

THESE

présentée par

Jean-Marc PICHON

Ingénieur E.N.S.E.R.B.

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

1ère partie : Principes et simulation du robot

Soutenue le 12 juillet 1991 devant le jury :

MM.	J. CROWLEY	Président
	P. COIFFET	
	N. FRANCESCHINI	
	J. HERAULT	
	P. PUGET	

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	MOSSIERE	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	ROBERT	ROBERT	François
ENSPG	DURAND	Jean-Louis	SABONNADIERE	SABONNADIERE	Jean-Claude
ENSHMG	FAUTRELLE	Yves	SAUCIER	SAUCIER	Gabriele
ENSIEG	FOGGIA	Albert	SCHLENKER	SCHLENKER	Claire
ENSIMAG	FONLUPT	Jean	SCHLENKER	SCHLENKER	Michel
ENSIEG	FOULARD	Claude	SERMET	SERMET	Pierre
UFR PGP	GANDINI	Alessandro	SILVY	SILVY	Jacques
ENSPG	GAUBERT	Claude	SIRIEYS	SIRIEYS	Pierre
ENSERG	GENTIL	Pierre	SOHM	SOHM	Jean-Claude
ENSIEG	GENTIL	Sylviane	SOLER	SOLER	Jean-Louis
IUFA	GREVEN	Hélène	SOUQUET	SOUQUET	Jean-Louis
ENSIEG	GUEGUEN	Claude	TROMPETTE	TROMPETTE	Philippe
ENSERG	GUERIN	Bernard	VINCENT	VINCENT	Henri
ENSEEG	GUYOT	Pierre	ZADWORN	ZADWORN	François
ENSIEG	IVANES	Marcel			
ENSIEG	JAUSSAUD	Pierre			

CHERCHEURS DU C.N.R.S.

*Copie
H. Langot*

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
ESCODIER	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
-----------------	--	--------------------------------------

"... Il y a des mouches, surtout. Lalla les aime bien, malgré leur bruit et leurs piqûres. Elle ne sait plus très bien pourquoi elle les aime, mais c'est comme ça. C'est peut être à cause de leurs pattes si fines, de leurs ailes transparentes, ou bien parce qu'elles savent voler vite, en avant, en arrière, en zig-zag, et Lalla pense que ça doit être bien de savoir voler comme ça ..."

J.M.G. Le Clézio : "Désert"

"... Je me rappelle qu'un jour, pour me dire la grandeur de l'Eternel, ma mère m'expliqua qu'il aimait les mouches, et chaque mouche en particulier, et elle ajouta : j'ai essayé de faire comme Lui pour les mouches, mais je n'ai pas pu, il y en a trop ..."

Albert Cohen : "Ô vous, frères humains"

*A Danielle ...
A toute ma famille ...*

REMERCIEMENTS

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire s'est essentiellement déroulé au Laboratoire de Neurocybernétique (CNRS, Marseille).

Je remercie Monsieur Nicolas Franceschini, Directeur de Recherche au CNRS, pour m'avoir accueilli dans son équipe.

Je remercie Messieurs :

- James Crowley, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble,
- Philippe Coiffet, Directeur de Recherche au CNRS (CRIIF, Centre de Robotique Intégrée d'Ile de France, Paris),
- Jeanny Hérault, Professeur à l'Université J. Fourier de Grenoble.
- Pierre Puget (LETI, Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble).

pour avoir bien voulu apporter leur caution scientifique à ce travail en acceptant de faire parti du jury de thèse.

Je remercie Monsieur Jean-François Lemaitre (IIRIAM, Institut International de Robotique et d'Intelligence Artificielle de Marseille) ainsi que Messieurs Jean-Louis Armand et Jean Mermet (IMT, Institut Méditerranéen de Technologie) pour avoir bien voulu m'apporter un soutien financier.

Je remercie enfin 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, C. Raybier, J. Roumieu, A. Totin et A. Yvinec.

AVANT-PROPOS

Ce projet est le fruit d'un travail commun, effectué par C. Blanes et J.M. Pichon 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 (DEM) : performances, limites.
- Chapitre IV : L'oeil-DEM complet : architecture, 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 (DEM), 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 définitions et notations	19
Chapitre I	21
INTRODUCTION GENERALE	
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	31
I.2.4. Conclusion	33
Chapitre II	35
PRINCIPES DU SYSTEME VISUEL DU ROBOT BASE SUR LA DETECTION LOCALE DU MOUVEMENT METHODES DE SIMULATION	
II.1. ROLE DU SYSTEME VISUEL DANS LE GUIDAGE DU ROBOT	39
II.1.1. Le principe de stéréo-mouvement appliqué à la navigation	39
II.1.2. Représentation de l'environnement par l'oeil-DEM	40
II.2. CAS D'ETUDE	42
II.2.1. Disposition de l'oeil-DEM sur la plate-forme mobile	42
II.2.2. L'environnement	43
II.2.3. Le champ de vision du robot	44
II.2.4. La stratégie de locomotion du robot	44
II.3. UN LOGICIEL DE SIMULATION COMME OUTIL D'ANALYSE ET DEVELOPPEMENT	45
II.4. PRINCIPES DE LA MESURE TELEMETRIQUE EFFECTUEE PAR L'OEIL-DEM	46
II.4.1. Principes géométriques d'un DEM en mouvement	46
II.4.2. Principes du traitement du signal : configuration de base du réseau de DEMs	49
a Description de l'architecture opto-électronique de L'oeil-DEM	49
b Extraction et identification d'un front de contraste	51
c Mesure du retard Δt	52

d	Discussion du principe	53
II.4.3.	Formalisation et paramétrage de la simulation de l'oeil-DEM	53
a	L'environnement.....	53
b	Les ommatidies	54
c	Le signal R_i du photo-récepteur de l'ommatidie.....	55
d	L'opération de différentiation temporelle	55
e	L'opération de seuillage à hystérésis	56
f	La mesure du retard Δt	56
e	Calcul de la distance radiale D_i	57
II.4.4.	Exemples de base : simulation d'un DEM en mouvement de translation	57
II.4.5.	Discussion des résultats préliminaires.....	61
a	Sensibilité au contraste variable avec la distance	61
b	La précision sur l'estimation des coordonnées polaires des points de contraste.....	62
		65
Chapitre III-----		
ANALYSE D'UN DETECTEUR ELEMENTAIRE DE MOUVEMENT (DEM)		
PERFORMANCES ET LIMITES.		
III.1.	POSITION DU PROBLEME	68
III.1.1.	Introduction.....	68
III.1.2.	Performances individuelles demandées à chaque DEM	69
III.1.3.	Performances d'un DEM ramenées au comportement optomoteur du robot.....	70
III.2.	LIMITES DE LA VERSION DE BASE DU DEM : PROBLEMES DE CORRESPONDANCE.....	71
III.2.1.	Domaine de validité de la version de base du DEM.....	71
III.2.2.	Problèmes de correspondance en 10 exemples.....	73
III.2.3.	Conclusion	88
III.3.	VERSION AMELIOREE DU DEM	89
III.3.1.	Séparation des voies ON et OFF.....	89
III.3.2.	Principe d'un DEM bidirectionnel	91
III.3.3.	Domaine de validité du DEM {bidirectionnel + voies ON/OFF séparées}	94
a	Limite du domaine de validité	94
b	Interprétation géométrique de la condition limite.....	96
c	Comparaison avec le domaine de validité de la version de base du DEM.....	96
d	Domaine de validité pour une mire périodique, plane, et parallèle au mouvement.....	97
III.3.4.	Ajustement du filtrage+seuillage : formalisme pour une mire périodique	99
a	Rôle et principe de l'ajustement du filtrage+seuillage	99
b	Cas simple d'un DEM perpendiculaire au mouvement	100

c	Généralisation de l'ajustement filtrage+seuillage à un DEM quelconque	105
d	Choix d'un couple recouvrement-seuil	106
e	Résultats avec des mires périodiques	109
III.3.5.	Performances du DEM amélioré dans un environnement quelconque	116
a	Performances sur le sens du mouvement.....	116
b	Performances sur l'estimation de la distance radiale des contrastes	117
III.3.6.	Conclusion	125

Chapitre IV----- 129

L'OEIL-DEM COMPLET : ARCHITECTURE ET PERFORMANCES.

IV.1.	CONTEXTE VISUO-MOTEUR.....	133
IV.1.1.	Situation de l'oeil-DEM dans l'asservissement optomoteur	133
IV.1.2.	Le mode de locomotion et le séquençement des acquisitions visuelles	134
IV.2.	DISTRIBUTION SPATIALE DES DEMS POUR UN ECHANTILLONNAGE OPTIMUM DU PLAN AZIMUTAL	135
IV.3.	SOLUTION RETENUE : UN OEIL-DEM BASE SUR UNE ZONE DE VISION CIRCULAIRE	
IV.3.1.	Propriétés fondamentales de cette solution	139
IV.3.2.	Echantillonnage du flux optique dans la direction du mouvement	142
IV.3.3.	Récapitulatif : l'oeil-DEM complet.....	144
IV.4.	PERFORMANCES DE L'OEIL-DEM COMPLET	146
IV.4.1.	Distribution de la calibration en distance dans le réseau de DEMs	146
IV.4.2.	Généralisation de l'ajustement filtrage+seuillage à l'ensemble de l'oeil-DEM.....	147
a	Choix d'un seuil commun à tous les DEMs.	148
b	Distorsion avec l'angle polaire : effet sur la distribution du recouvrement angulaire	148
IV.4.3.	Représentation de l'environnement pendant une translation élémentaire.....	151
IV.4.4.	Approche plus globale des problèmes de correspondance.....	156
IV.5.	CONCLUSION.....	158

Chapitre V----- 161

L'OEIL-DEM APPLIQUE A L'EVITEMENT D'OBSTACLES ANALYSE COMPORTEMENTALE DU ROBOT.

V.1.	PRINCIPES DE NAVIGATION DU ROBOT	164
V.1.1.	L'oeil-DEM en boucle fermée.....	164
V.1.2.	L'architecture "évolutionniste" du système de navigation.....	165
V.1.3.	Choix d'une chaîne optomotrice bas-niveau consacrée à l'anticollision.....	166

V.2. LE SYSTEME ANTICOLLISION	167
V.2.1. Principes géométriques de l'algorithme anticollision	168
a Critères géométriques d'anticollision	168
b Critères supplémentaires.....	168
c Cas d'un mouvement continu et d'un senseur parfait	169
d Aspects réflexes de l'algorithme anticollision	169
V.2.2. Principe du calcul effectué par le système anticollision : génération de patterns moteurs	171
a Opérations appliquées individuellement à chaque point de contraste	171
b Interactions latérales entre chaque point de contraste : mélange des zones interdites	173
V.3. PARAMETRAGE DE LA CHAINE COMPLETE "OEIL-DEM + SYSTEME ANTICOLLISION"	174
V.3.1. Principe du paramétrage	174
a Le coefficient relatif d'anticipation du robot : K_{ant}	175
b Modulation du flux de connexions de chaque DEM sur le réseau anticollision.....	175
c Remarque sur la méthode de simulation	176
V.3.2. Intégration des incertitudes engendrées par les translations élémentaires	176
a Calcul du coefficient d'anticipation	176
b Ajustement de l'interconnexion entre le réseau DEM et le réseau anticollision	177
c Ajustement du seuillage sur la distance pour valider le cercle de vision R_v	178
d Domaine de validité des translations élémentaires	179
e Exemples	179
V.3.3. Intégration des incertitudes inhérentes aux DEMs	183
a Incertitudes en distance dues aux problèmes de correspondance non résolus.....	183
b Incertitudes dues à l'angle d'acceptance des ommatidies	184
c Exemples	185
V.3.4. Intégration des paramètres cinématiques du robot : stratégie de braquage.....	186
a Caractéristiques de la plate-forme.....	186
b Transformation de la consigne de braquage en une commande dynamique des deux moteurs ..	187
c Intégration de la zone aveugle de braquage liée à la cinématique du robot.....	190
d Exemples.....	191
V.4. ANALYSE COMPORTEMENTALE DU ROBOT EN FONCTION DE LA CONFIGURATION DE SON SYSTEME VISUEL	191
V.4.1. Le "robot modèle"	194
Comportement avec un senseur théorique parfait	194
V.4.2. Le "robot peureux "	196
Effets des erreurs de correspondance, lorsqu'elles ne sont pas filtrées	196
V.4.3. Le "robot imperturbable"	198
Comportement avec l'oeil-DEM dont l'ajustement du "filtrage+seuillage" a été optimisé	198

V.4.4.	Le "robot économique"	200
	Effets de la réduction du champ de vision	
V.4.5.	Le "robot téméraire"	202
	Quelques exemples dans un environnement dynamique	

Chapitre VI-----	205
------------------	-----

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

VI.1. DES SENSEURS DEVELOPPES SPECIFIQUEMENT POUR LE GUIDAGE DES CREATURES.....	209
VI.2. INTERDEPENDANCE ENTRE L'ASPECT SENSORIEL ET L'ASPECT MOTEUR.....	209
VI.3. EXTENSIONS	211
VI.4. ET LA MOUCHE ?	214

Annexe-----	215
-------------	-----

LA MOUCHE

A.1. CE QUI FAIT L'INTERET DE LA MOUCHE.....	219
A.2. L'APPAREIL VISUEL DE LA MOUCHE.....	220
A.2.1. Introduction.....	220
A.2.2. L'échantillonnage de l'espace par l'ensemble cornée-rétine	222
A.2.3. Les unités de traitement.....	227
a "Voir" en termes de réseaux.....	227
b Les neurones détecteurs de mouvement de la lobula-plate	228
c La lamina : une mise en forme de l'information.....	231
d La medulla : le fossé qui sépare lamina et lobula	233
A.3. DES DETECTEURS ELEMENTAIRES DE MOUVEMENT	234
A.3.1. Des modèles pour mesurer le mouvement.....	234
A.3.2. Expériences sur un neurone détecteur de mouvement chez la mouche : H1	237
a L'adaptation de H1 en réponse au mouvement.....	237
b La contribution de chaque corrélateur à la réponse de H1	238
c Caractéristiques dynamiques et câblages de chaque D.E.M.	239

Références bibliographiques -----	243
-----------------------------------	-----

Définitions

RMA : Robot Mobile Autonome.

DEM : Détecteur Élémentaire de Mouvement.

Oeil-DEM : système visuel principal, constitué de Détecteurs Élémentaires de Mouvement, qui permet au robot d'estimer la position des obstacles sur les 360° du plan azimutal.

Plan azimutal : plan parallèle au sol servant à la représentation polaire de l'environnement.

Ommatidie : module opto-électronique constituant l'une des voies d'entrée d'un DEM, à laquelle est associée un axe optique, et correspondant à un point d'échantillonnage de l'environnement.

Détecteur de cible : système de vision additionnel permettant de détecter une cible positionnée dans le plan azimutal.

Pattern moteur : représentation de l'environnement sous forme de commandes motrices.

Réseau : système périodique d'éléments identiques interconnectés latéralement.

Notations

V_o vitesse constante imposée au robot pendant les mouvements de translation servant aux acquisitions visuelles.

Ω vitesse angulaire relative des points de contraste.

D_i distance radiale du point de contraste détecté dans la direction i .

ϕ_i angle polaire entre l'axe optique de l'ommatidie n° i et la direction de mouvement du DEM.

$\Delta\phi_i$ angle interommatidial = angle entre deux ommatidies voisines appartenant au même DEM.

$\Delta\phi_i$ angle d'acceptance = largeur à mi-hauteur du diagramme de sensibilité angulaire de l'ommatidie n° i .

H_h valeur du seuil haut du système à hystérésis placé sur chaque voies d'entrée d'un DEM.

G paramètre constant définissant la résolution angulaire moyenne de l'oeil-DEM.

ΔL longueur minimale d'une translation élémentaire nécessaire à l'acquisition visuelle.

R_v rayon du cercle de vision échantillonné par l'oeil-DEM et servant de périmètre de sécurité nécessaire à l'algorithme anticollision.

R_o rayon du disque représentant les dimensions physiques du robot.

K_{ant} ... coefficient d'anticipation du robot (caractérisant le rapport R_v/R_o).

Chapitre I

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I

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 et Annexe) .

"Insectes Mobiles Autonomes"	"Robots Mobiles Autonomes"
Environnement (inconnu, non structuré, optiquement contrasté)	
Optique (optique composée, basse résolution spatiale, champ panoramique)	
Photo-transduction (capteurs passifs, haute sensibilité, dynamique importante)	
Traitement du signal (réseaux parallèles, composants analogiques, faible bande passante)	
Système sensori-moteur (basé sur l'analyse visuelle du mouvement, câblé, embarqué, fonctionnement temps réel)	
Parties mécaniques (petite taille, faible inertie, hautes vitesses et accélérations, énergie embarquée)	
Aspect comportemental (systèmes réactifs, guidage bas niveau, évitement d'obstacles, poursuite de cibles)	

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 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° 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° 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° et 3° . 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 interfaçant 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 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*.

1.2. 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 essayer d'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).

I.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 triangulation 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 proximateurs 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 plateforme 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" du JPL 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

***PRINCIPES DU SYSTEME VISUEL DU ROBOT
BASE SUR LA MESURE LOCALE DU MOUVEMENT
METHODES DE SIMULATION***

Chapitre II

II.1. ROLE DU SYSTEME VISUEL DANS LE GUIDAGE DU ROBOT

II.1.1. Le principe de stéréo-mouvement appliqué à la navigation

II.1.2. Représentation de l'environnement par l'oeil-DEM

II.2. CAS D'ETUDE

II.2.1. Disposition de l'oeil-DEM sur la plate-forme mobile

II.2.2. L'environnement

II.2.3. Le champ de vision du robot

II.2.4. La stratégie de locomotion du robot

II.3. UN LOGICIEL DE SIMULATION COMME OUTIL D'ANALYSE ET DE DEVELOPPEMENT

II.4. PRINCIPES DE LA MESURE TELEMETRIQUE EFFECTUEE PAR L'OEIL-DEM

II.4.1. Principes géométriques d'un DEM en mouvement

II.4.2. Principes du traitement du signal : configuration de base du réseau de DEMs

- a Description de l'architecture opto-électronique de L'oeil-DEM
- b Extraction et identification d'un front de contraste
- c Mesure du retard Δt
- d Discussion du principe

II.4.3. Formalisation et paramétrage de la simulation de l'oeil-DEM

- a L'environnement
- b Les ommatidies
- c Le signal R_i du photo-récepteur de l'ommatidie
- d L'opération de différentiation temporelle
- e L'opération de seuillage à hystérésis
- f La mesure du retard Δt
- e Calcul de la distance radiale D_i

II.4.4. Exemples de base : simulation d'un DEM en mouvement de translation

II.4.5. Discussion des résultats préliminaires

- a Sensibilité au contraste variable avec la distance
- b La précision sur l'estimation des coordonnées polaires des points de contraste

Ce chapitre décrit le principe et les méthodes de développement de la partie visuelle du robot, appelée dans la suite "oeil-DEM", car ce système visuel repose essentiellement sur un réseau de Détecteurs Élémentaires de Mouvement (DEMs). L'aspect technologique et la réalisation proprement dite de cet oeil-DEM sont développés dans la Thèse C. Blanes (Chap.III).

II.1. ROLE DU SYSTEME VISUEL DANS LE GUIDAGE DU ROBOT

II.1.1. Le principe de stéréo-mouvement appliqué à la navigation

De manière générale, la survie d'un animal dépend de ses capacités à se mouvoir dans son environnement (pour rechercher de la nourriture ou capturer une proie, pour échapper à un prédateur ou plus simplement pour éviter les obstacles lorsqu'il se promène au hasard). Pour remplir cette tâche, la plupart des créatures vivantes utilisent la vision et comme on l'a déjà évoqué au Chap.I plus spécialement la *mesure du mouvement visuel*, induit par leur propre déplacement.

Lorsqu'une créature se déplace parmi des objets contrastés, un champ instantané de vecteurs vitesse, le *flux optique*, est généré sur sa rétine (Gibson 1958). Le flux optique est complexe et résulte des mouvements de rotation et de translation propres à la créature mais également des mouvements propres aux objets non stationnaires. Dans un environnement rigide et stationnaire, le flux optique peut en principe être séparé en une composante translationnelle et rotationnelle, bien que cette opération soit un problème majeur en soi (Longuet-Higgins et Pradny 1980, Horn et Shunck 1981). Si le système sensori-moteur est capable d'extraire la composante translationnelle du flux optique, alors il peut estimer la distance radiale des objets (Koenderink et Van-Doorn 1976, Pradny 1980, Loomis et Eby 1989) selon un principe de *stéréo-mouvement* résumé aux conditions limites par l'équation suivante (Whiteside et Samuel 1970) :

$$\Omega = \sin(\varphi) \cdot V/D \quad (\text{éq.I.1})$$

où Ω est la vitesse angulaire instantanée d'un point de contraste détecté selon un angle φ par rapport à la direction du mouvement, V la vitesse linéaire instantanée du système mobile et D la distance radiale du point de contraste. Le principe de stéréo-mouvement est un principe de stéréo-vision (Horn 1986) basé sur un *senseur unique en mouvement*, l'autre principe de stéréo-vision connu étant bien entendu la stéréo-vision binoculaire basée sur *deux senseurs distincts* séparés dans l'espace.

Le principe de stéréo-mouvement est également connu sous le nom de la *parallaxe de mouvement* introduit par Helmholtz (1867) au siècle dernier pour expliquer la perception du relief par l'oeil humain. Intuitivement la parallaxe de mouvement consiste à déterminer la profondeur relative de deux objets en bougeant la tête latéralement. De nombreuses expériences comportementales récentes (Collett 1978, David 1979, Eriksson 1980, Horridge 1986, Preiss 1987, Lehrer et al. 1988, Kirchner et Srinivasan 1989) suggèrent que les insectes semblent utiliser un tel principe de *télémétrie basé sur leur propre mouvement* pour se guider dans leur environnement.

D'un point de vue pratique (Bolles et al. 1987, Brooks 1987a) le principe de stéréo-mouvement est sujet aux deux problèmes essentiels suivants qui vont être analysés dans le cadre de ce projet :

- comment développer de *manière réaliste* des *senseurs opto-électroniques*, capables de mesurer le flux visuel exprimé comme la vitesse angulaire locale de n'importe quel point de contraste dans l'environnement ; les difficultés liées à ce problème étant :

- les *problèmes de correspondance* inhérents à tout système utilisant la stéréométrie (Skifstad et Jain 1989) et qui, statistiquement, apparaissent d'autant plus nombreux que la résolution angulaire du système visuel est faible ce qui est le cas chez les insectes

- le problème de la mesure du *flux visuel dans la direction du mouvement* de la créature, où la vitesse angulaire tend rapidement vers zéro

- comment recouvrer et utiliser les différentes composantes du flux visuel, et plus particulièrement *extraire la partie translationnelle* induite par le mouvement propre de la créature

II.1.2. Représentation de l'environnement par l'oeil-DEM

L'oeil-DEM du robot n'a pas une vocation de senseur universel. Au contraire, c'est un système visuel spécifiquement développé pour le *guidage réflexe d'un robot mobile* se déplaçant à haute vitesse. Dans le cadre de ce projet, le principe de guidage a été réduit à une tâche optomotrice de bas niveau (cf. Chap.V) qui est l'évitement d'obstacles dans un environnement inconnu. Pour accomplir cette tâche, le robot a besoin de déterminer à chaque instant son *état dynamique* (géométrie-vitesses-accélérations) par rapport à chaque obstacle de l'environnement. Le rôle du système visuel que nous voulons développer est de mesurer puis de représenter les paramètres nécessaires à la caractérisation de cet état dynamique.

Comme cela a été évoqué au Chap.I, la principale contrainte que nous nous sommes imposé est de construire le système visuel du robot, sur la seule base de Détecteurs Élémentaires de Mouvement capables de mesurer localement dans chaque direction de l'espace la vitesse angulaire Ω des objets, et ceci dans un référentiel lié au robot (cf. §.II.4.1.). On peut donc souligner que l'oeil-DEM est *intrinsèquement un senseur de mouvement*, et notre objectif à long terme est de montrer que le problème d'évitement d'obstacles pourrait être résolu à partir de cette seule

information sur la vitesse angulaire des obstacles par rapport au robot sans qu'aucune donnée supplémentaire soit nécessaire.

Cependant, comme cela vient d'être évoqué (cf. §.II.1.1) la perception du mouvement et plus particulièrement du flux visuel, est complexe dans le sens où l'information mesurée dépend d'une part de la géométrie (position-orientation) des objets par rapport au robot, mais aussi de la cinématique respective du robot et de l'environnement ; cette interdépendance est d'ailleurs résumée par l'expression de la vitesse angulaire effectivement mesurée $\Omega = \sin(\varphi) \cdot V / D$ décrite précédemment (cf. éq.II.1) où V , ainsi que le couple (D, φ) représentent respectivement *dans le référentiel du robot*, la vitesse linéaire relative et les coordonnées polaires de l'obstacle détecté. Un *guidage efficace* doit tenir compte aussi bien de l'aspect *purement géométrique* (par exemple une distance radiale minimum qui doit être respectée entre le centre du robot et les obstacles environnants), que de l'aspect *cinématique* (par exemple la vitesse de rapprochement entre le robot et chaque objet dont dépend l'anticipation nécessaire pour changer de direction sans heurter d'obstacles).

Afin de réduire la complexité de cette étude nous allons essayer dans un premier temps d'analyser indépendamment l'effet de ces deux aspects et de raisonner dans un *modèle purement géométrique de l'environnement*. Pour ce faire, nous allons *fixer les paramètres cinématiques* de l'environnement et du robot de telle façon qu'ils soient à priori connus. Pratiquement cela va nous obliger à réguler de façon proprioceptive la vitesse du robot et à supposer que l'environnement est statique (cf. §.II.2.2.). Suite à cette réduction du problème, l'information mesurée par chaque DEM ne dépend plus que d'un type de paramètre inconnu, à savoir l'ensemble des paramètres caractérisant la géométrie relative entre l'environnement et le robot.

En conséquence dans le cadre de cette première approche, l'oeil-DEM peut être considéré non plus comme un "*senseur de mouvement*" mais comme un "*senseur-3D*" dont le rôle ici se restreint à effectuer à chaque instant une *représentation polaire* dans le *plan azimutal* (distance radiale + position angulaire) des obstacles susceptibles de provoquer une collision. Cette *représentation géométrique* effectuée par l'oeil-DEM n'est en fait valable que pour une vitesse V_0 bien déterminée du robot, dont dépend la calibration en distance absolue de chaque DEM. La généralisation de l'étude à une cinématique quelconque et inconnue entre le robot et son environnement ne sera abordée qu'à la fin du Chap.V (cf. §.V.4.5 "Le robot téméraire") ainsi qu'au Chap.VI "discussion et perspectives" de ce mémoire.

L'oeil-DEM est plutôt rudimentaire dans son principe, et l'objectif est de montrer qu'en dépit de ses propres limitations il peut être utilisé de façon efficace s'il est incorporé à une chaîne optomotrice conçue spécifiquement pour lui. Ainsi, il existe une forte interdépendance entre la partie sensorielle (Chap.III, Chap.IV) et la partie navigation (Chap.V) qui sont successivement traitées dans ce mémoire ; ces chapitres feront donc en permanence référence l'un à l'autre .

II.2. CAS D'ETUDE

Comme on vient de le souligner, le rôle de la partie visuelle dans la chaîne optomotrice est d'effectuer à chaque instant une représentation géométrique (au moins locale) de l'environnement, afin que le robot mobile puisse éviter en temps réel les collisions avec d'éventuels obstacles. Avant de détailler le principe de cette partie visuelle et de présenter l'outil de simulation (cf. §.II.4.), nous allons décrire ici le cas d'étude qui nous sert de base de travail, d'une part pour mettre en évidence la nature des problèmes à résoudre, d'autre part pour analyser ces derniers de façon plus quantitative.

II.2.1. Disposition de l'oeil-DEM sur la plate-forme mobile

Le but ici, n'est pas de détailler la disposition mécanique de l'ensemble du robot mais simplement de faire des hypothèses qui restent compatibles avec la réalisation du prototype. On suppose donc que :

- l'oeil-DEM est installé (fig.II.1) sur une plate-forme mobile du type "synchro-drive" roulant au sol, plate-forme circulaire et très compacte (rayon 15cm, hauteur 20cm, poids 10 kg) dont les

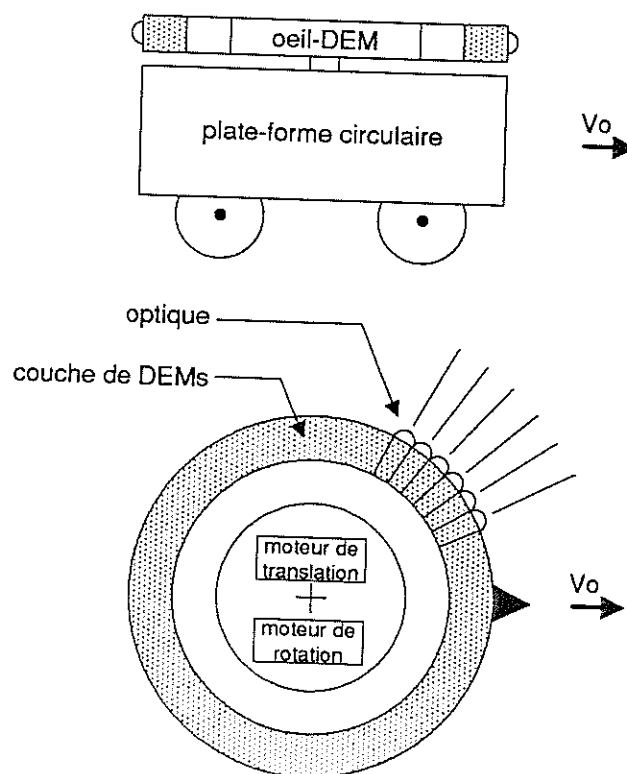


Fig.II.1 Illustration simplifiée de l'architecture de l'oeil-DEM et de son agencement sur la plate-forme mobile. Cet agencement permet de considérer l'ensemble du système comme un véritable oeil mobile dont le mouvement est directement contrôlé par un moteur de translation et un moteur de rotation.

performances sont détaillées dans la Thèse C. Blanes (Chap.VI). Cette plate-forme, dont la cinématique autorise un rayon de giration nul, est dite "holonomique".

- l'oeil-DEM est concentrique avec la plate-forme et tourne de façon solidaire avec les trois roues de cette dernière. Les trois roues quant à elles, sont commandées de façon synchrone par deux moteurs : un moteur est affecté à la translation du robot (vitesse linéaire), et un autre au braquage simultané des trois roues (vitesse de rotation). Il est possible, en agissant de façon combinée sur ces deux moteurs, d'obtenir de la part de l'oeil-DEM n'importe quel type de mouvement dans un plan horizontal (translation pure, rotation pure, ou translation et rotation mélangées).

En conséquence, dans toute l'étude en simulation effectuée dans ce mémoire, on va pouvoir considérer que l'ensemble du robot mobile se ramène à son oeil-DEM, véritable oeil mobile qui sera symbolisé par un disque en mouvement dans le plan horizontal.

II.2.2. L'environnement

On considère que le robot mobile se déplace sur une surface plane dans un environnement optiquement contrasté et totalement inexploré. Ainsi le robot ne dispose pas de modèle global (géométrique ou topologique) de l'environnement, qui aurait été préalablement stocké dans une mémoire.

L'environnement (schématisé à la fig.II.2) est structuré sous forme d'un ensemble de bandes verticales, de largeurs aléatoires et présentant des niveaux de gris différents (pouvant varier de 0 à 10 dans l'étude en simulation). Si l'environnement est constitué d'objets, ce principe conduit à une modélisation polyédrique de chacun d'entre eux, leur section horizontale étant alors formée par un ensemble de segments, chacun correspondant à la section d'une des bandes verticales décrite précédemment.

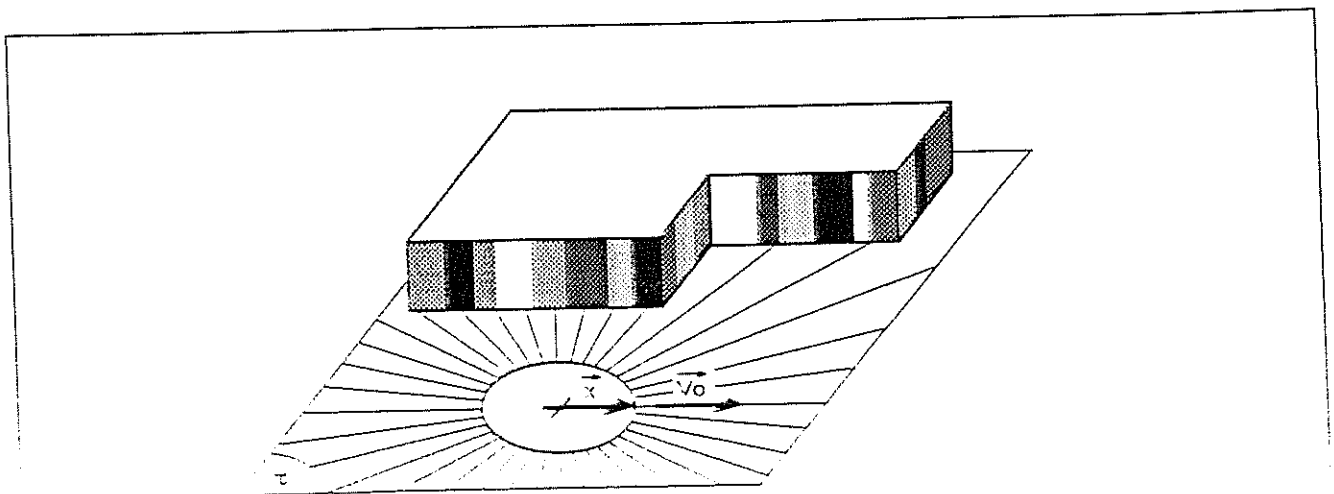


Fig.II.2 Schématisation de l'oeil-DEM avec l'ensemble de ses directions optiques réparties sur les 360° du plan azimutal. L'oeil est polarisé, $\vec{x}$ définissant sa parue frontale. L'environnement est assimilé à un ensemble de bandes verticales dont les bords sont détectés par l'oeil-DEM comme des points de contraste individuels.

Comme cela est décrit dans la suite, le traitement du signal dans les DEMs repose sur un principe de "détection de bord vertical" et donc seuls les points où l'intensité lumineuse présente une forte discontinuité spatiale peuvent être effectivement détectés par l'oeil-DEM. Ces points qui, dans la schématisation de la fig.II.2 correspondent aux bords des bandes verticales, sont appelés "points de contraste". La perception et la représentation géométrique de l'environnement se limitent donc ici à détecter puis à cartographier l'ensemble des points de contraste situés dans le champ de vision du robot.

Dans un premier temps on supposera que l'environnement est statique. Du fait de cette hypothèse, la vitesse relative entre les objets et le robot mobile ne dépend plus que de la vitesse propre de ce dernier et peut donc être déterminée de façon simple au moyen de capteurs proprioceptifs (codeurs optiques montés sur l'axe des moteurs d'entraînement dans le cas du prototype). L'extension de l'étude à un environnement dynamique nous intéresse, non pas dans le cadre d'une perception-3D absolue (un tel cas nécessiterait un système visuel très complexe), mais uniquement dans un cadre appliqué au guidage du robot et plus particulièrement à l'évitement d'obstacles ; pour cette raison, cette extension ne sera évoquée qu'à la fin de l'étude (cf. Chap.VI) une fois que la chaîne opto-motrice aura été décrite dans sa totalité.

II.2.3. Le champ de vision du robot

Le robot se déplaçant sur un plan, nous avons limité le champ de vision de son oeil au plan azimutal π parallèle au sol (cf. fig.II.2) . Cela signifie que seuls les points de contraste appartenant à l'intersection du plan π avec les bords verticaux de l'environnement, peuvent être détectés. L'oeil-DEM ainsi réalisé délivrera seulement une représentation polaire de l'espace dans un plan horizontal. Cette représentation est suffisante pour déterminer l'espace au sol libre pour la navigation, et l'espace au sol occupé par les obstacles. Cette limitation du champ ne modifie pas la problématique qui nous intéresse, et l'extension à un oeil couvrant les 4π stéradians de l'espace n'est pas abordée ici.

II.2.4. La stratégie de locomotion du robot

Au §.II.1.1 le flux optique a été présenté comme un champ de vecteurs vitesse dont les origines sont complexes, puisqu'elles dépendent à la fois des mouvements de rotation et de translation du robot mobile, ainsi que du mouvement des objets environnants.

La transformation du flux visuel en une représentation géométrique de l'espace nécessite dans un premier temps d'extraire la partie translationnelle de ce flux. Dans le cas général où le mouvement du robot est quelconque (et surtout imprévisible puisqu'il réagit à un environnement inconnu), la récupération de cette composante translationnelle à partir de la seule information visuelle est un problème ardu auquel se sont intéressés de nombreux théoriciens (cf. §.II.1.1) ; en

tout cas c'est un problème difficile à résoudre de façon *extéroceptive* par un traitement local du flux visuel tel que celui effectué par les DEMs.

L'environnement étant considéré comme statique, le flux visuel est généré par le mouvement propre du robot. Evaluer la composante translationnelle du flux optique revient donc, à évaluer la composante translationnelle du mouvement du robot et ici cette dernière est déterminée directement à partir d'une mesure odométrique de la vitesse de chaque moteur du robot. Dans le cadre de ce projet ce problème a été simplifié à l'extrême, en imposant au robot un mode de locomotion prédéterminé qui consiste en une succession alternée de deux classes de mouvement:

- 1 des mouvements de translation pure effectués à une vitesse V_0 constante et connue : ils sont consacrés à l'acquisition visuelle.
- 2 des mouvements de braquage qui peuvent être de forme et d'amplitude quelconques : ils sont consacrés aux changements de direction du robot.

Ce choix délibéré du mode de locomotion du robot et donc des mouvements de l'oeil-DEM, présente l'avantage de générer, pendant l'acquisition visuelle, un flux visuel très simplifié puisqu'il est, par définition, purement translationnel. Evidemment ce choix est contraignant au niveau technologique (cf. Thèse C. Blanes, Chap.VI) parce qu'il nécessite une bonne régulation en vitesse du robot.

L'oeil-DEM tournant de façon solidaire avec les roues de la plate-forme, il existe par construction, une direction appelée "direction frontale de l'oeil" (représentée par le vecteur $\vec{x}$ à la fig.II.2), qui reste en permanence alignée sur la direction du mouvement du robot (représentée par le vecteur V_0 à la fig.II.2). Ainsi, au cours des translations élémentaires consacrées à l'acquisition visuelle et à la représentation polaire de l'environnement, cette direction frontale sert directement de référence angulaire pour le flux visuel. L'intérêt de cette propriété sera rediscuté au Chap.IV qui décrit le mode de représentation polaire de l'environnement par l'ensemble de l'oeil-DEM.

II.3. UN LOGICIEL DE SIMULATION COMME OUTIL D'ANALYSE ET DE DEVELOPPEMENT

Plus qu'une étape nécessaire à la construction du prototype, la *simulation détaillée* de l'ensemble de la chaîne sensori-motrice du robot, constitue en fait un *outil d'analyse et de réflexion* utilisé tout au long du travail présenté dans ce mémoire. Au plan *analytique*, la simulation permet de mettre en évidence un certain nombre de problématiques fondamentales qu'il est difficile de formaliser a priori étant donné la complexité du système. Au plan du *développement*, elle permet de tester et de valider à moindre frais l'ensemble des choix effectués tout au long de cette étude. La

principale qualité d'un tel outil repose sur une *forte interactivité*, concernant aussi bien le *paramétrage* très complexe de l'ensemble de la chaîne sensori-motrice (allant de l'architecture optique de l'oeil-DEM, aux paramètres cinématiques de la plate-forme mobile), que *l'analyse* des diverses performances du système (pouvant s'appliquer aussi bien aux signaux analogiques en des point précis de la chaîne, aux trajectoires et aux réactions globales du robot dans son environnement). Une autre spécificité de cette simulation, est qu'elle se veut aussi près que possible de la *réalité* du robot, tant au niveau des architectures optiques et électroniques qu'au niveau des conditions expérimentales dans lesquelles est testé le prototype.

Ce logiciel de simulation a été développé en langage C et fonctionne sur compatible-PC. Comme il simule une architecture essentiellement parallèle, il nécessite quand même un calculateur assez rapide (ici un processeur 80386 fonctionnant à 33MHz). Il est organisé en trois modules principaux :

- le module environnement : il permet de définir la section horizontale de n'importe quel environnement (murs, obstacles) sur la base de la modélisation polyédrique évoquée ci-dessus.
- le module vision : ce module gère le paramétrage (définition de l'architecture optique, de l'architecture électronique) et la simulation de tout le traitement du signal effectué par l'oeil-DEM. Le paramétrage de ce module est détaillé à la fin de ce chapitre (cf. §.II.4.3. et §.II.4.4) en même temps que sont formalisés les principes de l'oeil-DEM.
- le module navigation : ce module gère la navigation "en boucle fermée" du robot. Il simule notamment l'implantation parallèle du système anticollision, un détecteur de cible ainsi que toute la commande motrice proprement dite de la plate-forme mobile. Le principe de ce module est détaillé au Chap.V au moment où la chaîne optomotrice est testée dans sa totalité.

II.4. PRINCIPES DE LA MESURE TELEMETRIQUE EFFECTUEE PAR L'OEIL-DEM

II.4.1. Principes géométriques d'un DEM en mouvement

La géométrie de base d'un DEM se ramène (fig.III.3) à deux axes optiques $i-1$ et i qui forment entre eux un angle $\Delta\phi_i$ (angle appelé ici "angle interommatidial", en référence aux travaux portant sur la mouche, cf. Annexe). Ces deux axes optiques se coupent en un point O qui définit le centre du DEM, et qui est confondu avec le centre de l'ensemble de l'oeil-DEM.

Supposons maintenant que O soit assujéti à un mouvement de translation pure, et ceci dans un environnement formé d'un seul point de contraste stationnaire C. Ce déplacement rectiligne du DEM (vers la droite à la fig.III.3a) provoque un mouvement de translation relatif (vers la gauche à

la fig.III.3b) de C, et le conduit à "passer" successivement devant l'axe $i-1$, puis devant l'axe i du DEM.

La vitesse angulaire "moyenne" Ω_m de C par rapport à O, mesurée par le DEM, est inversement proportionnelle à l'écart de temps Δt , nécessaire à C pour couper successivement chacun des axes optiques:

$$\Omega_m = \Delta\phi_i / \Delta t \quad (\text{éq.II.2})$$

Si l'on considère que le mouvement de translation s'effectue à une vitesse constante V_o alors Δt s'exprime de manière simple en fonction de la translation Δx nécessaire à C pour passer d'un axe optique à l'autre :

$$\Delta t = \Delta x / V_o \quad (\text{éq.II.3})$$

D'autre part un simple calcul géométrique montre que, lorsque le point de contraste C est situé à une distance radiale D_i (mesurée dans la direction i), Δx peut s'écrire sous la forme:

$$\Delta x = D_i \cdot \sin(\Delta\phi_i) / \sin(\phi_i - 1) \quad (\text{éq.II.4})$$

où $\phi_i - 1$ et ϕ_i sont respectivement les angles polaires des deux axes optiques du DEM $_i$, angles définis par rapport à la direction du mouvement (cf. fig.II.3).

En conséquence on obtient l'expression suivante pour la vitesse angulaire moyenne Ω_m locale mesurée par rapport à O :

$$\Omega_m = f_i \cdot V_o / D_i \quad \text{avec } f_i = \sin(\phi_i - \Delta\phi_i) \cdot \Delta\phi_i / \sin(\Delta\phi_i) \quad (\text{éq.II.5})$$

f_i est un facteur dépendant exclusivement de l'angle polaire ϕ_i et de l'angle interommatidial $\Delta\phi_i$, donc de la géométrie du DEM étudié.

En résumé, l'éq.II.5 montre que si le DEM effectue un mouvement de translation à une vitesse constante et connue V_o , alors la connaissance de la vitesse angulaire moyenne Ω_m locale d'un point de contraste stationnaire mesurée dans le référentiel du DEM, est équivalente à la connaissance de sa distance radiale absolue D_i . Aucune opération additionnelle n'est nécessaire et donc, dans les conditions énoncées ci-dessus, le DEM $_i$ en mouvement peut donc être utilisé comme un senseur télémétrique capable de mesurer la distance radiale d'un point de contraste situé dans son champ visuel.

L'éq.II.5 tient compte de l'hypothèse d'une faible résolution spatiale et est donc valable même si l'angle interommatidial $\Delta\phi_i$ n'est pas infiniment petit. En prenant la limite lorsque $\Delta\phi_i \rightarrow 0$, on vérifie que f_i tend vers $\sin(\phi_i)$, et que l'éq.II.5 prend l'aspect plus classique $\Omega = \sin(\phi) \cdot V_o / D$

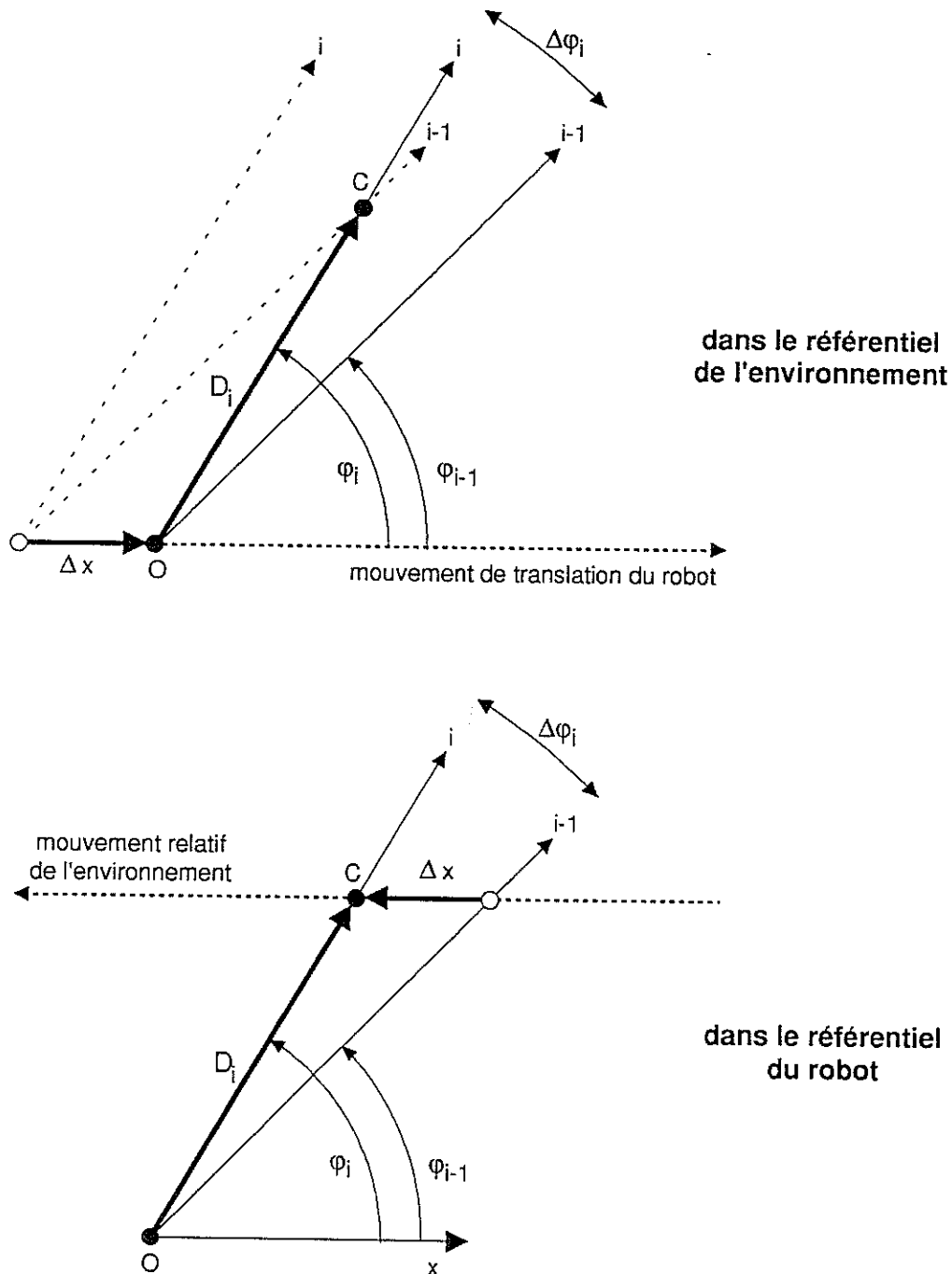


Fig.II.3 Situation définie par un DEM se déplaçant en translation à une vitesse constante V_0 . Le DEM considéré, schématisé par ses deux axes optiques i et $i-1$, est orienté dans une direction angulaire φ_i par rapport à l'axe du mouvement. C représente un point de contraste de l'environnement situé à une distance radiale D_i (dans la direction φ_i) du centre O du DEM. A cette distance, Δx est la longueur de translation nécessaire à C pour couper successivement les deux axes optiques du DEM. (a) Situation dans un référentiel lié à l'environnement (b) situation dans un référentiel lié au robot.

décrit par Whiteside et Samuel (1970) (cf. éq.II.1) où Ω est la vitesse angulaire instantanée mesurée dans la direction φ .

Dans le cas qui nous intéresse, à savoir un $\Delta\varphi_i$ non négligeable et un flux purement translationnel, la vitesse angulaire moyenne Ω_m n'est pas égale à la vitesse angulaire instantanée Ω .

II.4.2. Principes du traitement du signal : configuration de base du réseau de DEMs

Le principe géométrique de la transformation [vitesse $\Omega \rightarrow$ distance D] qui vient d'être décrit est simple ; le problème qui nous intéresse maintenant est de développer un DEM capable d'effectuer localement et dans n'importe quelle direction une mesure valide de Ω_m ou une information équivalente. Les deux difficultés sous-jacentes à ce problème sont :

- 1 de minimiser les erreurs sur la mesure de la vitesse angulaire Ω_m , ce qui signifie atténuer les effets des problèmes de correspondance, liés comme nous allons le voir à des problèmes de sous-échantillonnage de l'espace visuel ; ce problème est traité au Chap.III.

- 2 d'assurer sur l'ensemble de l'environnement la validité d'une acquisition visuelle ayant lieu pendant des mouvements imposés de translation. Ce problème est essentiellement abordé dans le Chap.IV, qui montre entre autres l'effet de la longueur ΔL de la translation élémentaire sur le périmètre géométrique effectivement échantillonné par l'oeil, et sur l'architecture géométrique à donner à l'ensemble des DEMs.

II.4.2.a Description de l'architecture opto-électronique de l'oeil-DEM

Chaque DEM est un module opto-électronique qui peut être reproduit à volonté, et constitue ainsi la maille de base d'un réseau parallèle (fig.II.4). Dans la version la plus simplifiée, le DEM n°i du réseau (appelé DEMi) possède deux photorécepteurs (R_{i-1} , R_i) qui dans le cas du prototype, sont des photodiodes individuelles (cf. Thèse C. Blanes, Chap.III). Une lentille convergente (facette) est associée à chaque récepteur et l'ensemble de ce système optique est équivalent à une ommatidie de l'oeil de mouche (cf. Annexe), caractérisée par deux paramètres essentiels :

- son axe optique formant un angle φ_i avec la direction frontale de l'oeil (vecteur x).
- son champ visuel (partie grisée à la fig.II.4) paramétré par la valeur de "l'angle d'acceptance" $\Delta\varphi_i$, qui représente la largeur à mi-hauteur du diagramme de sensibilité angulaire.

Chaque ommatidie fait office d'interface opto-électronique et délivre un signal analogique appelé R_i , égal au produit de l'intensité lumineuse par la sensibilité angulaire, intégré sur l'ensemble du champ de l'ommatidie (cf. le détail de la simulation §.II.4.3.).

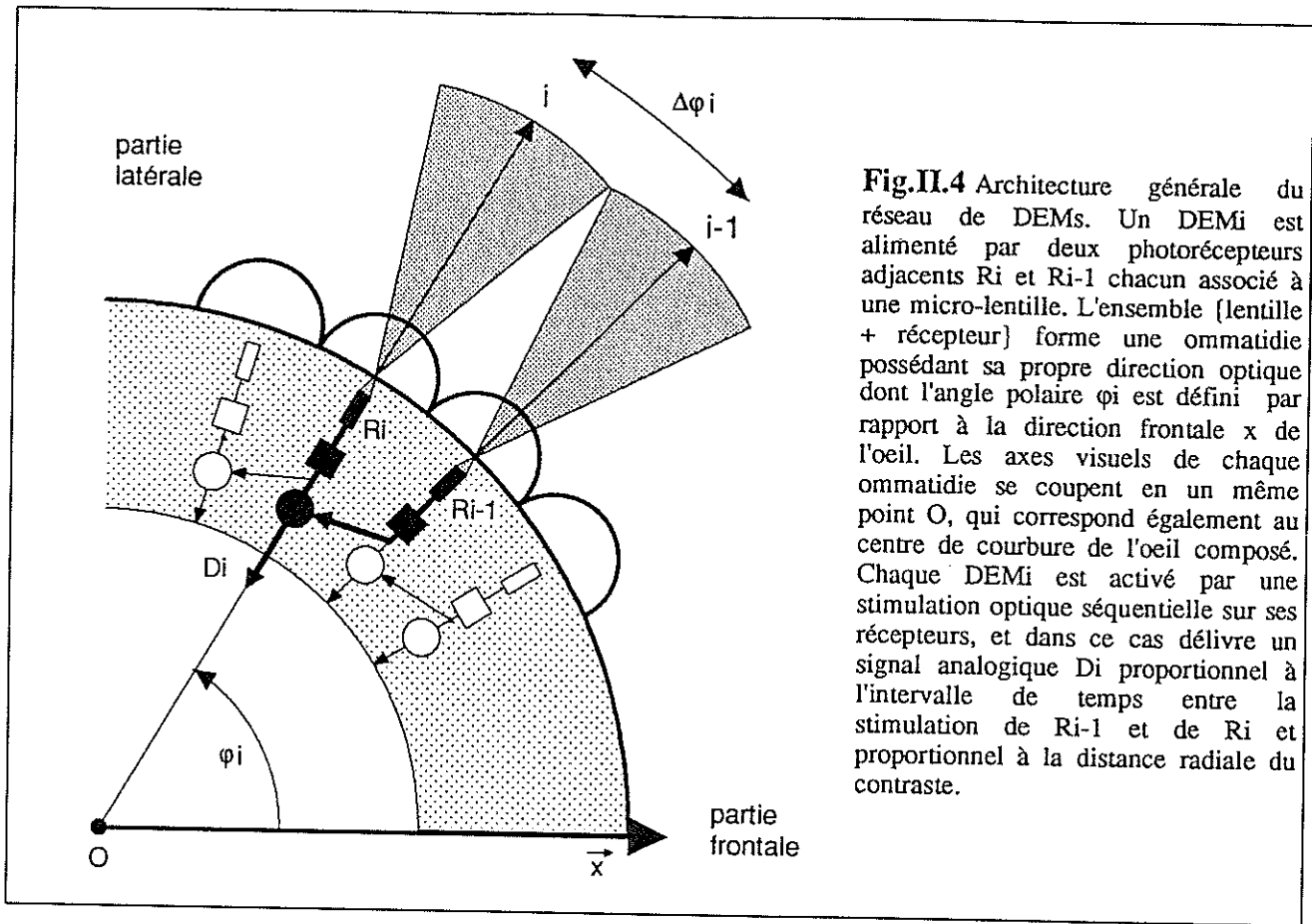


Fig.II.4 Architecture générale du réseau de DEMs. Un DEM_i est alimenté par deux photorécepteurs adjacents Ri et Ri-1 chacun associé à une micro-lentille. L'ensemble [lentille + récepteur] forme une ommatidie possédant sa propre direction optique dont l'angle polaire φ_i est défini par rapport à la direction frontale x de l'œil. Les axes visuels de chaque ommatidie se coupent en un même point O, qui correspond également au centre de courbure de l'œil composé. Chaque DEM_i est activé par une stimulation optique séquentielle sur ses récepteurs, et dans ce cas délivre un signal analogique Di proportionnel à l'intervalle de temps entre la stimulation de Ri-1 et de Ri et proportionnel à la distance radiale du contraste.

La couche d'ommatidies alimente point par point la partie électronique proprement dite du réseau de DEMs. En fait les DEMs sont imbriqués, au sens où une même ommatidie alimente deux DEMs adjacents. La partie électronique constitue en elle-même un réseau parallèle et analogique ; chaque maille *i* de ce réseau convertit en temps réel des signaux d'entrée analogiques (homogènes à une luminosité Ri et Ri-1), en un signal de sortie également analogique, homogène à une distance Di. Au niveau architectural, ce réseau est linéaire et bouclé sur lui-même ; il est faiblement interconnecté dans la mesure où chaque noeud ne reçoit des informations que de ses voisins immédiats (au maximum deux voisins : celui de gauche et celui de droite).

Nous avons admis jusqu'à présent que le rôle du DEM était d'effectuer la mesure d'une vitesse angulaire moyenne $\Omega_m = \Delta\phi_i / \Delta t$. Mais comme l'angle interommatidial $\Delta\phi_i$ du DEM est par construction prédéfini, le seul et unique paramètre inconnu que peut effectivement mesurer le DEM est l'écart temporel Δt (ou son inverse) entre l'instant où C coupe l'axe *i*-1 et celui où il coupe l'axe *i* (cf. fig.II.3b). Cette remarque est importante car elle suggère dès maintenant que le rôle du DEM est de mesurer une grandeur équivalente à un retard temporel (ou son inverse) ; on peut reformuler l'éq.II.5 de manière encore plus simple, de façon à rendre la distance radiale directement proportionnelle au retard mesuré :

$D_i = g_i \cdot V_o \cdot \Delta t \quad \text{où :} \quad g_i = \sin(\phi_i - \Delta\phi_i) / \sin(\Delta\phi_i)$	(éq.II.6)
---	-----------

Dans la configuration de base du DEM proposée ici, le traitement du signal (fig.II.5) est fondé sur les étapes essentielles suivantes:

- 1 une extraction et identification d'un même front de contraste sur chacune des deux voies du DEM.
- 2 une mesure du retard Δt qui sépare l'apparition du même front de contraste sur les deux voies du DEM .

II.4.2.b Extraction et identification d'un front de contraste

Cette étape comprend elle-même :

- 1 une transformée spatio-temporelle linéaire, essentiellement paramétrée par le filtrage spatial (lié aux propriétés optiques intrinsèques de l'ommatidie), et par le filtrage temporel qui lui fait suite.

Le rôle essentiel de cette transformée est de différencier le signal (ici différentielle du premier ordre) afin d'en rejeter la composante continue ; son second rôle est de filtrer certaines composantes spectrales du signal, qui sont à l'origine de problèmes de correspondance (cf. Chap.III).

Tout au long de ce travail, nous allons essentiellement analyser une solution basée sur une différentiation temporelle. Cette option est dictée par la mouche où cette opération de différentiation temporelle existe réellement et est parfaitement caractérisée au niveau de la couche nerveuse (Lamina) câblée derrière les photorécepteurs (cf. Annexe). La solution basée sur une différentiation spatiale (et donc sans filtrage temporel) sera également abordée dans le cadre d'une comparaison de performances (cf. §.II.4.3.).

- 2 une opération doublement non linéaire de seuillage à hystérésis délivrant en sortie des impulsions calibrées.

- la première non linéarité est le *seuillage* dont le rôle est de détecter, en utilisant comme critère l'amplitude sur le signal filtré F_i , la présence ou non d'un front de contraste, et de repérer sa position temporelle (instant de l'impulsion).

- la seconde non linéarité est *l'hystérésis* (cf. §.II.4.3.e) dont le rôle est de limiter les déclenchements intempestifs du seuillage induit par un bruit haute fréquence sur le signal filtré F_i . Cette hystérésis en éliminant l'effet des extrêmes locaux sur F_i , effectue une régulation non linéaire du signal F_i , opération par ailleurs connue sous le nom de "régulation à hystérésis" (Duda et Hart 1973).

On peut considérer que la sortie de cet étage de seuillage reste une *grandeur analogique* mais maintenant définie dans un *espace temporel*.

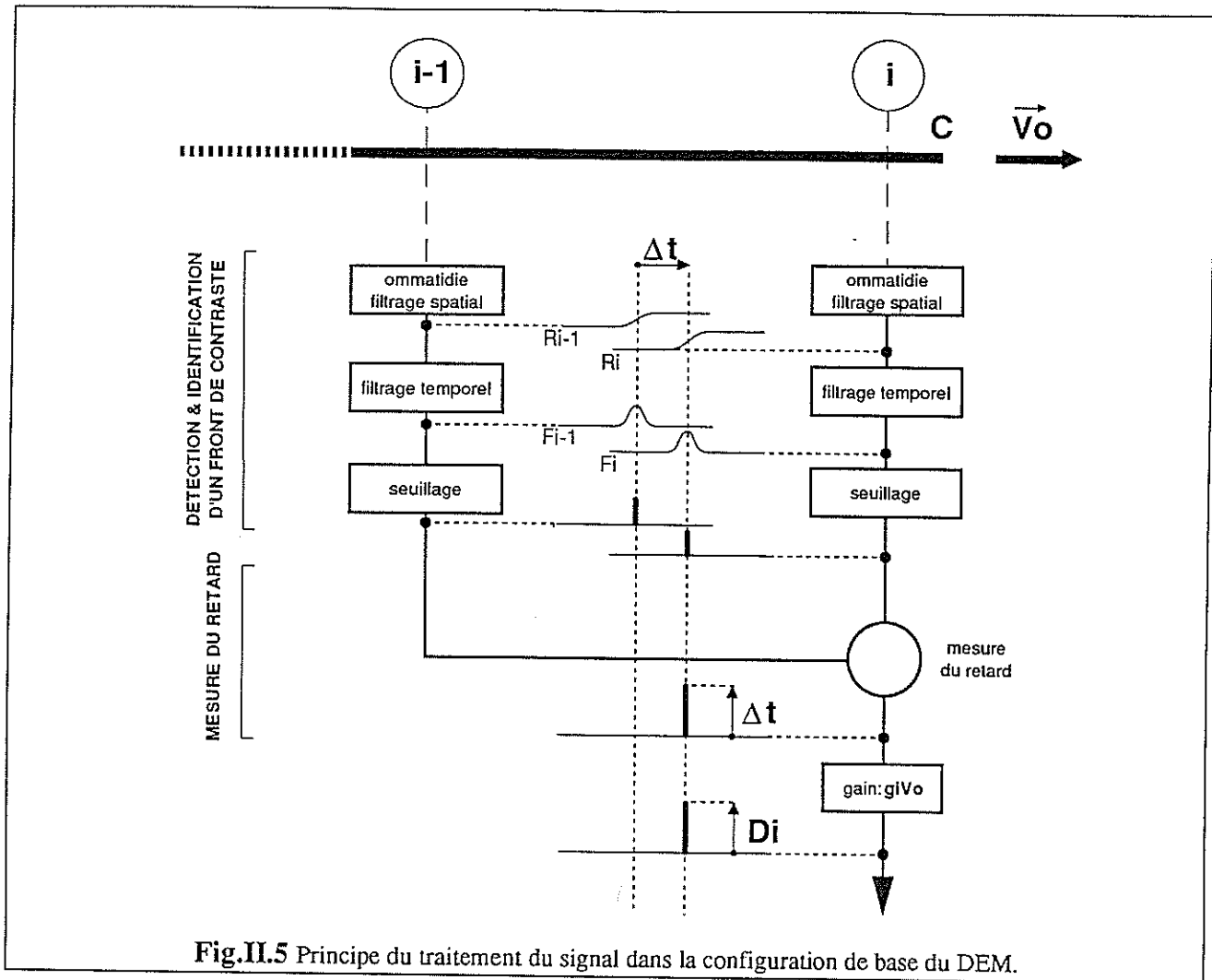


Fig.II.5 Principe du traitement du signal dans la configuration de base du DEM.

Comme nous le verrons au Chap.III, les fonctionnalités de la partie linéaire et de la partie non linéaire constituant cette étape d'extraction de contraste, sont en fait très interdépendantes.

II.4.2.c Mesure du retard Δt

Cette opération possède ici deux propriétés caractéristiques :

- elle est *directionnelle*, ce qui signifie ici qu'un DEM possède "un sens préféré" (par exemple de $i-1$ vers i à la fig.II.5) et ne délivre un signal de sortie que si la stimulation séquentielle a lieu dans ce sens préféré. Dans le cas contraire le DEM ne délivre aucune information. Obtenir une information de mouvement dans l'autre sens nécessite donc de câbler un second DEM dans le sens inverse.

- elle est *inhibée*, si les deux voies i et $i-1$ sont déclenchées *simultanément* (de façon périodique ou non). Cette caractéristique assure au DEM une immunité aux phénomènes de papillotement ou aux changements brusques de la lumière ambiante. Elle n'a d'intérêt que si l'opération de différenciation évoquée ci dessus, est de type temporel. Le mécanisme de cette inhibition n'est pas abordé ici mais par contre est détaillé dans la Thèse C. Blanes (Chap.III).

II.4.2.d Discussion du principe

Au niveau du principe on a affaire à une classique mesure stéréo puisque :

- l'étape 1 (cf. §.II.4.2.b) consiste à identifier (par filtrage spatio-temporel + seuillage), dans deux images prises sous deux angles différents ϕ_{i-1} et ϕ_i , les fronts de contraste correspondant à un même point de l'environnement (paire conjuguée).
- l'étape 2 (cf. §.II.4.2.c) consiste à mesurer la disparité des signaux dans la paire conjuguée ainsi identifiée, disparité qui se traduit ici par un retard temporel : $\Delta t = \Delta x / V_o$.

De par son traitement du signal, le DEM proposé ici ne correspond pas forcément aux modèles biologiques classiquement étudiés comme par exemple, le modèle du gradient ou le modèle de corrélation (cf. Annexe) et cela provient notamment de la non linéarité (seuillage) présente sur chacune des voies du DEM. Cette non linéarité précoce, en dehors de son aspect fonctionnel au niveau du filtrage (cf. ajustement du filtrage spatio-temporel au §.III.3.4.), permet de compartimenter les deux tâches fondamentales effectuées par le DEM qui sont d'une part, l'identification d'un même front de contraste sur chacune des deux voies, d'autre part la mesure de la disparité temporelle (en rendant notamment la mesure du retard indépendante de la valeur du contraste). Au contraire, dans un "vrai" corrélateur (cf. Annexe), ces deux étapes sont en fait combinées puisque la mesure théorique du taux de corrélation entre les signaux temporels de chacune des voies permet simultanément d'identifier une paire conjuguée (détection du maximum de corrélation) et d'évaluer la disparité temporelle entre les deux voies (retard temporel défini à partir du maximum de corrélation).

Rappelons cependant que le principe du DEM proposé ici n'est pas figé ; il constitue en fait une base de travail dans notre étude où l'objectif prioritaire reste avant tout de développer et d'analyser une chaîne opto-motrice *complète*. La validité des différents modèles envisagés de DEMs ne nous intéressent que dans le cadre de cette chaîne opto-motrice bien définie.

II.4.3. Formalisation et paramétrage de la simulation de l'oeil-DEM

Ce paragraphe décrit de manière formelle le paramétrage et le principe de simulation d'un DEM. Cette formalisation est importante dans la mesure où elle sert de protocole pour l'ensemble des résultats obtenus en simulation dans la suite de ce travail.

II.4.3.a L'environnement

L'environnement visuel du DEM, (défini à l'aide du module environnement) est modélisé (cf. §.II.2.2) dans le plan horizontal, par un ensemble de segments individuellement paramétrés par un niveau de gris donné. Dans le cadre de la simulation, ce niveau de gris peut prendre une valeur entière I_g comprise entre 0 et 10 ; le "fond" de l'environnement quant à lui, présente une valeur

$I_g=0$. L'interprétation proprement dite de la valeur I_g est sans importance en simulation (où 0 et 10 peuvent signifier respectivement blanc et noir ou l'inverse). Par contre la valeur du contraste m entre deux niveaux de gris différents I_{gmax} et I_{gmin} , définie par $m = (I_{gmax}-I_{gmin}) / (I_{gmax}+I_{gmin})$, est toujours comprise entre 0 et 1.

II.4.3.b Les ommatidies

Une ommatidie est paramétrée par :

- l'angle polaire ϕ_i de son axe optique dont on considère dans un premier temps qu'il passe par le centre O du robot
- la position de son centre optique, qui correspond au centre de la lentille paramétré par (l_x, l_y) en coordonnées cartésiennes ou par (ϕ_i, D_{lent}) en coordonnées polaires, par rapport au centre O du robot
- le diagramme de sensibilité angulaire $A_i(\phi)$: deux formes de sensibilité angulaire peuvent être envisagées en simulation:

1- une forme rectangulaire : la largeur du champ visuel de l'ommatidie est dans ce cas égale à son angle d'acceptance $\Delta\phi_i$:

$$A_i(\phi) = 1 \text{ pour } |\phi - \phi_i| \leq \Delta\phi_i / 2 \quad \text{et} \quad A_i(\phi) = 0 \text{ ailleurs} \quad (\text{éq.II.7})$$

2- une forme gaussienne ou plus exactement correspondant à la partie supérieure d'une gaussienne (afin de limiter son domaine de définition et ainsi la largeur totale du champ de l'ommatidie) :

forme gaussienne pure :

$$G_i(\phi) = \exp[-(\phi - \phi_i)^2 / 2\sigma_i^2] \quad (\text{éq.II.8})$$

forme gaussienne approchée effectivement adoptée:

$$A_i(\phi) = [\text{abs}(G_i(\phi) - s_0) + (G_i(\phi) - s_0)] / 2 \quad (\text{éq.II.9})$$

avec s_0 égal à la valeur de l'offset soustrait à la gaussienne pure.

Dans ce cas on montre que:

$$\text{l'angle d'acceptance } \Delta\phi_i = 2\sigma_i \cdot [2 \cdot \ln(2/(1+s_0))]^{1/2} \quad (\text{éq.II.10})$$

$$\text{la largeur totale du champ visuel } L_{vi} = 2\sigma_i \cdot [2 \cdot \ln(1/s_0)]^{1/2} \quad (\text{éq.II.11})$$

On peut vérifier que, dans le cas d'une gaussienne pure ($s_0=0$), l'angle d'acceptance s'exprime par $\Delta\phi_i = 2,35 \cdot \sigma_i$

Pour les deux diagrammes de sensibilité angulaire évoqués ici, l'angle d'acceptance $\Delta\phi_i$ est directement exprimé en fonction de l'angle interommatidial $\Delta\phi_i$ du DEM, et le paramètre à ajuster est le rapport $\Delta\phi_i / \Delta\phi_i$ qui caractérise le *recouvrement angulaire* entre deux récepteurs adjacents. On montrera dans la suite comment ce coefficient de recouvrement agit sur les caractéristiques du filtrage spatio-temporel présent sur chacune des voies du DEM.

II.4.3.c Le signal R_i du photorécepteur de l'ommatidie

La valeur $R_i(t)$ délivrée par le récepteur de chaque ommatidie à l'instant t (fig.II.5), est calculée en intégrant la valeur de l'intensité lumineuse sur l'ensemble du champ angulaire de l'ommatidie :

$$R_i(t) = \int_{-L_v/2}^{+L_v/2} I_g(\varphi, t) \cdot A_i(\varphi) \cdot d\varphi \quad (\text{éq.II.12})$$

R_i est normalisé par rapport à sa valeur maximum possible : ainsi $R_i = 1$ lorsqu'une bande de niveau $I_g=10$ recouvre complètement le champ visuel de l'ommatidie et $R_i = 0$ lorsqu'aucune bande ne couvre ce champ visuel.

Dans le cas réel du prototype, le DEM fonctionne dans une gamme d'intensité lumineuse beaucoup plus importante (environ 3 décades) que dans le cas de la simulation et pour cette raison est équipé d'un système d'amplification logarithmique (cf. Thèse C. Blanes, Chap.III) qui n'est pas simulé ici.

Le signal $R_i(t)$ délivré par une ommatidie dépend de l'environnement, de la position et de l'orientation du robot dans cet environnement, ainsi que de tous les paramètres réglables énoncés ci-dessus. C'est le calcul de ce signal pour chacune des ommatidies qui constitue le noyau du logiciel de simulation (c'est notamment la partie la plus coûteuse en temps de calcul)

II.4.3.d L'opération de différentiation temporelle

Le filtrage temporel appliqué au signal récepteur R_i et effectivement simulé ici, est une simple *dérivée temporelle du premier ordre* dont le but est d'éliminer la composante continue du signal. Dans le cadre d'une simulation, on peut utiliser une dérivée pure puisque il n'y a pas à s'affranchir des bruits hautes fréquences. Ce n'est pas le cas du prototype où le filtrage temporel correspond en fait à un filtrage passe-bande qui rejète les bruits indésirables (cf. Thèse C. Blanes, Chap.III). Dans un premier temps, on ne désire pas distinguer les séquences d'intensité de type $0 \rightarrow 10$ (séquences "ON") des séquences de type $10 \rightarrow 0$ (séquences "OFF") et pour cela seule la valeur absolue du signal filtré est considérée:

$$F_i(t) = \text{abs}[dR_i / dt] \quad (\text{éq.II.13})$$

Le gain du filtrage est ajusté de façon à *normaliser individuellement* le signal filtré F_i en respectant les conditions suivantes :

- 1 pour une réponse indicielle (bande recouvrant totalement le champ visuel de l'ommatidie) associée à une valeur de contraste maximal (ici imposé : 0→10).
- 2 pour une vitesse V_0 du robot (ici imposée à 50cm/s).
- 3 pour une distance radiale donnée D_{norm} .

D_{norm} est donc le seul paramètre réellement réglable dans l'opération de filtrage ; on verra dans la suite qu'il est choisi commun à tous les DEMs définissant par là-même un rayon de vision constant en fonction de l'angle azimutal.

Une seconde solution de *différentiation spatiale* est également disponible au niveau de la simulation (mais n'a pas été envisagée au niveau du prototype pour des raisons qui seront évoquées plus tard) : dans ce cas la dérivée temporelle évoquée ci-dessus est supprimée et remplacée par une différentielle spatiale du premier ordre exprimée de la façon suivante :

$$F_i(t) = \text{abs}[R_i(t) - R_{i+1}(t)] \quad (\text{éq.II.14})$$

Le gain de l'ensemble est ajusté de la même façon que pour la solution temporelle, à la différence près que seule la condition 1 joue un rôle dans cet ajustement du gain. En effet, et cela est détaillé dans le Chap.III (§.III.3.4.), l'une des caractéristiques (avantage ou inconvénient ?) de la solution purement spatiale, est que *son gain est indépendant de la distance radiale* des contrastes ainsi que de leur vitesse V_0 .

II.4.3.e L'opération de seuillage à hystérésis

L'opération de seuillage effectivement simulée ici, respecte le principe d'un seuillage à hystérésis (choisie pour son immunité au bruit cf. §.II.4.2.) dont chaque basculement à l'état haut génère une impulsion en sortie (cf. Thèse C. Blanes, Chap.III). Les deux seuils de l'hystérésis sont exprimés par rapport à la norme du signal filtré et donc varient entre 0 et 1. Le seuil bas est ici fixé à $H_b=0.01$, tandis que le *seuil haut* H_h constitue le *paramètre réglable* de cet étage. Le système de seuillage est déclenché (c'est-à-dire délivre une impulsion calibrée) uniquement lorsque F_i dépasse le seuil haut H_h et ne peut être redéclenché que si F_i est repassé en dessous du seuil bas H_b . Dans le cadre de cette simulation, c'est l'instant absolu du déclenchement qui est effectivement pris en compte et qui correspond à la génération d'une impulsion dans le cas du prototype.

II.4.3.f La mesure du retard Δt

La mesure du retard temporel qui sépare l'arrivée des impulsions en sortie du seuillage, entre les deux voies du DEMi est simulée de la manière suivante :

- le DEMi ne peut délivrer un signal de sortie que si un front de contraste est détecté sur la voie i ; on suppose que cette détection a lieu à l'instant t_i
- si la condition précédente est vérifiée, alors une mesure de retard temporel est enclenchée, opération qui peut faire appel à deux solutions différentes :
 - a) on considère que la voie i-1 du DEMi est *redéclenchable* à tout instant et que c'est le déclenchement t_{i-1} *le plus récent* qui est pris en compte dans la mesure du retard
 - b) on considère que si la voie i-1 du DEMi a été déclenchée une première fois elle reste alors *inhibée* tant que la voie i n'a pas été déclenchée à son tour ; dans ce cas c'est le déclenchement t_{i-1} correspondant au début de l'inhibition qui est pris en compte pour la mesure du retard.

Ces deux types de solutions, à savoir a) la "*version redéclenchable*" et b) la "*version inhibée*" du DEM, conduisent aux mêmes résultats dans les configurations simples (comme celles présentées à la fin de ce chapitre) ; par contre dans les cas de problèmes de correspondance, elles peuvent conduire à des erreurs d'estimation différentes. Une analyse comparative des deux versions est abordée dans le Chap.III (cf. §.III.2.2.) mais seule "la version redéclenchable" du DEM a été effectivement étudiée du début jusqu'à la fin de ce mémoire.

Notons que quelle que soit la version choisie, si la voie i est déclenchée alors qu'aucune information n'est apparue sur la voie i-1 du DEMi, le retard, et donc la distance, sont considérés comme infinis et tout se passe comme si le DEMi n'avait pas effectué de mesure.

II.4.3.e Calcul de la distance radiale D_i

La distance radiale D_i , est déduite directement du retard mesuré Δt , en multipliant ce dernier, par le facteur individuel de calibration $[g_i.V_o]$ défini dans l'éq.II.6.

II.4.4. Exemples de base : simulation d'un DEM en mouvement de translation

Les fig. II.6a, II.6b, II.6c, présentent trois exemples illustrant la simulation d'un DEM, telle qu'elle vient d'être décrite, dans le cas d'un mouvement purement rectiligne. Chacun de ces exemples montre l'effet de plusieurs formes et largeurs pour le diagramme de sensibilité angulaire des ommatidies du DEM. L'environnement, par contre, est le même dans les trois cas et est schématisé par deux segments de niveau de gris maximum $I_g=10$ sur un fond de niveau 0 ; dans la réalité du prototype, ces deux segments doivent être interprétés comme la section horizontale de deux bandes verticales (cf. fig.II.2) qui présentent, par rapport au fond, 4 fronts de contraste $C1..C4$ détectables par le DEM. Pendant le mouvement de translation, le DEM délivre une estimation de la

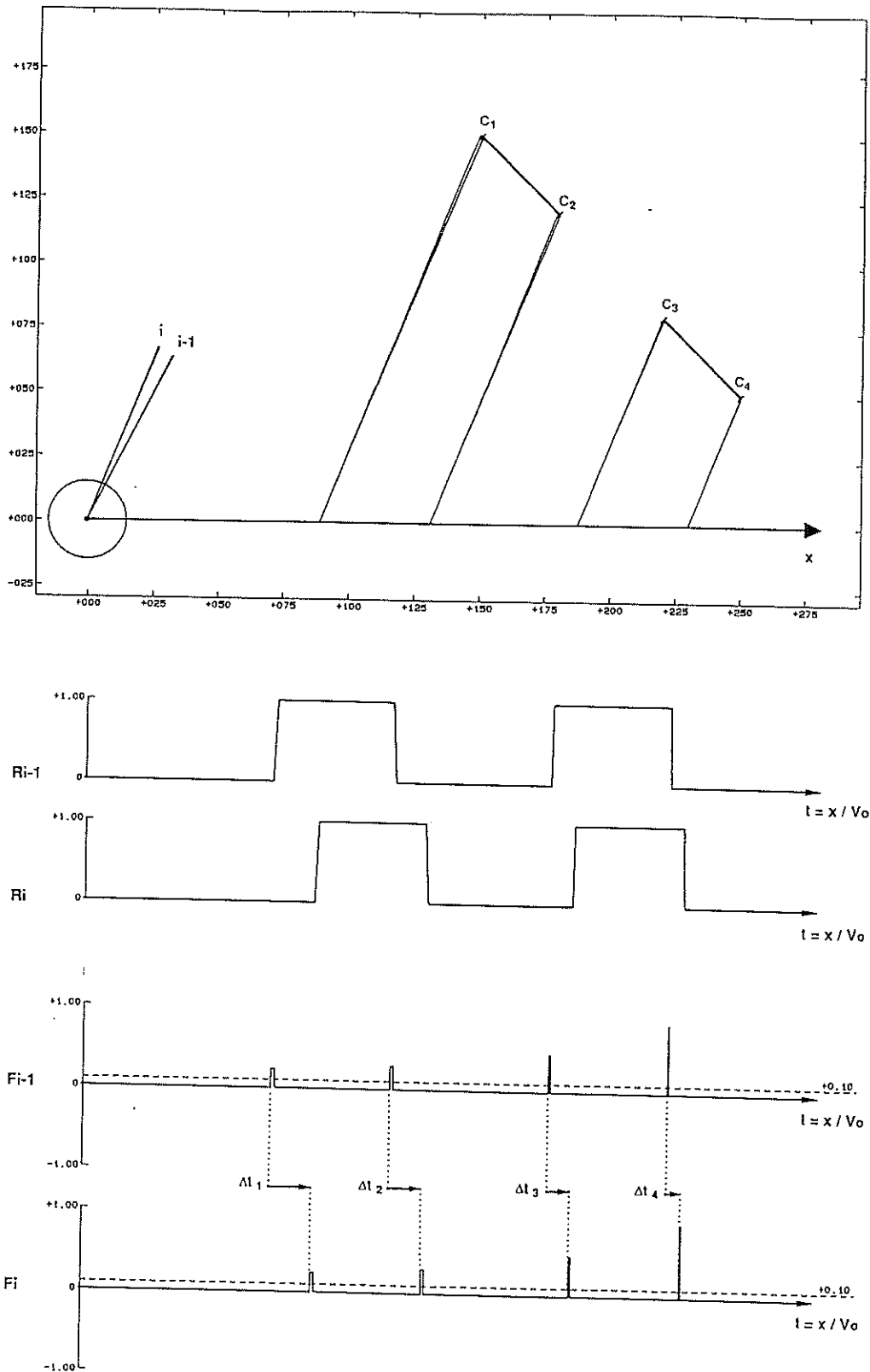


Fig.II.6a Simulation d'un DEM (sensibilité angulaire rectangulaire, $\Delta\phi=5.13^\circ$, $\Delta\rho=0.5^\circ$, $\Delta\rho/\Delta\phi=0.1$) en mouvement de translation dans un environnement formé de deux bandes verticales d'intensité maximum ($I_g=10$). Le DEM est représenté par ses deux ommatidies R_{i-1} et R_i (en haut à gauche) et l'environnement par les deux segments C_1-C_2 et C_3-C_4 . Le résultat de l'estimation de la distance radiale de chaque contraste est présenté sous forme géométrique dans la figure du haut et sous forme de retard temporel dans la figure du bas. Les courbes du bas décrivent les signaux obtenus avant et après filtrage spatio-temporel sur chacune des deux voies du DEM pendant le mouvement de translation. Les traits en pointillés superposés aux courbes F_{i-1} et F_i illustrent le niveau haut du seuillage à l'hystérésis.

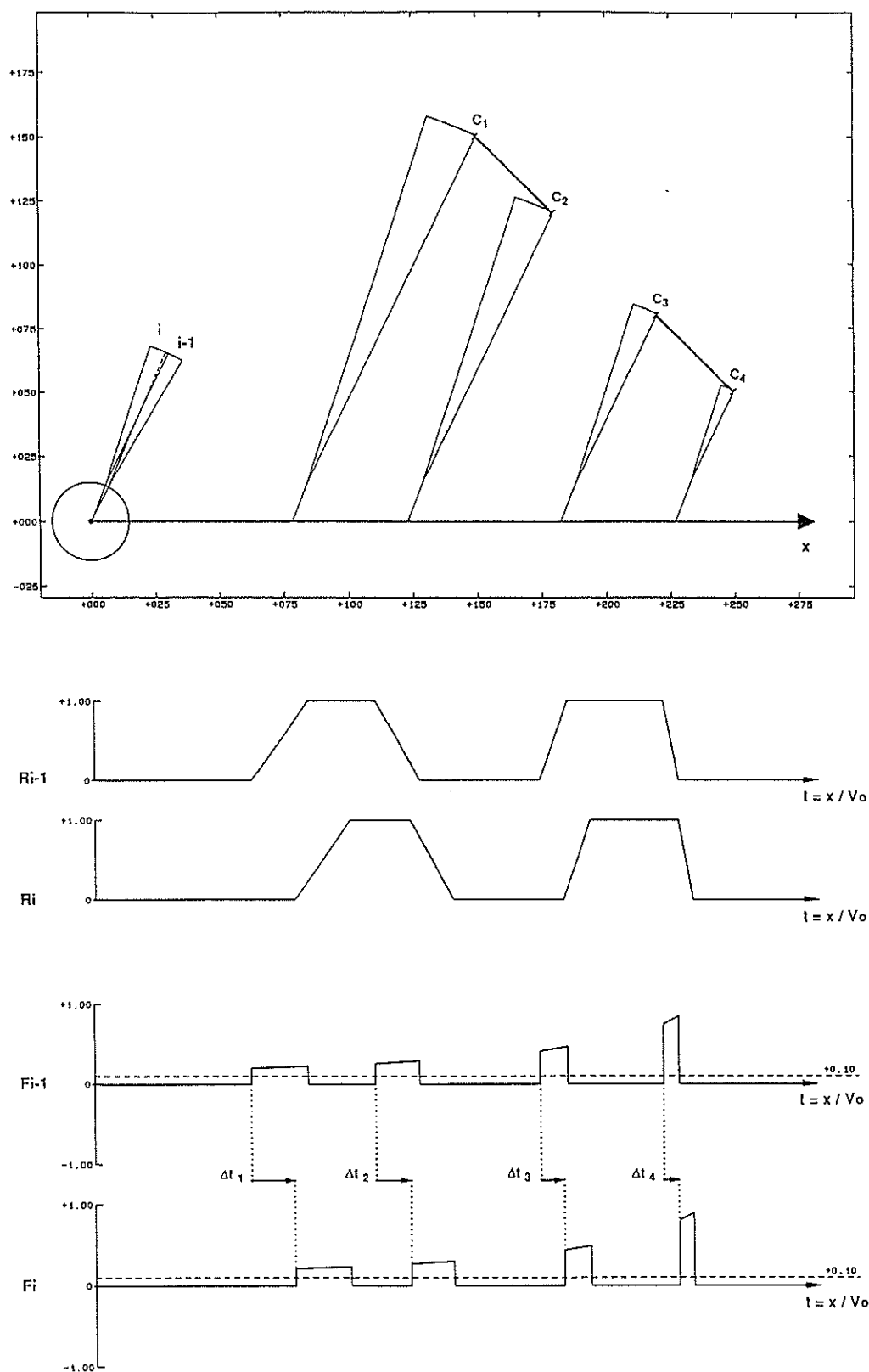


Fig.II.6b Même simulation qu'à la fig.II.6a , (sensibilité angulaire rectangulaire, $\Delta\phi=5.13^\circ$) mais avec un recouvrement et un angle d'acceptance beaucoup plus grand ($\Delta\rho/\Delta\phi=1.5, \Delta\rho=8^\circ$).

