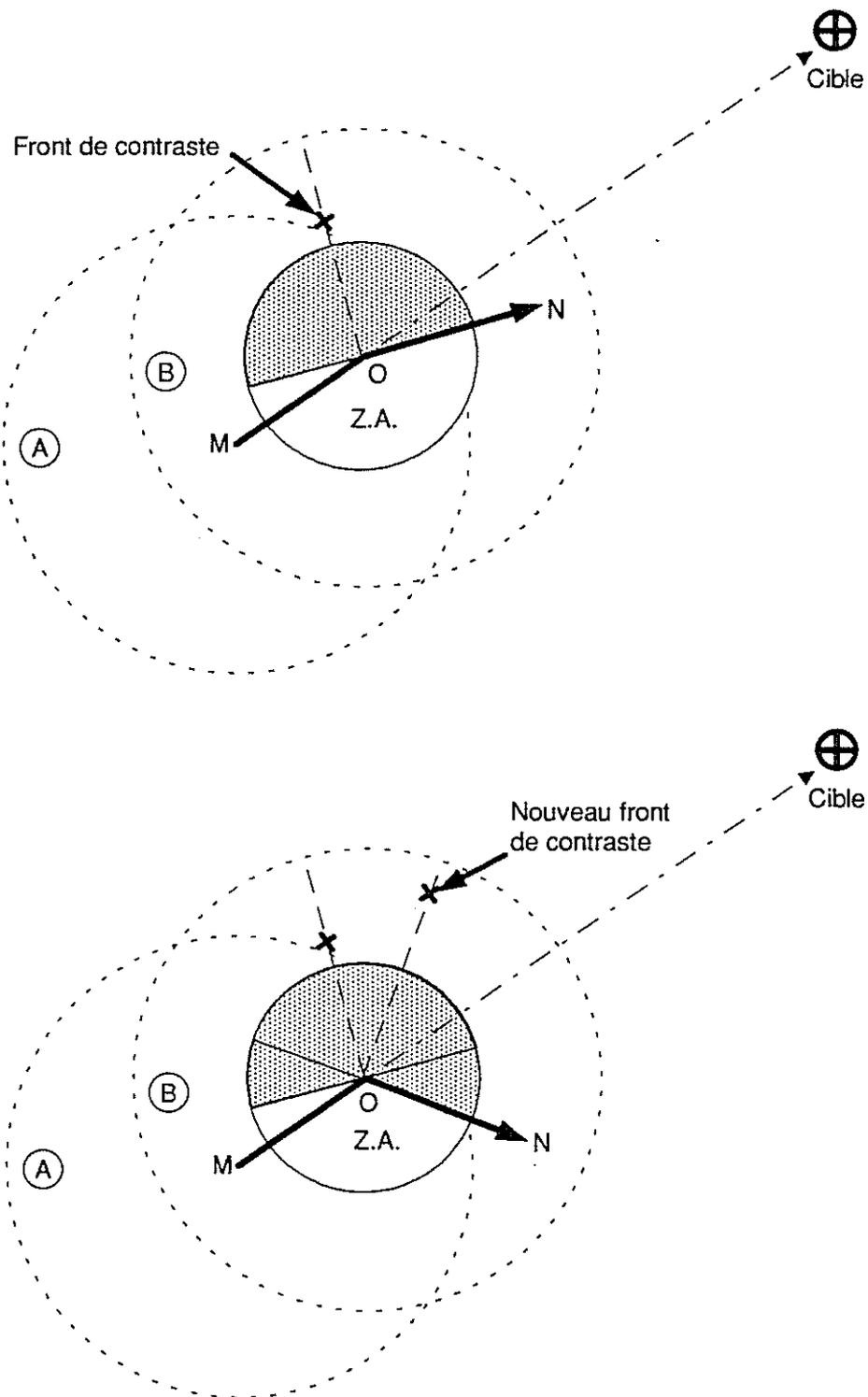
V.3.1. Position du problème

V.3.2. Principe général de l'implémentation parallèle du système anticollision

V.3.3. Architecture en réseaux implémentant l'algorithme anticollision

V.3.4. Electronique de la carte destinée au système anticollision

- a. Périmètre de sécurité et visualisation : seuillage et LED
- b. Propagation depuis la détection : réseau bouclé à diodes
- c. Zone interdite, zone autorisée : seuillage
- d. Propagation depuis la position du but : réseau échelle de résistances
- e. Amplification analogique
- f. Fusion multisensorielle par détection de minimum
- g. Extraction spatiale de la direction à suivre : détecteur de maximum et comparateur
- h. Valeur des angles gauche et droit : réseaux échelles de résistances
- i. Angle en Volts et sens de rotation : détecteur de maximum et comparateur
- j. Carte électronique du système anticollision



**Fig.V-1** : Principes géométriques de la stratégie de navigation du robot mobile.  $MO = ON$  : Translations élémentaires du centre du robot. A et B : Périmètres de sécurité associés aux positions M et O du robot. Les demi-cercles en pointillés correspondent aux zones s'étendant jusqu'à  $\pm 90^\circ$  de part et d'autre de la direction d'un obstacle détecté dans le périmètre de sécurité.

### V.1. Stratégie de navigation du robot

L'enjeu de ce projet consiste à doter un robot mobile d'une capacité d'évitement d'obstacles faisant appel à l'anticipation la plus faible possible, afin de lui laisser un maximum de liberté. Pour cela, un périmètre de sécurité délimité par un cercle de vision de rayon  $R_v=50\text{cm}$ , échantillonné par l'oeil D.E.M. (autour du robot) a été défini et minimisé (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.V) en tenant compte des incertitudes de mesure des D.E.M.s et des performances cinématiques de la plate-forme mobile utilisée comme système de locomotion (cf. §VI.1.).

La stratégie de navigation du robot est la suivante : le robot commence par avancer droit devant lui. Lorsqu'il atteint sa vitesse de croisière  $V_0$ , il entame une *translation élémentaire* durant laquelle son oeil D.E.M. échantillonne l'espace environnant afin de détecter les éventuels obstacles par le mouvement relatif qu'ils produisent sur le réseau de D.E.M.s. Parallèlement, son détecteur de cible lui indique constamment la direction azimutale de la lampe servant de but (cf. §IV.3.). A l'issue de ce déplacement élémentaire, si un contraste a été détecté dans son périmètre de sécurité, alors le robot effectue une manoeuvre de braquage, qui l'écarte de ce contraste, en tournant perpendiculairement à sa direction.

Deux modes de fonctionnement sont prévus ici :

-1) mode *errance* : le robot n'a aucune consigne à respecter en dehors du fait qu'il doit, sans s'arrêter, éviter les collisions avec d'éventuels obstacles rencontrés en chemin. Dans ce cas, tout se passe comme s'il "rebondissait" optiquement sur les contrastes perçus dans son périmètre de sécurité. Ici, seuls les signaux issus de l'oeil D.E.M. interviennent dans les modifications de trajectoire.

-2) mode *poursuite de cible* : une consigne additionnelle est fournie au robot : atteindre une cible, le plus directement possible. Ce dernier obéit dans la mesure du possible à cette consigne en respectant *en priorité* l'évitement d'obstacles (Fig.IV-1). Dans ce cas, les signaux fournis par l'oeil D.E.M. et par le détecteur de cible interfèrent pour assigner au robot la prochaine direction à suivre.

A l'issu d'une translation élémentaire et de l'éventuel braquage, le robot entame une nouvelle translation élémentaire, et ainsi de suite....

## V.2. Principe de calcul parallèle de l'algorithme anticollision.

Des principes de calcul parallèle (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.V) ont été développés afin de mettre en place la stratégie d'évitement d'obstacles décrite précédemment.

### V.2.1. Zone autorisée et zone interdite

La détection de fronts de contraste dans le périmètre de sécurité est prise en compte par le système anticollision de la manière suivante :

- chaque front de contraste génère une "zone interdite élémentaire" qui correspond à l'ensemble des directions interdites susceptibles de provoquer une collision pour la prochaine translation élémentaire; cette zone est représentée par une portion angulaire centrée sur le robot et symétrique de part et d'autre de la direction détectée (Fig.V-2);

- à la fin de la translation élémentaire en cours, les "zones interdites élémentaires" associées à chaque contraste détecté fusionnent sous la forme d'une "zone interdite" (ZI), obtenue en calculant leur union  $U$  (Fig.V-2). Les zones complémentaires ( $\bar{U}$ ) correspondent aux "zones autorisées" (ZA), c'est-à-dire à l'ensemble des directions angulaires pouvant être prises sans danger de collision.

En simulation, la taille des "zones élémentaires" a été optimisée (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.V) pour que le robot tourne de manière à éviter tangentiellement les contrastes. Dans ce cas, la taille de la "zone élémentaire" dépend de la distance  $D$  des contrastes (une fois qu'ils ont été sélectionnés comme étant à l'intérieur du périmètre de sécurité) et peut être inférieure à  $\pm 90^\circ$  (Fig.V-2-B).

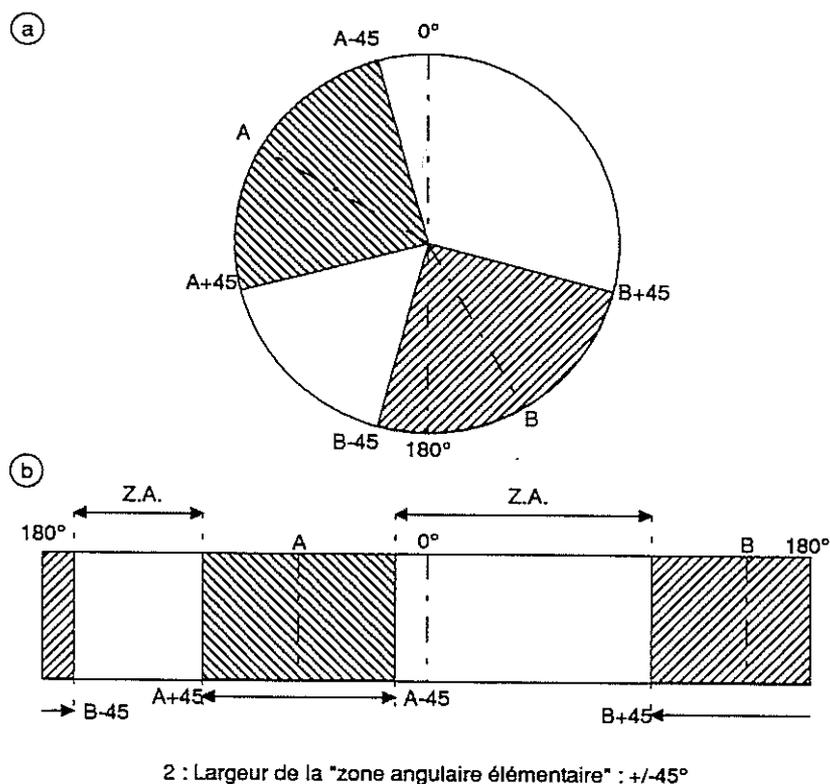
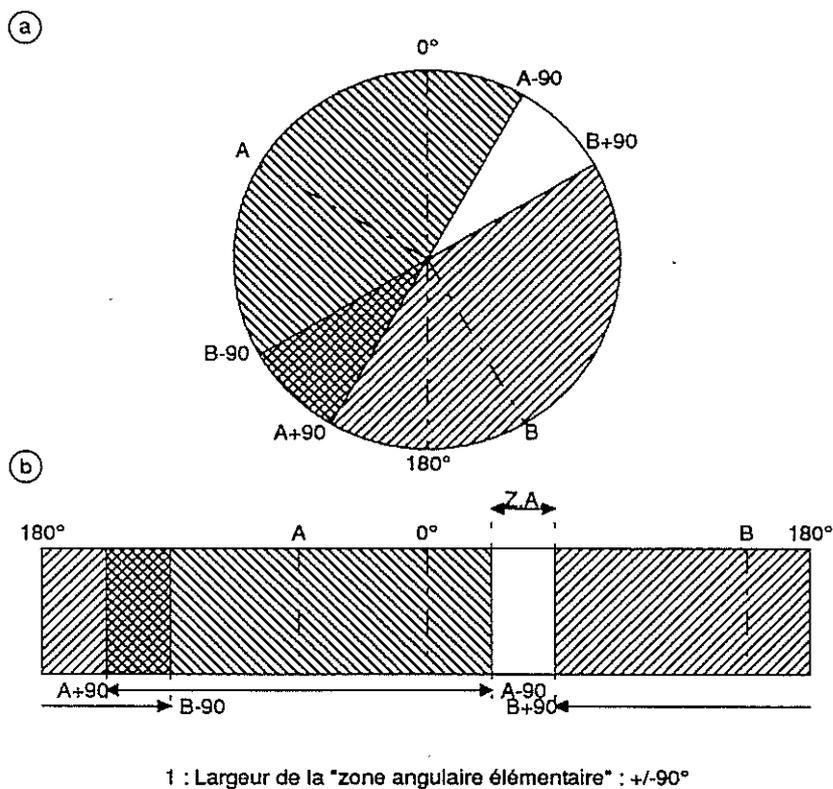
Dans le cadre du prototype, la taille angulaire des "zones élémentaires" a été choisie, dans un premier temps, invariante avec la distance du contraste, et fixée à  $\pm 90^\circ$  (Fig.V-2-A). Ce choix n'est pas néfaste à l'évitement d'obstacles, mais il rend les manoeuvres de braquage plus grossières.

### V.2.2. Choix de la direction de braquage

L'angle de braquage est choisi parmi les "zones autorisées" décrites précédemment :

- si aucune consigne de but n'est fournie, ce choix s'effectue de manière à minimiser l'angle de braquage;

- si une consigne de but est fournie par le détecteur de cible, la nouvelle direction est celle qui est la plus proche de la direction du but.



**Fig.V-2** : Principe de calcul de l'algorithme anticollision. Illustration de la génération des "zone autorisées" par la sommation spatiale des "zones interdites élémentaires" (hachurées) produites par deux contrastes A et B détectés dans le périmètre de sécurité. En 1), l'illustration du principe est faite en admettant que tout contraste détecté génère une "zone" de  $\pm 90^\circ$  et en 2), de  $\pm 45^\circ$ . Dans chaque cas, on montre :

- (a) une représentation angulaire sur un cercle.
- (b) une représentation angulaire sous forme de développante de cercle.

### V.3. Implémentation parallèle en réseaux analogiques de l'algorithme anticollision

Ce paragraphe va traiter de l'implémentation, sous la forme de réseaux analogiques, des principes de calcul parallèle énoncés ci-dessus.

#### V.3.1. Position du problème

Rappelons l'ensemble des contraintes qui gouvernent l'implémentation du système anticollision :

- le système anticollision doit fonctionner en temps réel, c'est-à-dire réagir de manière compatible avec la vitesse du robot ( $V_0=50\text{cm/s}$ ).

- le système anticollision doit prendre en compte simultanément, non seulement la centaine de signaux générés par le réseau de D.E.M.s (cf. §IV.2.), mais aussi la centaine de signaux générés par le réseau du détecteur de cible (cf. §IV.3.).

- ce système doit ensuite associer ("fusionner") tous ces signaux grâce à d'autres réseaux. Des interactions peuvent avoir lieu aussi bien au niveau de chaque oeil que par mélanges entre les sorties des deux systèmes visuels.

- ce système doit, à partir d'interactions entre ses multiples entrées, générer en fin de chaîne un signal unique représentant l'angle de braquage en Volts. Il servira de signal d'entrée au circuit de commande des moteurs assurant la procédure de changement de direction (cf. §VI.2.).

Comme nous allons le voir dans la suite de ce paragraphe, l'architecture parallèle analogique applique les principes généraux de propagation introduits au §II.4.. Elle fait appel à des interactions selon plusieurs axes :

- on appellera couronne la disposition circulaire d'éléments colonnaires identiques (résistances, circuits analogiques, fils d'entrées et de sorties,..) *non interconnectés*.

- lorsque l'architecture comporte plusieurs couronnes *concentriques*, chaque élément de l'une a son homologue dans la suivante, et lorsque ces éléments sont connectés, ils forment une *colonne*.

- on appellera réseau, un système périodique d'éléments identiques interconnectés latéralement (exemple : réseau échelle de résistances (cf. §II.4.2.) et réseau de diodes (cf. §II.4.3.).

### V.3.2. Principe général de l'implémentation parallèle du système anticollision

Afin de prendre en compte la position angulaire de la cible, un principe de calcul parallèle (Fig.V-3) a été développé de la manière suivante :

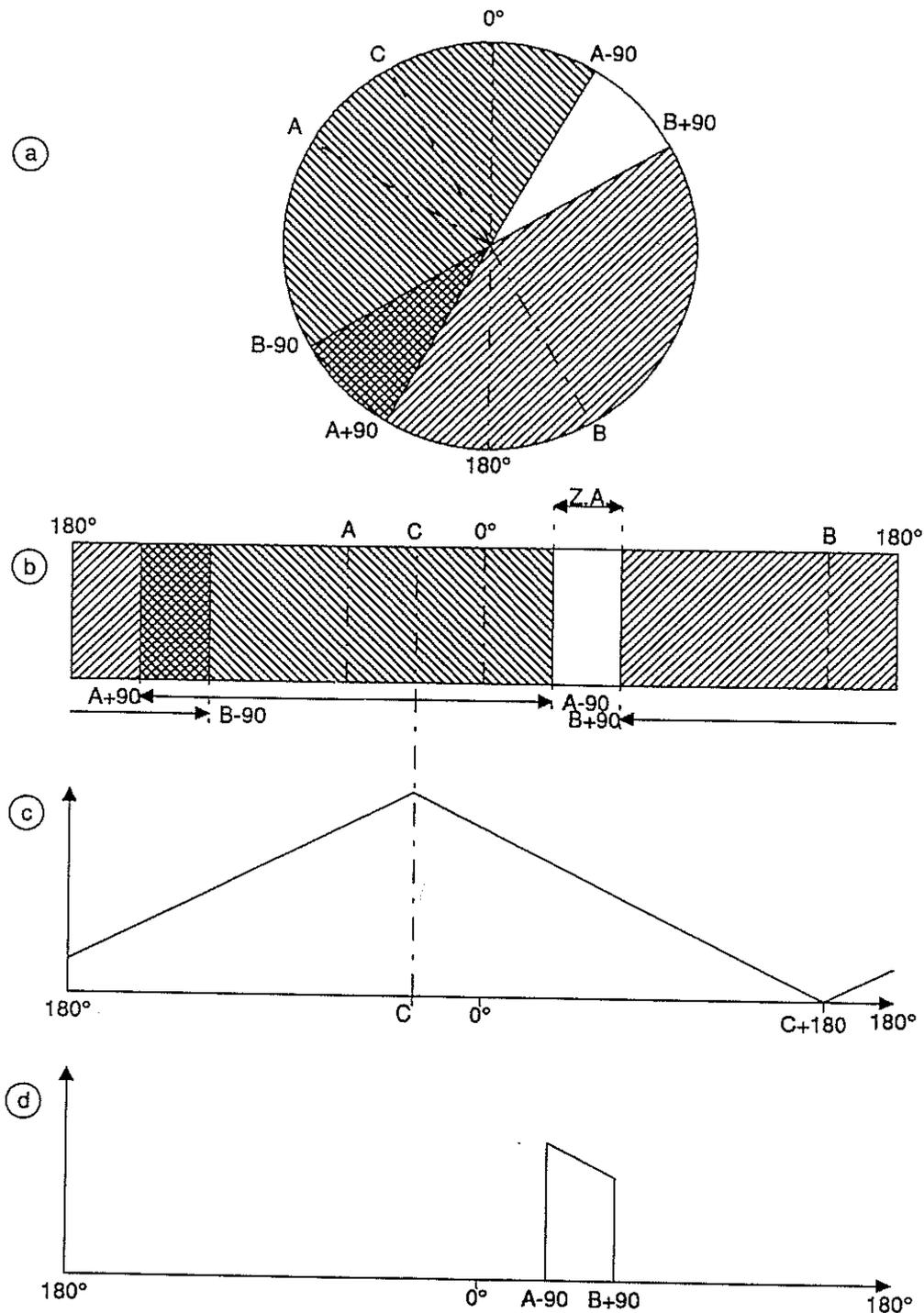
La position angulaire de la cible doit être caractérisée par rapport à toutes les autres, et ce de manière identique bi-latéralement pour que le robot puisse se diriger comme prévu, c'est-à-dire en choisissant la direction de la "zone autorisée" (Fig.V-3-a et b) la plus proche de celle du but.

Pour cela, depuis la direction azimutale de la cible, un signal se propage bi-latéralement le long d'un cercle centré sur le robot : son amplitude décroît de façon symétrique de part et d'autre de la direction angulaire du but (Fig.V-3-c). Cette propagation permet de *coder en amplitude* chacune des directions de visée par rapport à la direction de la cible.

Une "fusion" est réalisée entre, d'une part les points du cercle correspondant à la "zone autorisée" et à la "zone interdite", d'autre part ceux du cercle correspondant à la position angulaire relative des directions par rapport à celle de la cible, suivant le principe de traitement parallèle suivant : on considère que les zones sont constituées de signaux binaires (autorisé=niveau haut, interdit=niveau bas); dès lors, les signaux homologues à une même direction angulaire fusionnent deux à deux et génèrent une couronne de signaux : un point des zones sert de porte analogique à son homologue angulaire de la cible; lorsque le signal zone est au niveau haut, on retrouve le signal cible en sortie de la "fusion"; lorsque le signal zone est au niveau bas, le signal de sortie est nul quel que soit le signal cible (Fig.V-3-d).

Ce principe de fusion permet de générer une couronne de signaux indépendants fournissant par leur amplitude une représentation spatiale : l'amplitude de chacun est significative de la position relative de la direction angulaire considérée par rapport à celle de la cible, et ce uniquement si cette direction angulaire appartient à une "zone autorisée".

Il ne reste plus, à ce stade du traitement, qu'à générer un signal dont l'amplitude en Volts caractérise la *position angulaire* de celui de ces signaux qui présente la plus grande amplitude.



**Fig. V-3 :** Principe général de l'implémentation parallèle de l'algorithme anticollision.

(a) Représentation des directions angulaires de la cible C et de deux contrastes A et B, détectés dans le périmètre de sécurité, depuis le centre du robot. Représentation des signaux au niveau haut (hachurés) associés à la "zone interdite" générée par l'union des "zones élémentaires" engendrées par A et B sur  $\pm 90^\circ$  autour de leur direction.

(b) idem à (a), mais représentation suivant la développante d'un cercle centré sur le robot.

(c) Représentation, suivant la développante d'un même cercle, de la décroissance bilatérale d'un signal se propageant depuis la direction angulaire de la cible.

(d) Valeur du signal propagé par la cible uniquement aux points de la "zone autorisée" illustrant la fusion des deux réseaux circulaires précédents.

V.3.3. Architecture parallèle en réseaux et couronnes implémentant l'algorithme anticollision

La Fig.V-4 montre le synoptique du traitement de signal parallèle réalisant le système anticollision. Afin de décrire cette architecture, nous allons suivre pas à pas les étages d'une colonne de traitement à travers les multiples réseaux et couronnes du circuit de l'algorithme anticollision (Fig.V-5). Une description électronique plus détaillée de chaque étage sera faite au paragraphe V.3.4..

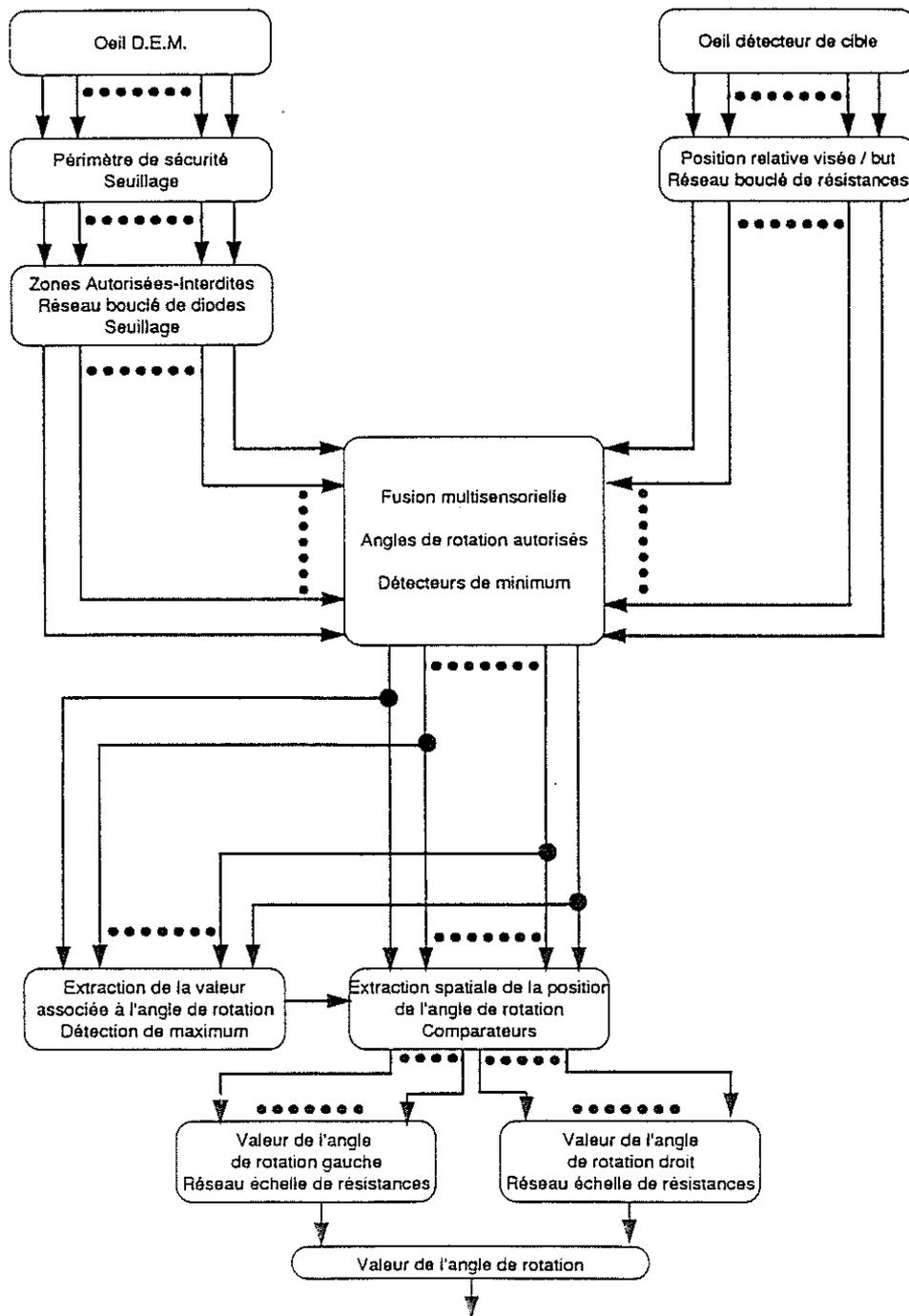


Fig.V-4 : Synoptique du traitement de signal parallèle réalisant le système anticollision

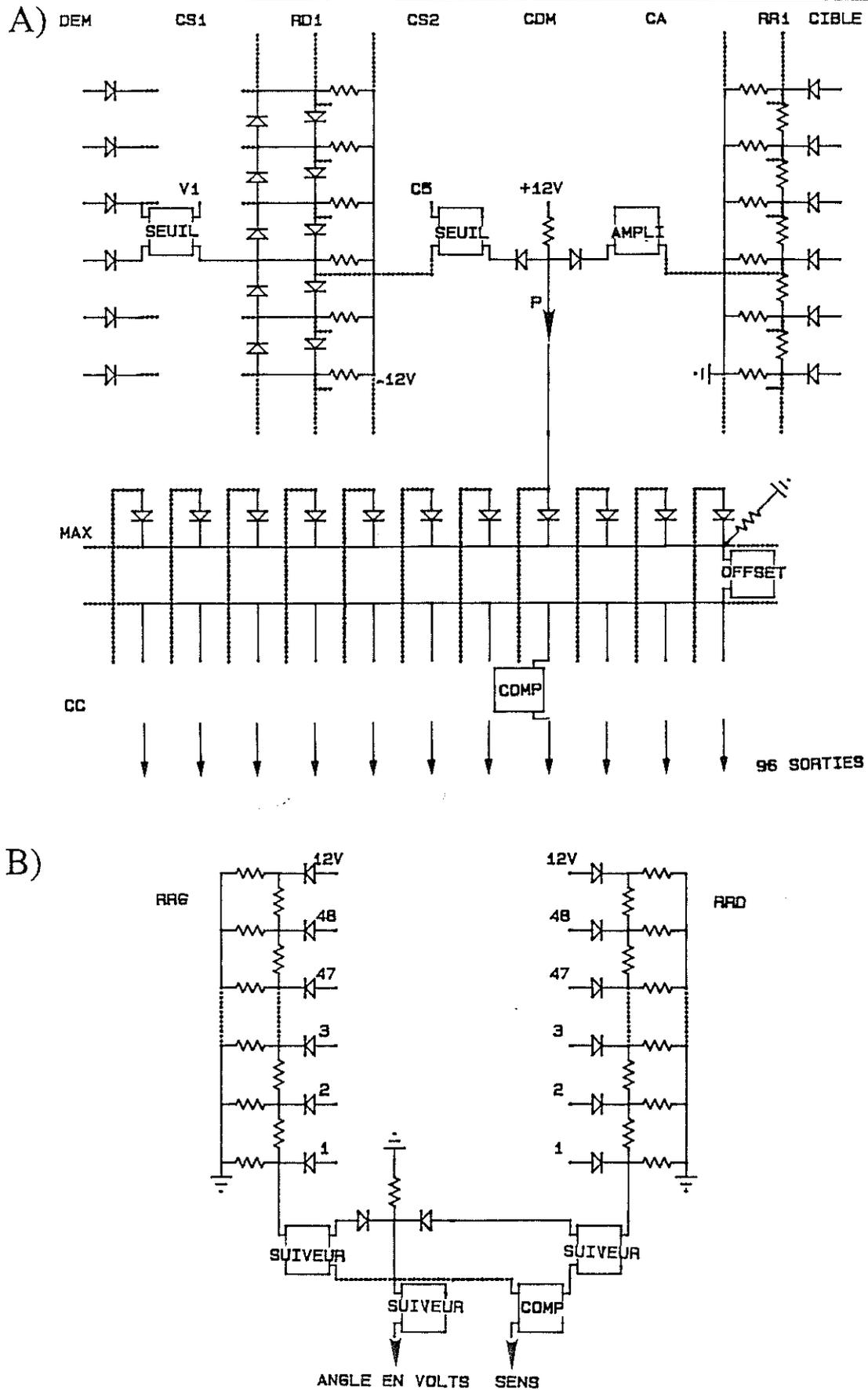


Fig. V-5 : Représentation schématique des étages du traitement parallèle de l'algorithme anticollision et d'une colonne de traitement.