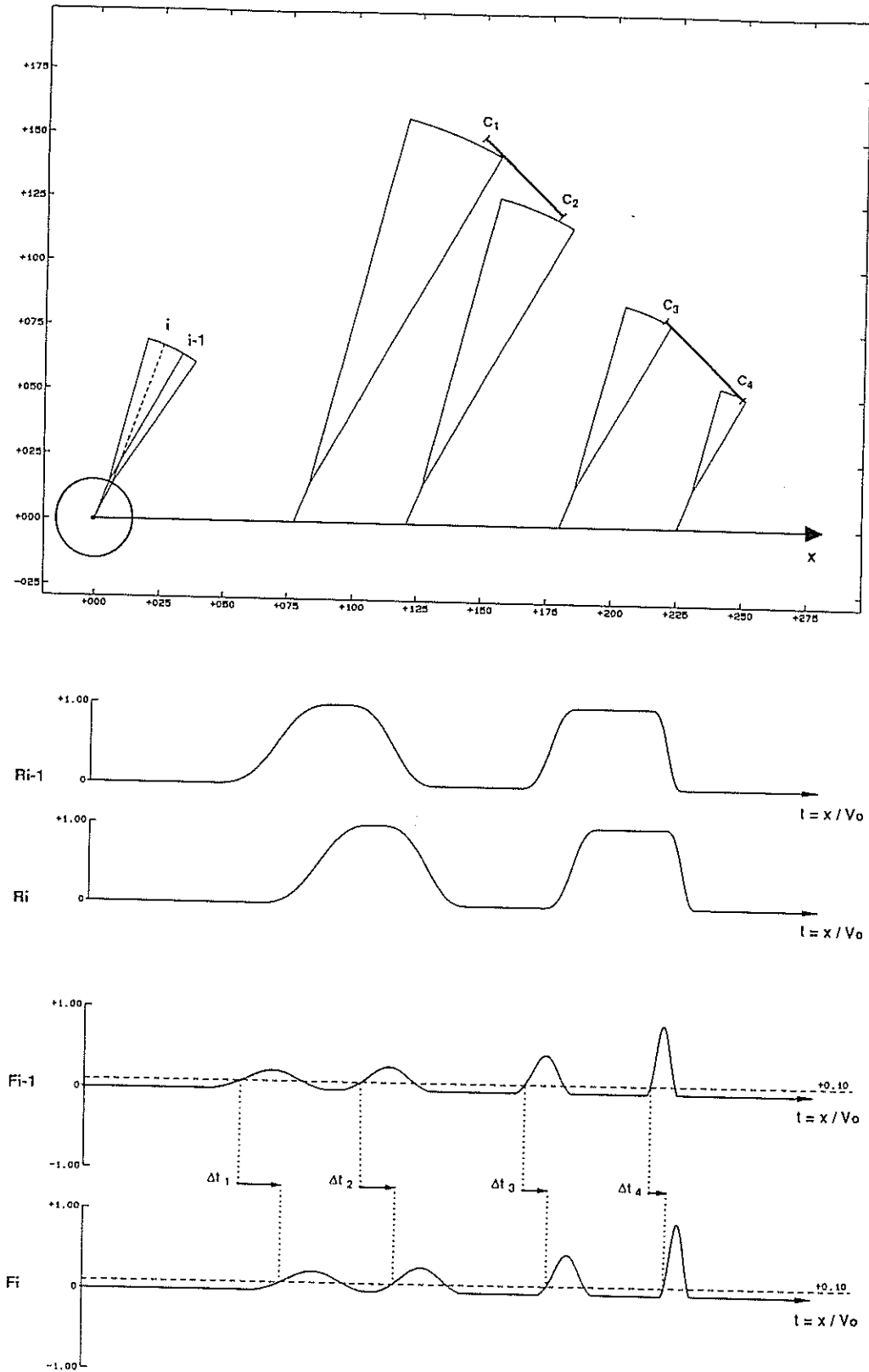


Fig.II.6c Même simulation que dans la fig.II.6b mais avec une forme de sensibilité angulaire "gaussienne approchée" ($\Delta\phi=5.13^\circ$, $\Delta\rho/\Delta\phi=1.5$, $\Delta\rho=8^\circ$).

distance radiale de chacun de ces points de contraste, et ceci, au fur et à mesure qu'ils sont rencontrés et détectés.

Le résultat de cette estimation est illustré, dans la partie du haut des trois exemples, sous forme de secteurs angulaires représentant en fait la position et l'orientation du champ visuel de l'ommatidie n°i, à l'instant exact où le contraste est détecté. Le rayon de ces secteurs correspond à la distance radiale estimée, et leur largeur angulaire correspond au champ visuel total (L_v) de l'ommatidie concernée. Ce mode de représentation permet de visualiser directement la double incertitude liée à l'estimation des coordonnées polaires du point de contraste ainsi détecté par le DEM. Les trois exemples 6a, 6b et 6c illustrent notamment l'effet de la sensibilité angulaire sur la précision de cette estimation.

La partie du bas des trois exemples présente les différents signaux analogiques simulés pour chacune des voies du DEM pendant le mouvement de celui-ci. A travers ces signaux, sont illustrées les principales étapes du traitement du signal décrites précédemment, à savoir :

- R_{i-1} et R_i représentent les signaux temporels délivrés par chaque ommatidie du DEM. Ils incluent l'effet du filtrage spatial passe-bas réalisé par chaque ommatidie.
- F_{i-1} et F_i représentent les signaux filtrés qui correspondent ici à la dérivée temporelle des signaux R_{i-1} et R_i , normalisée et redressée
- l'opération de seuillage à hystérésis est illustrée par les traits en pointillés qui représentent la valeur du seuil haut H_h , superposée au signaux F_{i-1} et F_i .
- $\Delta t_1 \dots \Delta t_4$ montrent quels sont les retards temporels effectivement pris en compte pour estimer la distance de chaque point de contraste, distance qui est reportée dans la partie du haut de chaque figure.

II.4.5. Discussion des résultats préliminaires

Avant d'entrer dans une analyse globale des performances et des limites du DEM dans un environnement quelconque (c'est l'objet du chapitre suivant), on peut déjà faire plusieurs remarques sur son fonctionnement élémentaire dans un environnement aussi simple que celui illustré à la fig.II.6.

II.4.5.a Sensibilité au contraste variable avec la distance

La *sensibilité au contraste* (m) du DEM, dépend de la distance radiale D_i du contraste et de la vitesse V_o (vitesse de déplacement du DEM). Cette remarque n'est toutefois valable que pour la solution choisie ici, où l'opération de *différentiation* est *temporelle*. Dans un tel cas en effet, l'amplitude du signal dérivé est proportionnelle à la vitesse angulaire Ω_i du point de contraste, elle même proportionnelle à V_o / D_i (cf. équ.II.5) :

$$F_i = \text{abs}[dR_i / dt] = k \cdot m \cdot \Omega_i = k' \cdot m \cdot V_o / D_i \quad (\text{éq.II.15})$$

La gamme de sensibilité au contraste étant définie comme le rapport entre l'amplitude maximum du signal F_i et la valeur du seuil haut H_h , elle dépend du paramètre V_o / D_i . Dans les simulations de la fig.II.6 par exemple, où le DEM est réglé pour $H_h=0.1$, $D_{\text{nom}}=50\text{cm}$ et V_o constants, cette propriété se traduit par une gamme de sensibilité au contraste égale à 10 ($I_g = 1 \rightarrow 10$) pour $D=50\text{cm}$, à 5 ($I_g = 2 \rightarrow 10$) pour $D=100\text{cm}$, à 2.5 ($I_g = 4 \rightarrow 10$) pour $D=200\text{cm}$, et par le fait qu'aucun front de contraste, quelle que soit sa valeur m , ne pourra jamais être détecté au delà de 10m. Ces limites sur la sensibilité au contraste, sont établies sur la base de stimuli capables de générer des réponses considérées comme "indicielles" pour la transformation spatio-temporelle (c'est-à-dire des bandes qui, au cours du mouvement viennent à couvrir totalement le champ visuel de l'ommatidie). Dans le cas contraire où la bande n'arrive pas à couvrir le champ de l'ommatidie, l'amplitude du signal récepteur R_i et donc du signal filtré F_i décroît d'autant plus que la largeur angulaire sous laquelle est vue la bande est petite.

Comme conclusion préliminaire, on peut dire que les capacités de détection d'un point de contraste par le DEM en mouvement sont limitées par la valeur même du contraste, et que cette limitation est d'autant plus grande que la distance radiale du contraste est importante. En contrepartie la gamme de contraste la plus élevée correspond aux distances les plus proches ce qui paraît être avantageux pour une tâche d'évitement d'obstacles. Cette propriété sera plus formellement analysée au Chap.III.

II.4.5.b La précision sur l'estimation des coordonnées polaires des points de contraste

La précision sur l'estimation des coordonnées polaires du contraste détecté par le DEM dépend largement de la forme et de la largeur de la sensibilité angulaire associée à chaque ommatidie.

En ce qui concerne la précision en distance, le DEM est calibré (cf. facteur g_i dans l'éq.II.6) sur la base de l'angle exact entre les deux axes optiques du DEM ; la qualité de cette calibration est illustrée par l'exemple 6a où le champ visuel des ommatidies est presque ponctuel vis-à-vis de l'angle interommatidial ($\Delta\rho/\Delta\phi=0.1$). Lorsque le recouvrement $\Delta\rho/\Delta\phi$ augmente, on observe une dérive de la calibration g_i avec la valeur du contraste. Cette dérive, qui se répercute sur la précision en distance, n'est pas très sensible dans le cas d'une sensibilité angulaire rectangulaire (cf. fig.II.6b), mais elle peut entraîner une imprécision notable dans le cas d'une forme gaussienne (cf. fig.II.6c). Quelques relevés sur la précision en distance ont été effectués en modifiant soit la valeur H_h du seuil, soit la valeur m du contraste ; les résultats obtenus sont les suivants :

- sensibilité carrée avec $\Delta\rho/\Delta\phi=0.1$, $\Delta\rho=0.5^\circ$, $\Delta\phi=5.13^\circ$ (DEM 6a) : erreur égale à $\pm 0.2\%$, sauf dans les cas où l'amplitude du signal filtré est à la limite du seuil haut de l'hystérésis ; dans un tel cas l'erreur maximum relevée en simulation atteint -6.1%

- sensibilité gaussienne avec $\Delta\rho/\Delta\varphi=1.5$, $\Delta\rho=8^\circ$, $\Delta\varphi=5.13^\circ$ (DEM 6c) : erreur comprise entre +5.5% et -14.7%
- sensibilité gaussienne avec $\Delta\rho/\Delta\varphi=2.75$, $\Delta\rho=14.1^\circ$, $\Delta\varphi=5.13^\circ$ (configuration effectivement utilisée au Chap.III) : erreur comprise entre +11.5% et -27%

Comme on le voit surtout dans les deux derniers cas, ces erreurs sont loin d'être négligeables, et elles devront être prises en compte au niveau de la stratégie même d'évitement d'obstacles choisie pour le robot. (cf. Chap.V).

Quant à l'erreur angulaire, elle dépend de la valeur de l'angle d'acceptance de chaque ommatidie. En effet, à l'instant où le front de contraste est détecté par le DEM, la seule information disponible quant à sa localisation angulaire est qu'il se trouve dans la première moitié du champ visuel de l'ommatidie R_i (ce phénomène, lié au choix d'un seuillage sur la différentielle du premier ordre et est illustré au Chap.V, fig.V.11). Ainsi, si la forme de la sensibilité angulaire est rectangulaire, l'erreur angulaire est de l'ordre de $\Delta\rho/2$. Si la forme de la sensibilité angulaire est une gaussienne approchée, l'erreur angulaire est inférieure à la première moitié du champ visuel, et dépend à la fois de $\Delta\rho$ et de la valeur H_h du seuil (par exemple si $H_h=0.5$ l'erreur est égale à $\Delta\rho/2$ puisque par définition $\Delta\rho$ est la largeur à mi-hauteur du champ visuel de l'ommatidie). L'intégration de cette erreur angulaire au niveau du comportement optomoteur du robot est détaillée dans la partie du Chap.V (cf. §.V.3.3.) qui traite de l'interconnexion entre le réseau de DEMs et le système anticollision.

Chapitre III

ANALYSE D'UN DETECTEUR ELEMENTAIRE DE MOUVEMENT PERFORMANCES ET LIMITES

Chapitre III

III.1. POSITION DU PROBLEME

III.1.1. Introduction

III.1.2. Performances individuelles demandées à chaque DEM

III.1.3. Performances d'un DEM ramenées au comportement optomoteur du robot

III.2. LIMITES DE LA VERSION DE BASE DU DEM : PROBLEMES DE CORRESPONDANCE

III.2.1. Domaine de validité de la version de base du DEM

III.2.2. Problèmes de correspondance en 10 exemples

III.2.3. Conclusion

III.3. VERSION AMELIOREE DU DEM

III.3.1. Séparation des voies ON et OFF

III.3.2. Principe d'un DEM bidirectionnel

III.3.3. Domaine de validité du DEM {bidirectionnel + voies ON/OFF séparées}

- a Limite du domaine de validité
- b Interprétation géométrique de la condition limite
- c Comparaison avec le domaine de validité de la version de base du DEM
- d Domaine de validité pour une mire périodique, plane, et parallèle au mouvement

III.3.4. Ajustement du filtrage+seuillage : formalisme pour une mire périodique

- a Rôle et principe de l'ajustement du filtrage+seuillage
- b Cas simple d'un DEM perpendiculaire au mouvement
- c Généralisation de l'ajustement filtrage+seuillage à un DEM quelconque
- d Choix d'un couple recouvrement-seuil
- e Résultats avec des mires périodiques

III.3.5. Performances du DEM amélioré dans un environnement quelconque

- a Performances sur le sens du mouvement
- b Performances sur l'estimation de la distance radiale des contrastes

III.3.6. Conclusion

III.1. POSITION DU PROBLEME

III.1.1. Introduction

L'une des difficultés liées à l'analyse et la conception du système visuel d'une créature mobile est due à la complexité du paramétrage qui caractérise l'interaction entre la créature et son environnement. Ce paramétrage est encore plus complexe dans le cas d'un environnement dynamique. Il est notamment difficile d'adopter un formalisme systématique permettant de décrire à chaque instant l'état dynamique du système sensori-moteur étudié. L'une des conséquences est qu'on ne dispose pas d'un critère absolu ou "infaillible" permettant de conclure à l'efficacité du système analysé (ou conçu si l'on travaille en robotique).

Dans le cadre de ce projet, et face à ce manque d'outils d'analyse et d'évaluation, la démarche adoptée est la suivante. Pour une solution sensori-motrice envisagée, il existe selon la situation du robot dans son environnement, un *nombre infini* de "bons cas de figure" où le système fonctionne sans erreur et un *nombre également infini* de "mauvais cas de figure" où les performances demandées ne sont plus respectées. Améliorer le système nécessite tout d'abord une évaluation de ses performances, ce qui se traduit ici par une caractérisation la plus exhaustive possible des "mauvais cas de figure" où il ne répond plus au cahier des charges (§.III.2.). En ce qui concerne l'oeil-DEM, ces "mauvais cas de figure" sont caractérisés par des erreurs de mesure tridimensionnelle, erreurs dues à des "problèmes de correspondance" liés au sous-échantillonnage de l'espace-3D par les DEMs. L'étape suivante consiste à étudier comment les erreurs ainsi répertoriées, se répercutent au niveau même du comportement optomoteur du robot. Enfin la dernière étape est de limiter l'effet des erreurs considérées comme néfastes pour le robot, et ceci en intervenant à deux niveaux distincts :

- d'une part en améliorant autant que possible la partie sensorielle du système, c'est à dire ici en améliorant le principe du traitement du signal dans chaque DEM, tout en sachant que les moyens sont très limités (basse résolution spatiale, traitement du signal uniquement local) : c'est l'objectif de la dernière partie de ce chapitre (§.III.3.).

- d'autre part en intégrant les erreurs non résolues par la partie sensorielle dans l'ensemble de la boucle optomotrice responsable du comportement global du robot : c'est l'approche qui sera suivie au Chap.V.

III.1.2. Performances individuelles demandées à chaque DEM

Les performances qui nous intéressent au niveau individuel de chaque DEM concernent essentiellement :

•1 La directionnalité du DEM

Dans une vision à court terme du projet, on pourrait ne pas imposer cette contrainte dans le cahier des charges du DEM, puisque dans un *environnement statique* et pour des *mouvements de translation*, le flux visuel est un champ de vecteurs vitesse ayant par définition, tous même direction et même sens (d'avant en arrière). Dans un tel cas, un DEM ne peut être stimulé dans un sens autre que son sens privilégié et donc a priori, ne nécessite pas d'être directionnel.

Cependant, rappelons que notre objectif à plus long terme est d'étudier le comportement de l'oeil-DEM, d'une part dans un environnement non stationnaire, et d'autre part pour des mouvements propres quelconques du robot. Dans une telle situation dynamique, la directionnalité du DEM devient impérative, et ce, quel que soit son niveau de compétence :

-1 si la tâche du DEM est réduite à une simple extraction de la partie positive du flux visuel (en perdant éventuellement la partie négative) il ne doit en aucun cas délivrer de réponse, pour des stimulations dans le sens contraire au flux visuel.

-2 si la tâche du DEM est de délivrer non seulement le module mais aussi le signe de la vitesse angulaire (par exemple pour détecter si un obstacle est en train de se rapprocher ou de s'éloigner mais aussi pour estimer le mouvement propre du robot sur lequel il est installé), le DEM nécessite d'être bidirectionnel et donc à fortiori directionnel.

C'est pour garder une possibilité de généralisation du fonctionnement de l'oeil-DEM dans un environnement dynamique qu'on a inclus ici la propriété de directionnalité dans le cahier des charges individuel de chaque DEM.

•2 La sensibilité du DEM à la valeur des contrastes

Cette sensibilité est fondamentale car elle conditionne la représentation de l'environnement "échantillonné" par le nombre de points de contraste effectivement détectés. Plus la sensibilité au contraste est importante, meilleur en est l'échantillonnage de l'environnement. Dans le cadre de la solution adoptée ici qui repose sur une différenciation temporelle, cette sensibilité dépend à la fois de la valeur du seuil H_h et de la position radiale D_i du point de contraste (cf. Chap.II, §.II.5.4.). On a montré notamment que la sensibilité au contraste du DEM est inversement proportionnelle à H_h . L'une des contraintes fondamentales à respecter est donc de choisir H_h le plus bas possible dans toute tentative d'amélioration du DEM.

•3 La précision dans l'évaluation des coordonnées polaires de chaque point de contraste

Dans les "bons cas de figure" comme ceux présentés à la fin du chapitre précédent (cf. fig.I.6), cette précision dépend essentiellement de la forme de la courbe de sensibilité angulaire associée au seuil H_h et elle varie avec la valeur du contraste détecté. Comme on l'a vu, l'erreur en distance ainsi que l'erreur angulaire augmentent toutes deux avec la valeur de l'angle d'acceptance de chaque ommatidie. Cela signifie que pour un angle interommatidial donné, et dans les "bons cas de figure", la contrainte est de choisir un recouvrement angulaire le plus faible possible.

Dans les "mauvais cas de figure" qui sont effectivement traités dans l'ensemble de ce Chap.III, la précision sur la distance radiale est essentiellement liée aux problèmes de correspondance et est a priori indéterminée ; par exemple une distance sous-évaluée peut conduire dans le cas extrême ($D_{mesurée}=0$) à une erreur relative de -100% ; à l'opposé une distance sur-évaluée peut conduire dans le cas extrême (point de contraste non détecté) à une erreur relative considérée comme égale à $+\infty$. Ce Chap.III va montrer que l'un des moyens permettant de limiter l'effet de ces problèmes de correspondance est d'augmenter, en association avec la valeur du seuil, le recouvrement angulaire afin de filtrer certaines fréquences spatiales élevées qui sont indésirables. Cette démarche va à l'encontre de celle préconisée pour les "bons cas de figure" et va donc nécessiter un compromis.

III.1.3. Performances d'un DEM ramenées au comportement optomoteur du robot

Dans le cadre de ce projet, dont l'objectif est de développer une chaîne optomotrice complète, ce n'est pas tant la précision sur la distance radiale ou sur l'angle polaire qui est prioritaire, que le fait de déterminer si le point de contraste se situe à l'intérieur ou à l'extérieur d'un *périmètre de sécurité*. En effet, un contraste n'est considéré comme "dangereux" et donc pris en compte par l'algorithme d'évitement d'obstacle (cf. Chap.V) que s'il est détecté à l'intérieur de ce périmètre de sécurité, dont la forme (ici un cercle) et les dimensions (rayon $R_v=50\text{cm}$) sont définis par rapport à des critères précis, liés au comportement préconisé pour le robot (cf. Chap.V). L'idée est ici de réduire le cahier des charges individuel du DEM en l'adaptant au périmètre de sécurité qu'on vient de définir. Ainsi on considère que le DEM est défaillant uniquement dans les deux types de situations suivantes:

- "cas grave de sous-estimation" :

un point de contraste est détecté comme étant à l'intérieur du périmètre de sécurité, alors qu'en réalité il se trouve à l'extérieur : ce type d'erreur entraîne un braquage inopportun du robot.

- "cas grave de surestimation" :

un point de contraste est détecté comme étant à l'extérieur du périmètre de sécurité ou n'est pas détecté du tout, alors qu'il se trouve en réalité à l'intérieur du périmètre de sécurité : ce type d'erreur peut entraîner une collision.

III.2. LIMITES DE LA VERSION DE BASE DU DEM : PROBLEMES DE CORRESPONDANCE

III.2.1. Domaine de validité de la version de base du DEM

Dans les simulations présentées à la fin du Chap.II (qui illustrent en fait les "bons cas de figure"), une solution de DEM avec des angles d'acceptance $\Delta\phi$ les plus fins possibles, associés à un seuil H_h le plus bas possible, semble donner les meilleurs résultats, tant au niveau de la sensibilité au contraste qu'au niveau de la précision de la mesure. Ce paragraphe met en évidence à travers un certain nombre de cas d'école (cf. cas A..J à la fig.III.3), les *problèmes de correspondance* qui apparaissent avec une telle solution. Ces problèmes entraînent, selon la version du DEM utilisée, soit l'un soit l'autre des deux cas de mauvais fonctionnement décrits ci-dessus ("cas grave de sous-estimation " ou "cas grave de surestimation ").

De manière générale, un "problème de correspondance" résulte d'une erreur dans l'identification d'une paire conjuguée de contrastes. Dans le cas du DEM cela signifie que la mesure du retard s'effectue entre deux déclenchements qui n'ont pas le même point de contraste pour origine : il s'ensuit une mesure erronée de la vitesse angulaire et par conséquent de la distance.

Les dix exemples de simulation présentés au paragraphe suivant (cf. fig.III.3) sont tous construits sur la base d'un même problème de correspondance (illustré à la fig.III.1) : celui-ci est produit par une configuration de l'environnement comportant au minimum deux points de contraste (A et B à la fig.III.1) dont la période d'apparition $T_{AB(i-1)}$ sur la voie $i-1$ est inférieure ou égale au retard $T_{A(i-1, i)}$ qui sépare l'apparition du premier contraste A entre chacune des voies $i-1$ et i .

$$T_{AB(i-1)} \leq T_{A(i-1, i)} \quad (\text{éq.III.1})$$

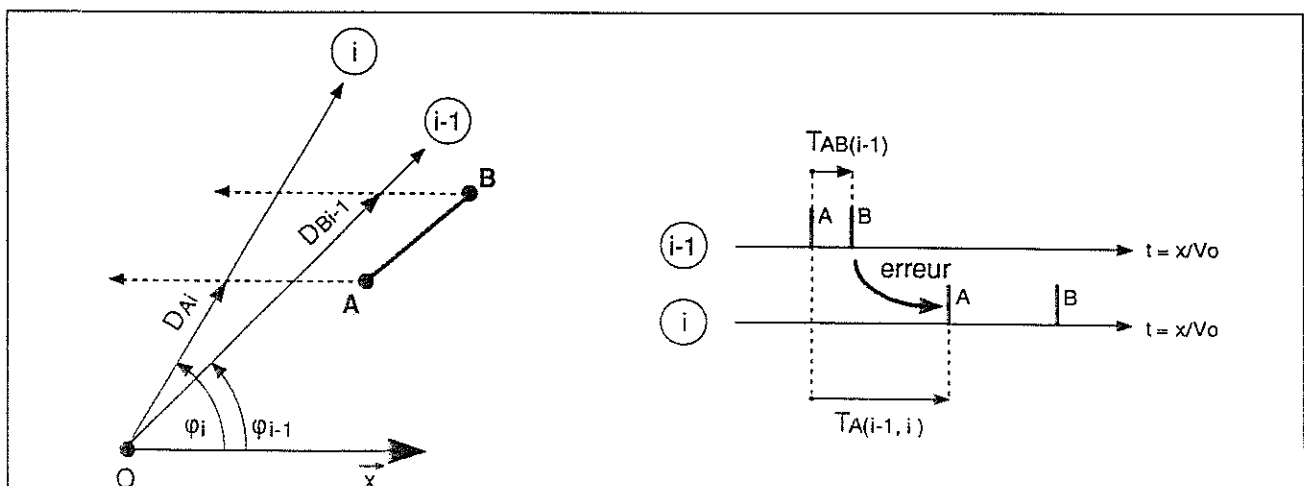


Fig.III.1 Illustration d'un problème de correspondance dans le cas de la version de base (redéclenchable) du DEM. La mesure du retard T_{AB} a lieu entre deux déclenchements qui n'ont pas le même point de contraste pour origine.

Dans un tel cas et pour la "version redéclenchable" du DEM, le retard Δt mesuré et la distance radiale qui en est déduite, sont inférieurs à leur valeur réelle. Cette erreur peut provoquer des "cas graves de sous-estimation" (cf. §.III.1.3.). Une comparaison avec la "version inhibée" qui tend au contraire à conduire aux "cas graves de surestimation", sera présentée dans le récapitulatif final (cf. fig.III.5).

Au niveau géométrique, l'éq.III.1 se traduit de la manière suivante :

- pour la direction $i-1$ du DEMi on a :

$$TAB(i-1) = TBA(i-1) = ABapp(i-1) / V_o \quad (\text{eq.III.2})$$

$$\text{avec } ABapp(i-1) = ABx - (DBi-1 - DAi-1) \cdot \cos(\phi_i - 1) \quad (\text{eq.III.3})$$

et $ABapp(i-1)$: largeur apparente du segment AB vue par le récepteur n° $i-1$
 ABx : projection orthogonale, du segment AB sur la direction du mouvement
 $DAi-1$ et $DBi-1$: distance radiale de chaque contraste mesurée dans la direction $i-1$

- pour le contraste A on a :

$$TA(i, i-1) = \Delta x(A, i, i-1) / V_o \quad (\text{eq.III.4})$$

$$\text{avec } \Delta x(A, i, i-1) = DAi-1 \cdot \cos(\phi_i - 1) - DAi \cdot \cos(\phi_i) \quad (\text{eq.III.5})$$

En conséquence, les configurations géométriques conduisant à des erreurs d'estimation se définissent de la façon suivante :

$$ABapp(i-1) \leq \Delta x(A, i, i-1) \quad (\text{eq.III.6})$$

ce qui de façon plus détaillée, donne :

$$ABx \leq DBi-1 \cdot \cos(\phi_i - 1) - DAi \cdot \cos(\phi_i) \quad (\text{eq.III.7})$$

Interprétation géométrique de la condition limite :

L'éq.III.7 qui définit le *domaine d'erreur* du DEM, s'interprète de façon simple comme le fait que l'écart l'angulaire ($\phi_A - \phi_B$) entre les deux points de contraste, mesuré par rapport à O lorsque $\phi_A = \phi_i$, est inférieur à l'angle interommatidial $\Delta\phi_i$ du DEM (cf. fig.III.2). Le *domaine de validité* du DEM est par définition le complémentaire du domaine d'erreur.

Ainsi l'erreur relative sur l'estimation du retard (et donc de la distance) peut varier de 0% dans le domaine de validité (eq.III.7 non vérifiée) à -100% ($Destimée=0$) dans le domaine d'erreur. L'erreur maximum est produite lorsque les deux termes de l'éq.III.7 sont pratiquement égaux, ce qui correspond aux diverses configurations limites de l'environnement décrites ci-contre où l'écart

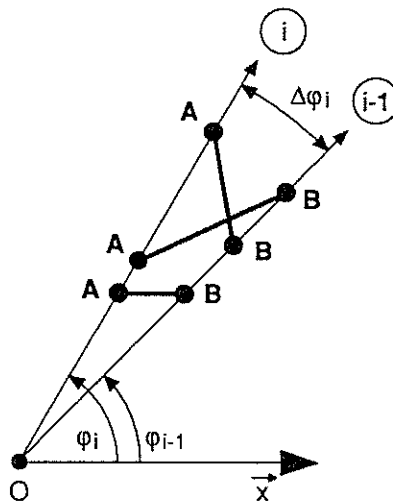


Fig.III.2 Ensemble de configurations de l'environnement définissant la limite du domaine de validité du DEM

angulaire entre les deux points de contraste coïncide exactement avec l'angle interommatidial du DEM.

III.2.2. Problèmes de correspondance en 10 exemples

Les 10 exemples de simulation, A..J, présentés ci-dessous (fig.III.3) sont construits sur la base des différentes configurations limites décrites à la fig.III.2. Ils constituent un échantillon représentatif et réaliste de configurations de l'environnement entraînant des mesures erronées de la part du DEM. Ils vont permettre d'analyser les effets néfastes ou non, des problèmes de correspondance au niveau du cahier des charges défini précédemment (cf. §.III.1.2. et III.2.2.).

Les exemples de la fig.III.3, s'ils conduisent tous à une erreur d'estimation, peuvent être eux mêmes groupés en plusieurs catégories:

- les cas A,B,C et D,E,F : ils sont basés, comme à la fig.III.1, sur seulement 2 points de contraste et présentent l'avantage d'être statistiquement très nombreux dans un environnement naturel. les groupes A,B,C et D,E,F présentent entre eux exactement les mêmes configurations géométriques, mais par contre diffèrent dans la séquence des intensités de chaque bande. A,B,C correspondent à une séquence 0,10,0 tandis que D,E,F correspondent à une séquence 0,5,10. Par conséquent, dans A,B,C on observe une réponse de type ON suivie d'une réponse de type OFF (ici, dans cette version du DEM, ces deux réponses ne peuvent être dissociées puisque le signal dérivé est redressé), tandis que les cas D,E,F sont basés sur deux réponses ON successives.

Les cas A&D illustrent un mur plan parallèle à la trajectoire du robot et contenant les deux points de contraste C1 et C2. Au contraire dans les cas B&E et C&F, la direction formée par les deux points de contraste coupe la trajectoire du DEM. Comme cela est suggéré à la fig.III.3 (partie grisée), ces cas dans un environnement réel, peuvent s'interpréter comme un "décrochement" dans un mur.

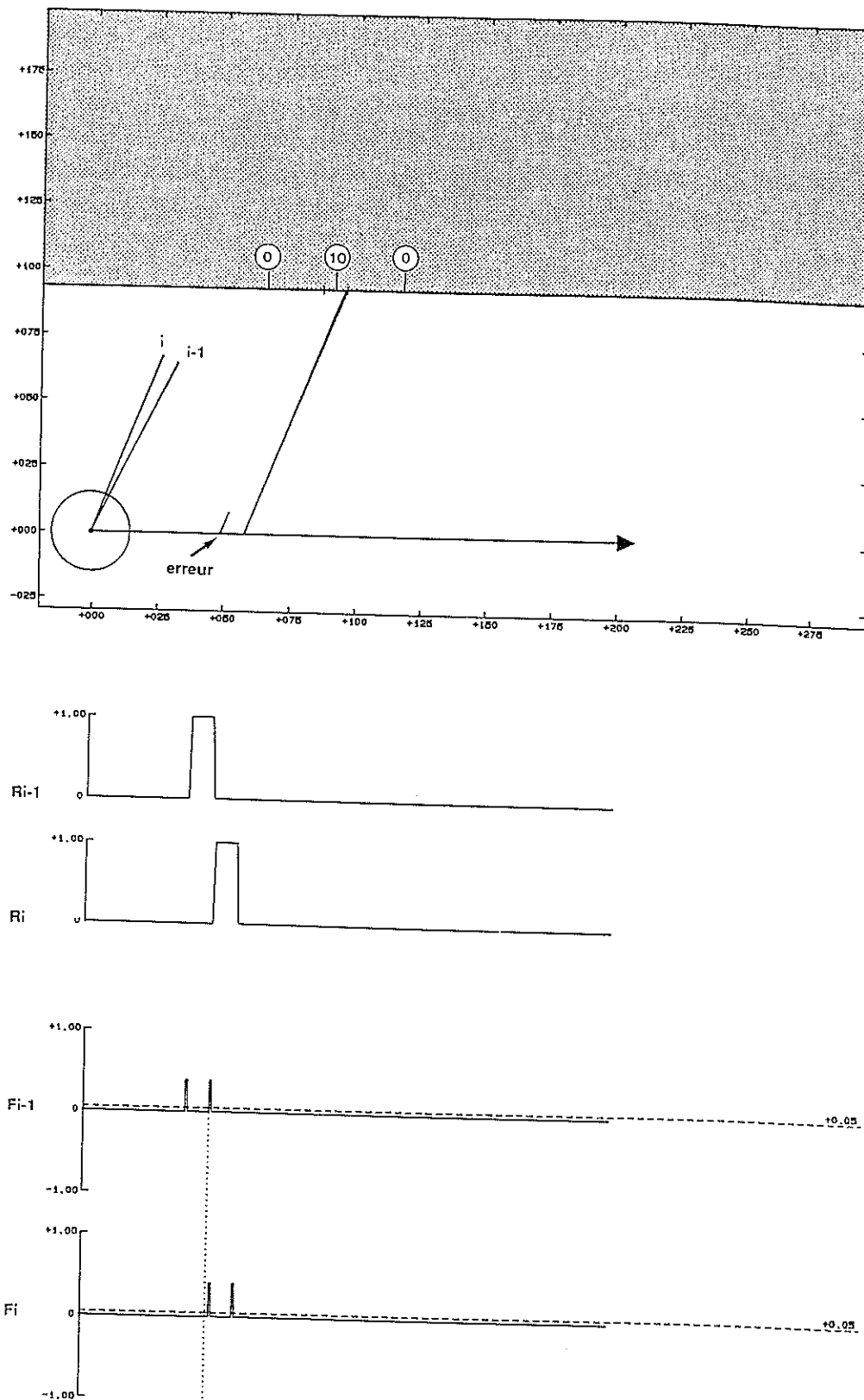


Fig.III.3 / cas A

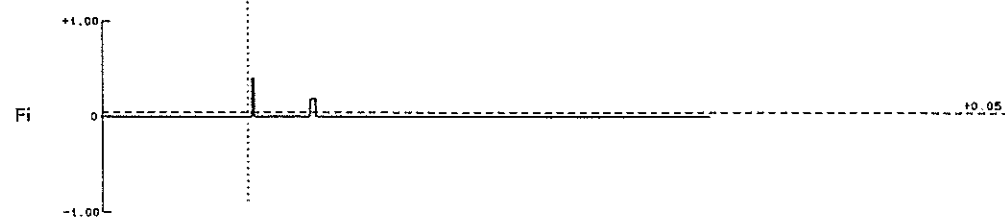
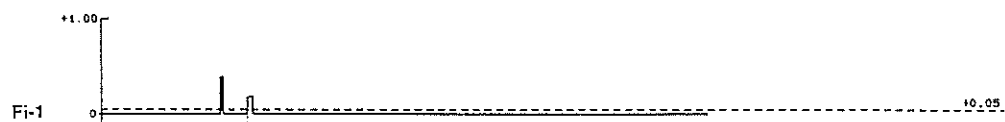
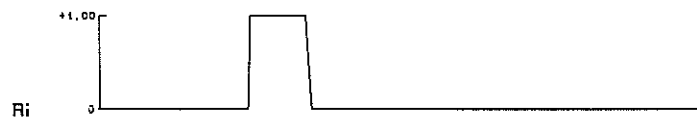
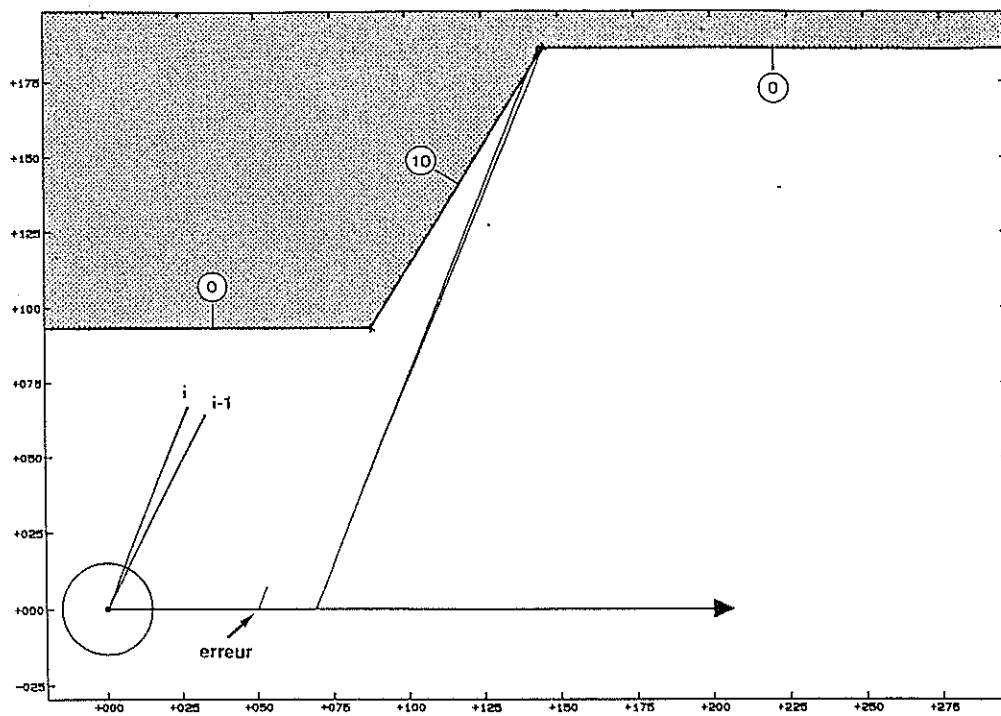


Fig.III.3 / cas B

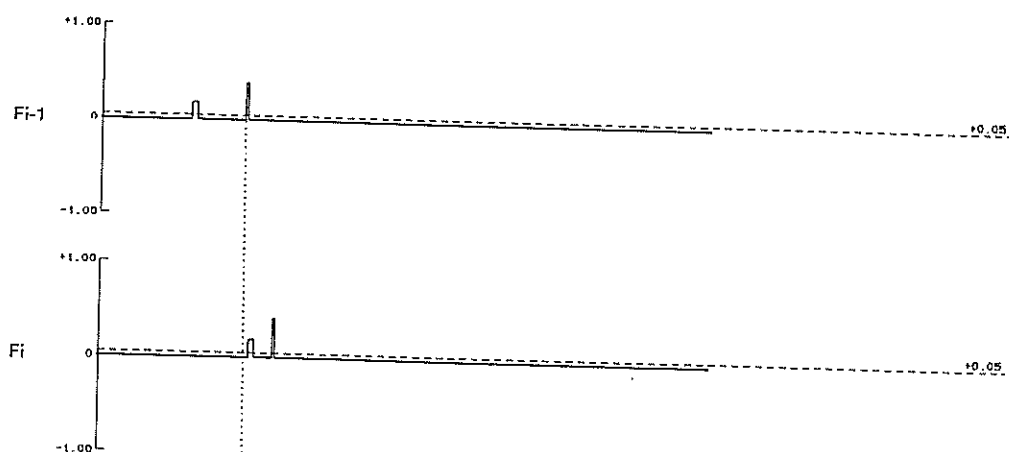
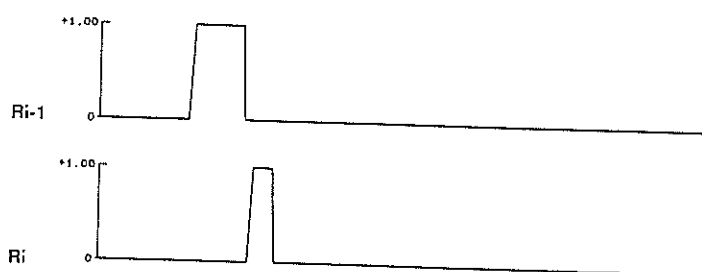
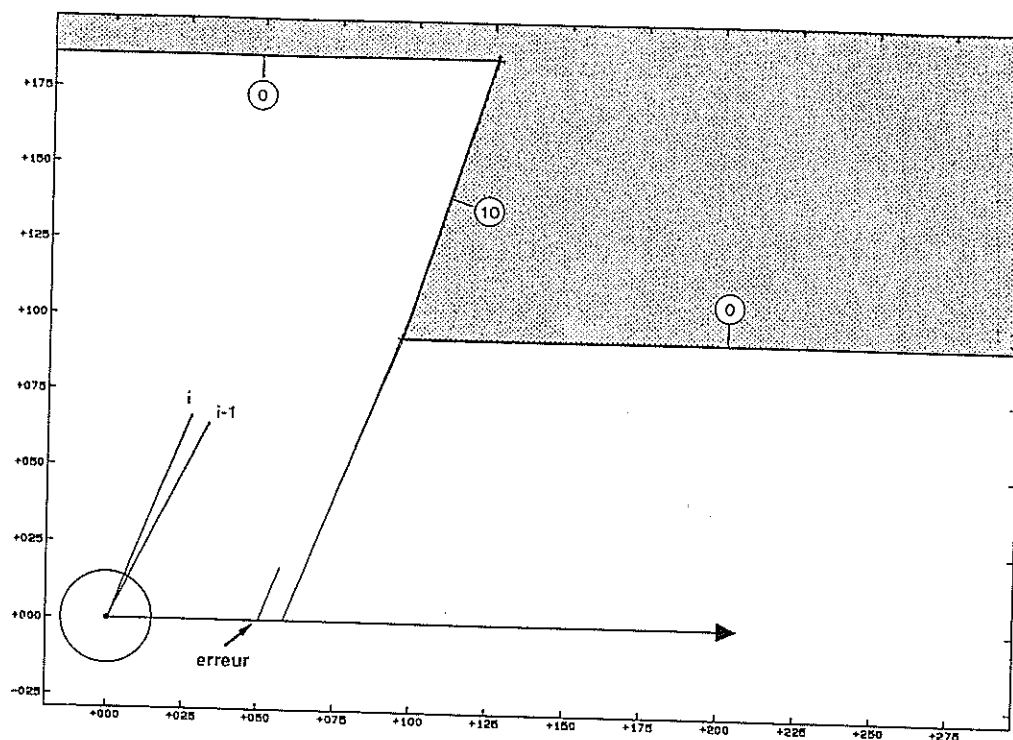


Fig.III.3 : cas C

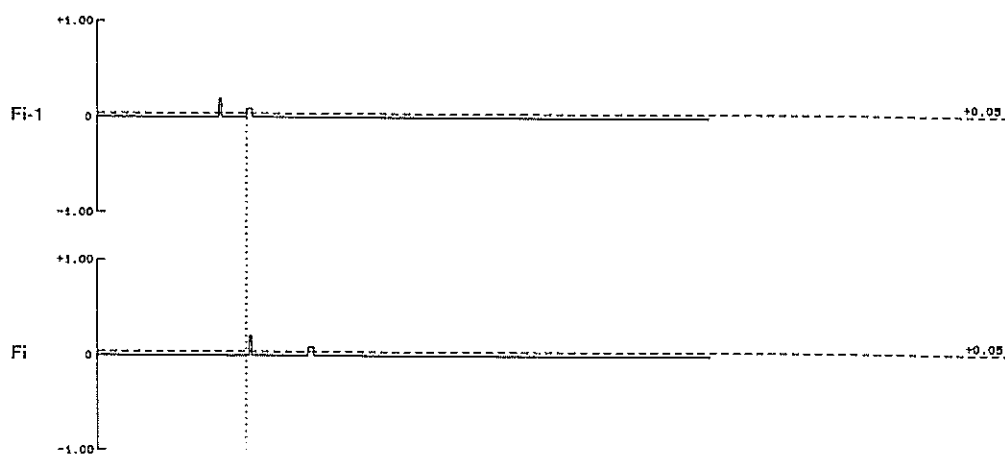
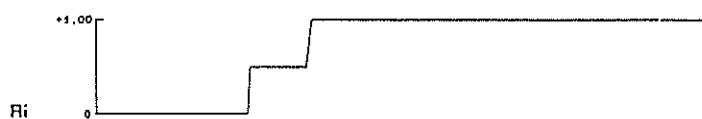
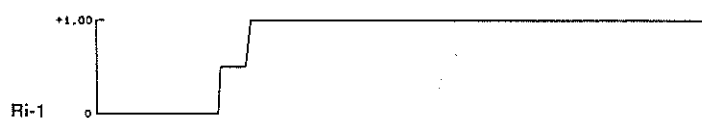
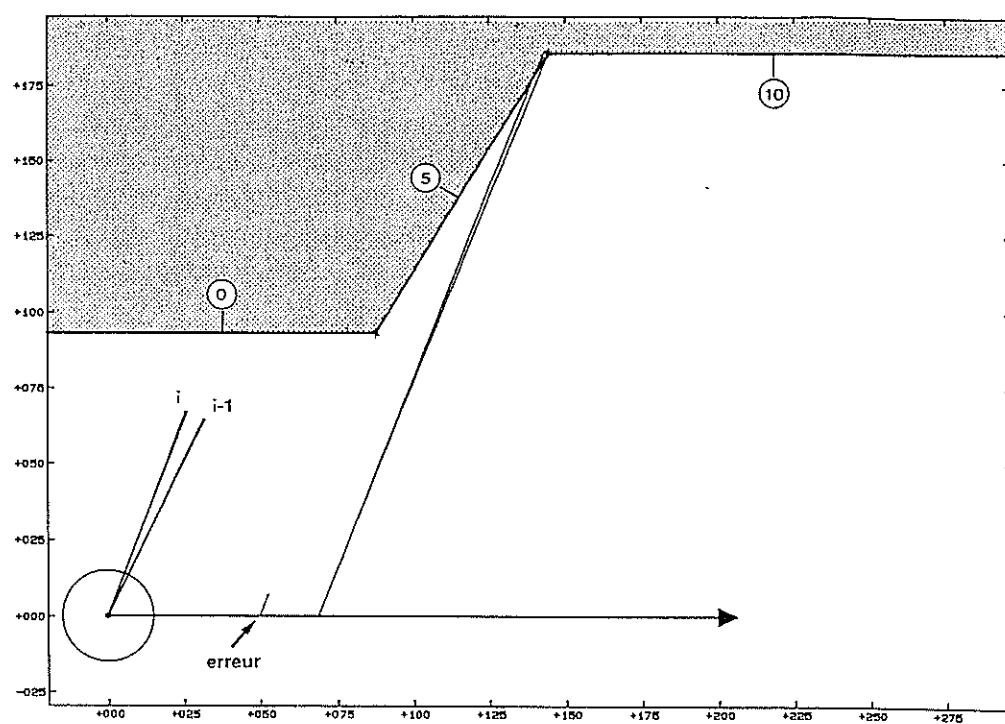


Fig.III.3 : cas E

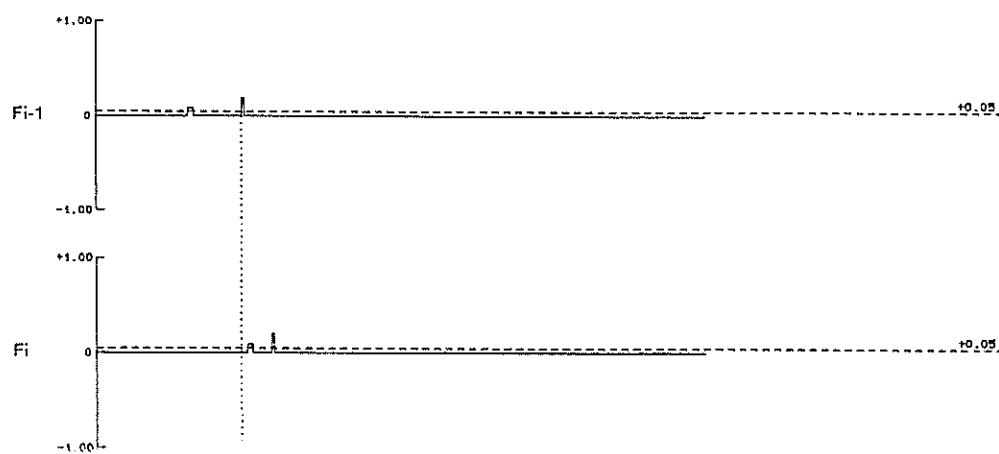
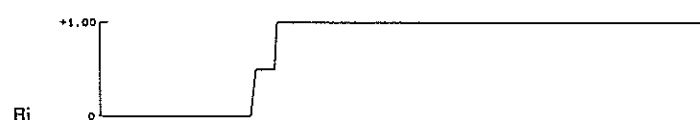
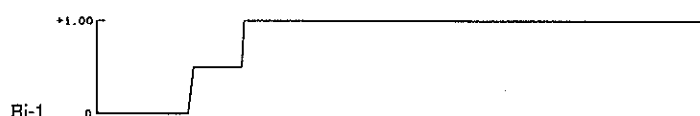
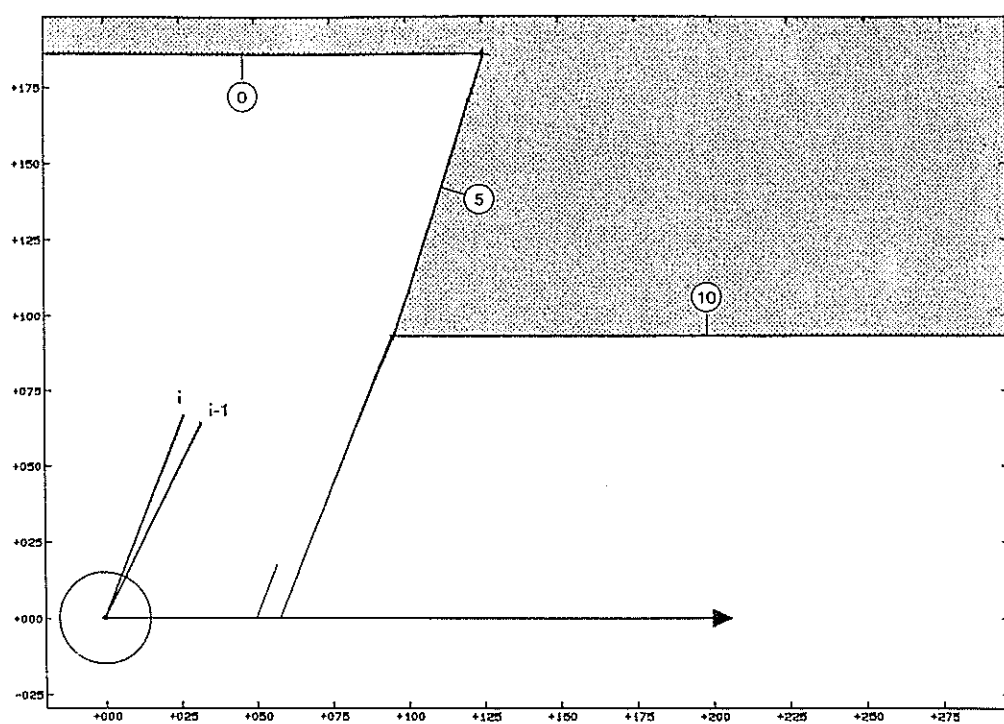


Fig.III.3 : cas F

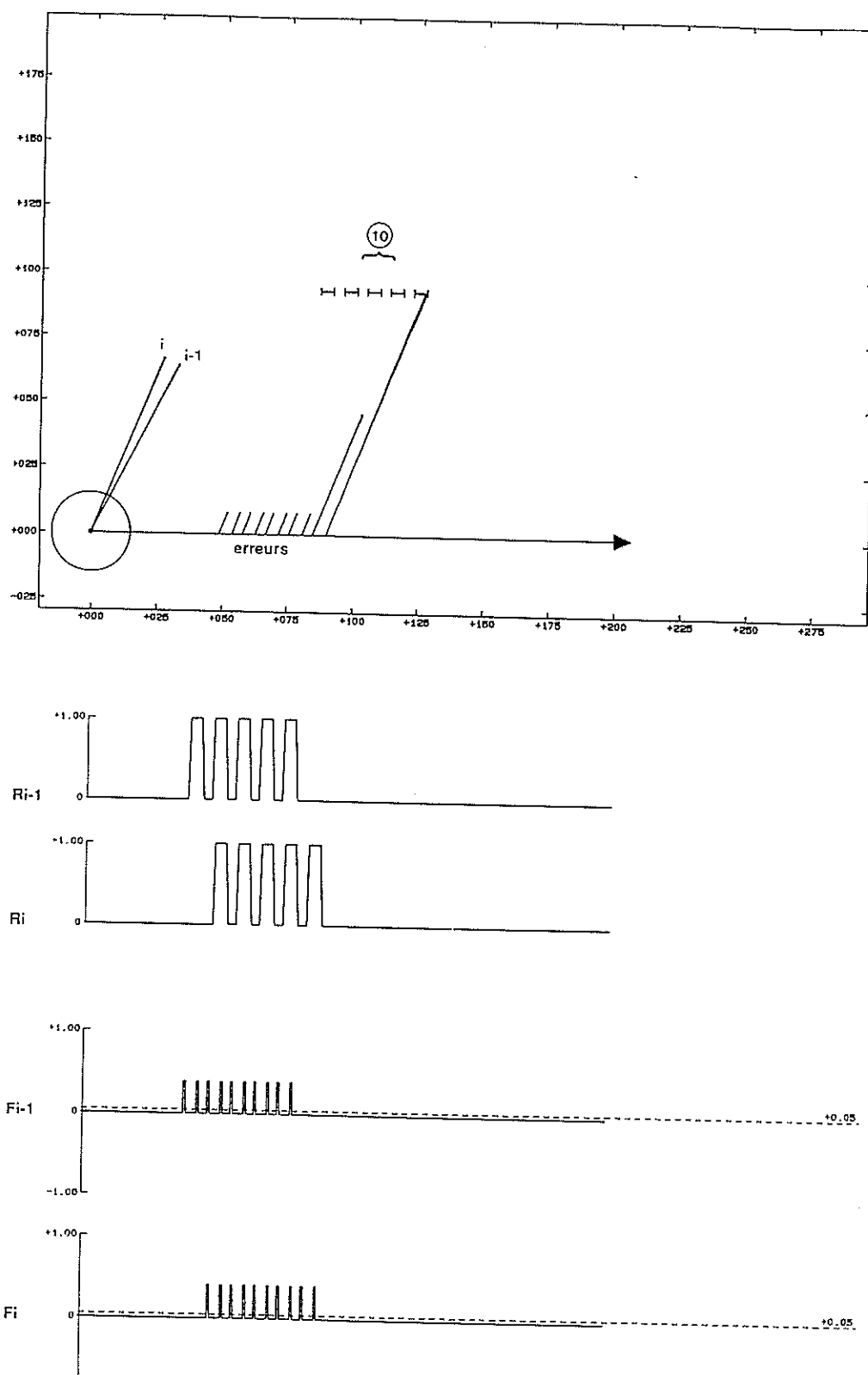


Fig.III.3 : cas G

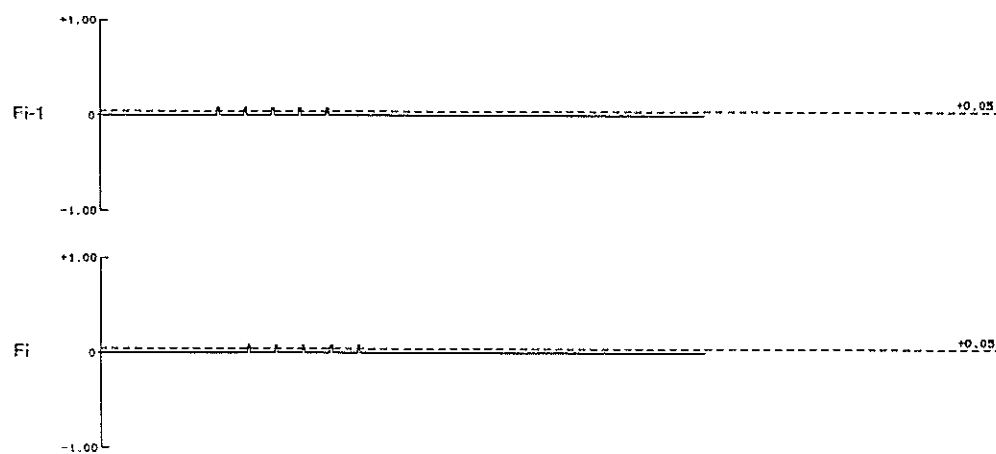
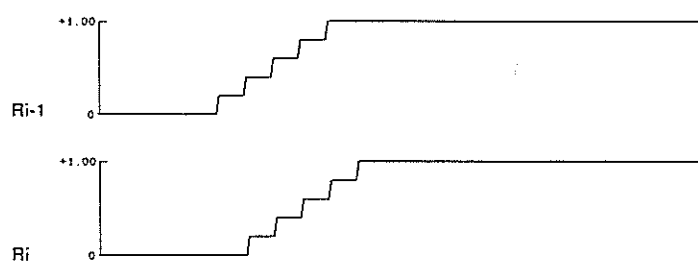
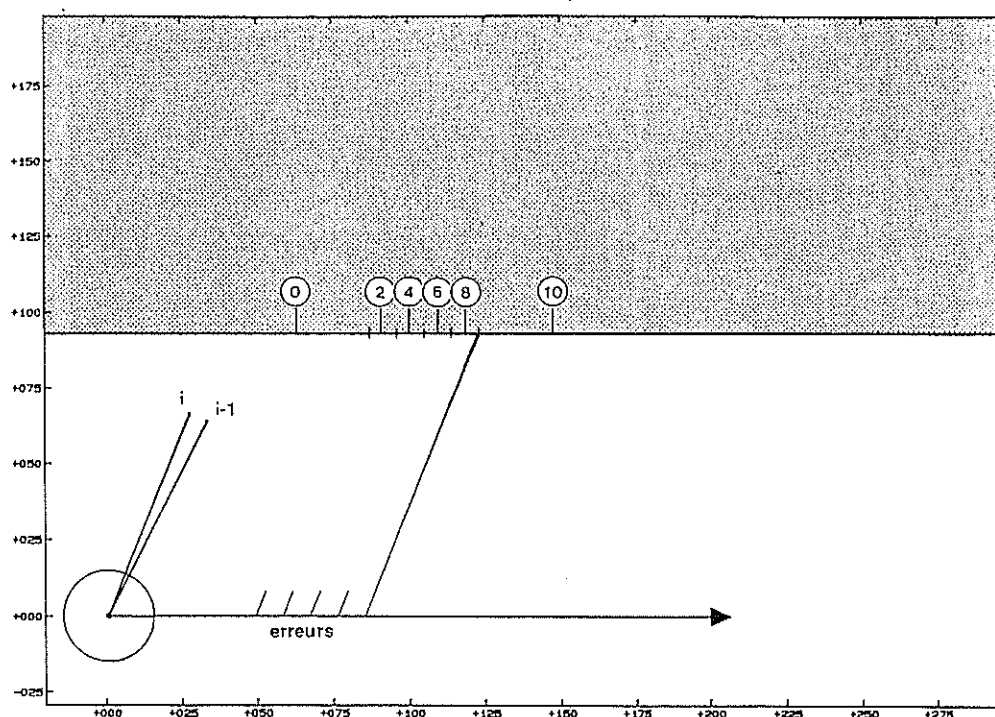


Fig.III.3 : cas H

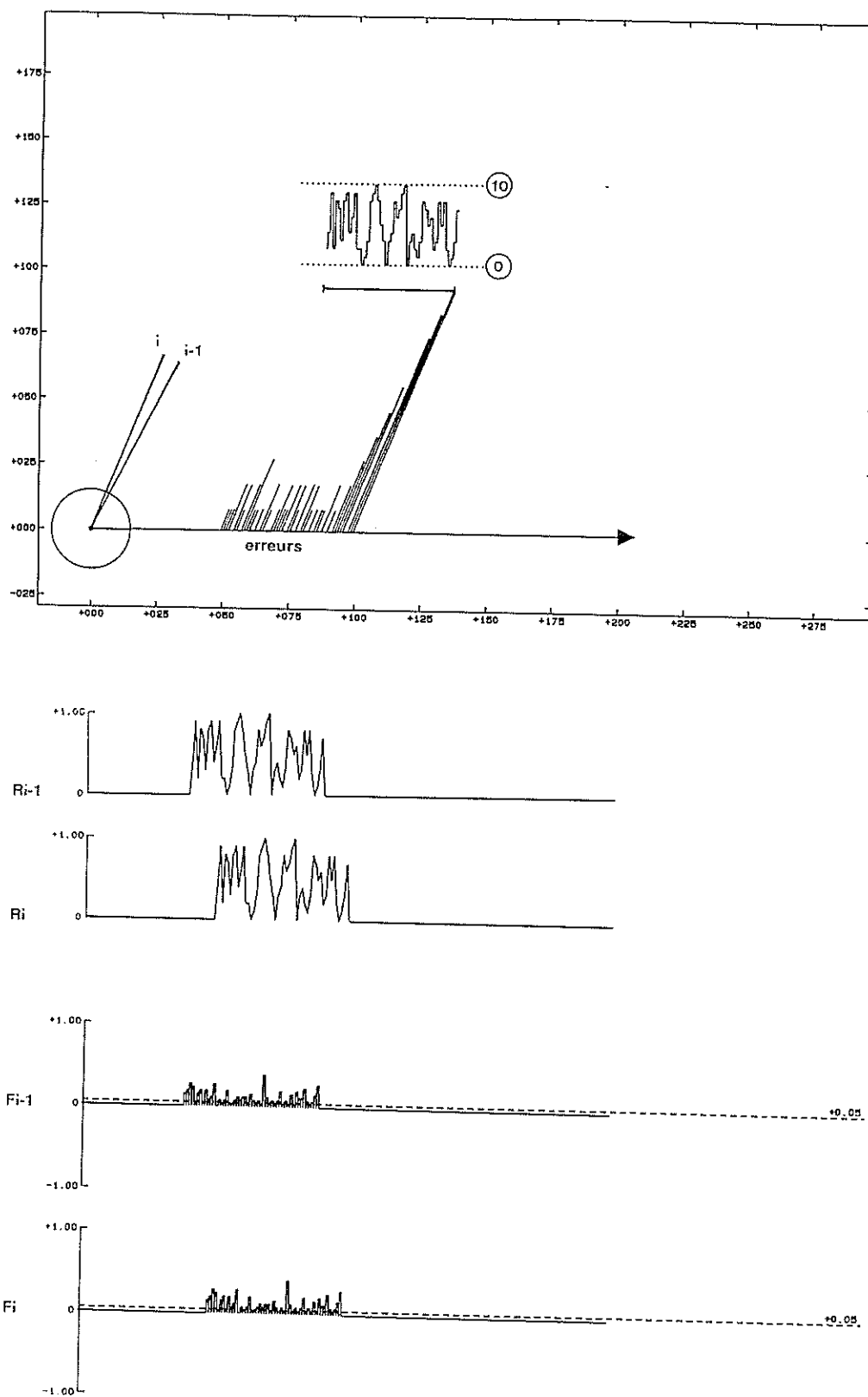


Fig.III.3 : cas I

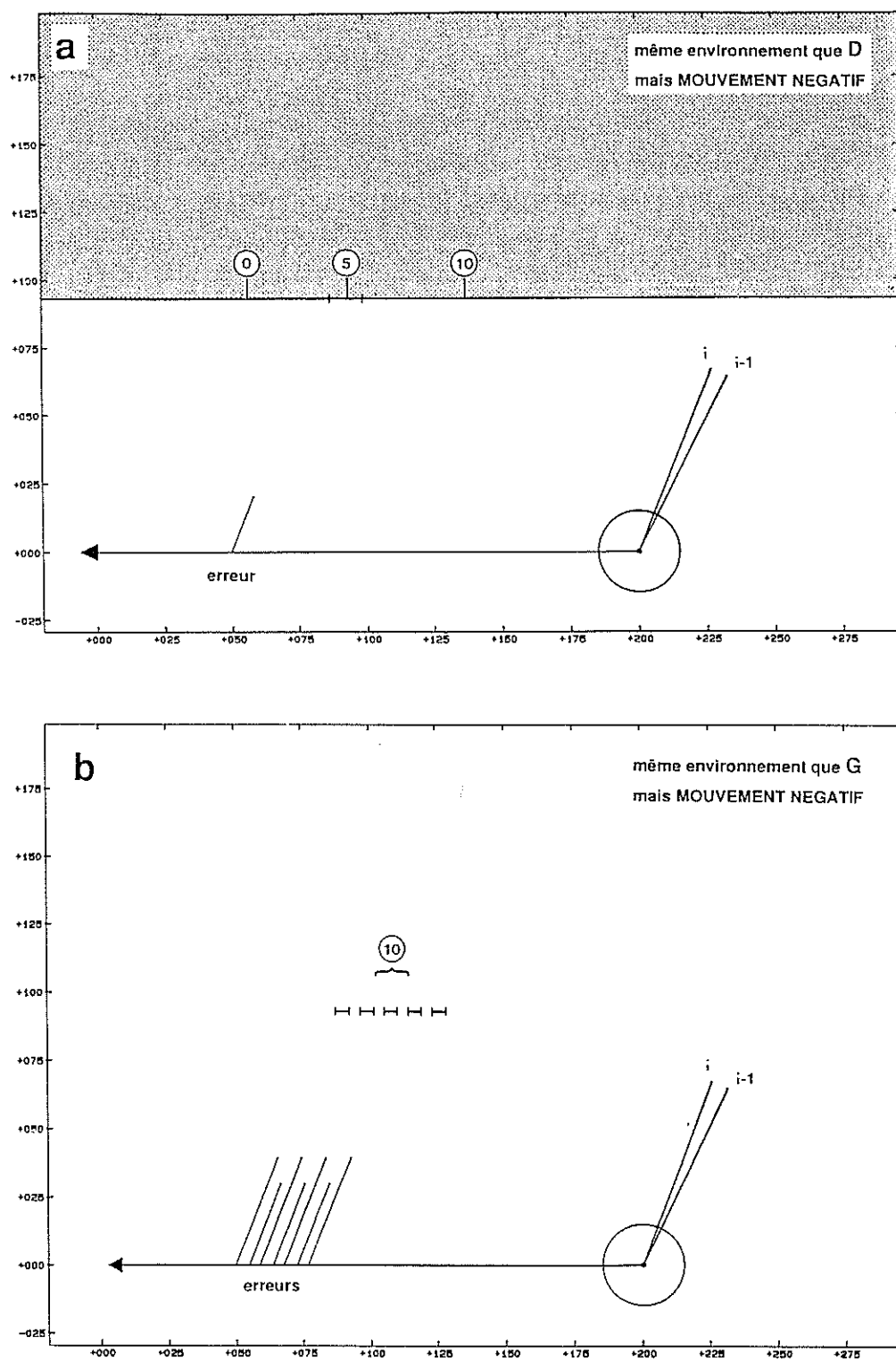
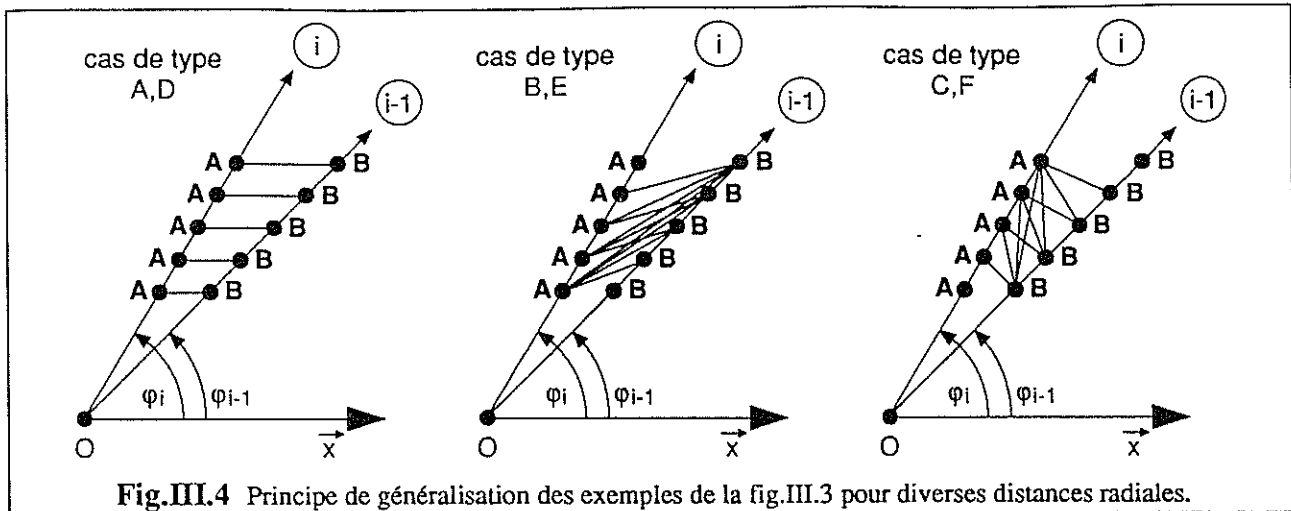


Fig.III.3 : cas J

- les cas G et H : ils correspondent à une extension des cas A&E, à une mire plane périodique. Ici seule une mire parallèle à la trajectoire est illustrée. Ces deux cas permettent une approche spectrale plus classique des problèmes d'échantillonnage et de repliement de spectre et offrent ainsi un point de départ pour résoudre de façon analytique certains problèmes de correspondance (cf. §.III.3.4.). Là encore, le cas G présente une alternance de réponses de type ON et OFF, alors que H présente une succession de réponses ON.
- le cas I : il correspond à une mire parallèle au mouvement dont les niveaux de gris varient aléatoirement ; c'est donc le cas d'environnement le plus intéressant d'une part parce qu'il permet de tester la sensibilité du système visuel à une image bruitée donc très naturelle, d'autre part parce que c'est une situation très réaliste (notamment pour le prototype) puisqu'elle ne repose sur aucune modélisation polyédrique des obstacles (c'est-à-dire une modélisation par un ensemble de segments présentant chacun un niveau de gris uniforme, cf. Chap.II).
- le cas J : ce cas reprend deux des configurations précédentes, à savoir le cas D (Ja) et le cas G (Jb), mais ici le sens du mouvement est inversé. Cet exemple met en évidence les erreurs au niveau de la directionnalité même du DEM, qui ne devrait être sensible qu'à des mouvements de $Ri-1$ vers Ri , mais qui, ici, répond également à des mouvements dans le sens opposé, à savoir de Ri vers $Ri-1$.

Notons que dans tous ces exemples d'école, le seuil a été volontairement choisi le plus bas possible ($H_h=0.05$) afin de privilégier a priori la sensibilité aux contrastes. Pour chaque cas de figure, il existe une valeur du seuil H_h qui élimine de façon sélective certains points de contraste à l'origine d'erreur d'estimation. Par exemple, dans les cas B, C, E, F, par un ajustement précis du seuil on pourrait éliminer le point de contraste le plus éloigné. Cependant il est impossible de trouver une valeur du seuil à la fois commune à tous les cas de figure, et éliminant tous les points de contraste indésirables.

Afin de rendre cette étude la plus exhaustive possible, chaque cas d'école présenté à la fig.III.3, a été généralisé sur la base du principe illustré à la fig.III.4, pour un ensemble de différentes distances radiales (à savoir 25, 50, 75, 100, 150 et 200 cm). Les performances des deux versions de base du DEM (la "version redéclenchable" et la "version inhibée", cf. §.II.4.3.f) ont été étudiées, dans le cadre de cette généralisation et sont présentées dans le récapitulatif final de la fig.III.5. Ce récapitulatif regroupe les résultats d'environ 180 simulations élémentaires (correspondant chacune à une configuration différente de l'environnement). Les résultats de ces simulations sont présentés ici sous la forme de diagrammes, où sont portés en abscisse, la distance radiale réelle des points de contraste à l'instant où ils sont détectés, et en ordonnée le résultat de la mesure effectuée par le DEM. Ainsi tout point n'appartenant pas à la droite $y=x$ correspond à une erreur de mesure. Dans chacun des diagrammes élémentaires, les "cas graves de sous-estimation" (cf. §.III.1.3.) sont représentés par le rectangle grisé horizontal et les "cas graves de surestimation" par le rectangle grisé vertical. Cette représentation permet de visualiser pour un grand nombre de



configurations, d'une part l'ensemble des erreurs absolues faite par le DEM sur l'estimation en distance, et d'autre part l'ensemble des erreurs considérées comme néfastes (parties grisées) au niveau du comportement optomoteur du robot.

Au vu de ces résultats, on constate que dans *les configurations à deux contrastes* (fig.III.5a) les deux versions du DEM se comportent différemment, tandis que dans *les configurations à mires périodiques ou aléatoires* (fig.III.5b) les deux versions du DEM mènent pratiquement aux mêmes résultats.

Plus précisément :

la version redéclenchable conduit, pour tous les cas de figure, à une sous-estimation de la distance radiale et, notamment dans la partie grisée interdite. La seule exception à cette propriété est la configuration de type H où la distance des contrastes à partir de 150cm, n'est pas sous-estimée faute de pouvoir être détectée ; mais dans un tel cas, la perte des points de contraste est due à leur faible valeur de contraste par rapport au seuil et non pas à un problème de correspondance.

la version inhibée conduit, dans les configurations à 2 contrastes (fig.III.5a), à une surestimation de la distance ; cette surestimation n'est en fait acceptable que dans les cas de type B ou E, alors que dans les cas de type A ou D et C ou F en privilégiant la détection du contraste le plus éloigné, elle provoque la perte du contraste le plus près et donc conduit aux "cas graves de surestimation". Par contre, dans les cas de mires planes périodiques ou aléatoires (fig.III.5b), la version inhibée conduit aux mêmes erreurs que la version redéclenchable. Elle est cependant légèrement plus performante (et cela n'apparaît pas sur ce type de représentation) car, alors que dans la version redéclenchable seul le dernier contraste de la mire est détecté sans erreur, ici le premier contraste de chaque mire est également correctement détecté.

VERSION REDECLENCHABLE

VERSION INHIBEE

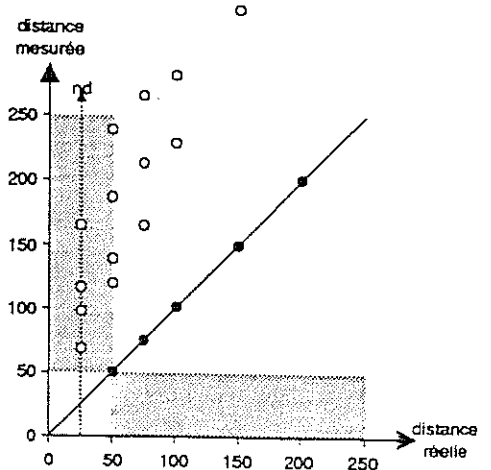
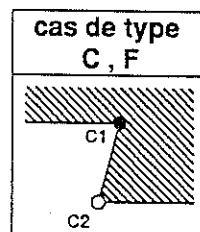
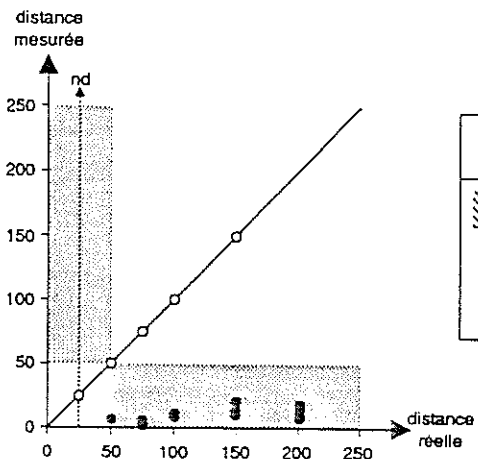
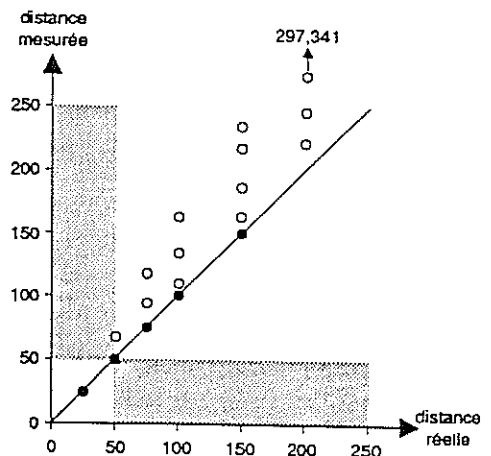
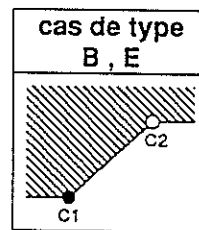
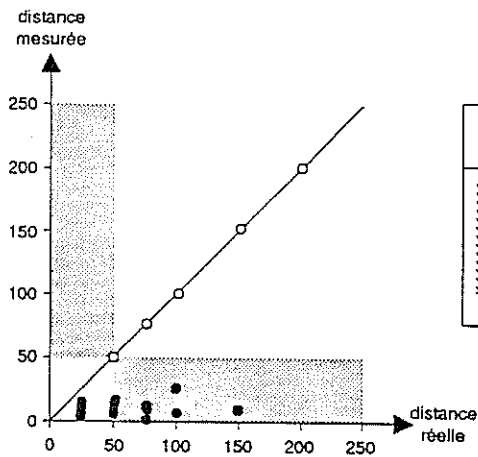
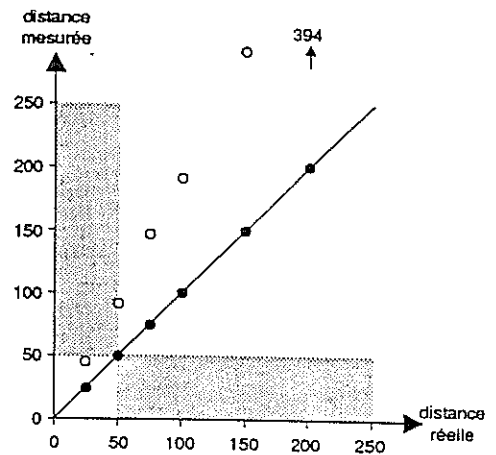
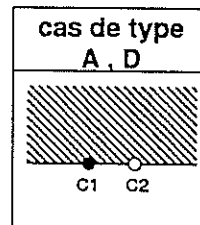
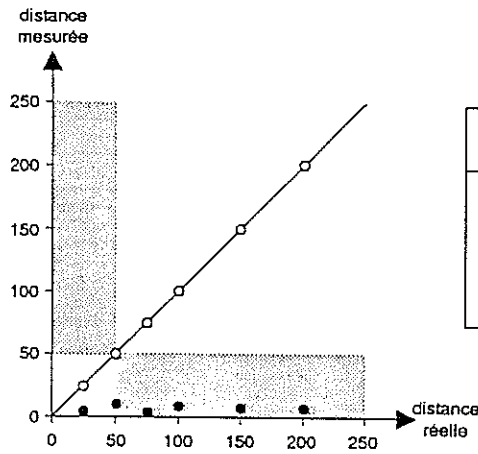


FIG.III.5a Résultats des estimations en distance faites par la version de base du DEM pour différentes configurations de l'environnement (ici basé sur deux points de contraste C1 et C2). Chaque cas correspond à la généralisation de l'un des exemples de la fig.III.3 testé simultanément pour deux versions du DEM (cf. §.II.4.3.f). Chaque diagramme visualise les couples (distance réelle du contraste, distance mesurée par le DEM) et met en évidence les erreurs induites par les problèmes de correspondance. Les points de contraste non détectés (nd) sont représentés par un trait pointillé vertical.

VERSION REDECLENCHABLE

VERSION INHIBEE

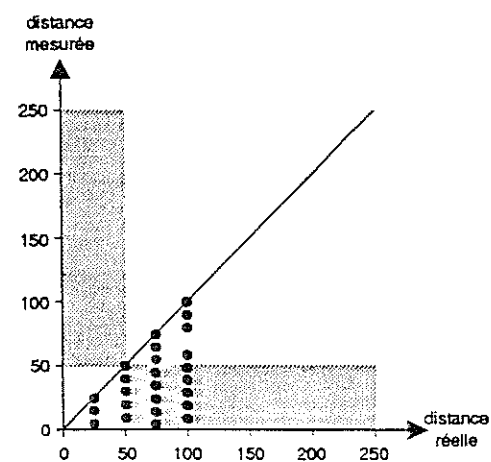
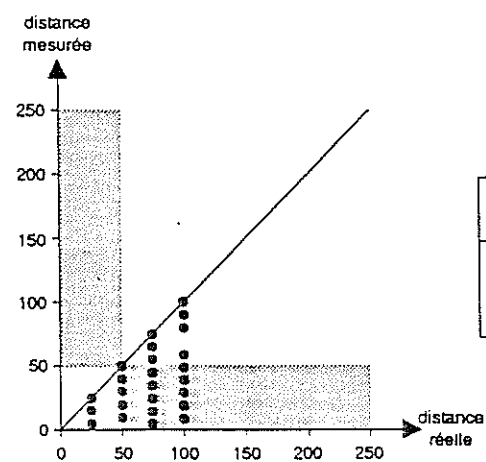
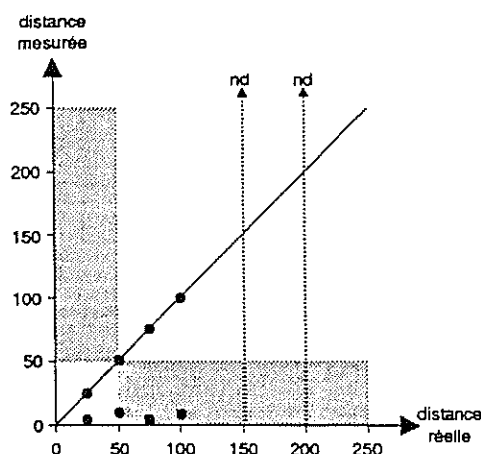
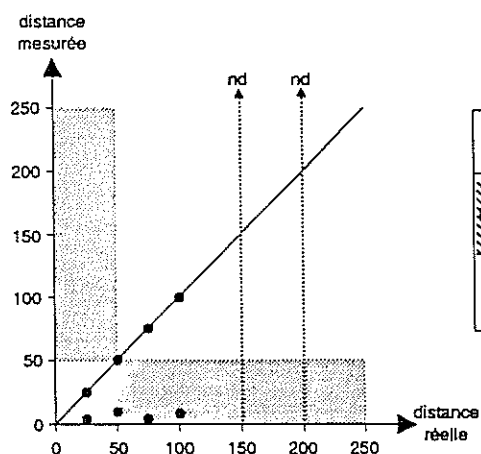
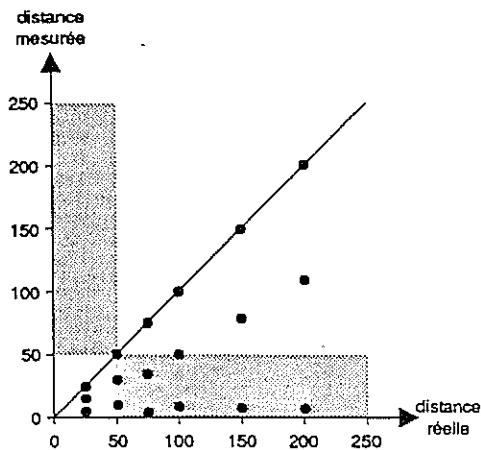
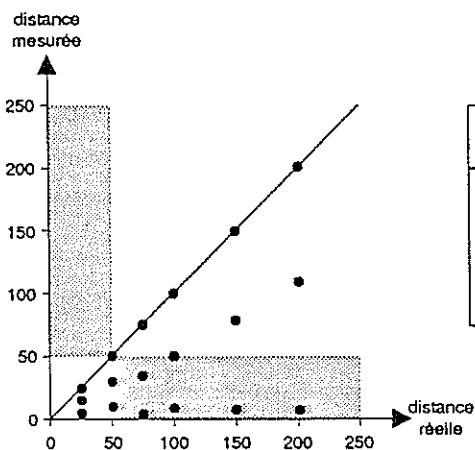


Fig.III.5b Résultats en simulation sur l'estimation de la distance radiale : même représentation que pour la fig.III.5a, mais ici les diverses configurations de l'environnement pour lesquelles le DEM est testé, correspondent à des ensembles de mires périodiques ou aléatoires situées à différentes distances radiales.