A) DEM : sorties des Détecteurs Élémentaires de Mouvement; CS1 : Couronne de circuits à seuil; RD1 : Réseau bouclé à diodes; CS2 : Couronne de circuits à seuil; Cible : Sorties des détecteurs de cibles; RR1 : Réseau bouclé de résistances; CA : Couronne de circuits d'amplification; CDM : Couronne de détecteurs de minimum; MAX : Détecteur de maximum; Offset : circuit de sommation; CC : Couronne de comparateurs;

B) 1,2,...,47,48 : 96 sorties de la couronne CC partagées en deux demi-couronnes de 48 points de part et d'autre de l'axe du robot; RRG et RRD : Réseau échelle de résistances; COMP : Comparateur.

Tout D.E.M. délivre un signal dont l'amplitude caractérise la distance d'un éventuel obstacle dans sa propre direction (cf. §IV.2.).

Afin de définir le "périmètre de sécurité" (cf. §V.1.), chaque sortie du réseau de D.E.M.s alimente l'une des entrées d'une couronne de circuits à seuil (CS1; cf. §V.3.4.a.) assurant une discrimination par un filtrage non-linéaire en amplitude (seuillage) sur son signal d'entrée.

Un point de contraste détecté dans le "périmètre de sécurité" se traduit par un état haut du signal de sortie du circuit à seuil associé.

Afin de ramener la distribution angulaire en gradient de l'oeil D.E.M. (cf. IV.2.) à une distribution angulaire uniformément répartie dans l'espace et identique à celle des 96 directions du détecteur de cible, plusieurs sorties de D.E.M. peuvent être connectées à un même point de la couronne de circuits à seuil CS1, la règle étant de connecter une sortie de D.E.M. à l'entrée de CS1 la plus proche angulairement.

A ce stade du traitement, la représentation (toujours spatiale) du "périmètre de sécurité" est binaire car elle se traduit par une couronne CS1 de 96 signaux à l'état haut ou bas.

Afin de générer les "zones interdites élémentaires" (cf. §V.2.1.), tout signal de sortie de la couronne CS1 à l'état haut se propage bilatéralement le long d'un réseau bouclé à diodes (RD1; cf. §V.3.4.b.). Chaque noeud de ce réseau RD1 alimente l'une des entrées d'une seconde couronne de circuits à seuil (CS2; cf. §V.3.4.c.) assurant un seuillage en amplitude. La décroissance du signal le long du réseau RD1 va permettre de fixer le nombre des circuits à seuil de la couronne CS2 qui basculent, grâce à l'amplitude commune CS de leur seuil. Cela permet de créer un ensemble de signaux bipolaires sur une portion angulaire, ceux à l'état bas correspondant à la "zone interdite élémentaire".

Afin de générer la "zone interdite" (cf. §V.2.1.), lorsqu'un circuit à seuil bascule, il reste à l'état bas jusqu'à la fin de la translation élémentaire. Ainsi, à la fin de la translation élémentaire, apparaît une couronne de signaux à l'état bas ("zone interdite") ou à l'état haut ("zone autorisée"). Il va de soi que chaque translation élémentaire débute par une remise au niveau haut de tous les circuits à seuil de la couronne CS2. A ce stade du traitement, la représentation spatiale de l'environnement est binaire : elle apparaît sous forme d'une couronne de 96 signaux à niveau haut, susceptibles de basculer au niveau bas au cas où ils seraient dans la "zone interdite" créée par les contrastes détectés dans le périmètre de sécurité.

En parallèle avec cette première architecture, fonctionne le réseau du détecteur de cible qui génère une couronne de 96 signaux binaires (CIBLE; cf. §IV.4.), tous au niveau bas sauf un, celui correspondant à la direction angulaire de la cible.

Afin de caractériser chacune des directions de visée par rapport à la direction de la cible (cf. §V.3.2.), chacun des signaux issus du réseau CIBLE est connecté par l'intermédiaire d'une liaison à diode à un noeud d'un réseau échelle bouclé de résistances (RR1; cf. §V.3.4.d.). Depuis l'unique sortie à l'état haut du réseau CIBLE, le signal décroît bilatéralement, de noeud en noeud, le long de ce réseau résistif bouclé. Ainsi, les noeuds de RR1 offre une représentation spatiale sous forme d'une couronne de 96 signaux codés en amplitude, l'amplitude de chacun d'eux étant toujours positive et d'autant plus grande qu'il correspond à une direction de visée plus proche de la direction de la cible.

Une couronne d'amplificateurs analogiques (CA; cf. §V.3.4.e.) réalise une adaptation avec le traitement qui va suivre et une amplification des signaux.

A ce stade, une *fusion multisensorielle* est réalisée (cf. §V.3.2.) par une couronne de détecteur de minimum à diodes (CDM; cf. §V.3.4.f.) qui tendent à *mélanger* deux à deux les signaux sortant de la couronne CS2 (définissant les zones interdites ou autorisées) et leur homologue issu de la couronne CA (codant les directions de visée par rapport à celle de la cible). Ce mélange vise à extraire, à la fin d'une translation élémentaire, tous les signaux issus de la couronne CA qui ont leur homologue à l'état haut (appartenant à la zone autorisée cf. Fig.V-3-d). Chaque détection de minimum est telle que si, pendant le temps de la translation élémentaire, un signal de CS2 passe à l'état bas (correspond à une "zone interdite"), elle génère en sortie un signal à l'état bas (d'amplitude négative) et ce quelle que soit l'amplitude (toujours positive par construction) du signal présent sur son autre entrée. Ceci permet de reconnaître spatialement, par leur signe, les signaux binaires qui appartiennent à la "zone interdite" (amplitude négative) de ceux de la "zone autorisée" (amplitude positive). A ce stade du traitement, persiste une représentation *spatiale* liée à la structure parallèle.

La direction que devra prendre le robot est représentée *spatialement* par la sortie P (Fig.V-5), du réseau CDM, qui affiche la plus grande amplitude, car c'est elle qui correspond à la direction la plus proche de celle de la cible dans la "zone autorisée". La reconnaissance de cette sortie va se faire en trois étapes :

- un détecteur de maximum à 96 diodes d'entrée (MAX; cf. §V.3.4.g.) compare les sorties de la couronne CDM; il permet de récupérer le signal d'amplitude maximale (diminuée de 0,6Volts après le MAX).

- un OFFSET proche de 0,6Volts permet d'ajuster, par valeur inférieure, l'amplitude du signal de sortie du MAX à son homologue de CDM.

- une couronne de comparateurs analogiques (CC; cf. §V.3.4.g.) compare chacun des 96 signaux de cette couronne CDM au signal issu de l'offset. Dès lors, ne se trouve au niveau haut que la sortie du comparateur correspondant à la nouvelle direction à prendre. Toutes les autres sorties de la couronne CC restent au niveau bas parce qu'elles affichent toutes une

tension d'entrée inférieure à l'amplitude maximale issue de l'offset. A ce stade du traitement, la nouvelle direction à prendre pour le robot est encore caractérisée par une représentation *spatiale*. Elle est représentée par l'unique signal à l'état haut (amplitude positive) d'une couronne dont les 95 autres signaux sont à l'état bas (amplitude négative). Cette position spatiale est évidemment susceptible de donner naissance à deux angles de braquage pour le robot puisqu'elle peut être atteinte par une rotation vers la droite ou vers la gauche.

Afin de convertir la représentation *spatiale* de la direction à suivre en deux signaux analogiques dont l'amplitude en Volts représente respectivement l'*angle* de braquage vers la gauche et vers la droite, chaque sortie de cette couronne de 96 comparateurs CC attaque, par l'intermédiaire d'une diode, l'un des noeuds de deux réseaux échelles de résistances identiques (RRD et RRG; cf. §V.3.4.h). Ces deux réseaux de 48 noeuds correspondent, l'un aux directions associées côté gauche du robot, l'autre aux directions côté droit. Les entrées 1 de chacun d'eux correspondent aux directions les plus frontales, donc à l'angle de braquage le plus faible. L'unique sortie de la couronne CC au niveau haut (direction à suivre) génère un signal qui se propage en décroissant le long d'un des deux réseaux RRD ou RRG. Au bout de chacun des deux, l'amplitude du signal caractérise la valeur de l'angle à tourner vers la gauche et vers la droite (la tension de sortie est d'autant plus grande qu'elle correspond à un angle de braquage faible).

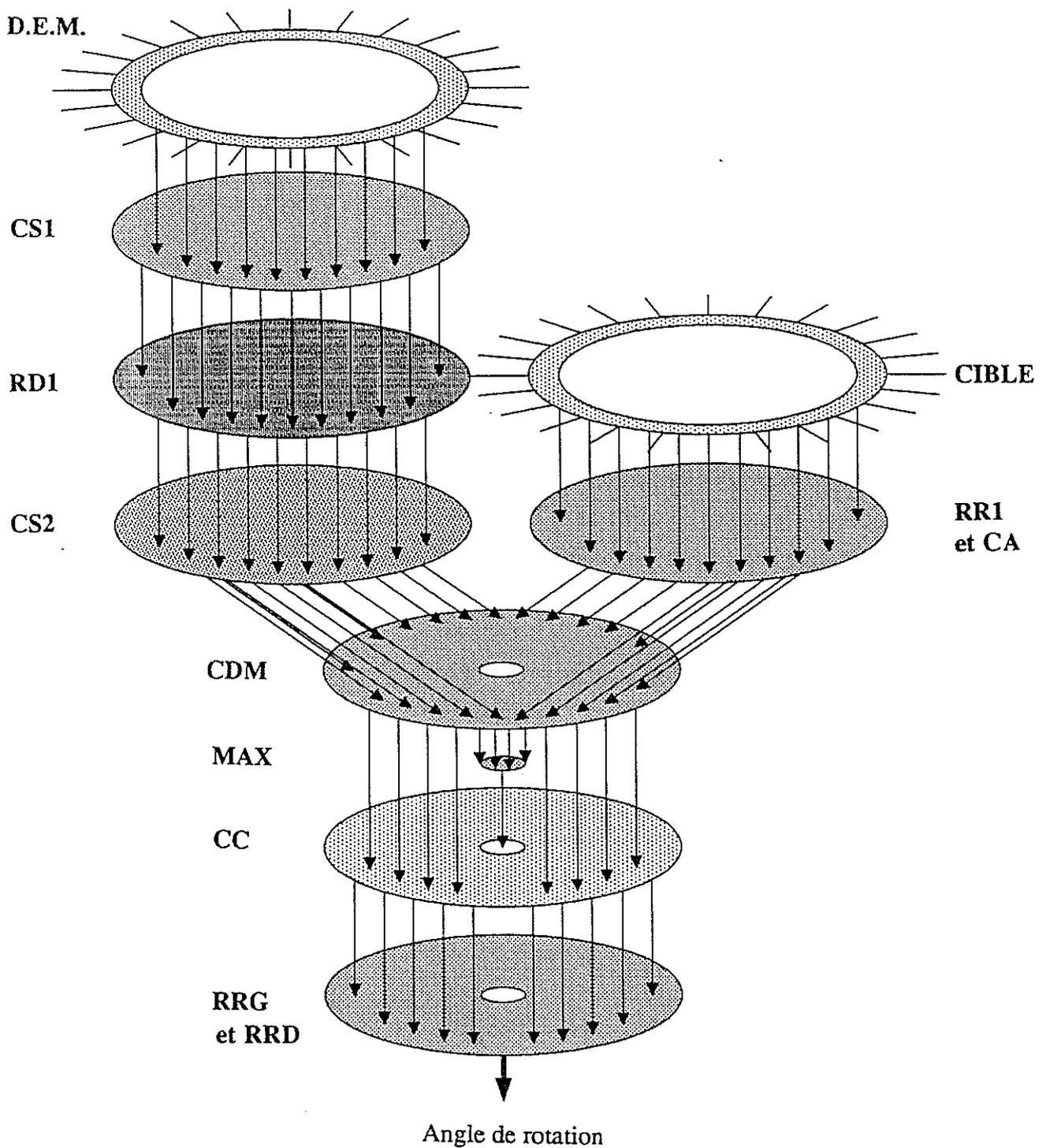
Un unique détecteur de maximum à diodes (cf. §V.3.4.i.) sélectionne le plus grand des deux signaux de sortie des réseaux RRD et RRG. Il permet de récupérer la valeur absolue (en Volts) de l'angle de braquage le plus faible. Par ailleurs, le signe de sortie d'un unique comparateur alimenté par les deux mêmes signaux permet de préciser le *sens* de la rotation (gauche ou droit).

Ce sont les sorties de ce détecteur de maximum et de ce comparateur qui serviront de signaux de commande des moteurs de la plate-forme (cf. §VI.2.).

#### V.3.4. Electronique de la carte destinée au système anticollision

L'algorithme de navigation, dont nous venons d'exposer le principe, est implémenté sur un réseau électronique entièrement parallélisé, qui se décompose en plusieurs couches de traitement (Fig.V-6). Chacune de ces couches réalise elle-même un réseau d'interconnexions denses entre ses entrées parallèles. Chacune de ces entrées fait partie d'une colonne de traitement associée à l'une des 96 directions angulaires uniformément réparties dans l'espace.

Nous allons décrire maintenant les circuits électroniques du système anticollision.



**Fig.V-6** : Principe de l'implémentation parallèle de l'algorithme de navigation du robot. Couches de traitement parallèle interconnectées de façon à définir des colonnes associées à une direction azimutale. DEM : sorties des Détecteurs élémentaires de mouvement; CS1 : Couronne de circuits à seuil; RD1 : Réseau bouclé à diodes; CS2 : Couronne de circuits à seuil; Cible : Sorties des détecteurs de cibles; RR1 Réseau bouclé de résistances; CA : Couronne de circuits d'amplification; CDM : Couronne de détecteurs de minimum; MAX : Détecteur de maximum; Offset : circuit de sommation; CC : Couronne de comparateurs; RRG et RRD : Réseau échelle de résistances.

## V.3.4.a. Périètre de sécurité et visualisation des contrastes détectés : seuillage et LED

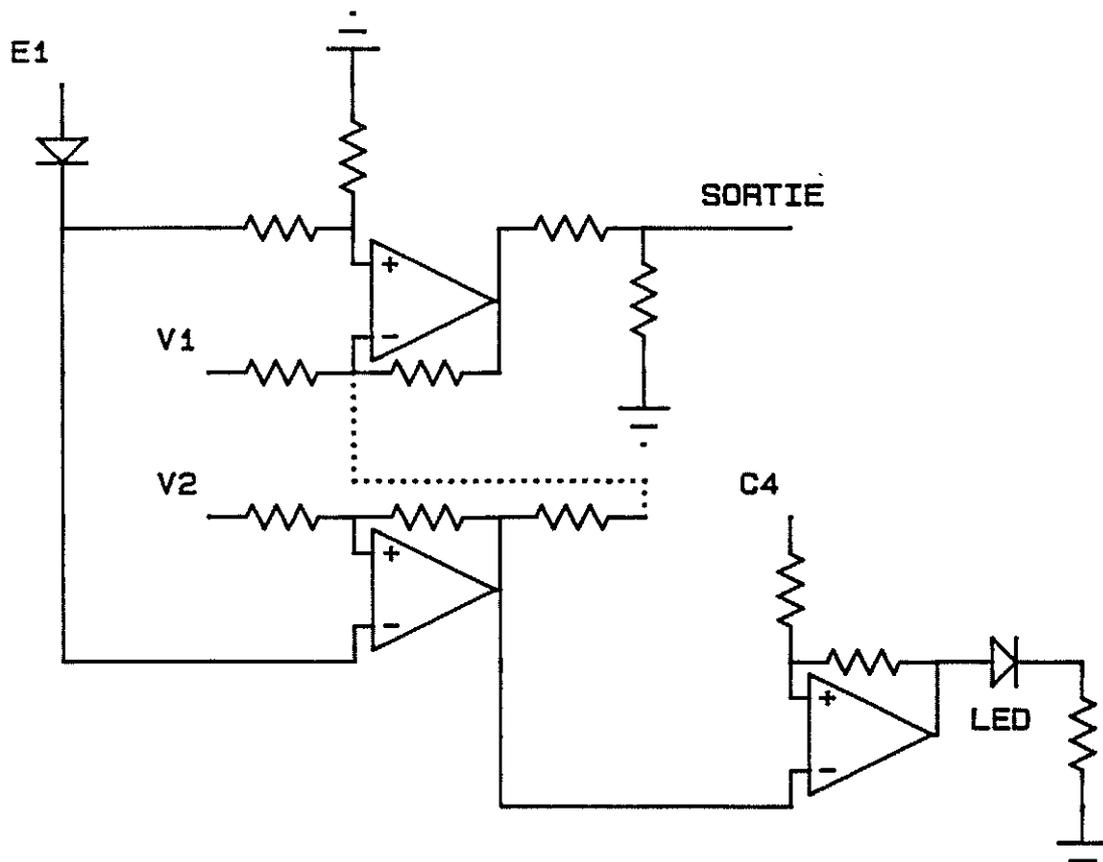


Fig.V-7 : Circuit électronique se retrouvant derrière chaque sortie de D.E.M.. Prise en compte et visualisation de la détection d'un front de contraste par un D.E.M. dans le périmètre de sécurité.

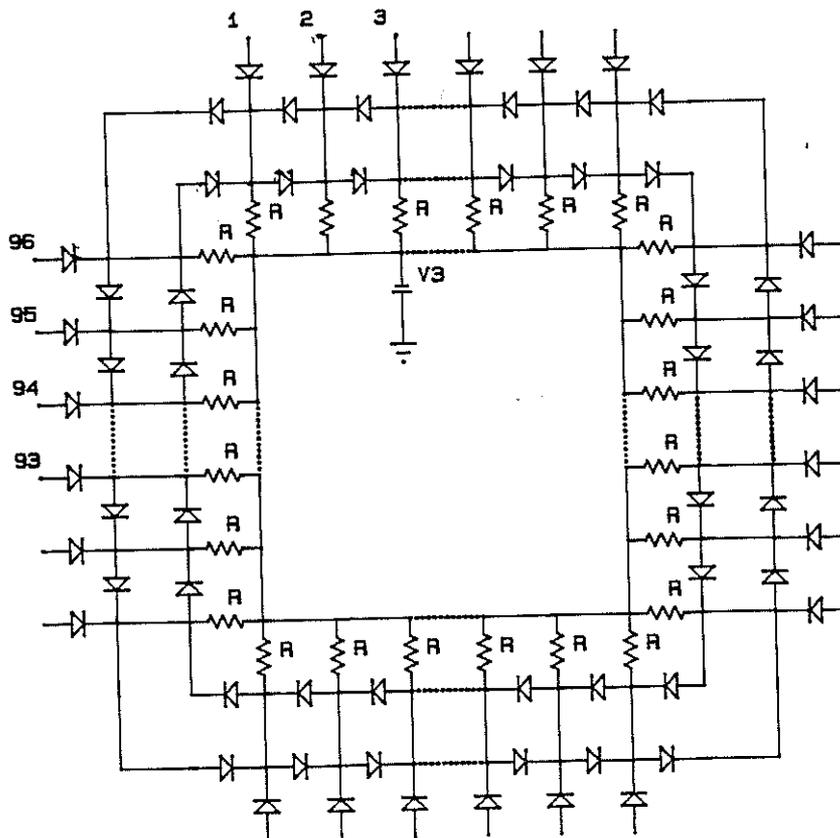
E1 : entrée connectée à une sortie de D.E.M.; V1, V2, C4 : tensions de référence; SS : sortie.

Chaque colonne de la couronne CS1 comporte un circuit analogique à seuil à hystérésis qui bascule lorsque l'amplitude de son signal d'entrée (provenant de la sortie d'un D.E.M.) dépasse un seuil (pendant la durée 1ms de la détection) puis revient à sa position d'équilibre (Fig.V-7). Son seuil de basculement (défini par le rayon du périmètre de sécurité) est fixé par une tension V2, réglable de manière identique pour tous les circuits de la couronne. Une fois le seuil dépassé, deux options sont prévues pour le signal de sortie : ou bien il sort calibré en amplitude (ce qui conduit à l'évitement de tout contraste, sans tenir compte de sa distance réelle) ou bien on restitue l'amplitude analogique du signal d'entrée (afin de pouvoir prendre en considération sa distance réelle; dans une phase ultérieure du projet, ceci permettra de définir des "zones interdites" fonction de la distance du contraste dans le périmètre de sécurité, cf. Thèse J.M. Pichon Chap.V). Pour ce faire, on utilise, dans chaque colonne de la couronne CS1, un sommateur analogique qui combine algébriquement une tension V1 (commune à tous les circuits de CS1), les signaux d'entrée et de sortie du circuit à seuil. Les gains en amplitude correspondant à chacune de ces entrées sont calculés de manière à ce que ce sommateur se comporte comme une porte analogique :

- lorsque le signal de sortie du circuit à seuil est au niveau haut, ce sommateur génère un signal similaire à celui présent à la fois à l'entrée du circuit à seuil et à l'une de ses entrées.
- lorsque le signal de sortie du circuit à seuil est au niveau bas, la sortie est négative.
- la tension  $V1$  règle le gain du signal de sortie de ce sommateur de la manière suivante :  $V1=+4V$ , sa sortie sature (négative si la sortie du circuit à seuil est au niveau bas et positif si au niveau haut);  $V1=+12V$  et si la sortie du circuit à seuil est au niveau haut, la sortie du sommateur est proportionnelle à l'amplitude du signal issu du détecteur de cible, si elle est au niveau bas, la sortie est saturée (négative).

Un circuit à seuil à hystérésis bascule au niveau haut lorsque le circuit à seuil précédent bascule. Il permet d'alimenter une LED de visualisation. Ainsi, une LED s'allume lors de la détection d'un point de contraste dans une direction angulaire du périmètre de sécurité. Elle reste allumée jusqu'à ce qu'une impulsion négative (-12V), contrôlée par la carte asservissement, arrive en C4. Cette impulsion est synchronisée avec la réinitialisation de la zone autorisée.

#### V.3.4.b. Propagation depuis la détection : réseau bouclé à diodes



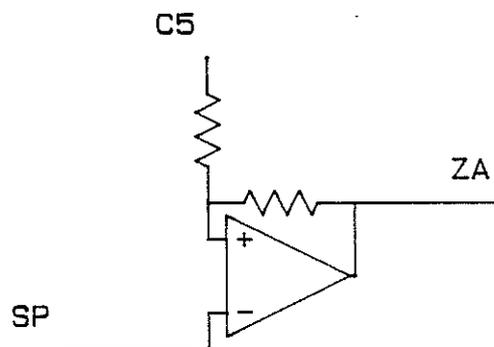
**Fig.V-8** : Réseau bouclé à diodes montées tête-bêche assurant une propagation bilatérale d'un signal depuis chaque sortie du réseau de circuits à seuil correspondant au périmètre de sécurité. Fonctionnement du réseau illustré Fig.II-8. Les points d'entrées 1, 2, ..., 95 et 96 sont connectés à 96 points de sortie SS de la Fig.IV-8.

Cet étage est constitué d'un réseau échelle bouclé à diodes (RD1) dont on a décrit le fonctionnement en §II.4.3.d. Chaque noeud reçoit par l'intermédiaire d'une diode d'entrée l'une des sorties de l'étage précédent. Depuis un signal d'entrée au niveau haut s'effectue une propagation bilatérale de ce signal. Il décroît en escalier d'amplitude égale à la tension de coude (0,6Volts) d'une diode et ce de noeud en noeud (cf. Fig.II-15). Nous avons vu que ce type de réseau conserve des longueurs de propagation identiques c'est-à-dire avec toujours les mêmes variations de signal d'un noeud à l'autre, et ce même pour plusieurs sources d'entrées au niveau haut simultanément (principe de sommation non-linéaire, cf. §II.4.3.d).

Afin d'accroître les distances de propagation bilatérale, le réseau n'est pas référencé par rapport à la masse, mais par rapport à une tension  $V3$  de -12Volts (Fig.V-8). L'amplitude de 24Volts ( $\pm 12$ Volts) entre la source au niveau haut et la référence permet une propagation sur 40 points avec les diodes utilisées.

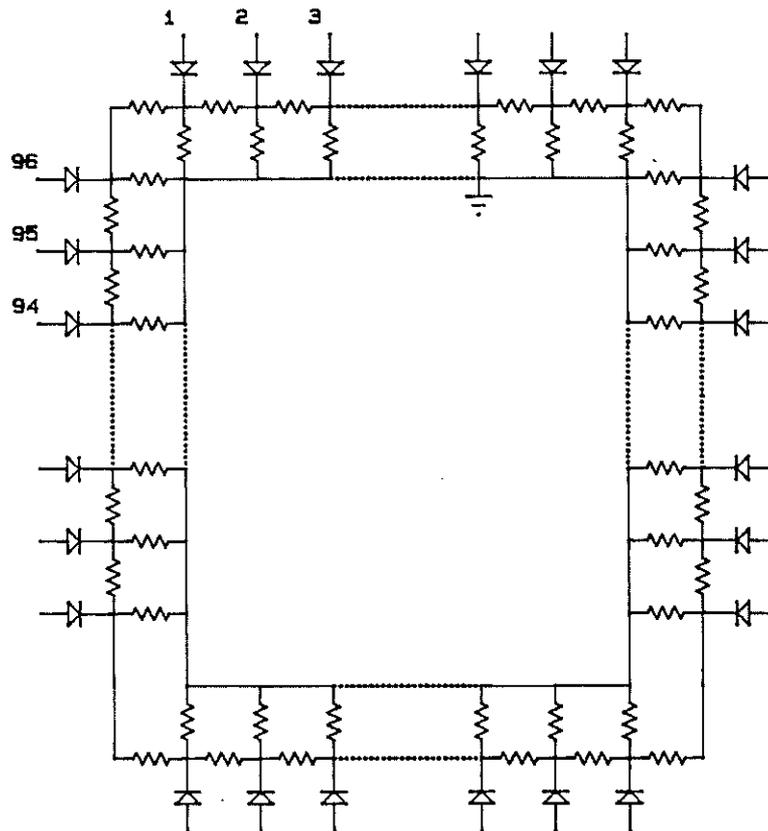
#### V.3.4.c. Zone interdite, zone autorisée : seuillage

Chacun des noeuds du réseau RD1 est connecté à l'un (Fig.V-9) des circuits à seuil à hystérésis de la couronne CS2 qui délivre un signal calibré en amplitude. Ce circuit contrôle la longueur de propagation des signaux d'entrée du réseau RD1 par une tension, C5, réglable et commune à tous les circuits. Il réalise un filtrage non-linéaire en amplitude (seuillage) sur son signal d'entrée et délivre un signal binaire (niveau haut positif=zone autorisée; niveau bas négatif=zone interdite). Lorsque ce circuit bascule au niveau bas, il le reste jusqu'à ce qu'une impulsion positive arrive sur la tension de référence C5 pour le remettre au niveau haut. Cette impulsion est gérée par la carte asservissement (cf. §VI.2.3.b.), qui réinitialise ainsi la zone autorisée au début d'une translation élémentaire  $\Delta L$  (plus exactement, à la moitié de  $\Delta L$ , cf. Thèse J.M. Pichon Chap.V).



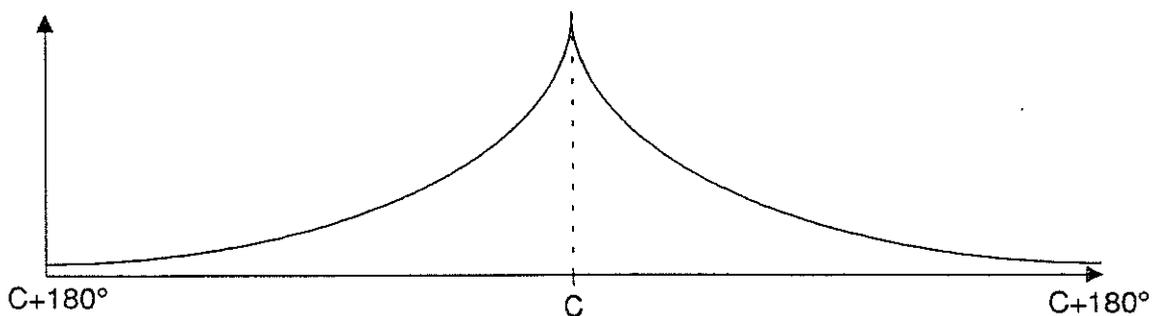
**Fig.V-9** : Circuit électronique de la couche réalisant les zones interdites et les zones autorisées. Circuit à seuil placé derrière chaque noeud du réseau de la couche précédente (Fig.V-8) et servant de filtre non-linéaire. Le point d'entrée SP est connecté à l'un des 96 noeuds du réseau de la Fig.V-9. C5 est une tension de référence et ZA le point de sortie.

## V.3.4.d. Propagation depuis la position du but : réseau échelle de résistances



**Fig.V-10** : Circuit électronique de propagation du signal de la cible. Réseau échelle bouclé de résistances. Une des sorties du détecteur de cible vient se brancher, par l'intermédiaire d'une diode, en chaque noeud.

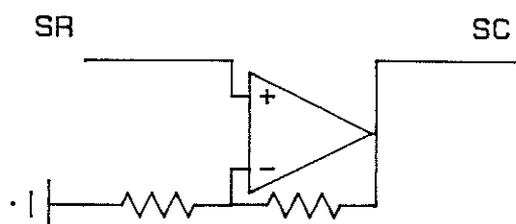
Chacun des 96 signaux générés par le détecteur de cible (cf. §IV.3.) est connecté par une diode aux noeuds d'un réseau échelle bouclé de résistances (RR1; Fig.V-10). On a vu le principe de fonctionnement en §II.4.2. de ce type de réseau, qui permet de propager un signal de part et d'autre d'un noeud source (ici correspondant à la position de la cible), décroissant exponentiellement de noeud en noeud (Fig.V-11). La décroissance se fait de manière identique à partir de n'importe quel noeud d'entrée du réseau.



**Fig.V-11** : Propagation de noeud en noeud depuis la position de la cible dans un réseau échelle bouclé de résistances (Fig.V-10).

Remarque :

On aurait pu utiliser un réseau bouclé à diodes qui, comme on l'a vu en §II.4.3.e. fournit une propagation de signal bilatérale, décroissant en escalier d'amplitude constante (0,6Volts) de noeud en noeud. Cette structure présentait l'inconvénient, dans le cas présent, de nécessiter une excursion en amplitude proche de 30Volts (48 fois la tension de coude de diode) pour pouvoir estimer la décroissance du signal jusqu'à 180° de la position de la cible.

V.3.4.e. Amplification analogique

**Fig.V-12** : Circuit électronique d'amplification de l'amplitude du signal de chaque noeud du réseau bouclé de résistances (Fig.V-10). SR est le point d'entrée connecté à l'un des noeuds du réseau de la Fig.V-10, et ZC le point de sortie de ce circuit.

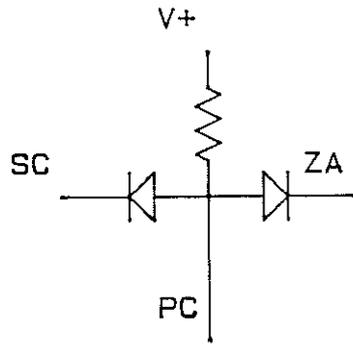
Une couronne d'amplificateurs analogiques (CA) accroît la valeur de chaque sortie du réseau échelle de résistances RR1 (Fig.V-12). Cet étage permet par ailleurs d'isoler les sorties de RR1 des entrées de l'étage suivant.