III.2.3. Conclusion

Cette première approche des problèmes de correspondance, montre que la version de base du DEM telle qu'elle a été décrite jusqu'à présent, ne remplit pas le cahier des charges même simplifié, fixé au début de ce chapitre, qui se résume à la propriété de directionnalité, et à éviter les deux niveaux de mauvais fonctionnement décrits dans le §.III.1.3. ("cas graves de sur/sous-estimation"). Elle montre également que la "version inhibée" n'apparaît pas plus performante que "la version redéclenchable" pour résoudre ces niveaux de mauvais fonctionnement ; la "version inhibée" sera donc laissée de côté dans la suite de ce travail. Une des raisons favorables à la "version redéclenchable" est qu'elle permet de résoudre de façon simple les phénomènes de papillotement (cf. Thèse C.Blanes, Chap.III).

Une *version améliorée* du DEM, est envisagée au paragraphe suivant avec l'objectif de limiter si ce n'est de supprimer les défaillances qui viennent d'être répertoriées. Cette amélioration va concerner deux points essentiels que les simulations précédentes ont mis en valeur :

- 1 la directionnalité du DEM ; les exemples Ja et Jb (fig.III.3) montrent que la version de base du DEM, *n'est pas directionnelle* puisque certains types de stimuli induisent (là encore à cause de problèmes de correspondance) une réponse du DEM alors qu'il est stimulé dans son sens "non préféré".

- 2 la limitation des *phénomènes de correspondance* répertoriés ci-dessus et ceci, en jouant sur le filtrage spatio-temporel local effectué par chaque entrée des DEMs. Cette amélioration va conduire à un compromis entre le "cas grave de surestimation" et le "cas grave de sous-estimation", la question étant notamment de déterminer lequel doit être privilégié par rapport à l'autre (cf. Chap.V). Par exemple la version "redéclenchable" du DEM décrite ci-dessus, associée à un recouvrement angulaire très faible et à un seuil très bas, conduit systématiquement à une sous-estimation des distances et donc aux "cas graves de sous-estimation". Dans le Chap.V, on montre que ce phénomène est pratiquement réhibitoire dans un environnement bruité comme celui illustré par la mire aléatoire (cas I). En effet, le robot réagissant en permanence à des obstacles "virtuels" qu'il perçoit comme des illusions optiques n'est alors plus contrôlable (cf. "le robot peureux", §.V.4.2.). Par contre, grâce à un filtrage adéquat on peut inverser cette tendance, c'est à dire éliminer une majorité de cas où les distances sont sous-estimées, et en contre-partie privilégier les "cas graves de surestimation" (cf. §.III.3.5.). On montre au Chap.V comment compenser ces derniers en augmentant l'anticipation du robot. (cf. §.V.3.3.).

Remarque sur la résolution angulaire

On notera que l'amélioration individuelle de chaque DEM n'est pas liée à *une augmentation de sa résolution angulaire*. En effet, la description du domaine de validité du DEM faite au

§.III.2.1. montre que quelle que soit la valeur de l'angle interommatidial $\Delta\phi$, il existe toujours une *infinité de configurations limites* comme celles présentées à la fig.III.2, qui génèrent des problèmes de correspondance. Une augmentation de la résolution angulaire étend les limites du domaine de validité du DEM mais ne résout pas les problèmes de correspondance. Les seuls avantages liés à l'amélioration de la résolution angulaire concernent plutôt la précision du système optomoteur, comme par exemple l'augmentation de la précision sur l'angle polaire du contraste détecté et d'autre part la réduction de la longueur des translations nécessaires aux acquisitions visuelles (cf. Chap.IV).

III.3. VERSION AMELIOREE DU DEM

III.3.1. Séparation des voies ON et OFF

Dans la version de base du DEM, le signal dérivé a été délibérément redressé afin de pouvoir travailler sur un signal monopolaire ne nécessitant qu'un seul système de seuillage à hystérésis par voie et qu'un seul système de mesure du retard Δt par DEM.

Cette version de base, si elle présente l'avantage d'être simple au niveau du câblage, semble induire, avec la perte de la polarité du signal dérivé, une perte d'information non négligeable pour l'identification des points de contraste. En utilisant la polarité du signal dérivé comme critère supplémentaire d'identification, on peut espérer éliminer toute une catégorie de problèmes de correspondance. Dans cette nouvelle version du DEM et dans toute la suite de cette étude, on a donc choisi de ne pas redresser le signal dérivé et de traiter séparément et indépendamment la partie positive et la partie négative de ce signal, tant au niveau de l'opération de seuillage qu'au niveau de la mesure du retard.

Par référence à certains travaux portant sur la mouche, la sous-voie traitant de la partie positive est appelée "voie ON" (elle traite les séquences de niveaux de gris de type 0→10) et la sous-voie traitant de la partie négative est appelée "voie OFF" (séquence de niveaux de gris de type 10→0). Chez la mouche, il semble que cette séparation entre la voie ON et la voie OFF existe car on n'a pas réussi par stimulation optique à créer d'interférences entre ces deux types de signaux (cf. Annexe, §.A.3.2.).

La contre-partie technologique de cette amélioration est un dédoublement de tous les circuits à partir de l'opération dérivée temporelle jusqu'à la mesure du retard comprise (cf. Thèse C. Blanes, Chap.III).

Si l'on reprend les 10 configurations de la fig.III.3, on observe qu'avec la séparation des voies ON et OFF, les cas A,B,C, sont maintenant complètement résolus. Par contre, rien n'est changé pour les cas D, E, F, G, H, ainsi que pour le cas I de la mire aléatoire où le nombre de contrastes

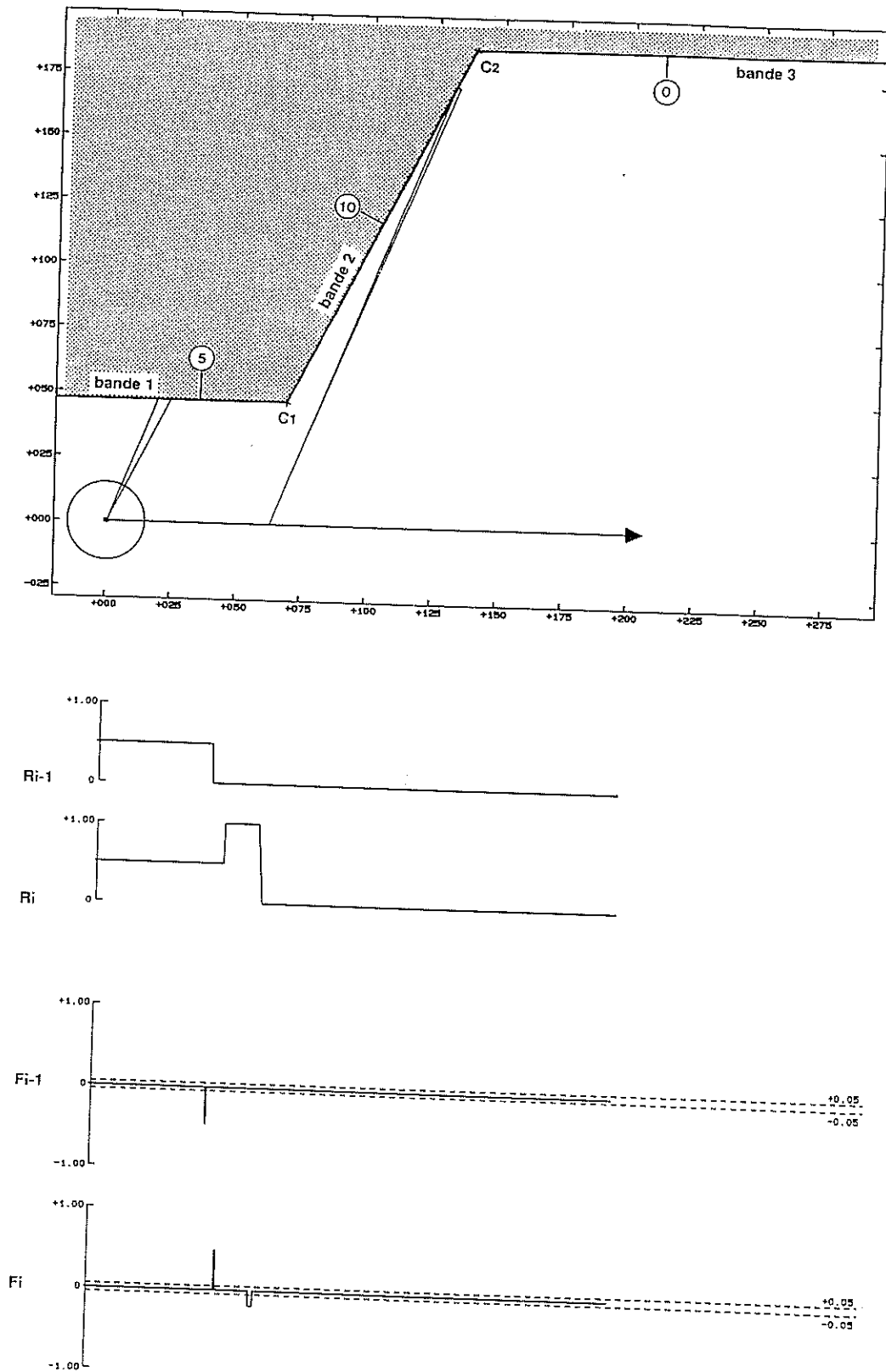


Fig.III.6 Illustration d'un problème de correspondance lié à la fois à un phénomène d'occlusion sur le récepteur $Ri-1$ et à la séparation des voies ON et OFF du détecteur. Le même point de contraste $C1$ induit un pulse négatif sur la voie $Fi-1$ et un pulse positif sur la voie Fi . Du fait de leur polarité contraire, ces deux pulses ne peuvent être corrélés et donc le contraste est perdu.

sous-estimés en distance est le même, bien que l'erreur moyenne soit légèrement plus faible que pour la version de base.

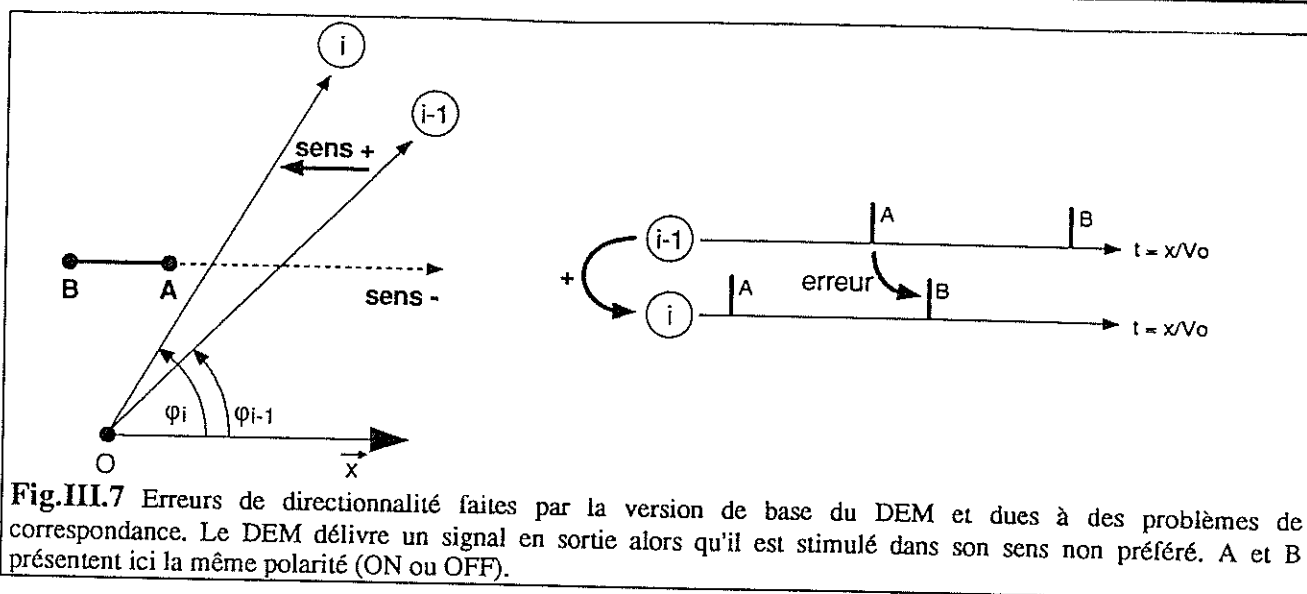
Par contre, la séparation des voies ON et OFF, si elle résout certains des cas de figure cités ci-dessus, génère une nouvelle classe de problèmes de correspondance. Ils sont provoqués par une configuration de l'environnement (fig.III.6) donnant naissance à un phénomène assez général *d'occlusion* sur l'un des deux récepteurs du DEM. Cet exemple illustré à la fig.III.6, est constitué par une séquence de trois bandes d'intensités différentes. Le récepteur Ri-1, au lieu de détecter le premier contraste C1 comme une différence d'intensité entre la Bande 1 et la Bande 2, détecte C1 comme une différence d'intensité entre la Bande 1 et la Bande 3 ; par contre, le récepteur Ri, un peu plus incliné, détecte C1 comme une différence d'intensité entre la Bande 1 et la Bande 2. En conclusion, chacun des récepteurs recueille deux signaux temporels différents (au moins en signe de contraste) alors qu'ils correspondent au même point C1 de l'environnement. De façon générale, cette observation montre que la seule valeur du signal dérivé est un critère limité d'identification des points de contraste. Dans le pire des cas, comme celui illustré à la fig.III.6, les signaux à corrélérer peuvent aller jusqu'à présenter des polarités opposées, ce qui, si les voies ON et OFF sont séparées, conduit à une perte radicale du contraste.

Remarque importante

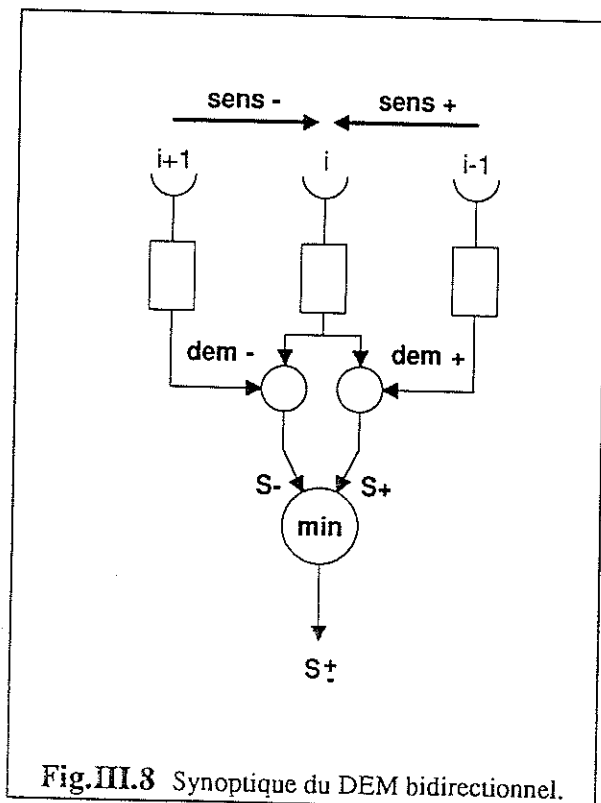
A partir de maintenant on va travailler sur un DEM avec *les voies ON et OFF séparées* bien que, comme on vient de le montrer, il soit difficile d'estimer sans l'aide d'outils statistiques, le rapport entre les avantages et les inconvénients liés à une telle solution. Ce choix revient à considérer deux DEMs complètement indépendants (un DEM-ON et un DEM-OFF), et tous les raisonnements effectués dans la suite vont porter indifféremment sur l'un ou l'autre de ces DEMs. Cela signifie que, à partir de maintenant, lorsqu'on évoquera les interactions entre plusieurs points de contraste (A,B, ...etc) sur une même voie, on supposera implicitement qu'ils présentent tous la *même polarité*.

III.3.2. Principe d'un DEM bidirectionnel

Les simulations Ja et Jb présentée au §.III.2.2. (fig.III.3) montrent que l'une des limitations de la version de base du DEM, est sa *non-directionnalité* puisqu'il délivre une réponse alors qu'il est stimulé dans son sens non préféré. Ce phénomène est détaillé à la fig.III.7 : il relève, là encore, d'un problème de correspondance sur chacun des DEM-ON ou DEM-OFF, et il se produit aussi bien dans le cas d'une mire périodique (cas Jb), que dans le cas plus général basé sur une configuration à deux points de contraste (cas Ja qui illustre d'ailleurs deux contrastes OFF successifs : 10→5 puis 5→0).



En dépit de son architecture asymétrique, la version de base du DEM (même avec la séparation des voies ON/OFF) est incapable de relever l'ambiguïté sur le sens du mouvement des objets détectés. Comme on va le montrer ci-dessous, ce problème trouve une solution simple, si l'on adopte une architecture bidirectionnelle qui, délivre non seulement la valeur mais aussi le signe de la vitesse angulaire des contrastes détectés. Bien que ce ne soit pas l'objectif prioritaire ici, on peut noter que ce DEM présente en plus l'avantage d'être utilisable pour des tâches autres que de la mesure de flux visuel.



La version bidirectionnelle du DEM n°i (fig.III.8) telle qu'on l'envisage ici, comprend en fait deux modules DEMs de base, appelés DEM+ et DEM-, et câblés en sens opposés. Ces deux sous-DEMs possèdent en commun l'axe optique n°i (qui devient donc l'axe central du DEM bidirectionnel), l'autre axe optique du DEM+ étant l'axe n°i-1 et celui du DEM- étant l'axe n°i+1. On notera que le DEM+ correspond à la version de base décrite jusqu'à présent, qui était câblée dans le sens avant-arrière de l'oeil-DEM. Le problème dès lors, est de trouver un opérateur *non linéaire* capable de discriminer lequel du DEM+ ou du DEM- fournit la réponse correcte. Par voie de conséquence il permet d'une part de déterminer le signe correct du mouvement, d'autre part de rejeter les valeurs erronées du module de la vitesse angulaire. C'est la

sortie $S_{\pm}$ de cet opérateur qui constitue en fait, la véritable sortie du DEM bidirectionnel. Si le mouvement est positif (cf. aussi fig.III.9b), on considère que toute réponse S_{-} du DEM- est erronée alors que toute réponse S_{+} du DEM+ est correcte ; inversement si le mouvement est négatif (cf. aussi fig.III.9c) on considère que toute réponse S_{+} du DEM+ est erronée tandis que toute réponse S_{-} du DEM- est correcte. L'opération non linéaire choisie ici et permettant une telle discrimination est la suivante:

- 1 si un seul des deux sous-DEMs est activé (par ex., par le contraste A à la fig.III.9b, ou B à la fig.III.9c), alors c'est la sortie et le signe du sous-DEM activé qui sont pris en compte.

- 2 si les deux sous-DEMs sont activés simultanément (par ex., le contraste B à la fig.III.9b, ou A à la fig.III.9c) alors c'est le *minimum* entre les deux valeurs S_{+} et S_{-} (homogène à un retard temporel) qui est pris en compte et associé au signe du sous-DEM correspondant. Dans le cas réel du prototype (cf. Thèse C. Blanes, Chap.III), les sous-DEMs délivrent en fait des signaux homogènes à $1/\Delta t$, de sorte que l'opération non linéaire à réaliser est une détection de maximum. Cette "détection de max" est ici avantageuse, car elle résout naturellement le premier cas ; en effet lorsqu'un DEM n'est pas activé, il délivre naturellement une valeur nulle sur le module de la vitesse angulaire, et ainsi le choix du max donne automatiquement la préférence au DEM activé dont la sortie est nécessairement positive.

Nous allons voir que cette architecture bidirectionnelle possède, comme pour la version de base (cf. §.III.2.1.) un domaine d'erreur (où l'opération de *détection de minimum* décrite ci-dessus n'est plus valable) et donc un domaine de validité complémentaire (cf. §.III.3.3. ci-dessous) qui définit les limites de son fonctionnement correct. Nous allons montrer également comment on peut "maintenir" le fonctionnement du DEM bidirectionnel dans son domaine de validité en utilisant un filtrage spatio-temporel adéquat.

Notons qu'au niveau de l'architecture, ce modèle s'éloigne du modèle bidirectionnel de Reichardt proposé dans le cadre des travaux sur la mouche (cf. Annexe, §.A.3.1.) et qui ne possède que deux directions optiques. En effet ce dernier combine par sommation, les sorties de deux sous-DEMs de sens opposés qui sont *superposés* et non pas *adjacents* comme ici. Dans le modèle de Reichardt les sorties S_{+} et S_{-} effectivement sommées correspondent à deux voies distinctes et donc à deux directions distinctes dans l'espace ; ainsi lorsqu'un même stimulus est capable d'activer aussi bien le DEM+ et le DEM-, ces activations se produisent généralement de façon séquentielle, et si par hasard elles ont lieu de façon simultanée c'est qu'elles ne sont pas générées par le même point de contraste ; en conséquence le mélange des deux signaux délivrés par chaque sous-DEM ne peut s'effectuer de façon instantanée et nécessite une intégration temporelle. Au contraire, dans le modèle proposé ici, la sortie $S_{\pm}$ du DEM bidirectionnel est activée dès l'instant où un contraste coupe son axe central ; c'est essentiellement cet aspect "traitement instantané du signal" qui a conduit ici à choisir un tel modèle.

III.3.3. Domaine de validité du DEM {bidirectionnel + voies ON/OFF séparées}

III.3.3.a Limite du domaine de validité

La fig.III.9 illustre la problématique du traitement du signal lié au DEM bidirectionnel. L'exemple présenté ici, se veut assez général puisque il traite le cas de deux contrastes A et B qui présentent la même polarité et qui se trouvent à deux distances radiales distinctes DA_i et DB_i du centre O du DEM et mesurées dans la direction i . Ce cas de figure est du même type que les exemples D,E,F de la fig.III.3 (cf. §.III.2.2.). Les mouvements étudiés ici, restent simplifiés dans la mesure où l'on considère qu'ils sont translationnels à vitesse constante, et ne concernent que des objets rigides. On notera par contre que la direction du mouvement peut être quelconque si l'on considère dans les calculs ci-dessous, que la géométrie du DEM (ϕ_{i-1} , ϕ_i , ϕ_{i+1}) est définie non plus par rapport à la direction frontale de l'oeil-DEM, mais directement par rapport à la direction du mouvement de l'objet étudié.

Comme on vient de le souligner, l'opération de détection de minimum sur les retards temporels, n'est valable que si :

- pour un mouvement positif elle donne la préférence à S_+ , ce qui nécessite $S_+ < S_-$
- pour un mouvement négatif elle donne la préférence à S_- , ce qui nécessite $S_- < S_+$

Au niveau des divers signaux temporels présents dans chaque DEM, cette double condition se traduit de la façon suivante :

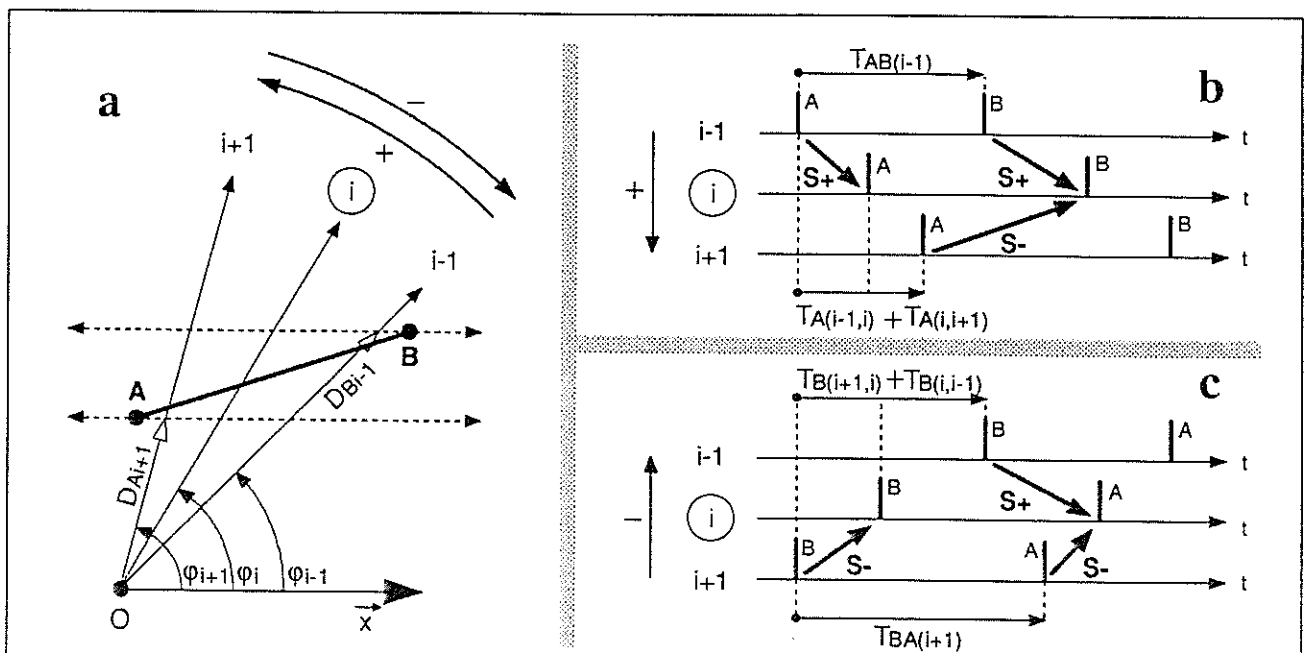


Fig.III.9 Principe du traitement du signal dans la version bidirectionnelle du DEM. (a) Principe géométrique d'une stimulation du DEM par deux contrastes A et B de même polarité et en mouvement dans une direction quelconque. (b) Signaux temporels pour une stimulation positive. (c) Signaux temporels pour une stimulation négative.

- dans le cas d'un mouvement positif (fig.III.9b) :

$$TAB(i-1) + S_+ = TA(i-1, i) + TA(i, i+1) + S_-$$

$$\text{et donc } S_+ < S_- \Leftrightarrow TAB(i-1) > TA(i, i-1) + TA(i, i+1) \quad (\text{éq.III.8})$$

- dans le cas d'un mouvement négatif (fig.III.9c):

$$TBA(i+1) + S_- = TB(i+1, i) + TB(i, i-1) + S_+$$

$$\text{et donc } S_- < S_+ \Leftrightarrow TAB(i+1) > TB(i, i+1) + TB(i, i-1) \quad (\text{éq.III.9})$$

avec (comme cela a déjà été défini au §.III.2.1.) :

- $TAB(i-1)$ et $TBA(i+1)$ représentant l'intervalle temporel qui sépare l'apparition de deux contrastes distincts (ici A et B de même polarité) sur une même voie (précisée à l'intérieur des parenthèses). On notera que $TAB(i) = TBA(i)$.

- $TA(i, i-1)$, $TA(i, i+1)$, $TB(i, i-1)$, $TB(i, i+1)$ représentant le retard temporel qui sépare l'apparition d'un même contraste (ici A ou B) sur deux voies distinctes (précisées à l'intérieur des parenthèses).

Au niveau spatial la double éq.III.8, III.9 se traduit de la manière suivante:

- pour chaque direction i on a :

$$TAB(i) = TBA(i) = AB_{app}(i) / V_o \quad (\text{éq.III.10})$$

$$\text{avec } AB_{app}(i) = AB_x - (DB_i - DA_i) \cdot \cos(\varphi_i) \quad (\text{éq.III.11})$$

et $AB_{app}(i)$: largeur apparente du segment AB vue par le récepteur n° i

AB_x : projection orthogonale, du segment AB sur la direction du mouvement

$DA_i - DB_i$: distance radiale de chaque point de contraste mesurée dans la direction i

- pour le DEM n° i , et pour un contraste quelconque C on a :

$$TC(i, i-1) + TC(i, i+1) = [\Delta x(C, i, i-1) + \Delta x(C, i, i+1)] / V_o \quad (\text{éq.III.12})$$

$$\text{avec } \Delta x(C, i, i-1) + \Delta x(C, i, i+1) = DC_{i-1} \cdot \cos(\varphi_{i-1}) - DC_{i+1} \cdot \cos(\varphi_{i+1}) \quad (\text{éq.III.13})$$

En conséquence, les configurations géométriques qui respectent le domaine de validité (éq.III.8, III.9) du DEM bidirectionnel se définissent de la manière suivante:

$$AB_{app}(i-1) > \Delta x(A, i, i-1) + \Delta x(A, i, i+1) \quad (\text{éq.III.14})$$

$$AB_{app}(i+1) > \Delta x(B, i, i-1) + \Delta x(B, i, i+1) \quad (\text{éq.III.15})$$

ce qui d'après les éq.III.11, III.12 conduit à la simple inégalité suivante :

$$\boxed{AB_x > DB_{i-1} \cdot \cos(\varphi_{i-1}) - DA_{i+1} \cdot \cos(\varphi_{i+1})} \quad (\text{éq.III.16})$$

La double condition que représentent les éq.III.14, III.15 n'est pas sans rappeler le théorème de Shannon qui définit le domaine de validité d'un système à échantillonnage (c'est-à-dire le domaine dans lequel est conservé la totalité de l'information contenue dans le signal), par la relation $\lambda > 2.T_e$; où λ représente la période du signal et T_e la période d'échantillonnage du système. Dans les éq.III.14, III.15, $\Delta x(\dots)$ représente la "période spatiale apparente" du stimulus visuel dans une direction de visée, tandis que $\Delta \phi_i$ avec la direction de mouvement des contrastes, et varie l'intersection de l'angle interommatidial $\Delta \phi_i$ avec la direction de mouvement des contrastes, et varie avec la distance radiale de ces derniers. Par abus de langage on pourrait donc considérer les éq.III.14, III.15 et l'éq.III.16 comme "une condition de Shannon généralisée" pour l'échantillonnage en trois dimensions de l'environnement par l'oeil-DEM (cf. Götz 1964, pour le cas de la mouche).

III.3.3.b Interprétation géométrique de la condition limite

De la même façon qu'au paragraphe précédent, l'éq.III.16 s'interprète simplement, comme le fait que l'écart l'angulaire ($\phi_A - \phi_B$) entre les deux points de contraste mesuré par rapport à O lorsque $\phi_A = \phi_{i+1}$, doit être supérieur à l'angle ($\phi_{i+1} - \phi_{i-1}$) qui est pratiquement égal au double $2.\Delta \phi_i$ de l'angle interommatidial du DEM (fig.III.10).

Divers agencements de contraste associés à la condition limite de validité sont décrits ci-contre (fig.III.10). Cette condition limite est paramétrée par les variables suivantes

- les deux axes extérieurs ϕ_{i-1} et ϕ_{i+1} du DEM.
- la distance radiale de chaque point de contraste.
- la longueur et l'orientation par rapport au DEM, du segment AB formé par deux contrastes successifs.

On notera que l'orientation de l'axe optique central ($n^\circ i$) du DEM n'intervient pas ici.

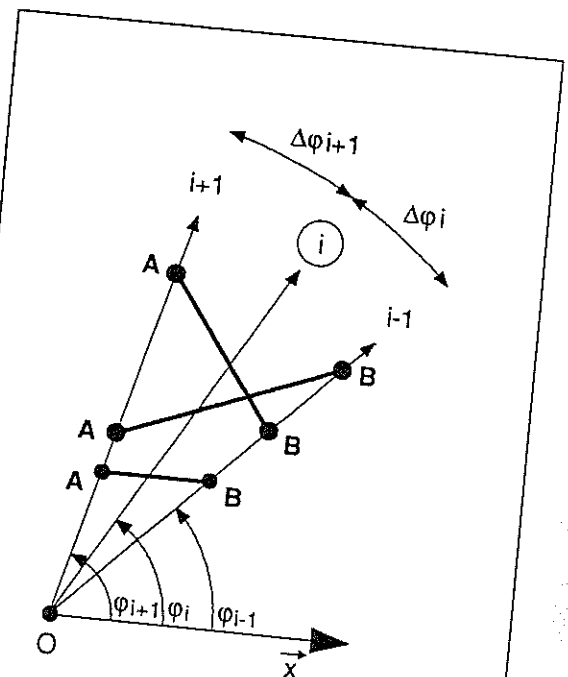


Fig.III.10 Illustration de diverses configurations de l'environnement, définissant la limite du domaine de validité du DEM bidirectionnel. A et B représentent ici des contrastes de même polarité.

III.3.3.c Comparaison avec le domaine de validité de la version de base du DEM

Au §.III.2. nous avons montré que le domaine de validité de chaque sous-DEM (DEM+ ou DEM-) était défini pour des configurations de l'environnement où $(\phi_A - \phi_B) > \Delta \phi_i$ (cf. fig.III.2) ; on constate donc que le domaine de validité du DEM bidirectionnel est contenu dans celui de chaque sous-DEM.

Cette remarque montre que si on arrive à se ramener au domaine de validité du DEM bidirectionnel, on se trouvera à fortiori dans le domaine de validité de chaque sous-DEM et les erreurs de sous-estimations décrites au §.III.2.2. seront éliminées.

III.3.3.d Domaine de validité pour une mire périodique, plane, et parallèle au mouvement

Le cas d'une mire périodique a déjà été illustrée dans les quatre derniers exemples (G,H,I et Jb) présentés à la fig.III.3 (cf. §.III.2.2.) et dans la suite il va servir de cas d'école pour formaliser le filtrage spatio-temporel présent dans chaque DEM (cf. §.III.3.4.).

Une mire plane et parallèle au mouvement se caractérise par la position latérale y_{mire} identique pour tous ses contrastes ; on obtient les simplifications suivantes:

- $AB_x = AB$
- $DA_{i+1} = y_{mire} / \sin(\varphi_i + 1)$
- $DB_{i-1} = y_{mire} / \sin(\varphi_i - 1)$

dans un tel cas l'éq.III.15 se traduit sous la forme :

$$AB > y_{mire} \cdot [\cotg(\varphi_i - 1) - \cotg(\varphi_i + 1)] \quad (\text{éq.III.17})$$

On peut rappeler que dans l'éq.III.17, A et B représentent deux contrastes successifs de même polarité (c'est-à-dire soit deux ON, soit deux OFF). Par conséquent pour étendre l'éq.III.17 au cas d'une mire est périodique de fréquence spatiale ν_s il suffit de remplacer la valeur AB par $1/\nu_s$. Dans ce cas l'éq.III.17 s'interprète comme une limitation par valeur supérieure de la fréquence spatiale de la mire:

$$\boxed{\nu_s < \nu_{slim}(i, y_{mire})} \quad (\text{éq.III.18})$$

$$\text{avec } \nu_{slim}(i, y_{mire}) = 1 / (y_{mire} \cdot [\cotg(\varphi_i - 1) - \cotg(\varphi_i + 1)]) \quad (\text{éq.III.19})$$

ce qui dans le domaine temporel ($\nu_t = V_o \cdot \nu_s$), se traduit également par une limitation haute des fréquences temporelles :

$$\boxed{\nu_t < \nu_{tlim}(i, y_{mire})} \quad (\text{éq.III.20})$$

$$\text{avec } \nu_{tlim} = V_o \cdot \nu_{slim} = V_o / (y_{mire} [\cotg(\varphi_i - 1) - \cotg(\varphi_i + 1)]) \quad (\text{éq.III.21})$$

La fig.III.11 illustre la variation du domaine de validité du DEM avec la position latérale de la mire périodique. Dans cet exemple le DEM a comme dans les simulations précédentes, une orientation de $\varphi_i = 68^\circ$. La fréquence spatiale ν_s de la mire correspond à la fréquence limite $\nu_{slim}(68^\circ, 46.4\text{cm})$; la valeur $y_{lim} = 46,4 = 50 \cdot \sin(68^\circ)$, correspond à la distance radiale $D_{lim} = 50\text{cm}$ prise dans toute cette étude comme rayon référence $D_{lim} = R_v$ pour définir le cercle de vision du robot (cf. §.III.1.3., Chap.IV et Chap.V).

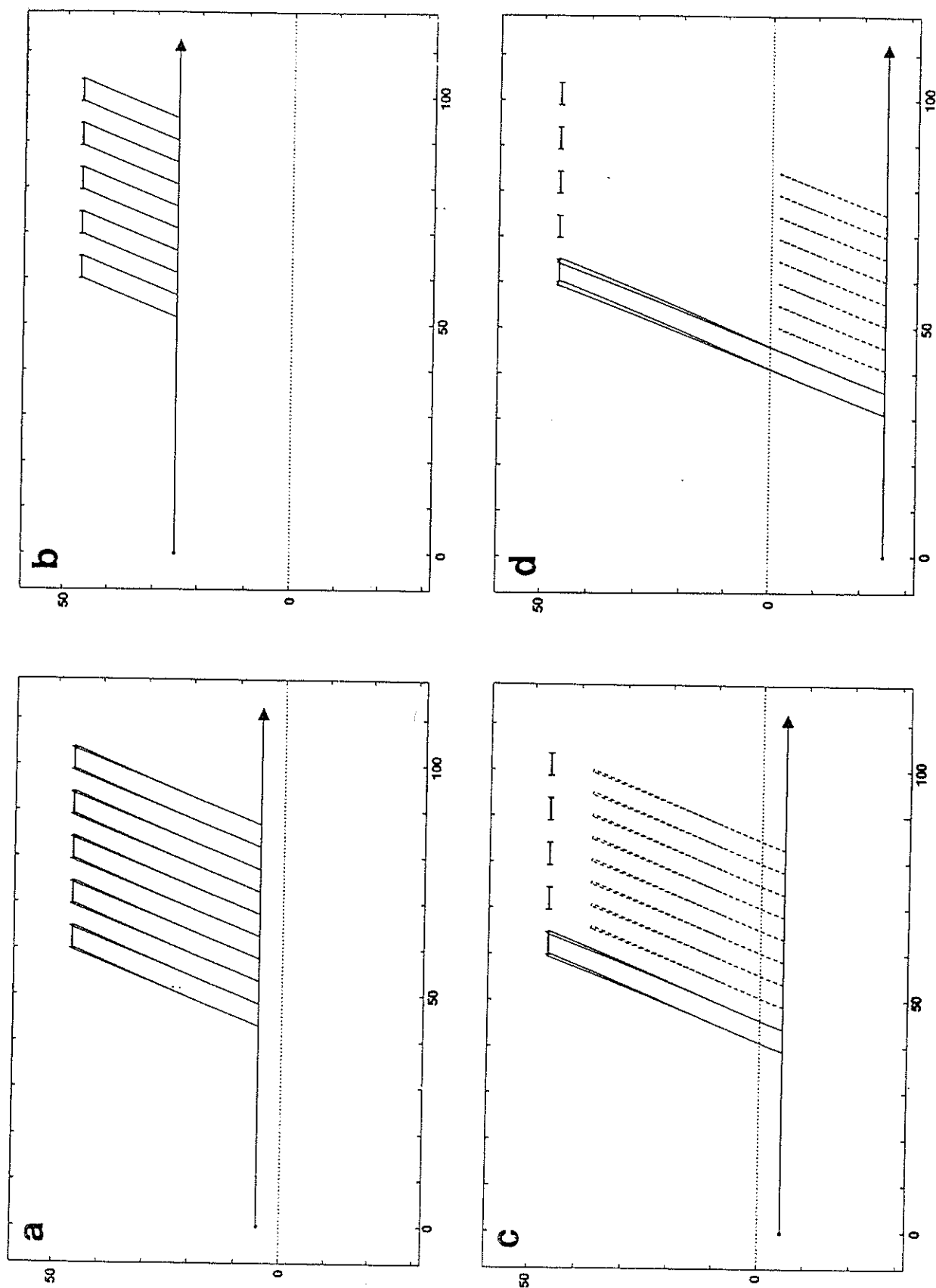


Fig.III.11 Exemples de simulation illustrant la relation entre le domaine de validité du DEM bidirectionnel et la distance radiale de la mire. Le DEM bidirectionnel simulé est orienté à 68° et la fréquence spatiale de la mire est calculée ici pour que la fréquence limite du DEM apparaisse à la distance radiale $D=50\text{cm}$. Pour cette mire, le fonctionnement du DEM n'est valide qu'en deçà de 50cm. Au delà de 50cm le DEM bidirectionnel délivre des réponses négatives (traits en pointillés) qui sont donc erronées.

Lorsque $y_{mire} < y_{lim}$ (cas a,b à la fig.III.11) on constate que le DEM ne fait aucune erreur de mesure ni sur le module, ni sur le sens du mouvement, et qu'il se trouve donc dans son domaine de validité. Cela n'est plus vrai, dans le cas contraire où $y_{mire} > y_{lim}$ (cas c,d à la fig.III.11) ; dans ce cas on observe dans la partie périodique de la mire, un ensemble d'erreurs concernant aussi bien l'estimation du module que le sens du mouvement.

III.3.4. Ajustement du filtrage+seuillage : formalisme pour une mire périodique

III.3.4.a Rôle et principe de l'ajustement du filtrage+seuillage

On vient de caractériser le domaine de validité du DEM tant au niveau temporel (cf. éq.III.8, éq.III.20) qu'au niveau géométrique (cf. éq.III.16, éq.III.18, fig.III.10). On va montrer maintenant comment on peut, en ajustant le filtrage+seuillage présent sur chaque voie d'entrée du DEM, ramener ce dernier à son domaine de validité temporelle, ce qui revient à éliminer en sortie du seuillage tous les trains d'impulsions incompatibles avec l'opération de "détection de minimum". La contrepartie d'un tel filtrage est évidemment une perte d'information qui se traduit par la non-détection d'un certain nombre de points de contrastes. L'effet de cette perte de points de contraste sera analysée au §.III.3.5.

On considère (fig.III.12) que le filtrage:

- concerne toute la chaîne de traitement du signal avant la mesure du retard.
- qu'il est identique sur chacune des voies.
- qu'il est paramétré par l'ensemble {opération d'intégration liée à la géométrie optique de l'ommatidie + opération de différentiation (spatiale ou temporelle) + opération de seuillage à hystérésis}.

On peut noter, que dans le cas d'une différentielle temporelle, la partie linéaire du filtrage ne dépend pas de l'angle interommatidial $\Delta\phi_i$ contrairement au cas d'une différentielle spatiale où chaque voie agit latéralement sur sa voisine (flèches blanches à la fig.III.12) avant la mesure proprement dite du retard.

L'étude d'un tel filtrage est difficile à formaliser dans le cas d'un environnement quelconque dont le paramétrage est complexe (n points de contraste, donc $2n$ coordonnées polaires, n^2 couples de contraste (A,B), x occlusions etc ...). Cette formalisation ne sera faite ici que dans le cas simplifié d'une mire plane, périodique, et

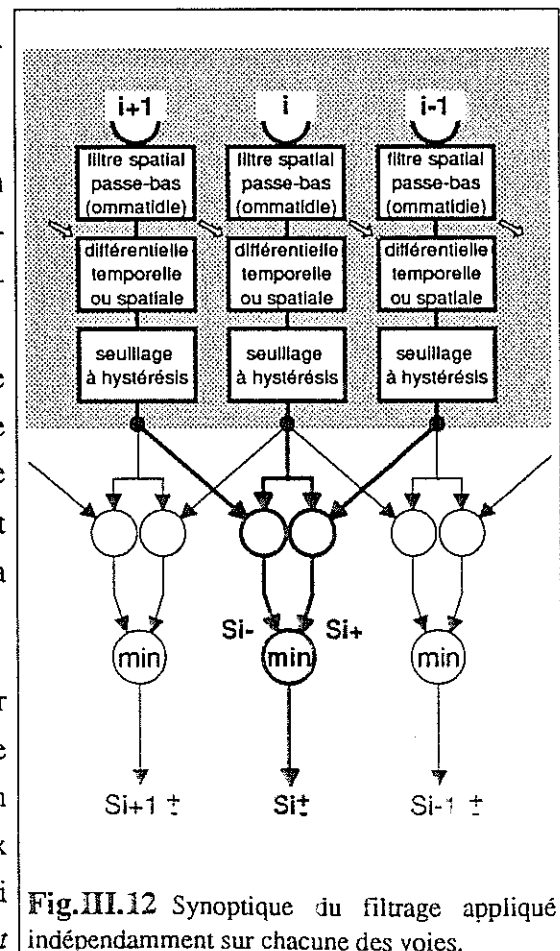


Fig.III.12 Synoptique du filtrage appliqué indépendamment sur chacune des voies.

parallèle au mouvement. Les solutions ébauchées dans le cadre de cette formalisation seront ensuite testées en simulation, d'une part sur les exemples d'écoles A à J définis précédemment (cf. §.III.3.5.), d'autre part dans le cadre plus général de la navigation du robot (cf. Chap.V).

Le domaine de validité spatial et temporel d'une mire périodique a été décrit au paragraphe précédent. L'éq.III.20, montre que le fait de ramener le DEM dans son domaine de validité temporel impose une limitation de la fréquence temporelle ν_t des impulsions délivrées par le système de seuillage sur chaque voie. Une propriété intéressante liée à cette limitation en fréquence est qu'elle est caractérisée par une fréquence de coupure ν_{lim} *variable* (en fait inversement proportionnelle) avec la position latérale y_{mire} , du stimulus.

La présence du système de seuillage à hystérésis permet de concevoir un filtre non linéaire conduisant à une réjection totale de la bande haute fréquence à éliminer. Pour ce faire il faut que le filtrage précédant le seuillage, soit du type *passé-bande* (dans la version de base il était assimilé à un dérivateur pur et ne coupait donc pas les fréquences hautes). Trois classes de solutions sont envisageables pour la construction d'un tel filtre *passé-bande* :

- 1 une solution purement spatiale : {passé-bas spatial + différentielle spatiale}
- 2 une solution spatio-temporelle avec deux possibilités: a) {passé-bas spatial + différentielle temporelle} et b) {différentielle spatiale + passé-bas temporel}
- 3 une solution purement temporelle {passé-bas temporel + différentielle temporelle}

La structure de base du DEM jusqu'à présent décrite possède déjà un filtrage *passé-bas* (dû à la largeur finie du champ de l'ommatidie) et une différentielle temporelle. Dans la suite, et pour respecter cette structure, seule la solution spatio-temporelle 2a sera détaillée. La solution 1 *purement spatiale*, et la solution 3 *purement temporelle*, seront quant à elles simplement abordées dans le cadre d'une comparaison théorique de performances.

III.3.4.b. Cas simple d'un DEM perpendiculaire au mouvement

L'étude spectrale présentée dans ce paragraphe, porte sur le cas simple d'un DEM perpendiculaire au mouvement ($\phi_i = 90^\circ$). Ce choix permet de s'affranchir dans un premier temps des distorsions qui apparaissent sur le signal récepteur lorsque l'angle ϕ_i entre son axe optique et la direction du mouvement devient faible. Dans un tel cas la distance radiale D_{mire} et la distance latérale y_{mire} de la mire sont égales.

La fig.III.13 montre une série de courbes de transfert du contraste en fonction de la fréquence temporelle générée par le mouvement de la mire périodique. Ces courbes expriment l'amplitude du signal au bout de la chaîne de filtrage, c'est-à-dire juste avant l'opération de seuillage et ceci, pour le filtrage spatio-temporel de type 2a et pour un recouvrement angulaire fixé (ici $\Delta\phi_i / \Delta\phi_i = 1,25$). Les courbes présentées ont été obtenues dans les conditions suivantes :

- les réponses sont générées d'une part par des mires périodiques carrées (courbes en traits pleins), et d'autre part par des mires sinusoïdale (courbes en pointillés).
- l'amplitude maximale des signaux portée en ordonnée, correspond à un régime permanent obtenu pour une valeur de contraste maximum (à savoir 0→10 dans le cadre de notre simulation).
- les courbes sont paramétrées par la distance radiale D_{mire} des mires ; ici 3 distances ont été étudiées : D_{norm} , $2.D_{\text{norm}}$ et $4.D_{\text{norm}}$. Rappelons que D_{norm} est, par définition (cf. §.II.4.3.), la distance radiale pour laquelle le signal filtré est normalisé. Ici D_{norm} coïncide également avec la valeur $R_v=50\text{cm}$, du rayon de sécurité (cf. §.III.1.3.) et représente la *limite* en dessous de laquelle la distance peut être sous-estimée sans que cela provoque de "cas grave de sous-estimation".

On peut noter que les courbes en traits pleins illustrent les *amplitudes maximales* envisageables pour le signal en sortie du filtrage alors que les courbes en pointillé construites sur la base de mires sinusoïdales peuvent être interprétées comme la *fonction de transfert* du filtre (transformée de Fourier de sa réponse impulsionnelle).

Ces représentations illustrent la stratégie adoptée pour ajuster la valeur du seuil haut H_h du système de seuillage dans le but d'éliminer les différentes bandes de fréquences situées en dehors du domaine de validité temporelle du DEM. Comme on l'a déjà souligné, les largeurs de ces bandes de fréquence varient avec la distance radiale de la mire, et à la fig.III.13 elles sont illustrées par $[\nu_{\text{lim}}(D_{\text{norm}}) \rightarrow \infty]$, $[\nu_{\text{lim}}(2D_{\text{norm}}) \rightarrow \infty]$ et $[\nu_{\text{lim}}(4D_{\text{norm}}) \rightarrow \infty]$ avec $\nu_{\text{lim}}(kD_{\text{norm}}) = \nu_{\text{lim}}(D_{\text{norm}}) / k$.

Les deux formes de sensibilité angulaire qui sont analysées ici correspondent d'une part à une sensibilité angulaire de forme carrée (fig.III.13a), d'autre part à une sensibilité de forme gaussienne (fig.III.13b). La fig.III.13a montre qu'avec une sensibilité angulaire carrée, la partie linéaire du filtre spatio-temporel ne se comporte pas comme un passe-bande et donc que quelle que soit la distance radiale, il est impossible de définir une valeur de seuil H_h permettant de rejeter les bandes de fréquences indésirables. La fig.III.13b montre que cela devient possible avec une sensibilité gaussienne. Dans ce cas, le réglage du seuil H_h minimum, s'effectue:

- 1 sur la base des réponses aux mires périodiques carrées puisqu'elles sont susceptibles de générer des signaux d'amplitude maximum.
- 2 en rapport avec la fréquence de coupure ν_{lim} la plus haute, en l'occurrence celle qui correspond à la distance radiale minimale D_{norm} au delà de laquelle on désire systématiquement éliminer les problèmes de correspondance.

Les bandes de fréquence associées aux distances radiales ($D_{\text{mire}} = k.D_{\text{norm}}$), supérieures à D_{norm} sont automatiquement rejetées par $H_h(D_{\text{norm}})$ puisque comme le montre l'éq.III.22 ci-dessous, dans ce cas le seuil minimum $H_h(kD_{\text{norm}})$ nécessaire est inférieur à $H_h(D_{\text{norm}})$:

$$H_h(kD_{\text{norm}}) = H_h(D_{\text{norm}}) / k \quad (\text{éq.III.22})$$

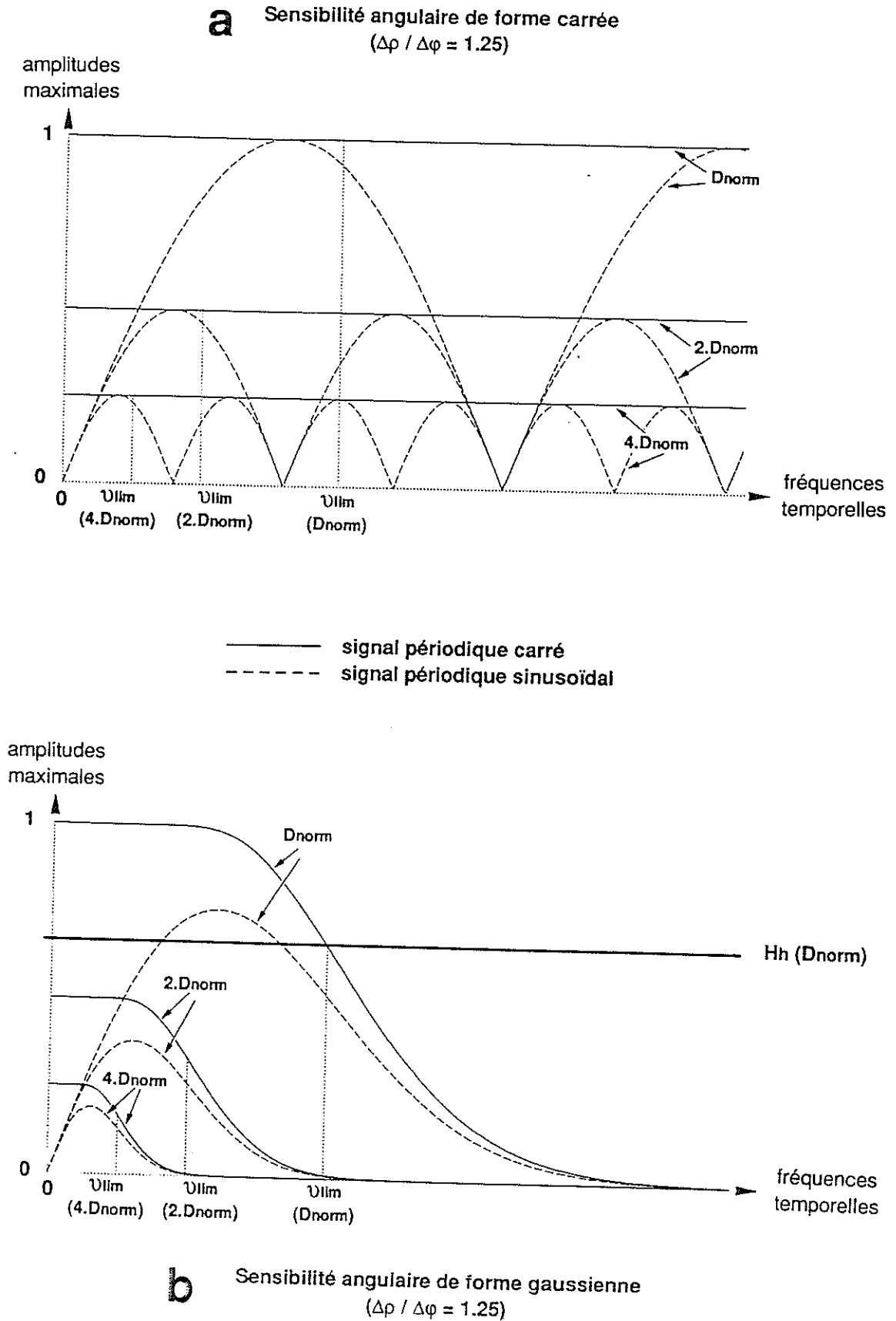
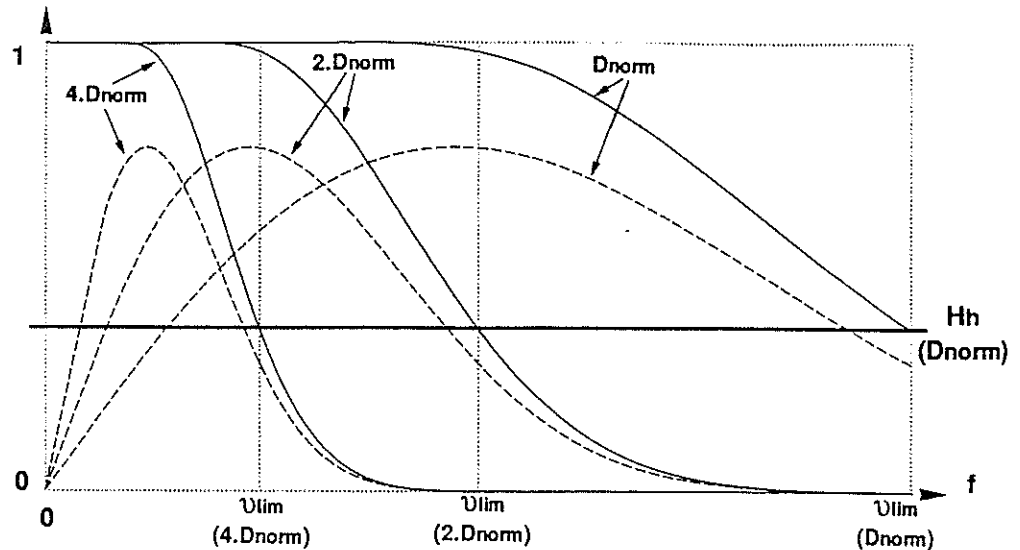


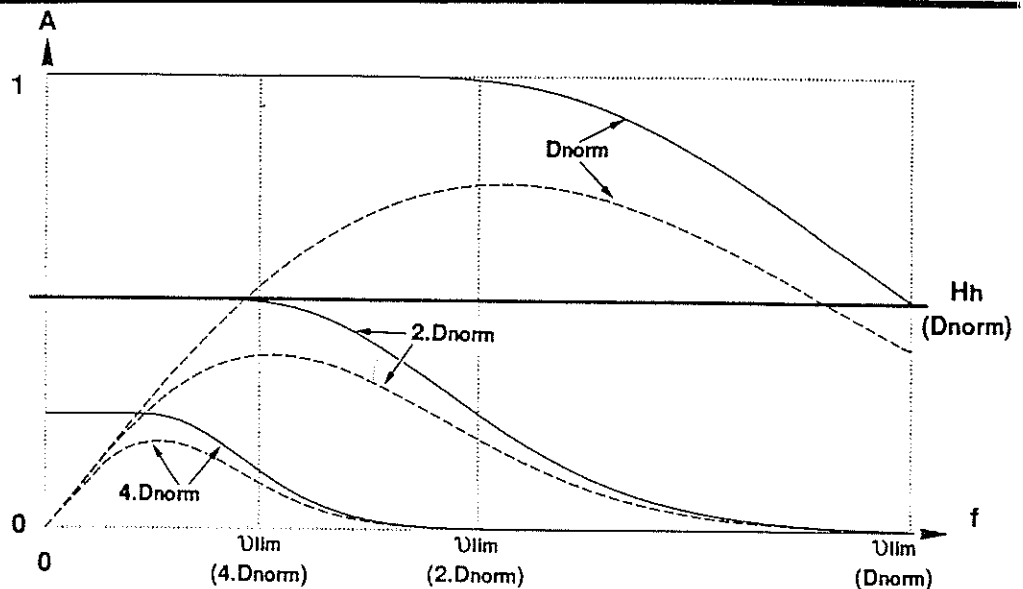
Fig.III.13 Caractéristiques du filtrage spatio-temporel : courbes de réponses amplitude-fréquence caractérisant l'amplitude du signal juste avant seuillage en réponse à des mires périodiques carrées (traits pleins) ou sinusoïdales (traits pointillés). Dans chaque diagramme les courbes sont paramétrées selon la distance radiale de la mire. (a) Sensibilité angulaire de forme carrée. (b) Sensibilité angulaire de forme gaussienne.

a

Solution
purement spatiale
($\Delta\rho / \Delta\varphi = 1.4$)

**b**

Solution
spatio-temporelle
($\Delta\rho / \Delta\varphi = 1.4$)

**c**

Solution
purement temporelle
($\Delta\rho / \Delta\varphi = 1.4$)

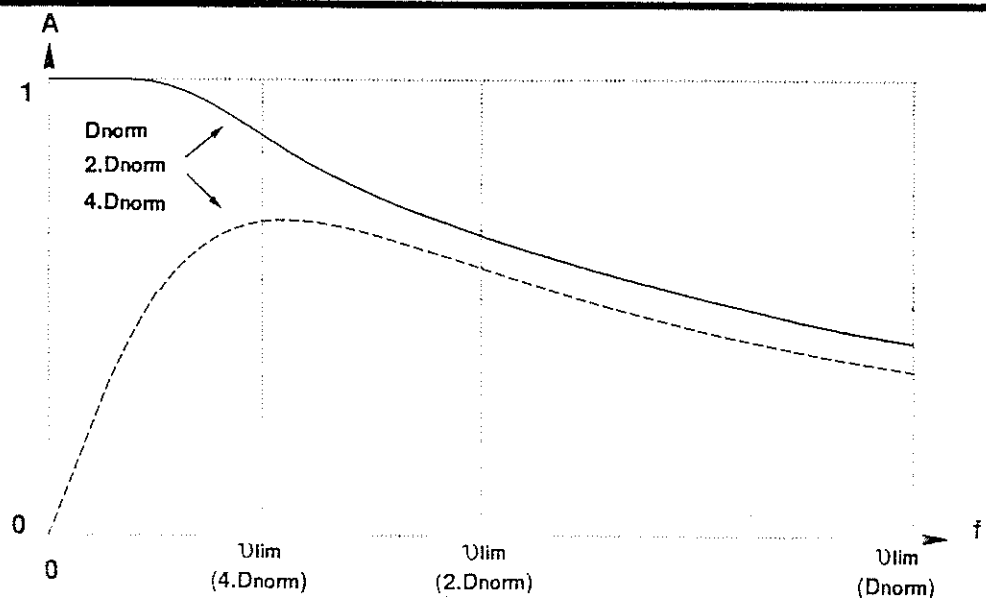


Fig.III.14 Comparaison entre les diagrammes amplitude-fréquence obtenus pour trois classes de filtrage (a) solution purement spatiale avec différentielle spatiale du premier ordre (b) solution spatio-temporelle avec dérivateur temporel pur (c) exemple d'une solution temporelle pure avec un angle d'acceptance ponctuel et une fonction de transfert de type $H(p) = p / (1 + \tau p)^2$.

Cette remarque, qui n'est valable que pour la solution spatio-temporelle, signifie que pour les distances radiales supérieures à D_{norm} , le seuil unique $H_h(D_{norm})$, élimine des bandes de fréquences largement supérieures à celles définies par le domaine de validité du DEM. La conséquence est une perte d'information, d'autant plus importante que la distance radiale des points de contraste est grande. D'ailleurs, comme on l'a déjà remarqué en conclusion du Chap.II (cf. §.II.4.5.b.) pour la solution spatio-temporelle, il existe une distance limite $D_{max} = D_{norm} / H_h$ à partir de laquelle tout signal est complètement éliminé par l'opération de seuillage et ceci, quelle que soit la fréquence et la valeur de contraste du stimulus.

En ce qui concerne ce dernier problème, la fig.III.14 présente une brève comparaison entre la solution spatio-temporelle et les autres classes de solutions évoquées au début de ce paragraphe.

- la fig.III.14a correspond à une solution purement spatiale (avec une différentielle spatiale du premier ordre du type $F_i = R_i - R_{i+1}$)
- la fig.III.14b correspond à la solution spatio-temporelle étudiée jusqu'ici (fig.III.13b)
- la fig.III.14c illustre un exemple de solution purement temporelle associée à un angle d'acceptance extrêmement faible ; ici la fonction de transfert du filtre temporel a été arbitrairement choisie de la forme $H(p) = p/(1+\tau p)^2$ (dans le domaine de Laplace).

Si on observe la façon dont les courbes amplitude-fréquence varient avec la distance radiale D_{mire} de chaque mire, on constate que :

- la solution 1 (spatiale) obéit à une simple homothétie selon l'axe des fréquences : (multiplication par D_{norm} / D_{mire})
- la solution 2 (spatio-temporelle) obéit à une double homothétie en amplitude et en fréquence (dans les deux cas, multiplication par D_{norm} / D_{mire})
- la solution 3 (purement temporelle) est invariante avec la position radiale de la mire.

Cette étude comparative amène les observations suivantes :

- une solution purement temporelle n'est pas envisageable, car elle ne conduit à aucune valeur du seuil acceptable permettant d'assurer le domaine de validité pour toute distance radiale (la seule valeur possible étant $H_h=1$)
- la solution purement spatiale, du fait de l'invariance avec la distance de l'amplitude de son diagramme spectral, est celle qui présente le meilleur "rendement" ; cela signifie que c'est le système filtrage+seuillage qui minimise le plus la perte d'information et notamment la perte des points de contraste les plus éloignés. Toutefois si l'on considère la tâche optomotrice globale du robot, ce n'est pas forcément là un avantage.

Il semble cependant prématuré de conclure sur l'efficacité de telle ou telle solution à partir des diagrammes ci-dessus car ils traitent d'un cas qui reste très particulier à savoir une mire périodique et parallèle au mouvement, et perpendiculaire au DEM. Notons simplement que pour ce cas, les

deux solutions respectent chacune le cahier des charges défini au début de ce chapitre (cf. §.III.1.3.) qui est, pour un DEM, de déterminer en priorité si un point de contraste se situe ou non à l'intérieur d'un périmètre de sécurité (ici caractérisé par D_{norm}).

III.3.4.c. Généralisation de l'ajustement filtrage+seuillage à un DEM quelconque

On vient de montrer qu'avec une sensibilité angulaire gaussienne, il est possible d'ajuster sur chacune des voies l'ensemble filtrage+seuillage de façon à ramener le DEM bidirectionnel dans son domaine de validité temporelle. A cet ajustement correspond un ensemble de solutions possibles, chacune d'entre elles étant caractérisée par le couple $\{ \Delta\phi_i / \Delta\phi_i \text{ et } H_h(D_{norm}) \}$ avec :

- $\Delta\phi_i / \Delta\phi_i$ = rapport entre l'angle d'acceptance et l'angle interommatidial.
- $H_h(D_{norm})$ = valeur minimum du signal à hystérésis qui lui est associée.

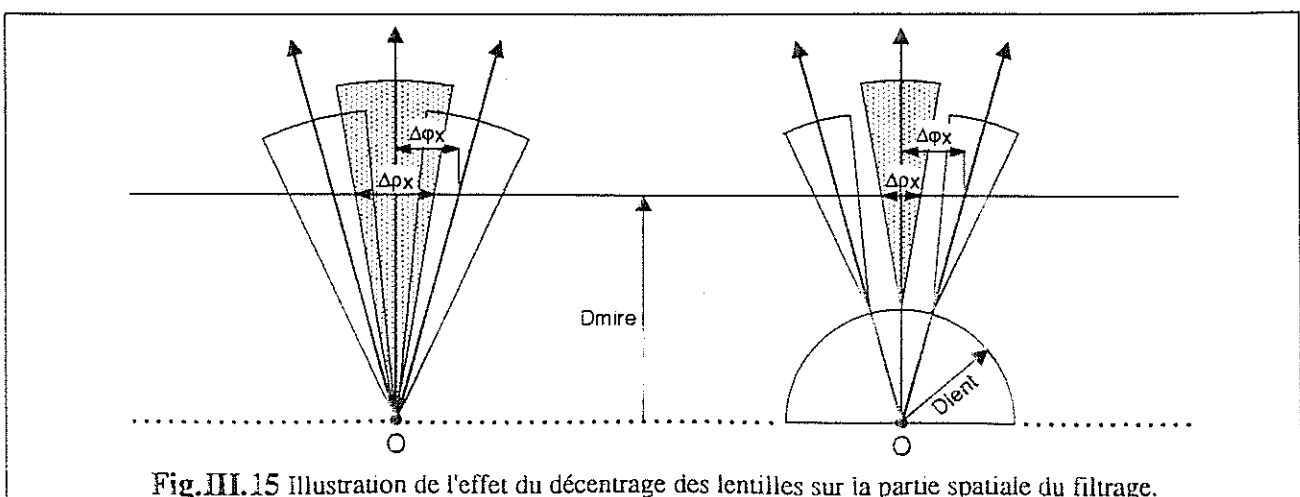
Ce principe reste valable pour un DEM *quelconque*, c'est à dire :

généralisation 1 : un DEM dont le centre des lentilles (qui définit en fait le sommet de l'angle d'acceptance d'une ommatidie) se trouve sur le périmètre physique du robot et donc n'est pas confondu avec le centre du DEM (fig.III.15).

Avec une lentille centrée ($l_x=0, l_y=0$), cas correspondant à l'étude spectrale précédente, le recouvrement linéaire $\Delta\rho_x(D_{mire}) / \Delta\phi_x(D_{mire})$ à une distance donnée D_{mire} (fig.III.15), est égal au recouvrement angulaire $\Delta\phi_i / \Delta\phi_i$ et donc invariant avec la distance radiale des contrastes. Avec une lentille décentrée radialement ($D_{lent} = (l_x^2 + l_y^2)^{1/2}$) ce recouvrement linéaire n'est plus invariant et augmente maintenant avec la distance radiale D_{mire} ; il est nul pour $D_{mire} = D_{lent}$ et prend la valeur du recouvrement angulaire $\Delta\phi_i / \Delta\phi_i$ pour D_{mire} tendant vers l'infini. La variation du recouvrement linéaire est donc surtout effective pour des distances proches de D_{lent} .

$$\Delta\rho_x(D_{mire}) / \Delta\phi_x(D_{mire}) = (D_{mire} - D_{lent}) / D_{mire} \cdot \Delta\phi_i / \Delta\phi_i \quad (\text{éq.III.23})$$

Ce décentrage provoque une augmentation avec la distance du rapport entre la fréquence ν_{slim} , qui limite la validité du DEM, et la fréquence de coupure de la partie passe-bas du filtrage. Ceci



signifie que le filtrage passe-bas est d'autant plus efficace que le stimulus est plus éloigné, propriété avantageuse dans le cadre de ce projet où la priorité est donnée aux contrastes les plus proches.

généralisation 2 : un DEM dont les axes optiques font un angle quelconque avec la direction du mouvement du stimulus (fig.III.16). Cette généralisation a deux conséquences (étudiées plus en détail au Chap.IV, §.IV.4.2.b) :

- d'une part elle provoque sur chacun des 3 récepteurs du DEM, une distorsion spatio-temporelle du signal qui est d'autant plus importante que l'angle polaire φ_i de l'ommatidie est faible. Cette distorsion provient du fait que le cône d'acceptance de chaque ommatidie n'est pas coupé perpendiculairement à son axe par le stimulus et donc n'est pas balayé à une vitesse angulaire constante (réponse impulsionnelle asymétrique)

- d'autre part on observe une différence d'amplitude non négligeable sur chacune des trois voies du DEM alors que celui-ci est balayé par un même stimulus. Ce phénomène est lié au principe de calibration (en fait un contrôle de gain) du signal sur chacune des voies du DEM. On peut rappeler (cf. §.II.4.3.) que cette calibration est propre à chacune des voies et est indépendante du DEM qu'elle alimente ; elle consiste à appareiller en amplitude toutes les voies entre elles sur la base d'un ensemble de stimulus situés à une même distance radiale D_{norm} . Or dans le cas présent, lorsqu'un même stimulus situé à une distance latérale y_{mire} donnée, balaye le DEM dans sa totalité, il active chaque voie du DEM à des distances radiales distinctes (respectivement $y_{\text{mire}}.\sin(\varphi_{i-1})$, $y_{\text{mire}}.\sin(\varphi_i)$, $y_{\text{mire}}.\sin(\varphi_{i+1})$) et par conséquent il induit des signaux d'amplitudes différentes. Cette différence d'amplitude est d'autant plus importante (cf. §.IV.4.2.b) que :

- l'angle φ_i entre le DEM et la direction du mouvement est faible

- l'angle interommatidial $\Delta\varphi_i$ est grand (hypothèse de basse résolution)

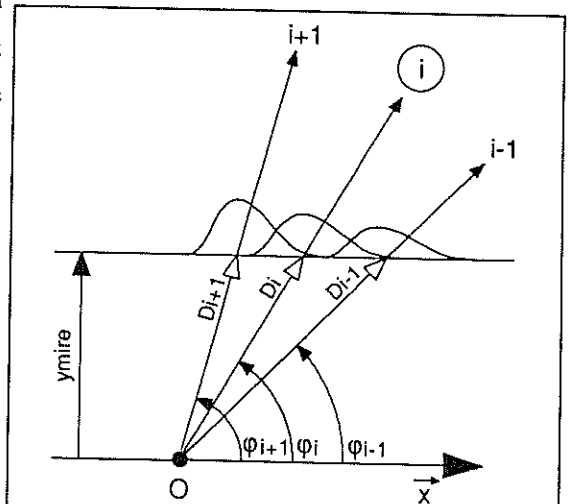
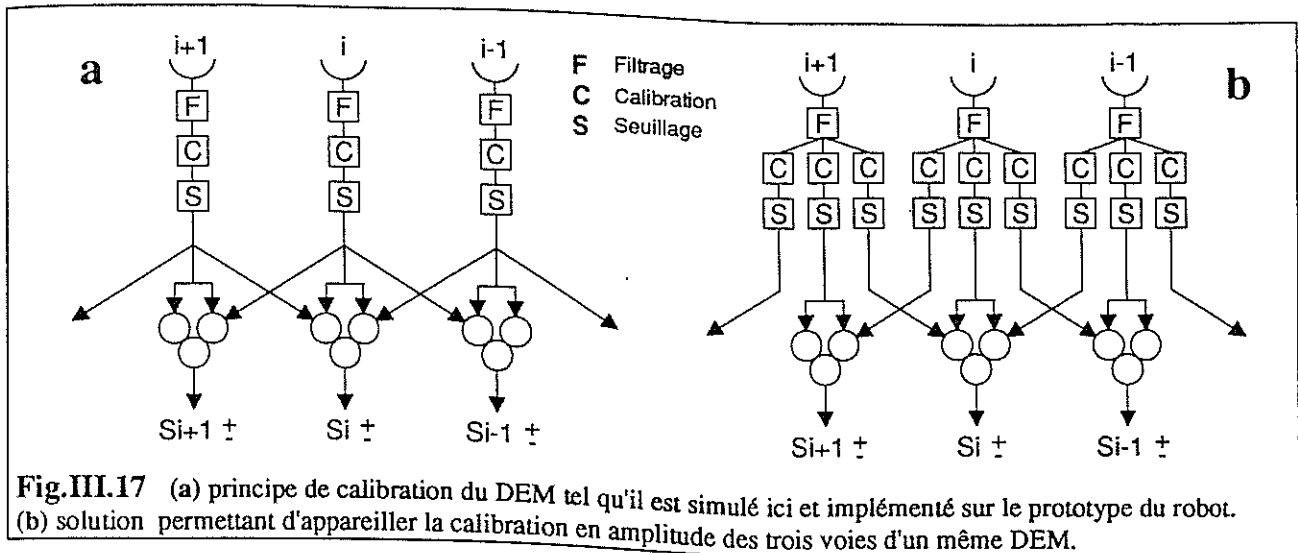


Fig.III.16 Schématisation des réponses impulsionnelles des trois voies d'un DEM présentant une orientation quelconque par rapport à la direction du mouvement.

Une solution pour palier à cet inconvénient est illustrée à la fig.III.17. Elle consiste à tripler le système de calibration sur chacune des voies, et ajuster le gain en fonction du DEM alimenté. Cette solution n'a pas été retenue dans le cadre du prototype, essentiellement pour des raisons de coût ; elle aurait conduit notamment à tripler le nombre de modules de seuillage à hystérésis. Cette solution n'est donc pas simulée dans la suite. D'autre part, cette amélioration n'a de sens que dans le cas d'un environnement statique (où la direction du mouvement est prédéterminée), et perd de son intérêt dans une généralisation à un environnement dynamique (où l'angle entre le mouvement et le DEM est indéterminé).



III.3.4.d. Choix d'un couple recouvrement-seuil

La fig.III.18 illustre l'évolution de l'amplitude maximale du signal avant seuillage et donc du seuil minimum à ajuster, en fonction du recouvrement angulaire du DEM étudié ; dans cet exemple $\phi_i = 68^\circ$ et $\Delta\phi_i = 5,1^\circ$ et le stimulus correspond à la mire périodique carrée utilisée au paragraphe précédent (§.III.3.3.) pour calculer la valeur minimale du seuil $H_h(D_{norm})$ à la distance D_{norm} .

Les résultats présentés à la fig.III.18 ont été obtenus à partir de 120 simulations élémentaires, semblables à celles de la fig.III.19a, chacune d'elles étant paramétrée par un recouvrement angulaire différent. L'amplitude maximale du signal avant seuillage, reportée dans les diagrammes, ne concerne que la partie où le régime périodique est stabilisé (et donc équivalent à un régime permanent).

Les deux types essentiels de filtrage évoqués précédemment ont été étudiés ici : le premier (fig.III.18a) correspond à la solution spatio-temporelle et le second (fig.III.18b) à la solution purement spatiale.

Dans chacun des diagrammes, deux types de DEM sont illustrés :

- l'un correspond au cas théorique (courbes en pointillés) où les lentilles ne sont pas décentrées.
- l'autre correspond au cas pratique (courbes en traits pleins) où les lentilles sont décentrées de 15 cm (cette valeur correspond au rayon physique R_o du robot).

Enfin et pour chaque cas de figure, sont représentées les réponses simultanées des 3 voies du DEM étudié. Ceci permet notamment d'illustrer la différence évoquée ci-dessus, entre les amplitudes recueillies sur chacune des voies du DEM alors qu'il est stimulé par une même mire périodique. Ces diagrammes récapitulent l'ensemble des possibilités quant au choix d'un couple $[H_h(D_{norm}), \Delta\phi_i / \Delta\phi_i]$, caractérisant le filtrage local optimum pour ce DEM. Les résultats présentés

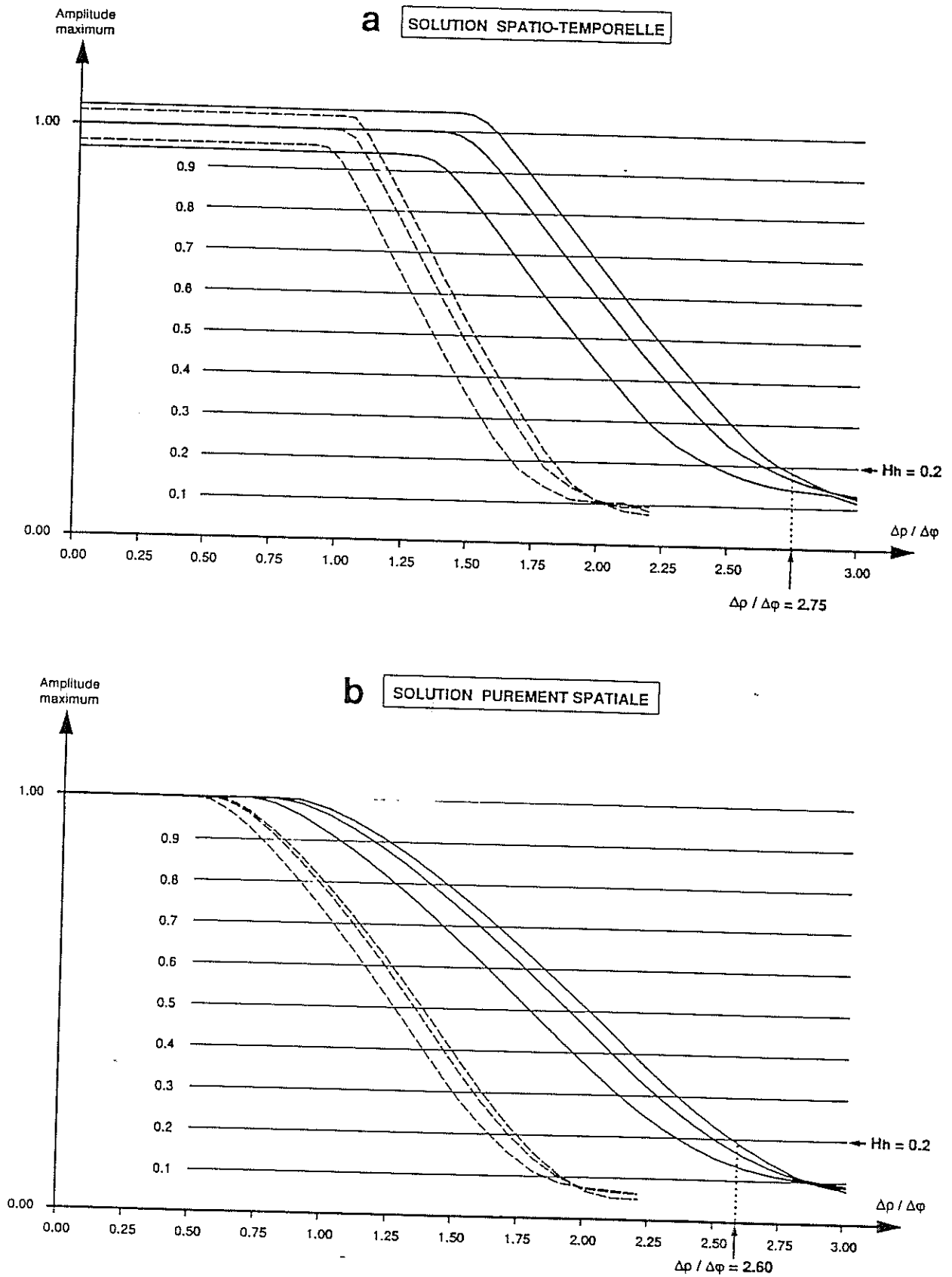


Fig.III.18 Evolution de la valeur de transfert de contraste en fonction du recouvrement du DEM ($\phi_i=68^\circ$ et $\Delta\phi_i=5,1^\circ$) permettant de choisir la valeur Hh du seuil. En pointillés : DEM avec des lentilles centrées. En trait plein : DEM avec des lentilles décentrées de 15 cm. Chaque cas de figure illustre l'amplitude maximum du signal périodique mesurée simultanément sur les 3 voies d'entrée du DEM en réponse à la mire périodique limite pour la distance D_{norm} .

ici ne dépendent pas de la résolution angulaire du DEM qui, dans cet exemple, est caractérisée par $\Delta\phi(68^\circ)=5.13^\circ$. La raison en est que l'amplitude du signal avant seuillage, est proportionnelle à la période spatiale de la mire, qui dans le cas de la mire limite utilisée pour calculer la valeur du seuil, est elle même proportionnelle à l'angle interommatidial $\Delta\phi$ du DEM. Pour que cette amplitude limite reste invariante lorsque $\Delta\phi$ est multiplié par un facteur k , le gain sur la partie linéaire du filtrage doit être divisé par le même facteur k , ce qui revient à multiplier $\Delta\phi$ par k et donc à maintenir constant le recouvrement angulaire $\Delta\phi_i / \Delta\phi$ du DEM. Un ensemble de simulations (non représentées ici) a été effectué pour un DEM ayant la même orientation angulaire ($\phi=68^\circ$) mais présentant une résolution angulaire multipliée par deux (donc un angle interommatidial divisé par deux : $\Delta\phi(68^\circ)=2.68^\circ$) ; ces simulations confirment l'invariance avec $\Delta\phi(68^\circ)$ des courbes $[Hh(D_{\text{norm}}), \Delta\phi_i / \Delta\phi]$ aussi bien dans le cas de la solution spatio-temporelle que dans le cas de la solution purement spatiale. Il faut noter qu'une diminution de $\Delta\phi$ réduit l'écart d'amplitude entre les 3 voies du DEM.

Choix du couple recouvrement-seuil :

Ce choix résulte d'un compromis d'une part entre une *minimisation du seuil* qui permet de maximiser la sensibilité à la valeur de contraste, et d'autre part une *minimisation de l'angle d'acceptance*, qui favorise d'une part la précision angulaire mais aussi la précision en distance en dehors des phénomènes de correspondance. Le choix adopté ici et pour lequel le DEM amélioré va être ensuite testé est le suivant :

- 1 solution spatio-temporelle (fig.III.18a): $\Delta\phi_i / \Delta\phi = 2.75$, $Hh = 0.2$
- 2 solution purement spatiale (fig.III.18b): $\Delta\phi_i / \Delta\phi = 2.60$, $Hh = 0.2$

On peut noter une légère supériorité de la solution purement spatiale, qui pour une même sensibilité au contraste, offre un angle d'acceptance légèrement plus faible que la solution spatio-temporelle. Dans le cas du DEM étudié ici ($\Delta\phi=5.13^\circ$), ce choix conduit à $\Delta\phi(68^\circ)=14.10^\circ$ (et donc à un champ visuel total de l'ommatidie : $L_v=27^\circ$ pour $so=0.107$) pour la solution spatio-temporelle, et à $\Delta\phi(68^\circ)=13.34^\circ$ (et donc à un champ visuel total de l'ommatidie : $L_v=26^\circ$ pour $so=0.107$) pour la solution purement spatiale. De tels recouvrements sont assez importants et comme on l'a vu dans le Chap.II (cf. §.II.4.5.b.), ils affectent fortement la précision en distance en dehors des phénomènes de correspondance. Ici pour la valeur du seuil effectivement choisie $Hh=0.2$ et à la distance $D_{\text{norm}}=50\text{cm}$, cette précision est comprise entre +7,3% (contraste maximum, $I_g=10$) et -27% (contraste minimum, $I_g=2$).