V.3.4.f. Fusion multisensorielle par détection de minimum

Cet étage fait fusionner deux à deux les sorties correspondant à une même direction angulaire en provenance de la couronne d'amplificateurs CA et de la couronne de circuits à seuil CS2. Cette fusion est réalisée par des détecteurs de minimum à diodes (Fig.V-13) dont on a décrit le fonctionnement en §II.4.3.a. illustré sur la Fig.II.7..

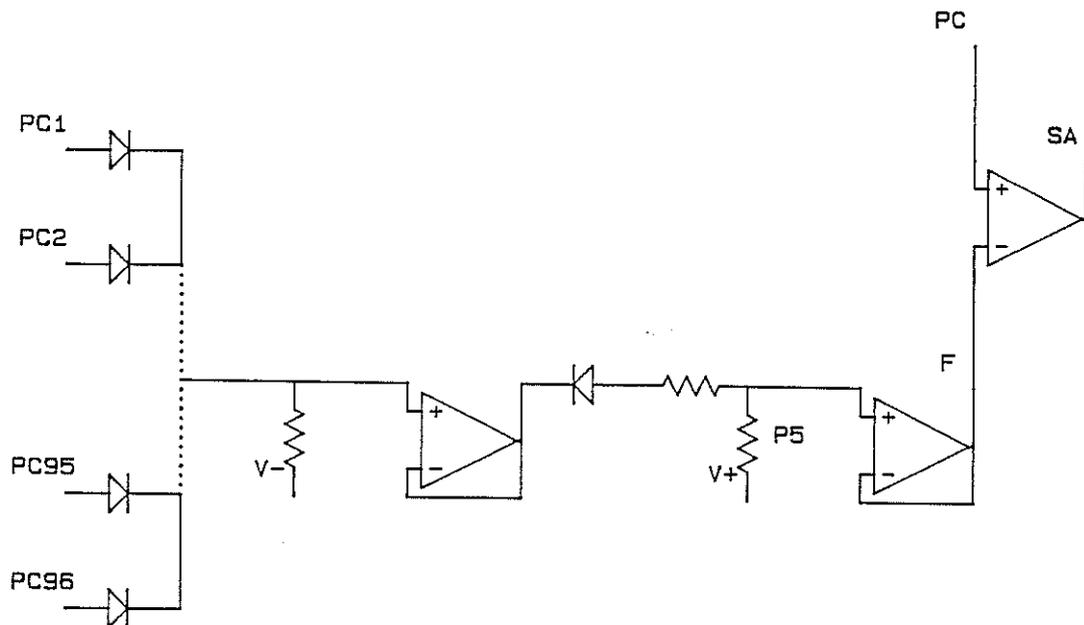
Le fonctionnement ici est le suivant :

- si le signal d'entrée ZA, provenant de la couronne CS2, est au niveau haut (saturation positive="zone autorisée"), le signal positif SC, provenant du réseau RR1, apparaît en sortie du "ET".
- si le signal d'entrée ZA passe au niveau bas (saturation négative="zone interdite"), le signal de sortie du détecteur de minimum passe lui aussi au niveau bas (saturation négative).



**Fig.V-13** : Détecteur de minimum réalisant la fusion multisensorielle entre une entrée ZA provenant d'un circuit associé à une direction I de la couronne CS2 (correspondant à la "zone autorisée" ou de la "zone interdite" cf. Fig.V-10) et une entrée ZA provenant d'un noeud, associé à la même direction I, dans le réseau RR1 (assurant une propagation bilatérale depuis la direction angulaire de la cible cf. Fig.V-12). V+ est une tension de référence, et PC le point de sortie.

#### V.3.4.g. Extraction spatiale de la direction à suivre : détecteur de maximum et comparateur



**Fig.V-14** : Réseau électronique réalisant l'extraction spatiale de la direction à suivre pour la prochaine translation élémentaire. Les entrées PC sont connectées aux 96 sorties des détecteurs de minimum de la couronne CDM (Fig.V-13). V- et V+ sont deux tensions de référence.  $F = \text{Max}(PC1, PC2, \dots, PC95, PC96)$ . SA est le point de sortie.

Un détecteur de maximum à 96 diodes (Fig.V-14), dont le fonctionnement a été décrit en II.4.3.b., permet d'extraire l'amplitude maximale des sorties PC de la couronne CDM.

A la sortie de ce circuit, on retrouve cette amplitude maximale (qui a subi une chute de potentiel de 0,6Volts due à la tension de coupe de la diode). Afin de retrouver une amplitude très proche, par valeur inférieure, à celle de l'entrée du détecteur de maximum, on ajoute au signal de sortie une tension voisine de 0,6Volts.

Cette valeur F est ensuite isolée par un suiveur analogique pour être ensuite comparée en parallèle, individuellement à chaque valeur d'entrée du "OU" par une couronne de comparateurs (CC) qui basculent autour de la valeur F (Fig.V-14). Ainsi, 96 signaux binaires sont au niveau bas (négatif) sauf un qui est au niveau haut (positif), celui précisément qui correspond à la direction à suivre.

#### V.3.4.h. Valeur des angles gauche et droit : réseaux échelles de résistances

On a vu en §II.4.2. le principe de fonctionnement des deux réseaux échelles de résistances RRG et RRD (Fig.V-15) comportant chacun 48 noeuds connectés par une liaison à diode à l'une des sorties de la couronne CC. Une tension de +12V est imposée à l'extrémité opposée à la sortie, afin d'obtenir en bout de celui des réseaux (RRG ou RRD) non associé à la direction à suivre une amplitude correspondant à tourner de  $180^\circ$  toujours inférieure à celle générée par l'autre réseau (RRG ou RRD) et correspondant à l'angle de rotation. Depuis l'unique valeur positive, correspondant à l'angle de braquage  $\alpha$ , va se propager de noeud en noeud un signal décroissant exponentiellement. Les sorties de l'étage précédent sont connectées à chaque noeud dans l'ordre angulaire spatial, sachant que celle associée à la direction  $0^\circ$  l'est au noeud précédent la sortie du réseau. Cette sortie du réseau est connectée à l'entrée d'un suiveur analogique. Ainsi, comme on l'a vu en §II.4.2.a., l'amplitude du signal de sortie du réseau varie de manière monotone avec l'angle de braquage à adopter. Cet angle sera d'autant plus faible que la tension propagée en bout de chaîne est grande.

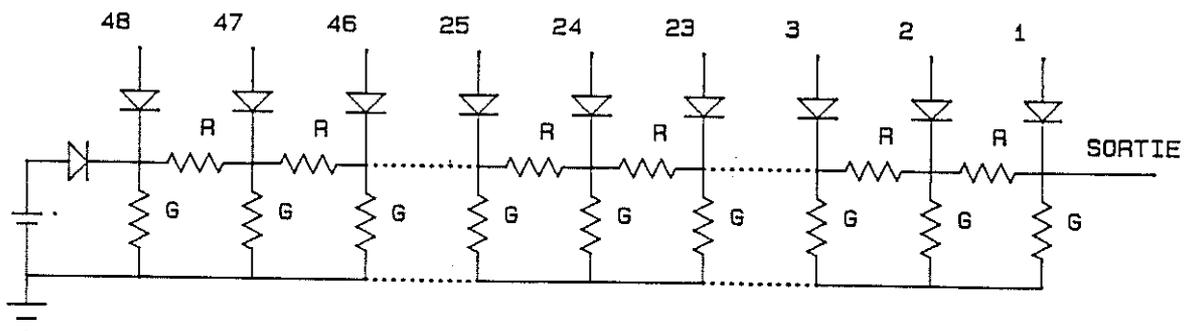
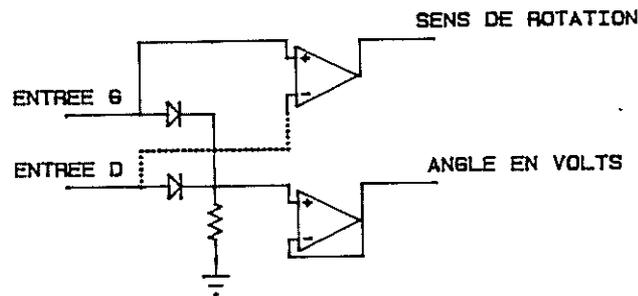


Fig.V-15 : Circuit électronique définissant la valeur de l'angle à tourner. Réseau échelle de résistances. Les entrées 1,2, ...,47,48 sont connectées aux sorties de la couronne CC (assurant la détection spatiale de la prochaine direction à suivre cf. Fig.V-14).

#### V.3.4.i. Angle en Volts et sens de rotation : détecteur de maximum et comparateur



**Fig.V-16** : Circuits délivrant l'angle de rotation en Volts (détecteur de maximum à diodes et suiveur) et le sens de rotation (comparateur).

Un détecteur de maximum à diodes (Fig.V-16) génère le plus grand des deux signaux de sortie des réseaux RRG et RRD (amplitude=angle de rotation). Ces deux mêmes signaux attaquent chacune des entrées d'un comparateur analogique dont le signe renseigne sur le sens de rotation (Fig.V-16).

#### V.3.4.j. Carte électronique du système anticollision

Le circuit électronique du système anticollision a été décomposé en 96 colonnes de traitement identiques (Fig.V-16). Pour l'implémentation de ce circuit, conformément au cahier des charges décrit au §II.3.2., une technologie C.M.S. a été retenue (Fig.V-17). 96 LEDs visualisent les contrastes détectés dans le périmètre de sécurité et ont été placées à la périphérie du circuit. Sa taille a pu être ramenée à un disque de 13cm de rayon percé au centre d'un trou de 2,5cm de rayon. Une implantation double face sur un circuit imprimé à six couches a été nécessaire (Fig.V-18). Douze connecteurs miniatures à 8 contacts amènent les 96 sorties de la carte du détecteur de cible. De même, des connecteurs individuels amènent les signaux issus des cartes de D.E.M.s. Un connecteur à 6 contacts assure la liaison avec la carte asservissement qui tient lieu aussi d'alimentation stabilisée.

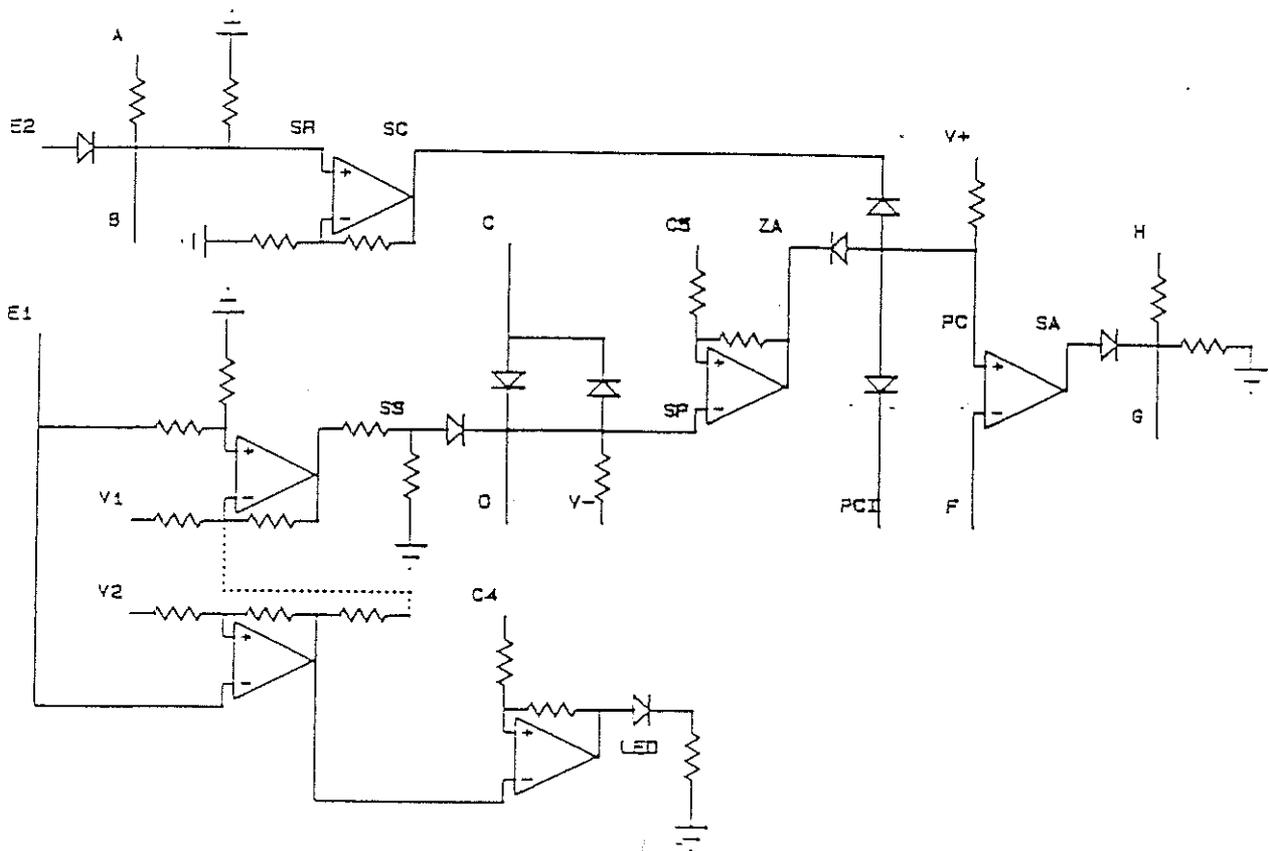


Fig.V-17 : Circuit électronique d'une colonne (I) de l'algorithme de navigation. E1 est connectée à la sortie du D.E.M. échantillonnant la même direction  $\alpha$  que celle provenant du détecteur de cible qui est connectée à l'autre entrée E2. V+, V-, V1, V2, V3, C4, C5 sont des tensions de référence. A, C et H sont connectés respectivement à B, D et G de la voie (I-1). B, D et G sont connectés respectivement à A, C et H de la voie I+1. Tous les points E sont reliés. Le point F est unique.

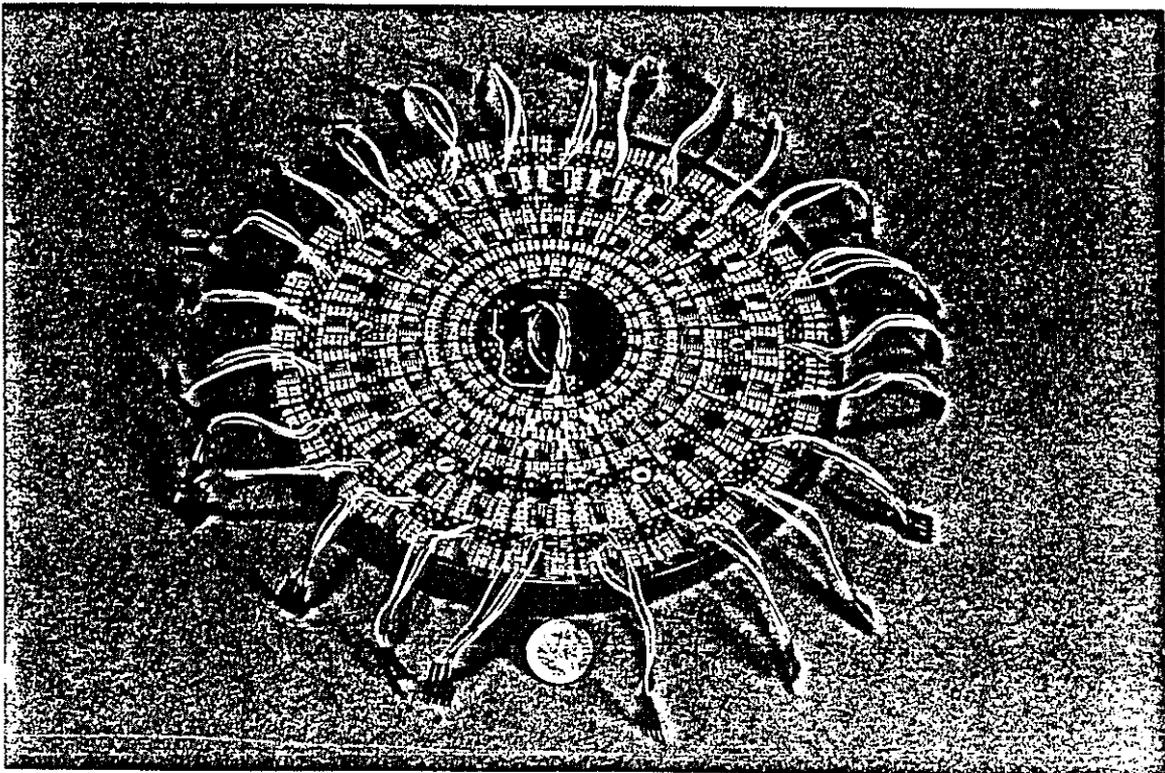


Fig.V-18 : Photo des deux faces de la carte du système anticollision.

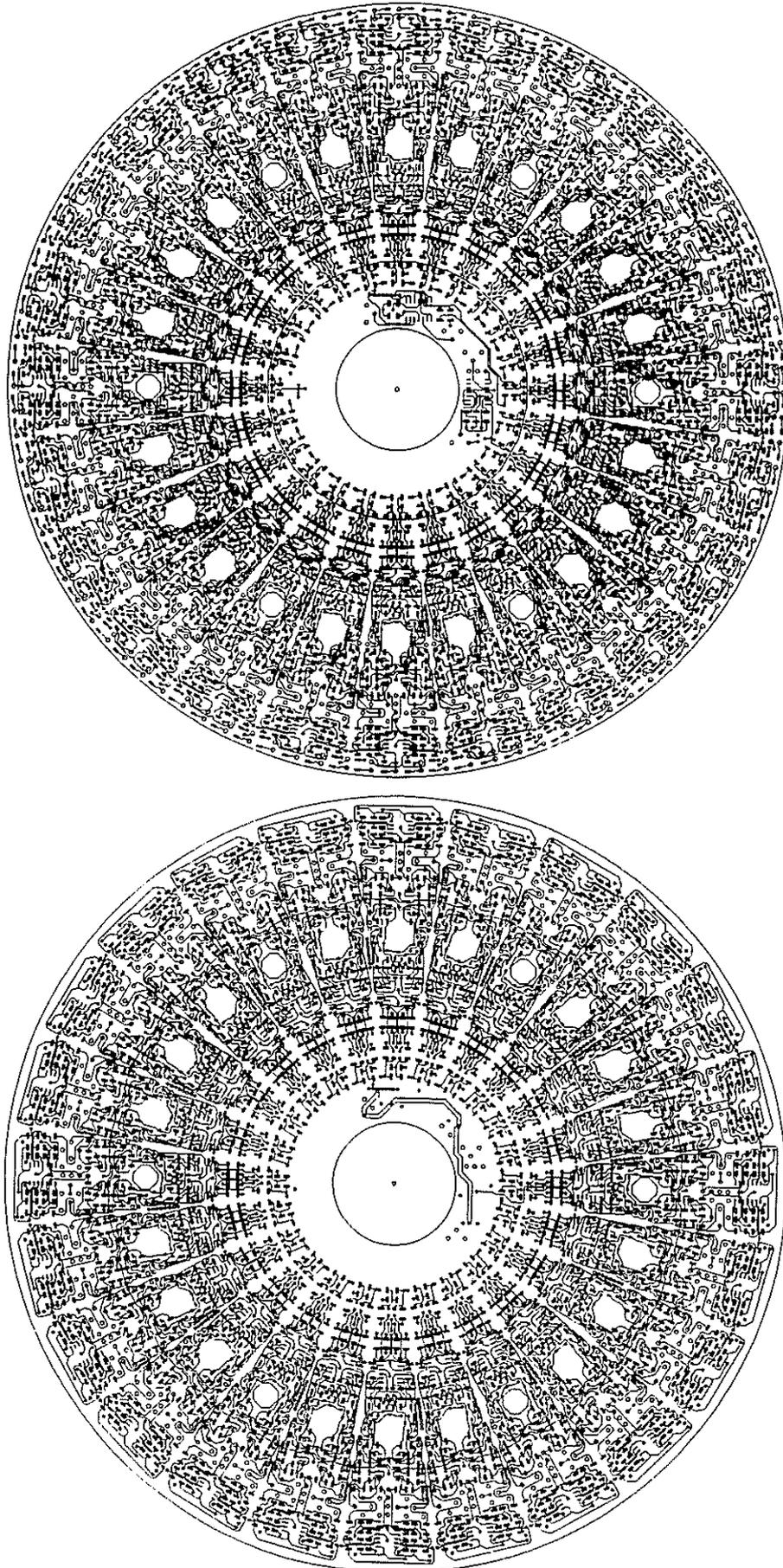
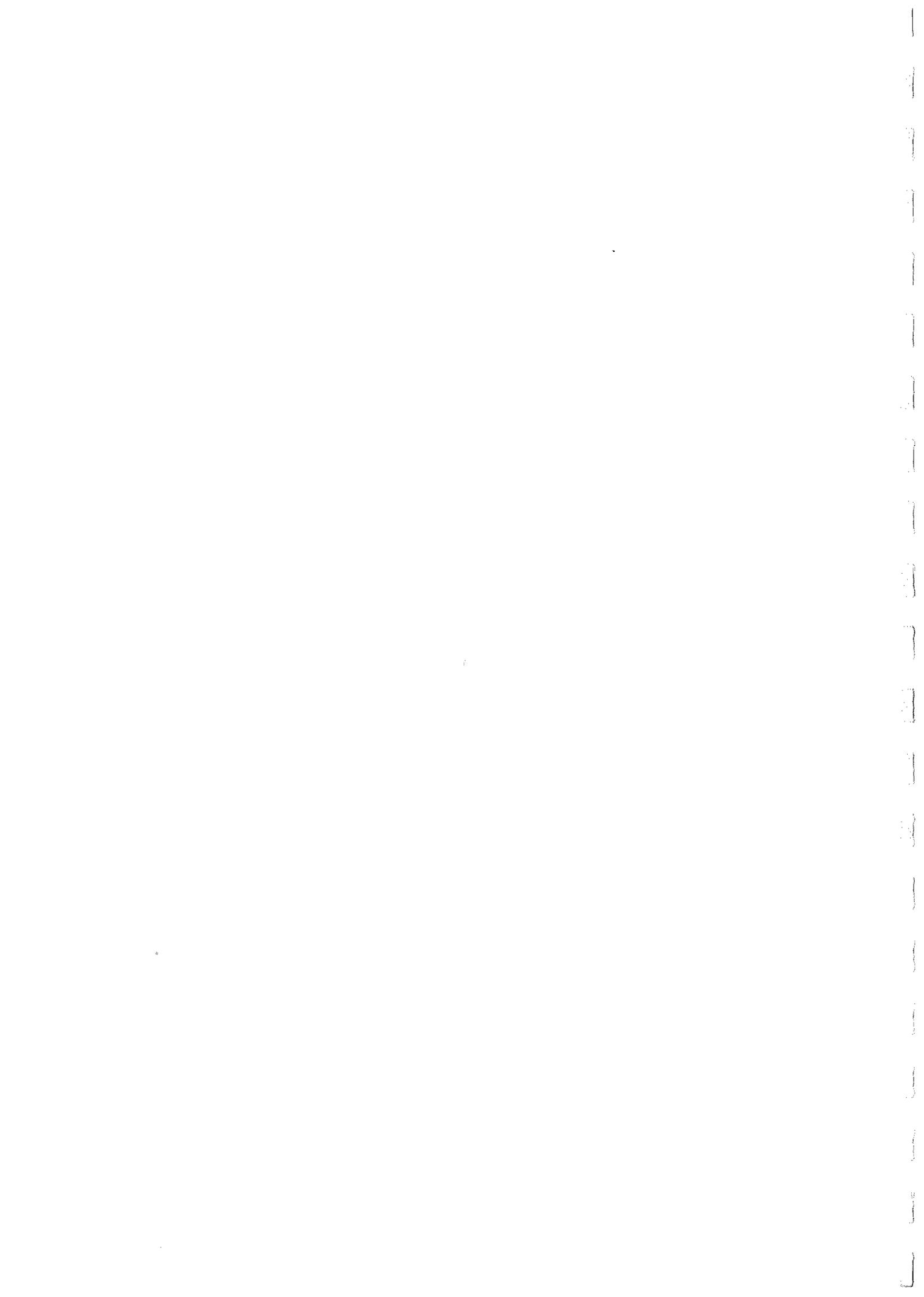


Fig.V-19 : Routage des deux faces du système anticollision.



**CHAPITRE VI**

**LE PROTOTYPE DU ROBOT**



## **VI.1. Système de locomotion**

VI.1.1. Cahier des charges

VI.1.2. Description de la plate-forme mobile

a. Mécanique

b. Performances

## **VI.2. Commande en vitesse des moteurs du robot**

VI.2.1. Stratégie de déplacement

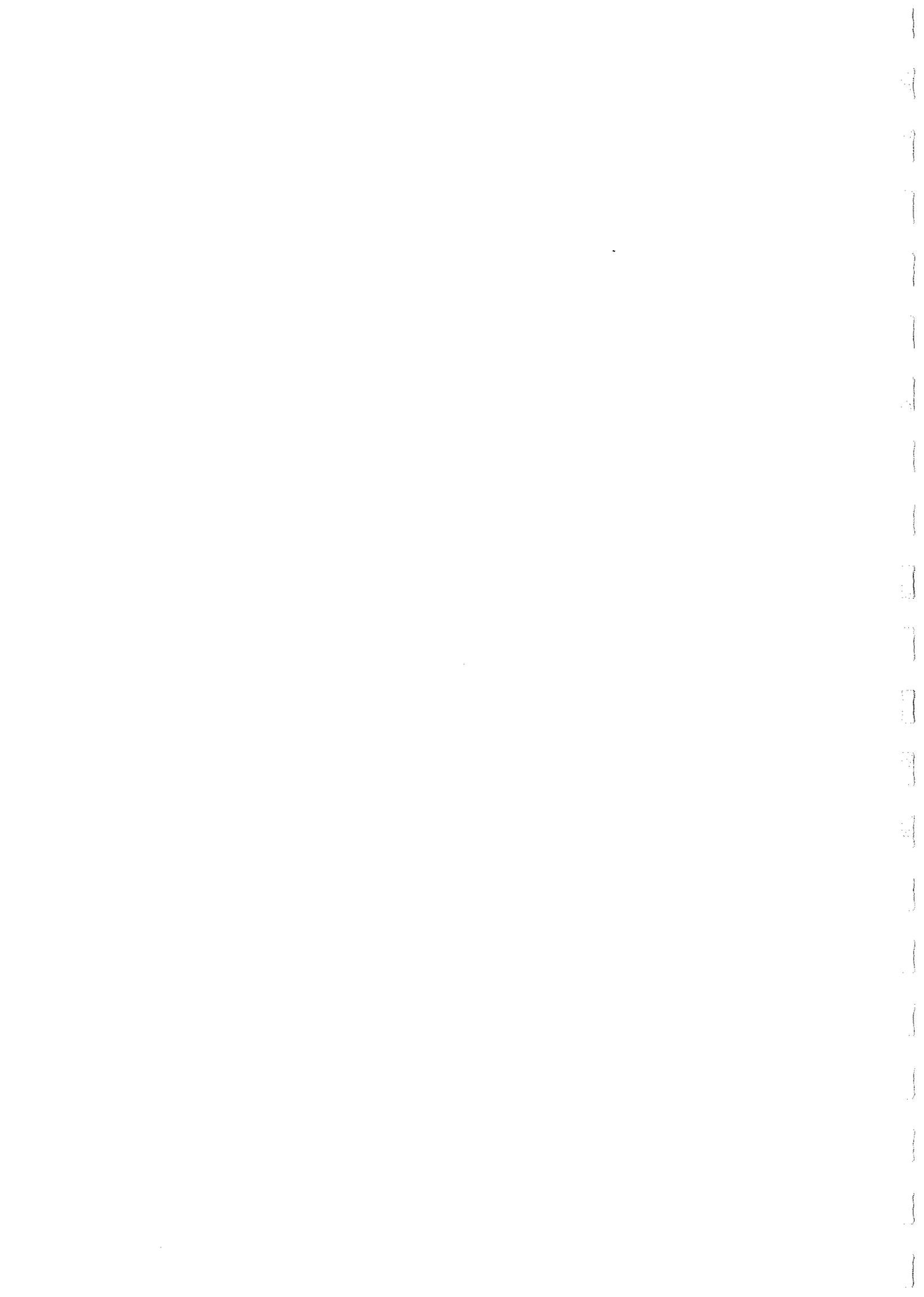
VI.2.2. Asservissement en vitesse des moteurs du robot

VI.2.3. Interface entre le système anticollision et les moteurs de la plate-forme

a. Mise en marche : émetteur-récepteur radio-électrique

b. Carte asservissement robot

## **VI.3. Architecture mécanique du robot**



## VI.1. Système de locomotion

### VI.1.1. Cahier des charges

Un déplacement d'une translation élémentaire  $\Delta l$  à vitesse constante du système visuel permet de réaliser un échantillonnage visuel sur  $360^\circ$  (cf. §IV.2.). A l'issue de ce déplacement, le système de navigation délivre un signal concernant la prochaine direction à prendre pour éviter des collisions avec les éventuels obstacles (cf. §V.1.). L'ensemble de ces deux systèmes (de vision et de navigation), confère une autonomie de décision à la plate-forme mobile qui les supporte. Cette plate-forme doit donc pouvoir être pilotée de façon à faire fonctionner l'ensemble dans les conditions d'étude définies au cours des chapitres précédents. Nous voulons qu'elle réponde au cahier des charges suivant :

- possibilité de rendre solidaire des roues directrices le support optique du système visuel;
- déplacement avant et arrière;
- rotation gauche et droite;
- commandes en vitesse séparées pour la rotation et la translation;
- encombrement réduit;
- énergie embarquée;
- possibilité d'embarquer une masse de plusieurs kilogrammes.

### VI.1.2. Description de la plate-forme mobile

La construction du support électromécanique ne faisait pas l'objet de notre projet de recherche. Nous avons utilisé une plate-forme du type "synchro-drive" (Holland, 1985) mise au point au Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) (Fig.VI-1).

#### VI.1.2.a. Mécanique

Cette base mobile circulaire holonomique, de type synchro-drive, comporte trois roues directrices et motrices commandées par deux moteurs indépendants, dits de "translation" et de "rotation". Cette plate-forme présente la particularité d'avoir un "corps" qui reste toujours orienté parallèlement à lui-même, quel que soit le mouvement de translation et de rotation. Un plateau circulaire horizontal surmonte la plate-forme et tourne avec les roues autour d'un axe vertical centré (Fig.VI-2).

Les déplacements en translation et en rotation de la plate-forme peuvent être commandés en vitesse de manière indépendante par deux signaux de commande externes. A cet effet, des entrées sont prévues pour des signaux analogiques. La commande de marche avant ou arrière et la commande de rotation gauche ou droite, s'effectuent toutes deux par des variations de signal de  $\pm 2,5$ Volts autour d'un point milieu de 2,5Volts.

Deux codeurs optiques solidaires des axes des moteurs sont utilisés dans les asservissements des moteurs.

Des batteries argent-zinc (12Volts, 24A.h.), d'une excellente capacité massique, fournissent l'énergie nécessaire à la propulsion.

Dimensions de la plate-forme mobile nue :

- diamètre hors tout 30cm
- hauteur hors tout 20cm
- diamètre de roue 8,25cm
- poids à vide 10kg
- charge autorisée 10kg

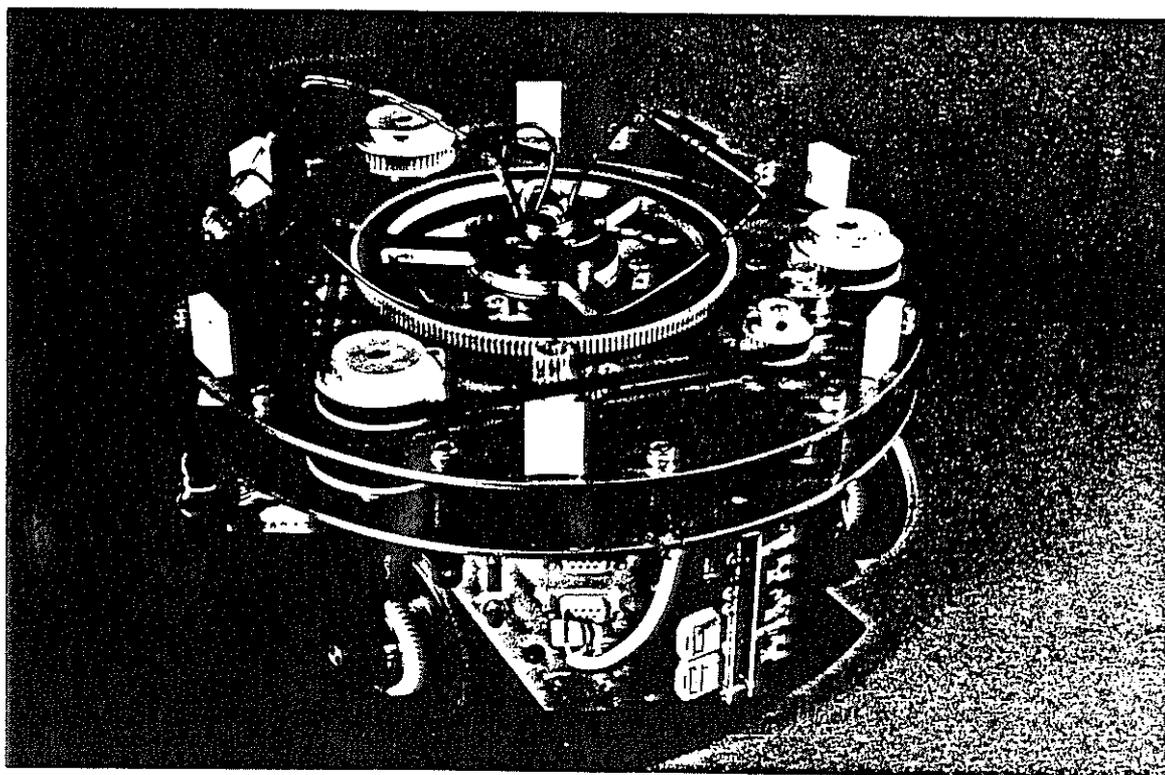
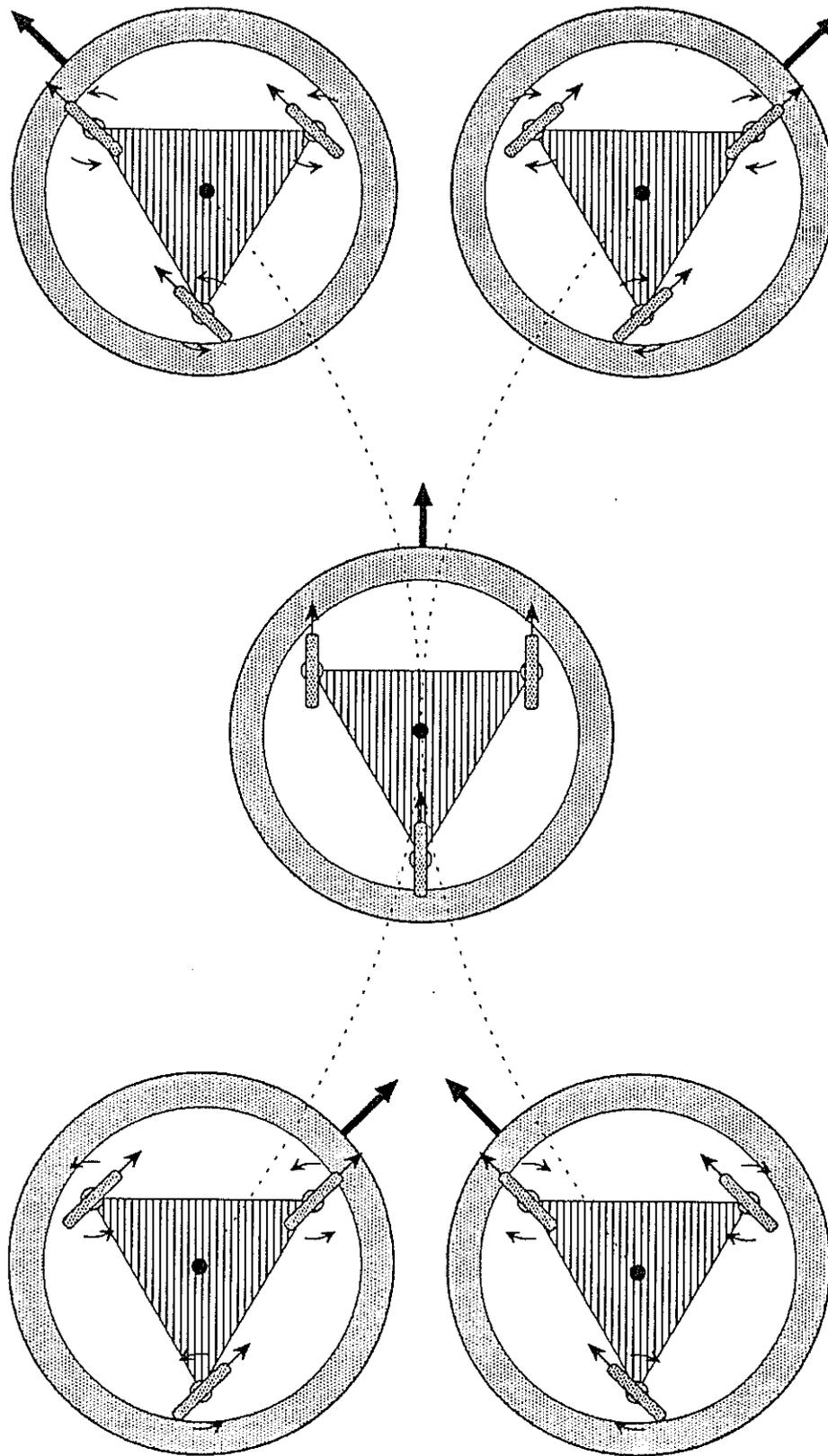


Fig. VI-1 : Plate-forme mobile, du type "synchro-drive".



**Fig.VI-2** : Pour illustrer le déplacement de la plate-forme holonomique utilisée, de type "synchro-drive". Le support mécanique (triangle hachuré) reste toujours parallèle à lui-même. Les trois roues sont orientées suivant la tangente à la trajectoire (pointillés), et sont solidaires du plateau supérieur (couronne en pointillés) sur laquelle est verrouillé le système visuel du robot.

### VI.1.2.b. Performances

Des enregistrements ont permis d'évaluer les performances de la plate-forme. Certaines étant jugées insuffisantes (en particulier la régulation de vitesse), nous avons demandé au constructeur de les modifier. Le système actuel est tel qu'il permet d'atteindre en charge, avec un poids équivalent au système visuel, sur le sol :

- en translation : une vitesse de  $\pm 1\text{m/s}$  avec une accélération de  $\pm 1,25\text{m/s}^2$  (Fig.VI-3-A)
- en rotation : une vitesse de  $\pm 90^\circ/\text{s}$  avec une accélération de  $\pm 180^\circ/\text{s}^2$  (Fig.VI-3-B).

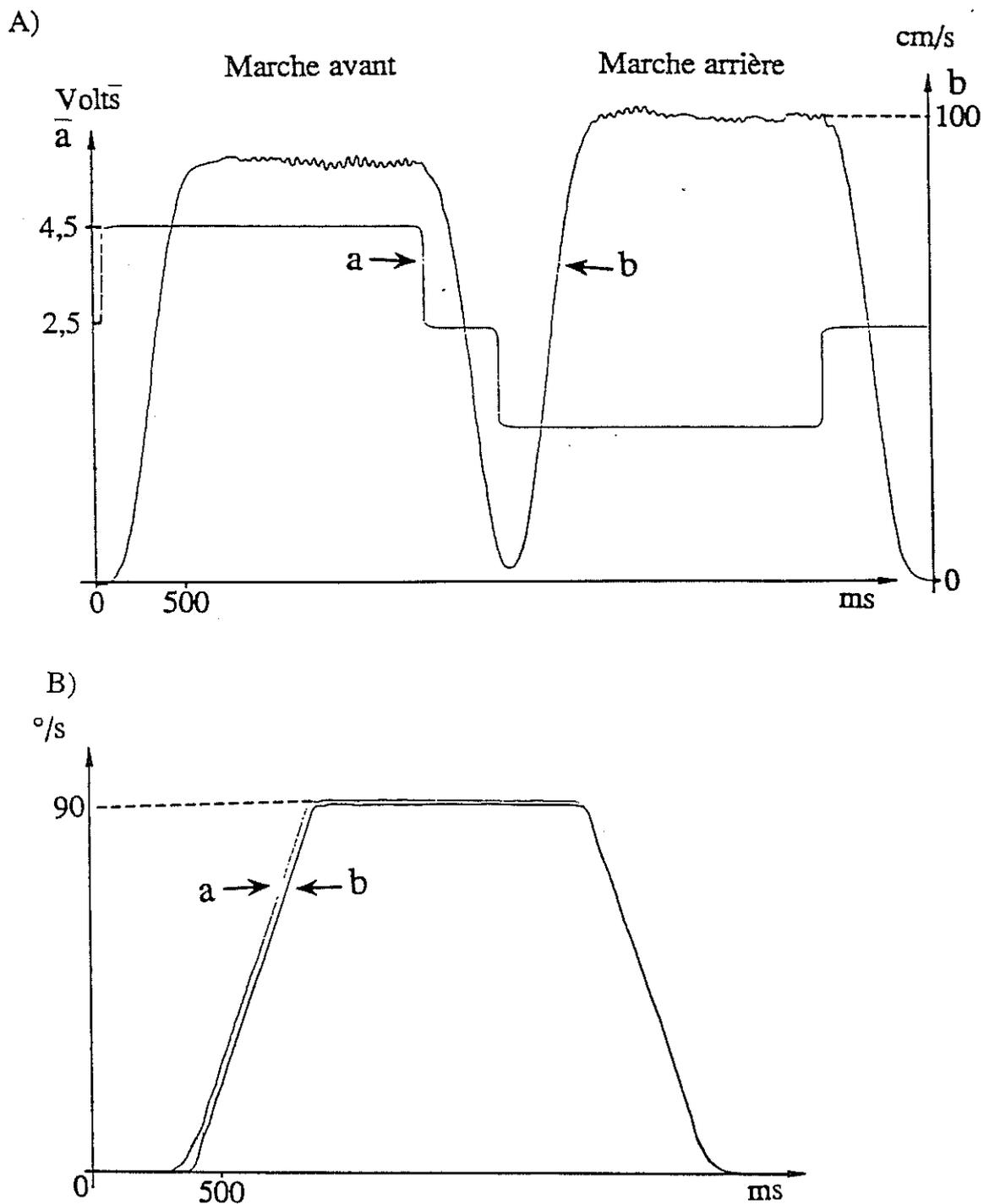
Les accélérations sont suffisamment "franches" et les asservissements en vitesse minimisent correctement le dépassement, quelle que soit la variation de vitesse réalisée. Ces caractéristiques permettent de contrôler la trajectoire de la plate-forme en réalisant une commande *en vitesse* des moteurs de translation et de rotation. Une connaissance du signal de commande suffit pour déduire la dynamique du système de sortie.

## VI.2. Commande en vitesse des moteurs du robot

### VI.2.1. Stratégie de déplacement

Les systèmes de vision et de navigation pilotent le robot par feed-back visuel en utilisant la mobilité de la plate-forme et repose sur le mode de locomotion suivant :

- 1- le robot démarre de manière rectiligne jusqu'à ce qu'il atteigne sa vitesse de croisière  $V_0$ ;
- 2- il se déplace d'une translation élémentaire, à vitesse constante  $V_0$ , durant laquelle est effectuée l'échantillonnage visuel par les D.E.M.s;
- 3- l'algorithme de navigation définit la nouvelle direction à suivre pour la prochaine translation élémentaire;
- 4- le robot effectue la rotation de façon à suivre la nouvelle direction;
- 5- il engage une nouvelle translation élémentaire à vitesse constante  $V_0$ .



**Fig.VI-3** : Signaux de vitesse des moteurs pour un fonctionnement de la plate-forme sur le sol (avec une charge de 2kg simulant l'ensemble du système sensoriel à installer).

A : Translation

a) signal de commande en vitesse et b) signal issu de la démodulation du codeur optique de translation

B: Rotation

a) signal issu de la démodulation du codeur optique de rotation, et ce pour une rotation dans le sens trigonométrique en réponse à un signal de commande en créneau.

b) idem à (a) pour une rotation dans le sens inverse.

### VI.2.2. Asservissement en vitesse des moteurs du robot

La stabilité de la vitesse de déplacement du robot est fondamentale pour son système visuel (le principe d'estimation en distance par les D.E.M.s reposant sur une vitesse quasi-constante de ceux-ci). La mobilité de la plate-forme doit donc être contrôlée par un asservissement en vitesse de ses moteurs (Fig.VI-4). Des simulations de manoeuvres de braquage, tenant compte des paramètres cinématiques de la plate-forme (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.V), ont été effectuées au préalable et ont conduit à la procédure décrite ci-dessous.

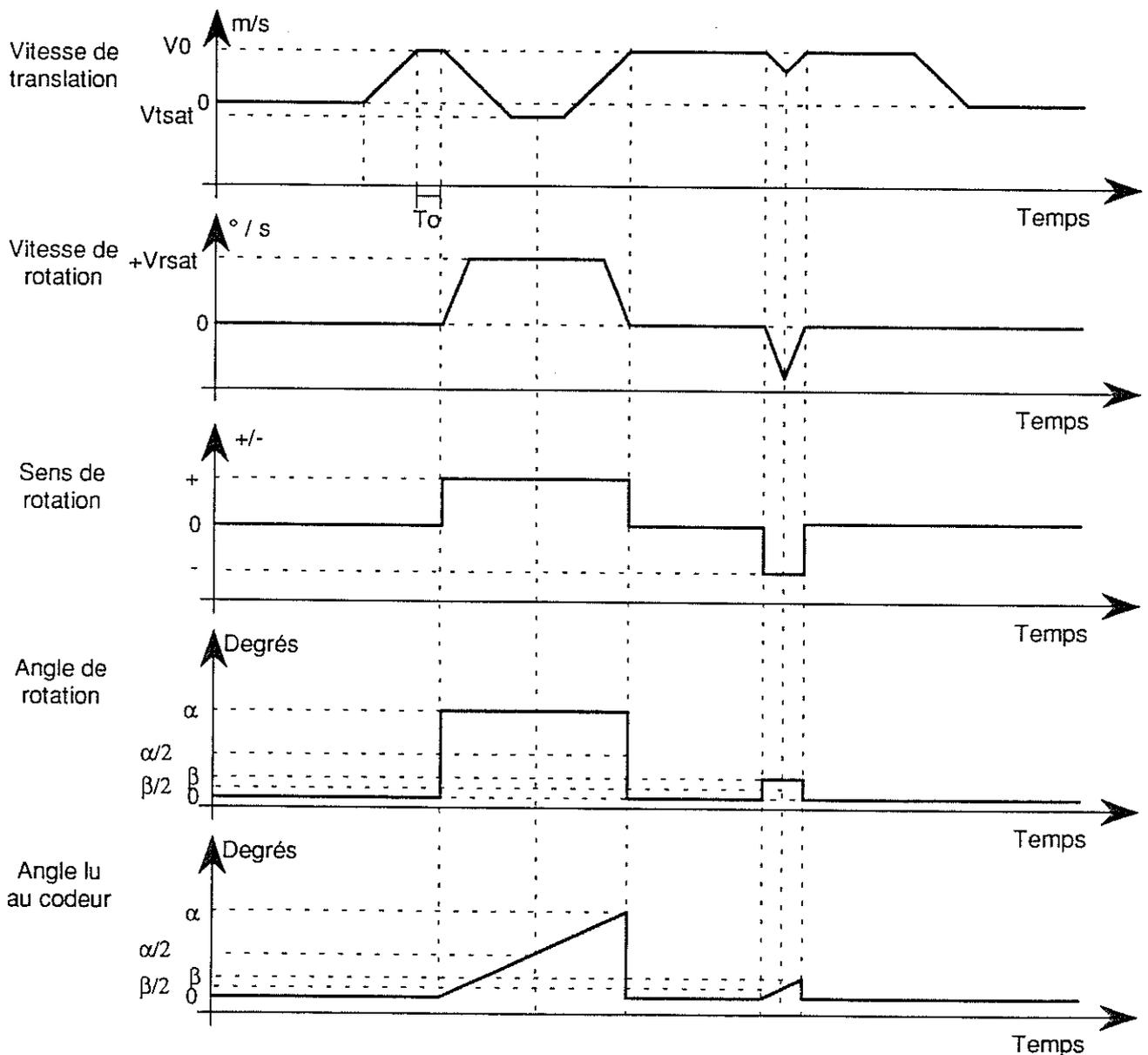


Fig.VI-4 : Chronogramme de l'asservissement en vitesse du déplacement du robot.

Le démarrage du robot se fait à accélération constante jusqu'à ce qu'il atteigne sa vitesse de croisière  $V_0$ . La dynamique de déplacement du robot étant contrôlée par un asservissement (déjà existant sur la plate-forme), un seuil placé sur le signal rampe de commande du moteur de translation permet de connaître le moment où le robot a atteint sa vitesse  $V_0$ . L'accélération linéaire est alors stoppée et le robot continue à vitesse constante pendant une translation élémentaire de durée  $T_0$  constante. A la moitié de  $T_0$ , une réinitialisation des Zones Autorisées de l'algorithme anticollision est effectuée.

Pour braquer à la suite d'une translation élémentaire, le robot ne stoppe pas nécessairement. Il prend en considération la valeur de l'angle de braquage et le sens de rotation, et effectue des changements en conséquence, de sa vitesse de translation  $V_t$  et de sa vitesse de rotation  $V_r$  (toujours à accélération maximale). Ces variations sont réalisées de manière symétrique (décélération puis accélération) autour de la moitié de la valeur de l'angle à tourner. La valeur de l'angle de rotation effectué depuis le début de la rotation est mesurée par un codeur optique solidaire du moteur de rotation. Cette lecture définit précisément le demi-angle de rotation, par comparaison entre la moitié de la valeur de commande et celle du codeur. La mécanique de la plate-forme fixe les limites d'accélération, de décélération, et de vitesses de rotation et de translation du robot lors de cette opération. Les décélérations peuvent le conduire à reculer jusqu'à ce qu'il atteigne une vitesse de translation de saturation  $V_{tsat}$ . Cette valeur  $V_{tsat}$  suit une loi qui est fonction de la valeur de l'angle de rotation. Cette loi a été définie afin de minimiser la surface au sol de la trajectoire (cf. Thèse J.M. Pichon, Chap.V) car le braquage est une opération réalisée "en aveugle", et par conséquent dangereuse.

Une fois cette rotation effectuée symétriquement autour du demi-angle de rotation, le robot prend la nouvelle direction à sa vitesse de croisière  $V_0$ . Il engage donc une nouvelle translation élémentaire.

Dans le cas où l'on impose au robot de s'arrêter (par radiocommande), celui-ci termine sa translation élémentaire, puis réalise sa rotation. Un chronogramme illustre la procédure d'arrêt selon le moment choisi pour stopper (Fig.VI-5). Ce choix laisse la possibilité de faire repartir le robot dans les conditions de son arrêt qui sont des conditions sûres vis-à-vis des obstacles (supposés ici stationnaires).

Dans le cas où un arrêt d'urgence s'impose, le robot reçoit l'ordre de s'immobiliser le plus rapidement possible sans achever sa translation élémentaire.

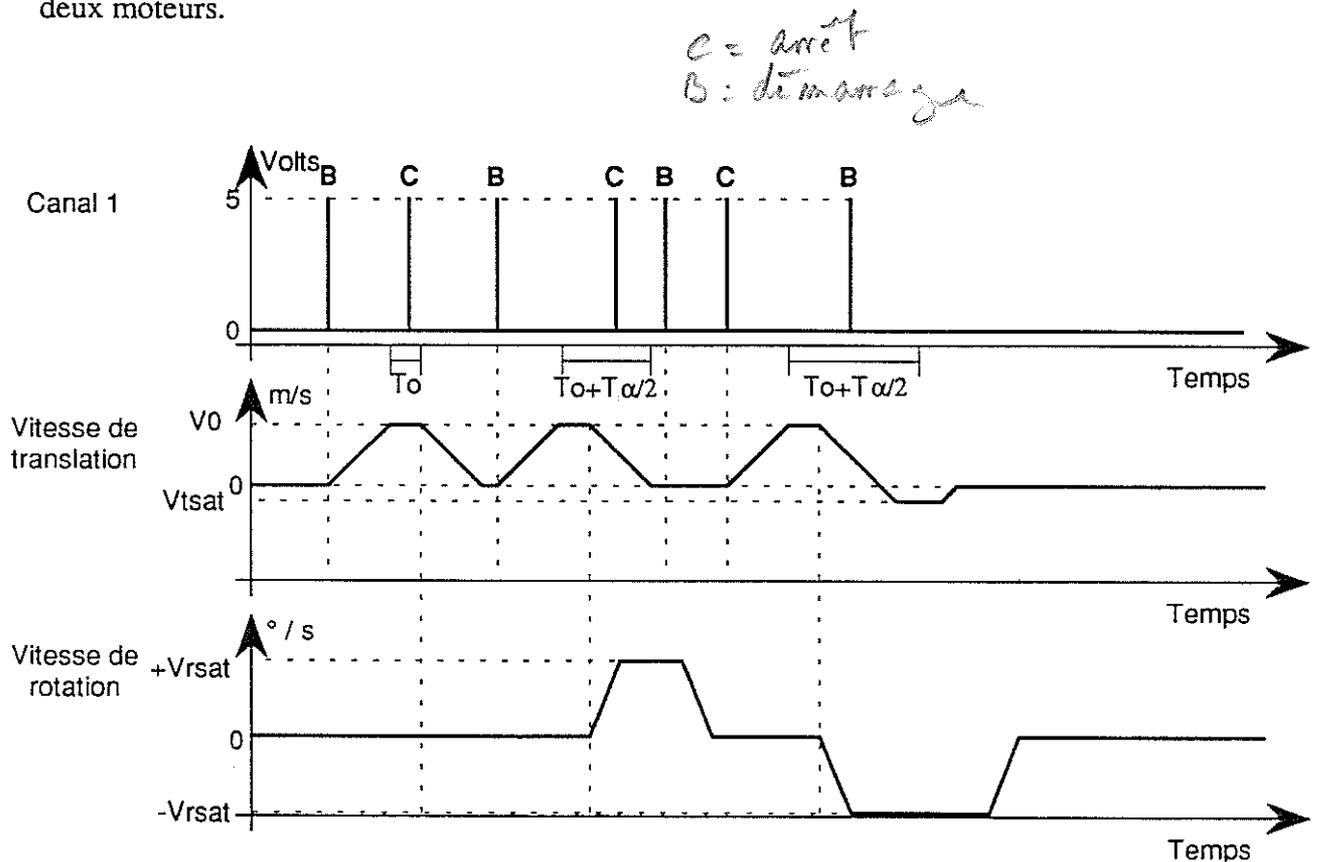
### VI.2.3. Interface entre le système anticollision et les moteurs de la plate-forme

#### VI.2.3.a. Mise en marche : émetteur-récepteur radio-électrique

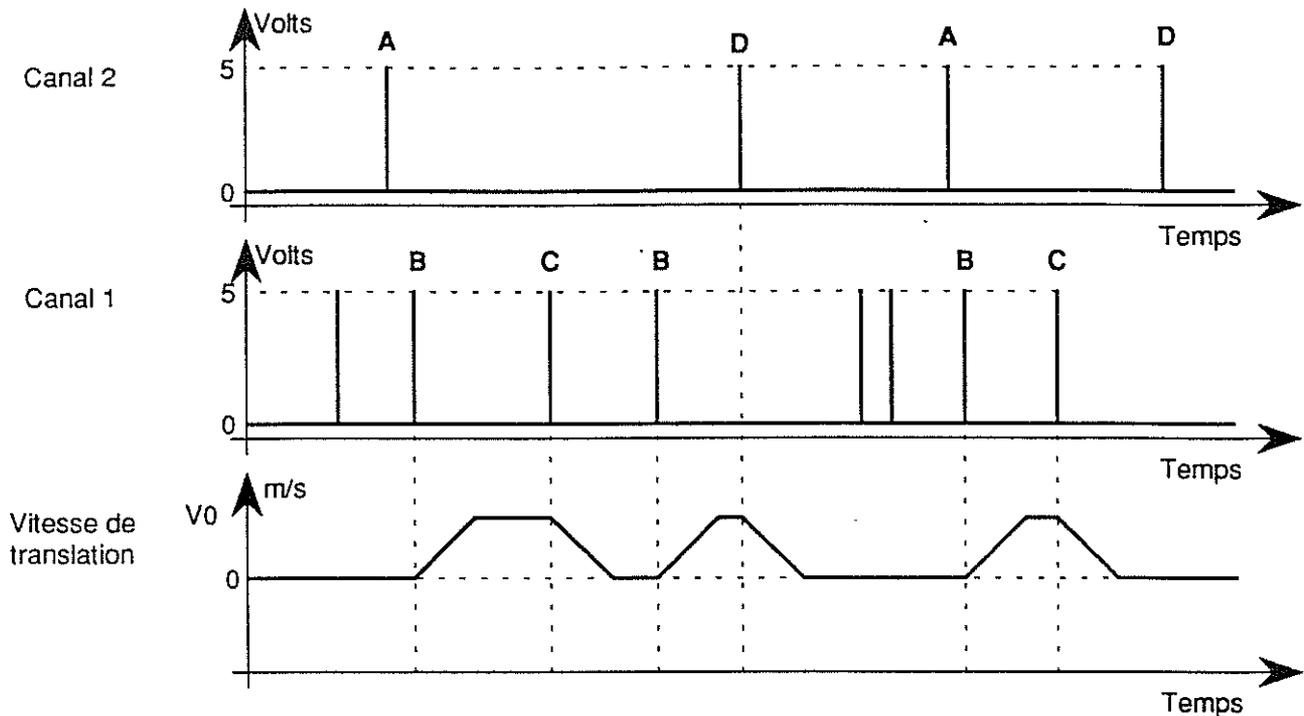
Nous avons incorporé au robot un émetteur-récepteur radio-électrique à 2 canaux, qui assure sa mise en marche (Fig.VI-6) et son arrêt à distance :

- le canal 1 déclenche la procédure, soit de déplacement, soit d'arrêt à la fin d'une translation élémentaire du robot (Fig.VI-5);

- le canal 2 joue le rôle d'autorisation ou d'interdiction du fonctionnement de l'autre canal. Lorsque le robot est prêt à fonctionner, il faut actionner ce canal pour que l'autre devienne opérationnel. Lorsque le robot se déplace, son activation stoppe immédiatement les deux moteurs.



**Fig.VI-5** : Chronogramme illustrant la procédure d'arrêt du robot.  $T_0$  représente le temps nécessaire pour effectuer une translation élémentaire.  $T_{\alpha/2}$ , respectivement  $T_{\alpha}$ , représente le temps nécessaire pour effectuer une rotation d'un angle  $\alpha/2$ , respectivement  $\alpha$ . Sur le canal 1, une impulsion fait démarrer (B) puis arrêter (C) le robot. Lorsque l'arrêt est demandé pendant  $(T_0 + T_{\alpha/2})$ , le robot stoppe comme illustré. Lorsque l'arrêt est demandé pendant  $(T_{\alpha/2} + T_{\alpha})$ , le robot stoppe après la prochaine translation élémentaire et selon l'illustration.



**Fig. VI-6 :** Chronogramme de fonctionnement des canaux de mise en marche du robot. Après l'impulsion A sur le canal 2, le robot démarre lors d'une impulsion B sur le canal 1, s'arrête lors d'une nouvelle impulsion C sur ce même canal, redémarre lors d'une autre impulsion B... Une deuxième impulsion D sur le canal 2 arrête immédiatement le robot dont le redémarrage exige une nouvelle impulsion A.

### VI.2.3.b. Carte asservissement robot

Le système de contrôle-commande gérant la navigation est implanté sur une carte électronique, interface entre le système anticollision et les moteurs de la plate-forme. Cette carte coordonne des signaux issus de différents modules (Fig. VI-7) :

- les signaux issus du récepteur radio-électrique : mise en marche et arrêt du robot (Canal 1 et Canal 2);
- les signaux issus de la plate-forme : commandes des 2 moteurs (vitesse de translation et vitesse de rotation), marche-arrêt, codeur optique asservi au moteur de rotation (Angle lu au codeur);
- les signaux issus du système anticollision : prise en compte de la valeur et du sens de l'angle de rotation après une translation élémentaire, réinitialisation des zones autorisées et interdites à la moitié de la translation élémentaire (R.A.Z.).

Comme tous les modules électroniques du robot, cette carte a été réalisée en suivant les contraintes technologiques imposées (cf. §II.3.2.; Fig. VI-8). Elle incorpore entre autres le circuit d'alimentation (régulateurs) de toutes les autres cartes. La tension de 13,5Volts provenant des accumulateurs du robot est convertie en alimentations stabilisées  $\pm 12$ Volts et 5Volts.