III.3.4.e. Résultats avec des mires périodiques

La fig.III.19a,b illustre la configuration du DEM qui vient d'être décrite (cas spatio-temporel uniquement) simulée dans le cas de la "mire type" qui a servi à établir les résultats de la fig.III.18 (mire carrée dont la fréquence spatiale ν_{slim} définit la limite du domaine de validité du DEM à la

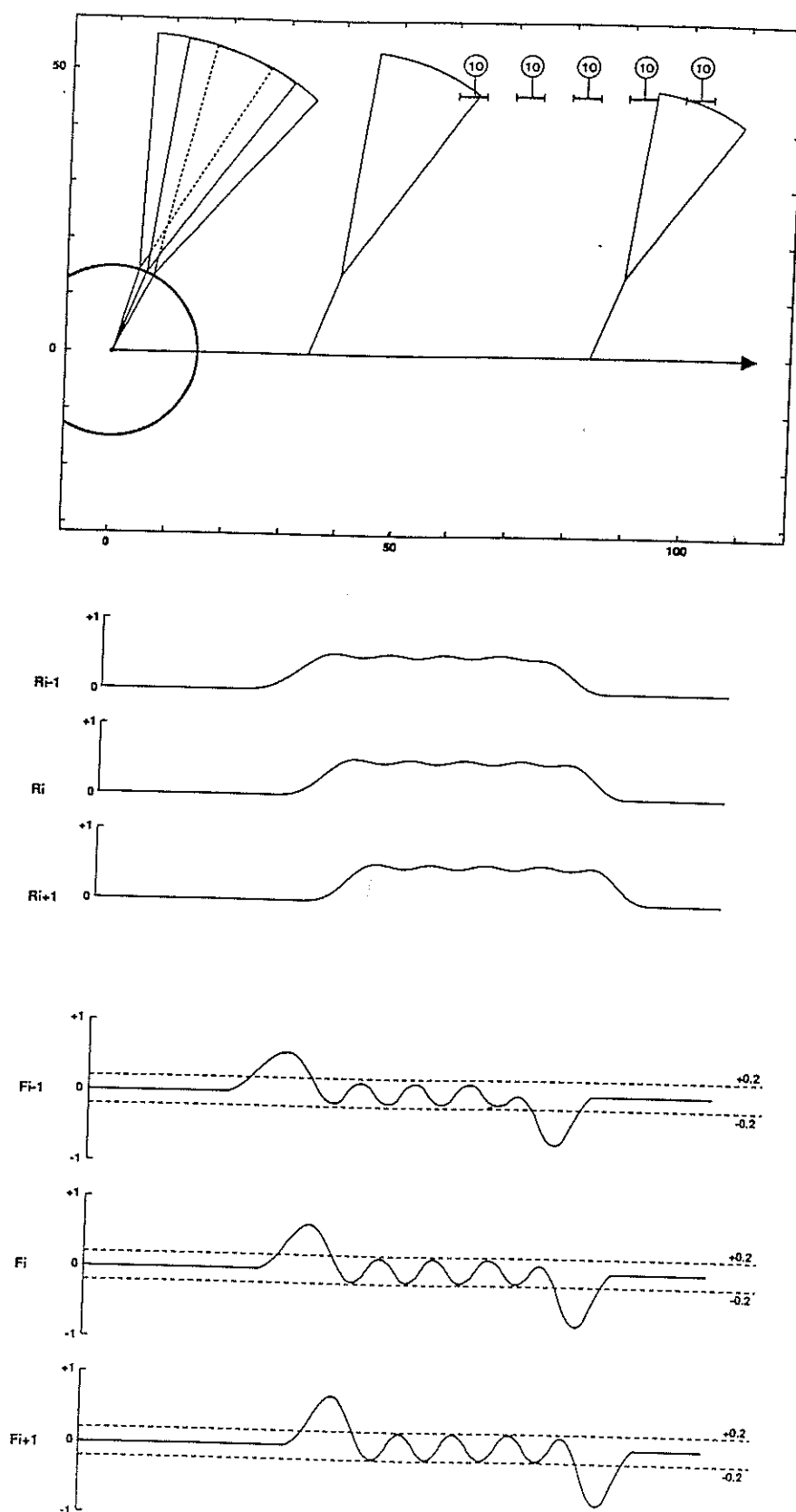


Fig.III.19a Principe de l'ajustement du seuillage pour le DEM étudié ici (filtrage spatio-temporel, $\phi_i=68^\circ$, $\Delta\phi_i=5.13^\circ$, $\Delta\rho_i/\Delta\phi_i=2.75$, $Hh=0.2$) ; la fréquence spatiale de la mire choisie ici est celle qui correspond à la limite du domaine spatial de validité de ce DEM, pour la distance $D_{norm}=50\text{cm}$.

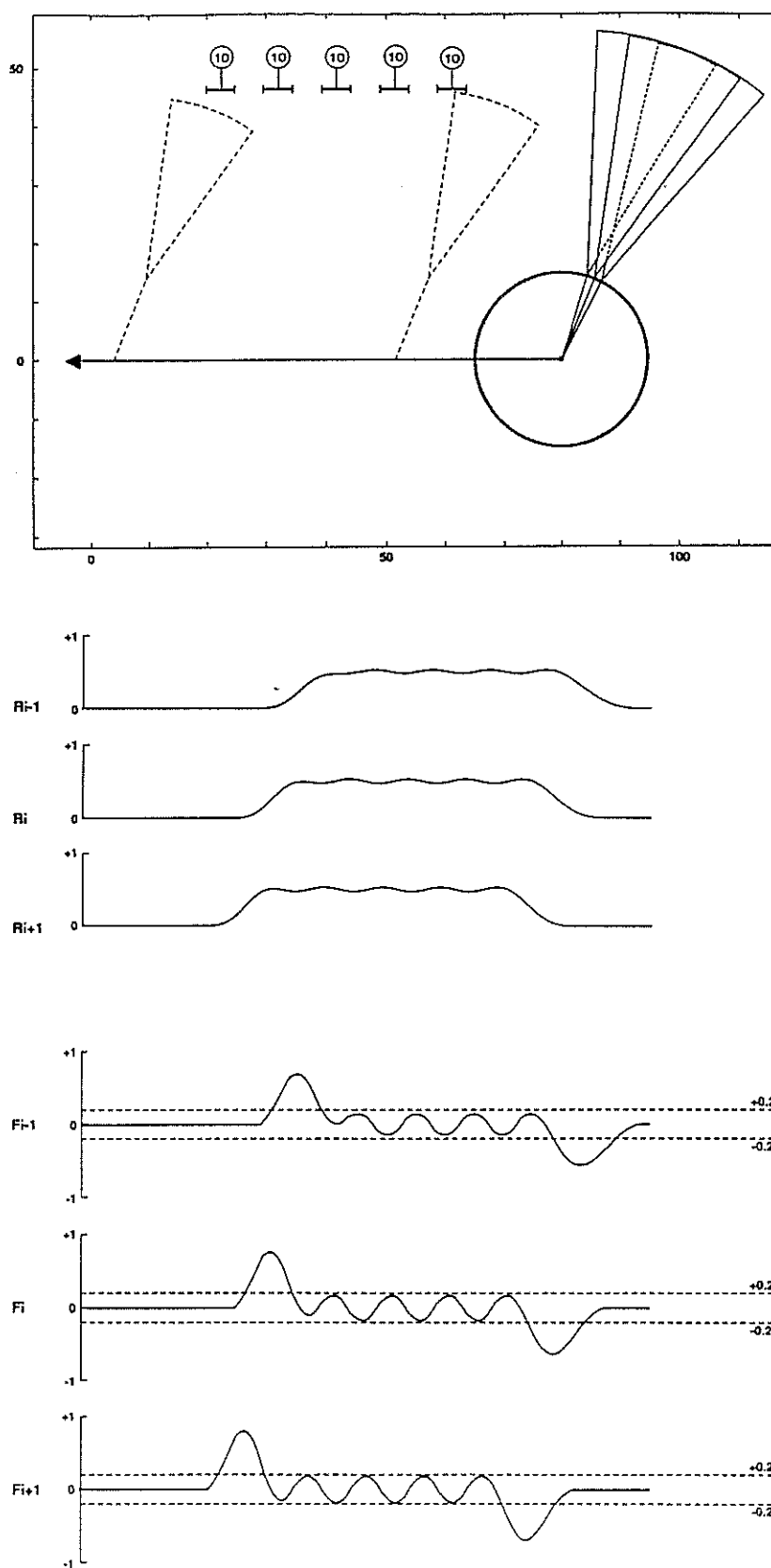


Fig.III.19b Idem au cas III.19a mais pour un mouvement dans le sens négatif.

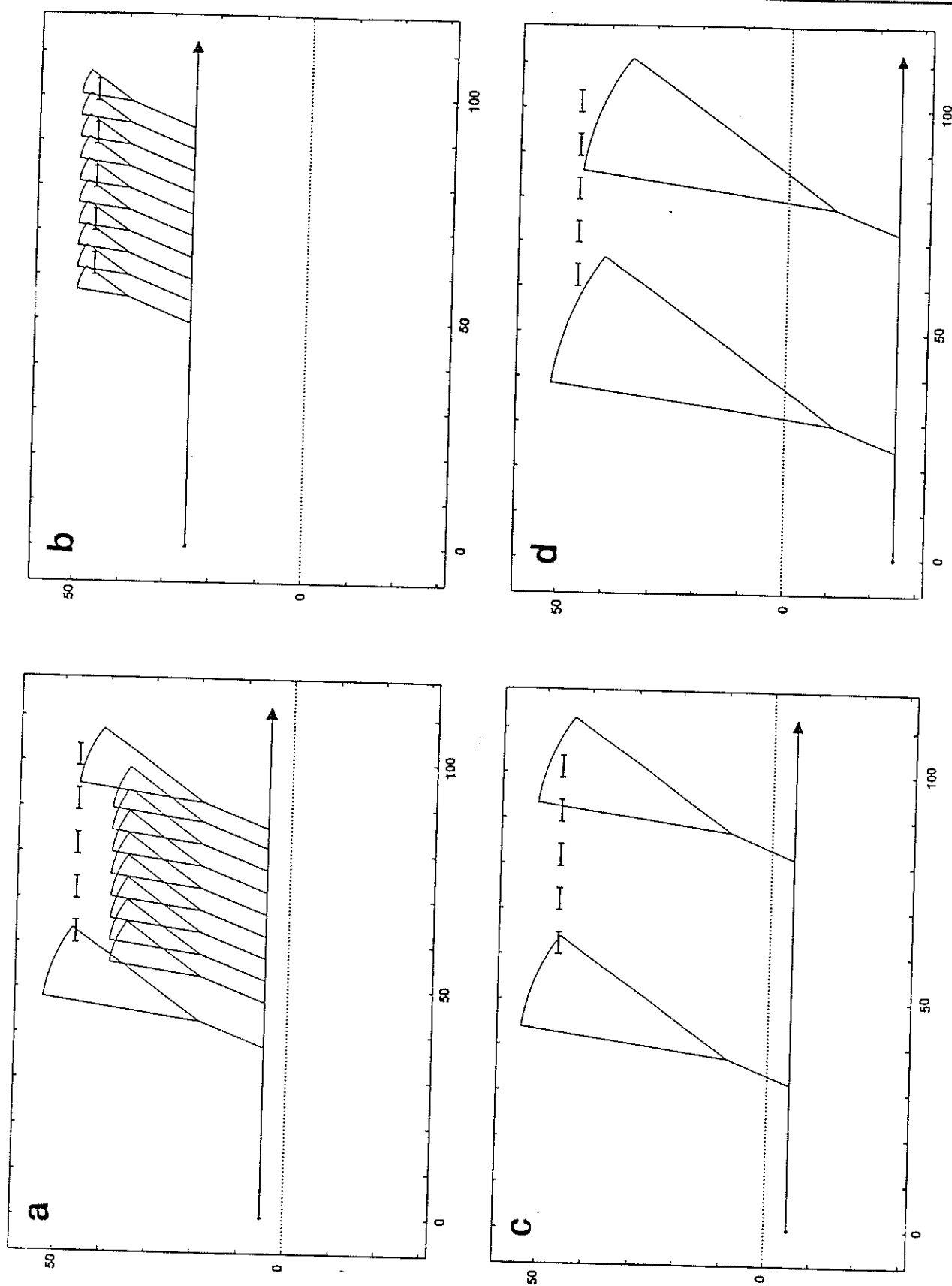


Fig.III.20 Performances du DEM ($\phi_i = 68^\circ$, $\Delta\phi_i = 5.13^\circ$, filtrage spatio-temporel, $\Delta\phi_i / \Delta\phi_i = 2.75$, $H_h = 0.2$) pour différentes distances radiales. La ligne en pointillés définit la limite du domaine de validité spatiale du DEM associé à cette mire de réglage. En deçà de cette limite le DEM se trouve dans son domaine de validité, et détecte tous les points de contraste de la mire. Au delà de cette limite, le DEM se trouve à l'extérieur de son domaine de validité et ne détecte la mire que par son bord d'attaque et son bord de fuite.

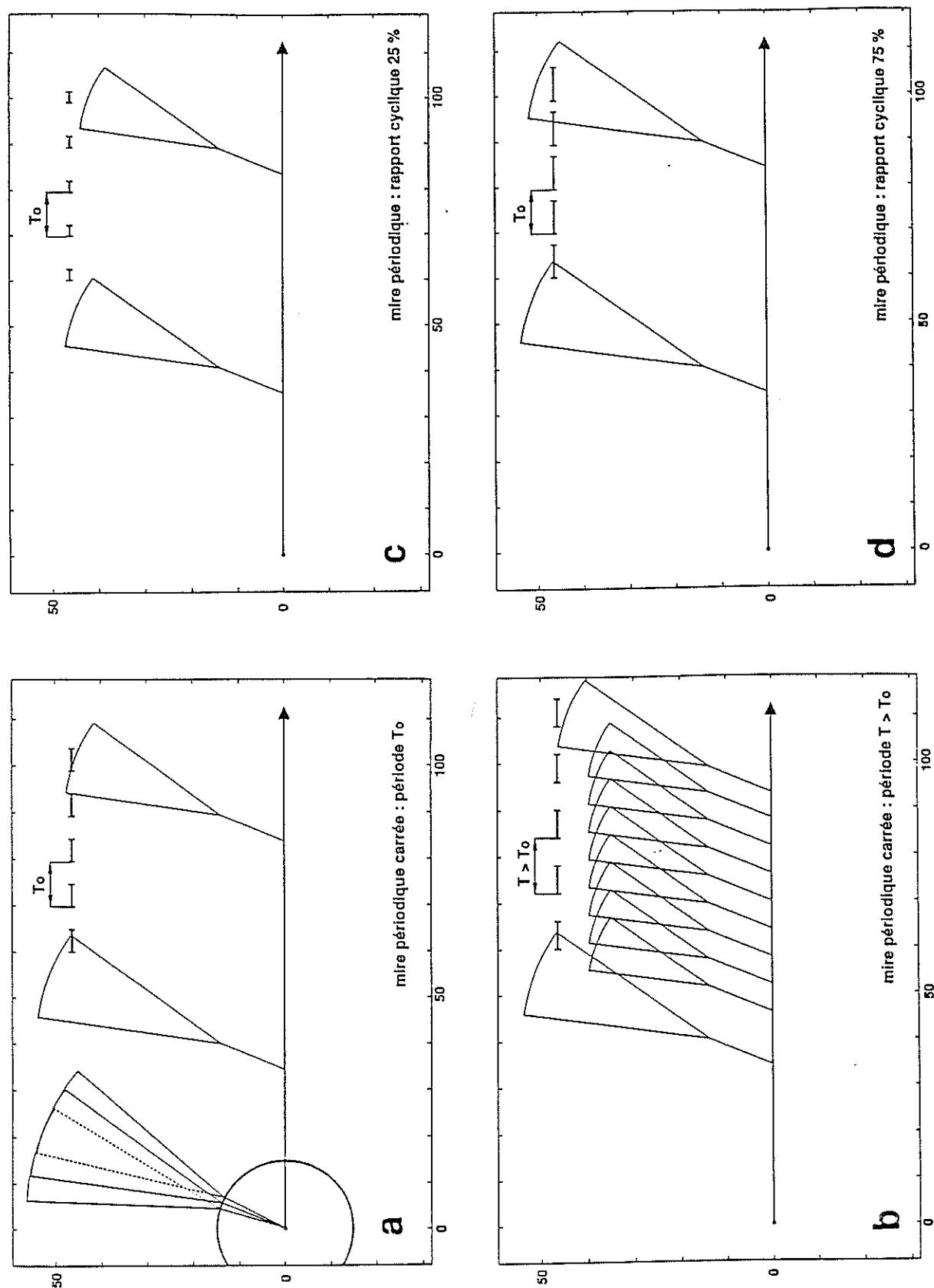


Fig.III.21 Performances du DEM ($\phi_i=68^\circ$, $\Delta\phi_i=5.13^\circ$, filtrage spatio-temporel, $\Delta\phi_i/\Delta\phi_i=2.75$, $H_h=0.2$) pour différentes structures de mires. (a) Mire limitée définissant le domaine de validité spatiale du DEM à la distance D_{norm} . (b) Période de la mire carrée légèrement supérieure à celle de (a). (c)(d) même période que (a) mais avec des mires rectangulaires présentant un rapport cyclique de 25% pour (c) et de 75% pour (d).

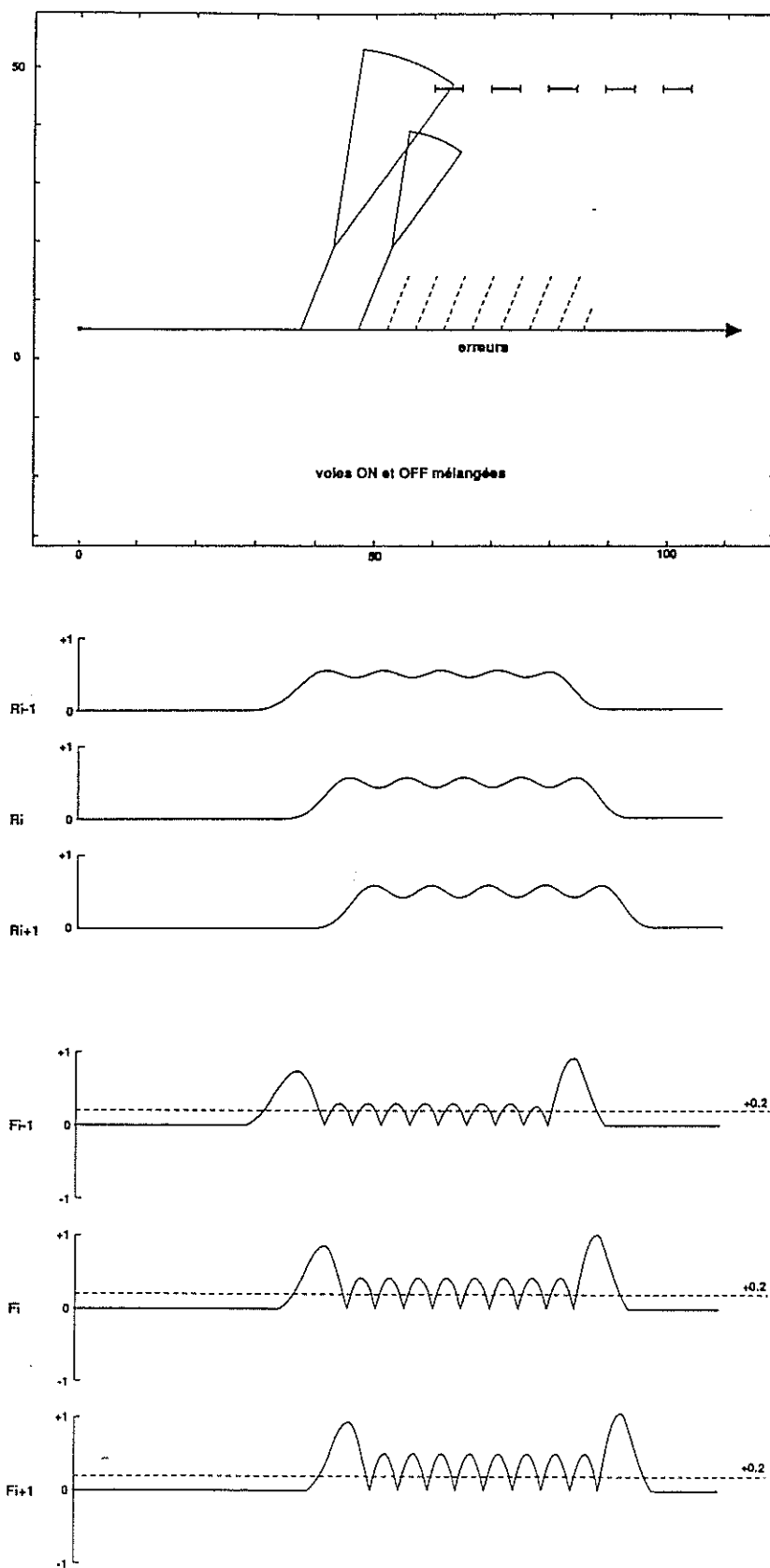


Fig.III.22 Illustration de l'effet du mélange des voies ON et OFF pour le DEM ($\phi_i=68^\circ$, $\Delta\phi_i=5.13^\circ$, filtrage spatio-temporel, $\Delta\phi_i/\Delta\phi_i \approx 2.75$, $H_h=0.2$). L'ajustement du filtrage spatio-temporel n'est dans ce cas plus valable, ce qui provoque une série de mesures erronées tant sur la distance que sur le sens du mouvement.

distance D_{norm}). Quel que soit le sens du mouvement (fig.III.19a : sens positif et fig.III.19b : sens négatif) le DEM détecte le bord d'attaque et le bord de fuite de la mire, en délivrant une valeur correcte aussi bien sur la distance radiale que sur le sens du mouvement (le sens positif est représenté par les secteurs angulaires en traits pleins, et le sens négatif par les secteurs angulaires en pointillés). Par contre, les contrastes appartenant à la partie périodique de la mire, et qui jusqu'à présent conduisaient à des mesures erronées sont ici éliminés par le filtrage. Puisque, par définition, la valeur du seuil a été réglée à partir de cette configuration limite, on observe bien qu'elle coïncide avec l'amplitude des signaux en sortie du filtrage (partie du bas des figures : F_{i-1} , F_i , F_{i+1}).

Si, comme c'est le cas ici, la mire périodique a une largeur finie, alors ses bords d'attaque et ses bords de fuite continuent à être détectés par le DEM, et tout se passe comme si la mire était unie, avec une valeur apparente de contraste dépendant à la fois de la fréquence spatiale de la mire et de sa distance radiale.

Les fig.III.20, III.21, III.22 récapitulent les principales propriétés caractérisant l'ensemble filtrage+seuillage du DEM bidirectionnel tel qu'il vient d'être réglé.

La fig.III.20 montre comment, pour une mire donnée, le comportement du DEM varie, selon sa position radiale par rapport à cette mire. Comme on l'a déjà décrit au §.III.3.3., cette position radiale détermine si le DEM se trouve ($D < D_{\text{lim}}$) ou ne se trouve pas ($D > D_{\text{lim}}$) dans son domaine spatial de validité. On a montré que sans ajustement du filtrage+seuillage (cf. fig.III.11), lorsque $D > D_{\text{lim}}$ le DEM délivrait des valeurs erronées sur la distance et le sens du mouvement des contrastes situés dans la partie périodique de la mire. Dans le cas étudié maintenant et présenté à la fig.III.20, ces mêmes contrastes ne sont plus détectés parce qu'ils ont été filtrés auparavant. Ainsi, au delà d'une certaine distance D_{lim} , la mire carrée est vue non plus comme une mire périodique mais comme une mire unie.

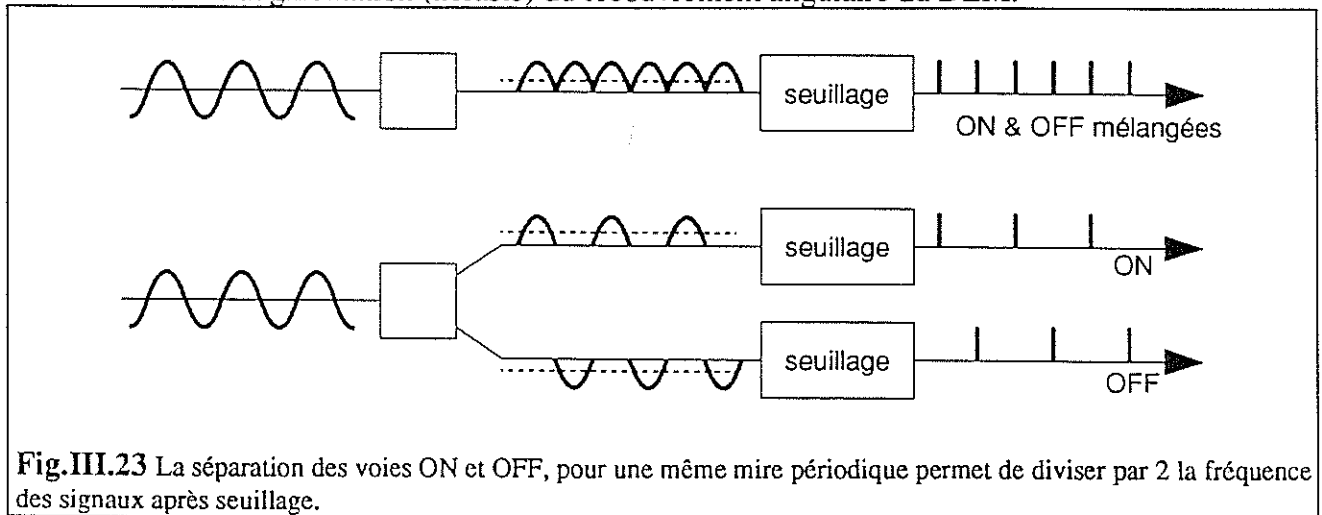
La fig.III.21 montre l'effet des variations de la structure de la mire, sur le fonctionnement du DEM. A une distance radiale D donnée, il existe une fréquence spatiale limite $\nu_{\text{slim}}(D) = 1/T_0$ (illustré à la fig.III.21a où $D = D_{\text{norm}} = 50\text{cm}$) définissant la limite du domaine de validité du DEM. Au dessus de cette fréquence, les contrastes de la partie périodique de la mire sont filtrés et la mire est donc vue comme une mire unie avec un bord d'attaque et un bord de fuite ; en dessous de cette fréquence (fig.III.21b) tous les contrastes de la mire sont détectés avec la précision propre du DEM. Les cas III.21c et III.21d illustrent l'effet du *rapport cyclique* pour une mire rectangulaire réglée à la fréquence limite $\nu_{\text{slim}}(50\text{cm})$. Ces deux exemples confirment que le réglage du DEM sur la base d'une mire carrée (rapport cyclique = 50%) reste valable pour n'importe quelle mire de même période mais présentant un rapport cyclique différent (ici 25% cas III.21c et 75% cas III.21d) puisque dans ces deux cas l'amplitude du signal une fois filtré est plus faible que pour la mire carrée. Quant à la valeur du rapport cyclique elle influe directement sur le "niveau de gris apparent" de la mire ; par exemple l'erreur de -7% dans le cas III.21c est typique d'une mire unie à faible

faible contraste tandis que l'erreur de +4 % observée à la fig.III.21d est typique d'une mire unie à fort contraste.

Pour revenir au problème de la séparation des voies ON et OFF (cf. §.III.3.1) qui est l'une des caractéristiques du DEM amélioré, une simulation (fig.III.22) a été effectuée avec un filtrage+seuillage réglé comme précédemment mais avec les voies ON et OFF à nouveau mélangées ; cet exemple montre que dans ce cas, la mesure effectuée par le DEM est incorrecte (il détecte des mouvements négatifs). On constate donc que la séparation des voies ON et OFF joue un rôle important dans l'ajustement filtrage+seuillage décrit précédemment. Plus précisément elle permet dans le cas de mire périodique illustrée ici, de diviser par deux la fréquence des signaux en sortie du seuillage (fig.III.23) et autorise ainsi une fréquence de coupure haute utlim deux fois plus élevée que dans le cas où les voies ON et OFF sont mélangées.

Le réglage du filtrage+seuillage pour d'un DEM avec les voies ON et OFF mélangées comme celui illustré à la fig.III.22, aurait été possible, mais au prix :

- soit d'une diminution de la sensibilité au contraste (augmentation de la valeur du seuil),
- soit d'une atténuation plus importante au niveau de la partie linéaire du filtrage ce qui nécessiterait une augmentation (néfaste) du recouvrement angulaire du DEM.



III.3.5. Performances du DEM amélioré dans un environnement quelconque

Au paragraphe précédent, le DEM amélioré a été réglé et testé sur la base de mires périodiques carrées, planes et parallèles au mouvement. Ce DEM ainsi réglé, va être repris et testé dans le cadre plus général, notamment pour toutes les configurations d'environnement répertoriées dans la fig.III.3 du §.III.2.2., et susceptibles de générer des problèmes de correspondance.

III.3.5.a Performances sur le sens du mouvement

On peut commencer par évoquer le problème de directionnalité, puisqu'il est à l'origine du choix de l'architecture bidirectionnelle pour le DEM amélioré. On a montré que la version de base

n'est pas directionnelle au sens où elle est incapable de relever l'ambiguïté sur le sens du mouvement dans un nombre de configurations statistiquement important (contenant au minimum deux contrastes). Les cas d'école Ja et Jb (cf. fig.III.3) illustrant ce défaut ont été repris ici, et les simulations présentées à la fig.III.24a,b montrent que pour ces configurations précises, le sens du mouvement est maintenant estimé sans erreur par le DEM (un mouvement détecté comme négatif étant représenté par un secteur angulaire en pointillé à la fig.III.24). Le problème de directionnalité est donc résolu pour cette catégorie de configuration. Cependant il reste encore certains cas de figure, où l'on observe une erreur sur le sens du mouvement. Ces cas de figures, dont le nombre est statistiquement beaucoup moins important que la catégorie précédente, correspondent aux situations limites (non illustrées ici) où l'amplitude du signal est légèrement inférieure au seuil sur la voie $i-1$, mais lui est par contre supérieure sur les voies i et $i+1$, ce qui active seulement le sous-DEM-. Ce défaut est typique des problèmes limites rencontrés avec une opération non linéaire telle que le seuillage adopté ici. De plus, il est amplifié ici par le mauvais appareillage en amplitude évoqué précédemment, entre les 3 voies alimentant un même DEM.

D'autre part le réglage du seuil a été effectué sur la base de l'amplitude du signal filtré à la distance D_{norm} . Comme on l'a déjà suggéré, cela signifie que dans le cas de la version spatio-temporelle les problèmes de correspondance induisant une erreur sur le sens du mouvement peuvent encore apparaître pour des stimuli se trouvant en deçà de D_{norm} . L'exemple présenté à la fig.III.24c illustre ce propos : la fréquence de la mire correspond ici à $v_{slim}(25cm=D_{norm}/2)$ et le stimulus se trouve à une distance radiale d'environ 30cm, c'est-à-dire à une distance comprise entre D_{norm} et $D_{norm}/2$. Par définition du périmètre de sécurité du robot (cf. Chap.V) qui coïncide avec D_{norm} ce type de situation apparaît rarement au cours de la locomotion du robot, puisque par définition, le rôle de l'algorithme anticollision est précisément de maintenir tous les stimuli en dehors du périmètre de sécurité et donc au delà de D_{norm} .

III.3.5.b Performances sur l'estimation de la distance radiale des contrastes

En ce qui concerne les problèmes de correspondance susceptibles d'induire des estimations erronées sur les distances, la version améliorée du DEM et plus particulièrement le principe de filtrage qui lui est associé ont été testés pour l'ensemble des cas d'école (cas A..I au §.III.2.2.), pour lesquels la version de base du DEM était systématiquement défailante (cf. fig.III.4 au §.III.2.2.). Le résultat de ces tests est récapitulé à la fig.III.25, sous la même forme qu'à la fig.III.4, c'est à dire sous forme de diagrammes [distance mesurée, distance réelle], chacun d'entre eux correspondant à un cas d'école particulier ; ce récapitulatif représente l'équivalent de 180 simulations élémentaires. Les performances des deux solutions envisageables pour le filtrage, à savoir la solution spatio-temporelle et la solution purement spatiale, sont présentées en parallèle pour chacune des configurations étudiées.

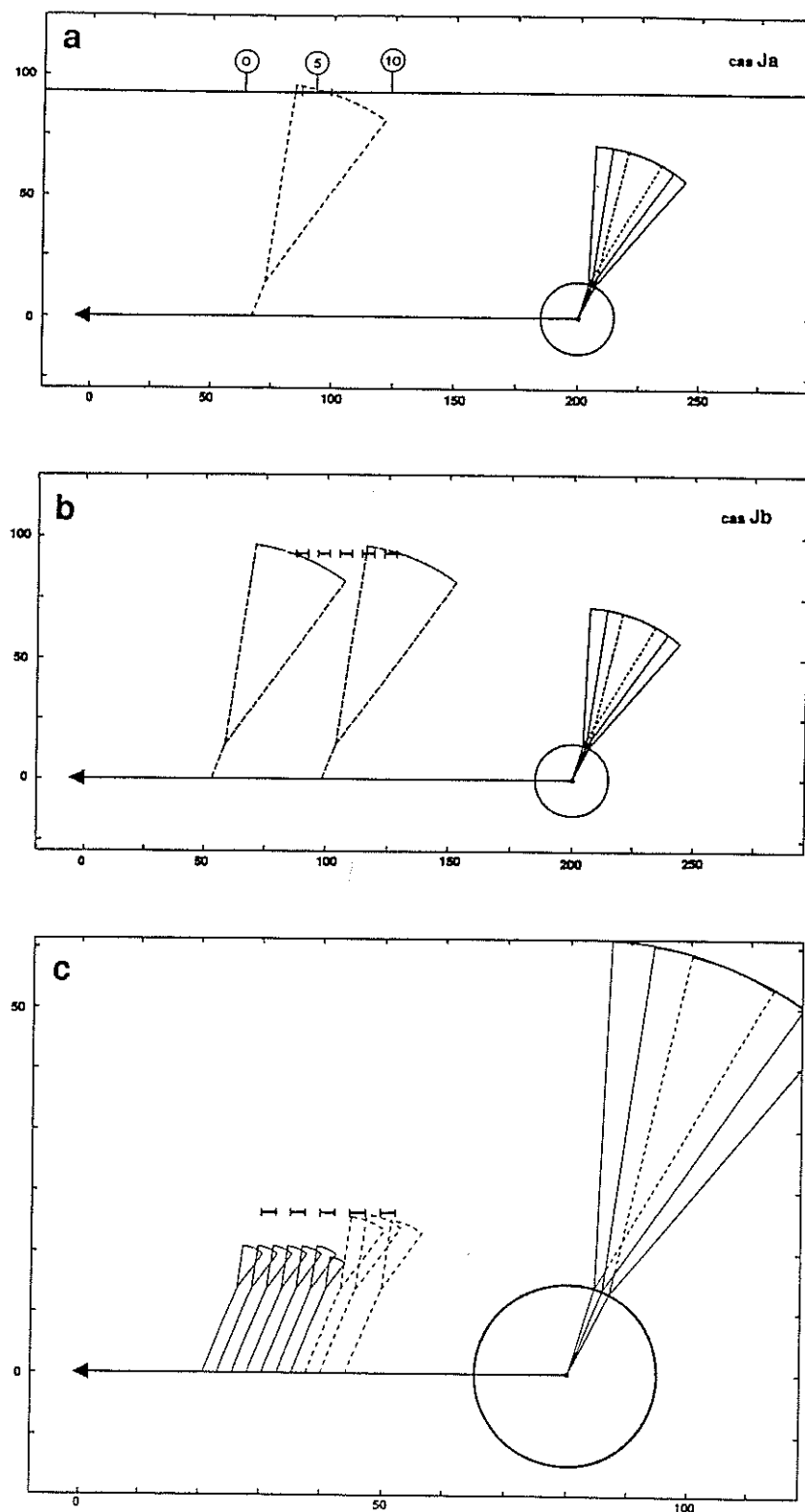
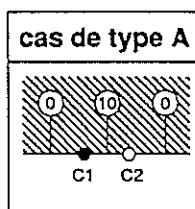
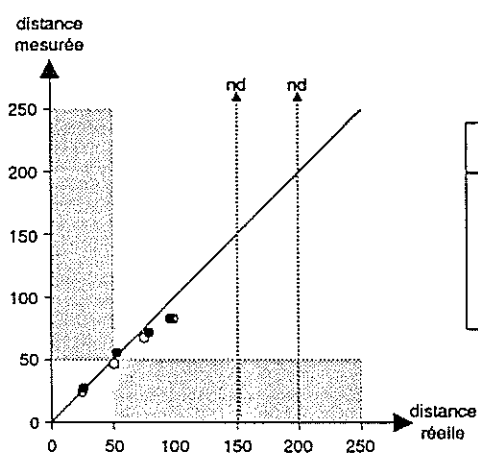


Fig.III.24 Test du DEM ($\phi_i=68^\circ$, $\Delta\phi_i=5.13^\circ$, filtrage spatio-temporel, $\Delta\phi_i/\Delta\phi_i=2.75$, $H_h=0.2$) pour des mouvements dans le sens négatif. (a)(b) mêmes configurations de l'environnement que celles évoquées dans les cas d'école Ia et Ib. (c) illustration des problèmes de directionnalité qui peuvent encore apparaître pour des mires situées à une distance radiale inférieure à $D_{\text{norm}}=50\text{cm}$.

SOLUTION SPATIO-TEMPORELLE



SOLUTION PUREMENT SPATIALE

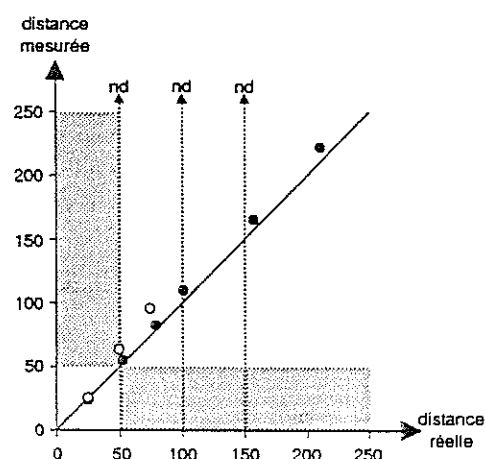
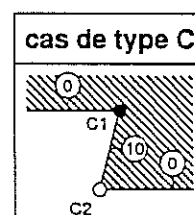
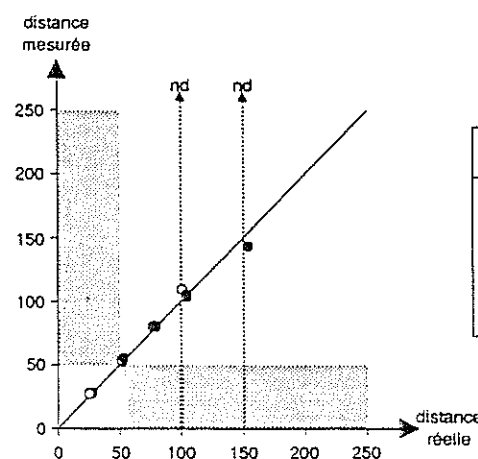
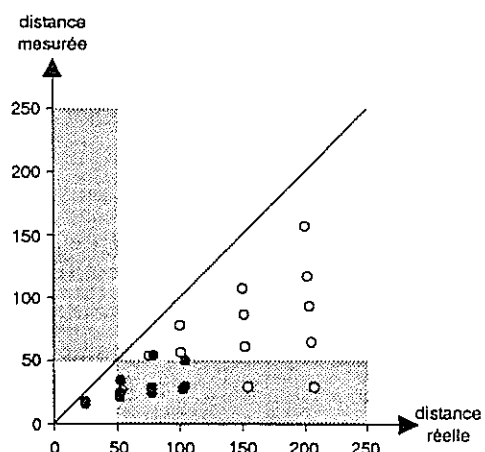
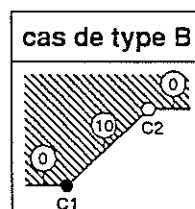
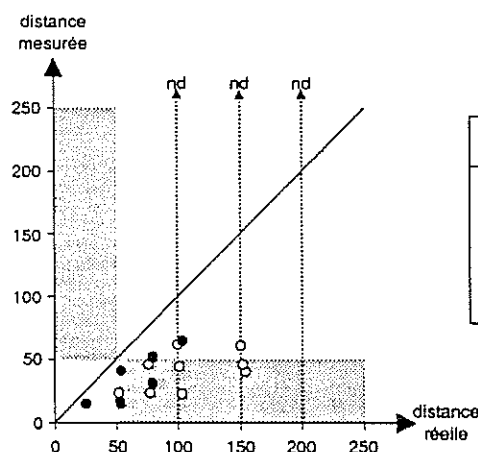
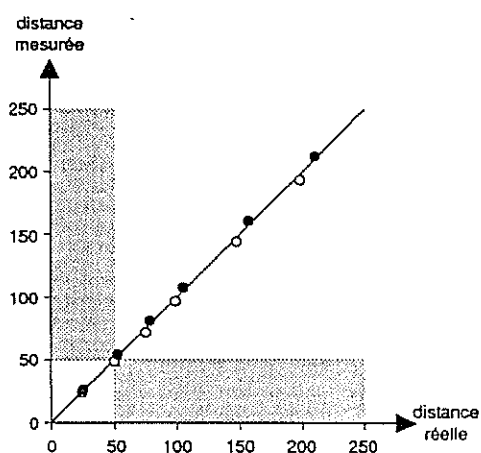
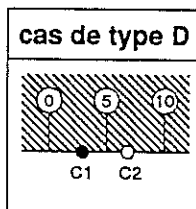
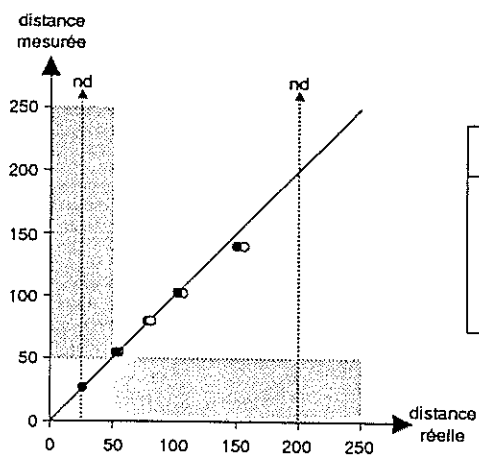


Fig.III.25a Performances caractérisant les estimations en distance faites par la version améliorée du DEM ($\phi_i=68^\circ$, $\Delta\phi_i=5.13^\circ$, $\Delta\phi_i/\Delta\phi_i=2.75$, $H_h=0.2$) dans un environnement généralisé. Les résultats présentés ici (planche a) correspondent aux cas d'école basés sur deux contrastes C1, C2 dans une séquence de type ON→OFF (cas A,B,C).

SOLUTION SPATIO-TEMPORELLE



SOLUTION PUREMENT SPATIALE

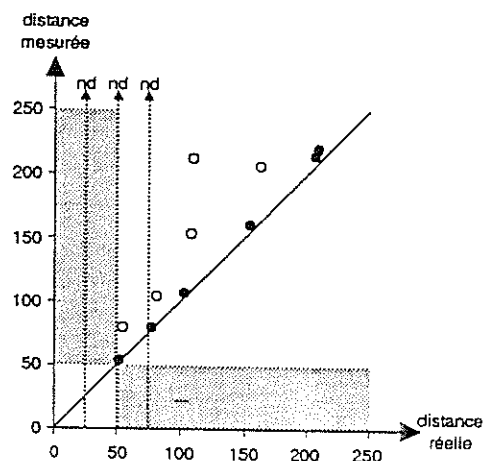
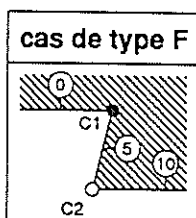
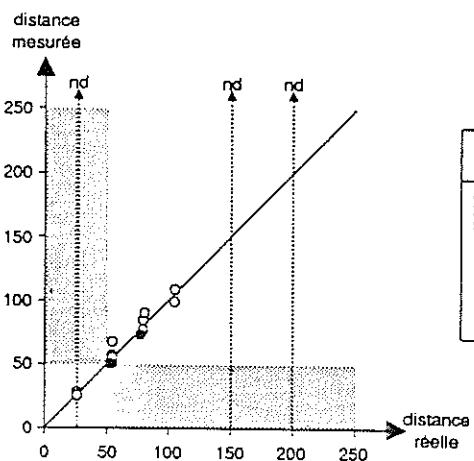
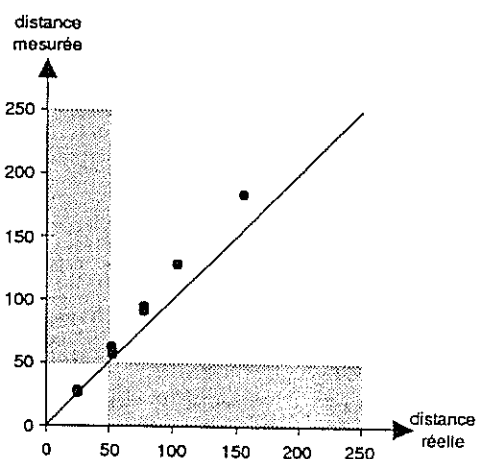
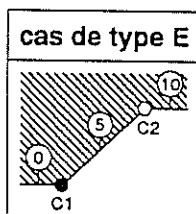
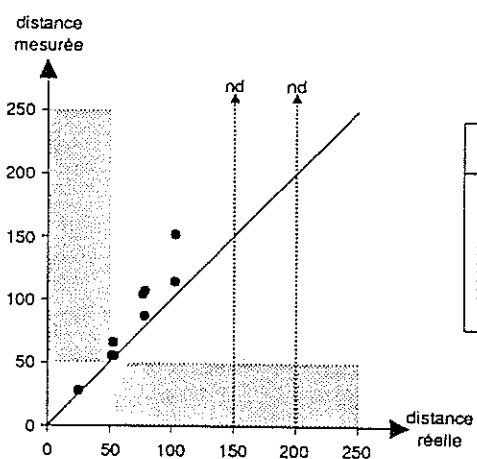
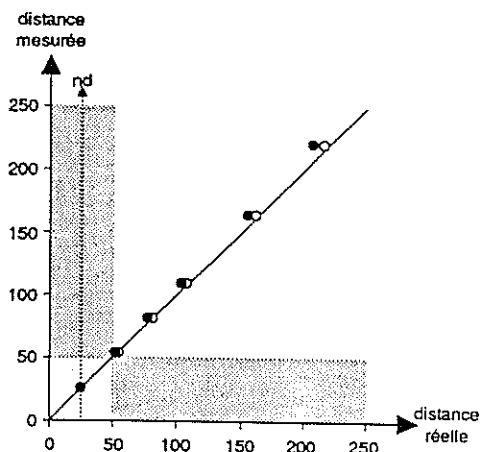
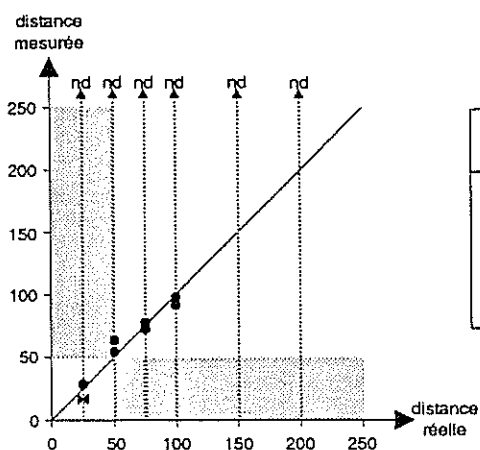


Fig.III.25b Idem à III.25a, mais pour les cas d'école à 2 contrastes C1, C2 dans une séquence de type ON→ON (cas D,E,F).

SOLUTION SPATIO-TEMPORELLE

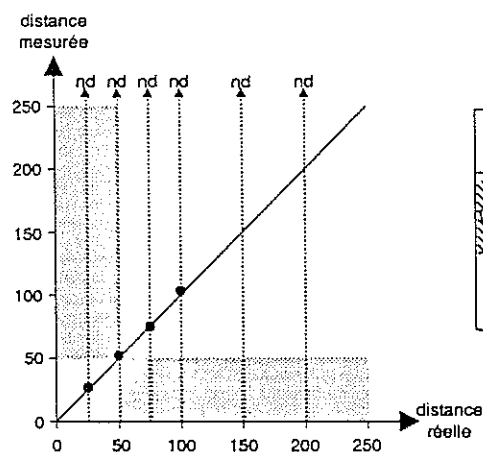
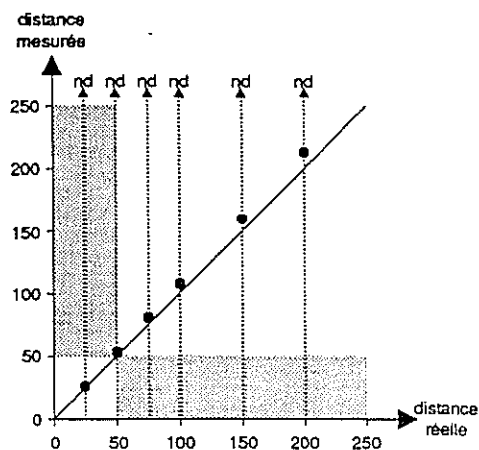


cas de type G

⑩ ⑩ ⑩ ⑩ ⑩

mire plane périodique

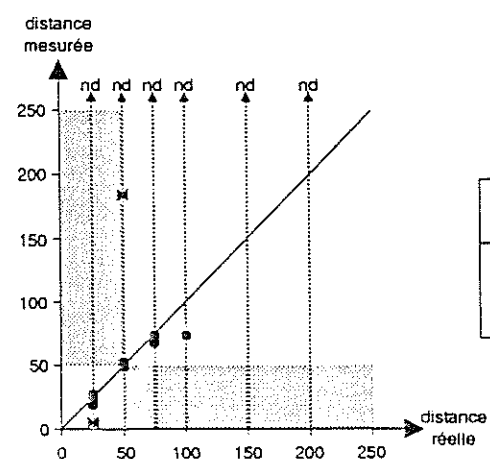
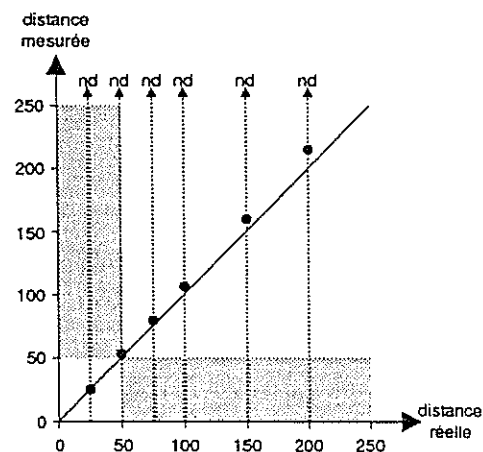
SOLUTION PUREMENT SPATIALE



cas de type H

0 2 4 6 8 10

mire plane périodique



cas de type I

mire plane aléatoire

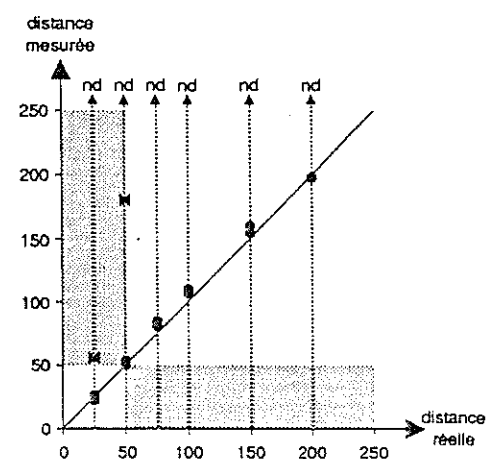


Fig.III.25c Idem à III.25a et III.25b mais pour les cas d'école avec des mires à plus de deux contrastes, soit périodiques (cas G,H) soit aléatoires (cas I). Les symboles correspondant à une double flèche inversée représentent les contrastes détectés avec un mouvement négatif.

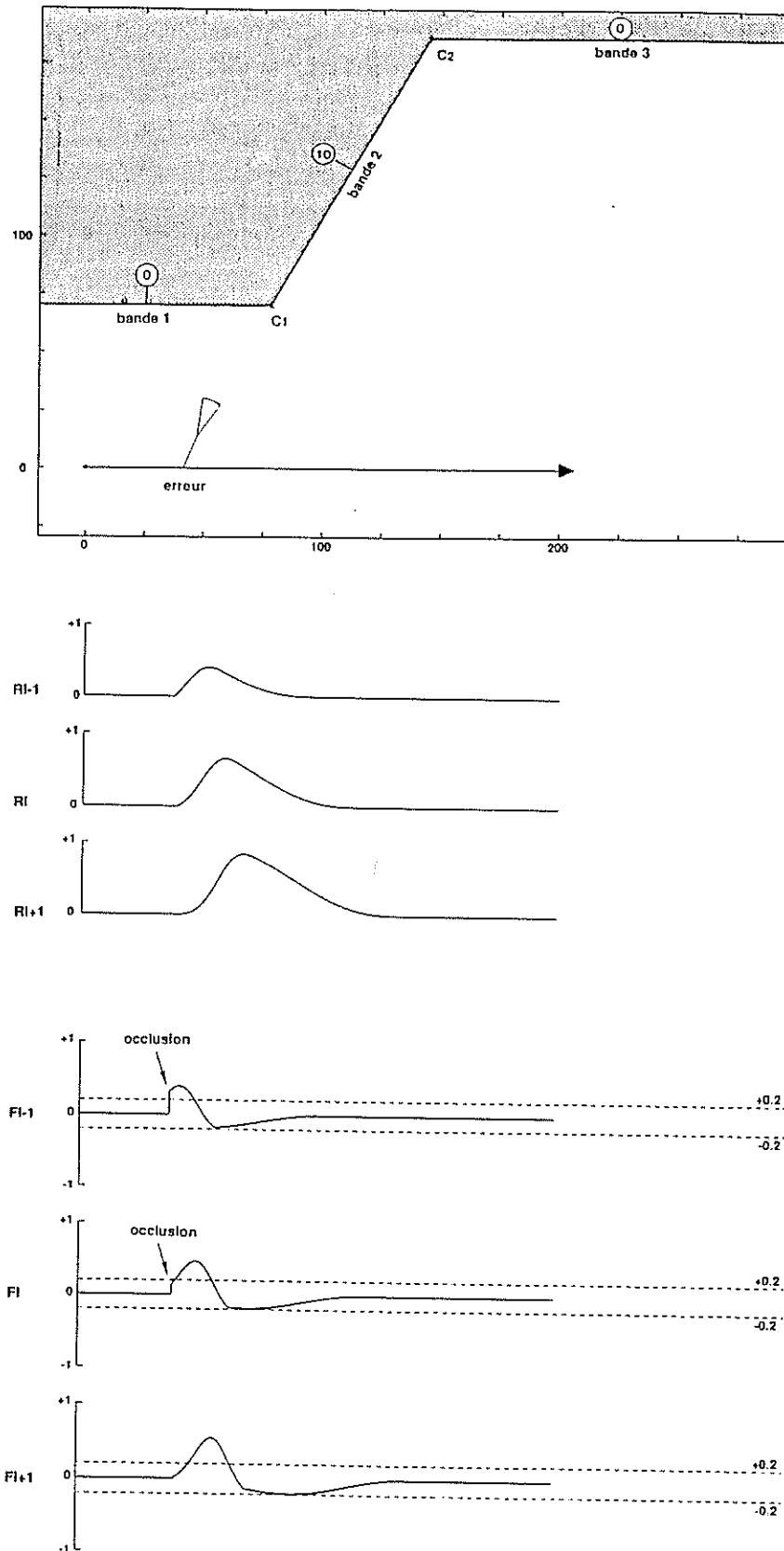


Fig.III.26 Illustration des phénomènes d'occlusion qui apparaissent de façon individuelle sur chaque voie du DEM lorsque le champ visuel de l'ommatidie est important. Ces phénomènes se traduisent par des discontinuités sur le signal filtré ($Fi-1$, Fi , $Fi+1$) qui provoquent le déclenchement du système de seuillage et induisent des mesures erronées en distance.

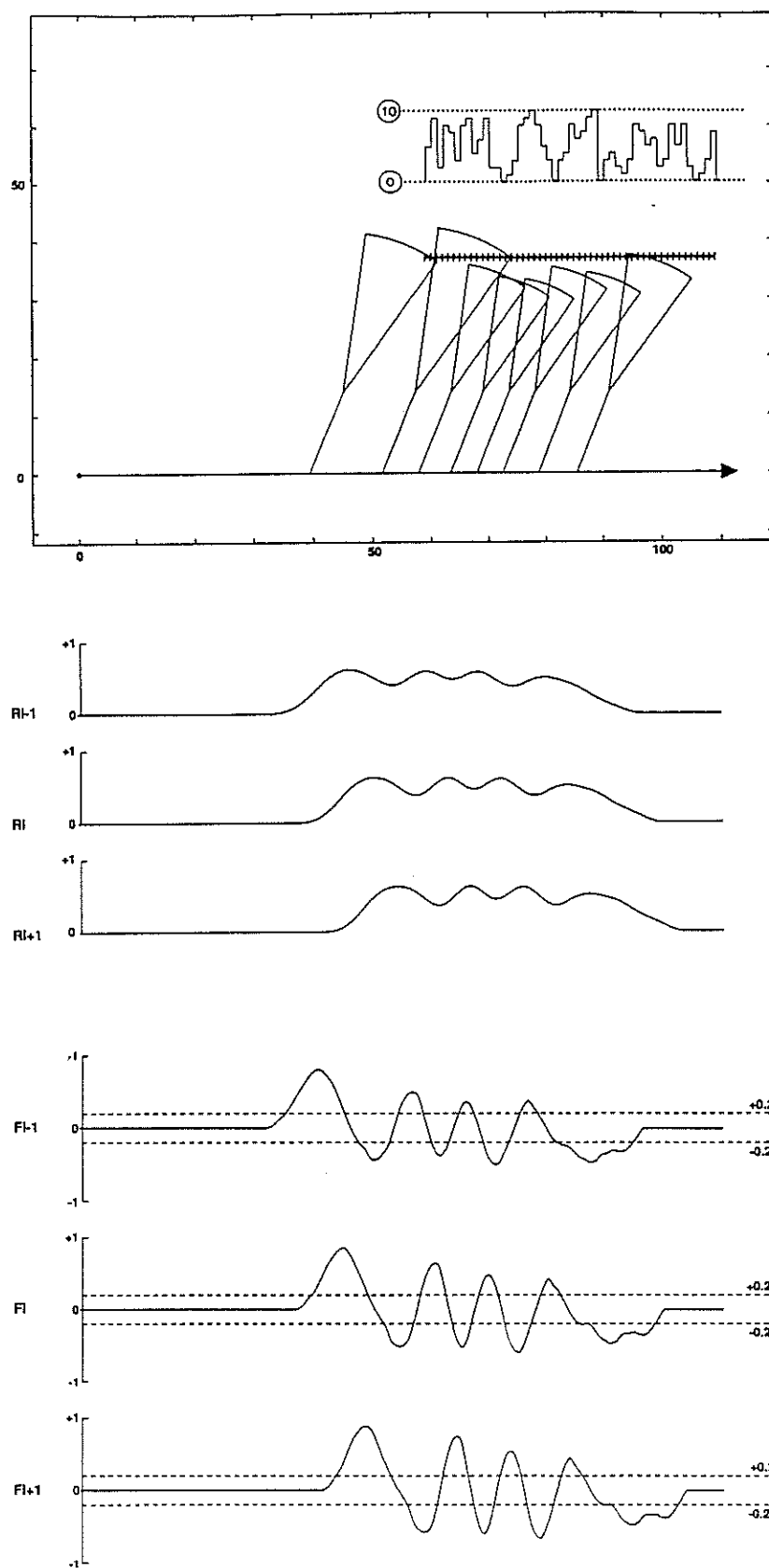


Fig.III.27 Fonctionnement du DEM ajusté, en mouvement devant la mire aléatoire (cas I de la fig.III.3) ici située à une distance radiale de 40cm .

L'ensemble de ces résultats montre que :

- 1 un plus grand nombre de contrastes est, soit *déecté avec une précision acceptable* (contrastes situés sur la droite $x=y$), soit *carrément non déecté* (flèches verticales en pointillés).
- 2 le "cas grave de surestimation" (contrastes localisés dans le rectangle grisé vertical) est ici nettement favorisé par rapport au "cas grave de sous-estimation" (contrastes localisés dans le rectangle grisé horizontal).
- 3 il n'y a pas, dans le cadre de cette généralisation, entre le filtrage spatio-temporel et le filtrage purement spatial, une solution qui apparaît nettement plus performante que l'autre quant à l'élimination des problèmes de correspondance.

En ce qui concerne la première remarque :

Puisque le principe du filtrage détaillé précédemment repose sur l'élimination sélective du maximum de mesures erronées, il conduit par définition à une perte de contraste plus importante. Quant aux contrastes correctement déectés, ils apparaissent en plus grand nombre dans les cas suivants:

- les cas de type A: ce phénomène est une conséquence, déjà évoquée, de la séparation des voies ON et OFF,
- les cas de type D: pour cette catégorie de configurations, seul le premier contraste C1 est en fait réellement déecté ; cependant (et cela n'apparaît pas dans la représentation adoptée ici) au moment de cette détection, le second contraste C2 se trouve déjà dans le champ de l'ommatidie centrale du DEM et l'on peut donc considérer que lui aussi est déecté. En d'autres termes, C1 et C2 ne sont plus considérés ici comme deux contrastes séparés mais comme un pattern unique qui est alors correctement déecté.

En ce qui concerne la seconde remarque :

Seul le cas de type B conduit au "cas grave de sous-estimation" (cf. fig.III.26) et ceci quelle que soit la solution adoptée pour le filtrage. L'erreur de sous-estimation semble être ici systématiquement provoquée par un phénomène d'occlusion sur l'une des ommatidies du DEM, phénomène qui se traduit par des discontinuités sur le signal différencié et déclenche de façon intempestive le système de seuillage. Ces phénomènes d'occlusion, illustrés à la fig.III.26, correspondent à l'apparition soudaine dans le champ de l'ommatidie, d'une bande (bande 2 à la fig.III.26) auparavant masquée par une autre bande (bande 1 à la fig.III.26) et leur probabilité d'apparition est amplifiée par la largeur importante du champ récepteur des ommatidies. Ce type de problème n'a pas été traité dans le cadre de ce projet, notamment parce qu'il semble difficile à résoudre à partir de la seule différentielle du 1er ordre. Une solution éventuelle pour limiter ces phénomènes serait de "repérer" une discontinuité sur la différentielle du 1er ordre (par exemple par un seuillage sur la différentielle du 2ème ordre) afin d'inhiber à cet instant, le déclenchement du système de seuillage.

Quant aux "cas graves de surestimation" ils apparaissent essentiellement dans les situations suivantes:

- les cas de type D et F : dans les configurations à deux contrastes, c'est la détection du premier contraste C1 rencontré par le DEM qui est favorisée par rapport au second C2 quelle que soit sa distance. Ainsi, lorsque C2 est plus près que C1 (cas D&F) cette propriété conduit aux "cas graves de surestimation"

- les configurations à base de mire périodique de type G ou H : ce phénomène a été observé au paragraphe précédent ; ces mires situées hors du domaine de validité spatiale du DEM sont vues comme des mire unies, ce qui signifie que dans la partie périodique les contrastes sont perdus.

- dans le cas de la mire aléatoire de type I (illustré à la fig.III.27) ; contrairement aux mires périodiques, ici quelques points de contrastes supplémentaires peuvent être effectivement détectés en plus du bord d'attaque et du bord de fuite de la mire. Le nombre de ces contrastes supplémentaires dépend de la composition spectrale et de la distance radiale de la mire. A une distance donnée, plus l'énergie spectrale de la mire se situe dans les fréquences basses, plus nombreux sont les contrastes supplémentaires effectivement détectés. Ce nombre, toutefois, ne peut pas être supérieur à celui fixé par la fréquence spatiale $v_{lim}(D)$ définissant la limite du domaine de validité du DEM à la distance D où se trouve la mire.

En ce qui concerne la troisième remarque :

La seule différence notable entre les deux types de filtrage est, comme cela a déjà été suggéré, une meilleure détection par la version purement spatiale, des contrastes les plus éloignés ; comme le montre la fig.III.25, les contrastes situés au delà de 150cm sont rarement détectés par la solution spatio-temporelle alors qu'ils le sont systématiquement par la solution purement spatiale. Cette caractéristique n'est pas forcément un avantage, comme par exemple le cas de type B où le contraste C2 situé à 200cm est totalement sous-estimé en distance ; cela signifie que statistiquement il y a davantage de "cas graves de sous-estimation" dans le cas purement spatial que dans le cas spatio-temporel. Un autre cas de figure où la solution purement spatiale est moins performante est le cas de type F, où le contraste le plus éloigné C1 est systématiquement privilégié au détriment du contraste le plus proche C2. Dans le cas spatio-temporel ce phénomène n'a plus lieu dès que C1 est suffisamment éloigné ($D > 100\text{cm}$) et se produit donc statistiquement moins souvent.

III.3.6. Conclusion

L'amélioration de la version de base du DEM porte donc essentiellement :

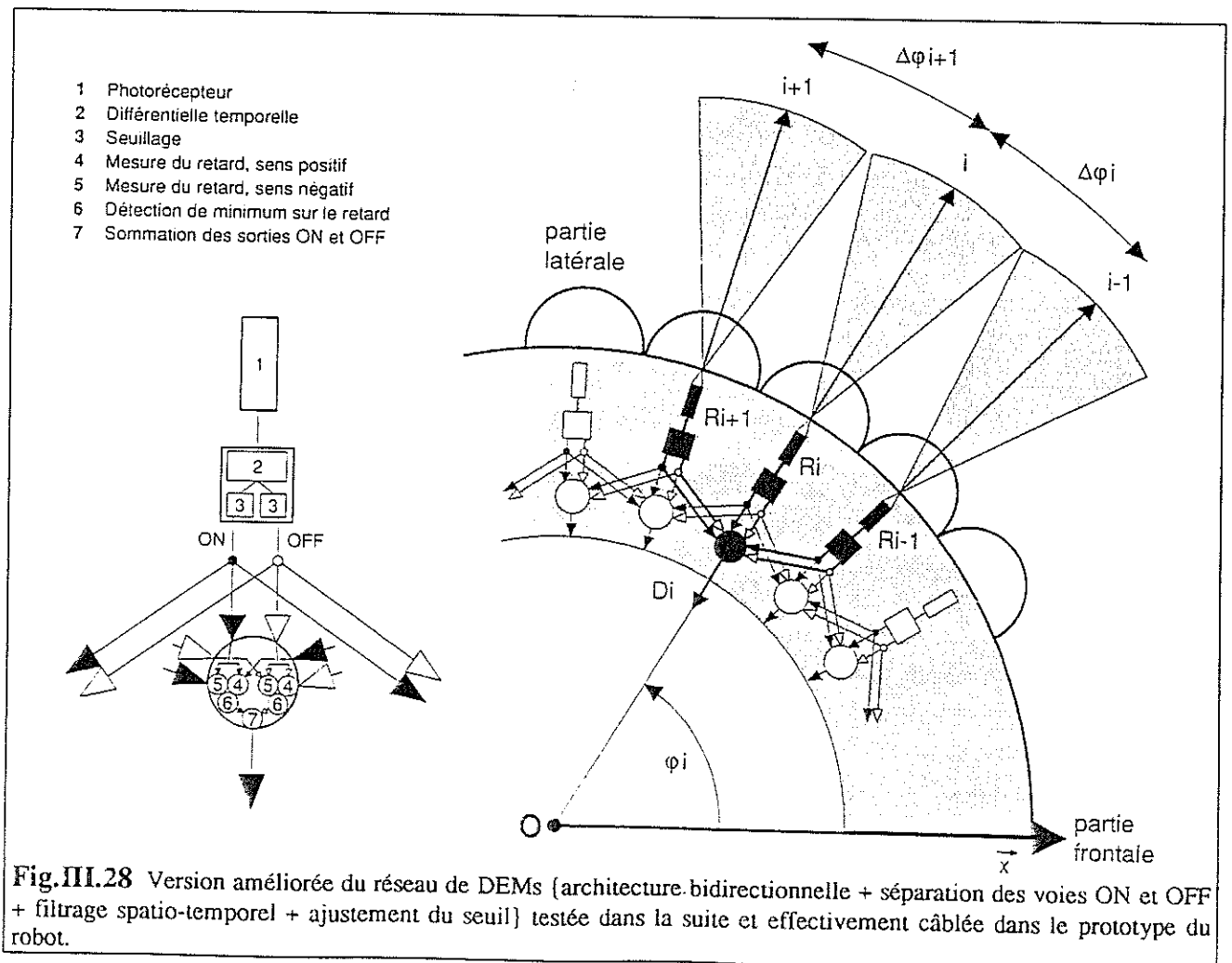
- sur la séparation des voies ON et OFF
- sur l'architecture bidirectionnelle de l'ensemble du détecteur
- sur l'ajustement du filtrage+seuillage pour chaque voie d'entrée du détecteur.

L'architecture bidirectionnelle est nécessaire pour résoudre les problèmes de directionnalité et sert donc à déterminer le signe de la vitesse angulaire. L'ajustement du filtrage+seuillage, quant à lui, permet de résoudre les problèmes de correspondance et d'améliorer l'estimation sur :

- le sens et le module de la vitesse angulaire, pour une *architecture bidirectionnelle*
- uniquement le module de la vitesse angulaire, pour une *architecture monodirectionnelle* (dont le fonctionnement est correct dans un environnement statique et pour des mouvements de translation).

L'ajustement du filtrage+seuillage décrit ci-dessus est d'une part indispensable au DEM bidirectionnel (sans quoi le principe de ce dernier perd tout son intérêt) et reste d'autre part valable pour un DEM monodirectionnel. Dans ce dernier cas, le réglage doit s'effectuer à partir du domaine de validité du DEM monodirectionnel décrit au §.III.2, qui correspond en fait à des fréquences spatiales limites deux fois plus grandes que pour le DEM bidirectionnel.

Le récapitulatif du paragraphe précédent §.III.3.5. montre que malgré le filtrage présent dans le DEM (bidirectionnel ou non), on peut encore observer quelques "cas graves de sous-estimation", mais leur nombre est statistiquement beaucoup plus faible que pour la version sans filtrage. Ces cas peuvent induire des braquages inopinés de la part du robot, qui restent acceptables dans la mesure



où ils sont statistiquement rares et ne peuvent donc perturber la trajectoire que très localement. Par contre la présence du filtrage amplifie le nombre de "cas graves de surestimation" qui rappelons-le (cf. §.III.1.3.) se traduisent par la non-détection de contrastes susceptibles de provoquer une collision. En conséquence, il va falloir tenir compte de ces derniers au niveau de l'ensemble de la boucle optomotrice du robot notamment en augmentant l'anticipation du robot (cf. Chap.IV et Chap.V).

En ce qui concerne le prototype du robot (cf. Thèse C. Blanes, Chap.III), c'est le réseau de DEM récapitulé à la fig.III.28 et basé sur la version {architecture bidirectionnelle + séparation des voies ON et OFF + filtrage spatio-temporel + ajustement du seuil} qui a été effectivement adopté puis réalisé. Chaque DEM a été construit de façon à garder réglable les paramètres essentiels au filtrage, à savoir l'angle d'acceptance de chaque ommatidie, et la valeur du seuil haut du système à hystérésis. Au plan technologique, l'une des raisons ayant conduit à rejeter la solution purement spatiale est la difficulté d'appareiller les photodiodes deux à deux sachant que cette contrainte est fondamentale pour la validité de la différentielle spatiale et le principe du seuillage qui lui succède (cf. Thèse C. Blanes, Chap.III). En rejetant la solution purement spatiale on perd certaines propriétés caractéristiques de la différentielle spatiale et qui sont essentiellement :

- insensibilité naturelle aux phénomènes de changements brusques ou de papillotements de la lumière ambiante
- invariance des caractéristiques du filtrage, vis-à-vis de la vitesse relative entre le robot et son environnement.
- invariance avec la distance de la gamme de sensibilité au contraste ; comme on l'a vu au §.III.3.5., cette propriété peut être considérée comme un inconvénient dans la limitation des problèmes de correspondance, puisque contrairement à la solution spatio-temporelle elle ne privilégie pas les contrastes les plus proches.

En ce qui concerne l'analyse théorique effectuée dans la suite de ce mémoire, la priorité sera donnée à la solution "standard" de DEM effectivement choisie pour le prototype (cf. ci-dessus). Cependant, certaines des autres versions abordées au long de ce chapitre, seront également reprises et comparées entre elles, ne serait-ce que pour confirmer au niveau comportemental du robot (cf. Chap.V) les orientations prises dans l'élaboration du modèle amélioré du DEM présenté ici.

Chapitre IV

L'OEIL-DEM COMPLET : ARCHITECTURE, PERFORMANCES

Chapitre IV

IV.1. CONTEXTE VISUO-MOTEUR

IV.1.1. Situation de l'oeil-DEM dans l'asservissement optomoteur

IV.1.2. Le mode de locomotion et le séquençement des acquisitions visuelles

IV.2. DISTRIBUTION SPATIALE DES DEMS, POUR UN ECHANTILLONNAGE OPTIMUM DU PLAN AZIMUTAL

IV.3. SOLUTION RETENUE : UN OEIL-DEM BASE SUR UNE ZONE DE VISION CIRCULAIRE

IV.3.1. Propriétés fondamentales de cette solution

IV.3.2. Echantillonnage du flux optique dans la direction du mouvement

IV.3.3. Récapitulatif : l'oeil-DEM complet

IV.4. PERFORMANCES DE L'OEIL-DEM COMPLET

IV.4.1. Distribution de la calibration en distance dans le réseau de DEMs.

IV.4.2. Généralisation de l'ajustement filtrage+seuillage à l'ensemble de l'oeil-DEM

a Choix d'un seuil commun à tous les DEMs.

b Distorsion avec l'angle polaire : effet sur la distribution du recouvrement angulaire

IV.4.3. Représentation de l'environnement pendant une translation élémentaire

IV.4.4. Approche plus globale des problèmes de correspondance

IV.5. CONCLUSION

IV.1. CONTEXTE VISUO-MOTEUR

Ce chapitre, qui décrit l'architecture complète de l'oeil-DEM, joue un rôle charnière entre une situation en boucle ouverte (DEMs en mouvement infini de translation rectiligne, cf. Chap.III) et une situation en boucle fermée (fig.IV.1), où la perception vient modifier, via un algorithme d'évitement d'obstacles (cf. Chap.V), le mouvement propre des DEMs embarqués. Ce chapitre souligne notamment la forte interdépendance qui existe entre la partie sensorielle et la partie motrice qui composent l'ensemble de la chaîne optomotrice du robot.

IV.1.1. Situation de l'oeil-DEM dans l'asservissement optomoteur

Le guidage bas niveau d'une créature mobile autonome peut être décrit, sous la forme d'un asservissement où la *consigne* est une contrainte comportementale, où la *perturbation* est l'environnement inconnu et où le système visuel joue le rôle de *feed-back* (fig.IV.1). Dans un tel cas, la trajectoire effectivement suivie par la créature, peut être considérée comme résultant de la régulation d'une (ou plusieurs) contrainte géométrique (ou cinématique) qui caractérise une tâche optomotrice bien précise du robot.

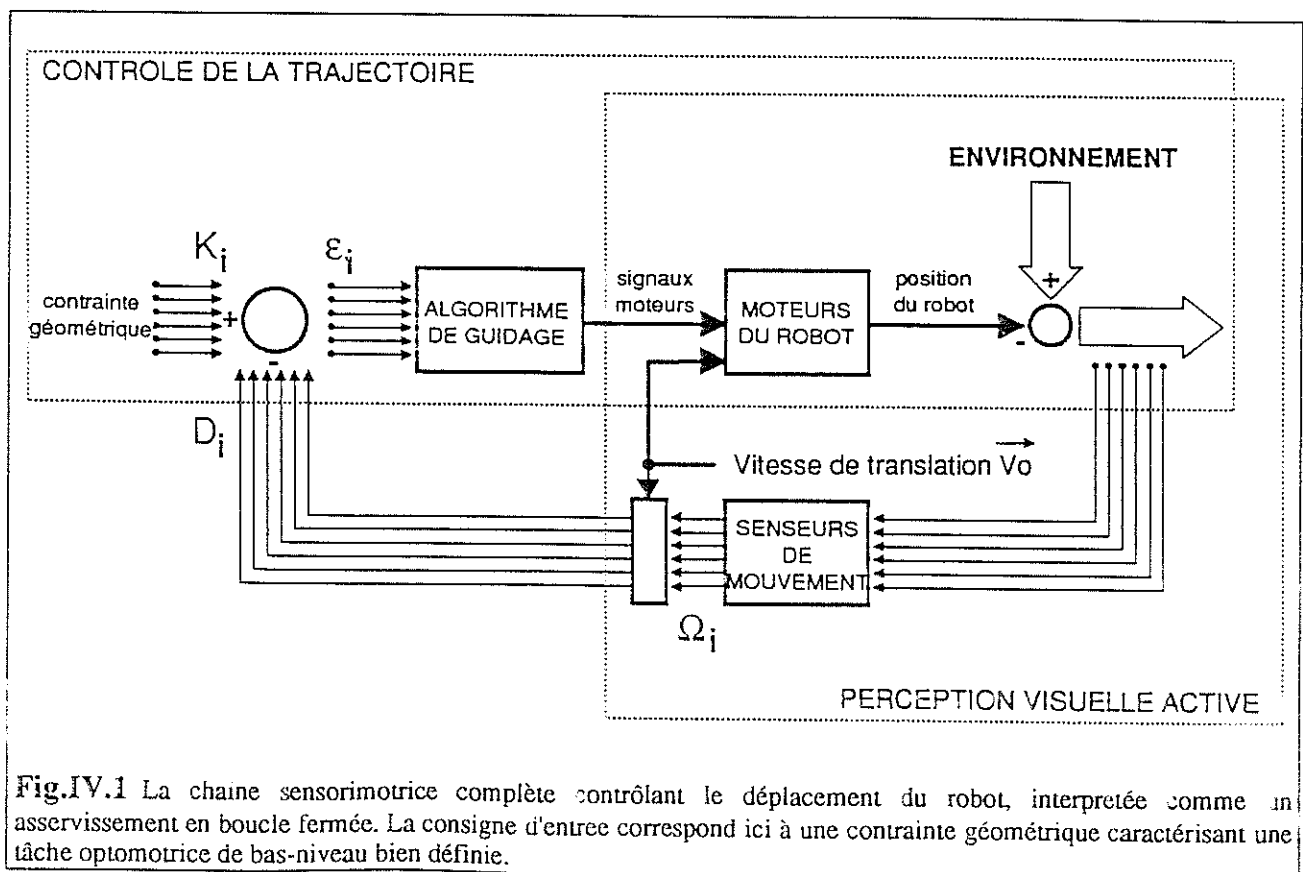


Fig.IV.1 La chaîne sensorimotrice complète contrôlant le déplacement du robot, interprétée comme un asservissement en boucle fermée. La consigne d'entrée correspond ici à une contrainte géométrique caractérisant une tâche optomotrice de bas-niveau bien définie.

Dans notre étude, où la tâche bas-niveau est l'évitement d'obstacles (cf. Chap.V), le vecteur $K \{k_1 \dots k_i \dots k_n\}$, servant de consigne au système en boucle fermée, correspond à un ensemble de distances minimales autorisées entre le centre O du robot et les points de contraste, dans chaque direction optique i de l'oeil-DEM ; la contrainte (éventuellement variable) à laquelle est asservi le centre du robot est dans ce cas, de type géométrique. C'est l'oeil-DEM qui fournit à lui seul le signal de feed-back sensoriel nécessaire à cet asservissement, mais pour cela il a besoin en plus de réguler son propre mouvement car la transformation vitesse-distance par un DEM nécessite un mouvement de translation à vitesse constante V_0 . En conséquence l'oeil-DEM doit être considéré comme un système de *perception visuelle active* (représenté par le carré en pointillés à la fig.IV.1) où l'aspect moteur joue un rôle essentiel (Bolles et al. 1987, Ballard 1987, Skifstad et Jain 1989, Sandini et Dario 1989) mais où il doit en même temps rester compatible (cf. paragraphe ci-dessous) avec la navigation proprement dite du robot.

IV.1.2. Le mode de locomotion et le séquençement des acquisitions visuelles

D'une part l'estimation en distance par les DEMs, nécessite des mouvements de translation pure, d'autre part le robot ne peut pas garder une trajectoire rectiligne puisqu'il doit contourner les obstacles. Le compromis entre ces deux contraintes opposées, est d'imposer au robot le mode de locomotion présenté au Chap.II, basé sur une succession alternée de translations élémentaires consacrées à l'acquisition visuelle, et de mouvements de braquage consacrés aux changements de direction (fig.IV.2a). A la fin de chaque translation élémentaire, l'oeil-DEM doit avoir construit une nouvelle représentation polaire (au moins locale) de l'environnement ; cette information est alors instantanément transformée en une consigne de braquage, qui permet au robot d'entamer sans danger de collision la translation suivante et donc un nouveau cycle acquisition+braquage. Le séquençement des acquisitions visuelles (fig.IV.2a) est aperiodique car la durée des mouvements de

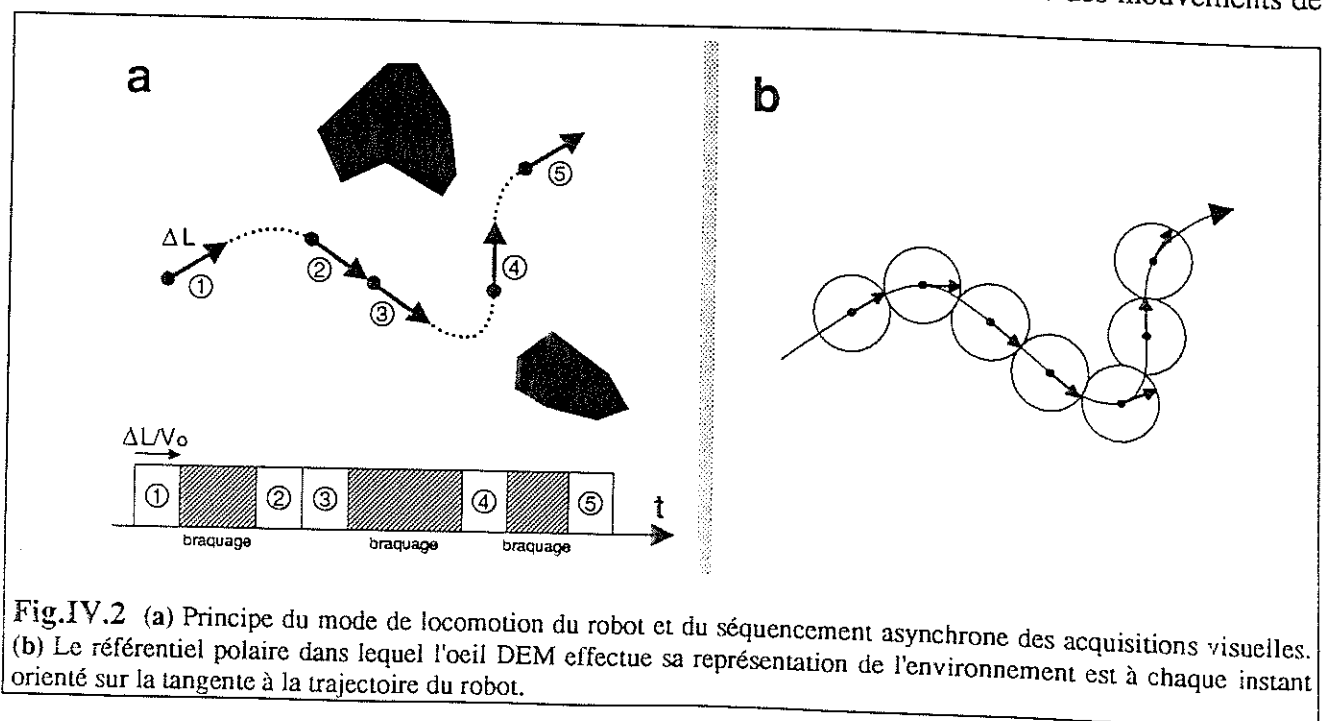


Fig.IV.2 (a) Principe du mode de locomotion du robot et du séquençement asynchrone des acquisitions visuelles. (b) Le référentiel polaire dans lequel l'oeil DEM effectue sa représentation de l'environnement est à chaque instant orienté sur la tangente à la trajectoire du robot.

braquage varie avec la valeur de l'angle à tourner (cf. Chap.V). En conséquence, les cycles acquisition+braquage ne sont pas synchronisés sur une horloge centrale périodique mais apparaissent au cours du temps de façon aléatoire, selon la composition locale de l'environnement. Cependant à l'intérieur d'un même cycle, un signal de fin de braquage en provenance des codeurs optiques des moteurs de rotation et coïncidant avec le début d'une translation élémentaire, synchronise les opérations suivantes :

- le déclenchement du système régulant la longueur ΔL des translations élémentaires (cf. Thèse C. Blanes Chap.VI).
- la construction d'une nouvelle carte polaire de l'environnement que le système anticollision mémorise seulement pendant la durée d'un cycle (cf. Chap.V).
- la remise à zéro de toute mesure de retard entamée par les DEMs avant le début de la translation élémentaire (cf. §.IV.4.3.a) ; le rôle de cette r.a.z. est d'éliminer les mesures de vitesse angulaire commencées pendant le mouvement de braquage, car leur interprétation en distance (qui n'est valable que pour des mouvements de translation) est dans ce cas forcément erronée.

Dans la suite de ce chapitre, nous analyserons les limitations imposées à l'oeil-DEM par ce mode de locomotion et ce séquençement des acquisitions visuelles, où le principal paramètre réglable est la *longueur ΔL des translations élémentaires*.

IV.2. DISTRIBUTION SPATIALE DES DEMS, POUR UN ECHANTILLONNAGE OPTIMUM DU PLAN AZIMUTAL

Par construction (cf. Chap.II), la direction frontale de l'oeil-DEM est à chaque instant colinéaire avec le vecteur vitesse du robot (fig.IV.2b). Cette direction frontale sert d'origine angulaire pour définir l'angle polaire φ_i de chacun des DEMs ; en conséquence la représentation de l'espace que délivre l'oeil-DEM s'effectue dans un système de coordonnées polaires, dont le centre O coïncide avec les centres confondus de l'oeil et du robot, et dont l'origine angulaire est la tangente à la trajectoire du robot (fig.IV.2b). Les coordonnées polaires de chaque point de contraste ainsi détecté par l'oeil DEM, sont codées par un *signal analogique* pour la valeur D_i de sa distance radiale et par la *position même du DEM* pour la valeur φ_i de son angle polaire ("codage de position").