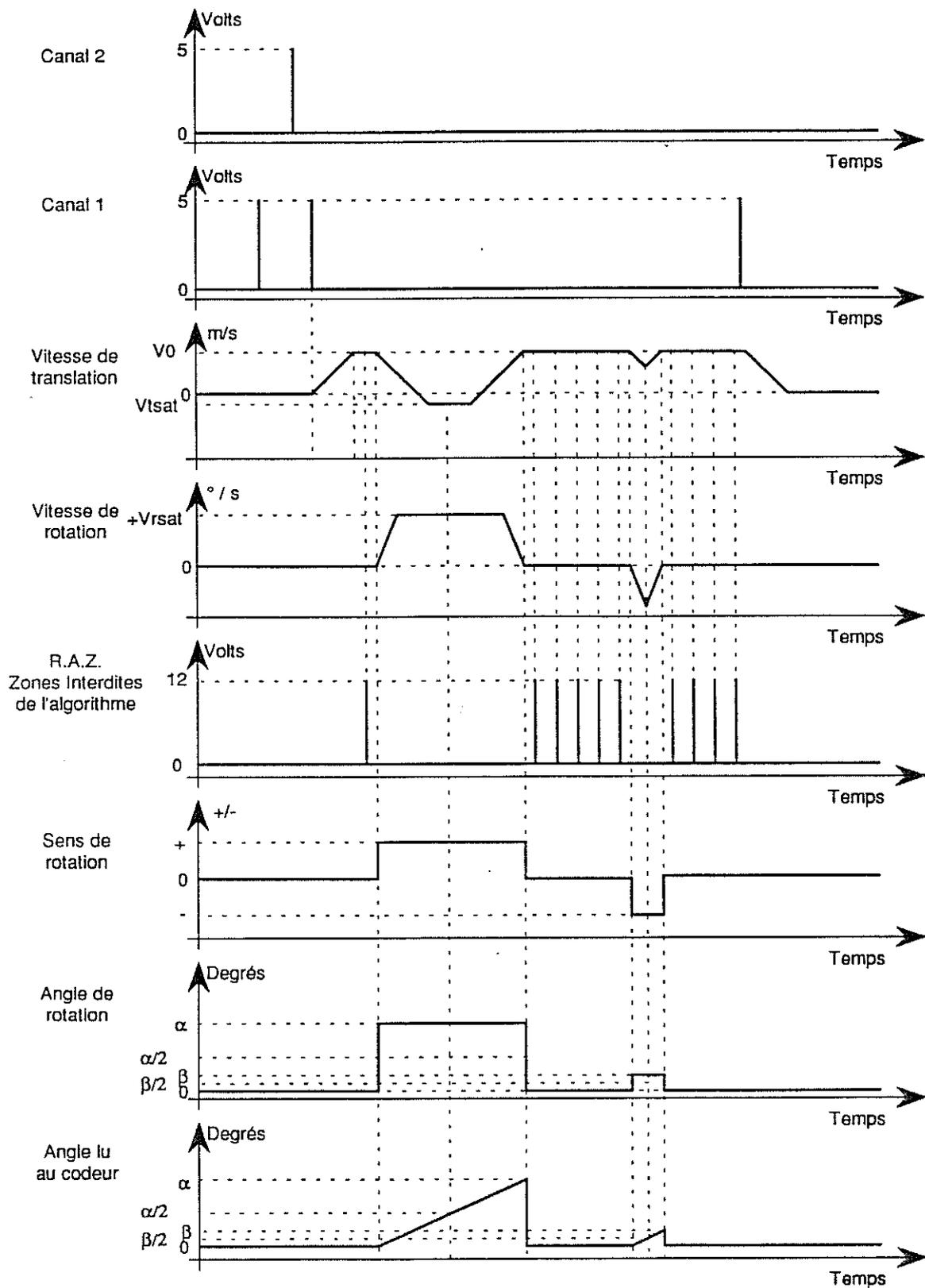


Fig.VI-7 : Chronogramme de fonctionnement des signaux d'entrée-sortie de la carte asservissement robot.

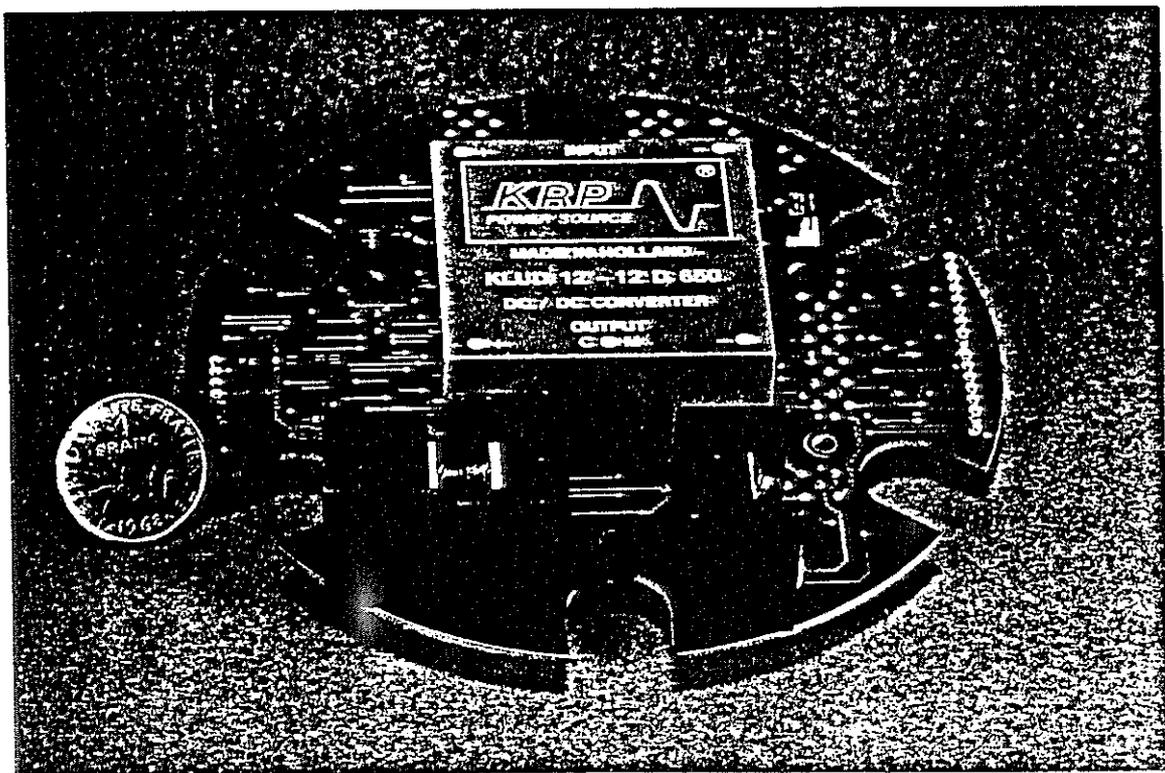
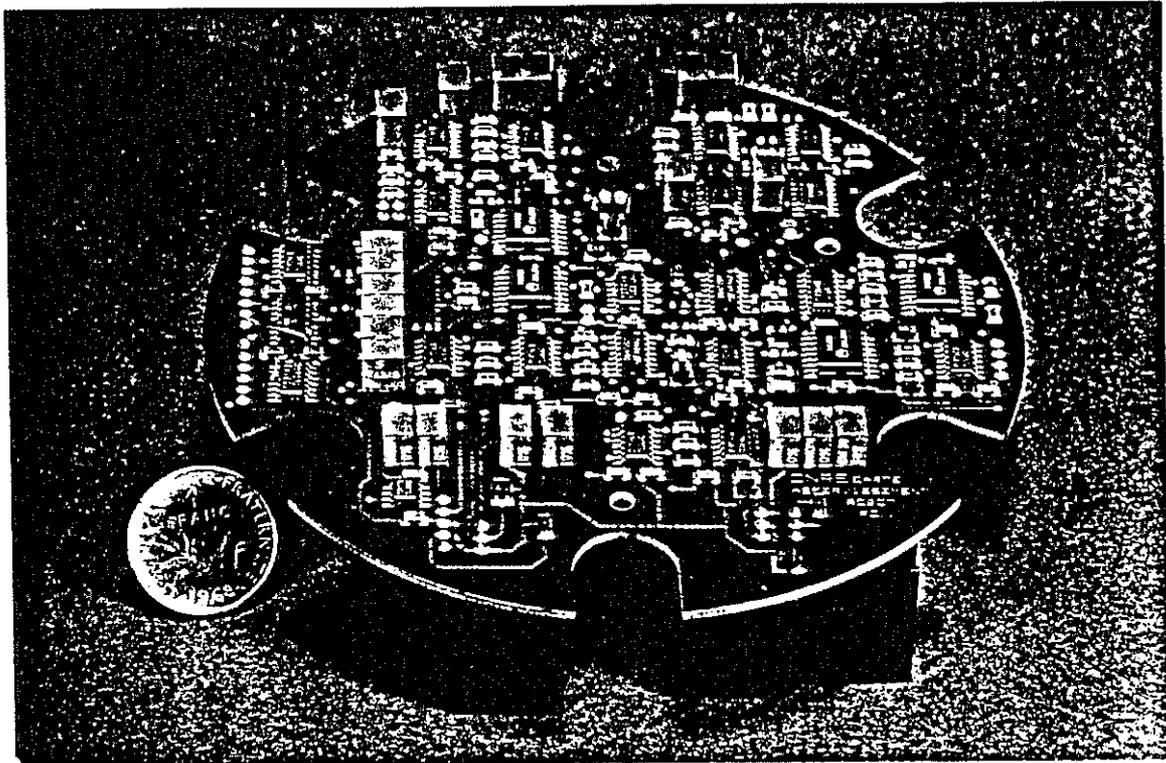


Fig. VI-8 : Photo des deux faces de la carte asservissement

### VI.3. Architecture mécanique du robot

Le prototype de robot s'insère dans un volume cylindrique de 30cm de diamètre sur 50cm de hauteur (Fig.VI-9). Il est composé de deux grandes parties :

- une plate-forme mobile posée sur le sol (support mécanique et moteur assurant le système de locomotion);
- un dispositif opto-électronique placée sur la plate-forme (support du système visuel et du système de navigation).

Les divers sous-systèmes, schématisés en place à la Fig.VI-9, ont été décrits précédemment, à savoir :

- PF- la plate-forme mobile (cf. §VI.1.2.);
- S1- le support optique de l'oeil D.E.M. (cf. §IV.1.3.);
- E1- le support électronique du réseau de D.E.M.s (cf. §IV.1.2.);
- S2- le support optique du détecteur de cible (cf. §IV.2.2.);
- E2- la carte électronique du détecteur de cible (cf. §IV.2.3.);
- E3- la carte électronique de l'algorithme anticollision (cf. §V.3.);
- E4- la carte électronique de l'asservissement moteur (cf. §VI.2.).

Les supports optiques S1 et S2 étant polarisés, ils doivent être verrouillés à la direction de déplacement. A cet effet, ils sont rendus solidaires de la plaque supérieure, P1, de la plate-forme, elle-même solidaire de la direction des trois roues. De ce fait, l'ensemble du dispositif électronique de vision et de navigation est fixé sur cette plaque. S1 et E1 sont fixés concentriquement à même la plaque P1. Une plaque P2 supporte les autres sous-systèmes. Usinée à un diamètre externe de 17cm dans un matériau rigide et léger (fibres de carbone d'épaisseur 2mm), elle est fixée de manière concentrique à P1 par l'intermédiaire de six colonnes légères en DELRIN, de hauteur 11cm et de diamètre 10mm, disposées de manière équidistante sur un diamètre de 9cm. P2 supporte E3 sur sa face supérieure et porte E4 sur sa face inférieure. Un trou de 4cm de diamètre percé en son centre permet de fixer une douille supportant un tube télescopique en alliage léger, de longueur ajustable, entre 10 et 20cm, orienté verticalement. S2 se trouve fixé à l'extrémité supérieure de ce tube, et rendu ainsi concentrique à P1. S2 supporte E2.

La Fig.VI-9 montre le flux d'information entre ces divers sous-systèmes. Depuis chaque ommatidie de S1, une fibre optique se connecte à la photodiode d'un module élémentaire assurant l'échantillonnage dans une direction de visée. Ces cartes sont enfichées sur la carte-mère qui assure les interconnexions nécessaires au fonctionnement des D.E.M.s. Chacune des 96 sorties de D.E.M. alimente une entrées de E3. De même, les 96 sorties de E2, assurant la détection de la position de la cible, sont connectées en parallèle à 96 autres entrées de E3. Les deux uniques signaux de sortie de E3, correspondant respectivement à l'angle de braquage

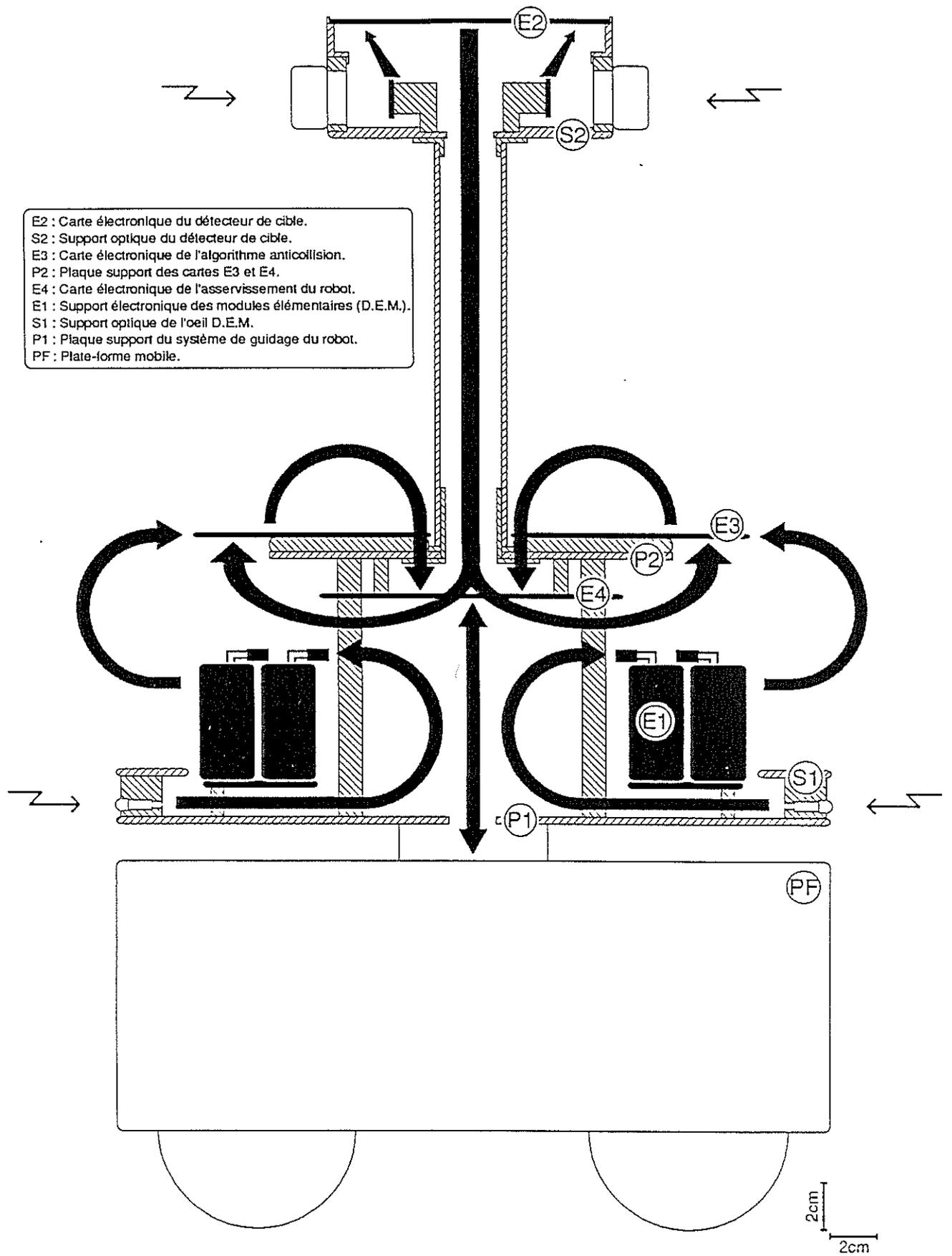


Fig.VI-9 : Architecture et flux d'information du prototype de robot mobile

nécessaire avant la prochaine translation et à son sens (vers la gauche ou vers la droite du robot), entrent sur E4. La carte finale E4 ne possède que deux sorties, pilotant les deux moteurs de la plate-forme mobile, qui renvoient eux-mêmes à E4 un signal de mesure de la rotation réalisée.

Remarque importante :

A ce jour, l'assemblage complet du prototype avec ses divers éléments constitutifs vient juste d'être terminé (Fig.VI-10). Son réglage est en cours et en conséquence aucun relevé de trajectoire n'a pu être effectué. Par ailleurs, un problème de découplage de l'alimentation des moteurs et du dispositif sensoriel reste à résoudre.

On a pu cependant vérifier que le prototype fonctionne sur le sol avec uniquement le détecteur de cible, et les premiers essais du robot équipé du détecteur de cible et d'un seul D.E.M. opérationnel, ont été concluants.

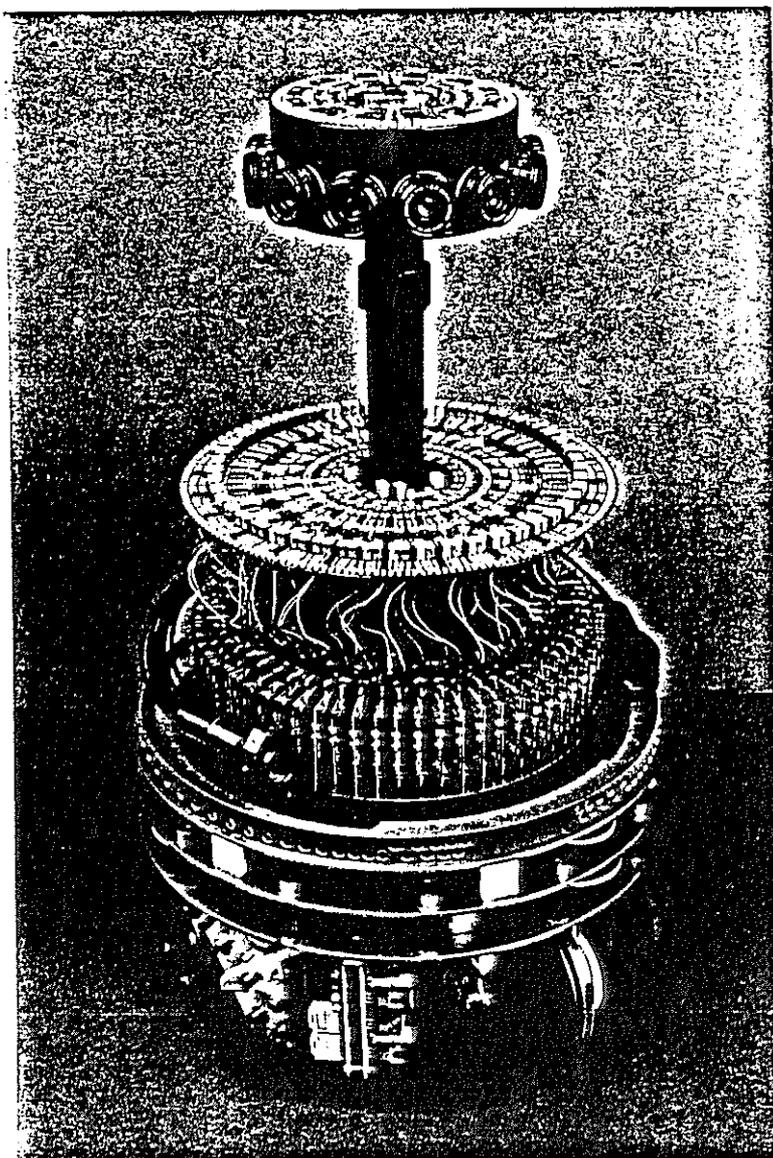


Fig.VI-10 : Le prototype du robot mobile autonome à guidage purement visuel.

*CHAPITRE VII*

*CONCLUSION*



## VII.1 Résumé des principaux dispositifs électroniques de la chaîne optométrice du robot

VII.1.1. Dispositif sensoriel (cf. Chapitres III et IV)

VII.1.2. Dispositif anticollision (cf. Chapitre V)

VII.1.3. Dispositif d'asservissement de la plate-forme mobile (cf. Chapitre VI)

## VII.2. Aspects liés à la conception et la réalisation du prototype

VII.2.1. Aspect détection du mouvement : mesure de vitesse angulaire

VII.2.2. Aspect optique

VII.2.3. Aspect traitement parallèle : interconnexions, fusion multisensorielle

VII.2.4. Aspect énergétique

VII.2.5. Aspect intégration des divers sous-systèmes

Fig. VII-1 : Le robot mobile autonome.  
Diamètre 30cm; hauteur 50cm; poids 12kg.

Ce mémoire a présenté l'élaboration opto-électronique de la chaîne sensori-motrice d'un robot mobile autonome, de faibles dimensions, à guidage purement *visuel* (Fig. VII-1). Le prototype met en oeuvre une interface parallèle entre une centaine d'entrées visuelles et une seule sortie, qui indique par un signal analogique l'amplitude de l'angle de braquage. Ce robot présente la particularité de s'inspirer des systèmes nerveux animaux, et en particulier de celui de la mouche, tant sur le plan traitement du signal en temps réel que sur le plan architecture parallèle. Le prototype représente la finalité de l'étude, assurant concrètement la validation des principes de guidage du robot.

Nous avons voulu développer un robot capable d'éviter les obstacles lorsqu'il se déplace dans un environnement inconnu. En tant que tel, ce robot ne fait que résoudre, de manière illustrative et grossière, un problème de la robotique mobile "temps réel". En revanche, un tel robot est prêt à recevoir, d'un niveau supérieur, une instruction lui assignant une mission précise. En prenant comme exemple une tâche de suivi de cible (imposée par un système visuel accessoire), nous avons illustré la manière dont un tel robot peut *fusionner* (par un traitement parallèle) deux informations dont l'une, liée à la survie, a une priorité absolue. Il va sans dire que cette tâche de suivi de cible pourrait faire place à d'autres tâche, comme par exemple, le suivi d'une carte mémorisée de l'environnement, la construction d'une carte spatiale de l'environnement, la navigation planifiée à longue distance, etc.... L'approche "bas niveau" que nous avons suivie tout au long de ces travaux a montré que, malgré l'absence de mémoire à bord, il est possible pour un véhicule de se déplacer dans un champ d'obstacles et même de suivre une cible en mouvement, tout en donnant la priorité absolue à l'évitement d'obstacles.

## VII.1 Résumé des principaux dispositifs électroniques de la chaîne optomotrice du robot

Le prototype a permis d'élaborer un certain nombre de concepts liés au traitement de signal parallèle (optique, architecture, calcul, réseaux), lors de la conception puis de la réalisation de chacun de ses sous-systèmes, qui font l'objet des divers chapitres de ce mémoire. Les étapes de traitement de la chaîne optomotrice, qui se décompose en trois principaux dispositifs électroniques (cf. Fig.VI-9), sont résumées ci-dessous.

### VII.1.1 Dispositif sensoriel (cf. Chapitres III et IV)

Un système visuel, appelé oeil D.E.M. (cf. Fig.IV-14), basé sur un réseau de Détecteurs Élémentaires de Mouvement implémentés sur des mini-cartes électroniques individuelles, génère une centaine de signaux à partir d'entrées visuelles obtenues par un échantillonnage panoramique mais *non-uniforme* du plan azimutal. C'est l'ensemble de ces signaux qui assure la détection des obstacles lors du déplacement du prototype dans un environnement inconnu.

Chacun de ces signaux provient d'une direction de visée supposée connue à bord du robot et l'amplitude de chacun d'eux permet une mesure de la distance radiale du contraste détecté autour du robot.

Un second système visuel, totalement indépendant du précédent, appelé "détecteur de cible" (cf. Fig.IV-22), génère également une centaine de signaux, à partir d'entrées visuelles obtenues par un échantillonnage *uniforme* sur les 360° du plan azimutal. Contrairement aux signaux (analogiques) délivrés par l'oeil D.E.M., les signaux délivrés par le détecteur de cible sont binaires. Un seul d'entre eux est au niveau haut : celui dont l'entrée visuelle détecte la présence de la cible, matérialisée ici par une lampe située au dessus de tous les obstacles.

### VII.1.2. Dispositif anticollision (cf. Chapitre V)

Un système de navigation assurant l'évitement d'obstacles est implémenté sur une carte électronique sous la forme d'un réseau de traitement parallèle (cf. Fig.V-5). Il fusionne les multiples signaux que lui fournissent ses deux yeux en un unique signal analogique dont l'amplitude représente l'angle de braquage à adopter pour se diriger vers la cible, même mouvante, tout en évitant les obstacles rencontrés en chemin (cf. Fig.V-3). Cette convergence de signaux est réalisée grâce à des réseaux électroniques passifs faisant appel uniquement à des résistances et à des diodes ainsi qu'à des couronnes de composants analogiques actifs (amplificateurs opérationnels).

### VII.1.3. Dispositif d'asservissement de la plate-forme mobile (cf. Chapitre VI)

Un traitement de signal permet d'asservir le déplacement de la plate-forme mobile à partir de l'unique signal de sortie du système anticollision (selon un protocole de fonctionnement, cf. Fig.VI-7). Il assure une commande en vitesse des moteurs de translation et de rotation du robot.

## VII.2. Aspects liés à la conception et à la réalisation du prototype

### VII.2.1. Aspect détection du mouvement : mesure de vitesse angulaire

Un dispositif opto-électronique de mesure de la vitesse angulaire liée au mouvement relatif d'un front de contraste a été mis au point : le Détecteur Élémentaire de Mouvement (D.E.M.). Développé ici spécifiquement pour le système visuel basse résolution du robot, un D.E.M. pourrait servir à d'autres fonctions nécessitant une mesure de la vitesse angulaire (par exemple pour contrôler, de l'extérieur, la vitesse de ce même robot ... ou de tout autre véhicule).

Rappelons que le principe de fonctionnement de l'oeil D.E.M. nécessite un déplacement rectiligne à vitesse constante du robot. De ce fait, toute *rotation* intempestive du robot (provoquée par le sol, ou la mécanique) pendant la mesure se traduit par un accroissement apparent de la vitesse angulaire liée au mouvement relatif de l'environnement, accroissement qui entraîne des erreurs de mesure des D.E.M.s. Les D.E.M.s les plus frontaux (ayant les plus petits angles interommatidiaux) sont les plus sensibles à ce type de fluctuation qui apparaît comme un "bruit de mouvement". C'est l'amplitude maximale et la fréquence de ces fluctuations, qui viennent limiter la résolution angulaire du système visuel. Il ne serait donc possible d'augmenter la résolution que dans la mesure où :

- la distribution angulaire en gradient serait bornée dans la zone frontale du robot par un angle interommatidial supérieur à l'amplitude maximale des rotations intempestives;
- la fréquence des fluctuations serait en dehors de la bande passante du D.E.M..

Au vu des premiers essais du prototype complet, il est possible de conclure que la distribution angulaire choisie pour les directions de visée du robot, qui descend jusqu'à un angle interommatidial de l'ordre de  $1^\circ$ , est compatible avec le bruit lié aux fluctuations de la trajectoire lors du déplacement du robot en translation élémentaire.

### VII.2.2. Aspect optique

L'optique de l'oeil D.E.M. (cf. Fig.IV-13), composée de mini-lentilles, tire son inspiration de la structure en ommatidies de l'oeil composé de la mouche. Ce système optique multifacettes permet de construire facilement et à la demande un champ visuel panoramique, tout en offrant la possibilité de régler individuellement le champ visuel relatif à chaque direction de visée (cf. §III.2.3.).

L'échantillonnage sur  $360^\circ$  du plan azimutal évoqué tout au long de cette étude, fait abstraction du fait que le champ visuel de chaque ommatidie s'étend verticalement. Cette hypothèse reste vraie car rappelons que l'environnement de ce robot expérimental se résume à une texture de bandes verticales dont la hauteur couvre toujours l'étendue verticale du champ visuel d'une ommatidie.

Le système optique pourrait être étendu à un échantillonnage vraiment omnidirectionnel, comme celui que réalise l'oeil composé de la mouche. Dans un tel cas, la détection du mouvement se ferait en suivant les propriétés du flux optique et imposerait encore des architectures en gradient, réalisables cette fois non plus par une couronne mais par une sphère de D.E.M.s.

### VII.2.3. Aspect traitement parallèle : interconnexions, fusion multisensorielle

Les paramètres de l'oeil D.E.M. ont été réglés pour un déplacement du robot à une vitesse de 50cm/s, vitesse dictée essentiellement par les performances électro-mécaniques de la plate-forme utilisée. Ce n'est pas le système visuel qui a imposé la limite de vitesse de déplacement du robot, car son principe de traitement parallèle présente comme seule contrainte, un déplacement à vitesse linéaire constante d'une translation élémentaire dont la longueur dépend de la résolution angulaire choisie. L'oeil D.E.M. ne réalise aucun *balayage* de la scène visuelle et n'effectue pas d'analyse *séquentielle* de ses signaux d'entrée. C'est la raison pour laquelle un système de vision basé sur les mêmes principes de traitement parallèle, avec le même type de distribution angulaire (en gradient) des directions de visée, pourrait, en principe, fonctionner sur un robot (ou quelque autre système mobile) se déplaçant à vitesse beaucoup plus élevée.

Le traitement parallèle nécessite de nombreux mélanges de signaux issus de plusieurs entrées, ce qui pose le problème de leurs interconnexions. L'algorithme de navigation du robot, qui repose sur des principes de calcul parallèle, a pu être implémenté grâce à des réseaux (la plupart bouclés) de composants passifs (cf. §V.3.). Nous avons montré que des réseaux de résistances et de diodes peuvent apporter des solutions simples et fiables pour la fusion multisensorielle, car leur architecture permet de réaliser de manière intrinsèque des interconnexions massives. Ces réseaux ont le mérite d'illustrer des principes de calcul parallèle fortement inspirés de propriétés neuronales (cf. §II.4.).

### VII.2.4. Aspect énergétique

Transporter "sur soi" toute l'énergie nécessaire au système moteur, aux systèmes sensoriels et décisionnels est une propriété spécifique aux animaux et aux robots mobiles *autonomes*. Si le problème de minimiser la consommation des moteurs et de réduire le poids des accumulateurs est classique en robotique mobile, on ne saurait taire le problème de la consommation du système sensoriel et de l'électronique du système décisionnel, qui sont dans certains cas loin d'être négligeables, notamment lors de l'utilisation de détecteurs actifs tels que sonar, télémètre laser ...

Le système sensoriel, développé dans le cadre de cette étude, repose sur des capteurs photoélectriques *passifs* (photodiodes PIN), de consommation négligeable.

La réalisation de l'architecture parallèle a imposé non seulement l'utilisation de composants à faible consommation mais aussi une minimisation des étages de traitement câblés derrière chaque direction optique. La consommation de l'électronique de l'algorithme

de calcul est réduite car il est implémenté essentiellement sur des réseaux passifs. La consommation de l'ensemble du système de guidage se chiffre par rapport au nombre d'amplificateurs opérationnels et à leur consommation propre. Ainsi, trouve-t-on derrière chaque ommatidie une puissance consommée de 40mWatts pour la détection du mouvement et de 30mWatts pour l'algorithme. La partie opto-électronique du système de guidage a une consommation totale voisine de 10Watts. De ce fait, la capacité énergétique des batteries (288Watts-heure) embarquées sur le robot est suffisante pour l'autonomie du prototype.

#### VII.2.5. Aspect intégration des divers sous-systèmes

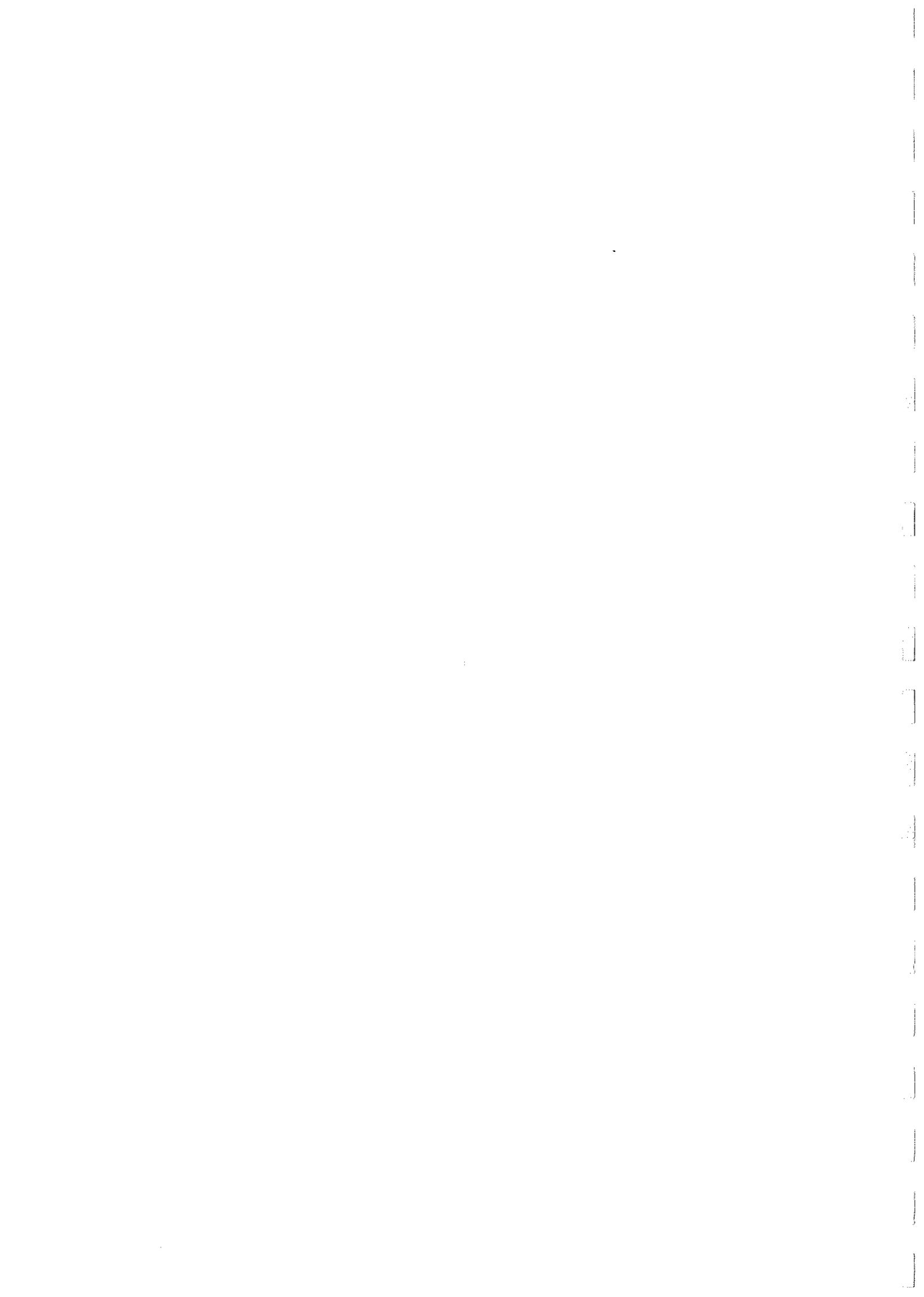
Nous avons délibérément opté pour un prototype de *faibles* dimensions, malgré toutes les difficultés technologiques relatives à cette contrainte :

- le système visuel principal (oeil D.E.M.) tient dans un cylindre de diamètre 30cm, de hauteur 7cm et ne pèse que 1kg (cf. Fig.IV-14).
- le système visuel annexe (détecteur de cible) s'insère dans un cylindre de diamètre 15cm, de hauteur 5cm, et pèse 0,5kg (cf. Fig.IV-21).
- l'ensemble des divers sous-systèmes assurant le guidage du robot, occupe un cylindre de diamètre 30cm, de hauteur 35cm, et pèse 2kg (cf. Fig.VI-9).
- le prototype complet est contenu dans un cylindre de diamètre 30cm et de hauteur 50cm, et ne pèse que 12kg (Fig.VII-1).

L'ensemble oeil D.E.M. et système anticollision pourrait éventuellement être intégré comme système de contrôle à tout autre robot mobile, moyennant quelques modifications pour l'adapter à un véhicule de type "non-holonomique".

La technologie C.M.S. utilisée dans cette réalisation ouvre la voie à une intégration future des circuits analogiques, qui déboucherait sur une réduction de taille, de masse et de consommation beaucoup plus considérable encore.

Il nous semble essentiel d'avoir amené le projet jusqu'à la réalisation d'un prototype, car seule une réalisation permet de mesurer toutes les difficultés liées au fonctionnement d'un robot réel dans un monde réel.



*ANNEXE*

*LA MOUCHE*



## A.1. Ce qui fait l'intérêt de la mouche

## A.2. L'appareil visuel de la mouche

### A.2.1. Introduction

### A.2.2. L'échantillonnage de l'espace par l'ensemble cornée-rétine

### A.2.3. Les unités de traitement

- a. "Voir" en termes de réseaux
- b. Les neurones détecteurs de mouvement de la lobula-plate
- c. La lamina : une mise en forme de l'information
- d. La medulla : le fossé qui sépare lamina et lobula

## A.3. Des détecteurs élémentaires de mouvement

### A.3.1. Des modèles pour mesurer le mouvement

### A.3.2. Expériences sur un neurone détecteur de mouvement chez la mouche : H1

- a. L'adaptation de H1 en réponse au mouvement
- b. La contribution de chaque corrélateur à la réponse de H1
- c. Caractéristiques dynamiques et câblages de chaque D.E.M.



## A.1. Ce qui fait l'intérêt de la mouche

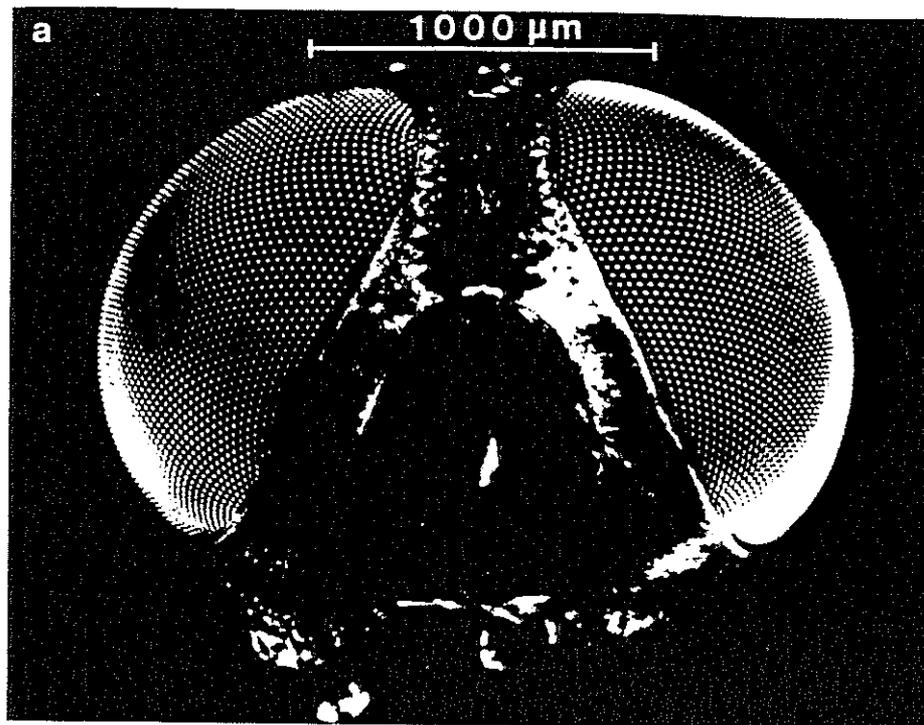


Fig. A-1. : Tête de *Musca Domestica* (Franceschini, 1985).

Le traitement de l'information visuelle chez la mouche (Fig.A-1) peut faire l'objet d'études à deux niveaux très distincts :

- au niveau du comportement visuo-moteur; on peut définir les lois générales du système et mettre en évidence certaines opérations de base devant nécessairement être réalisées par les circuits neuroniques sous-jacents;

- au niveau neuroanatomique et électrophysiologique ; le but est alors de caractériser de façon précise, d'une part le câblage des circuits neuroniques, d'autre part le traitement de signal effectué par les neurones et leurs synapses.

En tant qu'objet d'étude, la mouche présente les avantages suivants :

- 1) on dispose d'une connaissance anatomique détaillée révélant que cette structure est relativement simple en nombre d'interconnexions et de modules élémentaires;

En effet :

- le système visuel de la mouche possède un nombre de neurones ( $\#10^6$ ) relativement faible en comparaison, par exemple, avec celui des vertébrés;

- la structure périodique de chaque ganglion optique réduit largement la complexité du système (traitement parallèle);
- l'anatomie de plusieurs ganglions optiques a pu être décrite de façon exhaustive jusqu' à l'échelle des neurones individuels (Strausfeld, 1989);
- la présence d'ensembles paucineuronaux offre la possibilité d'enregistrements unitaires reproductibles sur des neurones identifiés;

-2) au niveau expérimental, on peut contrôler aujourd'hui de manière rigoureuse l'accès aux entrées-sorties des circuits neuroniques, ce qui favorise la reproductibilité de l'expérience "stimulation-enregistrement" et facilite les conclusions que l'on peut tirer de cette expérience.

En effet :

- au niveau des entrées, la stimulation est effectuée de manière optique, grâce à des techniques microscopiques, et peut donc être à la fois simple et précise;
- au niveau des sorties, l'enregistrement électrophysiologique peut être effectué de façon unitaire sur des neurones dont le type et la forme sont connus à l'avance.

## A.2. L'appareil visuel de la mouche

### A.2.1. Introduction

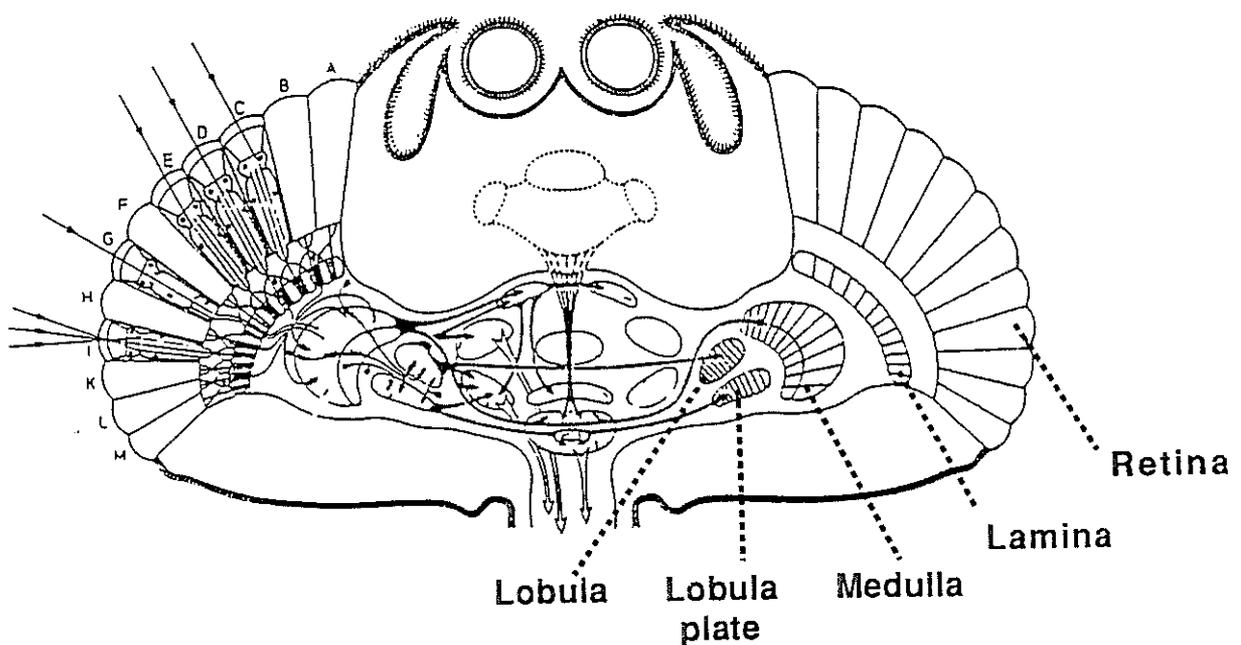


Fig. A-2. : Représentation schématique du système visuel de la mouche (Kirschfeld, 1979).

Ce qui frappe le plus lorsqu'on observe pour la première fois la structure de l'oeil composé d'une mouche, c'est son architecture qui est le fruit d'une double organisation dans l'espace (Fig. A-2) :

-1) Une organisation en couches discrètes

En partant de la périphérie on distingue successivement la cornée et la rétine, puis trois ganglions optiques: la lamina, la medulla, le complexe lobulaire formé de la lobula et de la lobula-plate.

-2) Une organisation cristalline

Si l'on coupe transversalement chacune des couches précédentes, on découvre une impressionnante mosaïque rétinotopique parfaitement ordonnée (Fig.A-3). Chaque maille élémentaire, ou colonne, est composée de "neurones à petit champ" et est reliée à ses voisines par des cellules amacrines et de cellules tangentielles.

Il existe une correspondance totale entre les colonnes de chaque couche, les connexions s'effectuant par un croisement de fibres au niveau de chiasmas. Ainsi, dans toute la profondeur du lobe optique, on trouve une trace du champ visuel ipsilatéral échantillonné sur 3000 colonnes.

La structure précédente, caractérisée à priori anatomiquement, peut l'être tout aussi bien fonctionnellement, chacune des couches correspondant alors à une étape du traitement de l'information, l'aspect périodique quant à lui, évoquant le parallélisme, trait principal de ce traitement (on notera le nombre réduit d'étages successifs).

#### A.2.2. L'échantillonnage de l'espace par l'ensemble cornée-rétine

Deux types de systèmes optiques ont été développés au cours de l'évolution naturelle (Fig.A-4) :

- l'oeil camérulaire formé d'une lentille unique, on le trouve chez les vertébrés, chez quelques mollusques et chez les arachnéides;
- l'oeil composé constitué d'un ensemble de microlentilles, chacune étant associée individuellement à un groupe élémentaire de photorécepteurs. On le trouve essentiellement chez les insectes et les crustacés.

Chez la mouche, l'espace visuel est échantillonné sur  $4\pi$  stéradians et selon 3000 directions pour chaque oeil (Fig.A-5).

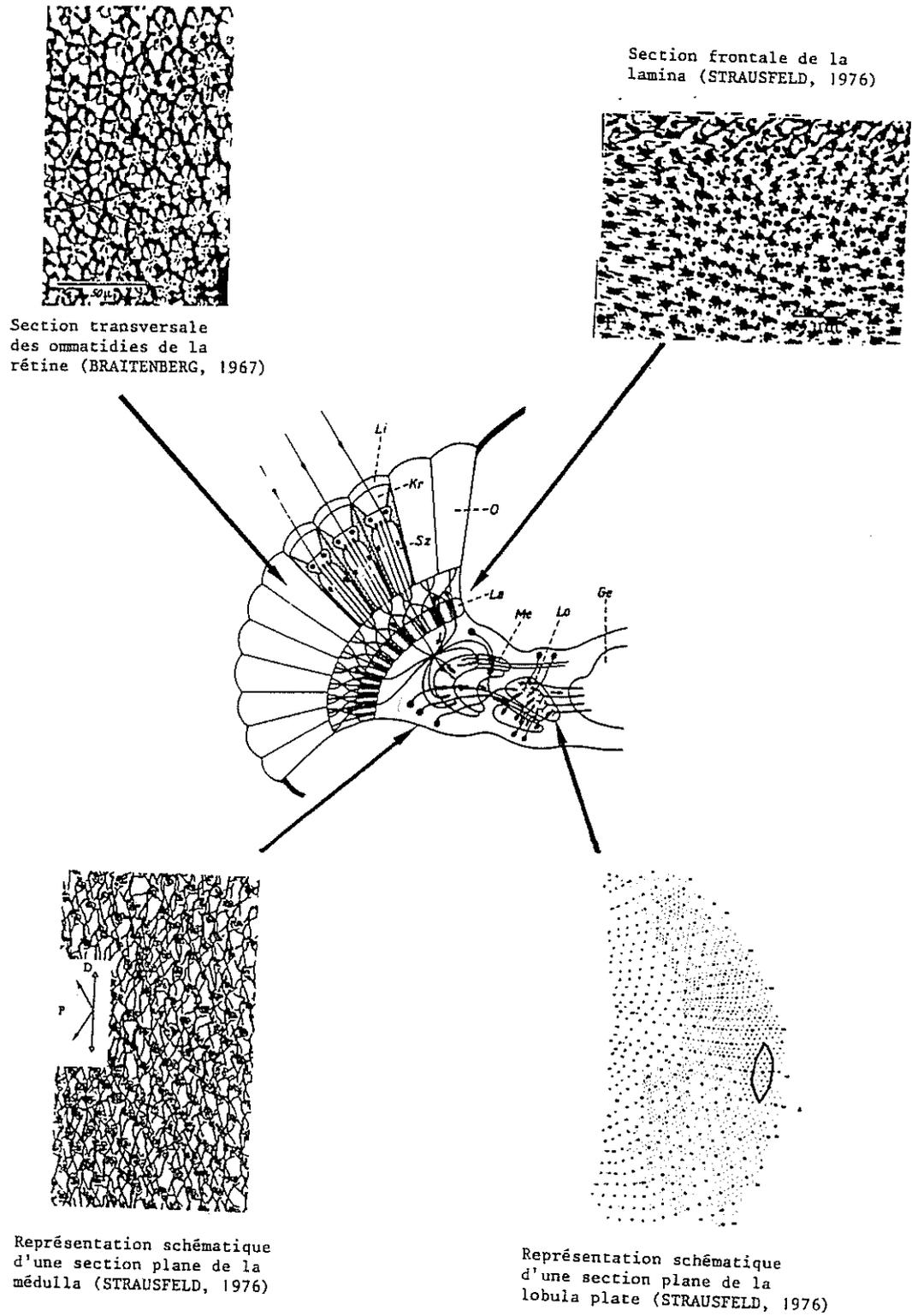


Fig. A-3 : Illustration de l'aspect cristallin du système visuel de la mouche (Kirschfeld, 1972).

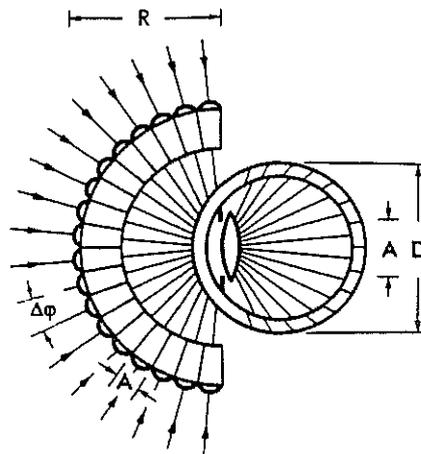


Fig.A-4 : Diagramme schématique d'un œil caméculaire et d'un œil composé (Kirschfeld, 1976).

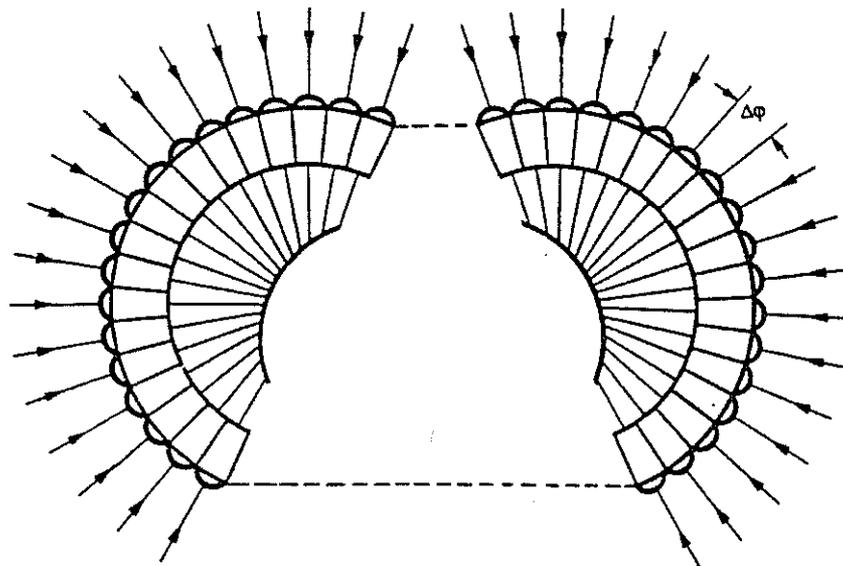


Fig.A-5 : Principe de l'échantillonnage pour l'œil de la mouche dans un plan horizontal de l'espace (abstraction faite du gradient en  $\Delta\phi$ ).

A chaque module élémentaire, ou ommatidie, correspond une direction de l'espace.

L'angle entre deux directions voisines est défini comme angle interommatidial  $\Delta\phi$ ; il est approximativement égal au diamètre de la lentille divisé par le rayon de courbure de l'œil.

L'angle interommatidial varie en fait selon les régions de l'œil provoquant ainsi une variation spatiale de l'acuité visuelle (Franceschini, 1975):

$\Delta\phi = 1^\circ$  dans la région dorso-frontale (zone de véritable "Fovea")

$\Delta\phi = 3^\circ$  latéralement.

Remarque :

Paradoxalement, c'est dans la région dorso-frontale (où  $\Delta\phi$  est le plus petit) que le diamètre  $d$  et la distance focale  $f$  de chaque facette sont les plus grandes. On peut supposer qu'une distance focale plus longue permet d'obtenir dans cette région de l'œil, un champ angulaire plus étroit pour chaque ommatidie et par conséquent d'améliorer la résolution angulaire. Quant à l'accroissement simultané du diamètre, il permet, en conservant l'ouverture

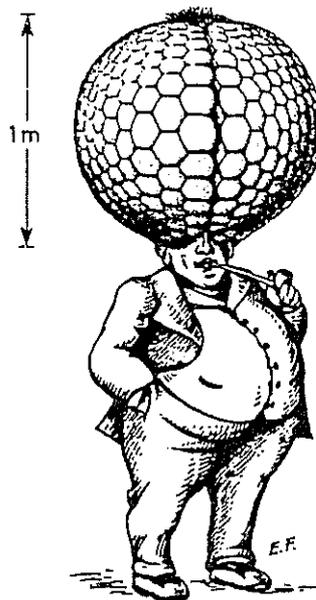
relative  $f/d$  constante, d'éviter une diminution de l'éclairement (en photons/m<sup>2</sup>/s) dans le plan focal, engendrée par l'augmentation de  $f$ . De plus, l'invariance du rapport  $f/d$  se traduit par une invariance du diamètre du disque d'Airy (phénomène de diffraction); ce diamètre, en effet, doit rester adapté à celui du rhabdomère qui est constant quelle que soit la région de l'oeil.

### L'ommatidie

L'ommatidie est formée d'une facette et de huit photorécepteurs constituant une maille élémentaire du réseau rétinien.

La facette est une microlentille de diamètre 25  $\mu\text{m}$ , lentille du type plan convexe remarquable par sa précision. Le très faible rayon de courbure conduit à une distance focale très courte: 30 à 50  $\mu\text{m}$ .

La conséquence de cette dernière propriété est l'inutilité d'un système d'accommodation, principal avantage d'un oeil composé. Par contre, l'existence d'un angle d'acceptance  $\Delta p$  important pour chaque lentille peut entraîner une réduction néfaste de la transmission du contraste (due au "chevauchement" des diagrammes de sensibilité angulaire de deux ommatidies voisines). La faible résolution angulaire de l'oeil composé compense en partie ce défaut (Fig. A-6).



**Fig. A-6 :** Illustration de la taille minimale d'un oeil humain, s'il était du type "composé" et gardait la même résolution au niveau de l'échantillonnage spatial (Kirschfeld, 1976)

Il est possible que la haute résolution offerte par l'oeil camérolaire permette des tâches sophistiquées telles que la reconnaissance de formes, mais qu'une faible résolution soit amplement suffisante pour des tâches plus élémentaires telles que la reconnaissance locale de mouvement.

### Les photorécepteurs de la rétine

Au nombre de huit, les photorécepteurs se trouvent disposés de manière très caractéristique derrière chacune des facettes (Fig.A-7).

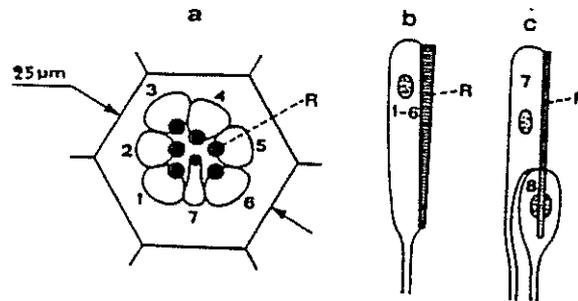


Fig. A-7 : Le schéma suivant montre en (a) la disposition de l'extrémité distale des sept photorécepteurs, (le huitième se trouve sous le R7 avec le même axe optique, comme le montre (c)) et en (b) une coupe longitudinale des récepteurs R1 à R6. (R) rhabdomère. (Franceschini, 1983)

Le rhabdomère R, partie photosensible par excellence de chaque cellule, agit comme un véritable "guide d'ondes lumineux". Son diamètre est de l'ordre de  $1\mu\text{m}$  et sa longueur de  $100\mu\text{m}$ . Ainsi, le faisceau lumineux est propagé vers l'extrémité interne du rhabdomère et absorbé petit à petit par le pigment visuel (appelé xanthopsine chez la mouche).

Il est intéressant de noter l'existence, dans chaque cellule, d'un mécanisme de migration de pigment le long des parois du rhabdomère, mécanisme qui, en modifiant l'absorption sur la paroi, joue le rôle d'une "pupille" propre à chaque cellule (Kirschfeld, Franceschini, 1969).

Au plan électrophysiologique, ces enregistrements intracellulaires montrent que la réponse électrique des photorécepteurs à un créneau de lumière d'intensité variable est une dépolarisation soutenue dont l'amplitude croît (de manière non linéaire) avec l'intensité lumineuse (Fig. A-8).

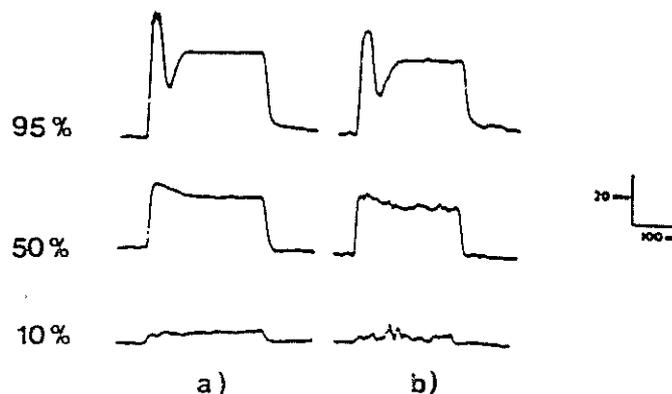
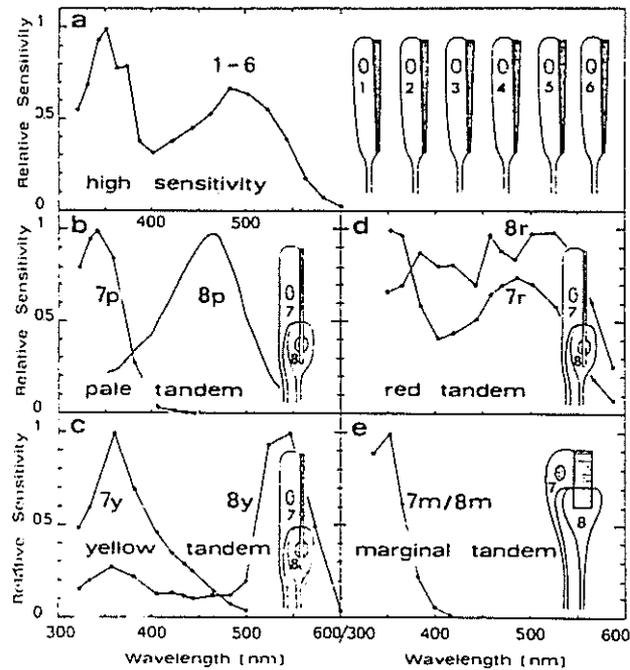


Fig. A-8 : Réponse typique de (a) R1-6 (b) R8 au niveau de la rétine à 10%, 50% et 95% de l'amplitude maximale (d'après Hardie, 1977)

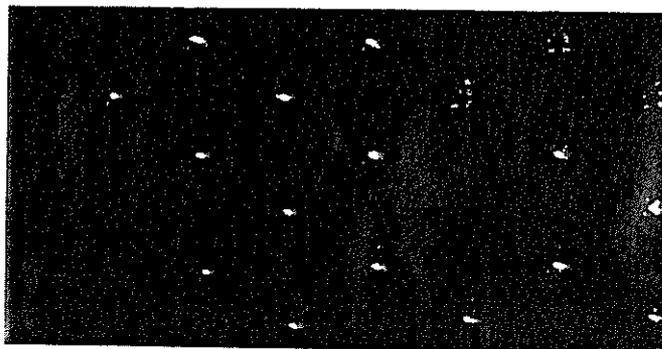
Une étude approfondie de la sensibilité spectrale de chacun des photorécepteurs amène à distinguer deux sous-systèmes (Fig. A-9) :

- l'ensemble R1 à R6; ces 6 récepteurs ont la même sensibilité spectrale, avec un pic dans le vert et l'ultra-violet;
- l'ensemble R7-R8 dont la sensibilité spectrale est hétérogène. Cette distinction est confirmée morphologiquement par le fait que R1-R6 et R7-R8 ne projettent pas leur axone dans le même ganglion.



**Fig. A-9** : Résumé des diverses sensibilités spectrales des cellules réceptrices de la mouche domestique (Franceschini, 1985).