La longueur ΔL des translations élémentaires consacrées aux acquisitions visuelles doit être minimisée de manière à augmenter la fréquence de ces dernières, et partant de là, la précision de la trajectoire. Cependant, le fait de limiter la longueur des translations élémentaires restreint le nombre de contrastes effectivement détectés par chaque DEM, en éliminant tous ceux qui au cours de la translation élémentaire, n'arrivent pas couper successivement les deux axes du DEM+ (sous-

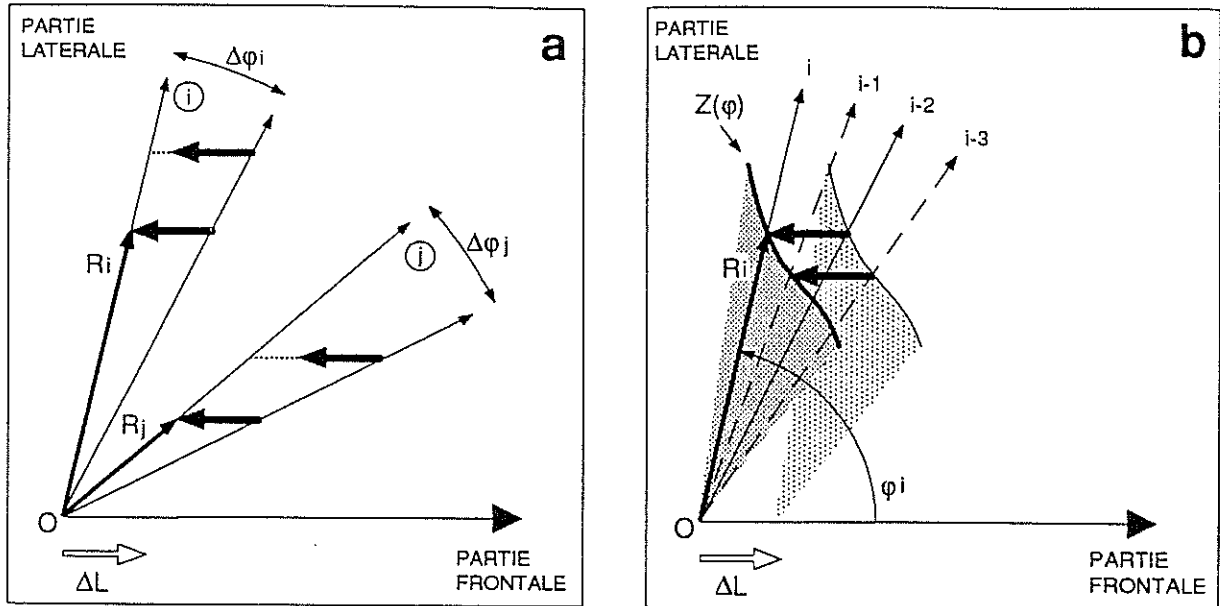


Fig.IV.3 (a) Pour une translation ΔL donnée, il existe pour chaque DEM une distance limite $R_i(\Delta L)$ au delà de laquelle les contrastes ne coupent plus les deux directions i et $i-1$ du DEM+, et de ce fait ne peuvent pas être détectés. (b) Méthode pour calculer la distribution des axes optiques de l'oeil-DEM en association avec une "zone de visibilité" limitée par la courbe polaire $R_i = Z(\phi_i)$; cette dernière est le périmètre à l'intérieur duquel tout contraste peut être détecté à partir de la seule translation ΔL .

DEM du DEM bidirectionnel, mesurant les mouvements positifs) et donc ne peuvent pas activer ce dernier ; cette limitation peut être formalisée de la façon suivante :

- pour un DEM $_i$ et pour une longueur ΔL de translation donnés, il existe toujours une distance limite $R_i(\Delta L)$ au delà de laquelle un contraste ne peut plus être détecté par le demi+ (fig.IV.3a).
- cette distance limite $R_i(\Delta L)$ dépend uniquement des paramètres géométriques ϕ_i et $\Delta\phi_i$ du détecteur considéré, et peut être exprimée de la façon suivante (cf. Chap.II, éq.II.3) :

$$R_i(\Delta L) = \Delta L \cdot \sin(\phi_{i-1}) / \sin(\Delta\phi_i) \quad (\text{éq.IV.1})$$

Par exemple dans la situation illustrée à la fig.IV.3a, où les deux DEM+ considérés, ont le même angle interommatidial ($\Delta\phi_i = \Delta\phi_j$), la distance limite $R_i(\Delta L)$ varie dans le même sens que l'angle polaire ϕ_i du DEM considéré, et tend vers zéro dans la direction du mouvement.

La propriété précédente se traduit par le fait que, pour une répartition géométrique donnée des axes visuels de l'oeil-DEM, il existe dans le plan azimutal une "zone de visibilité" ayant une forme spécifique limitée par la courbe $R_i(\Delta L) = Z(\phi_i)$; cette "zone de visibilité" définit le lieu géométrique de tous les points pouvant être potentiellement détectés par l'oeil-DEM au cours d'une translation élémentaire de longueur ΔL .

La fig.IV.3b, montre de façon schématique la méthode adoptée pour calculer la distribution des axes visuels de l'oeil-DEM. Cette méthode permet d'obtenir une "zone de visibilité" de forme quelconque $Z(\phi_i)$ (partie grisée à la fig.IV.3b) :

Une première trame d'axes (trame paire, correspondant aux axes i et $i-2$ de la fig.IV.3b) est obtenue à partir de la relation récurrente ci-dessous, issue de l'éq.IV.1 :

$$\sin(\varphi_i - \varphi_{i-2}) = \sin(\varphi_{i-2}) \cdot \Delta L / Z(\varphi_i) \quad (\text{eq.IV.2})$$

Cette première trame d'axes visuels, n'est cependant pas suffisante pour résoudre les problèmes d'échantillonnage du mouvement à l'intérieur de la "zone de visibilité". En effet, pour qu'un contraste localisé à la distance radiale limite $R_i(\Delta L)$, coupe au moins deux axes visuels successifs lors d'une translation ΔL , la période d'échantillonnage linéaire à la distance R_i doit être inférieure ou égale à $\Delta L/2$. Si cette dernière condition, apparentée là-encore au théorème d'échantillonnage (Shannon), n'est pas vérifiée, alors certains contrastes peuvent pénétrer à l'intérieur de la "zone de visibilité" sans activer un seul DEM et donc sans être détectés. En conséquence, une seconde trame d'axes visuels, (trame impaire représentée en lignes pointillées et notée $i, i-3$ à la fig.IV.3b) est calculée à partir de la même relation récurrente (eq.IV.2) que pour la trame paire, et est intercalée avec la trame paire. Cette intercalation s'effectue par le choix des axes initiaux permettant le calcul de chaque trame. Par exemple si le calcul récurrent est appliqué dans le sens des angles décroissants, si les deux trames comportent chacune n axes, et si φ_{2n} est l'angle initial pour la trame paire, alors l'angle initial φ_{2n-1} pour la trame impaire est obtenu à partir de la relation suivante:

$$\sin(\varphi_{2n} - \varphi_{2n-1}) = \sin(\varphi_{2n-1}) \cdot (\Delta L/2) / Z(\varphi_{2n}) \quad (\text{eq.IV.3})$$

Remarque: au lieu de fabriquer la distribution angulaire à partir de deux trames intercalées, chacune étant établie à partir de la récurrence IV.2 paramétrée par ΔL , on peut envisager de n'utiliser qu'une seule trame basée également sur la récurrence IV.2 mais paramétrée par $\Delta L/2$ comme dans l'éq.IV.3. Cette seconde solution a été étudiée mais rejetée, car contrairement à la première, elle conduit à une "zone de visibilité" réelle qui n'inclut pas la "zone de visibilité" $Z(\varphi)$ attendue. La différence entre ces deux méthodes est illustrée à la fig.IV.6 pour une architecture optique associée à une "zone de visibilité" circulaire (cf. §.IV.3.).

La méthode de calcul de l'architecture optique de l'oeil qui vient d'être décrite, peut être appliquée pour synthétiser une zone de visibilité ayant n'importe quelle forme. La fig.IV.4 en illustre trois exemples:

- a) une zone de visibilité ayant une forme arbitraire et qui illustre la généralité de la méthode.
- b) une zone de visibilité résultant d'une distribution uniforme pour laquelle tous les angles interommatidiaux $\Delta\varphi_i$ sont considérés comme égaux entre eux.
- c) une zone de visibilité circulaire concentrique avec l'oeil-DEM, et l'architecture optique qui lui est associée. Cette forme circulaire induit un gradient dans la distribution angulaire des axes optiques, de manière telle que l'angle interommatidial soit beaucoup plus faible dans la direction frontale que dans les directions latérales de l'oeil-DEM.

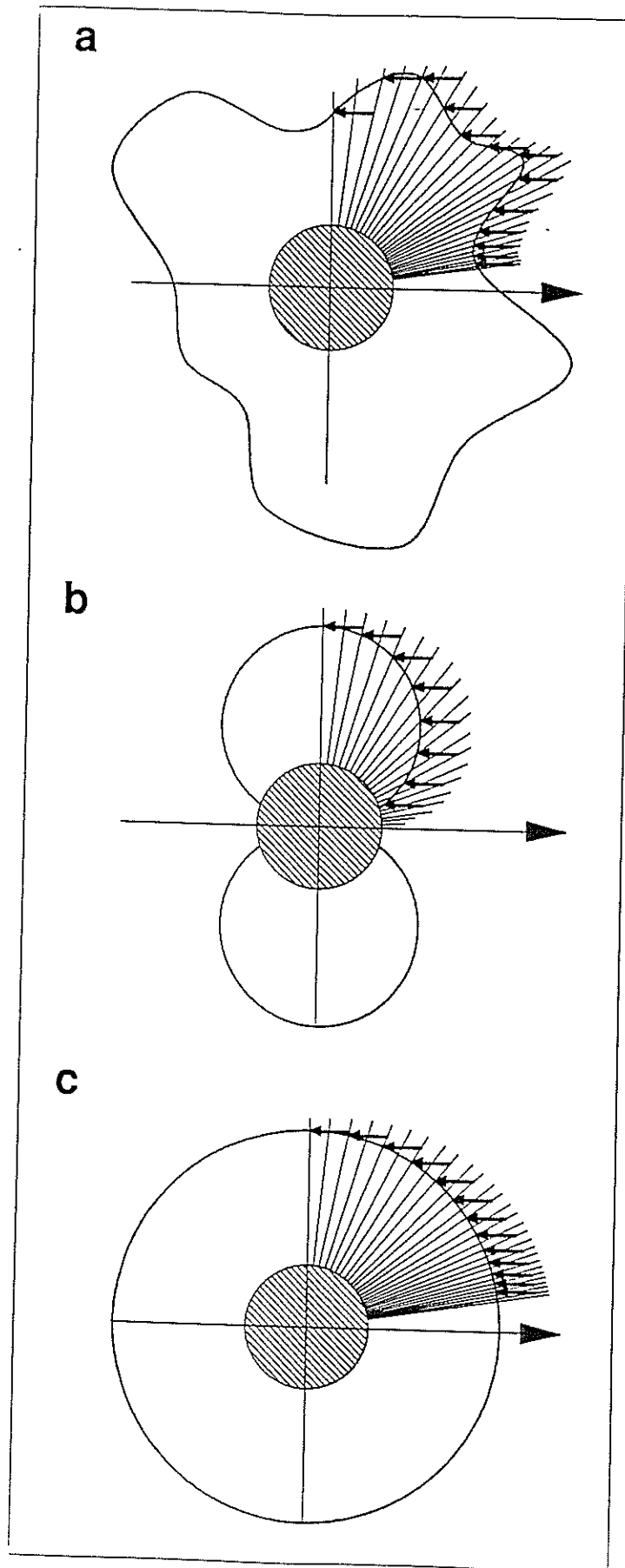


Fig.IV.4 Diverses architectures optiques pour l'oeil-DEM, avec les zones de visibilité qui leur sont associées. (a) Cas le plus général. (b) Distribution angulaire uniforme avec des angles interommatidiaux égaux entre eux. (c) Distribution angulaire en gradient spécifiquement conçue pour obtenir une zone de visibilité circulaire.

IV.3. SOLUTION RETENUE : UN OEIL-DEM BASE SUR UNE ZONE DE VISION CIRCULAIRE

La stratégie d'évitement d'obstacles choisie pour le robot (cf. Chap.V) fait appel, comme on l'a déjà vu, à un cercle de vision (rayon R_v) définissant un périmètre de sécurité autour du robot. Plus précisément, rappelons qu'un contraste est considéré comme "dangereux" et donc pris en compte par l'algorithme anticollision que s'il est détecté à l'intérieur du périmètre de sécurité. Au niveau sensoriel cette condition se traduit à deux niveaux :

- 1 l'oeil-DEM doit être capable de déterminer si la distance radiale D de chaque contraste détecté est inférieure ou supérieure à R_v , le rayon du cercle de vision ; ce problème a été essentiellement traité au chapitre précédent (cf. Chap.III).

- 2 l'oeil-DEM doit à la fin de chaque cycle d'acquisition avoir systématiquement détecté tout contraste localisé à l'intérieur du périmètre de sécurité (dans la limite de la gamme de sensibilité au contraste de chaque DEM) ; ceci exige que la forme et les dimensions du périmètre de sécurité coïncident avec la "zone de visibilité" de l'oeil-DEM. Ainsi, puisqu'ici le périmètre de sécurité est de forme circulaire, la "zone de visibilité" de l'oeil-DEM a également été choisie circulaire ; l'architecture optique qui lui est associée correspond à la solution illustrée à la fig.IV.4c.

IV.3.1. Propriétés fondamentales de cette solution

Pour une zone de visibilité circulaire $Z(\varphi_i) = \text{constante} = R_v$, la fonction de récurrence (cf. éq.IV.2) permettant de calculer la distribution angulaire des axes devient :

$$\sin(\varphi_i - \varphi_{i-2}) / \sin(\varphi_{i-2}) = G \quad \text{avec : } G = \Delta L / R_v \quad (\text{éq.IV.4})$$

elle est équivalente, pour une récurrence dans le sens des angles décroissant, à :

$$\varphi_{i-2} = \arctang[\sin(\varphi_i) / (\cos(\varphi_i) + G)] \quad (\text{éq.IV.5})$$

Cette fonction récurrente ne dépend que du seul paramètre G (G comme gradient) qui représente le rapport entre la longueur ΔL des translations élémentaires, et le rayon R_v du cercle de vision.

La fig.IV.5 illustre plusieurs distributions angulaires obtenues pour trois valeurs de G différentes (0.1, 0.2, 0.4). Dans ces trois exemples, la portion angulaire effectivement échantillonnée est comprise entre 10° et 90° ; le rayon de vision R_v est représenté constant, c'est donc la valeur ΔL de la translation élémentaire associée à R_v qui dans cette schématisation, varie

avec la valeur de G . Dans les trois cas, le calcul récurrent a été effectué dans le sens des angles décroissant, l'angle initial φ_{2n} pour la trame paire étant de 90° , et l'angle initial pour la trame impaire étant, d'après l'éq.IV.3, défini de la façon suivante :

$$\varphi_{2n-1} = \arctang(2/G) \quad (\text{éq.IV.6})$$

Ce principe de décalage entre des trames paires et impaires, est important dans la mesure où il permet d'obtenir une variation de l'angle interommatidial $\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i-1} \approx (\varphi_i - \varphi_{i-2})/2$ pratiquement uniforme avec l'angle polaire φ_i du DEM, et ce quelle que soit la parité de la direction i .

La fig.IV.6a montre, pour $G = 0.2$, la "zone visuelle" réellement échantillonnée par l'oeil-DEM au cours d'une translation élémentaire ; cette zone (représentée par la courbe en dents de scie de la fig.IV.6a) n'est pas circulaire, cependant elle circonscrit le cercle de vision (R_v) pour laquelle elle a été calculée. La fig.IV.6b illustre la méthode qui aurait consisté à n'utiliser qu'une seule trame pour établir la distribution angulaire, mais avec une loi de récurrence (IV.5) basée sur $\Delta L/2$ au lieu de ΔL . Cet exemple montre que dans un tel cas, le cercle de vision n'est pas parfaitement échantillonné au cours d'une translation élémentaire.

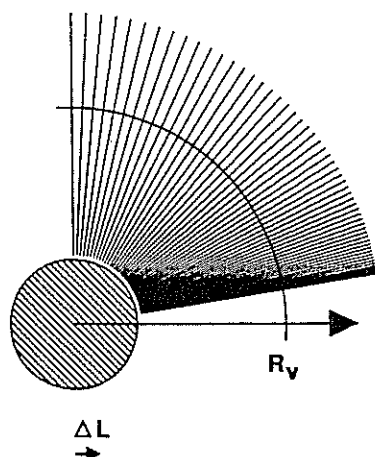
La loi récurrente définie par les éq.IV.4, IV.5, parce qu'elle oblige $\sin(\varphi_i - \varphi_{i-2})$ à varier proportionnellement à $\sin(\varphi_{i-2})$, conduit à une résolution angulaire locale, et donc à un nombre d'axes optiques, qui tend vers l'infini lorsque $\varphi_i \rightarrow 0$ ou $\varphi_i \rightarrow 180^\circ$ (direction polaire de l'oeil-DEM). En pratique, le nombre de DEMs utilisés dans l'oeil étant évidemment limité, on n'a pas d'autre choix que d'envisager une "zone angulaire morte" dans la partie frontale et arrière de l'oeil-DEM. La largeur angulaire de cette zone morte a été fixée ici à une valeur de $\pm 10^\circ$ autour de l'axe polaire de l'oeil-DEM. Un système additionnel a été spécialement conçu pour échantillonner l'environnement dans cette zone morte frontale ; il est détaillé au paragraphe suivant (§.IV.2.2.).

Le paramètre G conditionne en fait la *résolution angulaire moyenne* de l'oeil-DEM, directement quantifiée ici par le nombre N d'axes optiques utilisés pour échantillonner une portion angulaire donnée de l'espace. La fig.IV.7 illustre la variation de N en fonction de G , et ceci pour deux types de champ angulaire :

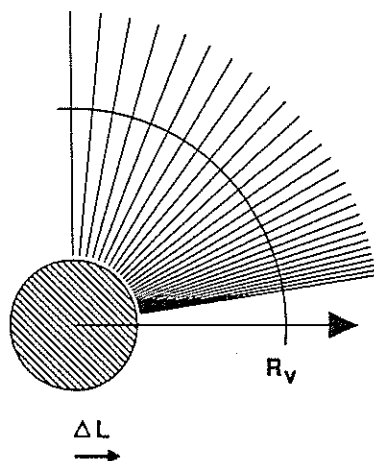
- un champ $90^\circ \rightarrow 10^\circ$ qui couvre un quadrant du champ visuel frontal de l'oeil, auquel est soustraite la demi zone morte frontale ($10^\circ \rightarrow 0^\circ$) ; cette courbe inclut notamment les trois exemples illustrés à la fig.IV.5.
- un champ $90^\circ \rightarrow 1^\circ$ qui correspond au même quadrant que précédemment, mais qui est amputé ici d'une demi-zone morte frontale 10 fois plus petite, à savoir ($1^\circ \rightarrow 0^\circ$).

La fig.IV.7 montre que, quel que soit le champ couvert, la résolution moyenne N , varie de manière non linéaire avec G , et augmente très rapidement lorsque G tend vers 0. Elle montre également que le nombre de DEMs, nécessaire pour couvrir la zone $10^\circ \rightarrow 1^\circ$ est pratiquement égal

$G = 0.1$
 $N = 53$



$G = 0.2$
 $N = 28$



$G = 0.4$
 $N = 16$

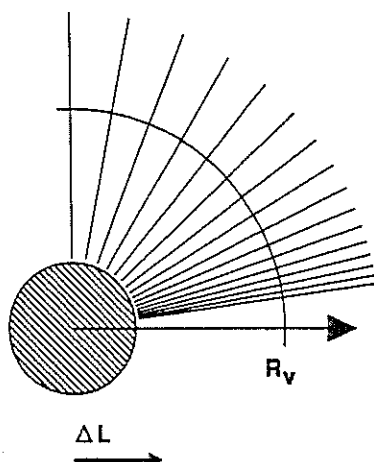


Fig.IV.5 Trois exemples de distributions angulaires en gradient, toutes conçues pour une zone de visibilité circulaire et concentrique à l'oeil-DEM. La résolution angulaire dépend globalement du rapport $G = \Delta L / R_v$ entre la longueur des translations élémentaires et le rayon du périmètre de vision qui lui est associée. Ici, le nombre N de directions optiques, associé à chaque G est donné pour un quart avant de l'oeil-DEM amputé d'une zone frontale de $0^\circ \rightarrow 10^\circ$.

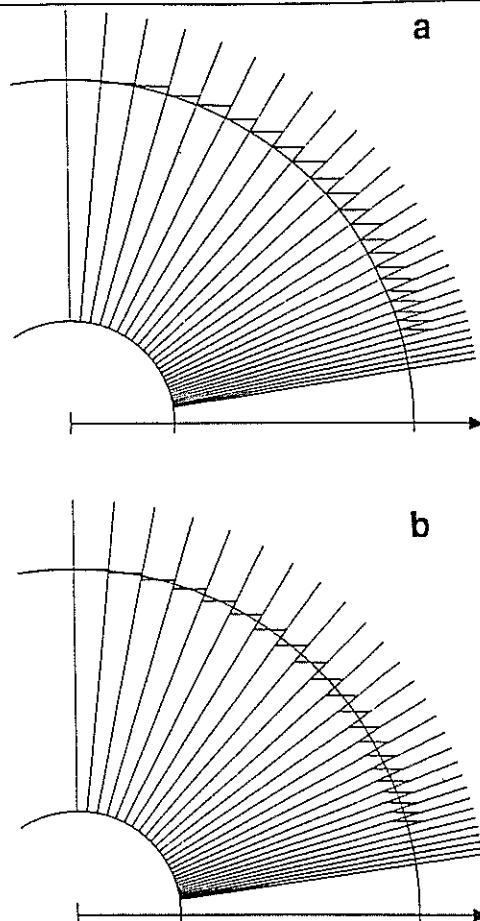


Fig.IV.6 Zone visuelle réellement échantillonnée par l'oeil-DEM au cours d'une translation élémentaire. (a) Distribution reposant sur deux trames intercalées, chacune paramétrée par ΔL . (b) Distribution établie à partir d'une trame unique mais paramétrée par $\Delta L/2$.

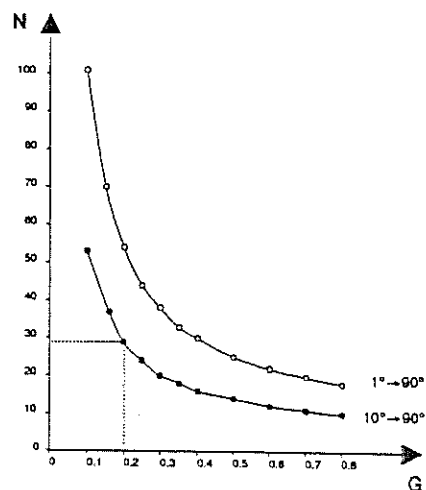


Fig.IV.7 La résolution angulaire moyenne de l'oeil-DEM portée en fonction du paramètre $G = \Delta L / R_v$. Deux cas sont considérés ici : une zone morte de $0 \rightarrow 10^\circ$ (ronds noirs) et une zone morte $0^\circ \rightarrow 1^\circ$ (ronds blancs). Le point de coordonnées $G=0.2$ et $N=28$ correspond à l'architecture effectivement étudiée dans la suite.

à celui nécessaire pour couvrir la zone $90^\circ \rightarrow 10^\circ$, pourtant 9 fois plus grande. C'est donc l'échantillonnage des régions dans l'axe frontal et postérieur de l'oeil qui coûte cher en DEMs.

Choix d'une valeur pour G

Ce choix résulte, là encore, d'un compromis entre deux contraintes opposées:

- 1 d'une part le choix délibéré de basse résolution et de parcimonie impose de minimiser le nombre de DEMs pour échantillonner les 360° du plan azimutal, ce qui revient à maximiser G.
- 2 mais d'autre part la précision relative entre la trajectoire du robot et son environnement dépend, comme cela est montré au chapitre suivant (cf. Chap.V), directement du rapport $G = \Delta L / R_v$, et améliorer cette précision nécessite de diminuer G.

Dans le cadre de ce projet, on a adopté la valeur $G=0.2$. Cette valeur, associée à une zone morte avant et arrière de $\pm 10^\circ$, conduit à une architecture panoramique comprenant un nombre de DEMs (cf. récapitulatif au §.IV.3.3.) similaire à celui qui caractérise la section équatoriale de l'oeil de la mouche domestique (de l'ordre de la centaine, cf. Annexe).

Equipé de l'architecture optique qui vient d'être présentée le robot, possède la propriété fondamentale suivante, résumée par l'éq.IV.7 : s'il désire détecter systématiquement tous les contrastes situés à l'intérieur d'un cercle de vision donné, alors il doit effectuer une translation élémentaire dont la longueur minimum ΔL est proportionnelle au rayon R_v de ce cercle de vision (cf. fig.IV.8) :

$$\boxed{\Delta L = G \cdot R_v} \quad (\text{éq.IV.7})$$

En d'autres termes, et comme le montre la fig.IV.8, plus la translation effectuée par l'oeil-DEM est importante, plus la profondeur de son champ de vision est grande. Par exemple si l'algorithme anticollision nécessite un périmètre de sécurité de rayon égal à 50cm et si $G = 0.2$, alors la locomotion du robot devra s'effectuer sur la base de translations élémentaires de 10cm.

IV.3.2. Echantillonnage du flux optique dans la direction du mouvement

La distribution en gradient telle qu'elle vient d'être décrite, n'est pas valable dans les directions avant et arrière de l'oeil. Dans ces directions, qui coïncident avec le pôle du flux visuel, les vitesses angulaires tendent vers zéro et donc ne peuvent être échantillonnées par des DEMs dont l'origine se situe sur l'axe du mouvement.

La solution adoptée ici (fig.IV.9) pour échantillonner la zone morte frontale ($\pm 10^\circ$), est d'ajouter deux groupes symétriques de DEMs dont les origines polaires sont décalées par rapport au centre de l'oeil (centre principal O). Ce décalage s'effectue dans la direction opposée, à

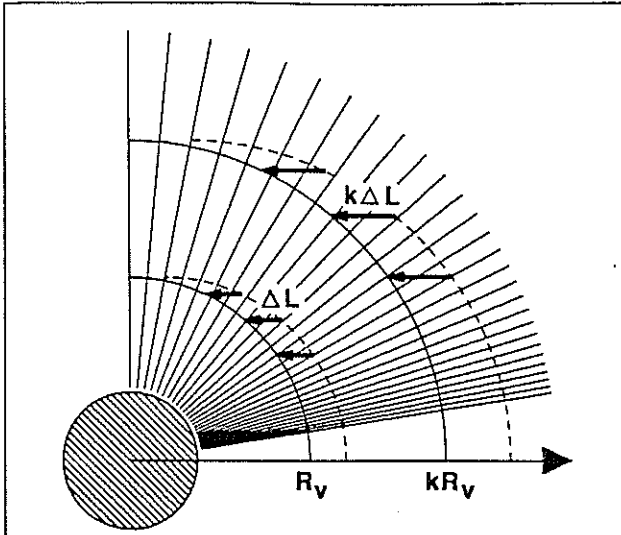


Fig.IV.8 Avec la distribution spatiale adoptée ici, la portée du champ de vision R_v , est proportionnelle à la longueur ΔL des translations élémentaires ; dans cet exemple $G=0.2$.

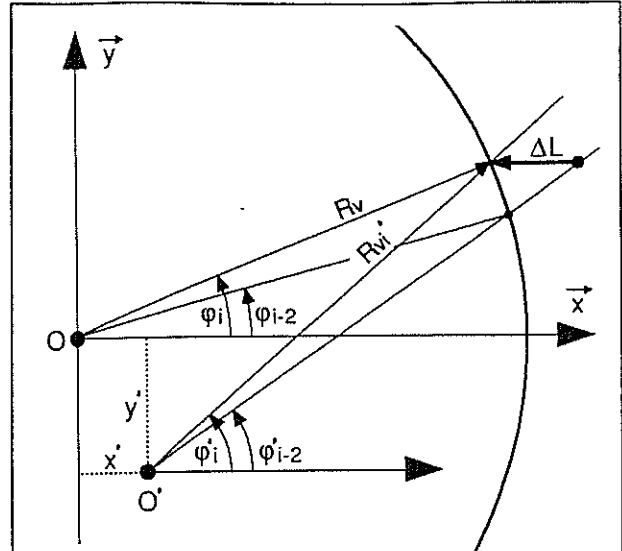


Fig.IV.9 Principe de l'échantillonnage de la zone frontale avant, en utilisant des DEMs dont le centre (O') est décalé par rapport au centre principal (O) de l'oeil.

l'hémichamp à échantillonner. Le principe permettant d'établir la distribution angulaire de ces DEMs additionnels est une généralisation de la loi récurrente précédente (éq.IV.5). Il consiste ici à échantillonner un cercle de rayon R_v et de centre O , à partir d'un centre secondaire O' exprimé par son décalage frontal x' et latéral y' par rapport à O (fig.IV.9) et formellement s'exprime de la façon suivante:

$$\phi_{i-2}' = \arctan\left[\frac{\sin(\phi_i')}{\cos(\phi_i') + \Delta L / R_{vi}'} \right] \quad (\text{éq.IV.8})$$

avec :

$$R_{vi}' = \left[R_v^2 - (x' \cdot \sin(\phi_i') - y' \cdot \cos(\phi_i'))^2 \right]^{1/2} - (x' \cdot \cos(\phi_i') + y' \cdot \sin(\phi_i')) \quad (\text{éq.IV.9})$$

Dans ces deux équations ϕ_i' et R_{vi}' représentent le paramétrage en coordonnées polaires du cercle de vision dans le repère lié à O' . La relation qui permet d'exprimer ϕ_i' dans le repère centré sur l'oeil est la suivante :

$$\phi_i = \phi_i' - \arcsin\left[(x' \cdot \sin(\phi_i') - y' \cdot \cos(\phi_i')) / R_v \right] \quad (\text{éq.IV.10})$$

On vérifie que lorsque x' et y' tendent vers zéro, alors $\phi_i = \phi_i'$ (éq.IV.10), $R_{vi}' = R_v$ (éq.IV.9), et l'éq.IV.8 se ramène à l'éq.IV.5 caractérisant le gradient centré.

Cet ensemble de DEMs décentrés ne peut par construction optique, échantillonner la zone morte frontale que sur le cercle de vision, pour lequel sa distribution angulaire a été calculée. Ce système additionnel possède donc les mêmes limitations que celles d'un *proximètre*, à savoir, une portée visuelle qui est prédéterminée. Cela signifie que l'étendue du champ de vision (en terme d'estimation en distance) dans la zone frontale de l'oeil, ne peut, comme dans sa zone latérale, varier avec la longueur des translations élémentaires. Augmenter la portée du *proximètre* nécessite de

modifier ce dernier, tant au niveau de l'orientation qu'au niveau du nombre des DEMs décentrés qui le constituent.

D'autre part, les DEMs décentrés, ne bénéficient pas de l'avantage fondamental, qui caractérise le reste de l'oeil-DEM, qui est d'offrir directement une représentation de l'espace en *coordonnées polaires indépendantes*, dans un *référentiel directement centré sur le robot*. L'utilisation de DEMs décentrés sur un centre secondaire O' nécessite une transformation supplémentaire $D_i = T_d(D_i', \varphi_i')$ et $\varphi_i = T_\varphi(D_i', \varphi_i')$ afin de transposer la position des contrastes détectés par le proximètre dans le système de coordonnées centré sur le robot. Ce changement de repère polaire fait appel à des fonctions T_d et T_φ à deux variables, qui ne traitent pas indépendamment la distance radiale et l'angle polaire de chaque contraste mesuré par un DEM décentré. Cependant, puisque le proximètre a été construit ici sur la base d'un cercle de vision R_v unique centré sur le robot, on peut considérer que la fonction T_φ transformant l'angle polaire φ_i' en φ_i se ramène à la fonction à une seule variable représentée par l'éq.IV.10, et paramétrée par R_v , x' et y' .

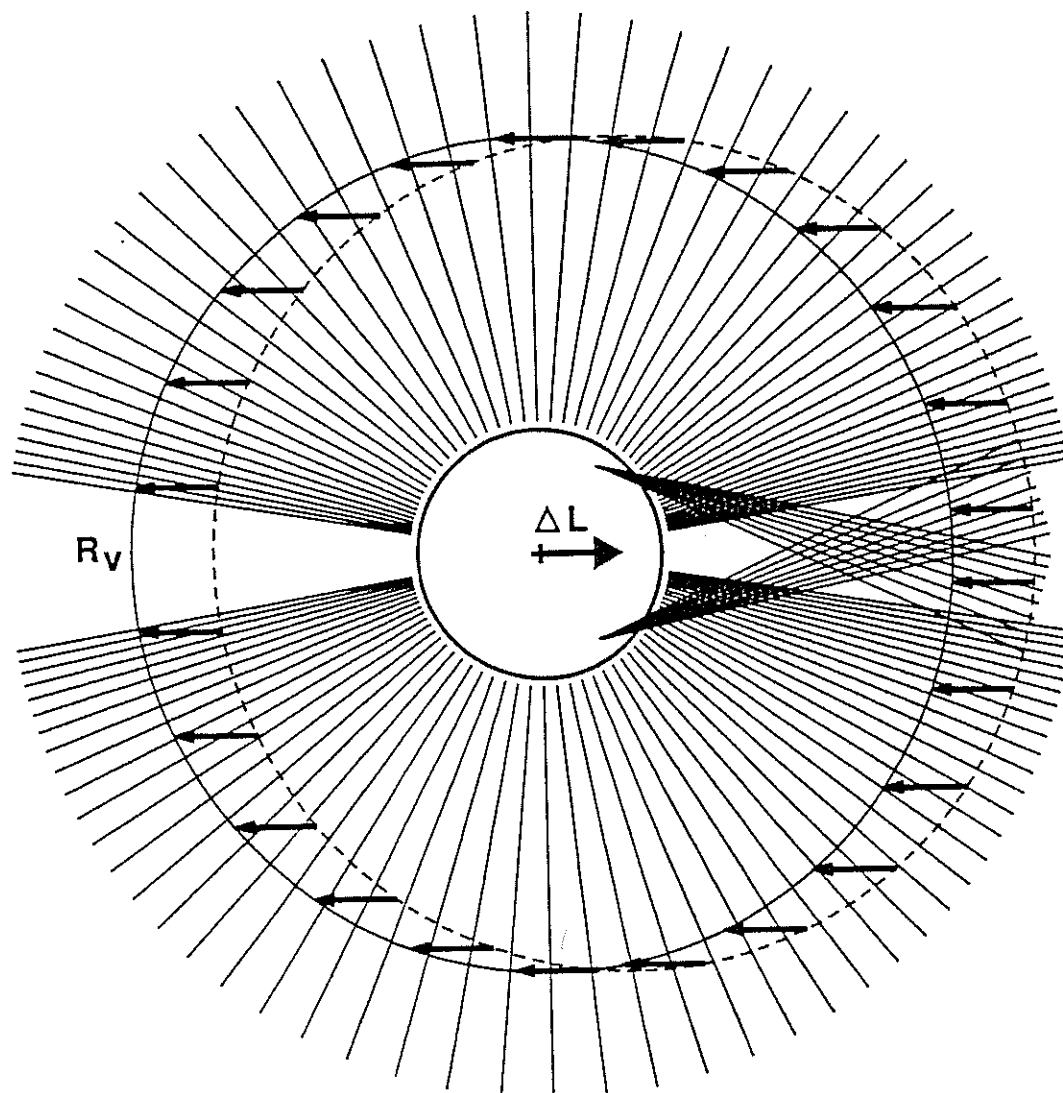
Pour la tâche d'évitement d'obstacles développée au chapitre suivant, les limitations du système proximétrique frontal restent acceptables dans la mesure où l'algorithme anticollision fait appel à un cercle de vision prédéterminé de rayon $R_v=50\text{cm}$ (celui d'ailleurs pour lequel le proximètre est effectivement calculé).

IV.3.3. Récapitulatif : l'oeil-DEM complet

La fig.IV.10 présente le récapitulatif de l'architecture optique complète de l'oeil-DEM telle qu'elle sera simulée dans la suite. Elle comprend au total *118 directions optiques* et est construite sur la base des paramètres suivants :

- le rayon physique du robot $R_o=15\text{cm}$: ce paramètre influe d'une part sur la position du centre de chaque lentille du système latéral, et d'autre part délimite l'espace où les centres secondaires du système proximétrique peuvent être positionnés de manière réaliste pour le prototype.
- le rayon de vision $R_v=50\text{cm}$: ce paramètre détermine le calcul de la partie proximétrique
- la valeur du gradient $G=0.2$: comme on l'a vu précédemment ce paramètre est lié au nombre de directions optiques effectivement utilisées pour construire l'ensemble de l'oeil, et détermine la taille minimale $\Delta L=10\text{cm}$ des translations élémentaires associées au cercle de vision $R_v=50\text{cm}$.

Tous ces paramètres sont représentés à la fig.IV.10, où est également schématisé le mouvement relatif du cercle de vision (cercle-pointillé $\rightarrow$ cercle-plein) au cours d'une translation élémentaire de longueur ΔL .



partie proximétrique		partie latérale avant		partie latérale arrière	
φ_i' / O'	$\Delta\varphi_i$	φ_i	$\Delta\varphi_i$	φ_i	$\Delta\varphi_i$
12.10.....		9.16.....		95.77.....	5.77
13.45.....	1.35	10.04.....	0.87	101.54.....	5.77
14.80.....	1.35	10.99.....	0.95	107.25.....	5.71
16.43.....	1.63	12.03.....	1.04	112.84.....	5.59
18.05.....	1.62	13.17.....	1.14	118.26.....	5.42
20.00.....	1.95	14.42.....	1.25	123.46.....	5.20
21.93.....	1.93	15.79.....	1.36	128.40.....	4.95
24.24.....	2.31	17.28.....	1.49	133.06.....	4.66
		18.91.....	1.62	137.42.....	4.36
		20.68.....	1.78	141.47.....	4.04
		22.62.....	1.94	145.20.....	3.73
		24.73.....	2.11	148.62.....	3.42
		27.03.....	2.30	151.75.....	3.13
		29.53.....	2.50	154.60.....	2.85
		32.25.....	2.71	157.18.....	2.58
		35.19.....	2.94	159.52.....	2.34
		38.37.....	3.18	161.63.....	2.11
		41.81.....	3.44	163.53.....	1.90
		45.51.....	3.70	165.25.....	1.71
		49.47.....	3.97	166.78.....	1.54
		53.71.....	4.24	168.17.....	1.38
		58.22.....	4.50	169.40.....	1.23
		62.98.....	4.77	170.52.....	1.11
		68.00.....	5.02		
		73.25.....	5.25		
		78.69.....	5.44		
		84.29.....	5.60		
		90.00.....	5.71		
φ_i' / O'	φ_i / O				
12.10.....	-1.24				
13.45.....	-0.02				
14.80.....	1.21				
16.43.....	2.71				
18.05.....	4.21				
20.00.....	6.03				
21.93.....	7.84				
24.24.....	10.04				
$O' (+7\text{cm}, -10.3\text{cm})$					
$R_v = 50\text{cm}$					

Fig.IV.10 Récapitulatif de l'architecture optique de l'oeil-DEM complet. Cette architecture comprend 118 directions optiques réparties en deux hémichamps symétriques (le droit et le gauche). Chaque hémichamp (détaillé dans le tableau ci-contre) comprend un système latéral avec un champ ($10^\circ \rightarrow 170^\circ$) et un système proximétrique frontal avec un champ ($0^\circ \rightarrow 10^\circ$). La distribution de l'ensemble des axes visuels respecte un gradient $G=0.2$. Un tel oeil est spécifiquement conçu pour détecter et estimer la distance de n'importe quel point de contraste qui, au cours d'une translation élémentaire de longueur ΔL , pénètre à l'intérieur d'un cercle de vision de rayon R_v .

L'hémichamp droit et l'hémichamp gauche de l'oeil sont symétriques par rapport à son axe polaire. Chaque hémichamp comprend deux sous-systèmes :

- 1 le système "latéral grand champ" composé de DEMs centrés, qui échantillonne la zone $10^\circ \rightarrow 170^\circ$ et comporte ici 51 axes optiques.
- 2 le système "frontal petit champ" composé de DEMs décentrés, qui échantillonne de manière proximétrique la zone $0^\circ \rightarrow 10^\circ$: il comporte 8 axes optiques et son centre secondaire O' est situé dans l'hémichamp opposé à celui qu'il échantillonne. La position de O' a été calculée de façon à minimiser le nombre de DEMs utilisés dans ce système proximétrique, ce qui revient à décentrer O' le plus possible par rapport à O, tout en le maintenant à l'intérieur du périmètre physique du robot (Ro); la position ainsi établie pour O' est $x'=+7\text{cm}$ et $y'=-10.3\text{cm}$. La valeur des angles ϕ_i mesurée par rapport à O' et la valeur correspondante ϕ_i mesurée par rapport à O (pour une distance de 50cm) sont précisés dans le tableau au bas de la fig.IV.10.

Dans le cas du prototype (cf. Thèse C. Blanes, Chap.IV), l'architecture réalisée est identique à celle présentée à la fig.IV.10, mis à part le fait que chaque partie latérale (DEMs centrés) a été amputée de 5 directions optiques (une à l'arrière et quatre à l'avant). Cette modification permet de limiter la valeur minimum de l'angle interommatidial et ainsi de disposer les lentilles de manière simple sur la périphérie du robot. Elle entraîne ainsi un accroissement de la zone morte frontale à une valeur de $\pm 13^\circ$ et nécessite un système proximétrique légèrement différent de celui présenté à la fig.IV.10 et qui comporte en fait 10 axes optiques au lieu de 8. L'oeil-DEM du prototype comprend donc au total 112 directions optiques au lieu de 118. Pour chaque hémichamp, le système "latéral grand champ" repose sur l'optique composée (une direction optique $\rightarrow$ une lentille) évoquée jusqu'à présent ; par contre, dans le cas du prototype, le système proximétrique "frontal petit champ" fait appel à une lentille unique (une par hémichamp, distance focale = 50mm) servant d'optique commune aux 10 directions nécessaires à l'échantillonnage d'un hémichamp frontal.

IV.4. PERFORMANCES DE L'OEIL-DEM COMPLET

IV.4.1. Distribution de la calibration en distance dans le réseau de DEMs.

Le gradient optique caractérisant la distribution des axes visuels de l'oeil-DEM présente la propriété suivante : à une distance donnée D_i , il rend invariant avec l'angle polaire ϕ_i le retard temporel $TC(i-1,i+1)$ nécessaire à un contraste C pour couper successivement les trois axes d'un même DEM bidirectionnel :

$$TC(i-1,i+1) = \Delta L / V_o = G \cdot D_i / V_o \quad (\text{éq.IV.11})$$

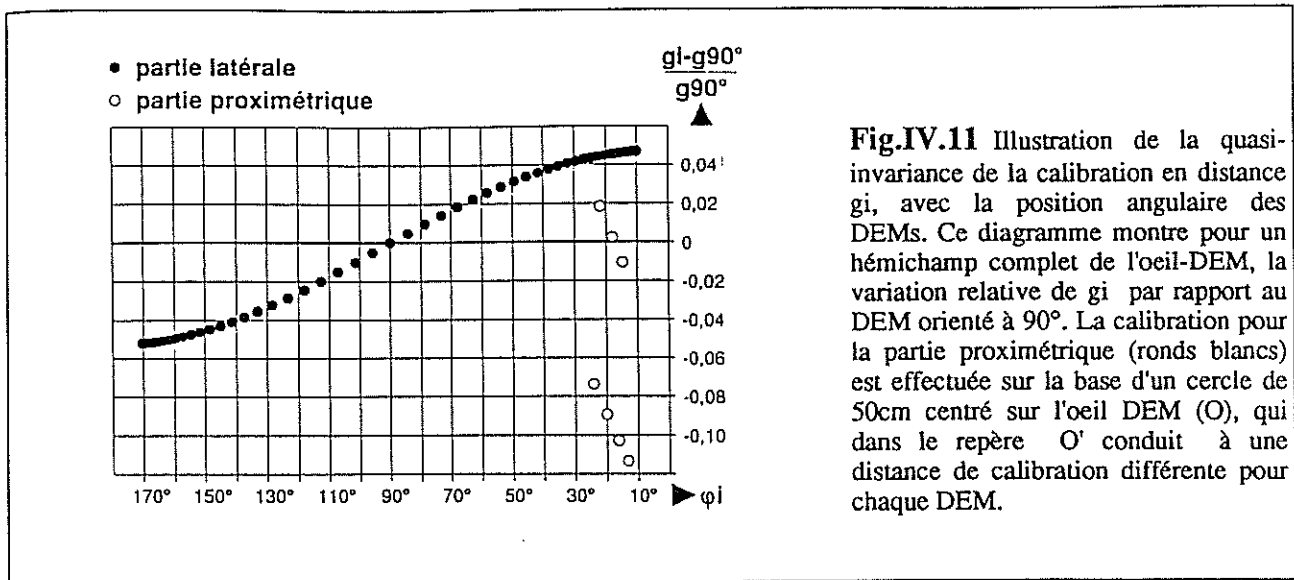


Fig.IV.11 Illustration de la quasi-invariance de la calibration en distance g_i , avec la position angulaire des DEMs. Ce diagramme montre pour un hémichamp complet de l'oeil-DEM, la variation relative de g_i par rapport au DEM orienté à 90° . La calibration pour la partie proximétrique (ronds blancs) est effectuée sur la base d'un cercle de 50cm centré sur l'oeil DEM (O), qui dans le repère O' conduit à une distance de calibration différente pour chaque DEM.

Cette propriété, ajoutée au principe d'intercalation équidistante entre chaque trame (cf. éq.IV.6), se traduit également par une quasi-invariance avec l'angle polaire ϕ_i des retards temporels $TC(i-1, i)$ et $TC(i, i+1)$ nécessaires à un contraste C , situé à la distance radiale D_i , pour couper les deux axes de chaque sous-DEM (DEM+, DEM-) constituant le DEM bidirectionnel.

$$\Delta t_i = TC(i-1, i) \approx TC(i, i+1) \approx (\Delta L / 2) / V_o \approx (G/2) \cdot D_i / V_o \quad (\text{éq.IV.12})$$

Au niveau de la partie électronique du réseau de DEMs, cette propriété se traduit par le fait que le facteur individuel de calibration g_i qui transforme le retard Δt_i en distance D_i , est pratiquement le même pour tous les sous-DEMs et ce, quelle que soit leur position dans le réseau :

$$g_i = D_i / \Delta t_i \approx \text{constante} \approx 2 \cdot V_o / G \quad (\text{éq.IV.13})$$

La fig.IV.11 montre la variation sur un hémichamp entier, du coefficient g_i de calibration en distance avec la direction ϕ_i de chaque DEM $_i$. Ces résultats montrent que la variation relative de g_i par rapport à g_{90° est comprise entre -10% et +4%, et confirme la quasi-invariance de cette calibration. En conséquence, tous les DEMs fonctionnent dans *une même gamme temporelle* quelle que soit leur direction de visée dans l'espace.

IV.4.2. Généralisation de l'ajustement filtrage+seuillage à l'ensemble de l'oeil-DEM

Au Chap.III on a montré comment *pour chaque DEM individuel*, il est possible de limiter *localement* les problèmes de correspondance en jouant simultanément sur le filtrage spatio-temporel (paramétré par le recouvrement angulaire $\Delta \phi_i / \Delta \phi_i$) et sur le système de seuillage à hystérésis (paramétré par le seuil haut H_h) présents de façon indépendante sur chacune des voies d'entrée du DEM. On a montré notamment que pour un DEM donné, il existe un ensemble de couples $[\Delta \phi_i / \Delta \phi_i, H_h]$ correspondant à un réglage optimum du DEM (cf. fig.III.19).

Le problème est de généraliser ce réglage à l'ensemble de l'oeil-DEM, sachant que la distribution angulaire des axes optiques est organisée en gradient et que chaque DEM_i, en conséquence ne présente pas des caractéristiques géométriques identiques.

IV.4.2.a Choix d'un seuil commun à tous les DEMs

On a choisi ici de régler tous les DEMs sur la base d'un seuil H_h commun. Ce choix entraîne plusieurs propriétés intéressantes

- il conserve *l'aspect cristallin* (déjà évoqué au paragraphe précédent) de la partie électronique du réseau de DEMs, en permettant à tous les modules de seuillage à hystérésis de fonctionner dans la même gamme d'amplitude (cf. Thèse C. Blanes, Chap.IV). Il faut cependant noter que, pour que le réglage du seuil soit fonctionnel, le signal filtré doit auparavant avoir été normalisé au niveau de chaque voie et ceci à la distance D_{norm} (cf. Chap.III). Cela nécessite la présence d'un contrôle de gain individuel pour chaque maille du réseau électronique (cf. fig.III.17). La distribution angulaire de ce gain sur l'ensemble du réseau est évoquée à la fin de ce paragraphe .
- il conduit à une *sensibilité aux valeurs de contraste* identique pour chaque DEM quelle que soit son orientation. Cette sensibilité à la valeur de contraste, fixée par la valeur commune du seuil, devient un paramètre propre à l'oeil-DEM complet. On notera que ce paramètre pourrait éventuellement être modulé de façon dynamique pendant la navigation du robot.

Dans la suite de ce travail, et comme dans le Chap.III, on a choisi une valeur du seuil $H_h=0.2$.

IV.4.2.b Distorsion avec l'angle polaire : effet sur la distribution du recouvrement angulaire

La valeur du seuil étant fixée, le réglage consiste maintenant à déterminer pour chaque DEM_i et selon le principe développé au Chap.III, la valeur du recouvrement $\Delta\phi_i/\Delta\phi_i$ associé à cette valeur du seuil. On notera que pour l'architecture bidirectionnelle du DEM (qui repose sur trois directions optiques) le recouvrement est moyenné sur le DEM+ et le DEM- du DEM_i considéré :

$$[\Delta\phi_i/\Delta\phi_i]_{bidirectionnel} = 2 \cdot \Delta\phi_i / (\phi_{i+1} - \phi_{i-1}) \quad (\text{éq.IV.14})$$

Puisque le principe de l'ajustement filtrage+seuillage ne dépend que du seuil et du recouvrement, et puisque le seuil est commun à tous les DEMs, on s'attend à obtenir une valeur de recouvrement identique pour tous les DEMs, et donc indépendante du gradient angulaire qui caractérise l'ensemble de l'oeil. Cependant, lorsque l'angle ϕ_i entre la direction optique d'une ommatidie et la direction du mouvement des objets devient faible, il apparaît un phénomène de distorsion au niveau de la réponse impulsionnelle de l'ommatidie qui modifie les caractéristiques du filtrage linéaire présent sur chaque voie et qui se répercute sur le signal filtré avant seuillage (cf. fig.III.16, du Chap.III et fig.IV.13).

Afin de prendre en compte les effets de cette distorsion, *le recouvrement angulaire a été ajusté de manière individuelle* pour l'ensemble des DEMs d'un même hémichamp. Ce réglage repose sur les deux étapes évoquées au Chap.III et qui sont pour chaque DEM_i, la détermination de la mire périodique limite (de fréquence ν_{lim}) à la distance $D_{\text{norm}}=50\text{cm}$ (§.III.3.4.b), et l'estimation de l'amplitude maximum du signal en réponse à cette mire. Les résultats obtenus en simulation pour le réglage du recouvrement, sont récapitulés à la fig.IV.12.

La fig.IV.12a illustre la configuration "standard" de l'oeil-DEM qui rappelons le, est caractérisée par un filtrage réglé pour des DEMs bidirectionnels et un seuil $H_h=0.2$, et par un gradient angulaire $G=0.2$. Ce diagramme montre que l'effet de la distorsion du signal filtré pour les ommatidies situés dans les directions polaires de l'oeil-DEM, est loin d'être négligeable pour cette configuration : on obtient en effet à l'avant et à l'arrière de l'oeil, des valeurs de recouvrement beaucoup plus importantes que dans la direction latérale $\phi_i=90^\circ$. On a choisi d'ailleurs de limiter par valeur supérieure, ces recouvrements (ici saturation à 5), car dans les directions polaires, un recouvrement trop important et la distorsion qui lui est associée, induisent une forte disparité entre les signaux d'entrée d'un même DEM, qui se traduit par une mesure erronée de vitesse angulaire. Cette distorsion et la disparité qu'elle entraîne, sont illustrées à la fig.IV.13a où sont comparés les signaux avant seuillage, obtenus sur les trois voies du DEM le plus latéral (DEM 90°) et du DEM orienté le plus à l'avant (DEM 10°).

L'importance du phénomène de distorsion sur le signal filtré est liée à *la valeur moyenne* Δp_{moyen} des angles d'acceptance des ommatidies sur l'ensemble de l'oeil-DEM, et elle augmente fortement avec cette dernière. Dans la configuration "standard" présentée à la fig.IV.12a, le Δp_{moyen} est de l'ordre de 10.8° avec $\Delta p_{170^\circ}=5.6^\circ$, $\Delta p_{90^\circ}=14.5^\circ$ et $\Delta p_{10^\circ}=5^\circ$. Les fig.IV.12b, IV.12c illustrent deux autres solutions où le Δp_{moyen} est deux fois plus faible que pour la solution standard et où l'effet de la distorsion angulaire est grandement atténué :

- la fig.IV.12b correspond, comme la fig.IV.12a, à un filtrage réglé pour un DEM bidirectionnel, mais avec une résolution angulaire caractérisée par $G=0.1$ c'est-à-dire deux fois plus grande qu'à la fig.IV.12a (113 directions par hémichamp au lieu de 59). En conséquence, l'angle interommatidial moyen est environ deux fois plus faible, ce qui à recouvrement équivalent, conduit à un Δp_{moyen} également deux fois plus faible. Les valeurs obtenues dans ce cas, sont $\Delta p_{\text{moyen}}=4.2^\circ$, avec $\Delta p_{170^\circ}=1.6^\circ$, $\Delta p_{90^\circ}=7.2^\circ$ et $\Delta p_{10^\circ}=1.3^\circ$.

- la fig.IV.12c au contraire, fait appel à la même résolution angulaire $G=0.2$ que la fig.IV.12a ; par contre, le filtrage est ici réglé pour des DEMs monodirectionnels (cf. Chap.III.), et donc repose sur des recouvrements deux fois plus faibles qu'à la fig.IV.12a ce qui, à angle interommatidial équivalent, conduit là encore à un Δp_{moyen} deux fois plus faible. Les valeurs effectivement obtenus dans ce cas, sont $\Delta p_{\text{moyen}}=4.1^\circ$, avec $\Delta p_{170^\circ}=1.4^\circ$, $\Delta p_{90^\circ}=7.2^\circ$ et $\Delta p_{10^\circ}=1.4^\circ$.

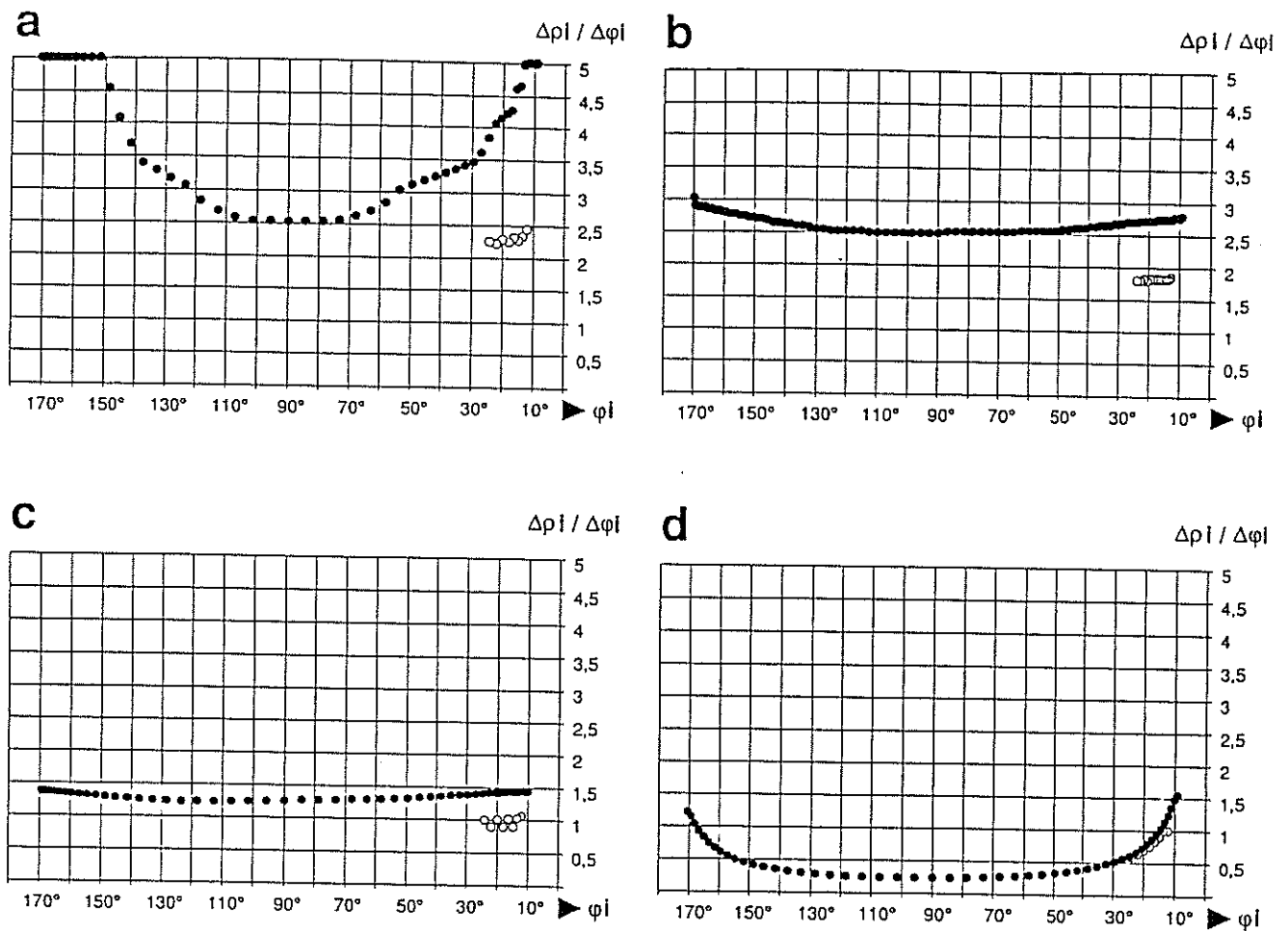


Fig.IV.12 Illustration de diverses distributions du recouvrement angulaire, sur un hémichamp entier de l'oeil-DEM. Les ronds blancs correspondent à la partie frontale proximétrique (a) Le cas standard : filtrage pour DEM bidirectionnel, $Hh=0.2$, $G=0.2$ (b) Idem à (a) mais avec une résolution angulaire deux fois meilleure, $G=0.1$. (c) Idem à (a) mais avec un filtrage pour DEM monodirectionnel (d) Distribution reposant sur un $\Delta\rho$ uniforme égal à 1.35°.

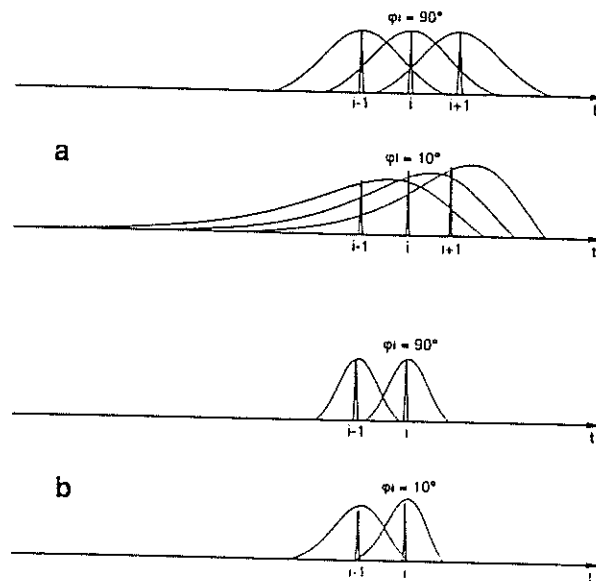


Fig.IV.13 Comparaison des réponses impulsionnelle entre les photo-récepteurs du DEM le plus latéral (DEM90°) et du DEM orienté le plus à l'avant (DEM10°). (a) Cas d'un recouvrement associé au DEM bidirectionnel (fig.IV.12a) superposé au cas d'un $\Delta\rho_i$ ponctuel (qui permet de situer l'axe optique de chaque ommatidie) (b) Cas d'un recouvrement associé à un DEM monodirectionnel (fig.IV.12c) superposé au cas d'un $\Delta\rho_i$ ponctuel.

- une solution avec un angle d'acceptance constant $\Delta\rho=1.35^\circ$, est également illustrée à la fig.IV.12d ; elle conduit à une distribution des recouvrements angulaires qui est exactement l'inverse de la distribution en gradient des angles interommatidiaux. La valeur $\Delta\rho=1.35^\circ$ illustrée ici correspond en fait à l'angle d'acceptance qu'on peut obtenir dans le cas du prototype (cf. Thèse C. Blanes, Chap.III) avec des lentilles de distance focale 8.5mm focalisées à $D = 50\text{cm}$ sur des photorécepteurs de largeur horizontale 0.2 mm.

L'étude du réglage d'un oeil faisant appel à des DEMs où le filtrage est "*purement spatial*" a été également abordée (non représentée ici), et montre qu'une telle solution est beaucoup moins sensible à la distorsion angulaire que la solution "filtrage spatio-temporel". Dans ce cas, on obtient en effet un recouvrement de 2.5 à 90° et seulement de 3.75 à 10° pour la configuration standard telle que celle présentée à la fig.IV.12a, à savoir filtrage bidirectionnel, $H_h=0.2$, $G=0.2$.

L'impact sur le comportement du robot de chacune de ces configurations sera analysé dans le dans le Chap.V. (§.V.4.).

Remarque

La distribution du facteur de normalisation du signal filtré sur chacune des voies n'a pas été représentée ici. On peut simplement souligner que sa variation relative maximale sur l'ensemble d'un hémichamp (évaluée par rapport à $\phi_i=90^\circ$) est de : 108% dans le cas IV.12a, 29% dans le cas IV.12b, 22% dans le cas IV.12c, et de 456% dans le cas IV.12d. On constate donc que ce sont les distributions où le facteur de recouvrement angulaire est pratiquement uniforme qui minimisent la variation du coefficient de normalisation avec la position du DEM et qui sont donc plus favorables à l'homogénéisation de la partie électronique du réseau de DEMs.

IV.4.3. Représentation de l'environnement pendant une translation élémentaire

L'architecture de l'oeil est spécifiquement conçue pour que chaque translation élémentaire permette au robot d'effectuer une nouvelle représentation de l'environnement *indépendamment de tout ce qui précède et tout ce qui suit* cette translation élémentaire.

Les deux caractéristiques permettant d'assurer cette indépendance sont :

- 1 la longueur minimum ΔL de la translation élémentaire, suffisante pour échantillonner localement le flux visuel à l'intérieur d'un cercle minimum de vision.
- 2 l'initialisation des DEMs au début de chaque translation permettant d'éliminer toute mesure de retard commencée par un DEM avant le début de la translation. Une solution pour réaliser cette

initialisation (et qui est effectivement simulée dans la suite) est de n'autoriser le déclenchement du système de seuillage à hystérésis, que pendant la durée de la translation élémentaire.

Il est cependant important de noter que cette initialisation n'est utile que si le mouvement précédant la translation élémentaire est très différent d'un mouvement rectiligne. Dans le cas contraire, cette initialisation est non seulement inutile mais même limitative dans la mesure où elle élimine toutes les estimations portant sur des distances supérieures à R_v (qui nécessitent des longueurs de translation plus importantes que ΔL). Cette limitation cependant n'affecte pas la stratégie d'évitement d'obstacles développée dans le cadre de ce projet, qui fait appel à un périmètre de vision borné par le cercle de rayon R_v . Pour des tâches de navigation plus évoluées, nécessitant des estimations en distance supérieures à R_v , il faudrait envisager de déclencher l'initialisation des DEMs, uniquement si un mouvement de *rotation* a précédé la translation élémentaire.

La fig.IV.14 montre les résultats obtenus en simulant l'oeil-DEM complet. Elle met en opposition, une acquisition visuelle effectuée dans le cas théorique du mouvement rectiligne uniforme et continu (fig.IV.14a) tel qu'il a été étudié jusqu'à présent, et des acquisitions élémentaires effectuées dans le cas d'un mouvement réel, séquencé en une succession de translations élémentaires et indépendantes (fig.IV.14b, IV.14c). Deux types de situations sont illustrées : une situation (en haut) où les points de contraste sont détectés par le système "latéral grand champ" de l'oeil, et une situation (en bas) où les points de contraste apparaissent dans la partie frontale du robot et sont détectés soit par le système "latéral grand champ" soit par le système "proximétrique frontal". Les figs. IV.14b et IV.14c montrent la validité de chaque acquisition visuelle indépendante (initialisation en début de translation) associée à chaque translation élémentaire. Cette validité se traduit par le fait que toutes les translations ΔL situées à une distance des points de contraste inférieure à la distance limite R_v (zones délimitées par les cercles en pointillés à la fig.IV.14) conduisent à une détection effective du contraste. Dans le cas contraire, la détection n'est pas systématiquement assurée (contrairement au cas de la fig.IV.14a).

Deux types de filtrage sont illustrés à la fig.IV.14 : le premier, plutôt théorique correspond à un recouvrement angulaire constant et très faible, qui conduit à des angles d'acceptance presque ponctuels (fig.IV.14a, IV.14b) ; le second (fig.IV.14c) correspond à la configuration "standard" adoptée pour l'ajustement du filtrage+seuillage dans les DEMs bidirectionnels et présentée au paragraphe précédent (cf. fig.IV.12a). Les simulations de la fig.IV.14.c montrent que la largeur de l'angle d'acceptance de chaque ommatidie, ainsi que les phénomènes de distorsion à l'avant de l'oeil n'influent pas sur la validité de l'acquisition visuelle pendant les translations élémentaires, et à l'intérieur du périmètre de vision.

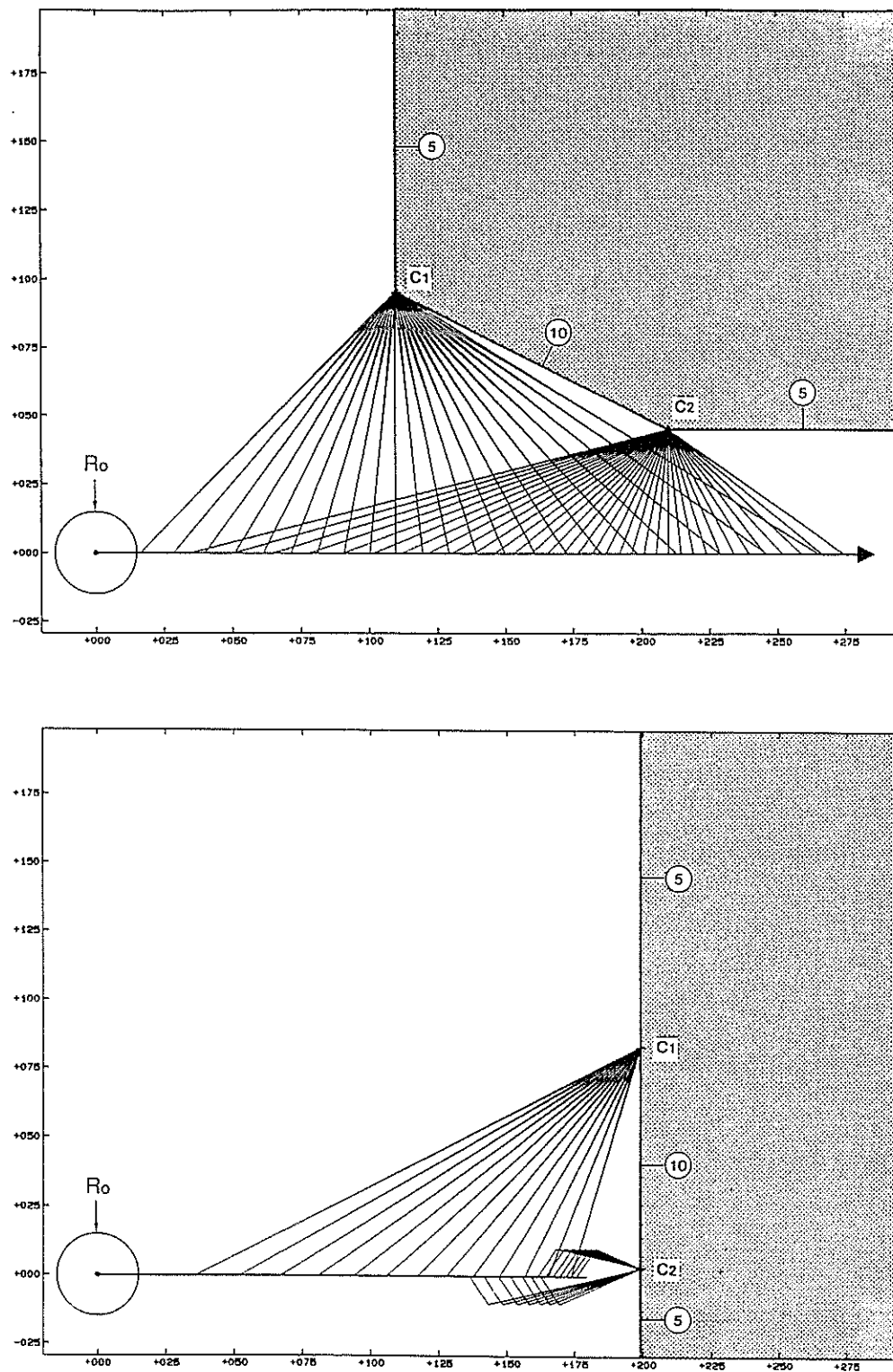


Fig.IV.14a Performances de l'oeil-DEM complet ($G=0.2$, $\Delta\phi_i/\Delta\phi_i=\text{constant}=0.1$) simulé dans le cas théorique d'un mouvement rectiligne uniforme et continu. La longueur des rayons portés indique la distance du contraste telle qu'elle est estimée par l'oeil (en haut) Environnement de type latéral dont les contrastes sont détectés par le système "latéral grand champ" de l'oeil. (en bas) Environnement de type frontal dont les contrastes sont détectés, soit par le système "latéral grand champ", soit par le système "proximétrique frontal" de l'oeil-DEM.

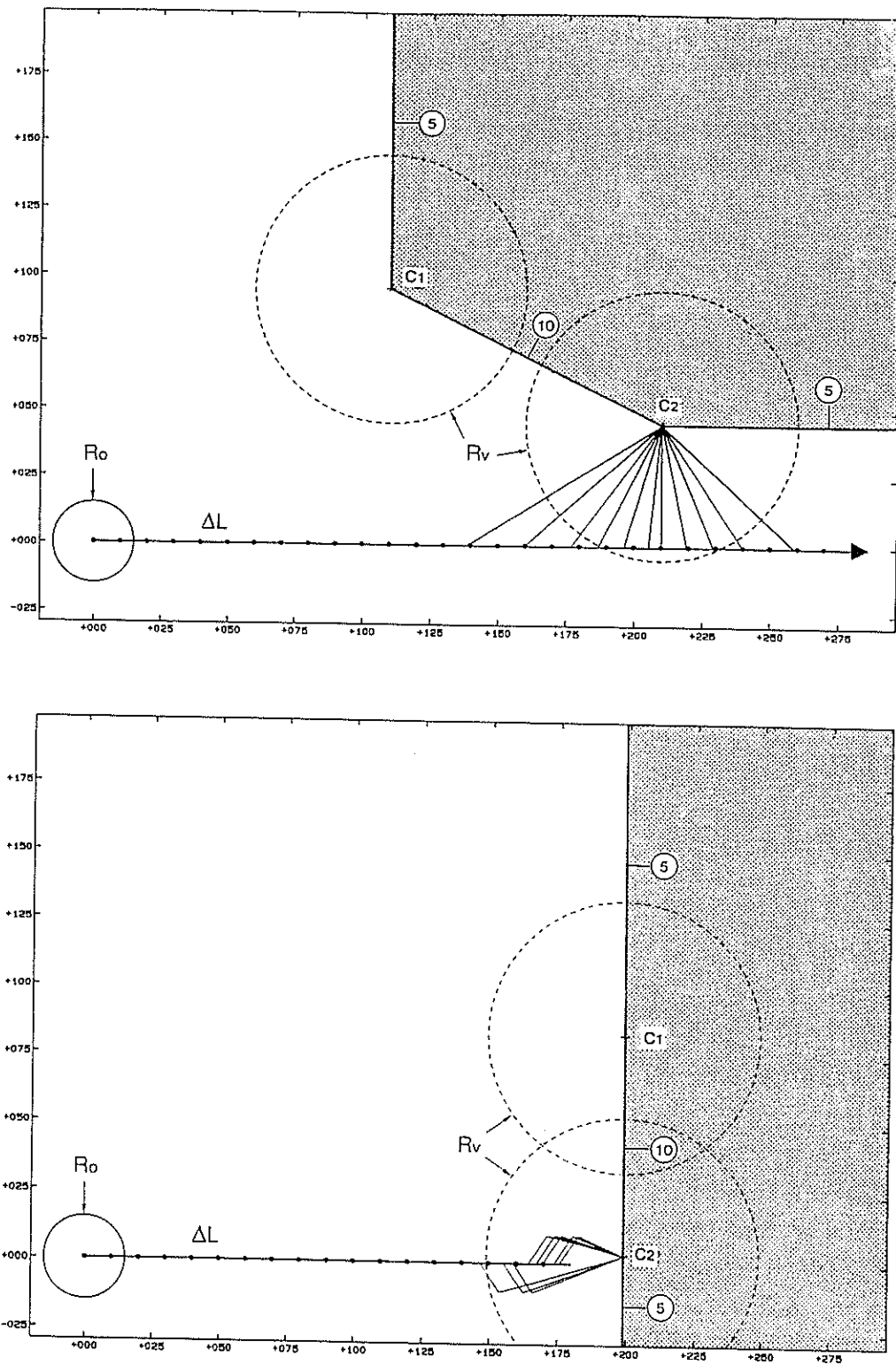


Fig.IV.14b Mêmes environnements et même oeil qu'à la fig.IV.14a, mais avec un mode de locomotion séquencé en translations élémentaires ΔL indépendantes. On constate que les acquisitions visuelles sont toutes valides pour les translations élémentaires, situées, à l'intérieur des zones délimitées par les cercles en pointillés autour des points de contraste, correspondant au périmètre de vision R_v du robot.

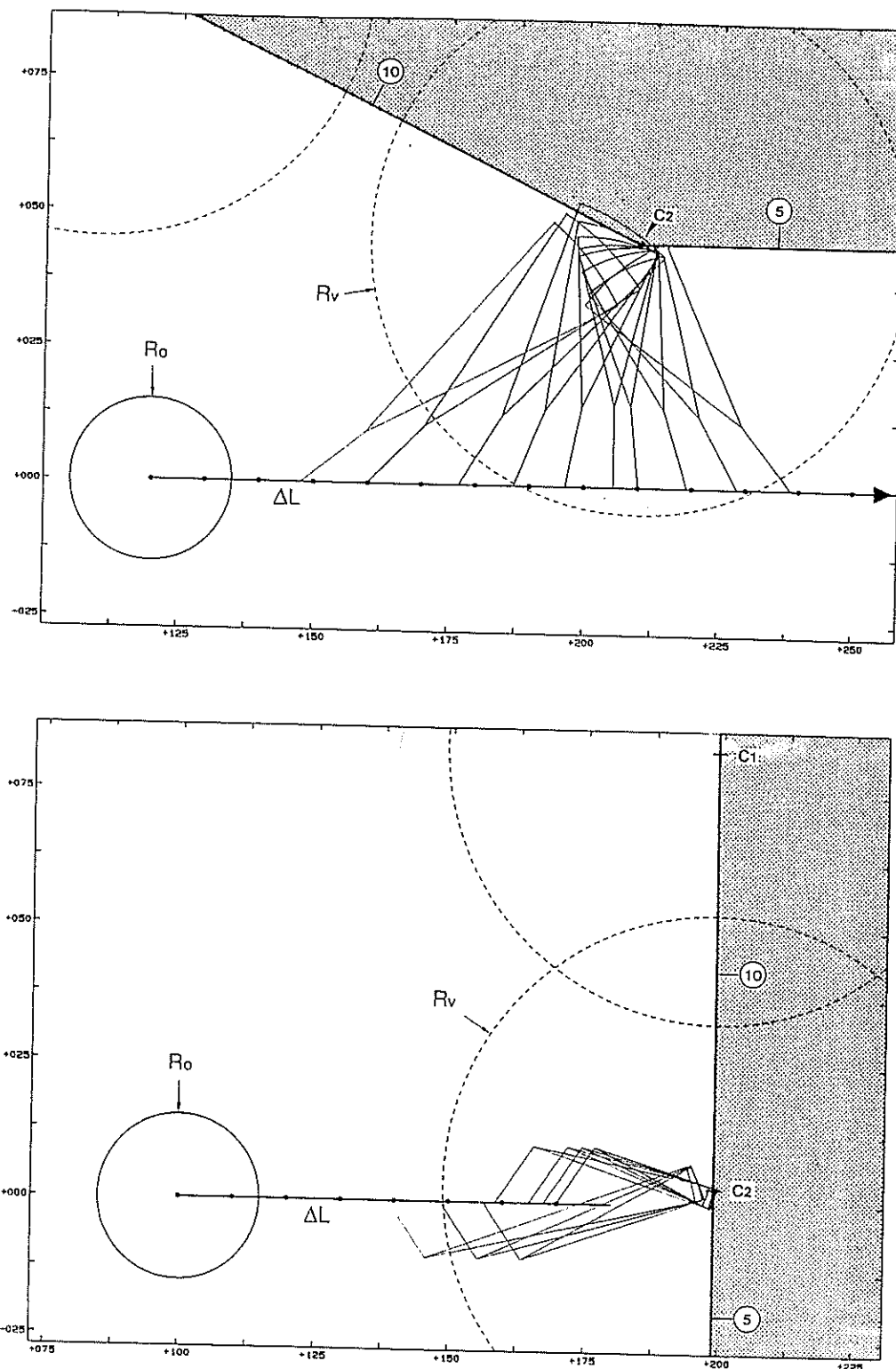


Fig.IV.14c Mêmes environnements et même mode de locomotion qu'à la fig.IV.14b mais ici l'oeil-DEM simulé respecte la distribution du filtrage+seuillage de type "standard" (bidirectionnel + seuil=0.2 + $G=0.2$) évoqué à la fig.IV.12a. La présence d'angles d'acceptance importants ne perturbe pas la validité des acquisitions visuelles pendant les translations élémentaires.

IV.4.4. Approche plus globale des problèmes de correspondance

Les configurations de l'environnement illustrées au paragraphe précédent (fig.IV.14) correspondent à des "bons cas de figure" au sens où elle n'induisent pour aucun DEM de l'oeil des mesures erronées ayant pour origine un problème de correspondance.

On a repris ici l'un des "mauvais cas de figure" déjà évoqué à la fin du Chap.III, (cf. §.III.3.5., cas de type F) et qui, pour le DEM68° étudié, induisait une surestimation en distance d'un point de contraste alors que ce dernier se trouvait à l'intérieur du périmètre de vision ("cas grave de surestimation" cf. §.III.1.3.). Cet exemple est très précisément illustré à la fig.IV.15, mais maintenant dans le cadre de l'oeil complet, et dans les conditions particulières du séquençement en acquisitions visuelles élémentaires, chacune associée à un pas de translation élémentaire ΔL . La simulation présentée dans la partie du haut montre que, le DEM68°, en donnant la préférence au contraste C1 situé à l'extérieur de son périmètre de vision, perd le contraste C2 pourtant situé à l'intérieur de son périmètre de vision et donc plus dangereux. Ici donc la représentation locale de l'environnement, disponible à la fin de la translation ΔL_n n'est pas valide pour des raisons de correspondance.

Les problèmes de correspondance s'ils ont déjà été grandement limités par l'ajustement du filtrage+seuillage ne peuvent pas être complètement résolus au niveau local par le DEM effectivement concerné. L'étape suivante est donc d'adopter une approche plus globale du problème, en intégrant les informations éventuellement fournies par les DEMs voisins. Un exemple caractérisant cette approche est présenté dans la partie du bas de la fig.IV.15 où seulement trois DEMs voisins (comprenant le DEM à 68°) sont effectivement simulés. Cet exemple montre que l'erreur de mesure effectuée par le DEM68° au cours de sa translation ΔL_n , ne se répercute pas dans la translation suivante ΔL_{n+1} sur les DEMs voisins --en l'occurrence le DEM n°i+2, orienté à 78.7°-- qui détecte à peu près correctement le contraste C2. Il existe en fait statistiquement très peu de configurations de l'environnement (cf. Chap.III, §.III.3.3.) susceptibles de générer, au cours d'un mouvement, des problèmes de correspondance sur plus de deux DEMs *successifs*. D'autre part, et c'est d'ailleurs le cas à la fig.IV.14, au cours du mouvement du robot, la situation d'un DEM à l'autre peut changer brusquement pour des raisons d'occlusion. Par exemple dans la simulation présentée à la fig.IV.15 (en bas), pour le DEM orienté à 78.7°, le contraste C1 est partiellement masqué par le contraste C2, ce qui privilégie la détection de ce dernier.

Suite à cette série d'observations, on peut envisager une approche plus globale des problèmes de correspondance en supposant que, *tout contraste non détecté à la translation élémentaire ΔL_n sera détecté par un DEM voisin à la translation élémentaire suivante ΔL_{n+1} .*

On verra dans le Chap.V, que cette règle peut être très simplement intégrée dans la stratégie d'évitement d'obstacles du robot, à condition d'augmenter d'une translation élémentaire

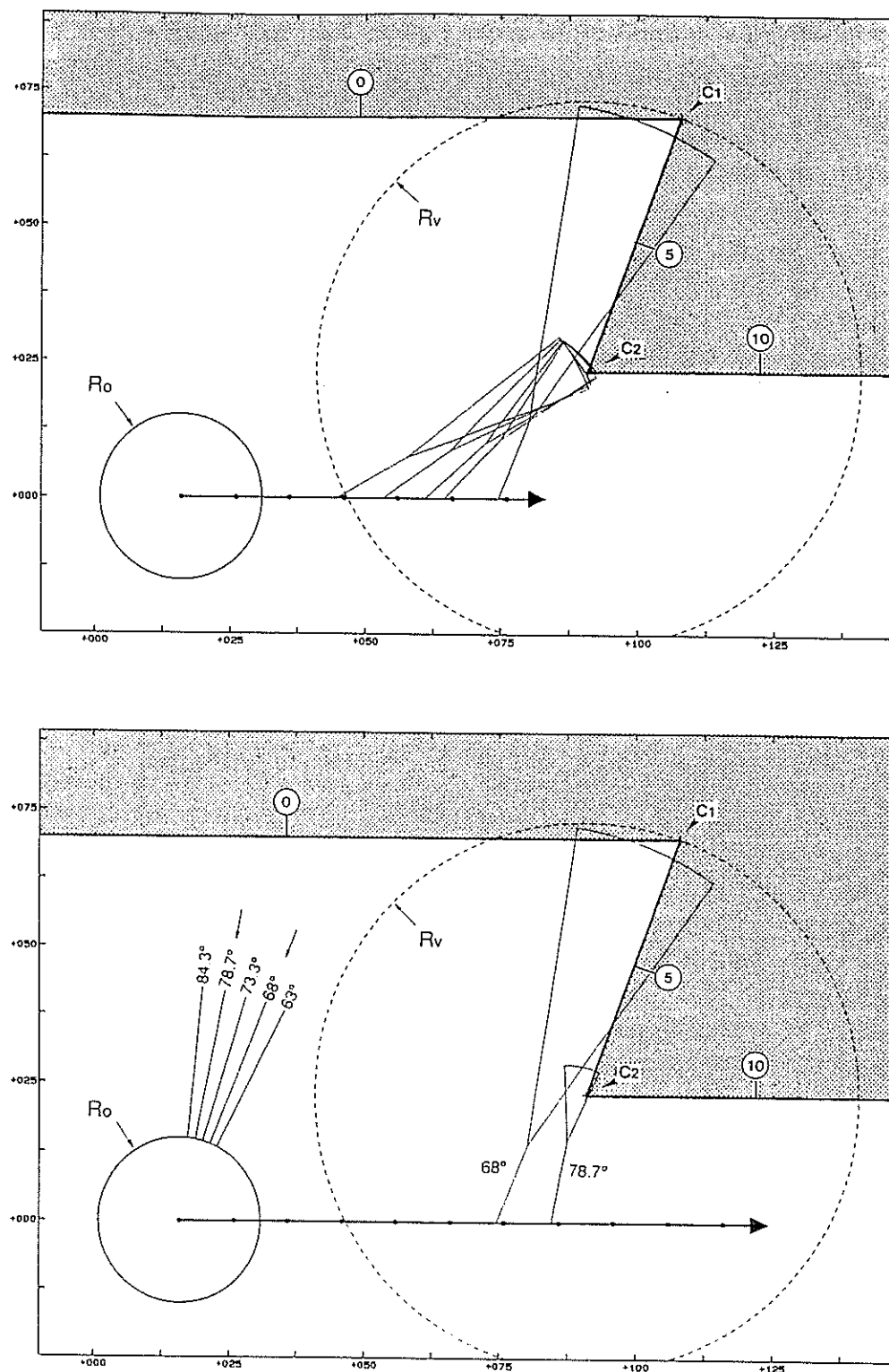


Fig.IV.15 Approche globale des problèmes de correspondance. (en haut) Simulation de l'oeil-DEM complet avec son filtrage "standard" qui montre la perte par le DEM68° du contraste C2, pourtant situé à une distance radiale inférieure à 50cm. (en bas) Simulation uniquement de trois DEMs voisins appartenant à l'oeil. Le contraste C2, perdu au cours de la translation ΔL_n , par le DEM68°, est détecté au cours de la translation suivante ΔL_{n+1} par le DEM78.7°.

l'anticipation (liée au rapport R_v/R_o) nécessaire au bon fonctionnement de l'algorithme anticollision.

Cette règle apparentée à un moyennage spatial, doit être considérée comme un principe qui, tout en permettant de limiter "les cas graves de surestimation" dus aux problèmes de correspondance, ne conduit pas nécessairement à leur élimination systématique. Comme cela est confirmé à posteriori par les démonstrations du Chap.V, cette limitation apparaît cependant suffisante pour conférer au robot un comportement optomoteur correct.

IV.5. CONCLUSION

• Le gradient optique

La principale caractéristique qui a émergé de ce chapitre est une distribution angulaire *non uniforme* des axes optiques de l'oeil-DEM dans le plan azimutal. Cette distribution obéit à un gradient, qui conduit l'angle interommatidial $\Delta\phi_i$ entre chaque direction optique à varier comme le sinus de l'angle polaire ϕ_i de ces mêmes directions. Elle compense ainsi le gradient naturel sur les vitesses angulaires Ω caractéristique d'un flux optique translationnel, généré dans un environnement statique.