### Les propriétés optiques de l'ensemble cornée-rétine



**Fig. A-10** : Observation in vivo, en épifluorescence, de la terminaison distale des rhabdomères dans une portion frontale de la rétine de la mouche domestique (Franceschini, 1985).

Disposées régulièrement dans un réseau hexagonal (Fig. A-10) que l'on retrouve symétriquement de part et d'autre de l'équateur, les ommatidies possèdent les propriétés remarquables suivantes :

- 1) L'extrémité distale de chaque rhabdomère se trouve dans le plan focal de la lentille (Fig. A-11f).

- 2) Au sein d'une même ommatidie chaque récepteur a un axe visuel qui lui est propre (à l'exception des 2 récepteurs centraux R7/R8 qui ont un axe visuel commun). (Fig. A-11c).

- 3) L'axe visuel d'un récepteur d'une ommatidie donnée correspond nécessairement à l'axe optique d'une ommatidie adjacente (Fig. A-11g). Ainsi, 8 récepteurs de 7 ommatidies voisines possèdent le même axe visuel (Kirschfeld, 1967).

- 4) Six photorécepteurs (R1-R6) appartenant à une même direction projettent leurs axones dans une même cartouche élémentaire de la lamina (où les réponses sont sommées). C'est le principe de la superposition neuronale découvert en 1967 par Kirschfeld, Braitenberg et Trujillo-Cenoz (Fig.A-12). Les deux autres récepteurs R7-R8, quant à eux, envoient leurs axones directement dans la medulla.

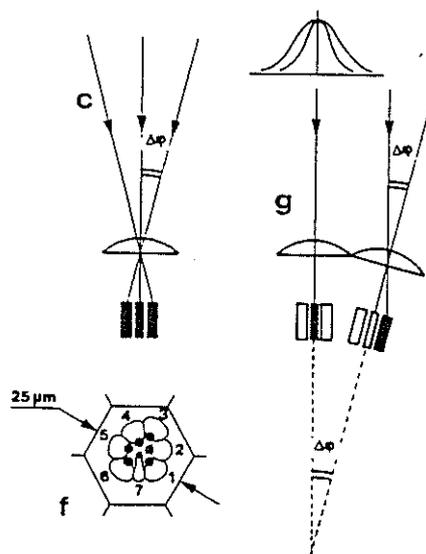


Fig. A-11 : Rappel des principes de base de la construction de l'oeil de la mouche (Franceschini, 1985).

Notons que les propriétés 3 et 4 sont étroitement corrélées et caractérisent simplement la redondance de l'échantillonnage pour une même direction, redondance dont l'intérêt biologique réside apparemment dans une amélioration précoce du rapport signal sur bruit par un facteur  $\sqrt{6}$  (Van Hateren, 1987).

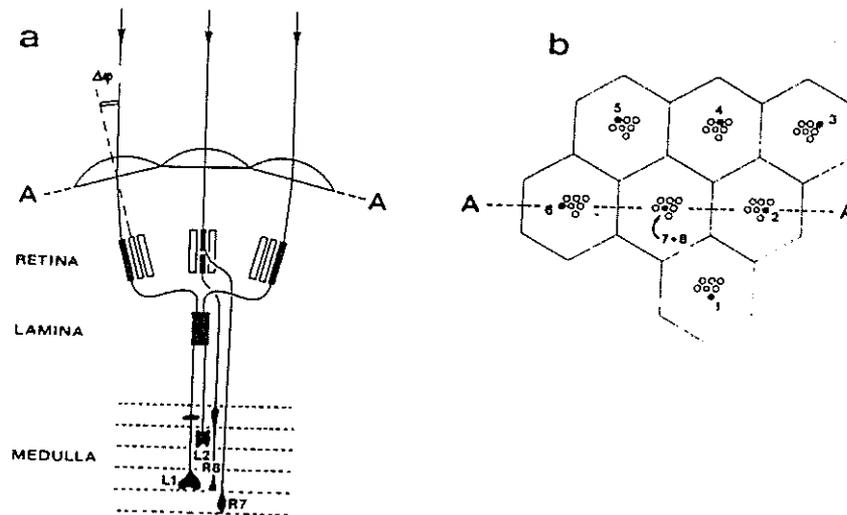


Fig. A-12 : Rappel du principe de la superposition neuronale de "l'oeil" de la mouche et de la projection neuronale des diverses cellules (Franceschini, 1985).

### A.2.3. Les unités de traitement

#### A.2.3.a. "Voir" en termes de réseaux

Nous venons de définir dans le paragraphe précédent quel type d'information est disponible à la sortie de la rétine.

A présent, plutôt que de décrire de manière exhaustive l'anatomie de chacune des couches suivantes, il est avant tout intéressant de traduire ce que veut dire le mot "voir" au niveau de cette circuiterie biologique, et ce afin de ne pas perdre pied dans la masse des données anatomiques.

Au niveau le plus élevé, l'information que transmet la vision peut être caractérisée selon deux aspects principaux :

- un aspect spatial : reconnaissance de position, de formes, de couleurs;
- un aspect temporel : évolution des formes ou détection du mouvement (sens, direction, vitesse, etc...).

De multiples expériences de comportement ont été faites sur l'orientation visuelle de la mouche dans son environnement. Il a ainsi été montré (synthèse : Poggio-Reichardt, 1976):

- qu'elle perçoit le mouvement relatif de son environnement et peut ainsi stabiliser son vol;
- qu'elle peut localiser et voler vers des objets caractéristiques;
- qu'elle peut poursuivre une cible en mouvement (ex: la poursuite de la femelle par le mâle);
- qu'elle peut percevoir le mouvement d'un objet de même texture que le fond.

Il semble donc que chez la mouche, l'orientation visuelle soit basée sur deux mécanismes fondamentaux qui sont la détection du mouvement et de la position d'un élément de contraste sur la rétine.

En conclusion, on s'attend donc à trouver dans le lobe optique de la mouche, des zones fonctionnelles se rapportant à ce qui précède (Fig. A-13).

C'est effectivement le cas, puisque la détection du mouvement est l'une des préoccupations majeures de la medulla et de la lobula-plate.

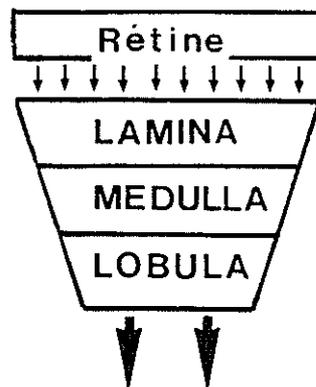


Fig. A-13 : Les trois ganglions optiques ou unités de traitement présents dans l'œil de la mouche.

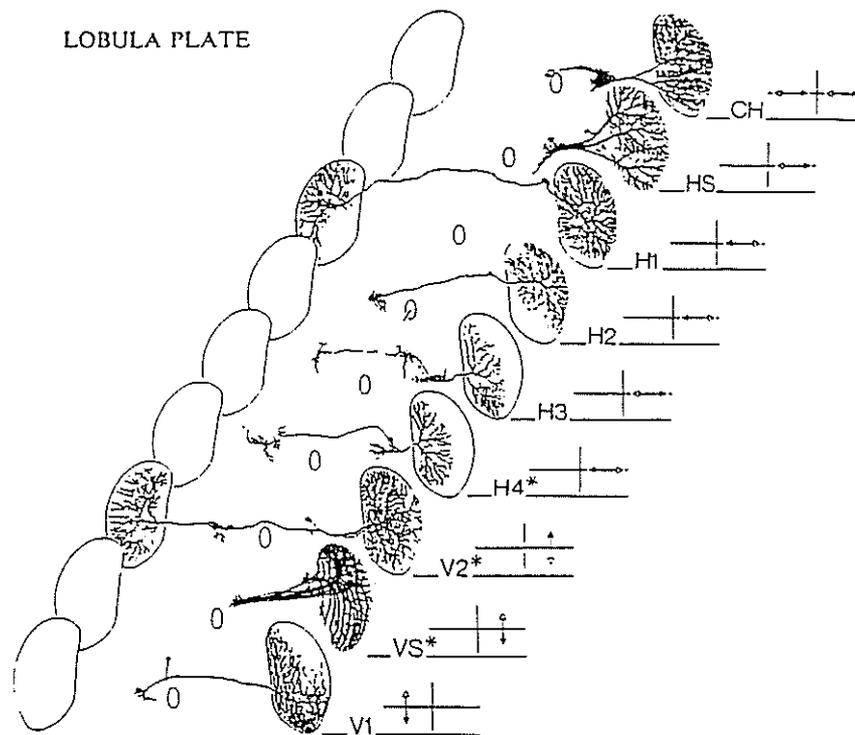
#### A.2.3.b. Les neurones détecteurs de mouvement de la lobula-plate

La lobula-plate (cf. Fig. A-2) fait partie du 3<sup>ème</sup> ganglion optique (complexe lobulaire) et est constituée d'un ensemble de 48 cellules à large champ récepteur, qui sont sensibles de manière sélective à des mouvements de direction verticale ou horizontale et de sens donné (Fig. A-14).

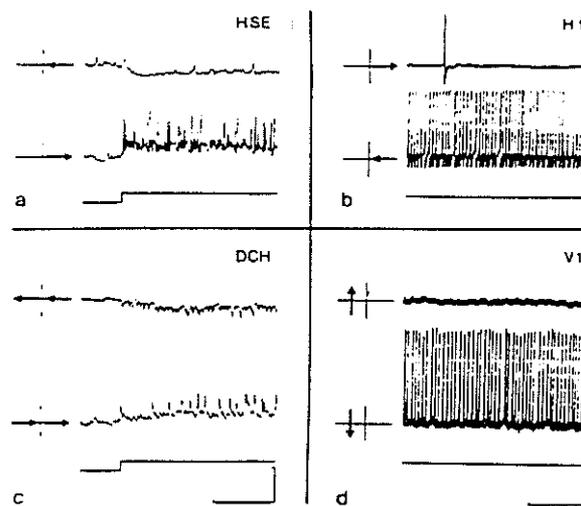
Il est à noter que chaque neurone (et non pas seulement chaque classe de neurone) est reconnaissable individuellement, d'animal en animal, grâce à la forme caractéristique de ses arborisations dendritiques.

Tous ces neurones étudiés répondent au mouvement de manière tonique, même pendant de longues périodes de stimulation. Les dendrites sont dépolarisées pour une stimulation dans le sens préféré et hyperpolarisées dans le sens inverse.

Par contre, le mode de transmission varie selon le type de neurone (Fig. A-15); modulation de fréquence pour H1-H3 et V1-V2 (Dvorak et al., 1975; Hausen, 1976a, b; Eckert, 1980), potentiels gradués (Hausen, 1976a, b; 1981; 1982) ou combinaison de potentiels d'action et de variations graduées pour les autres (Hausen, 1981; 1982).



**Fig. A-14** : Reconstitution en perspective des cellules tangentielles de la lobula-plate. Les flèches à droite indiquent les directions préférées (pointes noires) et les directions nulles (pointes blanches) des neurones détecteurs de mouvement. A= antérieur, P=postérieur (Hausen, 1984).



**Fig. A-15** : Illustration de la réponse de 4 neurones géants de la lobula -plate (Hausen, 1984).

La sensibilité de la réponse de chaque neurone varie de façon monotone entre un maximum (direction et sens précis du mouvement) et un minimum (même direction mais sens opposé), et ceci avec le cosinus de l'angle entre la direction du mouvement présentée, et la direction optimum.

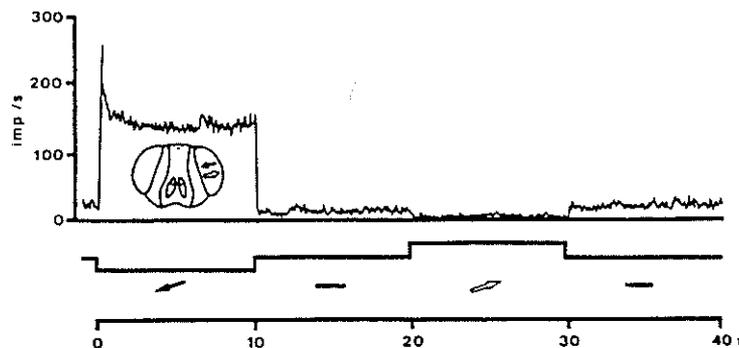
La plaque lobulaire semble donc effectuer une analyse vectorielle des informations visuelles (Erikson, 1983), selon quatre vecteurs de base: vertical-haut, vertical-bas, horizontal avant-arrière, horizontal arrière-avant.

### Le Neurone H1

Rappelons brièvement pourquoi H1 est, parmi tous ces neurones géants de la lobula-plate, un objet de prédilection pour l'électrophysiologiste :

- il en existe un seul dans chaque oeil;
- un certain nombre de caractéristiques qui lui sont propres permettent de le retrouver facilement :

- sa sensibilité horizontale d'arrière en avant (Fig.A-16);
- le transfert de son information dans la lobula-plate *contralatérale*;
- son large champ récepteur qui couvre pratiquement tout l'espace visuel, avec un maximum de sensibilité dans la région fronto-équatoriale;
- ses impulsions sont facilement enregistrables en extracellulaire;
- son seuil de sensibilité lumineuse est très bas.



**Fig. A-16** : Réponse de H1 à une mire rayée, présentée dans le sens préféré puis dans le sens non-préféré (Riehle, Franceschini, 1984).

Ayant maintenant, quelques données sur la façon dont est exploitée l'information au plus profond de l'oeil, retournons vers la périphérie, là où le traitement le plus élémentaire est déjà commencé.

#### A.2.3.c. La lamina: une mise en forme de l'information (Shaw, 1981)

Contrairement à la lobula-plate, la lamina, de par sa position (1er ganglion) et de par sa structure, est sans doute l'unité qui pratique les traitements les plus élémentaires au niveau de chaque colonne:

- sélection de la couleur ou de la polarisation;

- sommation des réponses des récepteurs dans des canaux communs;
- utilisation de l'amplification et de l'inhibition latérale pour améliorer l'efficacité du codage.

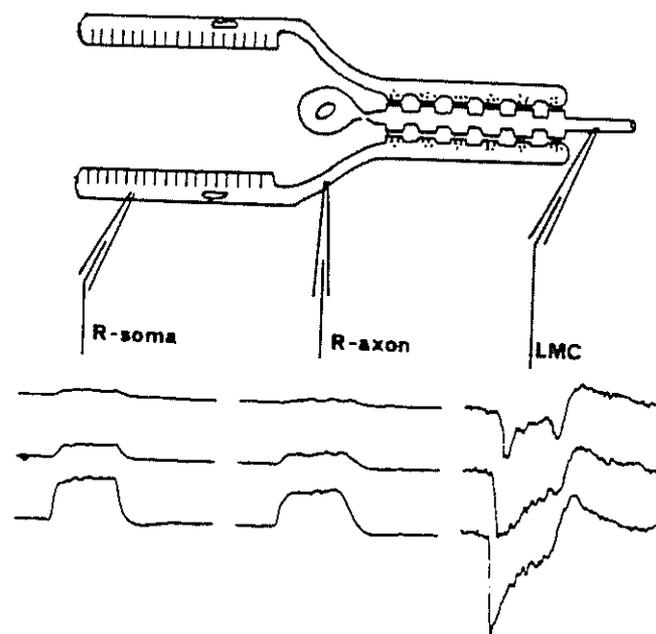
La lamina est, comme la rétine formée de 3000 "colonnes" appelées ici cartouches. Au niveau de la connexion entre ces deux couches, on peut rappeler la propriété de superposition neuronale (cf. §A.2.2.).

#### La fonction des canaux parallèles de la lamina

Parmi toutes les cellules de la lamina, que ce soit chez la mouche, la libellule ou l'abeille, très peu sont bien caractérisées électrophysiologiquement. En effet, à cause de la petite taille des neurones (diamètre des axones 1 à 4 $\mu$ m), les enregistrements et les marquages intracellulaires présentent de grandes difficultés.

Les cellules les mieux connues sont sans doute les cellules monopolaires et les cellules de type ON-OFF de Arnett (Arnett, 1972).

#### Transformation du signal au niveau des cellules L1, L2



**Fig. A-17** : Les réponses du soma et de l'axone d'un photorécepteur et d'une cellule monopolaire, à un même stimulus (Laughlin, 1984).

Par comparaison avec la réponse des cellules photoréceptrices, la réponse de L1 et L2 à un créneau lumineux est caractérisée par une inversion de polarité et un caractère transitoire (Fig.A-17).

On doit s'intéresser au contrôle de gain dans la mesure où il peut conditionner l'entrée des D.E.M..

Notons tout d'abord qu'une amplification précoce du signal est d'une façon générale indispensable dans un tel système sensoriel. En effet, elle permet de minimiser les limitations dues au bruit intrinsèque des étages postérieurs. Ici, elle a lieu au niveau des très nombreuses synapses chimiques (environ 200) reliant chaque axone de R1-R6 aux cellules monopolaires.

Le transcodage : pour l'amplification d'un signal variant dans une large gamme d'amplitude, un gain trop important entraîne le saturation pour les entrées maximum, et un gain trop faible conduit à la perte de signaux minimum.

La solution réside donc dans un gain variable en fonction du signal d'entrée. Ce transcodage, pour qu'il soit optimal (perte minimum de l'information) doit solliciter avec la même probabilité tous les niveaux de sorties disponibles.

Ceci n'est réalisable que si la fonction de transcodage correspond à la courbe des probabilités cumulées du signal d'entrée.

Cette propriété est effectivement vérifiée au niveau des synapses photorécepteurs-cellules monopolaires comme l'illustre la Fig. A-18.

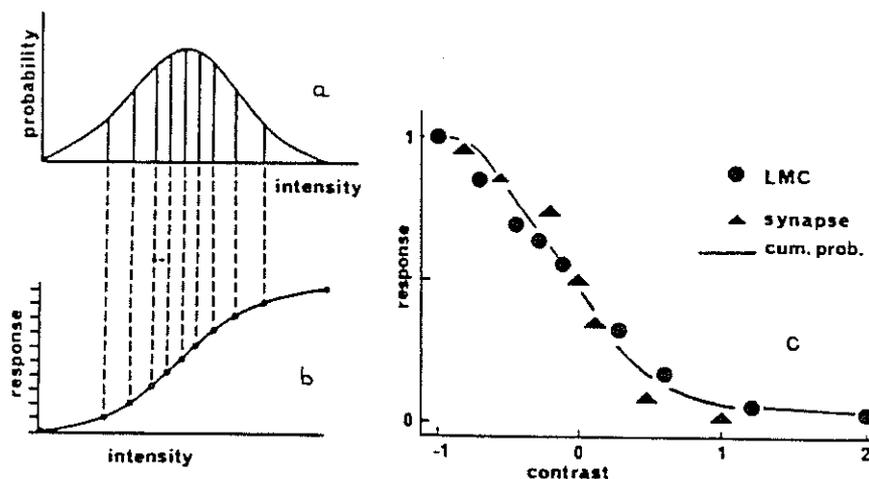


Fig. A-18 : Illustration du transcodage dans la lamina : (a) est la courbe de répartition des probabilités de chaque contraste de l'image observée. (b) est la fonction des probabilités cumulées correspondantes. (c) montre la coïncidence entre (b) et la réponse des cellules monopolaires aux contrastes précédents (Laughlin, 1984).

### Conclusions :

Il est vraisemblable que des neurones de la lamina (tels que L1 et L2 mais aussi peut-être L4 et L5 correspondant aux cellules ON-OFF de Arnett) font partie du circuit de détection de mouvement, puisque l'acquisition des données passe nécessairement par R1-R6

qui projettent eux-mêmes dans la lamina. En particulier, différentes études sur H1 montrent que le signal de mouvement doit être préfiltré précocement, notamment par des inhibitions latérales similaires à celles qui ont lieu au niveau de L4 et L5 (Shaw, 1981).

#### A.2.3.d. La medulla: le fossé qui sépare lamina et lobula

Par le chiasma externe, toute cartouche de la lamina communique avec une colonne de la medulla. Il existe à ce niveau un croisement de fibres qui a pour effet de produire une inversion fronto-latérale de l'image, mais pas d'inversion dorso-ventrale. La medulla est connectée au complexe lobulaire (lobula + lobula-plate) par le chiasma interne.

Contrairement aux deux ganglions décrits précédemment et bien qu'elle conserve leur structure périodique (3000 colonnes), la medulla est assez mal connue morphologiquement et fonctionnellement, constituant ainsi un gros point d'interrogation dans la chaîne de traitement.

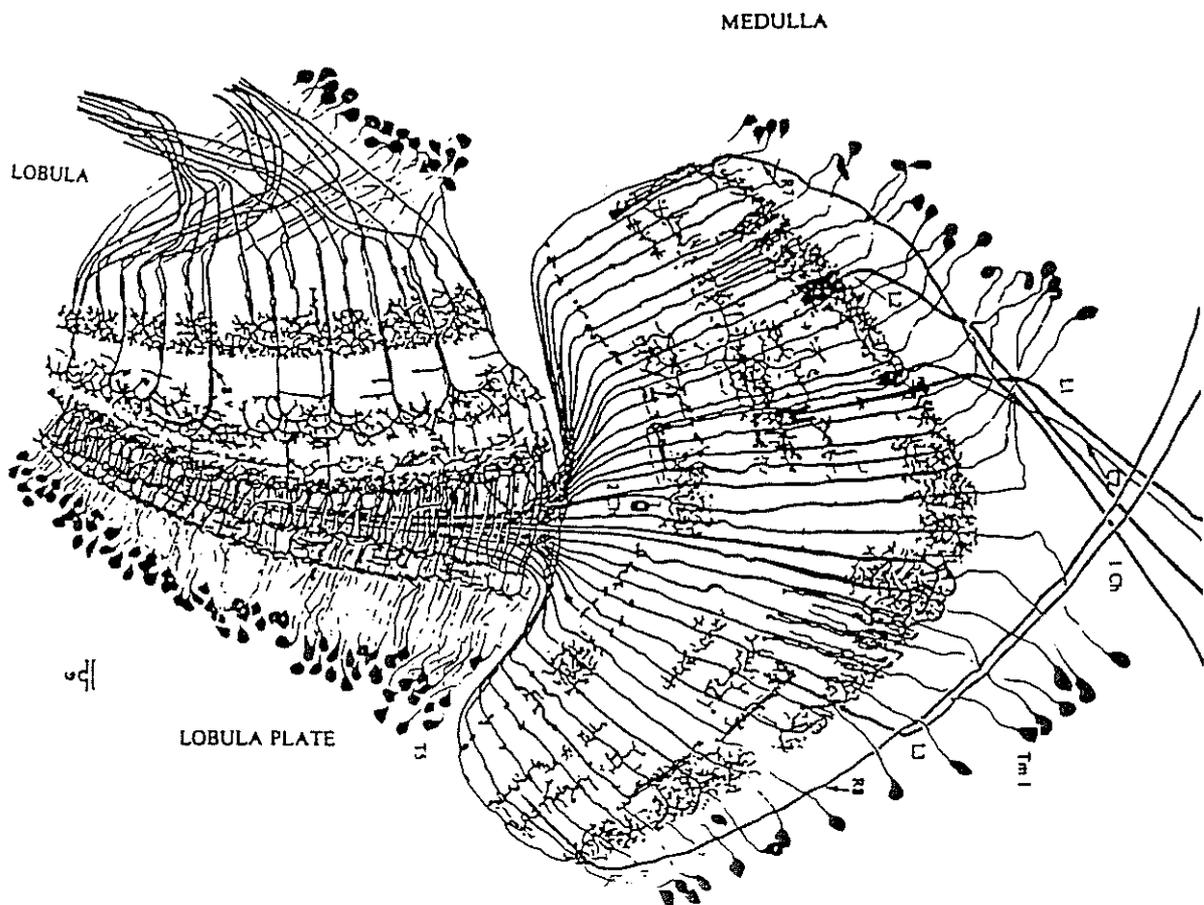


Fig. A-19 : Reconstitution d'une rangée de colonnes de la medulla; pour simplifier la lecture, un seul neurone parmi les quarante est représenté dans chaque colonne (Strausfeld, 1976).

## Anatomie

La complexité de la medulla est liée au nombre important de types de neurones qui la constituent; soixante d'entre eux ont pu être décrits (Campos-Orega, Strausfeld, 1972a), chacune des 3000 colonnes en contenant une quarantaine.

Le trait anatomique le plus frappant est la présence de nombreuses fibres organisées latéralement. Quant aux colonnes, chacune d'entre elles provient d'une colonne de la lamina et envoie une partie de ses afférences vers une colonne de la lobula, et l'autre partie vers une colonne de la lobula-plate (Fig. A-19).

## Fonctions

La structure de la medulla est encore suffisamment inextricable pour qu'on puisse suggérer un grand nombre de modèles de traitement de signal dans ce ganglion !

De par sa structure latérale, ce réseau semble spécialisé dans la corrélation de différents points de l'espace, mais aussi dans des comparaisons très locales pouvant par exemple établir le signe, la pente et la direction des éléments de contraste. Ainsi, à chaque colonne de la medulla pourrait être associée un Détecteur Élémentaire de Mouvement (D.E.M.).

De nombreux résultats vont dans ce sens, mais révèlent quand même une grande variété de fonctionnement (Bishop et al., 1968; McCann et Dill, 1969; Mimura, 1971; 1972; De Voe et Ockleford, 1976; De Voe, 1980).

## Conclusion

Lors de la description de chaque ganglion optique nous avons tenté de localiser les neurones qui pourraient appartenir aux D.E.M.s. Dans ce qui va suivre nous allons entreprendre une étude beaucoup plus fonctionnelle d'un D.E.M. au niveau individuel, et effectuer à partir des seules entrées-sorties, une analyse de ses propriétés dynamiques.

### **A.3. Les détecteurs élémentaires de mouvement**

#### **A.3.1. Des modèles pour mesurer le mouvement**

Des études psychologiques chez l'homme ont conduit à définir deux grandes classes de processus pour évaluer le mouvement visuel : le "short range process" et le "long range

process" (Braddick, 1974). Au premier est associée la notion de déplacement discret de faible amplitude (ou continu), et celle de courte fenêtre temporelle. A l'opposé le second ne considère que les déplacements et fenêtres temporelles importants.

En rapport avec ces deux processus, deux classes de modèle ont été élaborés (Synthèse : Ullman, 1981) :

- l'une nécessitant la reconnaissance préalable de motifs élémentaires : "Token matching schemes";
- l'autre reposant sur les variations locales d'intensité lumineuse : "Intensity based schemes".

Seule la seconde classe de modèle est abordée ici. Elle fait appel elle-même à deux grandes méthodes qui sont :

- la technique du gradient
- la technique de la corrélation.

Soulignons cependant que, quelle que soit la méthode utilisée, un détecteur de mouvement *directionnel* doit nécessairement répondre aux conditions suivantes (Synthèse : Poggio-Reichardt, 1976):

- le circuit le plus simple doit avoir au moins deux récepteurs séparés spatialement;
- le réseau connectant les deux récepteurs doit être asymétrique;
- le type d'interaction entre les deux signaux doit être non linéaire.

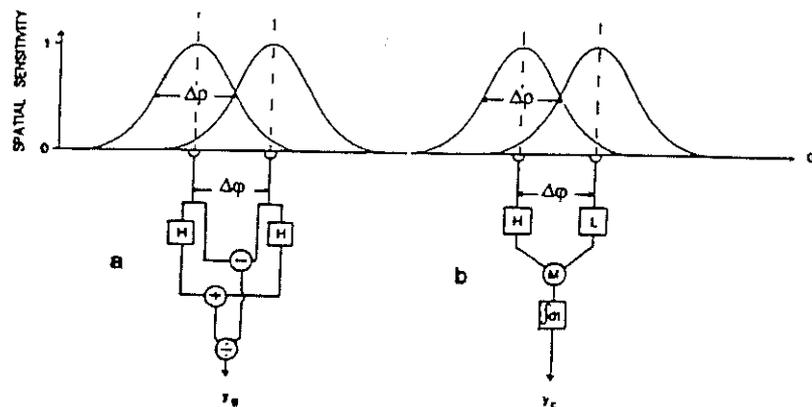


Fig. A-20 : Deux modèles de détecteur de mouvement élémentaire : a) technique du gradient; b) technique de la corrélation (H=filtrage passe-haut; L=filtrage passe-bas) (Synthèse : Buchner, 1984).

#### Le modèle du gradient (Fig. A-20-a)

Ce procédé (Ullman, 1981) repose sur les identités suivantes :

$$dI/dt = (dI/d\phi) \cdot (d\phi/dt) \quad (\text{A.1})$$

$$\omega = -d\phi/dt \quad (\text{A.2})$$

qui conduisent à :

$$\omega = (-dI/dt)/(dI/d\phi) \quad (\text{A.3})$$

L'équation (A.3) montre que la vitesse angulaire instantanée  $\omega = -d\phi/dt$  est donc évaluée en faisant le quotient d'un gradient temporel (au niveau d'un seul photodétecteur) et d'un gradient spatial (entre deux photodétecteurs).

#### Le modèle du corrélateur (Fig. A-20-b)

Ce modèle a été développé dans les années 1950 pour caractériser certaines réactions optomotrices chez l'insecte *chlorophanus* (Hassentein, Reichardt, 1956). Une variante de ce modèle a été également utilisée par Barlow et Levick en 1965 à la suite de travaux sur les cellules ganglionnaires de la rétine de lapin.

Dans le cas de la mouche, la comparaison entre les réponses expérimentales (de type optomotrices) et les réponses prédites par les modèles a montré que le principe de la détection élémentaire était plutôt celui de la corrélation que celui du gradient (Buchner, 1984).

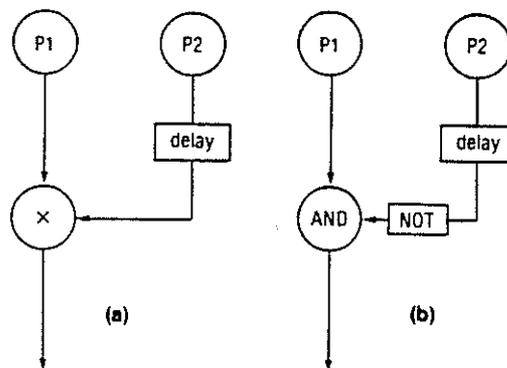


Fig. A-21 : Modèles de corrélateur (Ullman, 1981).

La Fig. A-21 est l'exemple le plus simplifié pour illustrer un corrélateur-détecteur de mouvement, où P1 et P2 correspondent à deux récepteurs répondant de manière transitoire à un front de contraste :

- a) un front se déplaçant à la vitesse appropriée dans le sens de P2 vers P1 donne une réponse seulement si P1 et P2-retardé coïncident.
- b) principe inverse de (a): la réponse P2 vers P1 est annulée, seulement si elle coïncide avec P2 retardée.