Dans ces conditions, un tel gradient permet :

- de minimiser le nombre de DEMs utilisé sur l'ensemble de l'oeil ; des performances visuelles similaires pourraient évidemment être obtenues avec une distribution angulaire isotrope. Mais une telle solution nécessiterait un nombre prohibitif de DEMs pour le même résultat (augmentation par un facteur de l'ordre de trois).

- d'uniformiser en partie le traitement du signal effectué par chacune des mailles de la couche électronique du réseau de DEMs : cette uniformisation concerne aussi bien les gammes d'amplitude des signaux filtrés avant seuillage et donc le rapport signal-sur-bruit, que les gammes temporelles caractérisant la mesure des retards.

• La zone frontale de l'oeil-DEM

Le pôle du flux visuel qui, par construction, coïncide à chaque instant avec la direction frontale de l'oeil-DEM, est caractérisé par des vitesses angulaires nulles. En conséquence, dans cette zone frontale du champ visuel où l'image vue du centre O du robot est pratiquement *statique*, le principe de stéréo-mouvement, n'est plus valable pour des DEMs centrés sur le robot.

Le système proximétrique proposé ici pour échantillonner la zone frontale de l'oeil, fait appel là encore, à la détection de mouvement puisqu'il repose sur des DEMs dont le centre est décalé latéralement par rapport à la direction du mouvement. Cette solution est loin d'être unique. Un système de stéréo-vision binoculaire serait par exemple une solution bien adaptée à l'estimation en distance dans cette zone frontale où l'image est d'une part quasiment statique et d'autre part correspond à un champ angulaire très faible (de l'ordre de $\pm 10^\circ$).

Une autre solution, impliquant beaucoup plus l'aspect moteur, consisterait à se passer complètement du système proximétrique frontal (dont le défaut essentiel est qu'il est justement proximétrique) et de n'utiliser que le système latéral grand champ pour guider le robot. Le défi dans ce cas se résume alors à la question : est-il possible de concevoir une stratégie d'évitement d'obstacles efficace, avec un système sensoriel possédant une zone frontale aveugle d'environ $\pm 10^\circ$? Une telle hypothèse, nécessiterait de modifier la stratégie de locomotion du robot, en lui interdisant à la fin de chaque acquisition visuelle, de braquer dans une direction appartenant à la zone morte frontale $\pm 10^\circ$. Cette solution nécessiterait également plus d'anticipation de la part du robot et conduirait ce dernier à décrire des trajectoires en "zig-zag", donc moins précises.

Chapitre V

***L'OEIL-DEM APPLIQUE A L'EVITEMENT D'OBSTACLES
ANALYSE COMPORTEMENTALE DU ROBOT***

Chapitre V**V.1. PRINCIPES DE NAVIGATION DU ROBOT**

- V.1.1. L'oeil-DEM en boucle fermée
- V.1.2. L'architecture "évolutionniste" du système de navigation
- V.1.3. Choix d'une chaîne optomotrice bas-niveau consacrée à l'anticollision

V.2. LE SYSTEME ANTICOLLISION

- V.2.1. Principes géométriques de l'algorithme anticollision
 - a Critères géométriques d'anticollision
 - b Critères supplémentaires
 - c Cas d'un mouvement continu et d'un capteur parfait
 - d Aspects réflexes de l'algorithme anticollision
- V.2.2. Principe du calcul effectué par le système anticollision : génération de patterns moteurs
 - a Opérations appliquées individuellement à chaque point de contraste
 - b Interactions latérales entre chaque point de contraste : mélange des zones interdites

V.3. PARAMETRAGE DE LA CHAÎNE COMPLETE "OEIL-DEM + SYSTEME ANTICOLLISION"

- V.3.1. Principe du paramétrage
 - a Le coefficient relatif d'anticipation du robot
 - b Modulation du flux de connexions de chaque DEM sur le réseau anticollision
 - c Remarque sur la méthode de simulation
- V.3.2. Intégration des incertitudes engendrées par les translations élémentaires
 - a Calcul du coefficient d'anticipation
 - b Ajustement de l'interconnexion entre le réseau DEM et le réseau anticollision
 - c Ajustement du seuillage sur la distance pour valider le cercle de vision R_v
 - d Domaine de validité des translations élémentaires
 - e Exemples
- V.3.3. Intégration des incertitudes inhérentes aux DEMs
 - a Incertitudes en distance dues aux problèmes de correspondance non résolus
 - b Incertitudes dues à l'angle d'acceptance des ommatidies
 - c Exemples
- V.3.4. Intégration des paramètres cinématiques du robot : stratégie de braquage
 - a Caractéristiques de la plate-forme
 - b Transformation de la consigne de braquage en une commande dynamique des deux moteurs
 - c Intégration de la zone aveugle de braquage liée à la cinématique du robot
 - d Exemples

V.4. ANALYSE COMPORTEMENTALE DU ROBOT EN FONCTION DE LA CONFIGURATION DE SON SYSTEME VISUEL

- V.4.1. Le "robot modèle"
Comportement avec un capteur théorique parfait
- V.4.2. Le "robot peureux"
Effets des erreurs de correspondance, lorsqu'elles ne sont pas filtrées
- V.4.3. Le "robot imperturbable"
Comportement avec l'oeil-DEM dont l'ajustement du "filtrage+seuillage" a été optimisé
- V.4.4. Le "robot économique"
Effets de la réduction du champ de vision
- V.4.5. Le "robot téméraire"
Quelques exemples dans un environnement dynamique

V.1. PRINCIPES DE NAVIGATION DU ROBOT

V.1.1. L'oeil-DEM en boucle fermée

Rappelons que cette étude a pour but de montrer comment une créature mobile --animal ou machine-- peut se déplacer à haute vitesse dans un environnement complexe et inexploré en utilisant uniquement des senseurs de mouvement relatif pour éviter les obstacles. Les principes et les performances de l'oeil-DEM constituant la partie sensorielle du robot ont été présentés dans les chapitres précédents. Rappelons que cet oeil-DEM a été développé dans le but précis d'être intégré à la chaîne sensorimotrice responsable du guidage du robot. En conséquence il n'a pas une vocation de senseur universel, ne serait-ce qu'à cause des limitations suivantes:

- son principe de représentation de l'espace nécessite un mode de locomotion séquencé en une succession de translations élémentaires, avec une origine angulaire verrouillée en permanence sur la direction du mouvement
- la portée de son champ de vision dépend de la longueur de chaque translation élémentaire
- la précision (en angle et en distance) des mesures effectuées par chaque DEM reste très grossière, ce qui est dû essentiellement, à la mauvaise résolution angulaire de l'oeil, aux angles d'acceptance élevés de chaque ommatidie et à certains problèmes de correspondance non résolus par le filtrage.

Ce dernier chapitre montre comment, en dépit de ces diverses limitations, l'oeil-DEM peut être utilisé efficacement, s'il est incorporé à une chaîne visuo-motrice qui tient pleinement compte de sa spécificité. Pour cela, les performances de l'ensemble de cette chaîne vont être analysées dans

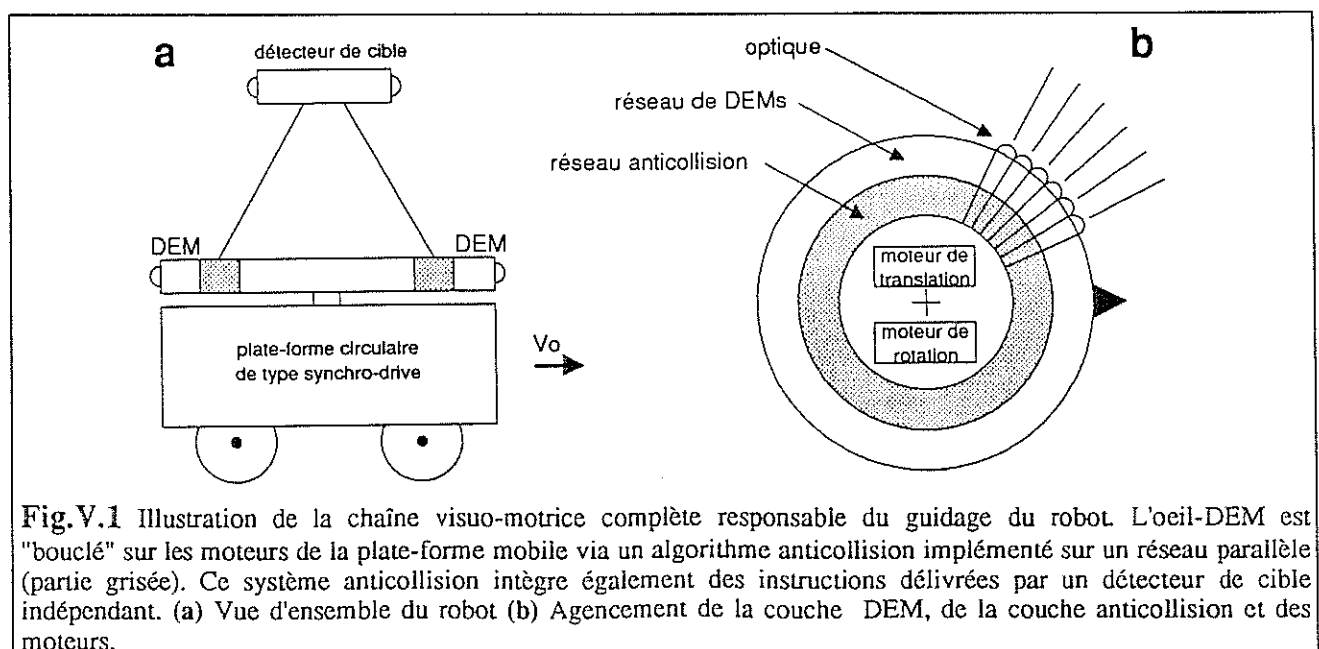


Fig.V.1 Illustration de la chaîne visuo-motrice complète responsable du guidage du robot. L'oeil-DEM est "bouclé" sur les moteurs de la plate-forme mobile via un algorithme anticollision implémenté sur un réseau parallèle (partie grisée). Ce système anticollision intègre également des instructions délivrées par un détecteur de cible indépendant. (a) Vue d'ensemble du robot (b) Agencement de la couche DEM, de la couche anticollision et des moteurs.

la situation en boucle fermée évoquée au chapitre précédent (cf. fig.IV.1), où l'oeil-DEM est "bouclé" via un algorithme de guidage sur les moteurs du robot (fig.V.1). Dans une telle situation la trajectoire du robot peut être considérée comme le résultat d'un asservissement où la consigne d'entrée est la contrainte comportementale (ici anticollision), où la perturbation est l'environnement inconnu et où le système visuel (ici l'oeil-DEM) constitue à lui seul le système de feed-back. La complexité de ce servomécanisme provient du fait que l'oeil-DEM n'est pas un système sensoriel indépendant, dans la mesure où son fonctionnement est directement lié au mouvement propre du robot.

Là encore, ce chapitre souligne la forte interdépendance qui existe entre la partie sensorielle et la partie motrice du robot, et justifie à posteriori certains choix effectués lors du développement de l'oeil-DEM.

V.1.2. L'architecture "évolutionniste" du système de navigation

La complexité du système de guidage visuo-moteur d'une créature mobile dépend de la tâche que doit accomplir cette dernière. On peut tenter de classer ces tâches selon leur niveau de priorité (Brooks 1986) :

- les tâches à haute priorité (couches 0, 1, 2 à la fig.V.2) : elles regroupent toutes les actions de type "*réflexe*", essentielles à la survie de la créature mobile : elles se résument à l'évitement d'obstacles (mobiles dans le cas le plus général), à l'évitement d'objets se rapprochant dangereusement (prédateurs...), ainsi qu'à la poursuite à haute vitesse d'une cible (proie, intrus etc...). L'ensemble des tâches à haute priorité constituent l'équivalent d'un "*système d'alerte*" qui n'est pas forcément très sophistiqué mais dont la principale caractéristique est la *robustesse*, c'est-à-dire une efficacité à 100%, indépendante de la complexité de l'environnement. Une telle efficacité repose essentiellement sur les performances "temps réel" à la fois de la partie sensorielle et de la partie motrice du système (immunité aux bruits divers, réaction dans une échelle de temps compatible avec la dynamique des événements, etc).

- les tâches à faible priorité (symbolisées par la couche la plus haute à la fig.V.2) : elles concernent la partie décisionnelle du système de navigation et font appel à des niveaux de raisonnement élevés nécessitant notamment une perception globale de l'environnement. Par exemple, dans le domaine de la navigation, elles comprennent la reconnaissance de formes, d'objets ou de lieux, la cartographie de lieux, le choix de buts, la planification optimale de trajets, etc... Ce sont ces tâches qui, en gérant de façon optimum le système d'alerte, confèrent à la créature mobile un comportement dit "intelligent", au sens où il obéit à un critère *prédéfini* et donc éventuellement *maîtrisable* (en robotique le robot doit avant tout être utile et donc obéissant). Il faut cependant noter qu'en aucun cas la défaillance de ces tâches de haut niveau ne doit affecter la survie de la créature mobile.

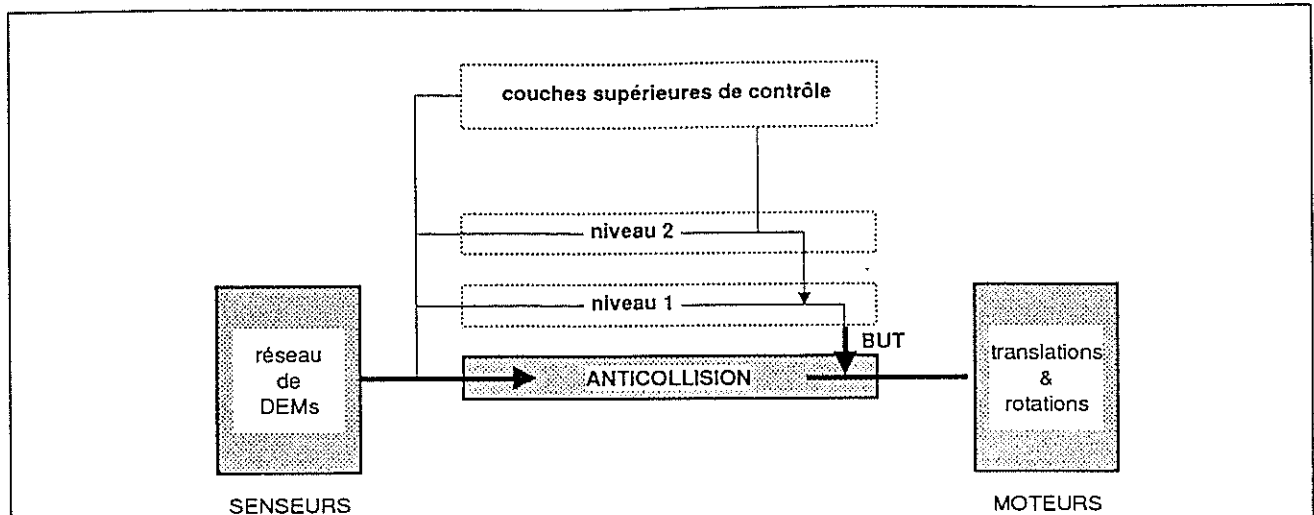


Fig.V.2 Décomposition du système visuo-moteur du robot, en couches de contrôle parallèles et indépendantes, basée sur une "subsumption architecture" (Brooks 1986). La couche 0, appelée "couche anticollision" est la seule traitée dans le cadre de ce projet. Elle présente le niveau de priorité le plus élevé et garantit la survie du véhicule. Le signal de but représente les instructions éventuellement fournies par les autres couches.

En terme de *robotique et d'ingénierie*, il est important de développer ces tâches dans leur ordre de priorité, et de commencer par construire un système d'alerte bas niveau très robuste, avant de s'intéresser aux comportements dits "intelligents" du système. Pour illustrer cette idée, Brooks (1987b) donne l'exemple d'un "robot travailleur" dont le comportement "intelligent" se résumerait à inspecter les rails d'une voie ferrée : pour un tel robot, il va sans dire que s'écarter de la voie lorsqu'un train arrive, est plus important pour sa survie, que d'achever l'inspection des dix dernières traverses.

En terme de *biologie et d'évolution*, cette affirmation reste valable pour ne pas dire évidente : pour une mouche par exemple, il est beaucoup plus important de détecter et d'échapper à une main mal intentionnée, que de terminer sa toilette matinale sur le bord de la table.

Le système bas niveau effectivement développé dans le cadre de ce projet est consacré exclusivement à l'évitement d'obstacles. Ce système est lui même organisé (fig.V.2) sur la base d'une architecture structurée en couches parallèles et indépendantes (cf. "subsumption architecture", Brooks 1986) et peut inclure différentes couches de contrôle (niveaux 0, 1, 2 de la fig.V.2), toutes consacrées à l'évitement d'obstacles mais chacune s'occupant d'une tâche spécifique avec un niveau de priorité donné. Toutes ses couches indépendantes fonctionnent de manière *simultanée* et leurs sorties qui sont collectées en respectant leur niveau de priorité, convergent vers un signal moteur unique.

V.1.3. Choix d'une chaîne optomotrice bas-niveau consacrée à l'anticollision

L'étude qui va suivre traite uniquement de la couche de plus bas niveau du système d'évitement d'obstacles : elle correspond à la couche 0 de la fig.V.2 et est appelée *couche*

anticollision. Son rôle se limite uniquement à éviter les collisions entre le robot et les objets de l'environnement, mais si possible avec 100% de réussite. En dehors de l'anticollision, cette couche 0 ne doit obéir à aucun autre critère d'optimisation qui contraindrait prématurément les couches supérieures. Par exemple, si l'objectif du robot est de se glisser entre deux objets, il ne doit pas en être empêché par un système anticollision, qui en lissant prématurément les trajectoires, réduirait sa manoeuvrabilité. De la même manière, "anticollision" ne signifie pas que le robot doive nécessairement s'arrêter devant un obstacle détecté mais simplement qu'il braque suffisamment afin d'éviter le choc (ce qui peut effectivement l'amener à décroître sa vitesse).

Les couches suivantes (niveaux 1, 2, etc... de la fig.V.2) correspondent aux nombreuses optimisations envisageables en matière d'évitement d'obstacles, comme par exemple le lissage de trajectoire, l'optimisation de la vitesse etc... Toutes ces couches d'optimisation ne sont pas étudiées ici. Par contre, afin d'illustrer leur mode de communication avec la couche anticollision, ces couches supérieures sont condensées ici sous la forme d'une *instruction de but* (fig.V.2), qui présente l'avantage didactique d'être facilement représentable dans l'espace par une cible que le robot doit essayer d'atteindre. Par construction, la couche anticollision doit pouvoir fonctionner aussi bien *avec* que *sans*, cette instruction de but. Dans le cas du prototype, pour matérialiser cette instruction de but, un détecteur de cible opto-électronique indépendant (fig.V.1) a été réalisé (Cf. Thèse C. Blanes, Chap.IV) et alimente la couche anticollision en concurrence avec l'oeil-DEM.

Une telle organisation rend le système de guidage du robot complètement *évolutif* au sens où ce dernier peut recevoir des couches de contrôle additionnelles, le dotant de capacités supérieures sans que cela remette en cause la couche anticollision. Pour cela, il suffit que ces couches additionnelles délivrent à la couche anticollision une instruction de but équivalente à celle représentée par la cible.

Il faut souligner, que ce domaine touchant à l'organisation du système de navigation d'un "robot réactif" a déjà été étudié par de nombreux chercheurs (cf. le chapitre d'introduction Chap.I, §.I.2.) et n'est pas une fin en soit dans le cadre de ce projet. Il constitue cependant une étape nécessaire, qui va permettre de tester en boucle fermée et de façon réaliste, les performances de l'oeil-DEM.

V.2. LE SYSTEME ANTICOLLISION

V.2.1. Principes géométriques de l'algorithme anticollision

Dans le domaine de la planification de mouvements, deux catégories d'algorithmes peuvent être distinguées (cf. Yap 1986) :

- ceux fonctionnant sur la base d'une *connaissance complète* de l'environnement (où la forme, la position et l'orientation des objets dans l'espace est connue à l'avance et décrite avec précision). Alors que ces algorithmes sont les plus performants d'un point de vue optimisation, leur implémentation technologique pose problème pour respecter les contraintes liées au "temps réel" et aux "systèmes embarqués". D'autre part, ces algorithmes sont mal adaptés à des environnement non stationnaires.

- ceux fonctionnant avec seulement une *connaissance partielle* de l'environnement aussi bien dans l'espace (locale) que dans le temps (instantanée) (cf. par exemple Lim 1968, Cahn et Phillips 1975, Lumelsky et Stepanov 1987). Dans ce cas, l'aspect "temps réel" pose moins de difficulté puisque la quantité d'information à traiter est considérablement réduite, et l'environnement qui ne doit pas forcément être mémorisé peut être non stationnaire.

Dans le cadre de ce projet, c'est délibérément au deuxième type d'algorithme que nous nous intéressons. L'environnement est constitué d'un ensemble de points de contraste disposés aléatoirement dans un plan (cf. Chap.II, §.II.3.2.). La plate-forme mobile et l'oeil-DEM étant tous deux circulaires et concentriques, le guidage du robot se résume ici, à contrôler la trajectoire d'un disque de rayon R_0 , se déplaçant dans un plan horizontal.

Les deux méthodes classiques, généralement utilisées pour représenter le mouvement d'un mobile dans son environnement sont :

- 1 pour une forme quelconque, de représenter tout au long de sa trajectoire, le mobile avec ses propres dimensions physiques, dans l'environnement original ; c'est le cas typique où le contrôle du déplacement de l'objet doit tenir compte de sa forme et de son orientation.

- 2 pour une forme circulaire, de réduire les dimensions du robot à un point représentant son centre, et d'élargir en conséquence les dimensions des obstacles, d'une quantité égale au rayon du robot. Ce principe permet de définir un "*espace de configuration*" (Udupa 1977, Moravec 1983, Lozano-Pérez 1983), dans lequel l'évitement de collision se traduit par le fait que la trajectoire du *centre* du robot ne doit jamais pénétrer à l'intérieur de ces "obstacles élargis". C'est ce type de représentation qui a été adopté par la suite.

V.2.1.a Critères géométriques d'anticollision

Le principe adopté ici pour éviter un point de contraste signalant la présence d'un obstacle est simple : il consiste pour le robot, à détecter le contraste *sans aucune anticipation* (c'est-à-dire au moment où le robot va entrer en contact avec lui) et à braquer, de façon à ce que son mouvement devienne *au minimum tangent* au point de contraste. Par cette minimisation délibérée de l'anticipation, le robot se réserve le maximum de "liberté" pour toutes les tâches additionnelles qu'il pourrait recevoir d'un niveau supérieur.

V.2.1.b Critères supplémentaires

Pour chaque contraste ainsi détecté il existe en fait un ensemble de plusieurs directions possibles (représentées par le groupe de flèches à la fig.V.3b) répondant au critère géométrique d'anticollision présenté ci-dessus. Le choix d'une direction parmi cet ensemble de solutions possibles nécessite les critères supplémentaires suivant :

- si la couche anticollision fonctionne seule (*mode errance*), alors le choix s'effectue sur la base du critère qui minimise la valeur α_{rot} de l'angle à tourner. Ce critère d'une part économise la mécanique et l'énergie du robot, et d'autre part maximise la rapidité de réaction du robot.
- si la couche anticollision fonctionne en *association avec d'autres couches supérieures*, alors le choix est laissé à la responsabilité de ces dernières. Dans le cadre de ce projet, puisque ces couches supérieures sont condensées sous la forme d'un *but*, le choix s'effectue de façon à minimiser l'angle entre la nouvelle direction et la direction $\overrightarrow{OB}$ du but. Ce critère est celui qui permet au robot de se conformer le plus directement à la consigne de but et contrairement au "mode errance" il ne minimise pas l'angle de braquage. On notera que la distance proprement dite du but n'intervient pas ici.

V.2.1.c Cas d'un mouvement continu et d'un senseur parfait

Dans ce cas très théorique (fig.V.3) où le périmètre (rayon R_v) du système sensoriel est confondu avec le rayon physique du robot (R_o), l'algorithme anticollision conduit le robot à choisir comme nouvelle direction, lorsqu'il détecte le contraste, la direction perpendiculaire à la direction $\overrightarrow{OC}$ formée par le contraste et le centre du robot (fig.V.3b). Si une consigne additionnelle de but est fournie (fig.V.3c), l'algorithme tout en gardant prioritaire l'aspect anticollision, conduit le centre du robot à pivoter autour des points de contraste (selon un cercle de rayon R_o) jusqu'à ce que son hémichamp orienté dans la direction du but soit à nouveau libre (cf. Lim 1968).

V.2.1.d Aspects réflexes de l'algorithme anticollision

En tout point O de l'espace, la direction $\overrightarrow{V_o(t+1)}$ dans laquelle doit tourner le robot, est complètement déterminée par la configuration instantanée de celui-ci dans son environnement ; cette configuration est paramétrée par les vecteurs suivants :

- $\overrightarrow{V_o(t)}$ qui représente l'orientation du robot avant braquage.
- l'ensemble des vecteurs $\{\overrightarrow{OC_n}\}$ formés par les points de contraste rapportés au point O.
- éventuellement le vecteur $\overrightarrow{OB}$ formé par le but rapporté au point O.

L'opération non linéaire qui combine à chaque instant ces différents vecteurs en un vecteur résultant $\overrightarrow{V_o(t+1)}$, est complètement déterminée à partir des différents critères présentés ci-dessus. En pratique, elle est effectuée par la couche anticollision via une technique de calcul parallèle très spécifique qui est présentée au paragraphe suivant (§.V.3.2.).

On peut faire l'analogie entre cet *aspect réflexe* (c'est-à-dire instantané et déterministe) qui gouverne ici le principe d'évitement de collision, et la technique *des champs artificiels de potentiels*, qui décrit le comportement d'un bras manipulateur ou d'un robot mobile, comme celui

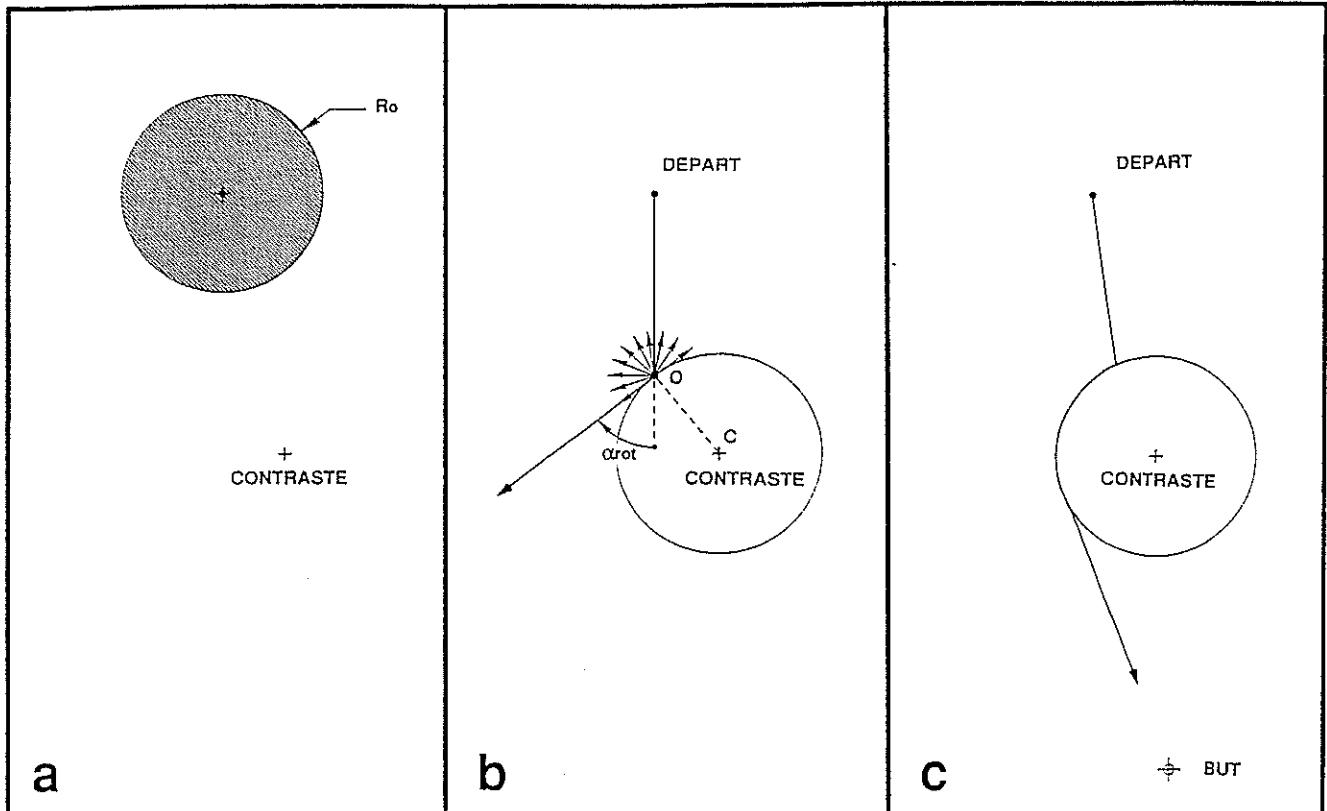


Fig.V.3 Principes géométriques de l'évitement de collision dans le cas théorique d'un mouvement continu et d'un capteur parfait (a) Représentation de la dimension physique du robot (cercle hachuré de rayon R_o) et de l'environnement (ici un seul point de contraste) (b) Évitement de collision dans le "mode errance": lorsqu'il détecte le contraste, le robot tourne dans la direction perpendiculaire à la direction du contraste (c) Même principe anticollision qu'en (b) mais avec une consigne additionnelle de but. En (b) et (c) le cercle dessiné autour des points délimite l'espace de configuration.

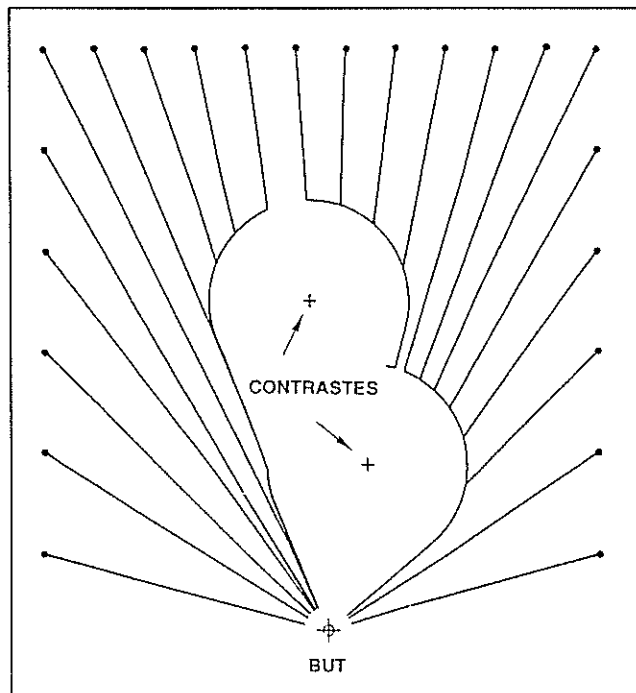


Fig.V.4 Réseau de trajectoires associé, à une configuration formée par deux points de contrastes et un but fixe. Chaque trajectoire peut être interprétée comme une ligne de champ, appartenant à un "champ artificiel de potentiels" auquel est "soumis" le robot mobile.

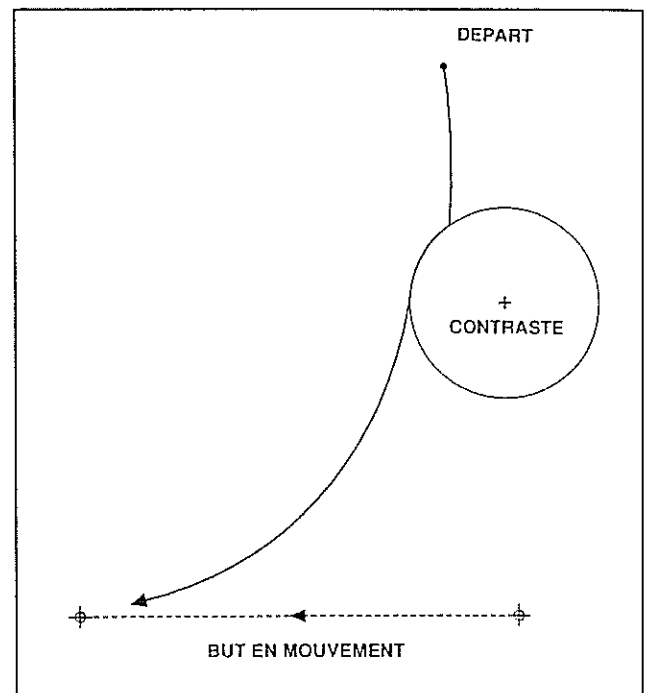


Fig.V.5 Illustration d'une simulation où le but est en mouvement (ici à vitesse constante), ce qui n'affecte en rien l'évitement de collision

d'un système soumis à un champ de vecteurs force (Khatib 1986, Koditschek 1987, Noborio et al. 1989). Dans notre cas, le mouvement du robot s'interprète comme étant régi par une combinaison (non linéaire) de forces répulsives générées par les obstacles, et éventuellement de forces attractives générées par le but. Ainsi la fig.V.4 qui illustre un réseau de trajectoires, obtenu pour différents points de départ, peut s'interpréter comme un réseau de lignes de champ (admettant ici des discontinuités au niveau de la différentielle spatiale) associé à cette configuration formée de deux points de contraste et d'un but fixe.

Puisque le principe géométrique de l'évitement de collision repose sur une opération vectorielle instantanée --et par conséquent rafraîchie à chaque instant-- il n'est pas affecté par le fait que la cible soit en mouvement. Cette propriété est illustrée par la simulation de la fig.V.5 qui montre une trajectoire obtenue pour une cible en mouvement rectiligne à vitesse constante.

V.2.2. Principe du calcul effectué par le système anticollision : génération de patterns moteurs

L'efficacité de l'algorithme anticollision repose non seulement sur la simplicité des principes géométriques évoqués ci-dessus, mais surtout sur le parallélisme quasi "naturel" du calcul auquel il fait appel. L'idée de base qui sous-tend ce parallélisme est de traiter instantanément et de manière simultanée, tous les points de contraste qui apparaissent à l'entrée du système anticollision, et de leur appliquer individuellement une série d'opérations, indépendante de leur angle polaire (c'est-à-dire de leur position dans le réseau).

Le principe de ce calcul parallèle est détaillé à la fig.V.6. Contrairement au modèle parfait du paragraphe précédent, on se place ici dans le cas plus général où le *périmètre de vision* (rayon R_v) et le *périmètre physique* du robot (rayon R_o) sont *distincts*. Les deux schémas de la fig.V.6 résument deux étapes fondamentales du calcul effectué par le système anticollision.

V.2.2.a Opérations appliquées individuellement à chaque point de contraste

La fig.V.6a illustre le calcul individuel effectué sur chaque point de contraste, dès l'instant où il apparaît à l'entrée du système anticollision ; cette opération se déroule elle-même en deux étapes séquentielles :

- 1 seuillage en distance : ce seuillage élimine tous les contrastes situés à l'extérieur du cercle de vision ($D > R_v$) et limite ainsi l'anticipation de l'algorithme anticollision (cf. §.V.2.1.).

- 2 génération d'une zone angulaire interdite : cette zone (gris foncé, à la fig.V.6a), détermine l'ensemble des directions susceptibles de provoquer une collision avec le contraste C. Cette zone est symétrique par rapport à la direction $\overrightarrow{OC}$ du contraste, et est générée à partir des deux tangentes au robot, issues du point de contraste C. La largeur angulaire ($2\alpha_{int}$) de cette zone interdite est

indépendante de l'angle polaire α_c du contraste, mais par contre est fonction de sa distance radiale D :

$$\alpha_{int} = \arcsin(R_o / D) \quad (\text{éq.V.1})$$

La "zone libre" (gris clair à la fig.V.6a), complémentaire à la "zone interdite", regroupe par définition l'ensemble des directions permettant d'éviter la collision avec C (symbolisé par un groupe de flèches à la fig.V.3). Comme on l'a vu au paragraphe précédent, la nouvelle direction $\vec{V}_o(t+1)$ du robot doit être nécessairement choisie dans la zone libre, et si aucune instruction de but n'est présente (comme c'est le cas à la fig.V.6a), ce choix est effectué de façon à minimiser l'angle de braquage α_{rot} .

La largeur ($2\alpha_{int}$) de la zone interdite générée par chaque contraste, peut varier ici entre $2\arcsin(R_o/R_v)$ et 180° . Dans le modèle théorique ($R_v=R_o$) du paragraphe précédent, la largeur des zones interdites était constante et limitée à la seule valeur de 180° .

V.2.2.b Interactions latérales entre chaque point de contraste : mélange des zones interdites

La fig.V.6b illustre le principe d'interaction latérale entre plusieurs zones interdites lorsque plusieurs points de contraste (C_1 , C_2 et C_4) sont détectés simultanément à l'intérieur du cercle de vision (en pointillé). Cette interaction latérale consiste très simplement, à établir une "zone interdite résultante" Z_{int} , en calculant l'union des "zones interdites" $Z_{int}(C_i)$ générées individuellement par chacun des contrastes :

$$Z_{int} = \{ Z_{int}(C_1) \cup Z_{int}(C_2) \cup Z_{int}(C_4) \} \quad (\text{éq.V.2})$$

La nouvelle direction $\vec{V}_o(t+1)$ du robot doit nécessairement être choisie dans la "zone libre" (gris clair à la fig.V.6b) complémentaire à la "zone interdite résultante" (gris foncé à la fig.V.6b), cette dernière n'étant d'ailleurs pas forcément continue.

On peut rappeler, que dans le cas illustré à la fig.V.6c, où une instruction de but est fournie sous la forme d'un angle (α_{but}), la nouvelle direction du robot est choisie au plus près de cette direction du but, c'est à dire de manière à minimiser $|\alpha_{rot} - \alpha_{but}|$. Il reste cependant un type de configuration où ce dernier critère n'est pas suffisant et laisse encore la possibilité entre deux solutions : ce cas apparaît lorsque la "zone interdite" résultante présente une symétrie locale par rapport de la direction $\vec{OB}$ du but. Dans cette situation, le choix s'effectue alors selon le critère qui minimise l'angle de rotation α_{rot} .

Le principe du calcul qui vient d'être développé ici pour le système anticollision présente les avantages suivants :

- sa structure naturellement parallèle facilite l'implémentation "hardware" du système anticollision sous forme d'un réseau analogique (cf. Thèse C. Blanes, Chap.V) ; notamment le concept de zones interdites "*propagées*" à partir de chaque point de contraste est bien adapté aux interactions de type *latéral*, nécessaires à la convergence des nombreuses informations sensorielles en un signal moteur unique.

- il conserve le plus loin possible la structure parallèle du traitement du signal, la convergence réelle du calcul ne s'effectuant qu'au moment du choix effectif, parmi les zones libres, de l'angle à tourner. De ce fait, en transformant la carte polaire des obstacles en une *carte de commandes motrices* (paramétrée par des angles de braquage interdits ou autorisés), il introduit un nouveau mode de représentation de l'environnement. On peut en effet considérer que l'ensemble de la chaîne sensorimotrice transforme chaque configuration instantanée {environnement+robot} en un "*pattern moteur*" (résultant de l'union des zones interdites à la fig.V.6b) qui décrit l'ensemble des commandes motrices envisageables à cet instant pour le robot.

- il constitue un système de *fusion multi-sensorielle* simple et efficace, puisque il "mélange" en temps réel les informations en provenance des multiples DEMs et du détecteur de cible, et les transforme en une *consigne unique de braquage*.

- bien qu'ici il ne soit utilisé que pour le système anticollision, il peut être généralisé à des couches plus sophistiquées de navigation. Pour cela, il suffit par exemple d'augmenter la taille du cercle de vision et de ce fait l'anticipation du robot.

V.3. PARAMETRAGE DE LA CHAÎNE COMPLETE "OEIL-DEM + SYSTEME-ANTICOLLISION"

V.3.1. Principe du paramétrage

N'importe quel type de senseur de proximité, qu'il soit mécanique, ultrasonore, ou optique pourrait alimenter le système anticollision tel qu'il vient d'être présenté. Cela montre que ce système est peu contraignant par lui même et constitue ainsi un excellent moyen pour étudier les performances de l'oeil-DEM dans une chaîne visuo-motrice complète.

Les différentes limitations de l'oeil-DEM, vont être intégrées à la tâche anticollision, en ajustant seulement deux types de paramètres qui sont :

- 1 l'anticipation du robot.
- 2 la modulation du flux de connexions de chaque DEM sur le réseau anticollision.

V.3.1.a Le coefficient relatif d'anticipation du robot : $K_{ant} = (R_v - R_o)/R_o$

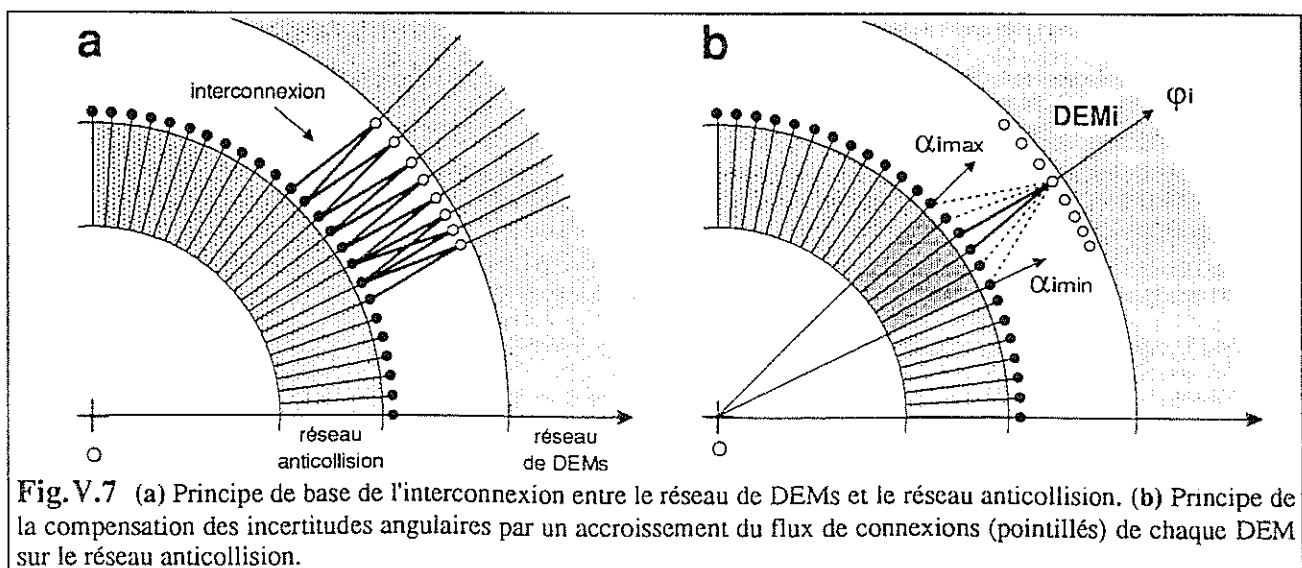
Ce coefficient quantifie le pouvoir d'anticipation du robot. Il peut prendre une valeur comprise entre 0 et l'infini et son ajustement va résulter du compromis entre les deux contraintes suivantes :

- il doit être augmenté de manière à compenser les différentes incertitudes portant sur l'estimation de la distance radiale des contrastes.
- inversement il doit être minimisé, afin de se conformer le plus possible au modèle théorique de comportement induit par l'algorithme anticollision dans le cas d'un senseur sans anticipation ($R_v = R_o$) décrit au §.V.2.1.

La suite de ce chapitre va montrer, qu'après avoir intégré les différentes incertitudes spécifiques à l'oeil-DEM, ce compromis conduit au même type de configuration que celle récapitulée au chapitre précédent (cf. §.IV.3.3.), à savoir un cercle de vision d'environ 50cm de rayon, pour un rayon du robot égal à 15cm.

V.3.1.b Modulation du flux de connexions de chaque DEM sur le réseau anticollision

Le réseau anticollision comporte exactement 96 voies (points noirs à la fig.V.7a qui n'en montre qu'un quadrant) représentant de manière isotrope *la carte polaire* du plan azimuthal du robot. Ce choix correspond à la résolution angulaire moyenne de l'oeil-DEM, et le chiffre exact de 96 voies a été ici dicté par le détecteur de cible fabriqué pour le prototype (cf. Thèse C. Blanes, Chap.IV) qui fait appel à 12 barrettes de 8 photodiodes chacune. Par conséquent, un tel réseau va délivrer des patterns moteurs, et donc des angles de braquage dont la résolution maximum sera égale à 3.75° .



La connexion (fig.V.7a) du réseau de DEMs (résolution angulaire *non uniforme*) sur le réseau anticollision (résolution angulaire *uniforme*) s'effectue de façon à encadrer la direction de visée ϕ_i de chaque DEM par deux valeurs correspondant à deux directions successives α_n et α_{n+1} dans le réseau anticollision. Certains DEMs situés dans les zones avant et arrière de l'oeil, où la résolution angulaire est très faible, convergent en un même point du réseau anticollision. Dans ce cas c'est la valeur minimum du signal de sortie des DEMs (homogène à un retard Δt et donc à une distance) qui est injectée dans le réseau anticollision.

Dans la suite, l'accroissement du nombre de connexions entre chaque DEM sur le réseau anticollision (connexions en pointillés à la fig.V.7b), va permettre de borner (par $\alpha_{\min}$ et $\alpha_{\max}$) les différentes incertitudes sur la position angulaire des contrastes détectés. Cette compensation aurait pu également s'effectuer en modulant la taille individuelle des zones interdites à l'intérieur même du réseau anticollision, mais cette solution est mal adaptée aux quelques DEMs frontaux qui convergent vers un même point et qui n'ont pas forcément les mêmes incertitudes angulaires. De plus, une modulation directement au niveau de l'interconnexion entre les deux réseaux autorise une asymétrie de la borne inférieure et de la borne supérieure, par rapport à ϕ_i .

V.3.1.c Remarque sur la méthode de simulation

Tous les résultats présentés dans la suite sont le fruit non seulement de la simulation de l'ensemble de l'oeil-DEM telle qu'elle a été présentée aux chapitres précédents, mais également d'une *simulation exacte* de la structure du réseau anticollision à savoir :

- la simulation des 96 voies indépendantes et de leur interconnexion avec le réseau de DEMs.
- la simulation pour chaque voie, du seuillage en distance et de la génération de la zone interdite.
- la simulation de l'opération de réunion des zones interdites.
- la simulation du choix final de la direction de braquage (et du mélange éventuel avec la direction de la cible).

V.3.2. Intégration des incertitudes engendrées par les translations élémentaires

V.3.2.a Calcul du coefficient d'anticipation

Comme on l'a vu au Chap.IV, l'une des spécificités de l'oeil-DEM est la relation de proportionnalité $\Delta L = G.R_v$ (cf. équ.IV.7) qui lie la longueur des translations élémentaires à la profondeur du champ de vision (R_v = rayon de vision).

Puisque la décision de braquage n'est "prise" qu'à la fin de chaque translation élémentaire, cela signifie que pendant toute la durée de ces dernières, le robot fonctionne en *boucle ouverte* au sens où il ne peut réagir, même si un contraste pénètre à l'intérieur de son périmètre de vision. En

conséquence, afin d'éviter la collision au cours même d'une translation élémentaire, le rayon de vision R_v doit excéder le rayon du robot R_o , d'une quantité au moins égale à ΔL :

$$R_v = R_o + \Delta L = R_o + G.R_v \quad (\text{éq.V.3})$$

et en transposant l'équ.IV.7, le coefficient d'anticipation $K_{ant}=(R_v-R_o)/R_o$ devient:

$$\boxed{K_{ant}(1) = G / (1-G)} \quad (\text{éq.V.4})$$

On peut rappeler que G dépend uniquement de la distribution angulaire des axes optiques dans l'oeil-DEM, et qu'il dépend de la résolution angulaire moyenne de ce dernier. Pour la valeur standard $G=0.2$ choisie jusqu'à présent, l'équ.V.4 conduit à un coefficient d'anticipation $K_{ant}=25\%$, c'est-à-dire à $R_v=1.25.R_o$ (cette configuration est également illustrée aux fig.V.9, V.10b).

V.3.2.b Ajustement de l'interconnexion entre le réseau DEM et le réseau anticollision

Chaque DEM peut être activé à n'importe quel moment d'une translation élémentaire ΔL . Par contre, chaque zone interdite (générée par chaque contraste détecté) doit être mémorisée jusqu'à la fin de la translation élémentaire. A cet instant où le pattern moteur est effectivement validé et où la direction de braquage est choisie, le point de contraste n'est plus nécessairement localisé dans la direction i du DEM $_i$ qu'il a activé. Ceci entraîne donc une incertitude (fig.V.8a) sur les coordonnées polaires (D_i , ϕ_i) délivrées par le DEM, incertitude qui doit être compensée avant d'être injectée dans le réseau anticollision.

L'incertitude angulaire (zone grisée à la fig.V.8a) engendrée par la translation élémentaire est comprise entre ϕ_i et ϕ_{i+1} (elle regroupe tous les points auxquels la translation élémentaire a permis d'activer le DEM $_i$, mais n'a pas été suffisante pour activer le DEM $_{i+1}$). La solution adoptée ici pour l'intégrer dans l'algorithme anticollision, a été de rajouter (fig.V.8b) une connexion latérale polarisée (au sens où elle a un effet dans le sens $i \rightarrow i+1$ mais pas dans le sens $i+1 \rightarrow i$) qui relie la sortie du DEM $n^\circ i$ à celle du DEM $n^\circ i+1$, sans modifier le flux de connexion, propre à chacun de ces DEMs. Ainsi chaque contraste détecté par le DEM $n^\circ i$, est interprété par le système anticollision comme un doublet de contrastes délivrés simultanément par le DEM $_i$ et le DEM $_{i+1}$.

L'incertitude en distance ($[D_i, D_{min}]$ à la fig.V.8a) engendrée par la translation élémentaire provient de la variation de la distance radiale réelle du contraste au cours de la translation. Pour un contraste localisé dans la zone angulaire $[\phi_i, \phi_{i+1}]$, cette incertitude en distance peut être bornée par l'intervalle suivant :

$$[D_i, D_i \cdot \sin(\phi_i) / \sin(\phi_{i+1})] \quad (\text{éq.V.5})$$

avec D_i représentant la distance radiale du contraste au moment où il active le DEM $_i$ et donc effectivement mesurée par ce dernier. L'incertitude définie par l'intervalle (V.5) est ici très

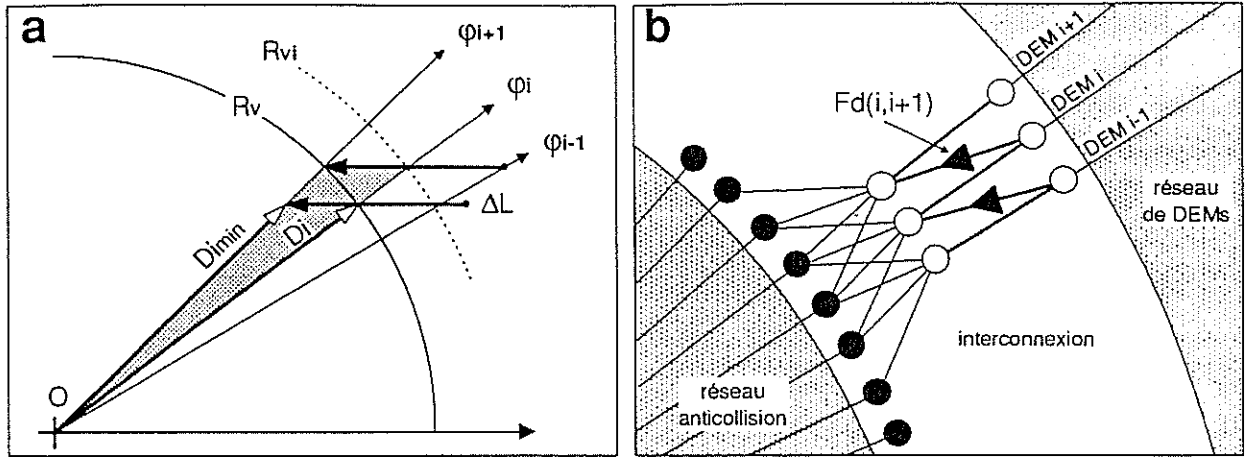


Fig.V.8 (a) Description géométrique des incertitudes en angle (zone grisée) et en distance [Di, Dimin] engendrées par chaque translation élémentaire (b) Compensation des incertitudes par une connexion latérale pourvue d'un contrôle de gain Fd (i, i+1), sur la sortie du DEM voisin (i+1).

simplement intégrée dans l'algorithme anticollision en imposant à l'interconnexion latérale reliant la sortie de DEMi à celle du DEMi+1 (fig.V.8b), le facteur de gain Fd (i, i+1) suivant :

$$Fd(i, i+1) = \sin(\varphi_i) / \sin(\varphi_{i+1}) \quad (\text{éq.V.6})$$

On peut noter que dans l'hémichamp frontal de l'oeil, le facteur Fd(i, i+1) provoque une atténuation du signal, alors que dans l'hémichamp postérieur il provoque une amplification. Le cas du système proximétrique frontal n'est pas détaillé ici. On notera simplement qu'il obéit au principe d'encadrement des incertitudes qui vient d'être évoqué, mais en tenant compte en plus du changement de repère (O'→O).

V.3.2.c Ajustement du seuillage sur la distance pour valider le cercle de vision Rv

Le système anticollision d'une part, et la distribution angulaire spécifique à l'oeil-DEM d'autre part, reposent tous deux sur la validité d'un échantillonnage systématique du cercle de vision de rayon Rv. Pratiquement, la sélection des points de contraste localisés à l'intérieur de ce cercle de vision, s'effectue via un seuillage (seuil Rvi) sur chaque voie à l'entrée du réseau anticollision. Le principe de seuillage est d'éliminer tous les signaux dont la valeur est supérieure à Rvi, et pour les autres de conserver intact leur valeur analogique qui paramètre ensuite la largeur de la zone interdite.

En pratique, les incertitudes générées par les translations élémentaires se répercutent sur la valeur réelle du seuil Rvi nécessaire dans chaque direction pour échantillonner correctement le cercle de vision. Tenir compte de ces incertitudes revient à choisir (fig.V.8a) une distance réelle de seuillage Rvi égale au rayon Rv divisé par le facteur de compensation $Fd(i, i+1) = \sin(\varphi_i) / \sin(\varphi_{i+1})$ déjà évoqué ci-dessus (éq.V.6) :

$$Rvi = Rv / Fd(i, i+1) \quad (\text{éq.V.7})$$

Cette modulation individuelle du seuil, valide une zone réelle de vision, qui est non pas le cercle R_v attendu, mais la zone de vision de forme plus complexe (en dents de scie) décrite à la fig.IV.6a du chapitre précédent (dans laquelle le cercle R_v est exactement inclus). En conséquence on s'attend à ce que certains points de contraste soient effectivement pris en compte par le système anticollision alors qu'ils se trouvent à l'extérieur du cercle de vision.

Par simplification, on pourrait opter pour un seuil en distance commun à tous les DEMs (c'est d'ailleurs le cas du prototype, cf. Thèse C. Blanes, Chap.V). Pour cela, il suffit de choisir comme seuil la valeur $(R_v + \Delta L/2)$ qui est supérieure à tous les R_{vi} , sur l'ensemble de l'oeil-DEM.

V.3.2.d Domaine de validité des translations élémentaires

Lorsque, pendant une translation élémentaire, deux DEMs successifs (DEM_i et DEM_{i+1}) sont activés par un même point de contraste, l'information en sortie du premier (DEM_i), en dehors du fait qu'elle est redondante avec le DEM suivant (DEM_{i+1}), accroît inutilement la zone interdite associée au contraste par le système anticollision, et donc le braquage du robot. Une solution permettant de limiter ce défaut est de ne prendre en compte les points de contraste (qui arrivent de façon asynchrone sur le réseau anticollision) que *pendant la seconde moitié de la translation élémentaire*. Ce choix n'affecte en rien la validité de l'échantillonnage dans le cercle de vision (R_v). En effet la distribution angulaire des axes optiques, est calculée pour que le pas linéaire d'échantillonnage $\Delta\phi_x$ (défini par l'intersection du mouvement à une distance radiale D donnée avec deux axes successifs de l'oeil-DEM) soit au maximum égal à la moitié de la translation élémentaire (cf. Chap.IV, §.IV.2.) et par conséquent :

- si $\Delta\phi_x = \Delta L/2$, alors l'activation du DEM nécessite un mouvement de longueur minimum égale $\Delta L/2$ et donc ne peut avoir lieu que pendant la deuxième moitié de la translation
- si $\Delta\phi_x < \Delta L/2$, alors plusieurs DEMs successifs sont nécessairement activés au cours de la translation, l'activation du dernier de ces DEMs se situant nécessairement dans la seconde moitié de la translation.

Une solution pratique au niveau du système anticollision pour ne valider que la seconde moitié de la translation, est d'effectuer *la remise à zéro du pattern moteur*, non pas au début, mais seulement à la moitié de chaque translation. Ainsi pendant chaque seconde moitié de translation, un nouveau pattern moteur se construit de façon asynchrone au fur et à mesure de l'arrivée des contrastes, et c'est seulement à la fin de la translation élémentaire que la direction de braquage est effectivement calculée (à partir du pattern moteur résultant et éventuellement de la consigne instantanée de but) et immédiatement envoyée aux moteurs du robot.

V.3.2.e Exemples

Les simulations présentées ici et jusqu'à la fin de ce mémoire tiennent compte de tous les principes de connexions, de seuillage et de validation des translations élémentaires évoqués ci-dessus.

La fig.V.9a,b,c reprend les exemples de la fig.V.3a,b,c qui décrivait le modèle comportemental théorique généré par le système anticollision équipé d'un senseur parfait.

La fig.V.9a illustre la configuration de l'oeil-DEM simulée ici à savoir $G=0.2$ et $R_v = 1,25.R_o$. Afin d'analyser uniquement l'aspect échantillonnage lié aux translations élémentaires, on suppose dans ce paragraphe que chaque ommatidie présente un angle d'acceptance ponctuel et est capable de détecter n'importe quel point de contraste coupant sa direction optique (pas de problèmes d'éclairage, de sensibilité au contraste, ou de correspondance). Dans le cadre de cette hypothèse, une représentation géométrique de l'environnement sous forme de points de contraste (et non pas visuelle sous forme de niveaux de gris) est suffisante.

Les fig.V.9b et V.9c reprennent les deux niveaux de comportement envisageables pour le robot ("mode errance" et "mode poursuite de cible"). La principale différence par rapport au modèle théorique est l'émergence de ce qu'on pourrait appeler une "zone d'incertitude" autour de chaque point de contraste, qui est délimitée par les deux cercles R_o et R_v dans l'espace de configuration. A l'intérieur de cette zone, la trajectoire locale du robot, bien qu'étant déterministe ne peut pas être facilement prédite puisqu'elle dépend de la trajectoire cumulée depuis le point de départ.

La taille de cette "zone d'incertitude" est fixée par K_{ant} , le coefficient d'anticipation, lui-même

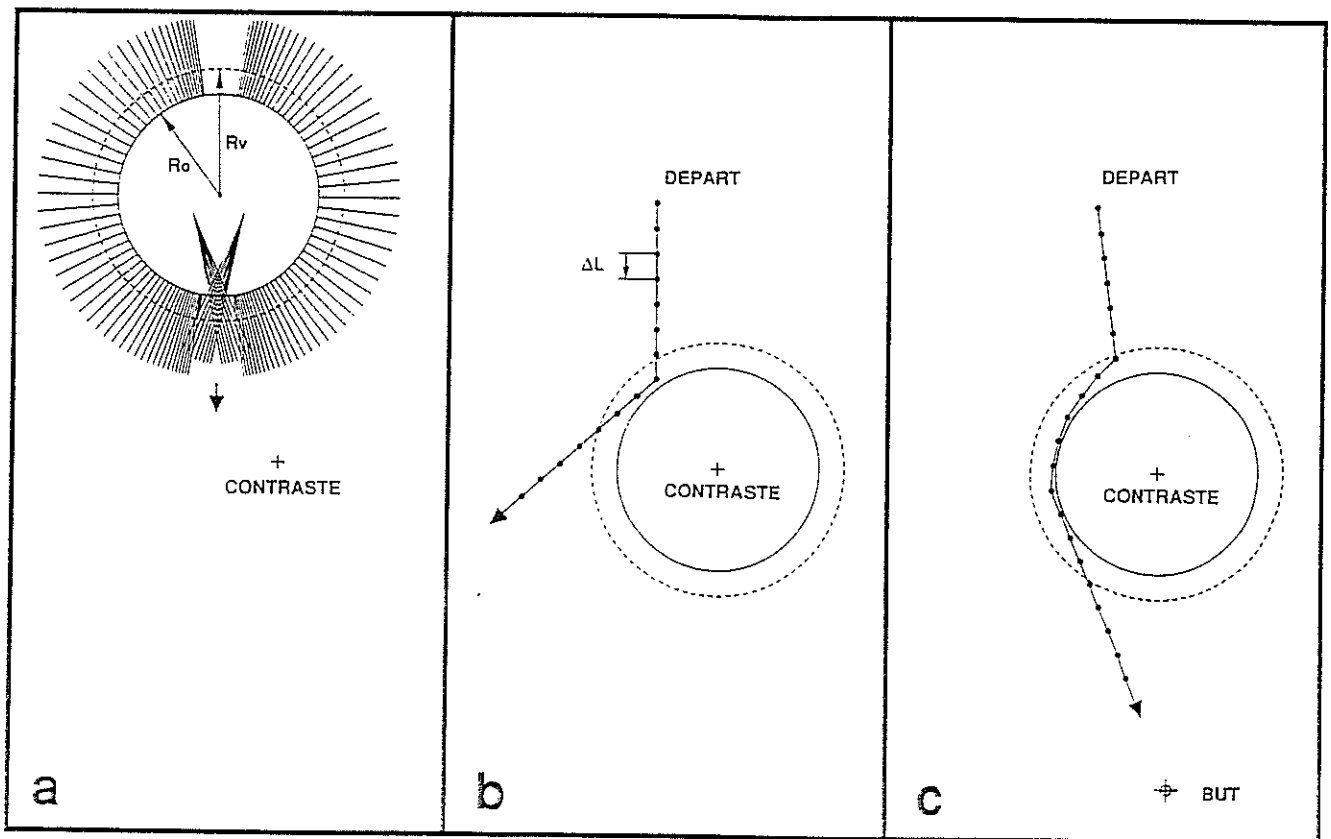


Fig.V.9 Evolution de la stratégie anticollision après avoir intégré les incertitudes engendrées par les translations élémentaires et l'architecture de l'oeil-DEM. Mêmes exemples que la fig.V.3.

Ces performances ne dépendent donc pour l'instant, que du seul paramètre G caractérisant la résolution angulaire de l'oeil-DEM.

Cette propriété est confirmée par les simulations regroupées à la fig.V.10 qui présente une analyse comportementale du robot en fonction de la résolution angulaire G de son oeil-DEM. Ces exemples reposent sur un environnement complexe formé de nombreux contrastes, et illustrent aussi bien "le mode errance" (colonne de gauche) que "le mode poursuite de cible" (colonne de droite).

Le cas V.10a rappelle le modèle théorique de comportement attendu pour le robot. Il repose sur un mouvement continu, un senseur parfait et une anticipation nulle. Un tel "senseur parfait" peut s'interpréter comme un oeil-DEM qui aurait une résolution angulaire infinie et donc une valeur $G = 0$.

Les deux autres exemples illustrent deux configurations réalistes pour l'oeil-DEM :

- le cas V.10b simule l'architecture optique standard évoquée jusqu'à présent (118 axes optiques, c'est celle qui est adoptée pour le prototype) caractérisée par $G=0.2$ et par une anticipation $K_{ant}=25\%$.
- le cas V.10c simule une architecture optique à très basse résolution (seulement 64 axes optiques) caractérisée par $G=0.4$. Cette configuration nécessite des translations élémentaires 2.7 fois plus importantes que pour la précédente configuration et impose donc une anticipation également plus importante $K_{ant}=67\%$.

Une vue d'ensemble des résultats regroupés à la fig.V.10 met en évidence les deux propriétés fondamentales suivantes :

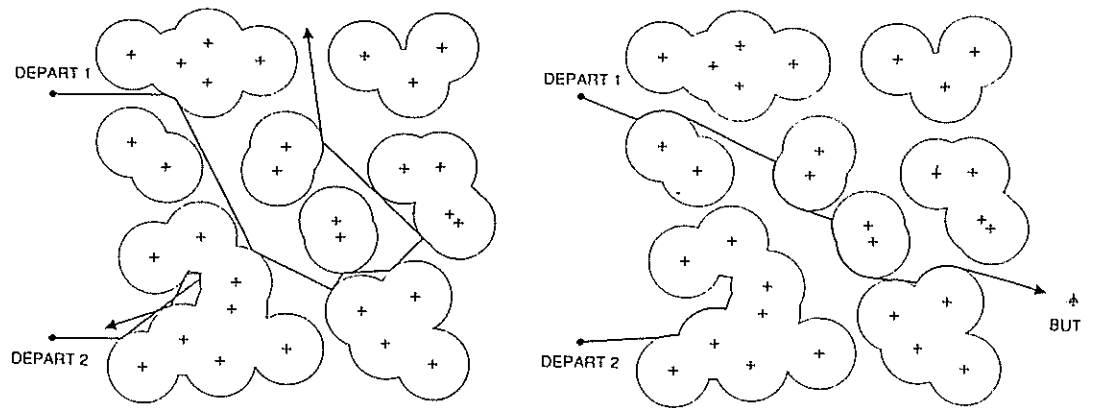
- 1 la tâche d'anticollision est exécutée *sans faute*, quel que soit le comportement du robot (errance, poursuite de but, piégé dans un cycle limite) et surtout quelle que soit la résolution angulaire de l'oeil-DEM
- 2 plus la résolution angulaire est *grossière*, plus les trajectoires du robot sont *rudimentaires*.

En ce qui concerne la première propriété elle est facilement quantifiable dans la mesure où il suffit de constater que le centre du robot ne pénètre jamais à l'intérieur de l'espace de configuration. La deuxième propriété traitant de la "qualité" des trajectoires du robot est plus difficile à formaliser de manière explicite mais elle est cependant bien illustrée par l'opposition des cas V.10b et V.10c qui font appel au même environnement et à la même taille physique du robot. On constate en effet que dans le cas V.10c, les mouvements du robot sont moins précis et qu'il a besoin de plus d'espace pour effectuer ses manoeuvres. Contrairement au cas V.10b, ceci l'empêche de se glisser entre certains obstacles alors que physiquement la place est libre comme le confirme l'espace de configuration. Ce handicap est bien évidemment dû à la taille importante des translations élémentaires, qui vont de pair avec la mauvaise résolution angulaire du système visuel.

$$G = 0$$

$$R_v = R_o$$

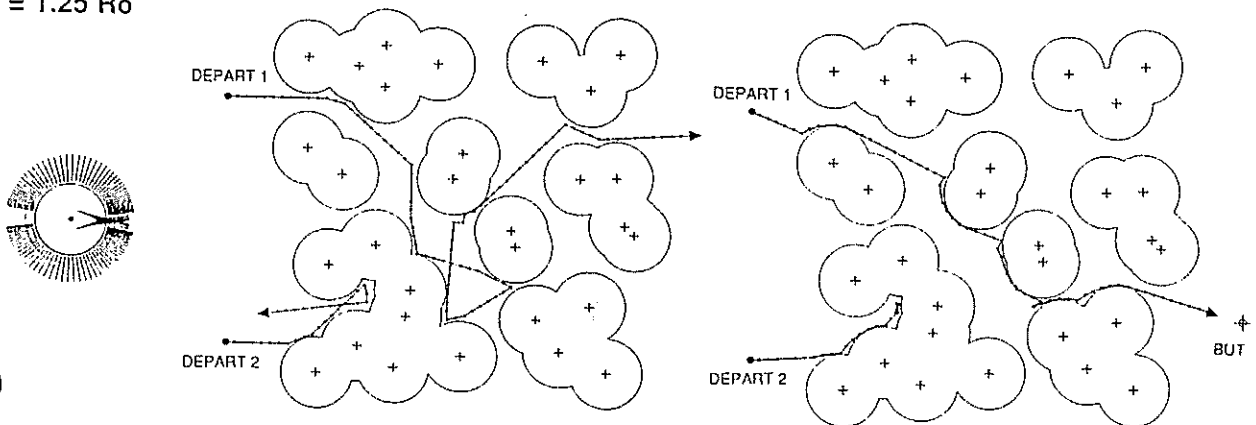
a



$$G = 0.2$$

$$R_v = 1.25 R_o$$

b



$$G = 0.4$$

$$R_v = 1.67 R_o$$

c

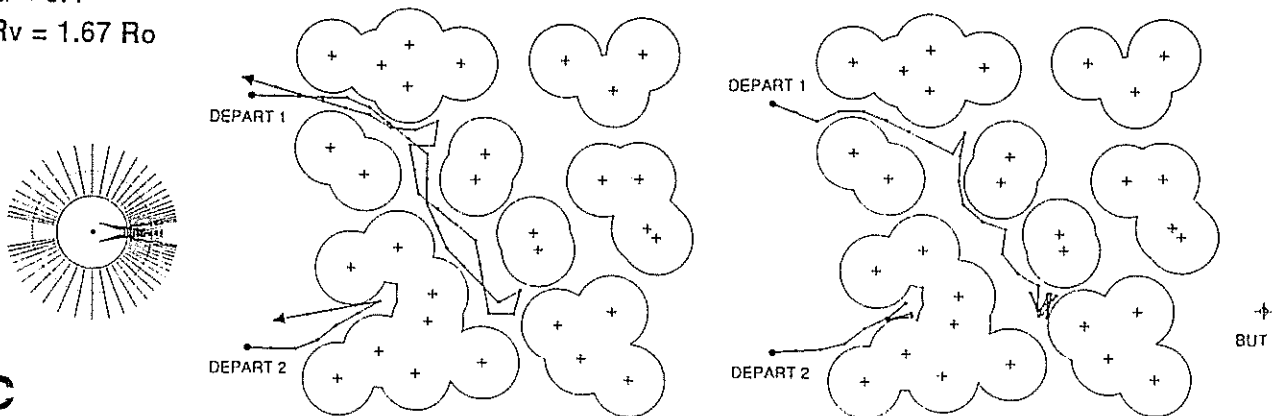


Fig. V.10 Analyse comportementale du robot en fonction de la résolution angulaire de son oeil-DEM. Pour toutes ces simulations l'environnement et la taille physique du robot sont invariants. **A gauche** : mode errance. **A droite** : mode poursuite de cible ; dans ce cas le robot peut se retrouver piégé dans des cycles limites non résolus par le système anticollision. (a) modèle théorique de comportement obtenu avec un capteur parfait, équivalent à un oeil-DEM avec une résolution angulaire infinie ($G=0$, $\Delta L=0$) (b) Configuration standard de l'oeil-DEM : 118 axes optiques, $G=0.2$, $Kant=25\%$. (c) Configuration basse résolution de l'oeil-DEM : 64 axes optiques, $G=0.4$, $Kant=67\%$.

V.3.3. Intégration des incertitudes de mesures inhérentes aux DEMs

V.3.3.a Incertitudes en distance dues aux problèmes de correspondance non résolus

Ce problème a déjà été évoqué à la fin du Chap.IV (cf. §.IV.4.4. et fig.IV.15), alors que l'oeil-DEM était encore testé en boucle ouverte. On peut rappeler que la solution proposée pour compenser partiellement les erreurs en distance (erreurs de surestimation) non éliminées par le filtrage spatio-temporel, est de poser le postulat suivant : tout contraste dont la distance a été surestimée par un DEM au cours de la translation élémentaire ΔL_n , est correctement estimé par un des DEMs voisins au cours la translation élémentaire ΔL_{n+1} suivante.

Afin d'intégrer ce postulat dans la stratégie anticollision, l'idée est non pas de doubler la taille des translations élémentaires, mais simplement de choisir un rayon de vision R_v qui excède R_o non pas de ΔL comme précédemment mais de $2\Delta L$:

$$R_v = R_o + 2\Delta L \quad (\text{équ.V.8})$$

Ainsi, lorsqu'un contraste susceptible de provoquer une collision, pénètre dans le cercle de vision du robot, deux cas de figure peuvent apparaître :

- ou bien le contraste est localisé dès la première translation, à l'intérieur du cercle de vision : dans ce cas le robot braque immédiatement en respectant les principes d'anticollision
- ou bien pour des raisons de correspondance, le contraste n'est pas détecté dès la première translation (bien qu'il soit à l'intérieur du cercle de vision) : dans ce cas le robot continue sa course et effectue une seconde translation sans danger grâce à sa réserve d'anticipation (équ.V.8) ; d'après le postulat évoqué ci-dessus, cette seconde translation doit lui permettre de localiser le contraste précédemment sous-estimé et de réagir en conséquence.

Il faut noter, que cette stratégie n'est pas infallible, car le postulat évoqué ci-dessus n'est pas toujours vrai. Là encore, cette remarque nécessiterait d'être complétée par une étude statistique évaluant le nombre de collisions dues à des problèmes de correspondance. Dans le cadre de ce mémoire, on se contentera, d'observer qualitativement que ce nombre est très faible puisque la tâche anticollision n'a pratiquement jamais été mise en défaut dans les simulations pourtant complexes présentées à la fin de ce chapitre (environnement aléatoire, cible mouvante etc ...).

De la même façon que précédemment, en transposant l'équ.IV.7 $\Delta L = G.R_v$, on peut exprimer le nouveau coefficient d'anticipation :

$$K_{ant}(2) = 2G / (1-2G) \quad (\text{équ.V.9})$$

Dans le cas standard caractérisé par $G = 0.2$, l'équ.V.9 conduit à une anticipation $K_{ant} = 67\%$ ($R_v = 1.67.R_o$).

V.3.3.b Incertitudes dues à l'angle d'acceptance des ommatidies

Le second type d'incertitude (lié aussi indirectement aux problèmes de correspondance) est provoqué par la largeur finie de l'angle d'acceptance des ommatidies qui, si l'on veut respecter les principes de filtrage spatio-temporel évoqués au Chap.III, peut prendre des valeurs très importantes. On peut rappeler que la largeur de l'angle d'acceptance entraîne deux types d'incertitude :

- une incertitude en distance K_d , qui varie avec la valeur de contraste : cette incertitude qui augmente avec l'angle d'acceptance, peut aller jusqu'à prendre les valeurs extrêmes $K_d = +8\%$ à $K_d = -30\%$ (valeurs relevées au Chap.III, cf. §.III.3.4.c). Une solution pour tenir compte de la surestimation en distance due à la partie positive de cette incertitude, est d'atténuer par le facteur $(1+K_d)$ l'information en distance D_i disponible à la sortie de chaque DEM_i et réellement injectée dans le réseau anticollision (avant le seuillage en distance) :

$$D_i \text{ réelle} = D_i \text{ mesurée} / (1+K_d) \quad (\text{équ.V.10})$$

Pour une distance donnée, l'équ.V.10 revient à recalibrer chaque DEM_i par rapport à la valeur maximum qu'il peut délivrer en sortie.

- une incertitude en angle qui peut être bornée de la façon suivante (cf. fig.V.11) :

Lorsqu'un contraste est détecté, l'amplitude du signal filtré avant seuillage est comprise entre la valeur H_h du seuil et la valeur maximum du signal filtré ; cette dernière est obtenue pour une réponse indicielle et dans ce cas coïncide avec l'axe optique ϕ_i de l'ommatidie. Cet intervalle sur les valeurs du signal filtré se traduit dans le domaine spatial (on ne tient pas compte ici de la distorsion dans les zones avant et arrière de l'oeil) par une zone d'incertitude angulaire $[\phi_{\min}, \phi_i]$ (zone en noir à la fig.V.11) associée à cette ommatidie et dont le sommet est le centre de la lentille (positionnée à la distance D_{lent} du centre O du robot). Dans le cas de la forme gaussienne tronquée utilisée en simulation pour modéliser la sensibilité angulaire de chaque ommatidie (cf. §.5.2.), cette

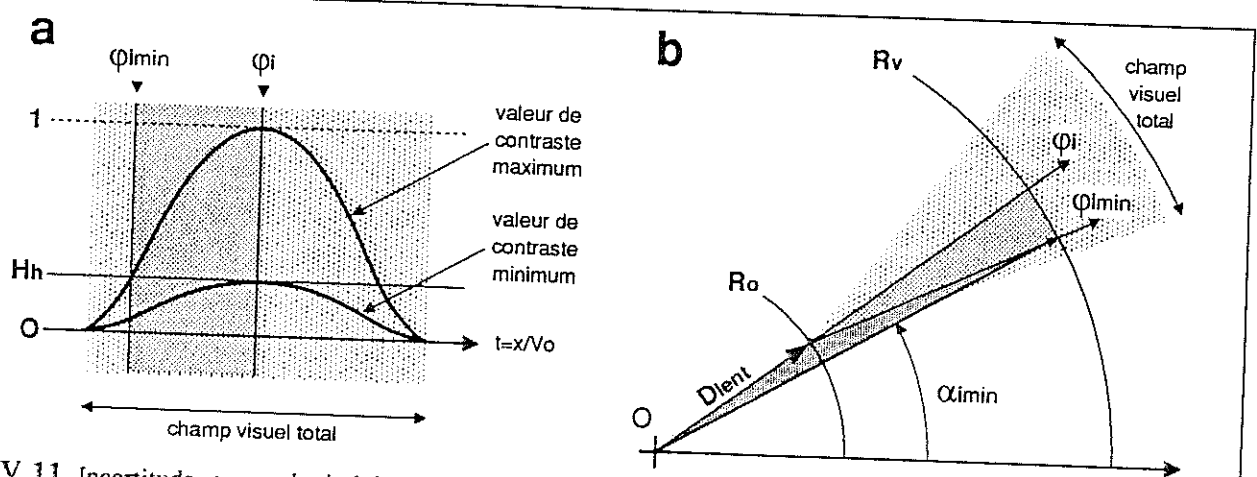


Fig.V.11 Incertitude en angle induite par la largeur $\Delta\phi_i$ de l'angle d'acceptance de chaque ommatidie (a) localisation du déclenchement par seuillage sur le signal filtré à l'entrée de chaque ommatidie (b) gris clair: zone d'incertitude angulaire associée à la zone de déclenchement du seuil ; gris foncé: incertitude ramenée à un système de coordonnées centré sur le robot.

zone s'exprime ainsi :

$$\varphi_i - \varphi_{\min} = 0.5 \cdot \Delta\varphi_i \cdot [\ln(so + Hh \cdot (1-so))]^{1/2} / [\ln(so + 0.5 \cdot (1-so))]^{1/2} \quad (\text{éq. V.11})$$

Tous les contrastes injectés dans le système anticollision se trouvent à une distance radiale maximum approximativement égale à R_v , et par conséquent la zone d'incertitude angulaire ramenée au centre O de l'oeil-DEM peut être bornée de la façon suivante :

$$\alpha_{i \max} = \varphi_i \quad (\text{éq. V.12})$$

$$\alpha_{i \min} = \varphi_{\min} + \arcsin [D_{\text{lent}}/R_v \cdot \sin(\varphi_i - \varphi_{\min})] \quad (\text{éq. V.13})$$

Le flux de connexions issu de chaque DEM_i et qui est représenté individuellement par l'intervalle $[\alpha_{i \min}, \alpha_{i \max}]$ est donc déterminé à partir des équ. V.11, V.12 et V.13.

V.3.3.c Exemples

La fig.V.12 illustre l'effet des incertitudes inhérentes au DEM dans les cas d'école déjà évoqués précédemment (cf. fig.V.3 et fig.V.9). La configuration de l'oeil-DEM simulée ici correspond au "filtrage+seuillage standard" c'est-à-dire : $G=0.2$ + un recouvrement angulaire pour DEMs bidirectionnels + un seuil en contraste $Hh=0.2$. Une telle configuration conduit à une

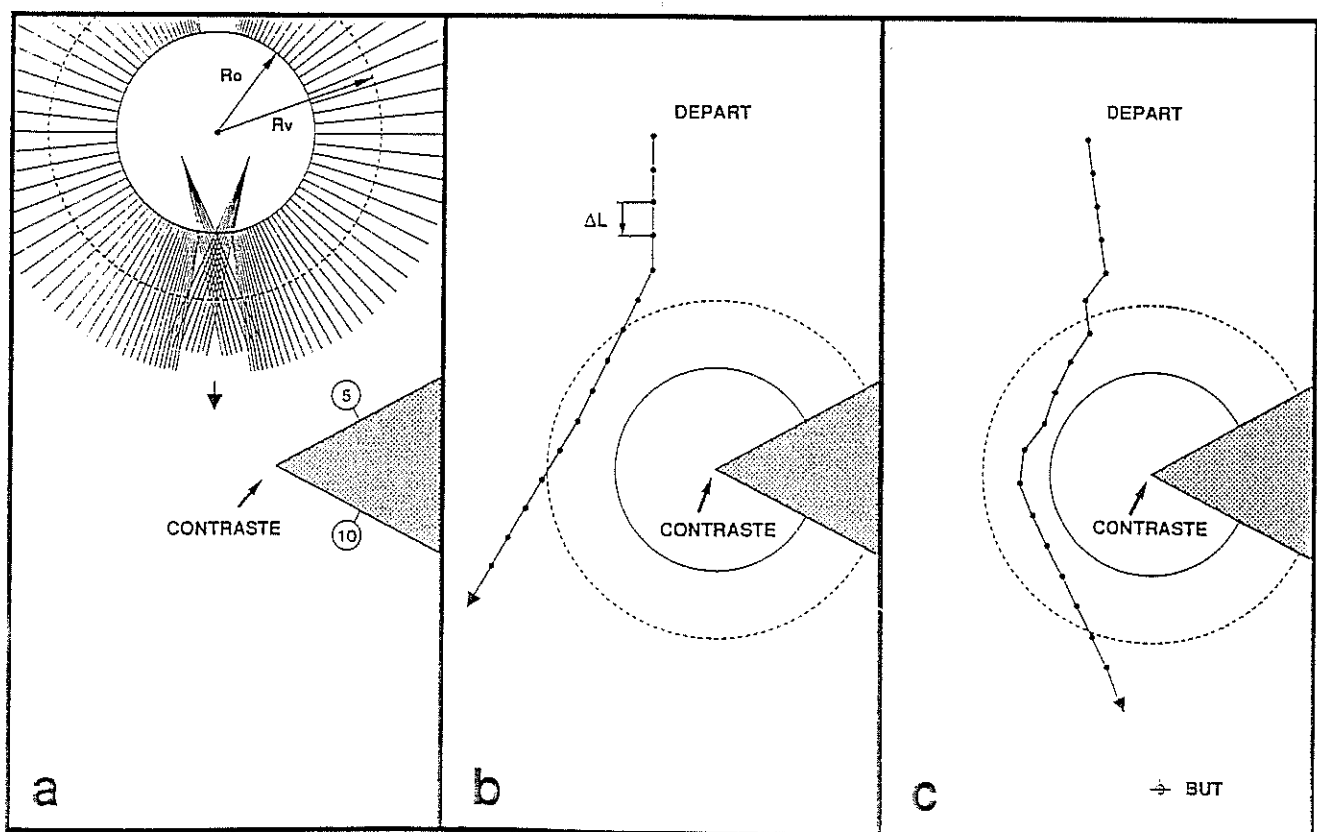


Fig.V.12 Evolution de la stratégie anticollision après avoir intégré les incertitudes inhérentes à chaque DEM. L'oeil-DEM simulé ici correspond à la configuration standard : $G=0.2$, filtrage bidirectionnel, $Hh=0.2$. Les coefficients d'anticipation et d'atténuation en distance associés à cette configuration sont $K_{\text{ant}}=67\%$ et $K_d=10\%$. Mêmes exemples qu'aux fig.V.3 et V.9 (b) = mode errance (c) = mode poursuite de cible.

incertitude positive sur la distance dont la valeur moyenne sur l'ensemble de l'oeil est $K_d = 10\%$, et à un coefficient d'anticipation $K_{ant} = 67\%$ ($R_v = 1.67.R_o$).

Puisque les simulations tiennent compte ici de l'aspect vision, l'environnement est à nouveau modélisé sous la forme de bandes verticales présentant des niveaux de gris distincts. Les simulations V.12b et V.12c illustrent des "bons cas de figure" où l'unique contraste est détecté sans problème de correspondance. La principale différence par rapport à la configuration précédente est, d'une part l'accroissement de la "zone d'incertitude" autour du robot (donc autour de chaque point de contraste dans l'espace de configuration) et d'autre part des changements de directions plus grossiers, du fait de l'importante incertitude angulaire sur la direction des contrastes détectés.

V.3.4. Intégration des paramètres cinématiques du robot : stratégie de braquage

Jusqu'à présent aucune considération cinématique n'a été prise en compte dans la stratégie de navigation du robot. Le principe de la télémétrie effectuée par l'oeil-DEM impose au robot de se déplacer à vitesse constante V_o pendant toute la longueur de chaque translation élémentaire. En fait, à la fin de ces translations, la plate-forme mobile ne peut évidemment pas tourner sur place instantanément comme on l'a supposé jusqu'à présent (cas n°1 à la fig.V.14 ci-dessous), parce que ses paramètres cinématiques (vitesses, accélérations, décélérations) sont limités. Ce paragraphe décrit le principe adopté pour commander les deux moteurs du robot. Il tient compte des *limitations cinématiques réelles* de l'ensemble, et tente de minimiser l'espace et le temps consacrés aux manoeuvres de changement de direction. Durant ces manoeuvres en effet, l'oeil-DEM n'est pas opérationnel et le robot devenu aveugle est vulnérable.

V.3.4.a Caractéristiques de la plate-forme (cf. Thèse C. Blanes, Chap.VI)

La plate-forme mobile est "holonomique" au sens où elle peut effectuer n'importe quel mouvement (fig.V.13) dans le plan horizontal : translations pures, rotations pures avec un rayon de giration pouvant être nul (cf. équ.V.16 ci-dessous), translation et rotation mélangées. Pour cela, elle dispose d'un moteur de translation et d'un moteur de rotation qui peuvent être commandés de manière totalement indépendante.

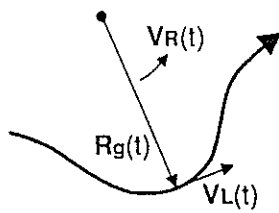
Les moteurs de la plate-forme mobile sont asservis en vitesse (cf. Thèse C. Blanes, Chap.VI) et l'on peut donc commander chacun d'eux par un signal de vitesse :

- un signal de vitesse linéaire V_L pour le moteur de translation :

vitesse linéaire pendant les translations élémentaires : $V_o = 50 \text{ cm/s}$

saturation de la vitesse linéaire V_L : $V_{Lsat} = 100 \text{ cm/s}$

saturation de l'accélération linéaire $\gamma_L = d(V_L)/dt$: $\gamma_{Lsat} = 200 \text{ cm/s}^2$

**Fig.V.13**

Résumé des paramètres cinématiques de la plate-forme mobile.

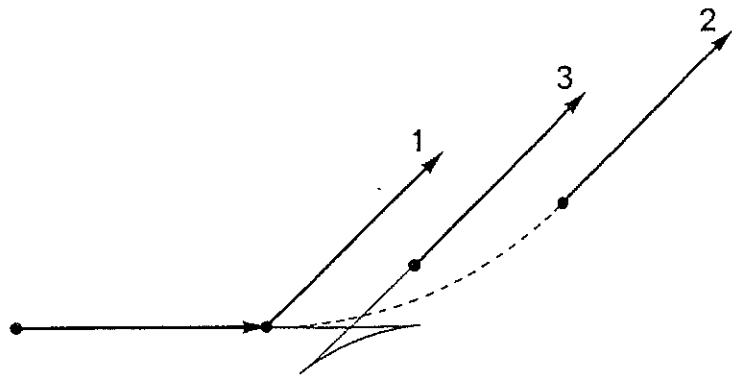


Fig.V.14 Différentes possibilités de braquage : 1 cas théorique où les paramètres cinématiques ne sont pas pris en compte; 2 cas où la vitesse linéaire du robot est maintenue constante; 3 cas effectivement retenu ici qui permet de minimiser la zone réservée aux changements de direction .

- un signal de vitesse de rotation VR pour le moteur de rotation :

saturation de la vitesse de rotation :

$$VR_{sat} = \pm 120^\circ/s$$

saturation de l'accélération en rotation $\gamma_R = d(VR)/dt$:

$$\gamma_{Rsat} = \pm 180^\circ/s^2$$

Les mouvements du robot dans un repère fixe du plan horizontal (fig.V.13), se traduisent de la manière suivante :

$$[(dx/dt)^2 + (dy/dt)^2]^{1/2} = VL(t) \quad (\text{éq.V.14})$$

$$d\alpha / dt = VR(t) \quad (\text{éq.V.15})$$

$$R_g(t) = VL(t) / VR(t) \quad (\text{éq.V.16})$$

où R_g représente le rayon de giration instantané. L'équ. V.16 montre que pour annuler le rayon de giration R_g , il suffit d'annuler la vitesse du moteur de translation.

V.3.4.b Transformation de la consigne de braquage en une commande dynamique des deux moteurs

A la fin d'une translation, le système anticollision délivre une *instruction unique* sous forme de l'angle à tourner α_{rot} (cf. §.V.2.2.). Si le robot conservait sa vitesse linéaire constante ($VL=V_0$), il décrirait alors un arc de cercle (cas n°2, fig.V.14) dont le rayon minimum serait égal à $R_g = V_0/VR_{sat}$ (ce qui donne ici $R_g \approx 24\text{cm}$), jusqu'à ce qu'il ait effectivement braqué de la valeur α_{rot} désirée. Un tel rayon de courbure imposerait au robot de se réserver une importante zone libre autour de lui afin de pouvoir effectuer sans danger ses changements de direction. La largeur latérale de cette zone, par rapport au centre du robot, est égale à $2R_g + R_0$ (ce qui donnerait ici $\approx 63\text{cm}$). En

conclusion, vouloir maintenir constante la vitesse linéaire du robot réduirait considérablement sa manoeuvrabilité et s'opposerait à l'aspect local de sa stratégie anticollision.

L'idée est de minimiser la "zone aveugle" réservée aux braquages, en obligeant le robot à décroître, puis accroître de nouveau sa vitesse linéaire, pendant que le moteur de rotation fonctionne au maximum de sa vitesse. Plusieurs solutions réalisant une telle opération ont été étudiées. Celle qui a été retenue ici (récapitulée à la fig.V.15) présente l'avantage de rester simple au niveau du principe des commandes motrices. Elle consiste à générer, dès le début du cycle de braquage, deux rampes en vitesse, dont la pente est respectivement égale à $\pm\gamma_{Rsat}$ pour le moteur de rotation (fig.15a) et à $-\gamma_{Lsat}$ pour le moteur de translation (fig.V.15b), et ceci jusqu'à ce que la moitié de l'angle de braquage $\alpha_{rot}/2$ soit atteint ; à cet instant, le processus est inversé sous forme de deux nouvelles rampes en vitesses qui sont symétriques des précédentes (pentes respectivement égales à $\pm\gamma_{Rsat}$ pour le moteur de rotation et à $+\gamma_{Lsat}$ pour le moteur de translation) ; la fin de ce cycle de braquage coïncide avec un angle total de braquage égal à α_{rot} , une vitesse linéaire $V_L=V_0$ et une vitesse de rotation nulle $V_R=0$. On peut considérer que cette stratégie de braquage, bien qu'elle soit basée sur une commande en *vitesse* des moteurs, relève également d'un asservissement sur *l'angle* de braquage puisqu'elle nécessite la mesure de l'angle $\alpha_{rot}/2$, (et éventuellement de α_{rot}). Dans le cas du prototype, cette mesure angulaire se fait de manière odométrique grâce aux codeurs optiques disposés sur le moteur de rotation de la plate-forme (cf. Thèse C. Blanes, Chap.VI).

Au cours du cycle de braquage, la vitesse de rotation sature "naturellement" à la valeur γ_{Rsat} définie par les limitations cinématiques de la plate-forme (fig.V.15a). De la même manière, on introduit artificiellement une saturation V_{Lsat} sur la vitesse linéaire (fig.V.15b) et l'originalité consiste à faire varier cette saturation V_{Lsat} proportionnellement à l'angle à tourner α_{rot} :

$$V_{Lsat} = k \cdot \alpha_{rot} + k_0 \quad (\text{éq.V.17})$$

Le principe de la commande motrice qui vient d'être détaillé conduit à générer pendant les changements de direction des trajectoires du même type que celle représentée à la fig.V.14 (cas n°3). Dans ce cas, le changement de direction pour le robot, revient à décélérer au maximum, s'arrêter, reculer tout en continuant à braquer, s'arrêter à nouveau, puis accélérer jusqu'à atteindre la vitesse V_0 lui permettant d'effectuer une nouvelle acquisition visuelle.

La fig.V.16 illustre (en simulation) la forme des trajectoires associées aux changements de direction, et ceci pour divers angles de braquage compris entre 0 et 180°. Les deux paramètres k et k_0 de l'équ.V.17 ont été ici ajustés de façon à ce que, pour un braquage $\alpha_{rot} = 180^\circ$, le centre O du robot retrouve exactement sa position initiale. Les valeurs ainsi obtenues sont les suivantes : $k=5$ et $k_0=-15.9$ (ces valeurs ne sont valables que pour les caractéristiques exactes de la plate-forme mobile énoncées précédemment).

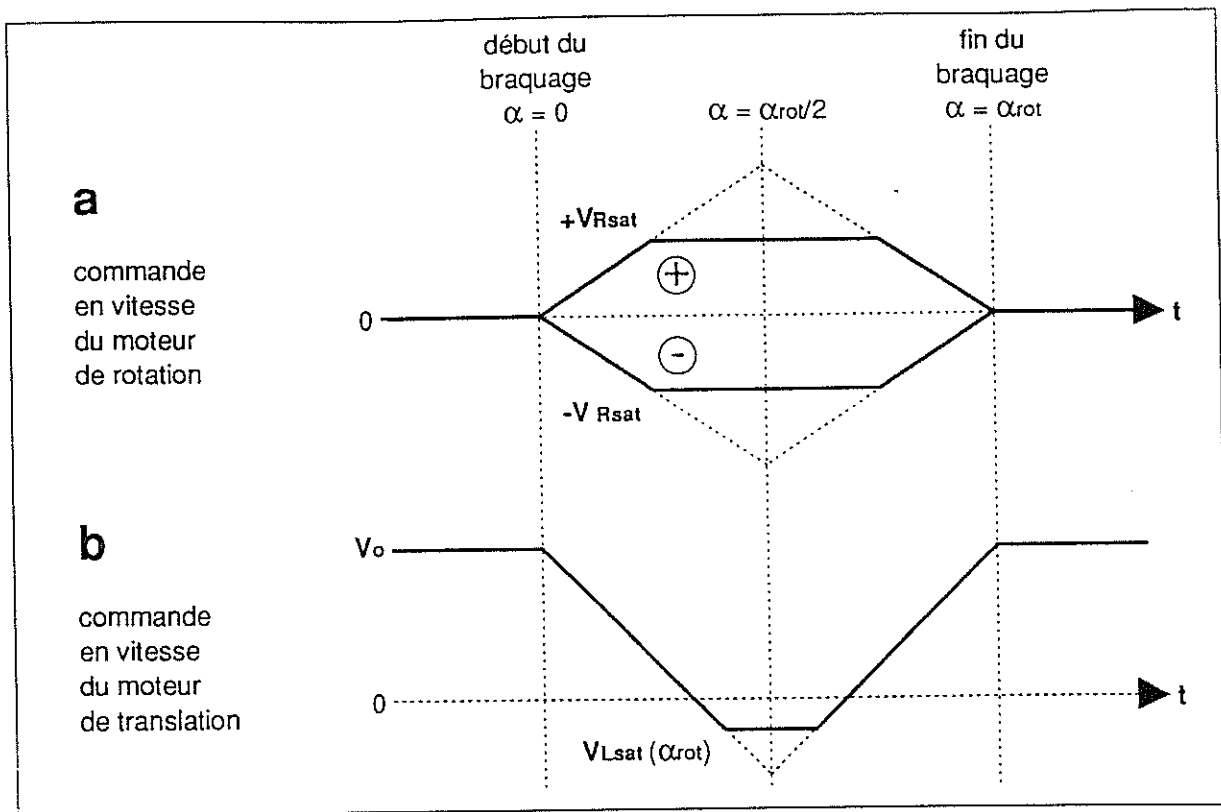


Fig.V.15 Principe de la commande des moteurs du robot à partir de l'information unique de l'angle à tourner (a) commande du moteur de rotation (b) commande du moteur de translation.

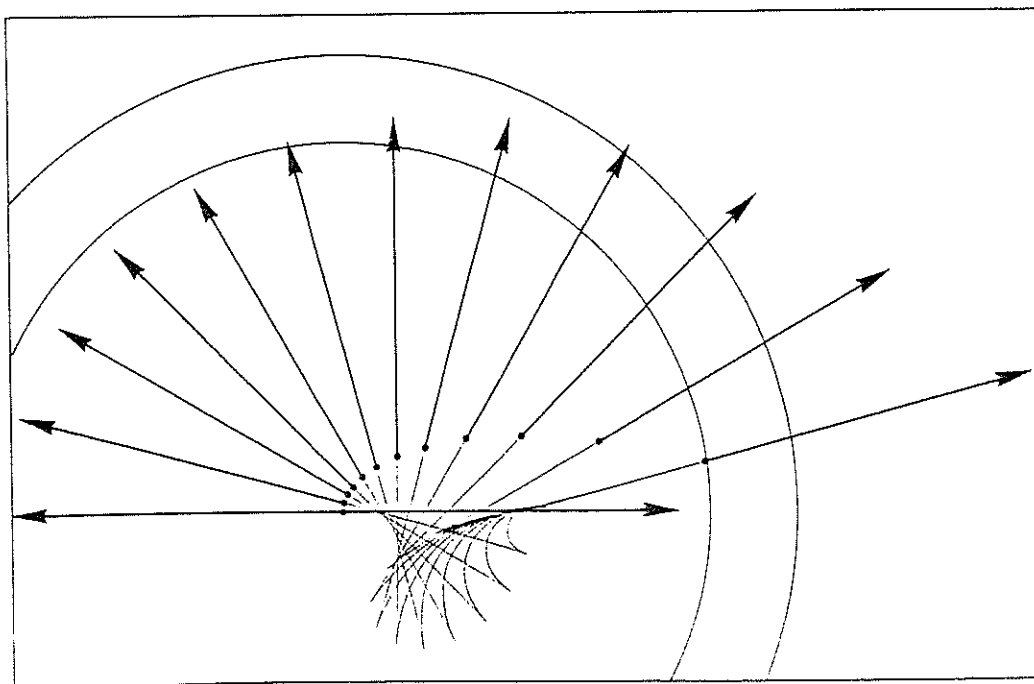


Fig.V.16 Trajectoires engendrées par le principe de commande simultanée des moteurs du robot illustrée à la fig.V.15 pour des angles de braquage variant par pas de 15° . La zone qu'on considère comme réservée aux changements de direction peut être bornée de manière très grossière par un cercle de rayon $K_{ciné}.Ro$; ici $K_{ciné}=0.8$.

Au plan comportemental, on peut observer à la fig.V.16 que la réaction cinématique du robot est modulée quasi-naturellement par la valeur de l'angle de braquage délivrée par le système anticollision. Par exemple, pour un angle de braquage faible ($\alpha_{rot} < 15^\circ$) le robot ne s'arrête pas et se contente de décroître légèrement sa vitesse linéaire pour modifier sa direction. Par contre, pour un angle de braquage élevé, non seulement il s'arrête mais il effectue une marche arrière qui dure d'autant plus longtemps que l'angle de braquage est important.

Il faut souligner que la manoeuvre de braquage, bien qu'elle utilise le moteur de rotation au maximum de son accélération (γ_{Rsat}) reste malgré tout assez lente. Par exemple, avec les paramètres introduits ci-dessus, le robot met 0.5 sec pour tourner de 45° , 1.41 sec pour tourner de 90° et 2.15 sec pour tourner de 180° ; on peut remarquer qu'il ne met que 0.2 sec pour effectuer une translation élémentaire de 10cm (à 50cm/s). En conséquence dans un cycle acquisition+braquage c'est la phase de braquage qui occupera le plus de temps. Il faut cependant insister sur le fait, qu'en l'absence d'obstacle dans son hémichamp frontal, le robot se déplace rapidement à une vitesse rectiligne de $V_0 = 50\text{cm/s}$ (il ne s'arrête pas à la fin de chaque translation).

V.3.4.c Intégration de la zone aveugle de braquage liée à la cinématique du robot

Comme le montre la fig.V.16 le principe de la commande motrice n'est pas suffisamment sophistiqué ici, pour que le cycle de braquage ramène exactement le centre O du robot en son point de départ (cette condition n'est en fait vérifiée que pour $\alpha_{rot} = \pm 180^\circ$). Cette dérive en position de $O_{dép}$ vers O_{fin} (fig.V.17) est néfaste au principe anticollision puisque l'angle α_{rot} calculé par le système anticollision n'est valable que dans le repère centré sur $O_{dép}$. Afin de compenser cette dérive en position d'une part, et en même temps de prendre en compte la zone réservée au braquage du robot, on introduit deux nouveaux paramètres :

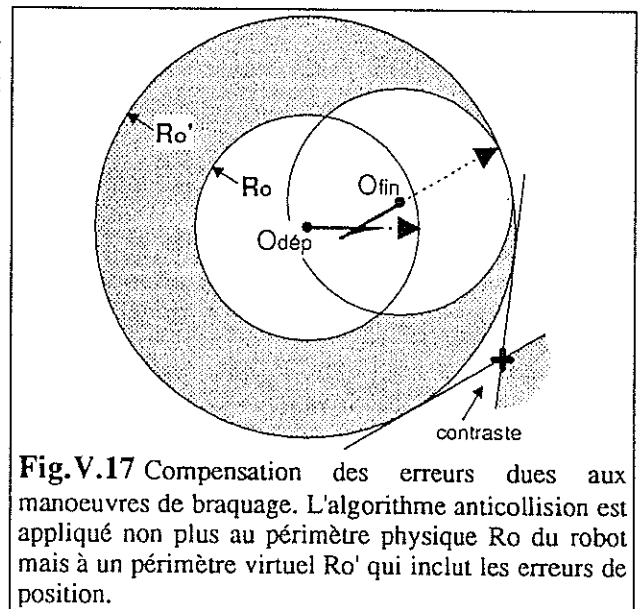


Fig.V.17 Compensation des erreurs dues aux manoeuvres de braquage. L'algorithme anticollision est appliqué non plus au périmètre physique R_o du robot mais à un périmètre virtuel R_o' qui inclut les erreurs de position.

- le premier, $K_{ciné}$, exprime l'incertitude sur la position de O relativement au rayon du robot : {erreur radiale de position} $< K_{ciné} \cdot R_o$; cette erreur de position a été bornée ici de manière très grossière par le cercle qui circonscrit exactement la zone de braquage, ce qui dans le cas représenté à la fig.V.16, conduit à une valeur de $K_{ciné} \approx 0.8$.

- le second, R_o' , définit le rayon d'un *cercle virtuel* (fig.V.17) correspondant au périmètre physique du robot (rayon R_o) incrémenté par l'incertitude $K_{ciné} \cdot R_o$.

$$R_o' = R_o (1 + K_{ciné})$$

(*éq.V.18*)

L'étape suivante consiste à appliquer tous les principes d'anticollision énoncés depuis le début de ce chapitre, non plus au périmètre de sécurité du robot de rayon R_o mais à ce nouveau périmètre virtuel de rayon R_o' :

Dans ces nouvelles conditions le périmètre de vision R_v s'exprime de la façon suivante :

$$R_v = R_o' \cdot (1 + K_{ant}(2)) = R_o \cdot (1 + K_{ciné}) \cdot (1 + K_{ant}(2)) \quad (\text{éq.V.19})$$

En transposant l'ancienne expression de l'anticipation $K_{ant}(2)$ (cf. éq.V.9) on obtient la nouvelle valeur $K_{ant}(3)$ du coefficient d'anticipation :

$$\boxed{K_{ant}(3) = (K_{ciné} + 2G) / (1 - 2G)} \quad (\text{éq.V.20})$$

Pour la configuration standard de l'oeil-DEM où $G=0.2$, et pour $K_{ciné}=0.8$, l'éq.V.20 conduit à la valeur $K_{ant}(3)=2$ c'est-à-dire à un rayon de vision trois fois plus grand que le rayon du robot ($R_v=3.R_o$). Ainsi dans le cas réel du prototype où $R_o = 15\text{cm}$ on obtient une valeur $R_v = 45\text{cm}$, ce qui correspond à peu près à la configuration de l'oeil-DEM, telle qu'elle a été récapitulée au Chap.IV (cf. fig.IV.10).

V.3.4.d Exemples

La fig.V.18 illustre la configuration finale du robot, placée dans les cas d'école déjà évoqués précédemment (cf. fig.V.3, fig.V.9, fig.V.12). L'oeil-DEM effectivement simulé dans cette figure, correspond à la configuration "standard" déjà illustrée à la fig.V.12. Avec l'augmentation du coefficient d'anticipation, la "zone d'imprécision" autour de chaque point de contraste s'est considérablement accrue mais il faut noter que cela n'affecte en rien la tâche anticollision. On peut rappeler que la détérioration apparente des trajectoires au voisinage des obstacles n'est pas irrémédiable et qu'il serait possible d'introduire des couches additionnelles de contrôle (éventuellement alimentées par l'oeil-DEM lui même) pour les optimiser (par exemple par un lissage).

V.4. ANALYSE COMPORTEMENTALE DU ROBOT EN FONCTION DE LA CONFIGURATION DE SON SYSTEME VISUEL.

Ce dernier paragraphe récapitule les performances en simulation du système sensori-moteur complet, tel qu'il vient d'être décrit tout au long de ce mémoire. Les simulations qui vont être présentées intègrent de façon très détaillée l'ensemble des paramètres caractérisant l'architecture hardware de la chaîne sensori-motrice, mais aussi les dimensions et la mécanique du robot ; elles incorporent en particulier :

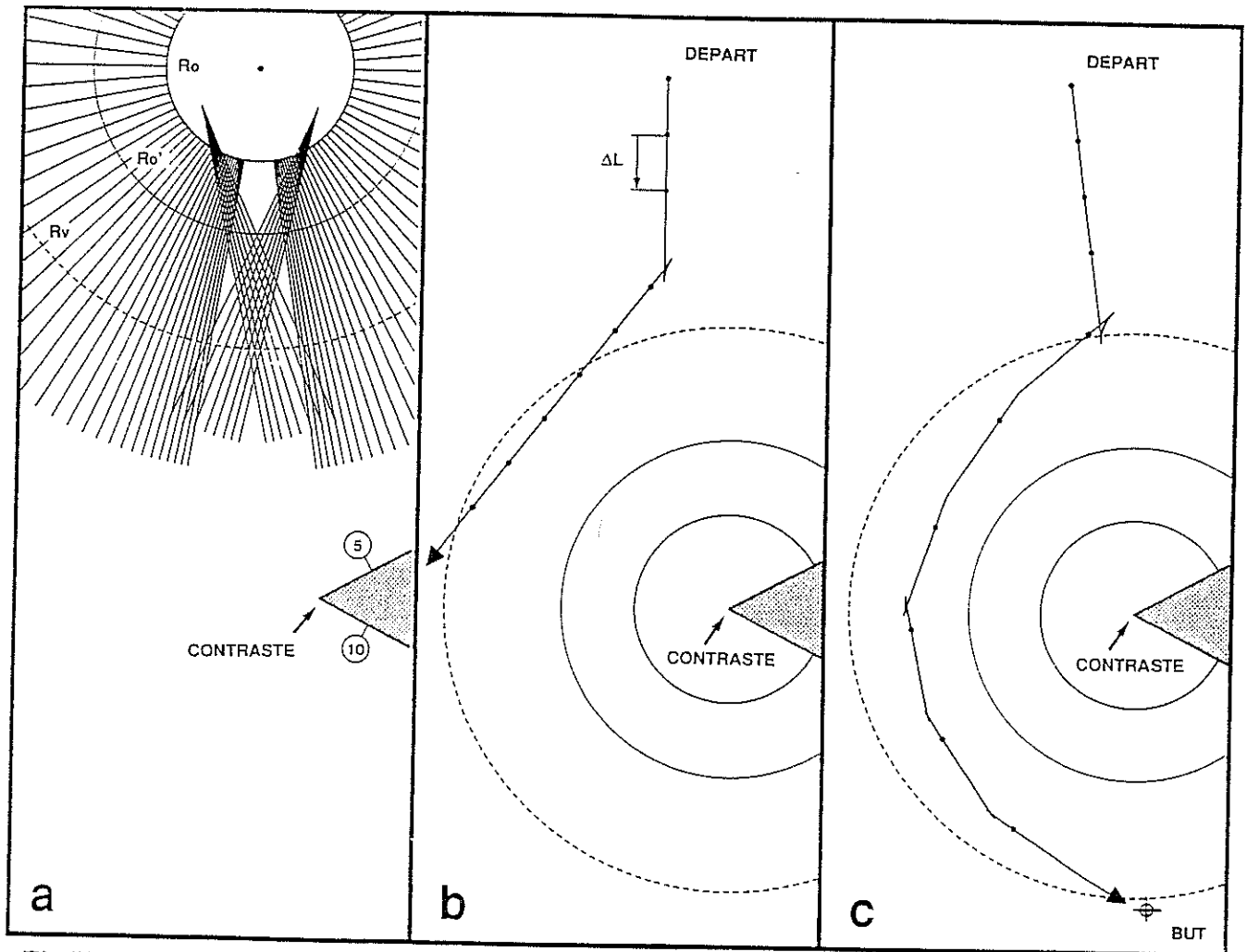


Fig.V.18 Evolution de la stratégie anticollision après avoir intégré les paramètres cinématiques du robot et tenu compte de la zone aveugle réservée aux manoeuvres de braquage. L'oeil-DEM simulé ici correspond à la configuration standard : $G=0.2$, filtrage bidirectionnel, $Hh=0.2$. Le coefficient d'anticipation associé à cette version finale de la chaîne sensorimotrice est $Kant=2$. L'espace de configuration représente à la fois le rayon physique R_o et le rayon virtuel R_o' du robot. Environnement idem à la fig.V12 : (a) mode errance (b) mode poursuite de cible.

- le traitement du signal complet effectué par chaque DEM (cf. Chap.III) avec les incertitudes de mesure inhérentes qui leur sont associées (cf. §.V.3.3.)
- l'architecture optique spécifique de l'oeil-DEM (cf. Chap.IV)
- le système anticollision (cf. §.V.2.) avec son paramétrage complet (cf.§.V.3.3.)
- les manoeuvres de braquage du robot intégrant notamment les propriétés cinématiques de la plate-forme (cf. §.V.2.).

En conséquence les résultats comportementaux présentés ici peuvent être considérés comme un *modèle précis* de ceux attendus pour le *prototype dans des conditions réelles*.

Les performances comportementales associées à cinq configurations différentes du système sensori-moteur du robot vont être ici brièvement analysées. Ces cinq configurations sont répertoriées pour des raisons mnémotechniques sous les noms suivants : le robot modèle, le robot peureux, le robot imperturbable, le robot économique, le robot téméraire.

Trois exemples essentiels vont être utilisés comme cas d'école pour comparer ces diverses configurations :

•1 Un environnement *complexe* de type "forêt" (fig.V.19a) , composé d'un ensemble de "petits" obstacles de forme triangulaire (longueur des cotés $\approx R_0$) et disposés aléatoirement dans l'espace. Chacune des faces de ces objets présente un niveau de gris pouvant prendre aléatoirement les valeurs $I_g=2$, $I_g=6$ ou $I_g=10$, de sorte que les sommets de chaque triangle représentent une valeur de contraste détectable par l'oeil-DEM. Une seconde source de complexité est ajoutée à cet exemple, par la présence d'un but mobile : celui-ci se déplace de manière rectiligne (du haut vers le bas à la fig.V.19a) à vitesse constante. La vitesse du but ($V_{but}=-12\text{cm/s}$) est environ quatre fois plus faible que celle du robot (50 cm/s).

•2 Un environnement *structuré* sous la forme d'une salle rectangulaire limitée par quatre murs plans, à l'intérieur de laquelle est disposé un seul obstacle, là encore de forme triangulaire (fig.V.19b). Pour être détectés par le robot, les murs présentent une texture faite de bandes verticales dont le niveau de gris varie alternativement de $I_g=0$ à $I_g=10$. La largeur L_b de ces bande est aléatoire mais varie dans un intervalle $[5\text{cm} < L_b < 30\text{cm}]$, la largeur maximum de 30cm correspondant au diamètre physique du robot. Un tel environnement fermé permet de tester le robot en mode errance.

•3 Un environnement visuel *bruité* (fig.V.19c), formé de la mire bruitée déjà utilisée au Chap.III (cf. fig.III.3., cas I). C'est le cas d'environnement le plus réaliste donc idéal pour estimer la robustesse au bruit de l'ensemble de la chaîne sensori-motrice.

V.4.1. Le "ROBOT MODELE"

Comportement avec un senseur théorique parfait

Le "robot modèle" correspond à la configuration finale du système obtenu à la fin du paragraphe précédent : $R_o=15\text{cm}$, $R_o'=27\text{cm}$, $R_v=50\text{cm}$, $\Delta L=10\text{cm}$, $K_d=0.1$, $K_{ciné}=0.8$, $V_o=50\text{cm/s}$. Par contre dans cet exemple l'oeil-DEM lui-même n'est pas simulé et est remplacé par un senseur télémétrique parfait, qui fournit sans aucune erreur les coordonnées polaires de chaque point de contraste détecté à l'intérieur du périmètre de vision.

Le rôle de ce "robot modèle" est d'illustrer le type de comportement qu'on est en mesure d'attendre de la part du système sensori-moteur dans le meilleur des cas, c'est-à-dire sans la présence des erreurs inhérentes à l'oeil-DEM. Cette configuration montre en particulier que malgré la présence d'un mode de locomotion rudimentaire (translations élémentaires + manoeuvres de braquage), et de l'anticipation importante conférée au système sensoriel ($R_v=50\text{cm}$ pour $R_o=15\text{cm}$), les performances comportementales du "robot modèle" restent compatibles avec le cahier des charges fixé au début de ce chapitre.

Dans le cas de la forêt et de la cible mobile (fig.V.19a) on constate que la tâche anticollision est largement assurée puisque le robot ne pénètre à aucun moment dans l'espace de configuration virtuel défini par le rayon R_o' et donc a fortiori dans le vrai espace de configuration défini par le rayon physique R_o . Dans la partie de trajectoire qui est représentée ici, le robot ne parvient pas à rejoindre le but, car il est considérablement ralenti par ses manoeuvres de braquage qui, il faut le rappeler, sont relativement lentes (cf. §.V.3.4.).

Dans le second cas d'école ("la salle", fig.V.19b) on constate que le "robot modèle" lorsqu'il est en mode errance se met à longer les murs à une distance radiale à peu près constante et égale à la valeur du rayon virtuel R_o' paramétrant le système anticollision.

Dans le dernier cas d'école (fig.V.19c), le "robot modèle" disposant par définition d'un senseur parfait, n'est pas perturbé par la présence du bruit d'image de la mire. Ainsi dans la trajectoire du haut, il détecte cette mire, dès qu'elle pénètre à l'intérieur de son périmètre de vision et la contourne normalement. Dans la trajectoire du bas, où il est éloigné de 150cm de la mire, il effectue son mouvement rectiligne vers le but sans être perturbé par cette dernière.

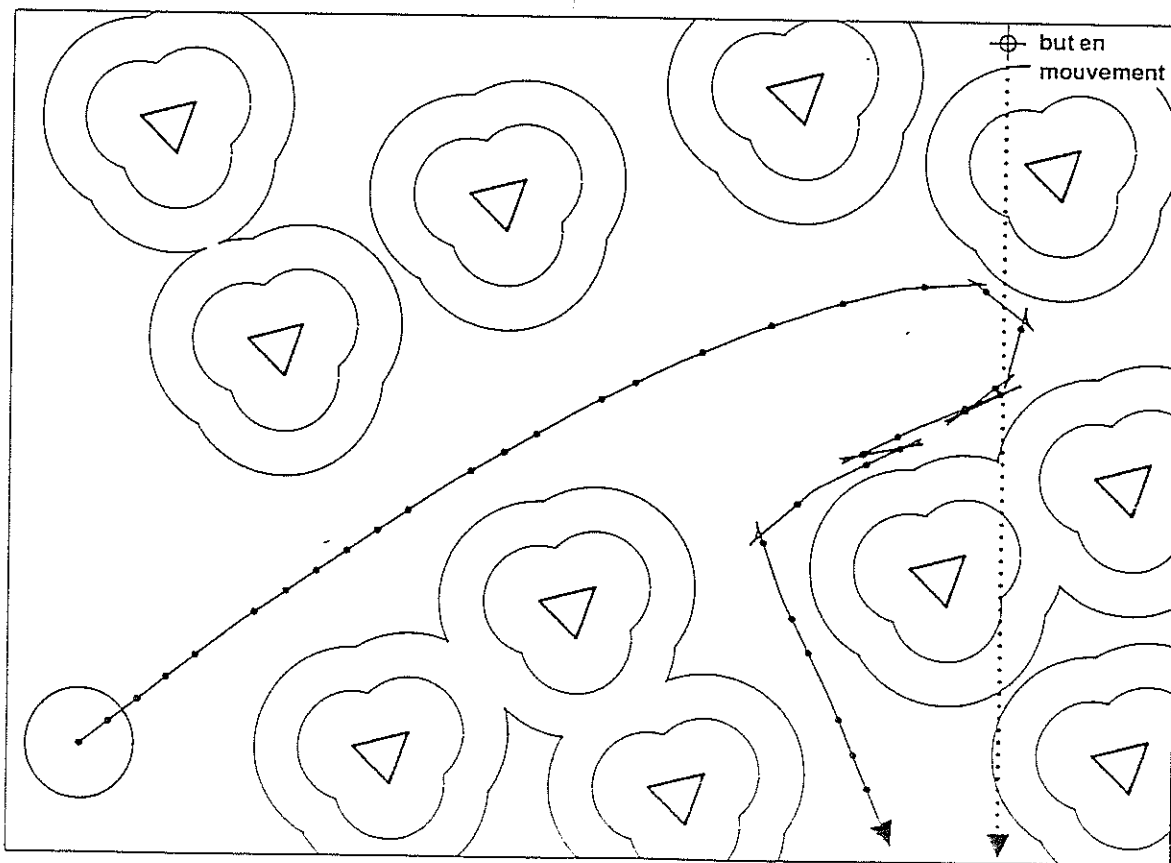


Fig.V.19a Le "robot modèle"

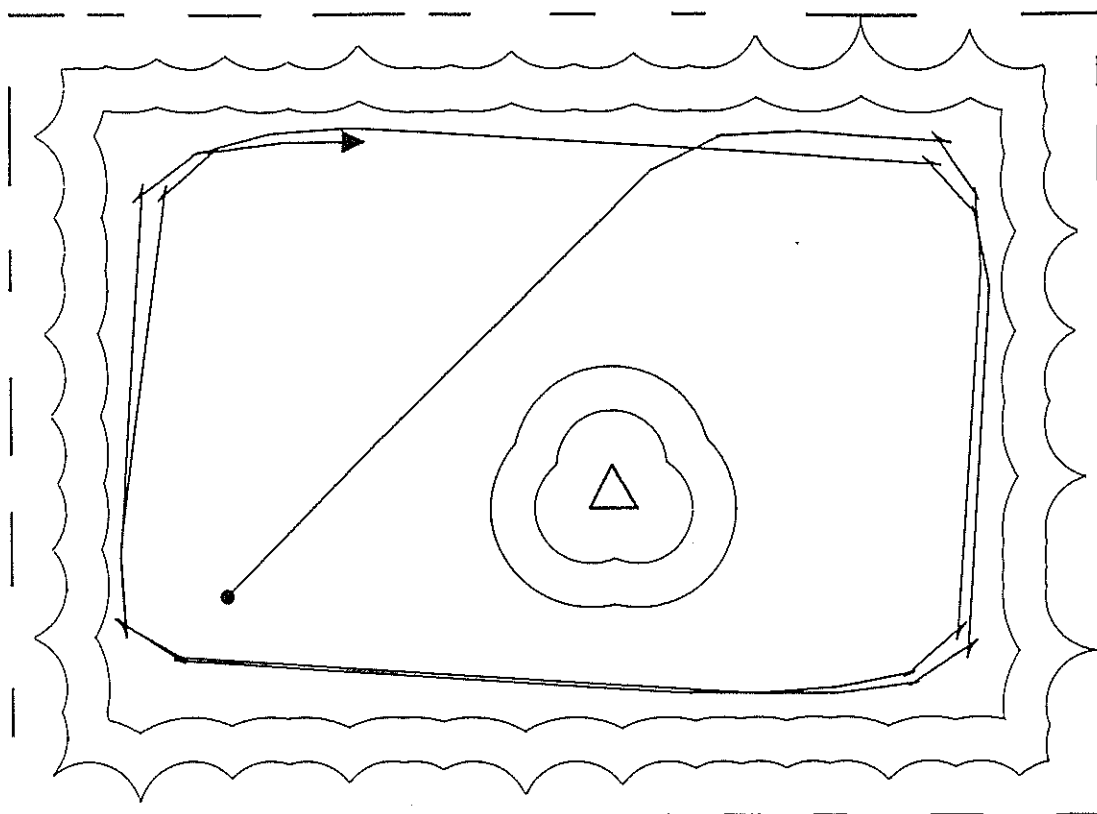


Fig.V.19b Le "robot modèle"

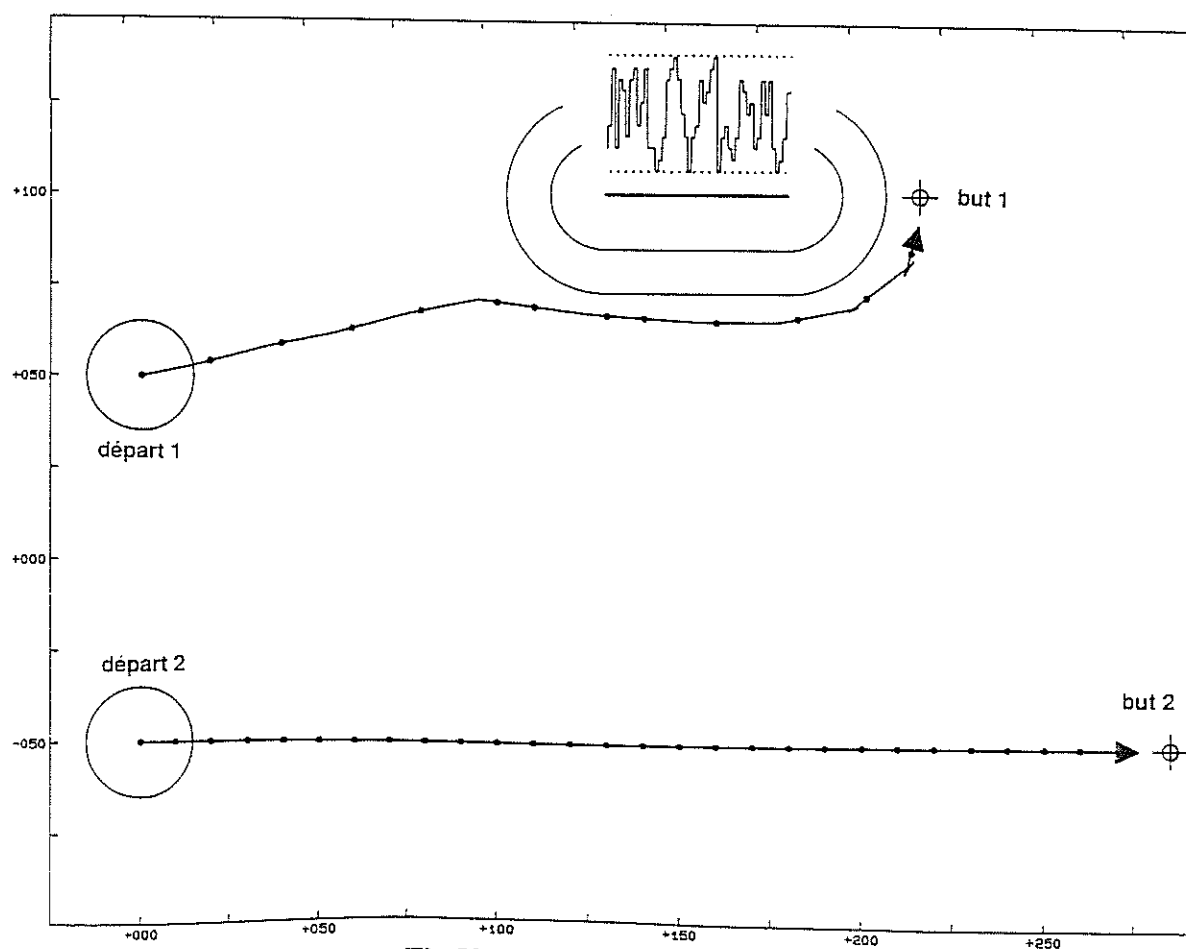


Fig.V.19c Le "robot modèle"

V.4.2. Le "ROBOT PEUREUX"

Effets des erreurs de correspondance lorsqu'elles ne sont pas filtrées

Dans cette configuration l'oeil-DEM est simulé dans sa totalité et est caractérisé par une distribution angulaire $G = 0.2$ (118 axes optiques). Par contre, et contrairement à la configuration standard évoquée tout au long de ce mémoire, le recouvrement angulaire n'a pas été optimisé de manière à éliminer les problèmes de correspondance. L'angle d'acceptance effectivement simulé, est uniforme et correspond à la valeur $\Delta\phi_i = 1.35^\circ$, qui conduit à un facteur de recouvrement angulaire $\Delta\phi_i / \Delta\phi_i$, de l'ordre de 0.25 à 90° et de 1.5 à 10° (cette configuration est résumée à la fig.IV.12d du Chap.IV). La valeur haute du seuillage à hystérésis est réglée à la valeur $H_h = 0.1$, ce qui fixe la gamme de sensibilité au contraste à $1 \rightarrow 10$ pour la distance $R_v = 50\text{cm}$.

On a vu au Chap.III qu'un tel réglage du filtrage dans l'oeil-DEM, s'il permet d'augmenter la sensibilité au contraste et la précision angulaire de l'oeil-DEM, favorise en contrepartie les sous-estimations en distance des contrastes éloignés, par suite de problèmes de correspondance ("cas graves de sous-estimation" cf. Chap.III). C'est effectivement ce qui se passe dans les trois exemples de la fig.V.20.

A la fig.V.20a ("forêt") ce phénomène ne semble pas affecter le comportement du robot. Par contre aux fig. V.20b et V.20c, le robot est fortement perturbé par ses nombreuses sous-estimations en distance qui l'induisent à manoeuvrer inopinément. A la fig.V.20b ces sous-estimations permanentes vont jusqu'à paralyser le robot dans ses manoeuvres et il se retrouve pratiquement "bloqué" contre le mur de droite. La fig.V.20c est celle qui caractérise le mieux l'effet néfaste du filtrage spatial insuffisant. Premièrement, le robot se voit dans l'impossibilité de se rapprocher de la mire bruitée (trajectoire du haut) qu'il détecte en permanence, comme étant à l'intérieur de son cercle de vision ; deuxièmement (trajectoire du bas) la mire bruitée oblige le robot à modifier sa trajectoire alors qu'il effectue une tâche (rejoindre de façon rectiligne le but 2) que la présence de cette mire ne devrait pas affecter (elle se trouve à 150cm du robot). C'est ce refus de se rapprocher des obstacles, comme il le pourrait sans danger, qui vaut à cette configuration le qualificatif de "robot peureux". Cette caractéristique, bien que n'influant pas sur l'aspect anticollision, restreint fortement les performances du robot dans la mesure où elle l'empêche d'effectuer correctement même les tâches les plus élémentaires (errance, rejoindre un but) auxquelles il est destiné.

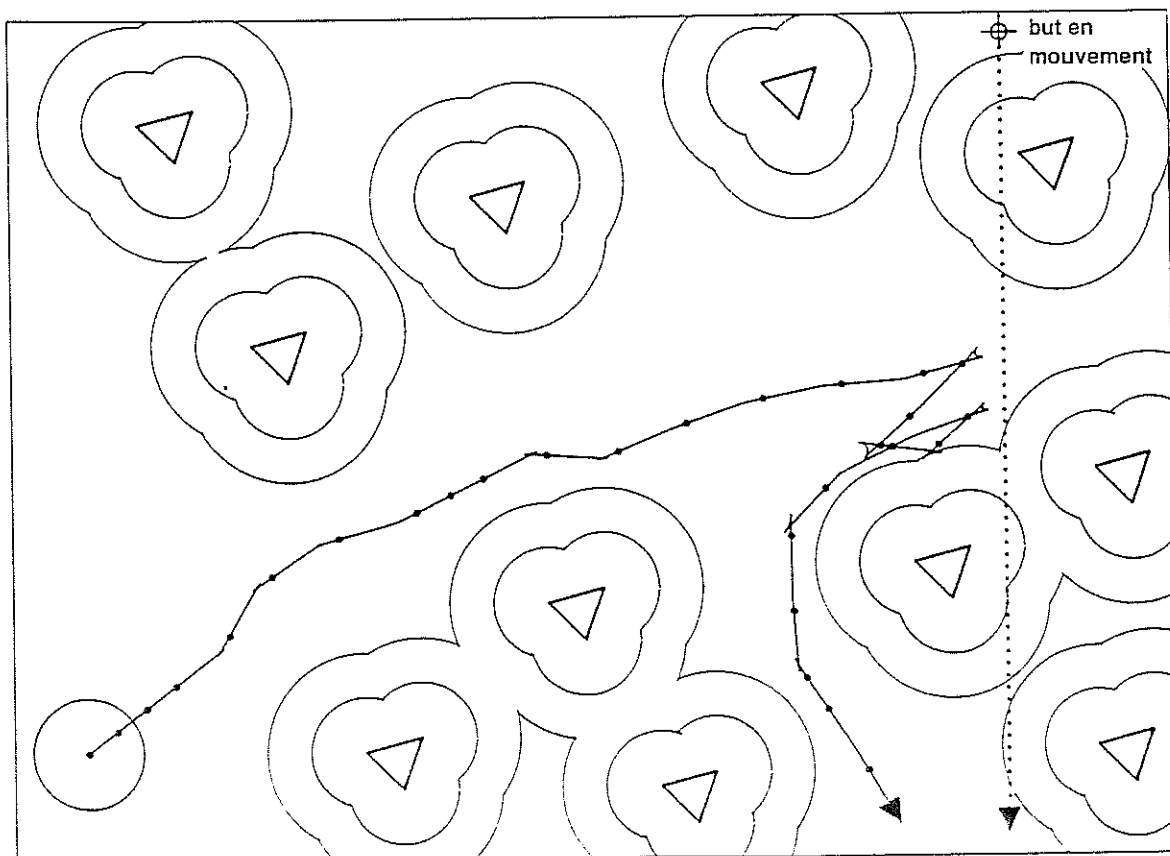


Fig.V.20a Le "robot peureux"

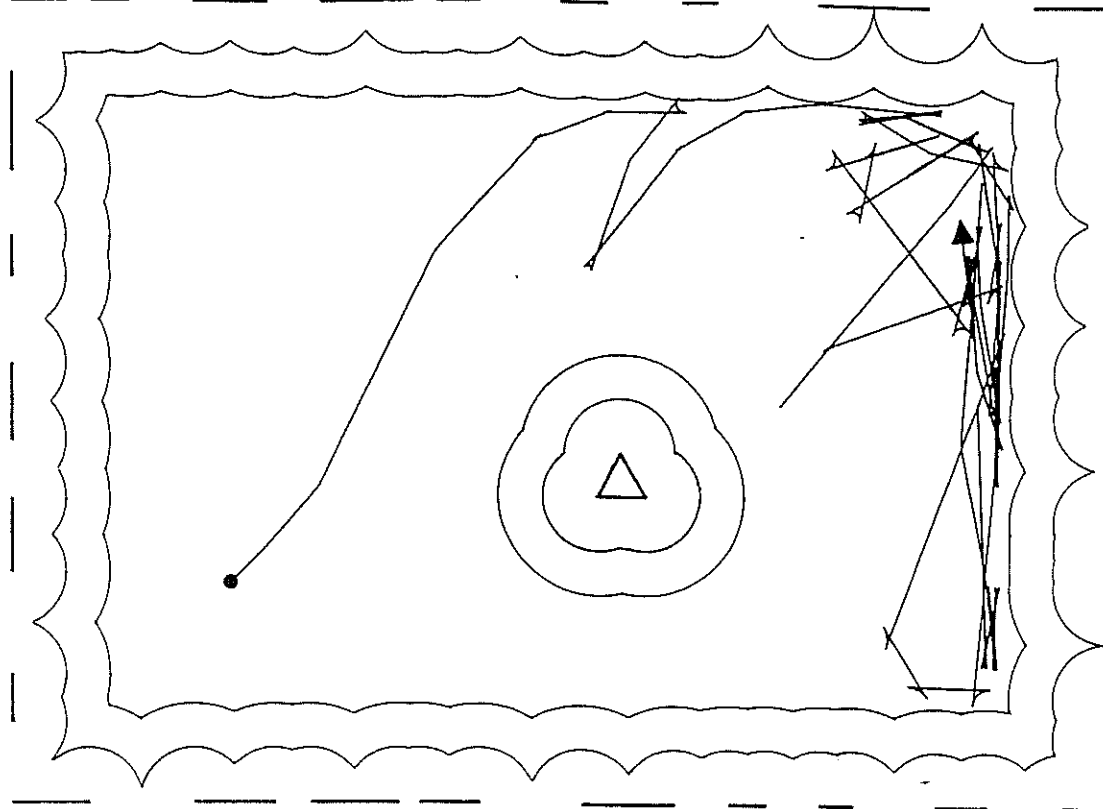


Fig.V.20b Le "robot peureux"

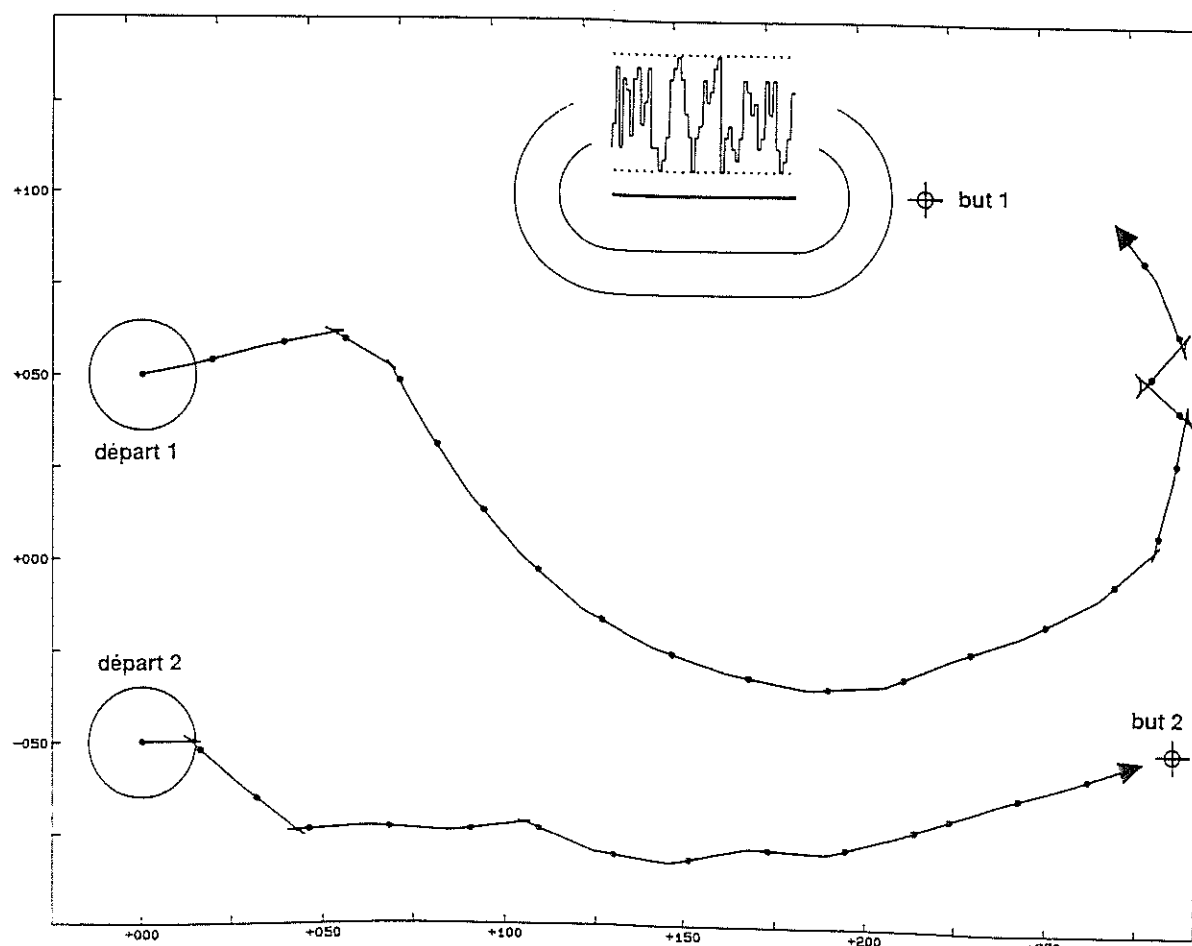


Fig.V.20c Le "robot peureux"

V.4.3. Le "ROBOT IMPERTURBABLE"

Comportement avec un oeil-DEM dont l'ajustement "filtrage+seuillage" a été optimisé.

Dans cet exemple l'oeil-DEM est également simulé dans sa totalité ($G=0.2$, 118 axes optiques). Contrairement au "robot peureux", le filtrage simulé ici correspond à la "solution standard" évoquée tout au long de ce chapitre et qui repose sur un fort recouvrement angulaire $\Delta\phi_i / \Delta\phi_i$ (dont la distribution est résumée à la fig.IV.12a du Chap.IV). La validité de ce filtrage est associée à un seuillage à hystérésis réglé à $Hh=0.2$, ce qui fixe la sensibilité au contraste à une gamme de 1→5 pour une distance $R_v=50\text{cm}$.

A la fig.V.21a ("forêt") on obtient des performances très proches de celles du "robot modèle" et du "robot peureux".

Par contre à la fig.V.21b on constate que le "robot imperturbable" est plus restreint dans ses manoeuvres par rapport au "robot modèle", cette caractéristique étant essentiellement due à la mauvaise précision angulaire engendrée par les angles d'acceptance élevés de chaque ommatidie. Cela se traduit notamment par le fait qu'il ne parcourt plus la salle en longeant régulièrement les murs, et qu'il ne se glisse pas naturellement dans l'espace du bas (pourtant libre) qui sépare l'obstacle du mur. Toutefois ce handicap ne paralyse pas le robot (comme c'était le cas dans la configuration "robot peureux") que l'on voit ici balayant pratiquement de façon uniforme l'ensemble de la salle.

Dans le cas de la fig.V.21c on constate que le robot est peu perturbé (d'où son nom "imperturbable") par la présence de la mire bruitée. Lorsqu'il se rapproche de la mire, il réussit à la détecter malgré le filtrage spatial important de ses ommatidies et à la contourner ; lorsqu'il est éloigné de la mire (trajectoire du bas) il oublie la présence de cette dernière puisqu'elle n'est pas perçue par l'oeil-DEM. A cette distance (150cm), la mire n'influe donc pas sur le comportement du robot.

Les résultats assez "satisfaisants" observés dans ces trois cas de figure pour le "robot imperturbable", justifient a posteriori l'optimisation du filtrage spatio-temporel développé pour l'oeil-DEM, puisqu'il compense les défauts de comportement du "robot peureux" illustrés dans l'exemple précédent.

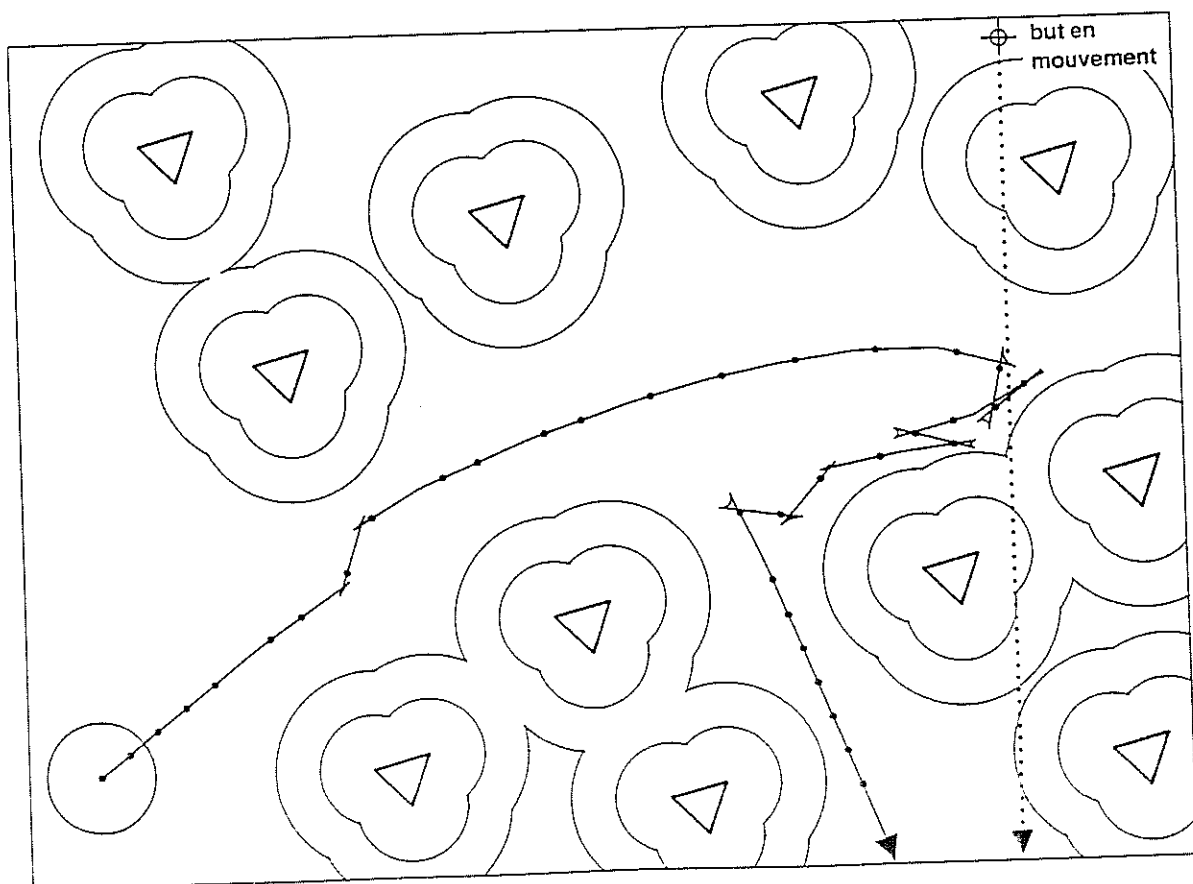


Fig.V.21a Le "robot imperturbable"

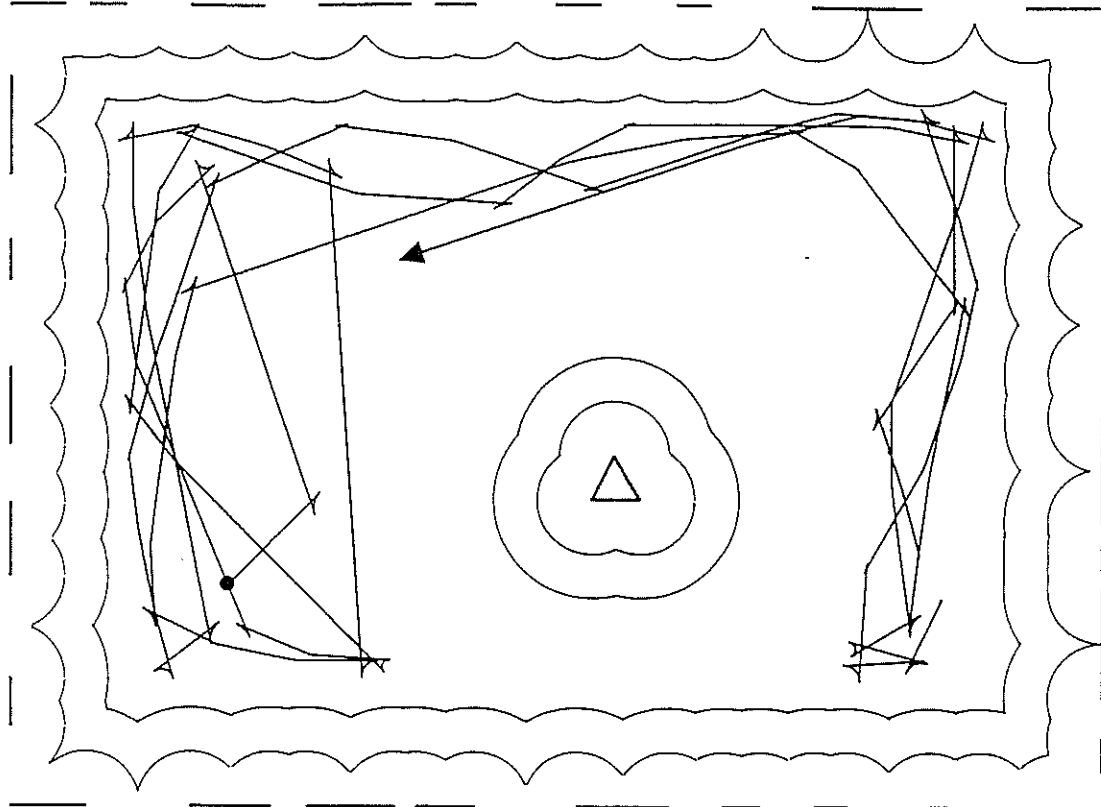


Fig.V.21b Le "robot imperturbable"

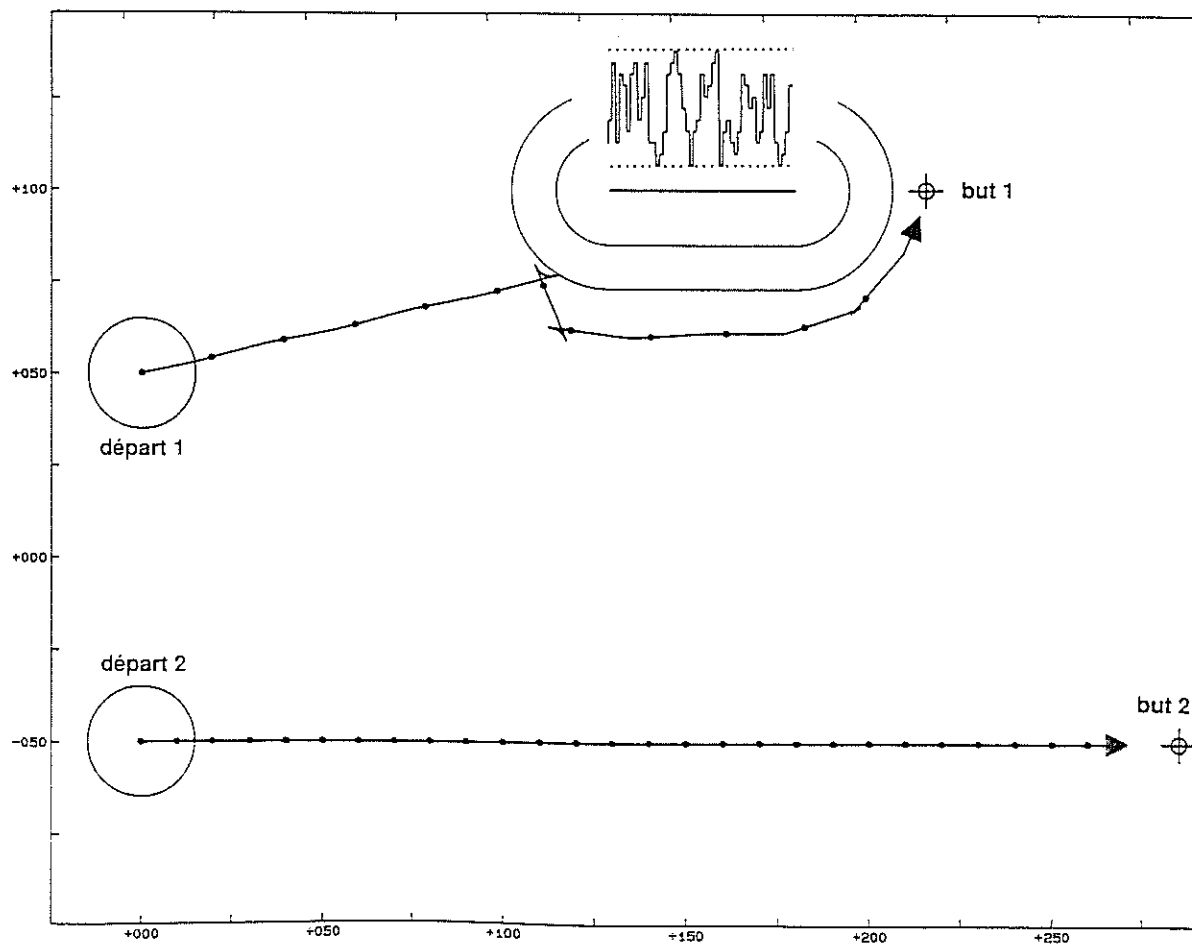


Fig.V.21c Le "robot imperturbable"

V.4.4. Le "ROBOT ECONOMIQUE"

Effets de la réduction du champ de vision

Le "robot économique" reprend exactement la même configuration que celle du "robot imperturbable" de l'exemple précédent. Ici l'analyse porte sur l'effet d'une réduction du champ visuel sur le comportement du robot réduction qui se traduit par une "économie" du nombre de DEMs effectivement utilisés par le système visuel.

Dans la simulation de la fig.V.22a on s'est contenté de supprimer tous les DEMs appartenant à l'hémichamp postérieur de l'oeil-DEM sans modifier la stratégie anticollision. On constate que cette réduction du champ de vision à la valeur de $\pm 90^\circ$, est néfaste au robot puisqu'elle conduit à une succession de collisions. En conclusion, du fait de l'aspect à la fois très local et très rudimentaire de la stratégie anticollision, on ne peut pas réduire sans prendre de précaution l'étendue du champ visuel de l'oeil-DEM.

Une solution pour prendre en compte une éventuelle réduction du champ visuel au niveau de la stratégie anticollision est d'interdire au robot de braquer dans les directions qui ne sont pas échantillonnées par l'oeil-DEM (réduction du champ de braquage). Les performances associées à une telle solution sont illustrées aux fig. V.22b et V.22c où le *champ de vision* et le *champ de braquage* du robot ont été réduits à $\pm 90^\circ$ simultanément ; en plus du champ de braquage $\pm 90^\circ$, le robot est autorisé à effectuer des demi-tours à 180° (il a toujours le droit de revenir sur ses pas).

Cette solution paraît correcte à la fig.V.22b, dans la mesure où elle garantit l'anticollision sans trop restreindre les manoeuvres du robot ; la seule différence comportementale réside dans le fait que le robot effectue plus souvent que précédemment des demi-tours à 180° .

Par contre la fig.V.22c, qui reprend exactement le cas de la fig.V.22a, montre que le défaut associé à cette solution est une plus grande facilité pour le robot à entrer dans des cycles limites ; c'est effectivement ce qui se passe pour la première fois dans cet exemple, où l'on voit le robot pris au piège dans une oscillation à $\pm 180^\circ$.

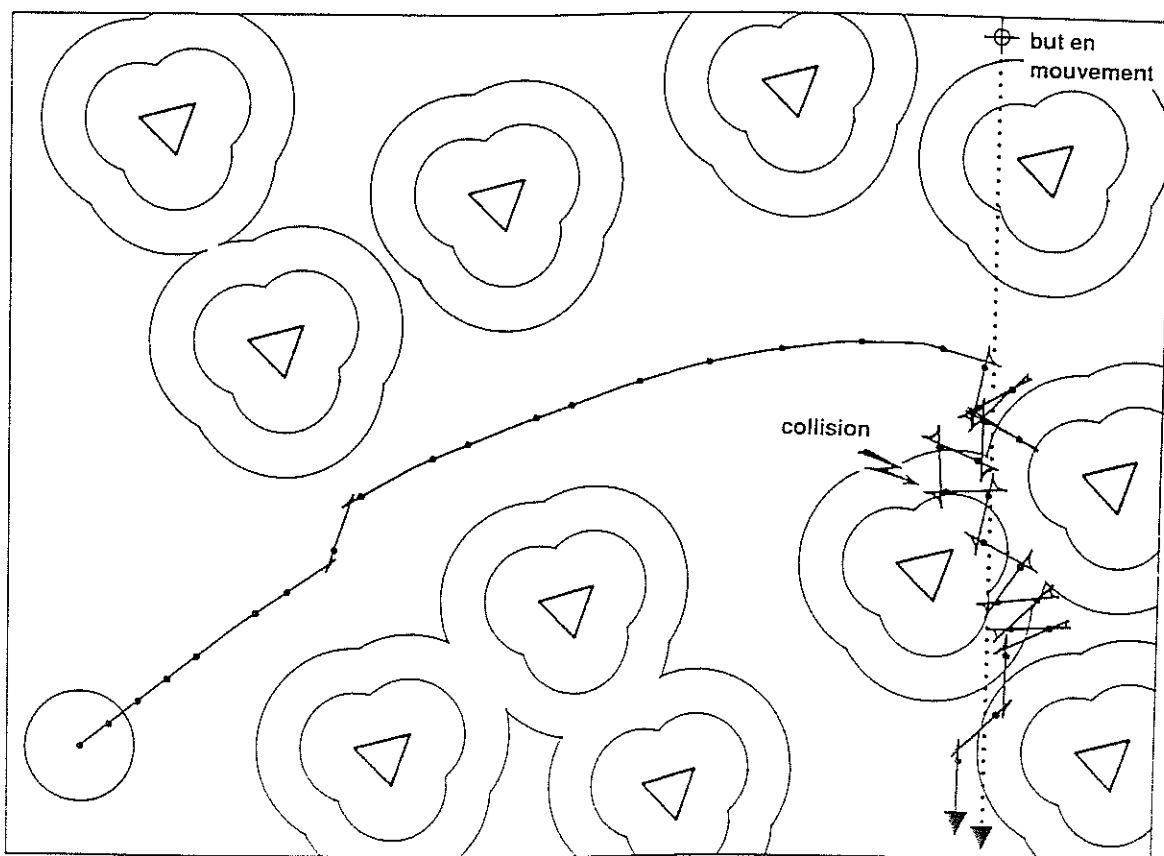


Fig.V.22a Le "robot économique"

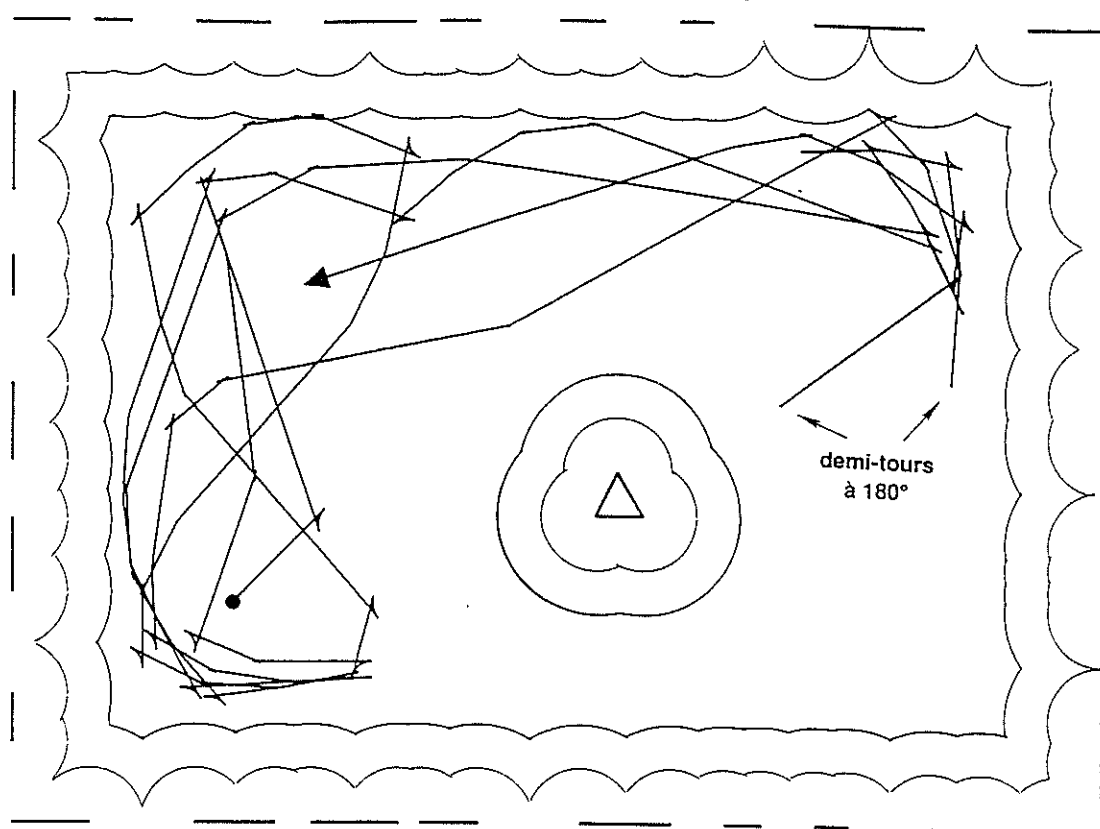


Fig.V.22b Le "robot économique"

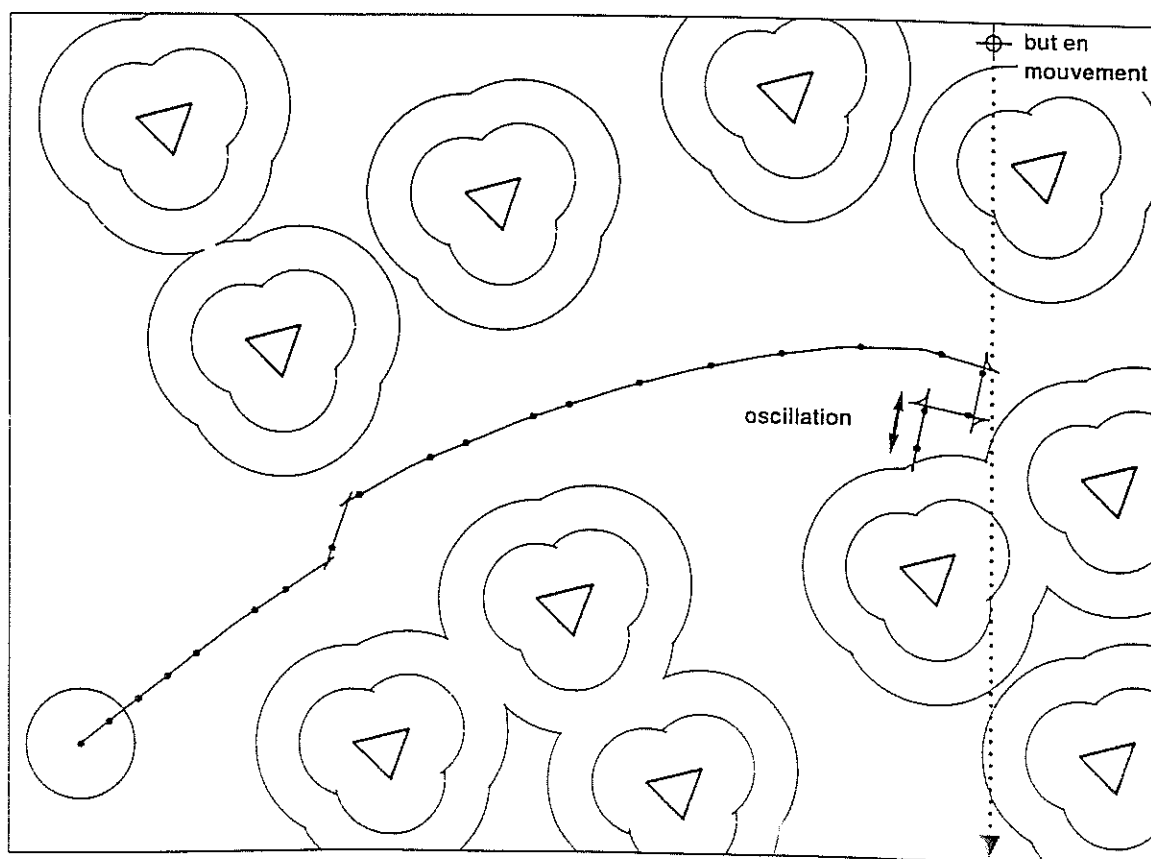


Fig.V.22c Le "robot économique"

V.4.5. Le "ROBOT TEMERAIRE"

Quelques exemples dans un environnement dynamique

"Le robot téméraire" reprend la configuration du "robot imperturbable" (oeil-DEM), mais ici analysée, et comparée avec le "robot modèle" (senseur théorique), dans un environnement où les obstacles eux-mêmes sont en mouvement. Cet exemple a essentiellement un rôle d'ouverture sur les perspectives d'études qui peuvent faire suite à ce travail.

Il est clair que les performances du robot dans un environnement dynamique dépendent à la fois de sa possibilité d'anticipation et de sa rapidité de réaction motrice. Comme on l'a déjà souligné, dans le cadre de cette étude, les manoeuvres de braquage ont été "optimisées" en tentant de minimiser la zone géométrique réservée aux changements de direction. De ce fait les réactions motrices du robot sont peu adaptées à éviter des objets se déplaçant à haute vitesse. De plus la lenteur de la réaction motrice, ne peut être compensée par une augmentation de l'anticipation qui est fixe ici ($R_v=50\text{cm/s}$ pour $R_o=15\text{cm}$). Par conséquent, on s'attend à ce que le robot se trouve dans l'impossibilité d'éviter les collisions avec des objets se déplaçant à haute vitesse.

Deux types d'exemples sont présentés ici pour illustrer cette remarque : le premier (fig.V.23) illustre le cas d'un objet se déplaçant à la même vitesse que le robot (50cm/s) et convergeant dans la direction du robot avec un angle de 120° (la vitesse tangentielle entre le robot et l'objet est donc réduite à $V_o/2 = 25\text{cm/s}$) ; le second (fig.V.24) illustre le cas du même objet, toujours en mouvement rectiligne mais venant de face à la rencontre du robot et ce pour différentes vitesses de translation (30cm/s , 50cm/s , 70cm/s).

Dans tous ces exemples, "le robot modèle" (fig.V.23 à gauche et fig.V.24 a, b, c en haut) équipé d'un "senseur-3D théorique" (qui mesure directement la distance et non pas le mouvement des objets) se fait effectivement percuter par l'objet en mouvement sans qu'il ait eu le temps de réagir. C'est également le cas pour le robot équipé de l'oeil-DEM, dans l'exemple de la fig.V.23 (à droite).

Par contre dans les trois cas de la fig.V.24 (a, b, c en bas) le robot équipé de l'oeil-DEM se montre paradoxalement plus performant que "le robot modèle". Cette caractéristique provient du fait, que lorsque la vitesse relative entre le robot et les obstacles est supérieure à V_o alors la distance des obstacles est automatiquement sous-estimée ce qui provoque naturellement une augmentation de l'anticipation du système (qui a priori est réglée sur la valeur $R_v=\Omega/V_o$). Ce phénomène est évidemment inversé lorsque cette vitesse relative est inférieure à V_o , et c'est la raison pour laquelle dans l'exemple V.23 (à droite) le robot détecte trop tard l'obstacle dont la vitesse tangentielle relative plus faible 25cm/s conduit à une sous-estimation de la distance.

L'ensemble de ces exemples regroupés sous le nom du "robot téméraire" confirment qu'une modélisation géométrique est loin d'être suffisante au guidage du robot et qu'il est fondamental pour celui-ci de pouvoir mesurer directement ou indirectement les paramètres cinématiques qui le caractérisent par rapport à son environnement. La fig.V.24 suggère qu'une telle propriété reste envisageable avec l'oeil-DEM qui, plus qu'un senseur 3D, est avant tout un senseur de mouvement.

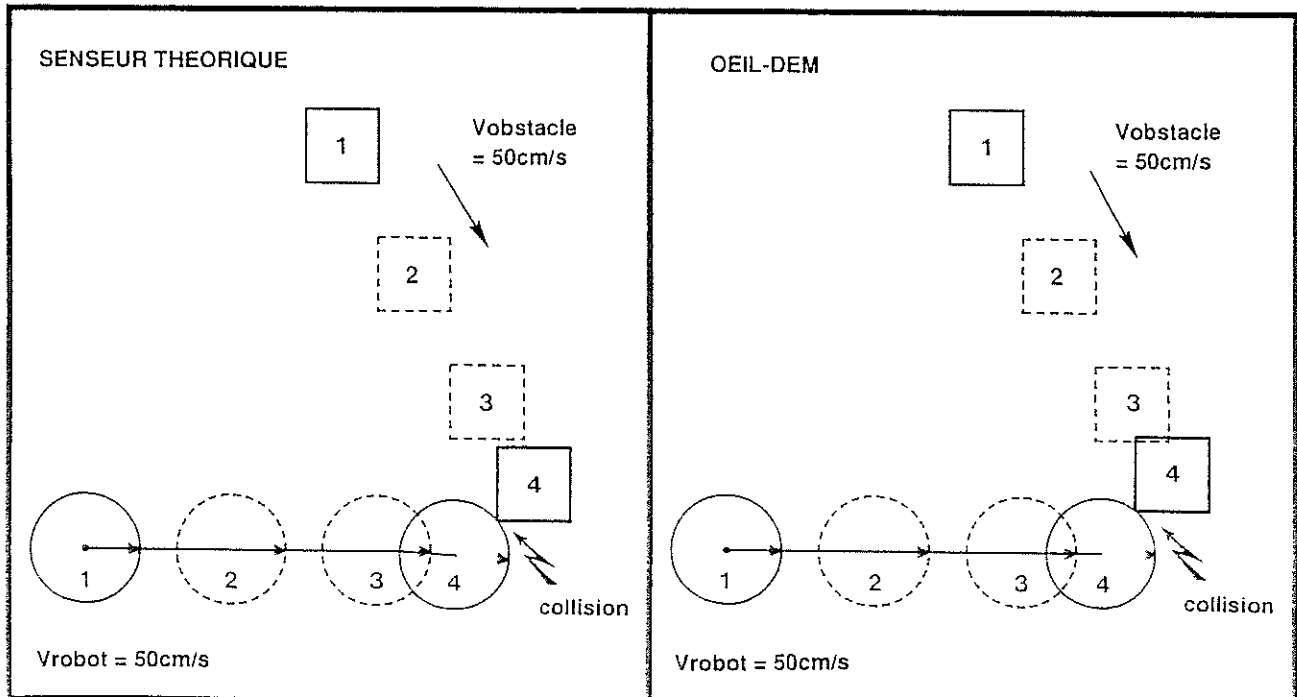


Fig.V.23 Le "robot téméraire"

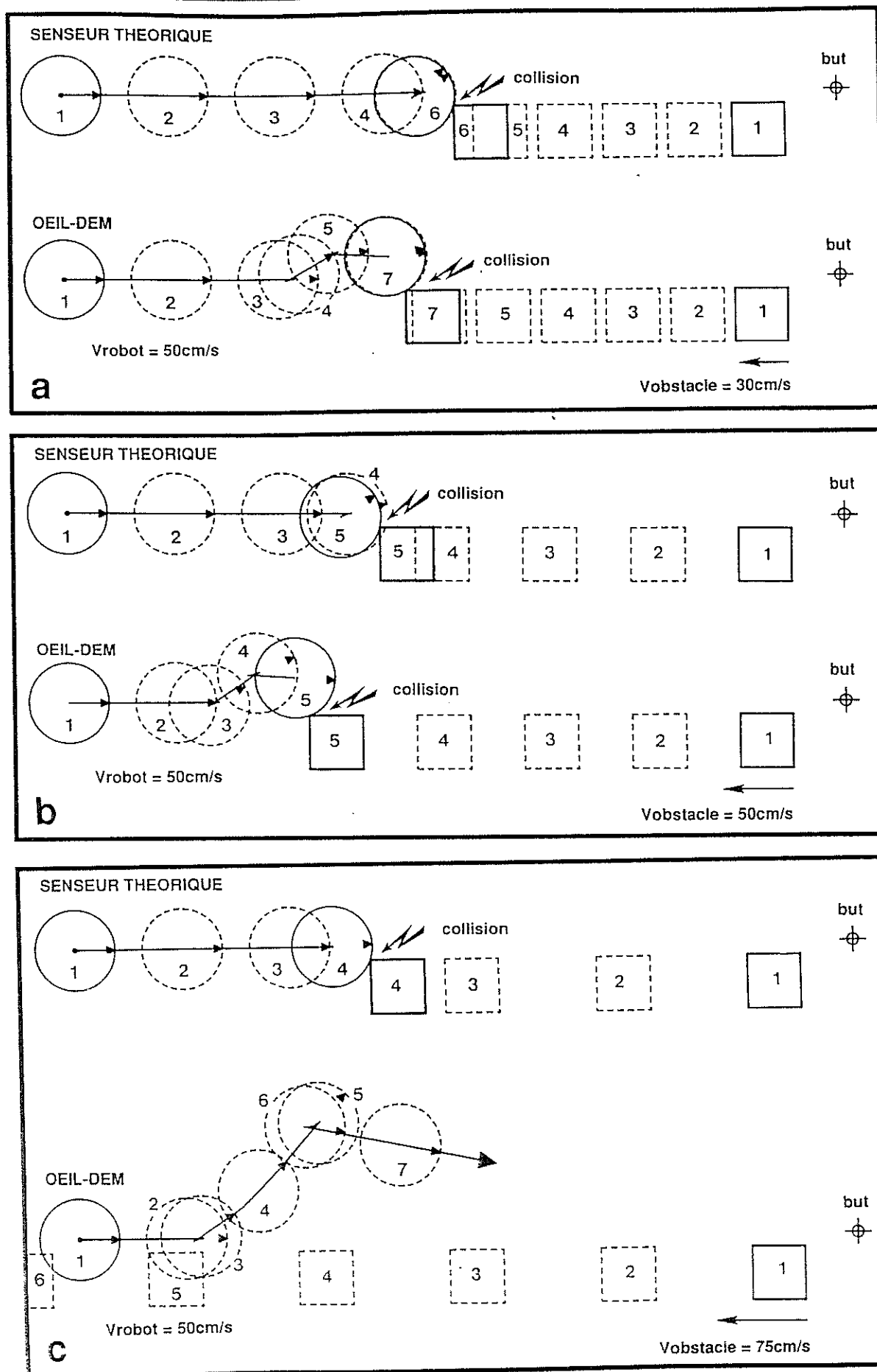


Fig.V.24 Le "robot téméraire"

Chapitre VI

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Chapitre VI

VI.1. DES SENSEURS DEVELOPPES SPECIFIQUEMENT POUR LE GUIDAGE DES CREATURES

VI.2. INTERDEPENDANCE ENTRE L'ASPECT SENSORIEL ET L'ASPECT MOTEUR

- Mouvement visuel = danger = réaction du robot
- Analyse des problèmes de correspondance en fonction de la tâche à accomplir
- Un mode locomotion simplifiant la perception mais compliquant la navigation
- Une qualité de trajectoire dépendant de la résolution angulaire
- Une représentation directe de l'environnement sous forme de patterns moteurs

VI.3. EXTENSIONS

- Vers une amélioration de la sensibilité au contraste
- Vers des architectures optiques encore plus spécifiques
- Vers un contrôle dynamique de la vitesse moyenne du robot
- Vers un environnement dynamique
- Vers des niveaux supérieurs de comportement

VI.4. ET LA MOUCHE ?