Un tel type de détecteur possède les caractéristiques suivantes :

- il détecte une vitesse angulaire définie :  $\Omega = \Delta\phi/\Delta t$
- avec  $\Delta\phi$  = écart angulaire entre P1 et P2
- $\Delta t$  = la valeur choisie du retard

- selon les performances du filtrage passe-haut et du filtrage passe-bas au niveau de P2, la détection de vitesse peut avoir lieu sur une gamme variable autour de  $V_0$ ;

- les limites de fonctionnement d'un tel détecteur sont imposées par  $\Delta\phi$  et  $\Delta t$ . En effet, pour ces valeurs données et si l'environnement est constitué de barres verticales de période  $\lambda$ , placées à une distance  $D$ , il existe des valeurs de  $\lambda/D$  (par ex.  $\Delta\phi < \lambda/D < 2.\Delta\phi$ ) pour lesquelles se produit un phénomène classique de repliement de spectre (effet stroboscopique). Ceci a été parfaitement confirmé expérimentalement chez la mouche, dont on peut provoquer le renversement du vol (Götz, 1964).

- La façon dont est collectée l'information à la sortie de chaque D.E.M. est également un problème important. Chez la mouche il semble qu'un certain nombre d'intégrations spatiales soit réalisé; ces intégrations pourraient fort bien avoir lieu au niveau de chaque neurone géant de la lobula-plate. H1, par exemple, collecterait les signaux émis par les micro-détecteurs horizontaux, et ceci sur un large champ (pratiquement tout l'oeil).

Remarque :

Cette intégration spatiale peut également être décrite en terme de moyennage (moyennage qui améliore avantageusement le rapport signal-sur-bruit) concernant l'information commune à plusieurs D.E.M.s, et autorise ainsi ces derniers à être "de mauvaise qualité" (on peut penser au bruit de "jitter" du codage en fréquence).

A.3.2. Expériences sur le neurone détecteur de mouvement (H1)

Actuellement, différents laboratoires dans le monde s'intéressent aux D.E.M. alimentant le neurone H1 de la mouche (cf. §.A.2.3.b.). Rappelons quelques travaux récents.

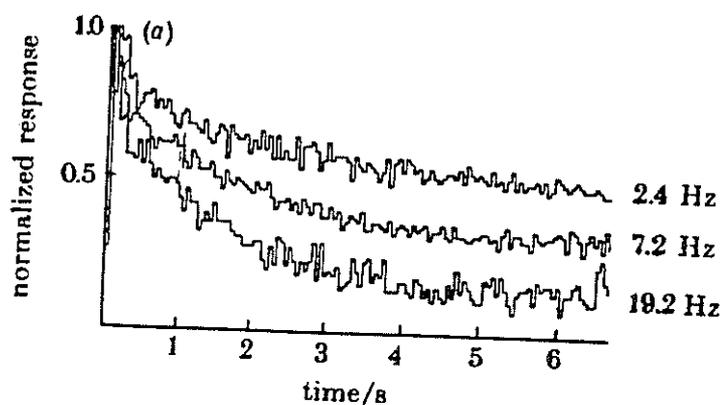


Fig. A-22 : Réponse normalisée de H1, au mouvement continu d'une mire rayée, et ce pour trois fréquences différentes.

### A.3.2.a. L'adaptation de H1 en réponse au mouvement

(Maddess et Laughlin, 1985)

L'adaptation de la réponse de H1 à un stimulus périodique semble être contrôlée principalement par la fréquence de contraste du stimulus (fréquence temporelle à laquelle chaque récepteur est excité) et ne dépend pas du contraste lumineux (une augmentation du contraste entraîne la saturation de H1) (Fig. A-22).

Le rôle fonctionnel de ce type d'adaptation est sans doute une augmentation de la sensibilité au changement de vitesse (filtrage de type passe-haut), tout en préservant une valeur moyenne du signal.

Le fait important est que cette adaptation est locale (Fig. A-23); ainsi le mécanisme semble présynaptique à H1 et pourrait se situer au niveau de la sortie de chaque D.E.M..

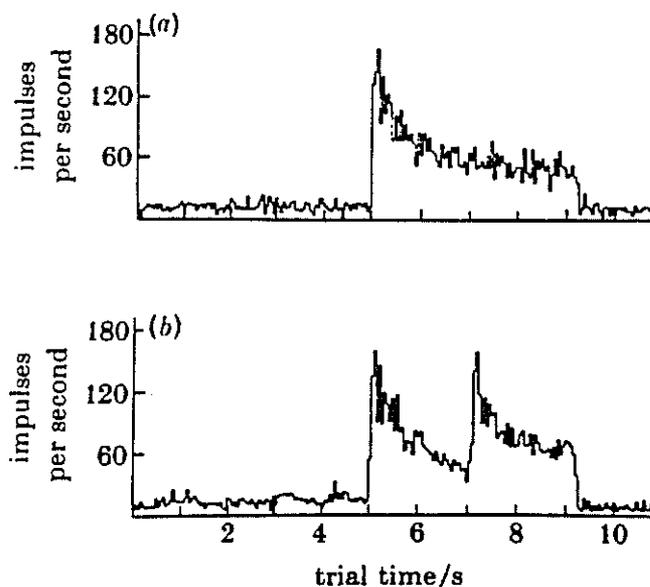


Fig. A-23 : a) Réponse de H1 à un mouvement localisé: b) Au milieu du test la localisation du micro-mouvement est décalée de 5° latéralement (Maddess et Laughlin, 1985).

#### Remarque :

Pour une même expérience sur H1, la répétition du stimulus est indispensable et ceci afin d'extraire par moyennage le signal du bruit. Les courbes précédentes suggèrent que pour préserver l'invariance de la réponse à chaque stimulation, la fréquence de répétition doit être faible :  $< 1\text{Hz}$ .

### A.3.2.b. La contribution de chaque corrélateur à la réponse de H1

Sachant que le corrélateur de Reichardt nécessite au minimum deux entrées, il est intéressant de préciser la position relative de ces entrées. Chez la mouche cela revient à se demander quelles sont les cartouches dont les signaux seront corrélés pour donner une réponse de H1.

Ce problème a fait l'objet de plusieurs études (Buchner, 1976), et récemment, par une stimulation optique précise, une carte relative à la contribution de chaque "corrélateur", dans la réponse de H1, a été établie (Fig. A-24).

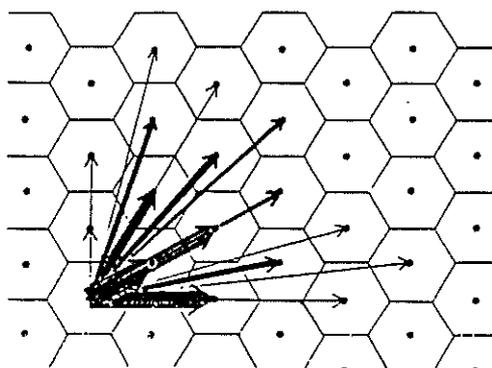


Fig. A-24 : L'épaisseur de chaque flèche indique le poids relatif de chaque corrélateur dans la réponse de H1 (Lenting, 1985, thèse).

C'est la corrélation entre deux cartouches voisines qui est la plus importante (phénomène amplifié par la présence d'un fond lumineux). D'autre part, tous les corrélateurs semblent avoir les mêmes caractéristiques temporelles avec, pour chacun d'eux, une sensibilité maximum pour un même retard :  $\Delta t = 40\text{ms}$  (pour deux flashes séquentiels de durée 1ms).

### A.3.2.c. Caractéristiques dynamiques et câblage de chaque D.E.M.

Il est intéressant de se pencher plus en détail sur la constitution propre de chaque D.E.M. chez la mouche et notamment d'essayer :

- d'extraire les modules fonctionnels indépendants;
- de caractériser la fonction de transfert (partie linéaire) de chacun de ces modules;
- de déterminer la façon dont ils sont interconnectés (en série ou en parallèle).

Ce type d'expérimentation a été rendue possible par l'utilisation d'une technique microscopique spéciale permettant de simuler un mouvement par microstimulation séquentielle de deux photorécepteurs adjacents, R1 et R6, d'une même ommatidie (récepteurs visualisés *in vivo*).

Les premiers résultats (Riehle et Franceschini, 1984) ont montré l'existence d'une réponse ON-OFF caractéristique, qui prend naissance lorsque la séquence des deux spots lumineux correspond à la direction et au sens préféré du neurone (Fig. A-25-a). La séquence opposée, au contraire, n'entraîne pas de réponse (Fig. A-25-b) ou parfois même une inhibition ON-OFF de la fréquence de repos.

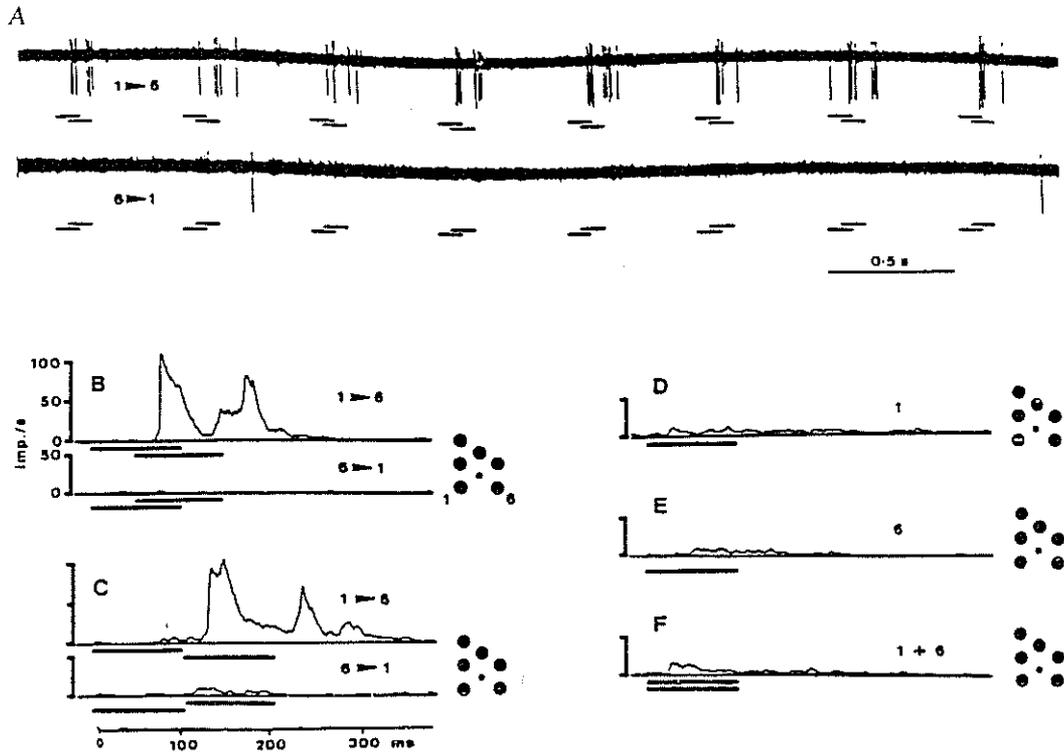


Fig. A-25 : A) Enregistrement original de l'activité électrique du neurone H1 au mouvement apparent produit par deux flashes lumineux de 100ms se recouvrant temporellement sur 50ms; en haut : 1er stimulus sur R1, 2ème sur R6 (1 vers 6); en bas : ordre inverse de présentation du stimulus (6 vers 1).

B), C), D), E), F) : Réponse moyennée du neurone H1 à différents stimuli, dont la séquence est indiquée sous chaque courbe (d'après Riehle et Franceschini, 1984).

Ce type d'expérience a permis de révéler la directionnalité du détecteur de mouvement au niveau élémentaire et de préciser le déroulement temporel de sa réponse en termes de fréquence instantanée.

Un ensemble d'expériences élémentaires et systématiques a été également réalisé, en balayant les nombreuses combinaisons séquentielles sur les spots lumineux de stimulation (Franceschini et al., 1989). Ainsi se sont dégagées les notions suivantes :

- la présence de deux circuits indépendants ON et OFF, le premier corrélant le déplacement du *bord d'attaque* d'une bande claire, le second s'occupant du *bord de fuite* de cette même bande;

- la notion de "fenêtre temporelle" (ON et OFF): il s'agit de l'intervalle de temps suivant la stimulation du premier récepteur (R1) et durant lequel la stimulation du second récepteur doit avoir lieu pour générer une réponse en sortie;

- le décalage temporel de ces fenêtres, assimilable à la réponse d'un filtre linéaire d'ordre élevé (Franceschini, 1985). On peut distinguer les "fenêtres" dont le stimulus conditionnant est une impulsion (flash de 10ms) et celles qui sont déclenchées par un échelon de lumière (créneaux > 100ms) et ainsi définir prudemment une "réponse impulsionnelle" et une "réponse indicielle" de cette partie du D.E.M. (Fig. A-26).

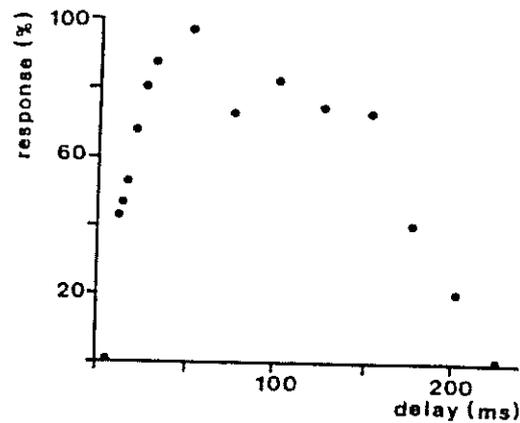


Fig. A-26 : Sensibilité du D.E.M. en fonction du retard entre les deux spots dans le sens préféré (1 vers 6). La "fenêtre temporelle" est ici de type "impulsionnelle". La courbe résulte du moyennage de 9 expériences (Franceschini, 1985).

*REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*



- Arkin, R.C. (1987)  
Motor schema based navigation for a mobile robot : an approach to programming by behavior. Proc. 1987 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation, pp.264-271
- Arnett, D.W. (1972)  
Spatial and temporal integration properties of units in the first optic ganglion of Dipterans. J. Neurophysiol. , 35, 429-444.
- Ayache, N. ; Faugeras, D. (1987)  
Maintaining representations of the environment of a mobile robot. In: 4th Intern. Symp. on Robotic Research., Santa-Cruz, R.C. Bolles , B. Roth (eds), pp. 337-350.
- Barlow, H.B., Levick, W.R. (1965)  
The mechanism of directionally selective units in rabbit's retina. J. Physiol., 178, 477-504.
- Bauzil, G. ; Briot, M. ; Ribes, P. ; Vaisset, M. (1981)  
Le sous-système de navigation par ultrasons du robot mobile HILARE  
3e congrès "Reconnaissance des formes et intelligence artificielle, Nancy, 16-18 sept., pp 553-564
- Bishop, L.G., Keehn, D.G., McCann, G.D. (1968)  
Motion detection by interneurons of optic lobe of the flies, *Calliphora phaenicia* and *Musca domestica*. J. Neurophysiol., 31, 509-525.
- Blanes, C. (1986)  
Appareil visuel élémentaire pour la navigation "à vue" d'un robot mobile autonome.  
DEA de Neurosciences, Université d'Aix-Marseille II
- Bolles, R.C.; Baker, H.H.; Marimont, D.H. (1987).  
Epipolar-plane image analysis: an approach to determine structure from motion. Int. J. Computer Vision 1, 7-55
- Braddick, O.J. (1974)  
A short range process in apparent motion. Vision Res, 14, 519-527.
- Braitenberg, V. (1967)  
Patterns of projection in the visual system of the fly. I- Retina-lamina projections. Exp. Brain Res., 3, 271-298.
- Brooks, R.A. (1986)  
A robust layered control system for a mobile robot. IEEE J. Robotics and Automation, RA-2, 14-24
- Brooks, R.A. ; Maes, P. ; Mataric, M.J. ; More, G. (1990)  
Lunar base construction robots. IROS '90, 389-392.
- Buchner E. (1976)  
Elementary movement detectors in an insect visual system. Biol. Cybern., 24, 85-101.

- Buchner, E. (1984)  
Behavioral analysis of spatial vision in insects. In: M. A. Ali (ed.) *Photoreception and vision in invertebrates*. Plenum, New York, London, pp. 561-621.
- Campos-Ortega, J.A., Strausfeld, N.J. (1972).  
Columns and layers in the second synaptic region of the fly's visual system: The case for two superimposed neuronal architectures. In: "Information Processing in the Visual system of Arthropods." R. Wehner (ed.), Springer Verlag, Berlin, New-York, pp. 31-36.
- Cao, Z.L. ; Oh, S.J. ; Hall, E.L. (1986)  
Omnidirectional dynamic vision positioning for a mobile robot. *Opt. Engng* 25, 1278-1283
- Chatila, R. (1981)  
Système de navigation pour un robot mobile autonome : modélisation et processus décisionnels. Thèse de Docteur-Ingénieur, UPS, Toulouse
- Chatila, R. ; Laumond, J. (1985)  
Position referencing and consistent world modeling for mobile robots. *Proc. 1986 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation*
- Coles, L.S.; Robb, A.M.; Sinclair, P.L.; Smith, .H.; Sobek, R.P. (1975)  
Decision analysis for an experimental robot with unreliable sensors. *Proc. 4th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Tbilisi, Georgia, URSS.*
- Connell, J.H. (1989)  
A colony architecture for an artificial creature. MIT Artif. Intell. Lab. Techn. Report 1151
- Crowley, J.L. (1985)  
Dynamic world modeling for an intelligent mobile robot using a rotating ultra-sonic ranging device. *Proc. 1985 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation, St Louis, MO*
- DeVoe, R.D., Ockleford, E.M. (1976)  
Intracellular responses from cells of the medulla of the fly, *Calliphora erythrocephala*. *Biol. Cybern.*, 23, 13-24.
- De Voe, R.D. (1980)  
Movement sensitivities of cells in the fly's medulla. *J. comp. Physiol.*, 138, 93-119.
- Dickmanns, E.D. ; Graefe, V. (1988a)  
Dynamic monocular machine vision. *Mach. Vis. Applic.* 1, 223-240
- Dickmanns, E.D. ; Graefe, V. (1988b)  
Applications of dynamic monocular machine vision. *Mach. Vis. Applic.* 1, 241-261
- Drumheller, M. (1987)  
Mobile robot localization using sonar. *IEEE Trans. on PAMI, PAMI-9, N°2*
- Dunlay (1987)  
Obstacle avoidance on the autonomus land vehicle using the warp systolic array machine. *Proc of SPIE, Mobile Robots II, 852 : 44-53*

- Dvorak, D.R., Bishop, L.G., Eckert, H.E. (1975).  
On the identification of movement detectors in the fly optic lobe. *J. comp. Physiol.*, 100, 5-23.
- Eckert, H. (1980)  
Functional properties of the H1-neurone in the third optic ganglion of the blowfly, *phaenicia*.  
*J. comp. Physiol.*, 135, 29-39.
- Elfes, A. (1986)  
A sonar-based mapping and navigation system. *Proc. IEEE Intern. Conference on Robotics and Automation*.
- Eriksson, S. (1983)  
Vector analysis in a neural network. *Uppsala Psychol. Rep.*, n°350.
- Franceschini, N. (1975)  
Sampling of the visual environment by the compound eye of the fly: fundamentals and applications. In *Photoreceptor optics*. A.W. Snyder, R. Menzel (eds). Springer Verlag, Berlin, pp. 98-125.
- Franceschini, N. (1983)  
In vivo microspectrofluorimetry of visual pigments. In: "The biology of Photoreception". D.J. Cosens & D. Vince-Price (eds.), University Press, Cambridge UK., pp. 53-85.
- Franceschini, N. (1985)  
Early processing of colour and motion in a mosaic visual system. *Neurosci. Res.*, Suppl. 2, 517-549.
- Franceschini, N., Riehle A., Le Nestour A. (1989)  
Directionnaly selective motion detection by insect neurons  
In : "Facets of vision". Stavenga D.G. & Hardie R.C. (eds.), Springer, Berlin, Heidelberg  
pp. 360-390
- Gage, S.; Evans, D.; Hodapp, M.; Sorensen, H.; Jamison, D.; Krause, B. (1981)  
*Optoelectronics Fiber-optics applications manual*. Second Edition. Hewlett-Packard Optoelectronics Division. McGraw-Hill Book Company. New York.
- Garnousset, H. (1986)  
Interprétation du mouvement 3D: Une approche par vision dynamique. Thèse 3ème cycle, Spécialité Automatique. Université Sabatier, Toulouse.
- Gibson, J.J. (1958)  
Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *Brit. J. Psychol.*, 49, 182-194.
- Giralt, G. (1987)  
Les robots mobiles autonomes. In "Derniers développements en automatique, informatique, robotique, micro-électronique, Séminaires du LAAS/CNRS, Cepadues Editions, pp 167-196

- Giralt, G. (1990)  
Les robots mobiles: Principales réalisations et perspectives. Exporobot, Paris.
- Götz, K.G. (1964)  
Optomotorische untersuchungen des visuellen systems einiger Augenmutanten der Fruchtfliege *Drosophila*. *Kybernetik*, 2, 77-92.
- Götz, K.G. (1968)  
Flight control in *Drosophila* by visual perception of motion. *Kybern.*, 4, 199-208.
- Hardie, R.C. (1977)  
Electrophysiological properties of R7 and R8 in the Dipteran Retina. *Z. Naturforsch.*, 32c, 887-889.
- Hassenstein, B, Reichardt, W. (1956)  
Systemtheoretische Analyse der Zeit-, Reihenfolgen- und Vorzeichenauswertung bei der Bewegungsperzeption des Rüsselkäfers *Chlorophanus*. *Z. Naturforsch.*, 11b, 513-524.
- Hausen, K. (1976a)  
Struktur, Funktion und Konnektivität bewegungsempfindlicher Interneurone im dritten optischen Neuropil der Schmeissfliege *Calliphora erythrocephala*. Dissertation, Eberhard-Karls-Universität Tübingen.
- Hausen, K (1976b)  
Functional characterization and anatomical identification of motion sensitive neurons in the lobula plate of the blowfly *Calliphora erythrocephala*. *Z. Naturforsch.*, 31c, 629-633.
- Hausen, K. (1981)  
Monocular and binocular computation of motion in the lobula plate of the fly. *Verh. Dtsch. Zool. Ges.*, 1981, 49-70.
- Hausen, K. (1982)  
Motion sensitive interneurons in the optomotor system of the fly. I. The horizontal cells: structure and signals. *Biol. Cybern.*, 45, 143-156.
- Hausen, K. (1984)  
The lobula-complex of the fly: structure, function and significance in visual behaviour. In : *Photoreception and Vision in Invertebrates*". M.A. Ali (ed.), Plenum, pp. 523-559.
- Hebert, M. (1986)  
Outdoor scene analysis using range data. In : *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, San Francisco, pp. 1426-1432
- Hildreth, E.C., Koch, C. (1987)  
The analysis of visual motion: from computational theory to neuronal mechanisms. *Ann. Rev. Neurosci.*, 10, 477-533.
- Hodgkin, A.L. ; Huxley, H. (1952)  
A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *J. Physiol. (London)* 117, 500-544

- Holland, J.M. (1985)  
Rethinking robot mobility. *Robotic age*, January, 26-31.
- Hoppensteadt, F.C. (1990)  
Neurons and some mathematical models of them. In: *An introduction to the mathematics of neurons*, F.C. Hoppensteadt (ed.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp 17-37
- Horn, B.K.P. (1974)  
The application of linear systems analysis to image processing. Some notes. MIT Artif. Intell. Lab. Working Paper 100
- Horn, B.K.P. (1986)  
Robot vision. MIT press, Cambridge, Mass., U.S.A..
- Kanade, T. ; Asaka, M. (1981)  
Non-contact visual three dimensional ranging devices. In *Machine Perception*, S.P.I.E., Vol. 283.
- Khatib, O. (1986)  
Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Internat. J. Rob. Res.* 5, N°1
- Kirschfeld, K. (1967)  
Die Projektion der optischen Umwelt auf das Raster der Rhabdomere im Komplexauge von *Musca*. *Exp. Brain Res.*, 3, 248-270.
- Kirschfeld, K. (1972)  
The visual system of *Musca*: studies on optics, structure and function. In: *Information processing in the visual system of Arthropods*". R. Wehner (ed.), Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 61-74.
- Kirschfeld, K. (1976)  
The resolution of lens and compound eyes. In: "*Neural Principles in vision*". F. Zettler, R. Weiler (eds.), pp. 254-370.
- Kirschfeld, K. (1979)  
The visual system of the fly: physiological optics and functional anatomy as related to behavior. In : "*Neurosciences: Fourth Study Program*." F.O. Schmitt, F.G. Worden (eds), MIT Press, Cambridge Massachusetts, pp. 297-310.
- Kirschfeld, K., Franceschini, N. (1969)  
Ein Mechanismus zur Steuerung des Lichtflusses in den Rhabdomeen des Komplexauges von *musca*. *Kybernetik*, 6, 13-22.
- Lacombe, J.L.; Deplante, M. (1991)  
Robot mobile d'intervention et de sécurité civile. Projet AMR. Colloque, bilan A2RP MRT Janvier 1991

- Laughlin, S. (1984)  
The roles of parallel channels in early visual processing by the arthropod compound eye. In: "Photoreception and vision in Invertebrates". M.A. Ali (ed.), Plenum, pp..
- Lenting, S. (1985)  
Functional characteristics of a wide-field movement processing neuron in the blowfly visual system. Thèse, Université de Groningen.
- Lewis, E.R. (1968)  
An electronic model of neuroelectric point process. *Kybern.* 5, 30-46
- Maddess, T., Laughlin, S.B. (1985)  
Adaptation of the motion-sensitive neurone H1 is generated locally and governed by contrast frequency. *Proc. Roy. Soc. Lond. B*, 225, 251-275.
- McCann, G.D., Dill, J.C. (1969)  
Fundamental properties of intensity form, and motion perception in the visual nervous system of *Calliphora phaenicia* and *Musca domestica*. *J. gen. Physiol.*, 53, 385-413.
- Marr, D. (1982)  
Vision. Freeman, San Francisco.
- Mataric, M.J. (1990)  
A distributed model for mobile robot environment-learning and navigation. MIT Artif. Intell. Lab. Techn. Report 1228
- Mead, C. (1989)  
Analog VLSI and neural systems, Addison-Wesley, Reading, MA, 371pp
- Meyer, J.A.; Wilson, S.W. (1991)  
From animals to animats. Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive behavior. The MIT Press, Cambridge (Mass), London.
- Mimura, K. (1971)  
Movement discrimination by the visual system of flies. *Z. vergl. Physiol.*, 73, 105-138.
- Mimura, K. (1972)  
Neural mechanisms, subserving directional selectivity of movement in the optic lobe of fly. *J. comp. Physiol.* 80, 409-437.
- Moravec, H.P. (1983)  
The Stanford Cart and the CMU Rover. *Proc. IEEE* 71, 872-884
- Moser, J.M. ; Everett, H.R. (1990)  
Wide-angle optical ranging system. In: Mobile robots IV. *Proc. SPIE* 1195, W.J. Wolfe and W.H. Chun (eds), pp 2-20
- Nagel, H.H. (1986)  
Image sequences\_ten (octal) years\_ from phenomenology towards a theoretical foundation  
8th ICPR, J.P. Haton (ed.), World Scientific, pp 459-483

Nakayama, K. (1985)

Biological image motion processing: a review. *Vision Res.*, 25, 625-660.

Nilsson, N.J. (1969)

A mobile automaton: an application of artificial intelligence techniques. Proc. 1st international Joint Conference on Artificial Intelligence, Washington D.C., USA.

Payton (1988)

Internalized plans: a representation for action resources. Workshop on Representation and Learning in an Autonomous Agent.

Pichon, J.M. ; Blanes, C. ; Franceschini, N. (1990)

Visual guidance of a mobile robot equipped with a network of self-motion sensors. In: Mobile robots IV. Proc. SPIE 1195, W.J. Wolfe and W.H. Chun (eds), pp 44-53

Poggio, T.; Reichardt, W. (1976)

Visual control of orientation behaviour in the fly. *Quart. Rev. Biophys.*, 9, 311-438.

Prazdny, K. (1980)

Egomotion and relative depth map from optical flow. *Biol. Cybern.* 36, 87-102.

Rall, W. (1959)

Branching dendritic trees and motoneuron membrane resistivity. *Exp. Neurol.* 1, 491-527

Reichardt, W. (1969)

Movement perception in insects. In: Processing of optical data by organisms and machines. W. Reichardt (ed.), Academic press, New York, pp. 465-493.

Riehle, A. ; Franceschini, N. (1984)

Motion detection in flies : parametric control over ON-OFF pathways. *Exp. Brain Res.* 54, 390-394

Shaw, S. (1981)

Anatomy and physiology of identified non-spiking cells in the photoreceptor-lamina complex of the compound eye of insects, especially Diptera. In : "Neurones without impulses". A. Roberts, B. Bush (eds.), Cambridge University press, pp. 61-116.

Si Ahmed, N. (1986)

Contribution à l'intégration de la vision dynamique au système de perception 3D du robot Hilare. Thèse Docteur Ingénieur. Spécialité Automatique. n° 959. Université de Toulouse.

Stavenga, D.G.; Hardie, R.C. (1989)

Facets of vision. Springer, Berlin Heidelberg.

Strausfeld, N.J. (1976a)

Mosaic organizations, layers and visual pathways in the insect brain. In: "Neural principles in vision". F. Zettler, R. Weiler (eds.), Springer Berlin, Heidelberg, New York, 245-279.

Strausfeld, N.J. (1976b)

"Atlas of an insect brain". Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Strausfeld, N.J. (1989)

Beneath the compound eye: neuroanatomical analysis and physiological correlates. In: . Facets of vision. D.G. Stavenga, R.C. Hardie (eds), Springer, Berlin Heidelberg, pp. 317-359.

Thorpe, C.; Hebert, M.; Kanade, T.; Shaffer, S. (1987)

Vision and navigation for the Carnegie Mellon Navlab. Ann. Rev. Comp. Sci., Vol. II. J. Traub (ed.). Annual review Inc, Palo Alto, USA

Thompson, A.M. (1977)

The navigation system of the JPL robot. Proc. 5th IJCAI, Cambridge, MA

Trujillo-Cenóz, O., Melamed, J. (1966)

Compound eye of dipterans: anatomical basis for integration. An electron microscope study. J. Ultrastruct. Res., 16, 395-398.  
MIT, 737-748.

Ullman, S; (1981)

Analysis of visual motion by biological and computer systems. Computer, August, 58-69.

Ullman, S. (1986)

Artificial intelligence and the brain: computational studies of the visual system. Ann. rev. Neurosci., 9, 1-26.

Van Hateren, J.H. (1987)

Neural superposition and oscillations in the eye of the blowfly. J. comp. Physiol., 161, 849-855.

Warren, R. ; Wertheim, A.H. (1990)

Perception & control of self-motion. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Hillsdale, New Jersey, Hove and London.

Wehrhahn, C. ; Poggio, T. ; Bühlhoff, H. (1982)

Tracking and chasing in houseflies (*Musca*). An analysis of 3-D flight trajectories. Biol. Cybern. 45, 123-130

Whiteside, T.C.D. ; Samuel, G.D. (1970)

Blur zone

Nature 225, 94-95