Le travail présenté dans ce mémoire s'est essentiellement attaché à démontrer la *faisabilité* d'un système sensori-moteur *complet* capable d'assurer avec *peu de moyens* le *guidage bas-niveau* d'un robot mobile autonome. L'originalité de ce guidage en effet, est qu'il repose sur une boucle réactive formée exclusivement de deux réseaux parallèles presque indissociables : un réseau de Détecteurs Elémentaires de Mouvement coté sensoriel et un réseau anticollision coté moteur.

Les résultats ont été validés ici par des simulations qui respectent fidèlement l'architecture hardware du prototype du robot lui-même (présenté dans le mémoire de C. Blanes) et par conséquent constituent un *modèle précis du comportement* attendu pour celui-ci. Ce travail a également montré comment l'ensemble de ces simulations pouvait constituer un outil d'analyse et de développement efficace pour étudier, tant au plan traitement du signal qu'au plan comportemental, un système optomoteur comme celui qui vient d'être présenté ; un tel système bien que reposant sur des principes simples, devient en effet complexe à appréhender à partir du moment où il est placé dans une situation en "boucle fermée" très proche de la réalité.

VI.1. DES SENSEURS DEVELOPPES SPECIFIQUEMENT POUR LE GUIDAGE DES CREATURES

Les DEMs utilisés dans l'oeil du robot et qui sont en partie inspirés par ceux du système visuel de la mouche ont été spécifiquement développés pour une tâche précise du robot, à savoir l'évitement d'obstacles (cf. "smart sensors" : Ballard 1987, Burt 1988, Sandini et Dario 1989, Van de Grind 1990). Ainsi, tout au long de ce travail, on s'est attaché à démontrer que le seul critère gouvernant la construction des DEMs était non pas un critère lié à une représentation géométrique de l'espace (étape intermédiaire), mais un critère comportemental (ici un critère anticollision). Cette approche repose sur l'idée que les contraintes liées au système visuel d'une créature mobile, ne sont pas forcément celles d'un système de vision-3D sophistiqué devant estimer la position des objets au millimètre près. Par exemple, et comme le montrent les résultats comportementaux présentés au Chap.V, une créature mobile peut accepter une certaine marge d'erreur sur les données délivrées par ses senseurs pourvu qu'elle soit capable d'en tenir compte dans ses réactions motrices. L'avantage lié à une telle tolérance à l'erreur est une forte simplification de l'ensemble sensori-moteur, simplification qui permet un fonctionnement "temps réel" avec un système embarqué léger.

VI.2. INTERDEPENDANCE ENTRE L'ASPECT SENSORIEL ET L'ASPECT MOTEUR

Toute l'efficacité du guidage du robot repose sur la forte interdépendance des différentes parties qui composent l'ensemble de son système visuo-moteur (de l'optique aux moteurs). C'est ce qui nous a conduit à aborder simultanément l'aspect vision et l'aspect navigation. Cette

interdépendance est apparue tout au long du mémoire et l'on peut la résumer à partir des caractéristiques énoncées ci-dessous.

- **Mouvement visuel = danger = réaction du robot**

Le système visuel du robot est aveugle en l'absence de mouvement relatif entre l'environnement et le robot. Cela n'affecte cependant pas la survie de ce dernier, qui interprète dans ce cas l'absence de mouvement relatif comme une absence de danger. Par contre, dès qu'un objet de l'environnement où le robot lui-même entame un mouvement, alors la chaîne visuo-motrice du robot devient naturellement active et donne ainsi à ce dernier la capacité d'éviter les collisions (pour l'instant dans les limites évoquées à la fin du Chap.V).

- **Analyse des problèmes de correspondance en fonction de la tâche à accomplir**

Le filtrage spatio-temporel présent dans chaque DEM n'a pas été développé pour résoudre systématiquement *tous* les problèmes de correspondance, ce qui est d'ailleurs impossible avec l'économie délibérée des moyens de traitement du signal mis en oeuvre dans chaque DEM. Au contraire, seuls les problèmes de correspondance jugés réellement néfastes au comportement du robot ont été atténués, et pour ce faire, dès le Chap.III, les performances des DEMs ont été "relativisés" par rapport au périmètre de sécurité (cercle de rayon R_v), qui est un paramètre fixé par l'algorithme anticollision (Chap.V). Les exemples récapitulatifs présentés à la fin du Chap.V tentent d'ailleurs d'illustrer le lien entre différentes configurations de filtrage spatio-temporel et les performances comportementales qui leur sont associées.

- **Un mode de locomotion simplifiant la perception mais compliquant la navigation**

Le mode de locomotion du robot (succession alternée de translations élémentaires et de mouvements de braquage) joue un rôle fondamental dans la perception (Chap.II) puisqu'il permet de simplifier la structure du flux optique en le rendant naturellement translationnel (Bolles et al. 1987, Skifstad et Jain 1989). Inversement, les caractéristiques de ce mode de locomotion, ont des répercussions sur la stratégie d'évitement d'obstacles puisqu'elles obligent à augmenter l'anticipation du robot (liée à la taille de son cercle de vision R_v) ce qui restreint la "liberté" de celui-ci (Chap.V). Un tel mode de locomotion peut paraître contraignant et non réaliste même d'un point de vue biologique. Il faut cependant souligner que certains insectes tels que les mouches, volent parfois en une succession de mouvements quasi-rectilignes, suivis d'une rapide saccade du corps exécutées en moins de 20ms (Wagner 1986). Cela suggère que les mouches, comme le robot décrit dans le cadre de ce projet, pourraient également utiliser leur mouvement rectiligne pour construire une représentation de l'environnement et effectuer ensuite "en aveugle" leurs manoeuvres de braquage.

- **Une architecture optique optimisée pour le système anticollision**

La distribution en gradient des axes optiques de l'oeil-DEM (Chap.IV) est à la fois dictée par l'adoption de translations élémentaires de longueur ΔL limitée et par la forme circulaire de la zone de vision nécessaire à l'algorithme anticollision, Chap.V). Il faut noter cependant qu'elle n'est valable que dans le cadre du principe d'orientation automatique de l'oeil-DEM dans la direction du

mouvement, et qu'elle n'a de sens qu'avec la contrainte additionnelle d'économie sur le nombre de DEMs à utiliser.

- **Une qualité de trajectoire dépendant de la résolution angulaire**

La résolution angulaire de l'oeil-DEM est caractérisée (Chap.IV) par le rapport G entre la longueur des translations élémentaires ΔL et le rayon de vision R_v du robot. Une mauvaise résolution angulaire (G grand) se répercute directement sur le comportement du robot qui doit alors effectuer des translations élémentaires plus longues, ce qui nécessite une anticipation minimale plus importante (R_v plus grand) ; ces deux contraintes détériorent à la fois la liberté du robot et la précision de sa trajectoire (Chap.V, fig.V.10).

- **Une représentation directe de l'environnement sous forme de patterns moteurs**

Si l'algorithme anticollision est ici particulièrement simple, c'est en partie à cause du principe de l'oeil-DEM qui fournit directement une représentation polaire de l'environnement, dans un référentiel à la fois centré sur le robot et orienté dans la direction du mouvement. D'autre part, le système anticollision, en prolongeant pratiquement point par point la structure parallèle du réseau de DEMs, permet d'oublier la représentation géométrique effectuée par ce dernier qui n'est en fait qu'une représentation intermédiaire. En effet l'ensemble de ces deux réseaux transforme directement le flux visuel en un pattern moteur, qui est la carte de commandes motrices résultant de la réunion de zones interdites au braquage (Chap.V). La transformation individuelle effectuée indépendamment par chaque colonne de cet ensemble est dans cette interprétation non plus une transformation $\Omega \rightarrow D$ mais une transformation $\Omega \rightarrow Z_i$ où Ω représente la vitesse angulaire locale des points de contraste détectés, et Z_i la zone interdite au braquage du robot associée à chacun de ces contrastes.

VI.3. EXTENSIONS

Comme on l'a souligné au début de cette conclusion, ce projet s'est surtout intéressé à la faisabilité de la chaîne visuo-motrice complète du robot. Mais ce travail n'est qu'un commencement dans la mesure où il a soulevé certaines problématiques qui pourraient donner lieu à de nombreuses extensions et qui sont essentiellement résumées ci-dessous.

- **Vers une amélioration de la sensibilité au contraste**

Le contrôle de la sensibilité au contraste détermine la qualité de l'échantillonnage de l'environnement pris en compte par le système de guidage. Il paraît intéressant d'obtenir une sensibilité au contraste *modulable* non seulement avec la distance des objets, mais également avec la *vitesse du robot*, et de façon plus générale, avec la tâche à accomplir.

Une augmentation de cette sensibilité peut s'obtenir au prix d'une amélioration des caractéristiques du filtrage spatio-temporel individuel (par exemple en utilisant un diagramme de sensibilité angulaire mieux adapté que la forme "gaussienne" choisie ici), au prix d'un traitement du signal moins localisé dans l'espace (interactions latérales entre plusieurs photorécepteurs voisins) et dans le temps (moyennage temporel), mais aussi en envisageant d'autres schémas de câblage de DEM.

• Vers des architectures optiques encore plus spécifiques

De la même manière on peut concevoir des architectures optiques composées beaucoup plus optimisées que celle présentée ici. Une telle optimisation peut porter sur deux points essentiels :

- modéliser le périmètre de vision en une forme autre qu'un cercle, en jouant sur la distribution angulaire des axes optiques.
- modifier le lieu géométrique des sommets de chaque DEM (confondus ici avec le centre du robot). Cela conduirait à un système de représentation de l'environnement autre qu'un système polaire centré et éventuellement mieux adapté à des réactions motrices spécifiques. Cela permettrait également d'éviter de scinder l'oeil en deux sous-systèmes distincts (la partie latérale et la partie proximétrique frontale) comme c'est le cas ici, en décentrant progressivement le sommet d'un DEM lorsque son angle polaire diminue.

Ces deux types d'optimisation sont à définir avant tout en fonction des besoins des algorithmes de guidage.

• Vers un contrôle dynamique de la vitesse moyenne du robot

Une hypothèse forte effectuée dans le cadre de ce projet a été le choix d'une vitesse V_0 du robot, identique pour toutes les translations élémentaires ΔL consacrées aux acquisitions visuelles, vitesse sur laquelle est basée la calibration en distance des DEMs. Une extension immédiate consisterait à généraliser le système de guidage à une vitesse qui resterait constante au cours d'une même translation élémentaire, mais serait variable d'une translation à l'autre. Cela conduirait par exemple :

- à trouver une loi décrivant (par exemple en fonction de l'encombrement de l'environnement détecté au cours de l'acquisition précédente) la variation de V_0 , variation qui peut être également associée à une variation des vitesses de braquage.
- à moduler la calibration en distance des DEMs en fonction de V_0 .
- ou à profiter au contraire d'une calibration fixe pour obtenir une anticipation du DEM naturellement modulée avec la vitesse V_0 . Ce dernier point est particulièrement intéressant. Il a déjà été évoqué dans le dernier exemple "le robot téméraire" du Chap.V illustrant le cas d'un environnement dynamique. Il relève, là encore de la loi $\Omega = V_0 / D$ (Chap.II), qui montre que si la vitesse du robot décroît alors la mesure de Ω induit une sous-estimation de D (diminution de l'anticipation), ce qui est un moindre mal puisqu'à faible vitesse le robot a besoin de moins d'espace pour freiner et effectuer son braquage. Par contre si la vitesse V_0 est importante, alors le

phénomène est inversé et la mesure de Ω induit une surestimation en distance (augmentation de l'anticipation) ce qui lui laisse un plus grand espace pour réagir, comme l'exige sa vitesse élevée.

Cette propriété suggère (cf. également Chap II. §.II.1) que la boucle réactive du robot pourrait être généralisée à une *régulation sur le signal de vitesse angulaire* Ω délivré par les DEMs et non pas sur un signal de distance absolue D (dont le calcul impliquerait ici la connaissance de V_0). Dans une telle régulation qui ne *nécessiterait plus la connaissance de la vitesse propre du robot* au niveau navigation, l'algorithme anticollision reposerait non plus sur un cercle de vision de rayon R_v , mais sur un "cercle de vitesse angulaire" de "rayon" $\Omega_v (= V_0/R_v)$.

• Vers un environnement dynamique

La seconde hypothèse forte du projet a été de travailler a priori dans un environnement statique. La généralisation à un environnement dynamique a été partiellement abordée dans le dernier exemple du Chap.V : "Le robot téméraire". C'est sans doute l'extension la plus difficile et comme on l'a vu dans cet exemple, le système de guidage du robot développé ici est encore mal adapté à un environnement dynamique, ne serait-ce qu'à cause des manoeuvres de braquage d'une lenteur incompatible avec l'évitement d'objets se dirigeant à haute vitesse droit sur le robot. Intuitivement, la modulation d'une navigation en fonction de la dynamique de l'environnement pourrait s'effectuer de la manière suivante :

- lorsque l'environnement est considéré comme "paisible" (c'est-à-dire relativement statique) mais très encombré (environnement de type forêt), alors le robot peut adopter l'anticipation et la stratégie de braquage telles qu'elles ont été envisagées dans le cadre de ce projet ; celles-ci étant minimisées dans l'espace, elles permettent notamment au robot de se glisser dans les espaces les plus étroits.

- par contre, lorsque l'environnement est considéré comme "dangereux" (c'est-à-dire dynamique), alors le robot doit prendre un certain nombre de précautions, d'une part en augmentant son anticipation et l'espace libre autour de lui, d'autre part en adoptant une stratégie de braquage lui permettant de s'écarter le plus rapidement possible du point de collision.

Un tel comportement nécessiterait :

- de trouver un principe simple permettant d'adapter les manoeuvres de braquage au type de la situation.

- de développer, comme dans le point précédent, une boucle réactive basée directement sur la régulation de la vitesse angulaire Ω (et non pas de la distance D) dans chaque direction qui modulerait automatiquement l'anticipation en fonction du mouvement relatif.

• Vers des niveaux supérieurs de comportement

Pour que la navigation du robot ne soit pas à tout jamais réduite à la stratégie rudimentaire d'anticollision évoquée dans ce mémoire, il paraît intéressant d'introduire des couches additionnelles de contrôle, qui en fonctionnant concurremment avec le système anticollision, viendraient optimiser la tâche d'évitement d'obstacles. Il serait notamment intéressant d'analyser si

ces couches additionnelles de contrôle pourraient, au plan sensoriel, être alimentées par le même réseau de DEM.

VI.4. ET LA MOUCHE ?

Il serait osé, de prétendre que les simulations des trajectoires du robot présentées dans ce mémoire, "modélisent" le comportement d'une mouche, ne serait-ce parce que *l'évaluation même* des performances d'une créature mobile, animal ou robot reste une *difficulté* en soi. Le comportement complexe d'une créature mobile n'est d'ailleurs pas forcément le résultat d'un système sensori-moteur inextricable. Il reflète surtout la complexité de l'environnement à travers un mécanisme qui peut être relativement simple. Cette remarque suggère notamment une certaine prudence dans les conclusions que l'on peut tirer de l'analyse comportementale d'un animal. Elle souligne aussi l'intérêt d'une double approche, à la fois analytique et synthétique, pour appréhender les fondements du guidage visuo-moteur des créatures mobiles vivantes (Braitenberg 1984).

ANNEXE

LA MOUCHE

Annexe

A.1. CE QUI FAIT L'INTERET 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. LES DETECTEURS ELEMENTAIRES 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 DEM

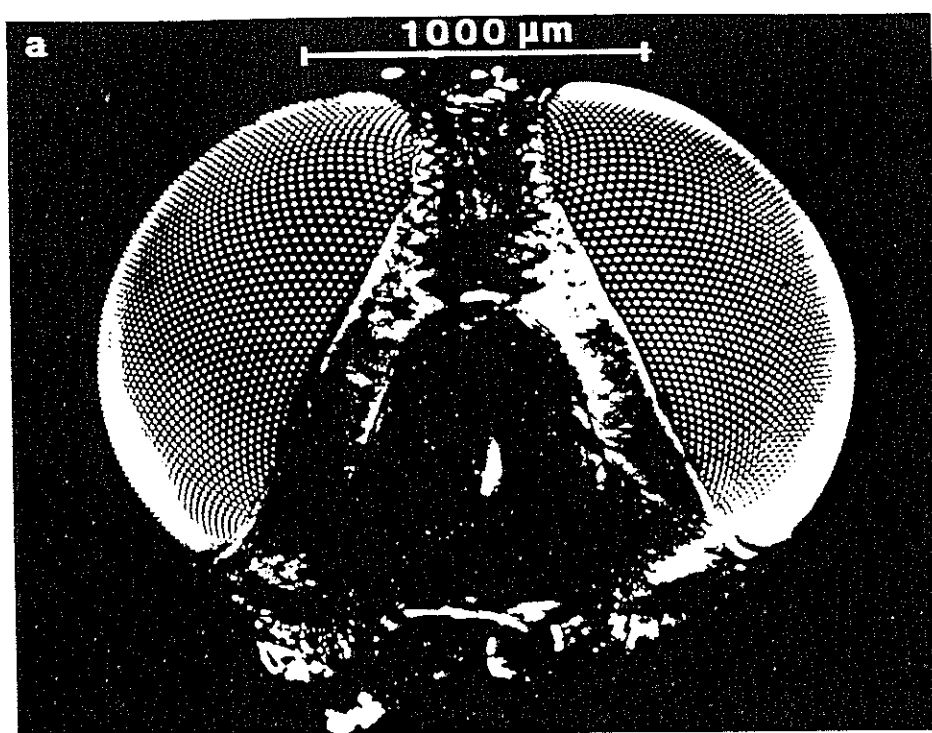


Fig.A.1 Tête de *Musca Domestica* (Franceschini 1985).

A.1. CE QUI FAIT L'INTERET DE LA MOUCHE

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 neuro-anatomique 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 (#106) 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 des conclusions qu'on peut en tirer.

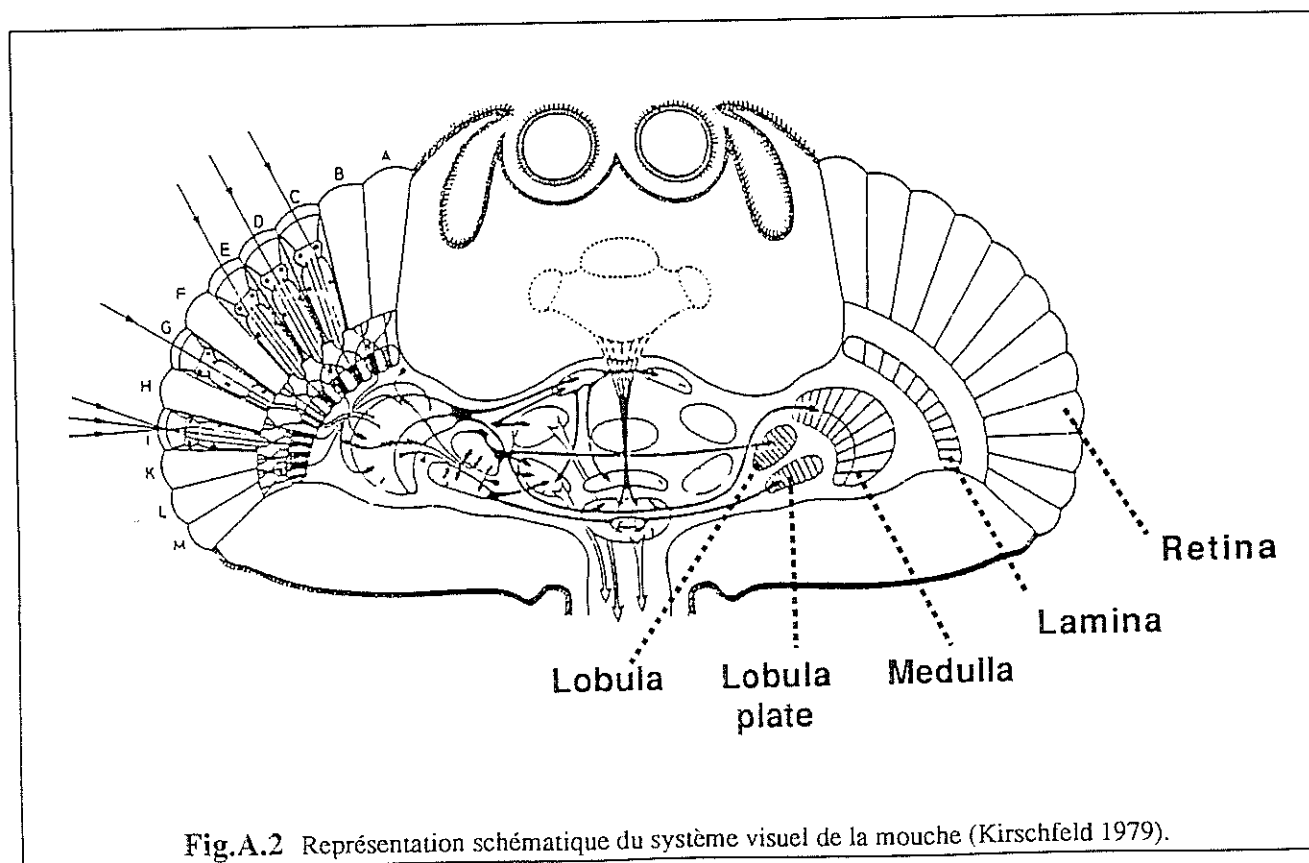
En effet :

- 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.

A.2. L'APPAREIL VISUEL DE LA MOUCHE

A.2.1. Introduction



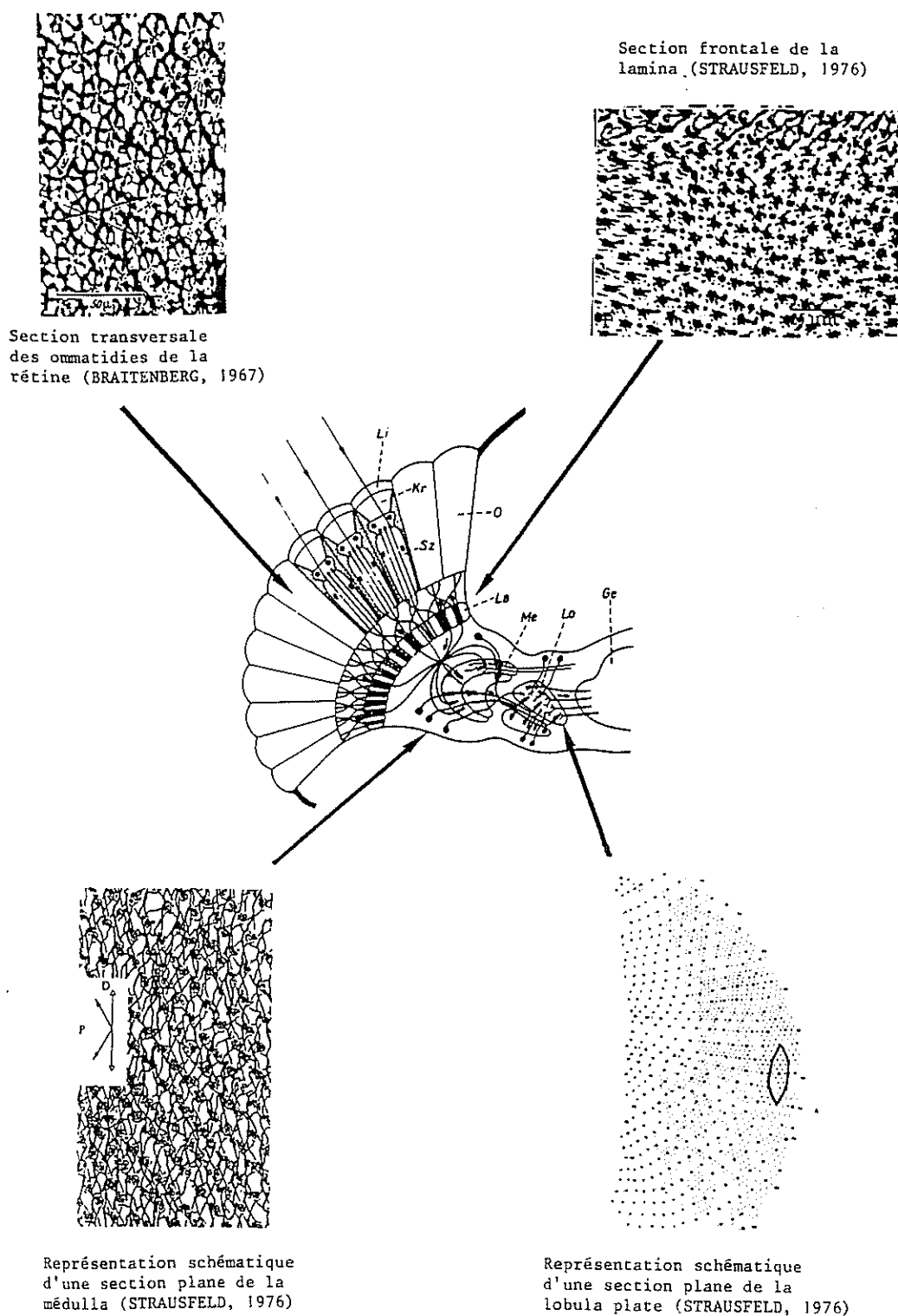


Fig.A.3 Illustration de l'aspect cristallin du système visuel de la mouche (Kirschfeld 1972).

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 voisins par des cellules amacrines et des 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

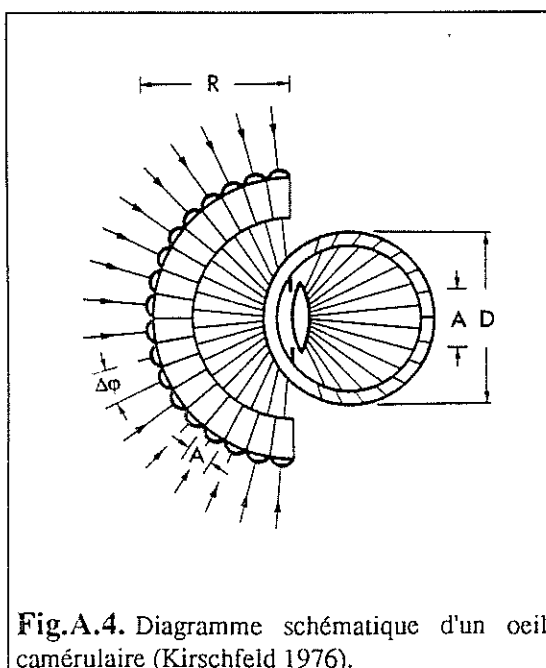


Fig.A.4. Diagramme schématique d'un oeil camérulaire (Kirschfeld 1976).

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 4π stéradians et selon 3000 directions pour chaque oeil (fig.A.5).

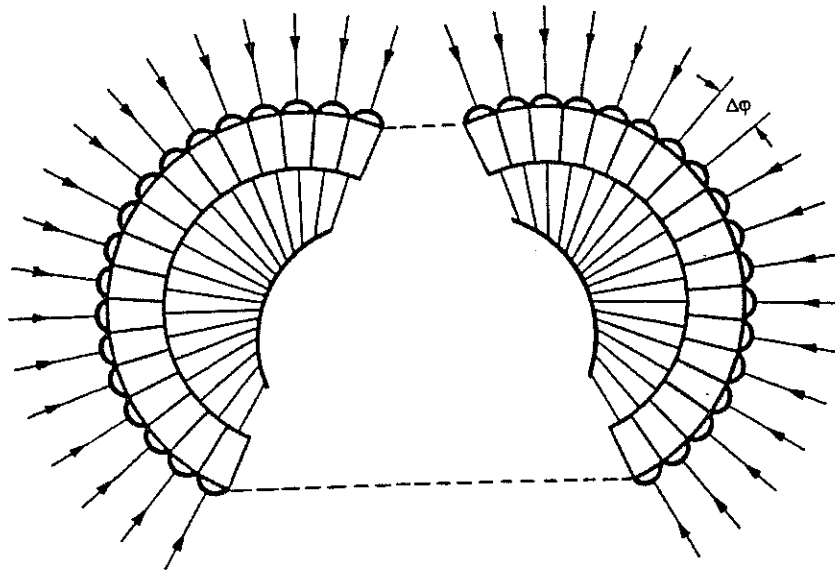


Fig.A.5 Principe de l'échantillonnage pour l'oeil de la mouche dans un plan horizontal de l'espace. (le gradient en $\Delta\phi$ n'est pas représenté ici)

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'oeil.

L'angle interommatidial $\Delta\phi$ varie en fait selon les régions de l'oeil 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'oeil, 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 photon/m²/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 lui, par contre, 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 $25\text{ }\mu\text{m}$, lentille du type plan convexe remarquable par sa précision. Le très faible rayon de courbure conduit à une distance focale très courte: 30 à $50\text{ }\mu\text{m}$.

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 Δp 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).

Il est possible que la haute résolution offerte par l'oeil camérulaire 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).

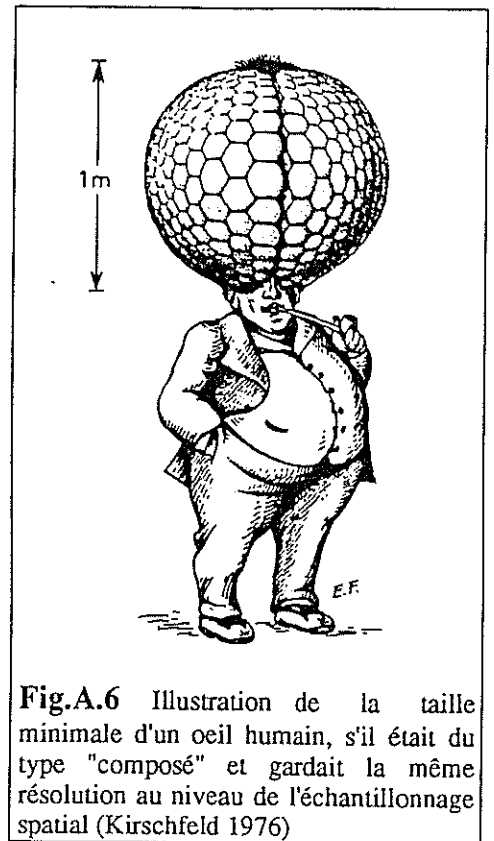


Fig.A.6 Illustration de la taille minimale d'un oeil humain, s'il était du type "composé" et gardait la même résolution au niveau de l'échantillonnage spatial (Kirschfeld 1976)

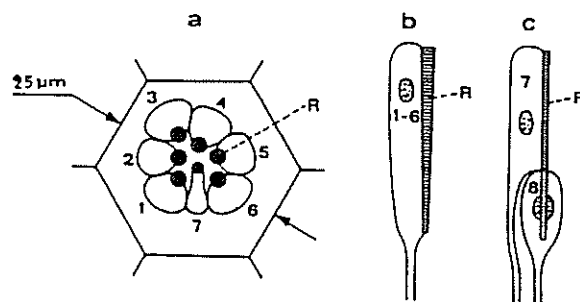
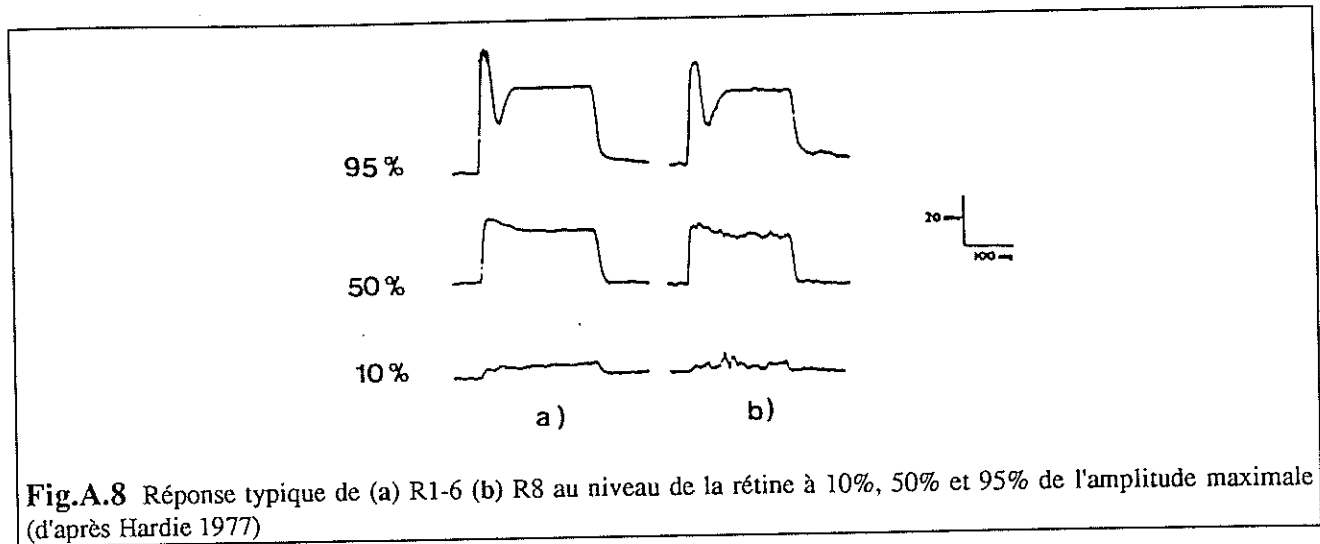


Fig.A.7 Le schéma suivant montre en (a) la disposition de l'extrémité distale des sept photorécepteurs, (le huitième se trouve sous le R7 avec le même axe optique, comme le montre (c) et en (b) une coupe longitudinale des récepteurs R1 à R6. (R) rhabdomère. (Franceschini 1983)

Le rhabdomère R, partie photosensible par excellence de chaque cellule, agit comme un "guide d'ondes lumineux". Son diamètre est de l'ordre de $1\text{ }\mu\text{m}$ et sa longueur de $100\text{ }\mu\text{m}$. 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 et Franceschini 1969).

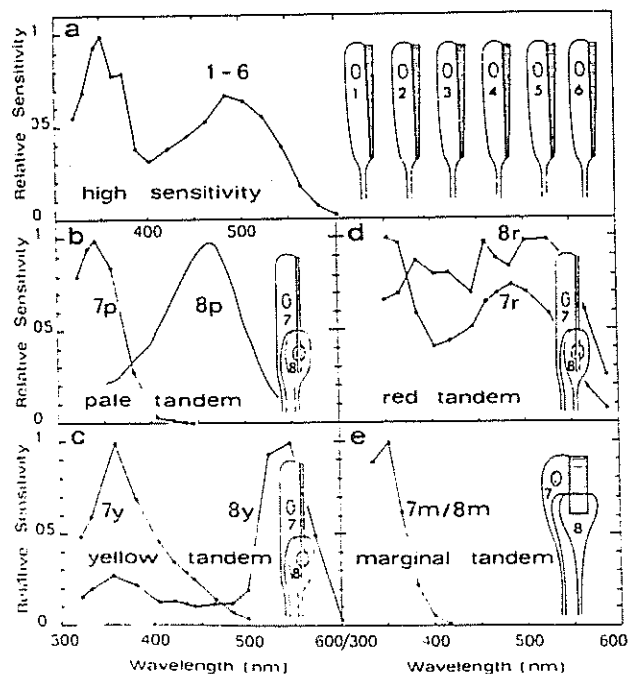
Au plan électrophysiologique, ces enregistrements intracellulaires montrent que la réponse électrique des photorécepteurs à un créneau de lumière d'intensité variable est une dépolarisation soutenue dont l'amplitude croît (de manière non linéaire) avec l'intensité lumineuse (fig.A.8).



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).



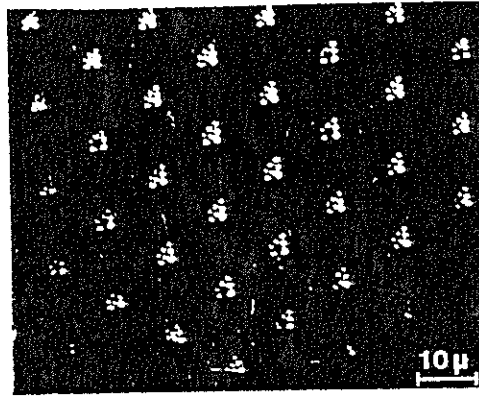


Fig.A.10 Observation in vivo, en épifluorescence, de la terminaison distale des rhabdomères dans une portion frontale de la rétine de la mouche domestique (Franceschini 1985).

Les propriétés optiques de l'ensemble cornée-rétine

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).

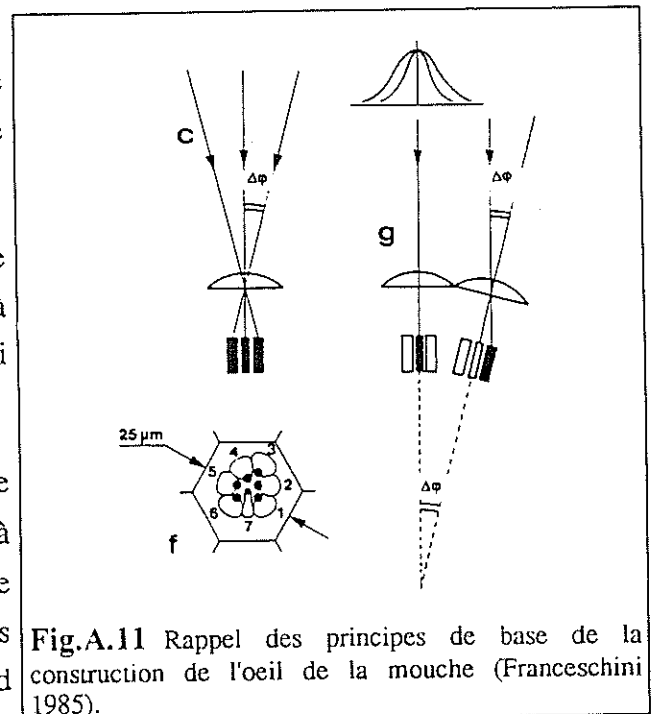


Fig.A.11 Rappel des principes de base de la construction de l'oeil de la mouche (Franceschini 1985).

- 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.

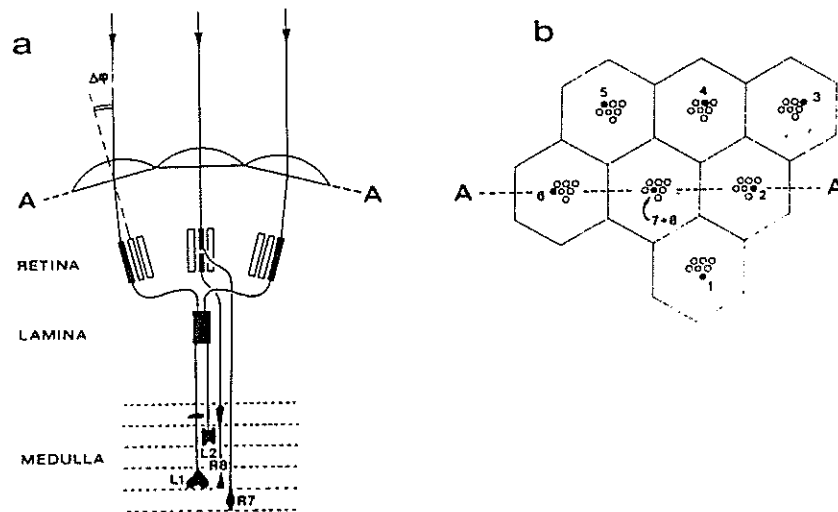


Fig.A.12 Rappel du principe de la superposition neuronale de "l'oeil" de la mouche et de la projection neuronale des diverses cellules (Franceschini 1985).

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).

A.2.3. Les unités de traitement

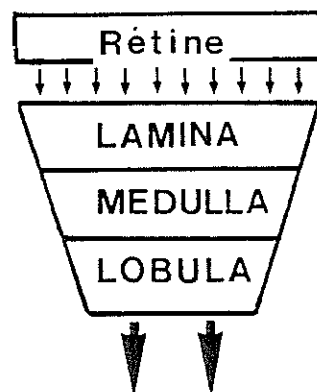


Fig.A.13 Les trois ganglions optiques ou unités de traitement présents dans l'oeil de la mouche.

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 schématisées à la fig.A.13, 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 et 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 aux caractéristiques énumérées ci-dessus.

C'est effectivement le cas, puisque la détection du mouvement est l'une des préoccupations majeures de la medulla et de la lobula-plate.

A.2.3.b Les neurones détecteurs de mouvement de la lobula-plate

La lobula-plate fait partie du 3ème 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, 1976b, Eckert 1980),

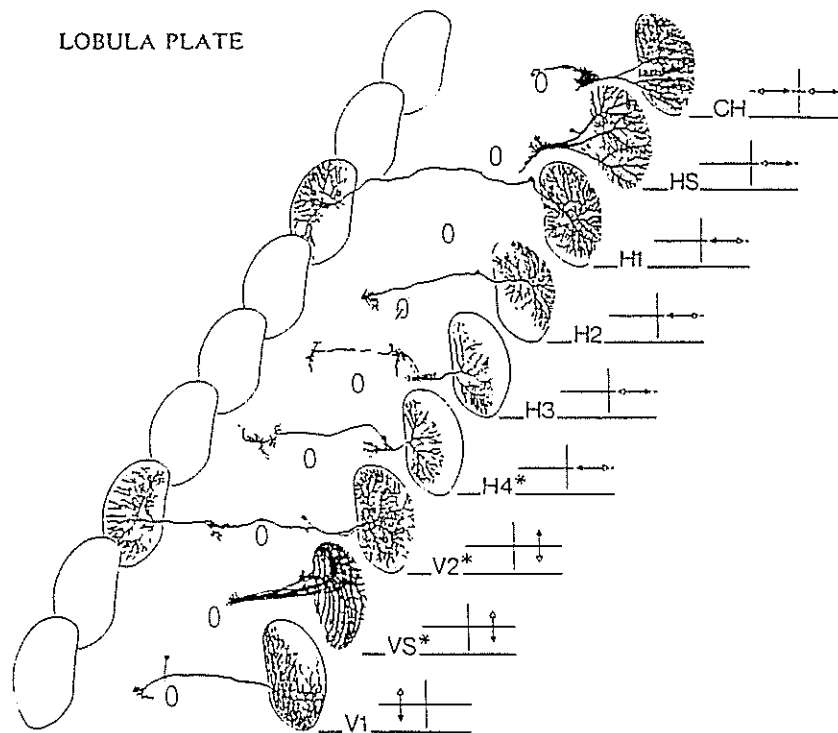


Fig.A.14 Reconstitution en perspective des cellules tangentielles de la plaque lobulaire. Les flèches à droite indiquent les directions préférées (pointes noires) et les directions nulles (pointes blanches) des neurones détecteurs de mouvement. A= antérieur, P=postérieur (Hausen 1984).

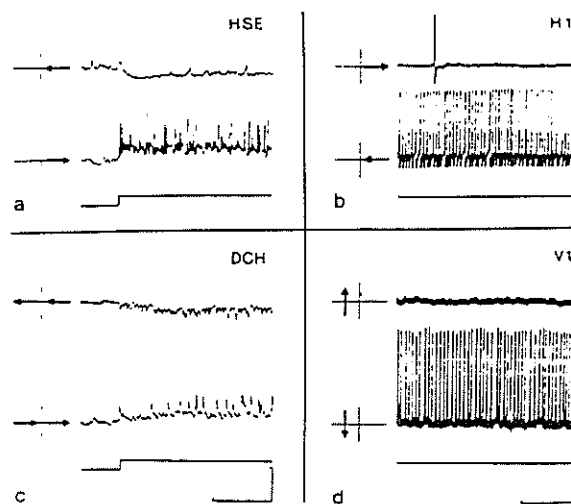


Fig.A.15 Illustration de la réponse de 4 neurones géants de la lobula-plate (Hausen 1984)

potentiels gradués (Hausen 1976a, 1976b, 1981, 1982) ou combinaison de potentiels d'action et de variations graduées pour les autres (Hausen 1981, 1982).

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.

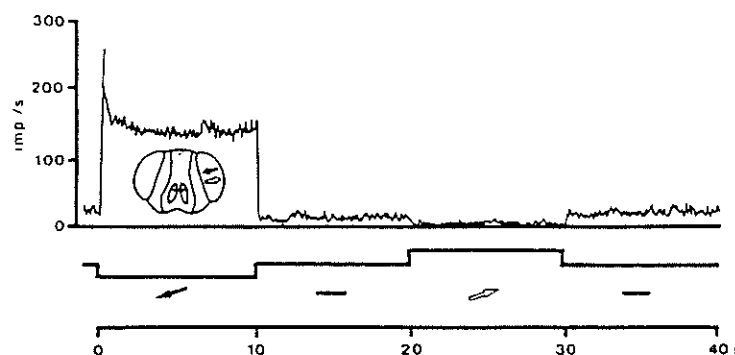


Fig.A.16 Réponse de H1 à une mire rayée, présentée dans le sens préféré puis dans le sens non-préféré (Riehle et Franceschini 1984).

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. et fig.A.12).

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 μm), 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

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).

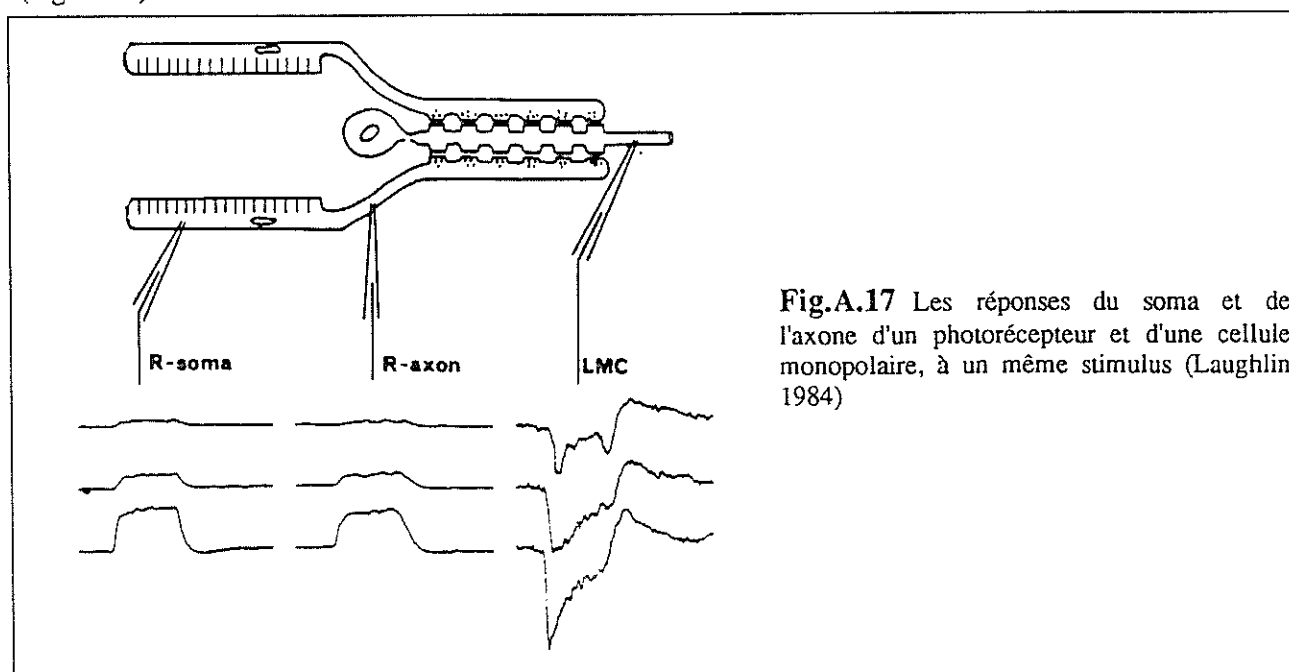


Fig.A.17 Les réponses du soma et de l'axone d'un photorécepteur et d'une cellule monopolaire, à un même stimulus (Laughlin 1984)

On doit s'intéresser au contrôle de gain dans la mesure où il peut conditionner l'entrée des DEMs.

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.

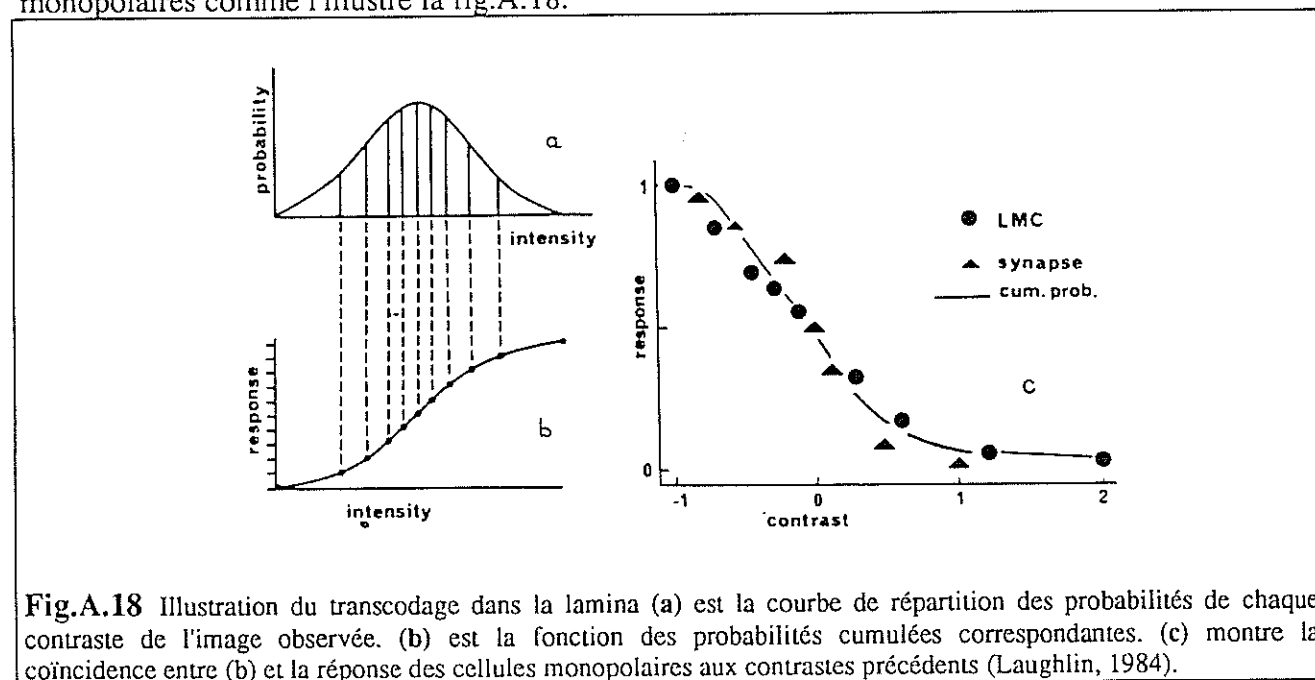


Fig.A.18 Illustration du transcodage dans la lamina (a) est la courbe de répartition des probabilités de chaque contraste de l'image observée. (b) est la fonction des probabilités cumulées correspondantes. (c) montre la coïncidence entre (b) et la réponse des cellules monopolaires aux contrastes précédents (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.

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

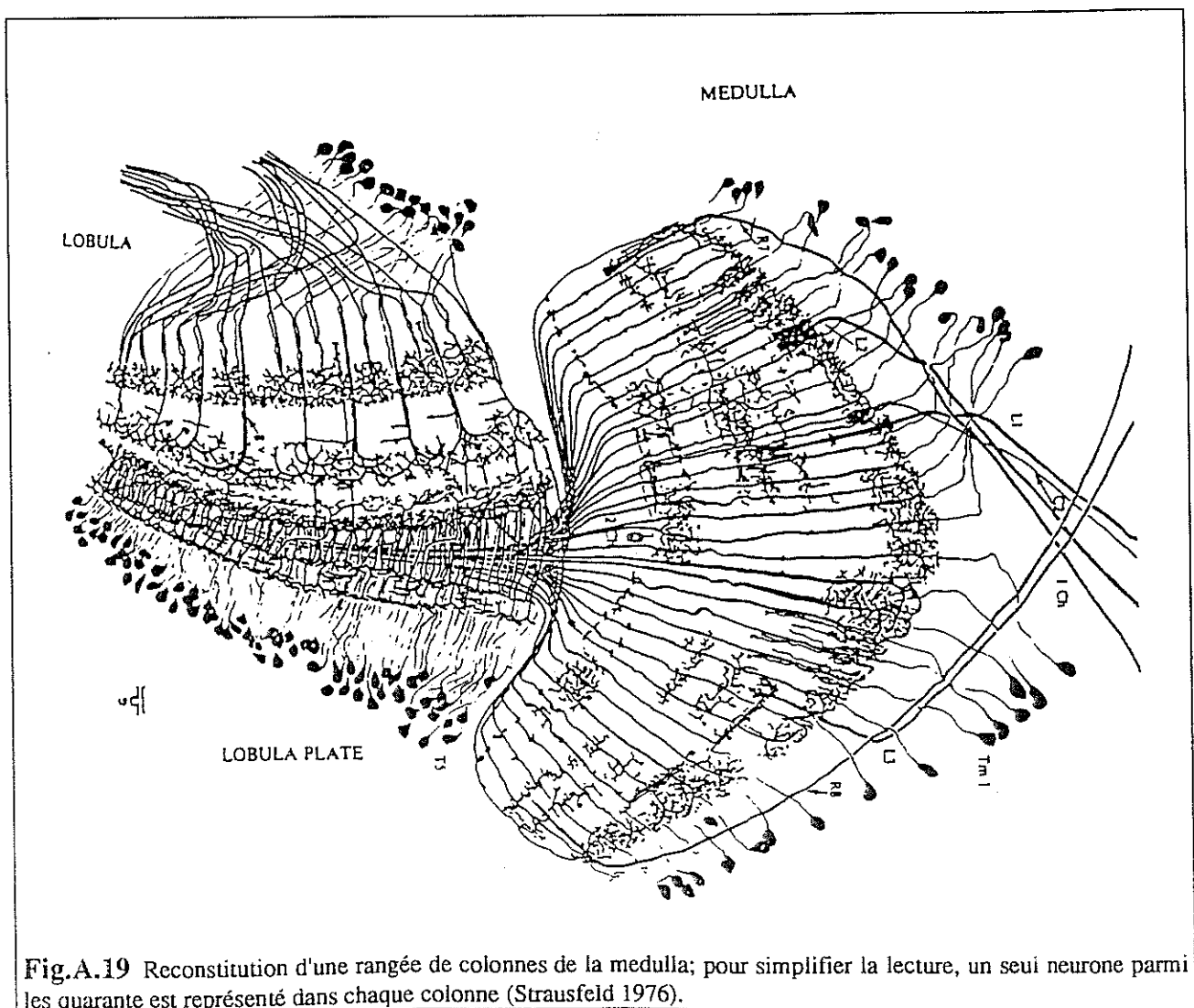


Fig.A.19 Reconstitution d'une rangée de colonnes de la medulla; pour simplifier la lecture, un seul neurone parmi les quarante est représenté dans chaque colonne (Strausfeld 1976).

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 (DEM).

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 DEMs. Dans ce qui va suivre nous allons entreprendre une étude beaucoup plus fonctionnelle d'un DEM au niveau individuel, et effectuer à partir des seules entrées-sorties, une analyse de ses propriétés dynamiques.

A.3. LES DETECTEURS ELEMENTAIRES 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) :

•1 l'une nécessitant la reconnaissance préalable de motifs élémentaires : "Token matching schemes".

•2 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 :

- a) la technique du gradient.
- b) 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.

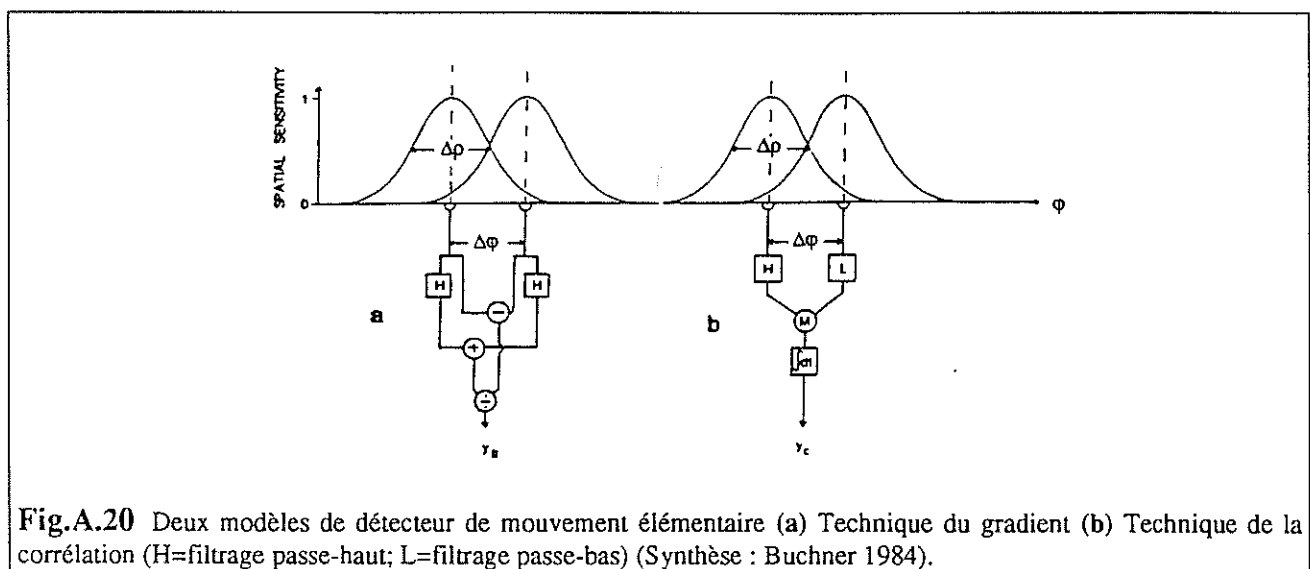


Fig.A.20 Deux modèles de détecteur de mouvement élémentaire (a) Technique du gradient (b) Technique de la corrélation (H=filtrage passe-haut; L=filtrage passe-bas) (Synthèse : Buchner 1984).

Le modèle du gradient (fig.A.20a)

Ce procédé (Ullman 1981) repose sur les identités suivantes :

$$dI/dt = (dI/d\phi) \cdot (d\phi/dt) \quad (\text{éq.A.1})$$

$$\omega = -d\phi/dt \quad (\text{éq.A.2})$$

qui conduisent à :

$$\omega = (-dI/dt) / (dI/d\phi) \quad (\text{éq.A.3})$$

L'éq.A.3 montre que la vitesse angulaire instantanée $\omega = -d\phi/dt$ peut être 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.20b)

Ce modèle a été développé dans les années 1950 pour caractériser certaines réactions optomotrices chez l'insecte "chlorophanus" (Hassentein et 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).

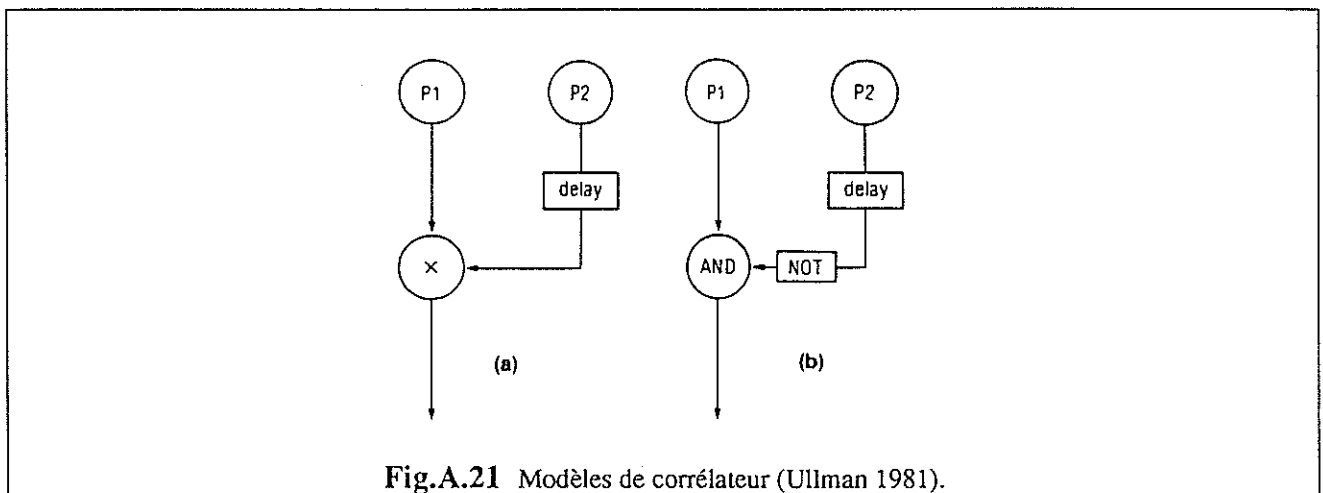


Fig.A.21 Modèles de corrélateur (Ullman 1981).

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

Δt = 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 Δt . En effet, pour ces valeurs données et si l'environnement est constitué de barres verticales de période λ , placées à une distance D il existe des valeurs de λ/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 DEM 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 DEM, 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 DEMs alimentant le neurone H1 de la mouche (cf. §.A.2.3.b). Rappelons quelques travaux récents.

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

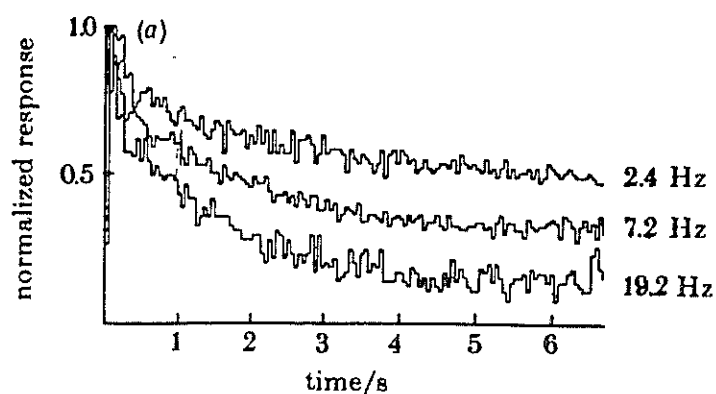


Fig.A.22 Réponse normalisée de H1, au mouvement continu d'une mire rayée, et ce pour trois fréquences différentes.

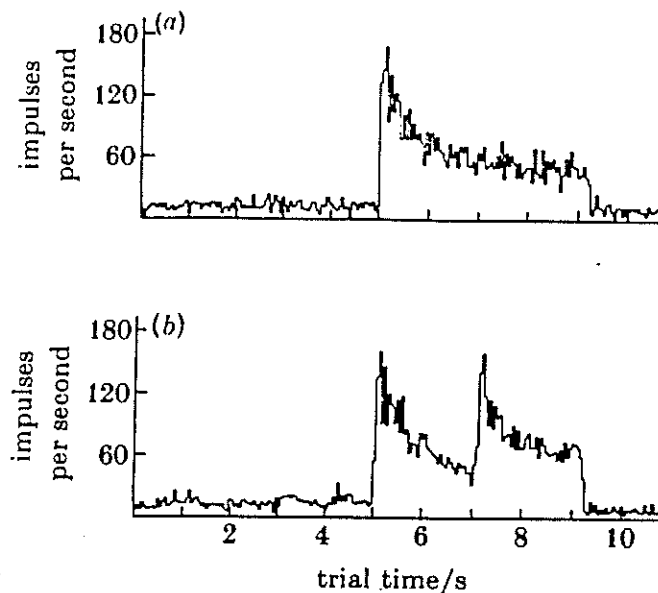


Fig.A.23 (a) Réponse de H1 à un mouvement localisé (b) Au milieu du test la localisation du micro-mouvement est décalée de 5° latéralement.

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 DEM.

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).

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).

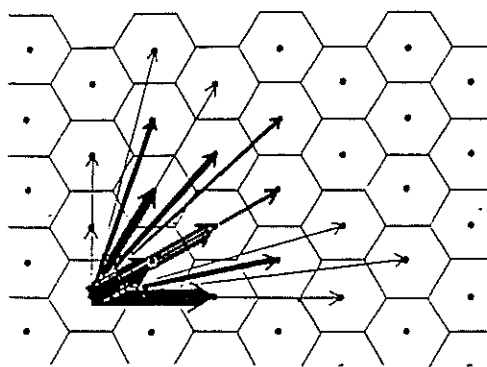


Fig.A.24 L'épaisseur de chaque flèche indique le poids relatif de chaque corrélateur dans la réponse de H1.

A.3.2.c Caractéristiques dynamiques et câblage de chaque DEM

Il est intéressant de se pencher plus en détail sur la constitution propre de chaque DEM 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).

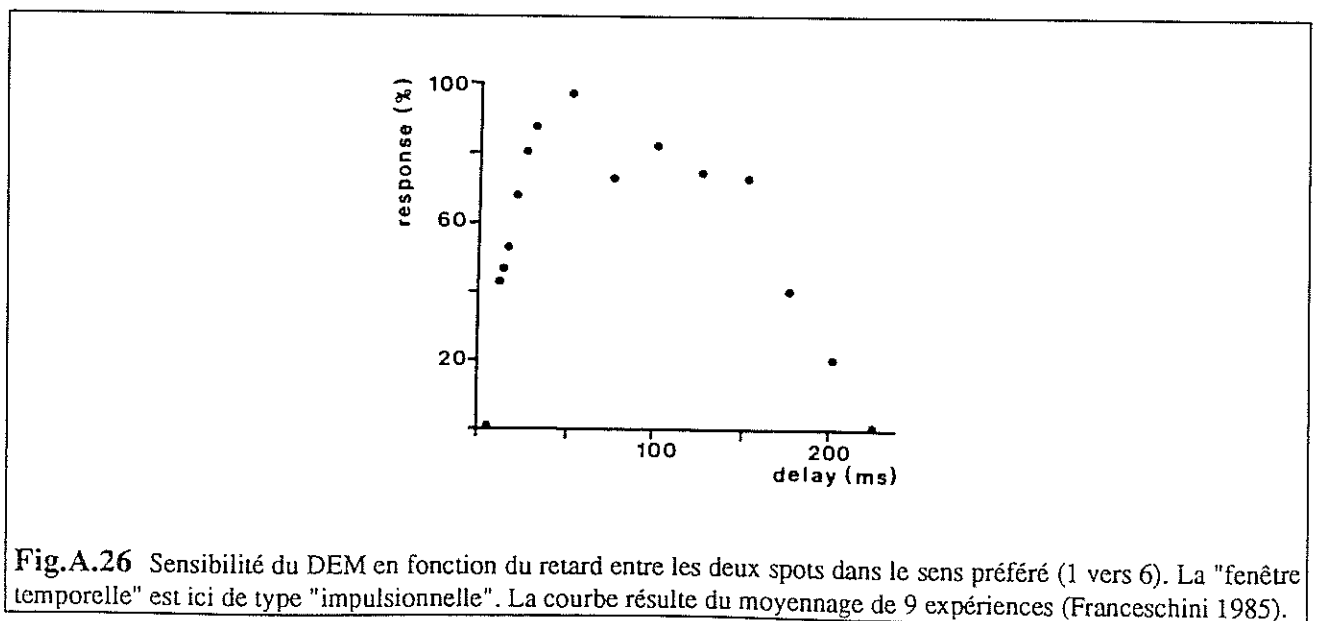
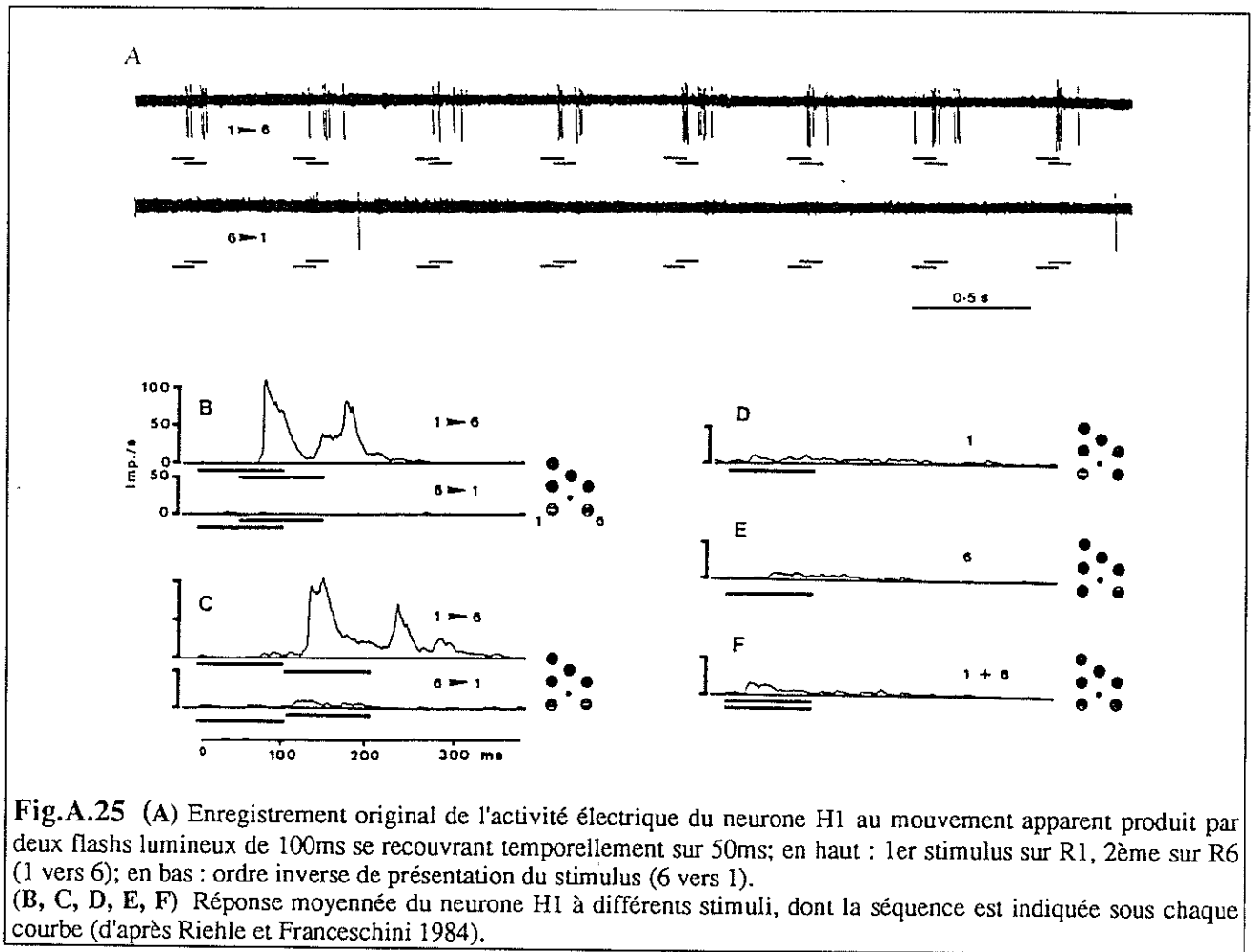
Ce type d'expérimentation a été rendue possible par l'utilisation d'une technique microscopique spéciale permettant de simuler un mouvement par microstimulation séquentielle de deux photorécepteurs adjacents, R1 et R6, d'une même ommatidie (récepteurs visualisés *in vivo*).

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.25a). La séquence opposée, au contraire, n'entraîne pas de réponse (fig.A.25b) ou parfois même une inhibition ON-OFF de la fréquence de repos.

Ce type d'expérience a permis de révéler la directionnalité du détecteur de mouvement au niveau élémentaire et de préciser le décours 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 dérouls 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 DEM (fig.A.26).

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, pp. 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.

Ballard, D.H. (1987)

Eye movement and visual cognition. Proc. of the 1987 Workshop on spatial reasoning and multi sensor fusion. pp. 188-200.

Barlow, H.B., Levick, W.R. (1965)

The mechanism of directionally selective units in rabbit's retina. J. Physiol., 178, pp. 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, pp. 509-525.

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, pp. 7-55

Braddick, O.J. (1974)

A short range process in apparent motion. Vision Res, 14, pp. 519-527.

Braitenberg, V. (1967)

Patterns of projection in the visual system of the fly. I- Retina-lamina projections. Exp. Brain Res., 3, pp. 271-298.

Braitenberg, V. (1984)

Vehicles. MIT Press, Cambridge , Mass. USA.

Brooks, R.A. (1986)

A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE J. Robotics and Automation*, RA-2, pp. 14-24

Brooks, R.A.; Flynn, A.M.; Marill, T. (1987a)

Self calibration of motion and stereo vision for mobile robots. 4th Intern. Symp. on Robotics Research, Santa Cruz, U.S.A.

Brooks, R.A. (1987b)

Autonomous Mobile Robots. In : "AI in the 1980s and beyond", Grimson W.E.L. & Patil R.S. (eds.), the MIT Press, Cambridge, Mass., pp. 343-363.

Brooks, R.A. ; Maes, P. ; Mataric, M.J. ; More, G. (1990)

Lunar base construction robots. *IROS '90*, pp. 389-392.

Buchner, E. (1976)

Elementary movement detectors in an insect visual system. *Biol. Cybern.*, 24, pp. 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.

Burt, P.J. (1988)

Smart sensing. In: *Machine vision, algorithms, architectures and systems*, Freeman, H. (ed.), Academic Press.

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.

Cahn D.F., Phillips S.R. (1975)

Robnav, a range-based robot navigation and obstacle avoidance algorithm. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, pp. 544-551.

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.
- Collett, T.S. (1978)
Peering: a locust behavior pattern for obtaining motion parallax information. J. Exp. Biol., 76, pp. 237-411.
- Connell, J.H. (1989)
A colony architecture for an artificial creature. MIT Artif. Intell. Lab. Techn. Report n°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.
- David, C.T. (1979)
Optomotor control of speed and height by free-flying drosophila. J. Exp. Biol., 82, pp. 389-392.
- DeVoe, R.D., Ockleford, E.M. (1976)
Intracellular responses from cells of the medulla of the fly, *Calliphora erythrocephala*. Biol. Cybern., 23, pp. 13-24.
- De Voe, R.D. (1980)
Movement sensitivities of cells in the fly's medulla. J. comp. Physiol., 138, pp. 93-119.
- Dickmanns, E.D. ; Graefe, V. (1988a)
Dynamic monocular machine vision. Mach. Vis. Applic. 1, pp. 223-240.
- Dickmanns, E.D. ; Graefe, V. (1988b)
Applications of dynamic monocular machine vision. Mach. Vis. Applic. 1, pp. 241-261
- Drumheller, M. (1987)
Mobile robot localization using sonar. IEEE Trans. on PAMI, PAMI-9, N°2
- Duda, R.O. ; Hart, P.E. (1973)
Pattern classification and scene analysis. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York, London, Sydney, Toronto.

Dunlay (1987)

Obstacle avoidance on the autonomous land vehicle using the warp systolic array machine. Proc of SPIE, Mobile Robots II, 852 : pp. 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, pp. 5-23.

Eckert, H. (1980)

Functional properties of the H1-neurone in the third optic ganglion of the blowfly, *phaenicia*. J. comp. Physiol., 135, pp. 29-39.

Elfes, A. (1986)

A sonar-based mapping and navigation system. Proc. IEEE Intern. Conference on Robotics and Automation.

Eriksson, E.S. (1980)

Movement parallax and distance perception in the grasshopper (*phaulacridium vittatum*, Sjöstedt). J. Exp. Biol., 86, pp. 337-340.

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, pp. 517-549.

Franceschini, N., Riehle A., Le Nestour A. (1989)

Directionally selective motion detection by insect neurons

In : "Facets of vision". Stavenga D.G. & Hardie R.C. (eds.), Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 360-390.

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, pp. 182-194.

Giralt, G. (1987)

Les robots mobiles autonomes. Dans : "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, pp. 77-92.

Hardie, R.C. (1977)

Electrophysiological properties of R7 and R8 in the Dipteran Retina. *Z. Naturforsch.*, 32c, pp. 887-889.

Hassenstein, B, Reichardt, W. (1956)

Systemtheoretische Analyse der Zeit-, Reihenfolgen- und Vorzeichenauswertung bei der Bewegungsperzeption des Rüsselkäfers *Chlorophanus*. *Z. Naturforsch.*, 11b, pp. 513-524.

Hausen, K. (1981)

Monocular and binocular computation of motion in the lobula plate of the fly. *Verh. Dtsch. Zool. Ges.*, 1981, pp. 49-70.

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, pp. 629-633.

Hausen, K. (1982)

Motion sensitive interneurons in the optomotor system of the fly. I. The horizontal cells: structure and signals. *Biol. Cybern.*, 45, pp. 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.

Helmholtz, H.L.F. von (1867) Handbuch der physiologischen Optik. Voss, Leipzig.

Hildreth, E.C., Koch, C. (1987)

The analysis of visual motion: from computational theory to neuronal mechanisms. Ann. Rev. Neurosci., 10, pp. 477-533.

Horn, B.K.P. (1986)

Robot vision. MIT press, Cambridge, Mass., U.S.A..

Horn, B.K.P. ; Schunck, B.G. (1981)

Determining optical flow. Artificial Intelligence, 17 (1-3), pp. 185-203.

Horridge, G.A. (1986)

A theory of insect vision: velocity parallax. Proc. R. Soc. London, B., 229, pp. 13-27.

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, pp. 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, pp. 13-22.

Kirschner, W.H.; Srinivasan, M.V. (1989).

Freely flying honeybees use image motion to estimate object distance. *Naturwissenschaften*, 76, pp. 281-282.

Koenderink, J.J.; Doorn, A.J. van (1976)

Local structure of movement parallax of the plane. *J. Opt. Am.*, 66, pp. 717-723.

Kodischek, D.E. (1987)

Exact robot navigation by means of potential functions: some topological considerations. *IEEE Robotics & Automation*, pp.1-6.

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. 457-481.

Lehrer, M.; Srinivasan, M.V.; Zhang, S.W.; Horridge, G.A. (1988)

Motion cues provide the bee's visual world with a third dimension. *Nature (London)*, 332, pp. 352-357.

Lim L.Y. (1968)

A pathfinding algorithm for a myopic robot. *Jet Propulsion Laboratory Techn. Rep. n°32-1288*.

Longuet Higgins, H.C.; Prazdny, K.F. (1980)

The interpretation of a moving retinal image. *Proc. R. Soc. London B*, 208, pp. 385-397.

Loomis, J.M. et Eby, D.W. (1989)

Relative motion parallax and the perception of structure from motion. *IEEE International Workshop on visual motion*, pp. 204-211.

Lozano-Perez, R. (1983)

Spatial planning, A configuration space approach. *IEEE Trans. Computers* C-32 (2).

- Lumelsky V.J. et Stepanov A.A. (1987)
Path planning strategies for a point mobile automaton moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape. *Algorithmica*, Vol. 2, pp. 403-430.
- 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, pp. 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, pp. 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 n°1228.
- 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, pp. 105-138.
- Mimura, K. (1972)
Neural mechanisms, subserving directional selectivity of movement in the optic lobe of the fly. *J. comp. Physiol.* 80, pp. 409-437.
- Moravec, H.P. (1983)
The Stanford Cart and the CMU Rover. *Proc. IEEE* 71, pp. 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. Hatan (ed.), World Scientific, pp. 459-483.

Nakayama, K. (1985)

Biological image motion processing: a review. *Vision Res.*, 25, pp. 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.*

Noborio, H.; Wasumi, S.; Fukuda, S.; Arimoto, S. (1989)

A potential approach for a point mobile robot on an implicit potential field without the generation of local minima. *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems.* 89., pp. 70-77.

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, pp. 311-438.

Prazdny, K. (1980)

Egomotion and relative depth map from optical flow. *Biol. Cybern.* 36, pp. 87-102.

Preiss, R. (1987)

Motion parallax and figural properties of depth control flight speed in an insect. *Biol. Cybern.*, 57, pp. 1-19.

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, pp. 390-394.

Sandini G., Dario P. (1989)

Space-variant sensing in active vision. In : *Robotics Research, the fifth international symposium. H. Miura and S. Arimoto (eds), M.I.T. Press, pp. 75-84.*

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.

Skifstad K., Jain R. (1989)

Range estimation from intensity gradient analysis. Machine vision and application, Vol. 2, pp. 81-102.

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, pp. 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-Cenoz, O., Melamed, J. (1966)

Compound eye of dipterans: anatomical basis for integration. An electron microscope study. J. Ultrastruct. Res., 16, pp. 395-398.

Udupa, S.M. (1977)

Collision detection and avoidance in computer controlled manipulators. Proc. I.J.C.A.I. 5, MIT, pp. 737-748.

Ullman, S; (1981)

Analysis of visual motion by biological and computer systems. *Computer*, August, pp. 58-69.

Ullman, S. (1986)

Artificial intelligence and the brain: computational studies of the visual system. *Ann. rev. Neurosci.*, 9, pp. 1-26.

Van de Grind W.A. (1990)

Smart mechanisms for the visual evaluation and control of self-motion. In : *Perception & control of self-motion*. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Hillsdale, New Jersey, Hove and London, pp. 357-398.

Van Hateren, J.H. (1987)

Neural superposition and oscillations in the eye of the blowfly. *J. comp. Physiol.*, 161, pp. 849-855.

Wagner, H. (1986)

Flight performance and visual control of flight of the free-flying housefly: 1 organization of the flight motor. *Phil. Trans. R. Soc. London, B* 312, pp. 527-551.

Warren, R. ; Wertheim, A.H. (1990)

Perception & control of self-motion. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Hillsdale, New Jersey, Hove and London.

Whiteside, T.C.D. ; Samuel, G.D. (1970)

Blur zone. *Nature* 225, pp. 94-95.

Yap, C.K. (1986). Algorithmic motion planning. In: *Advances in robotics, algorithmic and geometric aspect of robotics*. Vol. 1. J.T. Schwartz, C.K. Yap (eds). Lawrence Erlbaum, Hillsdale New Jersey, London, pp. 95-143.

Jean-Marc PICHON
Doctoral Thesis 1991

ON-BOARD VISUAL GUIDANCE SYSTEM FOR AN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT WITH A BIONIC DESIGN

Part 1 : Basic principles and robot simulation

In the present study a simple but fully developed on-board visuo-motor system is presented for steering an autonomous mobile robot through complex unexplored surroundings. This system is partly based on investigations carried out on a living creature, the fly, and involves a feedback loop consisting of two practically non-dissociable parallel networks : an Elementary Movement Detector (EMD) network on the sensory side and a network implementing an obstacle avoidance algorithm on the motor side.

The EMD network constitutes the robot's main eye (EMD-eye). It builds up a composite picture of the environment by sampling the 360° azimuthal field with a low angular resolution (only 120 optical axes). Each EMD measures the relative angular velocity of contrast points in the environment and deduces the radial distance to these points on a stereo-motion principle. The robot effects translation steps during which the EMD-eye instantaneously detects any obstacles on its course.

Obstacle avoidance is controlled on-line by a second parallel network which, using a local anticollision strategy, integrates the EMD outputs into a single signal which drives the robot motors. This network works on the basis of a safety margin on which the robot's minimum detection range depends, and which is calculated in such a way as to compensate for any measurement errors introduced by the EMDs. Other navigation aids can be added without affecting the design of the basic module formed by the two networks. Here for example, the robot has been equipped to perform a target-pursuit task in addition to obstacle avoidance.

In the present thesis, the results have been validated by a series of simulations where all the features of the robot's actual architecture have been faithfully transposed point by point (from the optics to the motors). These simulations provide a model which accurately predicts the robot's behaviour. The design of the prototype is described in detail elsewhere (C. Blanes, Doctoral thesis, 1991).

Keywords :

Mobile robotics, visual motion detection, parallel signal processing, reactive steering, obstacle avoidance, neuronal networks, bionics.

Jean-Marc PICHON

Thèse de Doctorat de l'INPG (Spécialité : Signal Image Parole)

12 Juillet 1991

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

1ère partie : Principes et simulation du robot

Ce travail décrit un système visuo-moteur simple mais complet, capable d'assurer le guidage bas-niveau d'un robot mobile autonome dans un environnement complexe et inexploré. Ce système est en partie inspiré du modèle vivant de la mouche et repose sur une boucle réactive formée exclusivement de deux réseaux parallèles presque indissociables : un réseau de Détecteurs Élémentaires de Mouvement (DEM) côté sensoriel et un réseau implémentant un algorithme anticollision côté moteur.

Le réseau de DEMs constitue l'oeil principal du robot (oeil-DEM). Il fait appel à une optique composée et échantillonne les 360° du plan azimutal avec une faible résolution angulaire (seulement 120 axes optiques). Chaque DEM mesure la vitesse angulaire relative des points de contraste de l'environnement et en déduit leur distance radiale selon un principe de stéréo-mouvement. Le robot effectue des translations élémentaires pendant lesquelles l'oeil-DEM fournit une représentation instantanée des obstacles.

L'évitement d'obstacles est géré en temps réel par un second réseau parallèle qui à partir d'un critère local d'anticollision, combine les sorties des DEMs en un signal unique commandant les moteurs du robot. Ce réseau anticollision repose sur un périmètre de sécurité qui détermine l'anticipation minimale du robot et qui est calculé de manière à compenser les erreurs de mesures inhérentes aux DEMs. D'autres modules de navigation peuvent être ajoutés sans que cela affecte la boucle réactive de base constituée par l'ensemble des deux réseaux. Ici par exemple une tâche de poursuite de cible est associée à l'anticollision.

Dans ce mémoire, les résultats sont validés par un ensemble de simulations, qui respectent point par point l'architecture hardware du robot réel (de l'optique aux moteurs) et constituent un modèle précis du comportement attendu pour ce dernier. La réalisation proprement dite du prototype est présentée dans une 2ème partie (Thèse C. Blanes, 1991).

Mots clefs :

robotique mobile, vision du mouvement, traitement parallèle du signal, guidage réactif, évitement d'obstacles, réseaux de neurones, bionique.
