

UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE II

N-FRANCESCHINI

MEMOIRE DE RECHERCHE

présenté en vue de l'obtention du

DEA de NEUROSCIENCES

Option: Neurosciences comportementales et cognitives

TITRE DU MEMOIRE

APPAREIL VISUEL ELEMENTAIRE POUR LA NAVIGATION

"A VUE" D'UN ROBOT MOBILE AUTONOME

par BLANES Christian

Responsable du Stage:

FRANCESCHINI Nicolas

Directeur de Recherche CNRS

Laboratoire:

Neurocybernétique, LNB 3

Laboratoire de Neurobiologie

C.N.R.S. Marseille

SESSION DE JUIN 1986

U N I V E R S I T E D ' A I X - M A R S E I L L E I I

MEMOIRE DE RECHERCHE

présenté en vue de l'obtention du

DEA de NEUROSCIENCES

Option: Neurosciences comportementales et cognitives

TITRE DU MEMOIRE

APPAREIL VISUEL ELEMENTAIRE POUR LA NAVIGATION
"A VUE" D'UN ROBOT MOBILE AUTONOME

par BLANES Christian

Responsable du Stage:

FRANCESCHINI Nicolas
Directeur de Recherche CNRS

Laboratoire:
Neurocybernétique, LNB 3
Laboratoire de Neurobiologie
C.N.R.S. Marseille

SESSION DE JUIN 1986

TABLE DES MATIERES

Résumé

I. Introduction

I.1. Présentation du projet

I.2. But du projet

II. Approche et description de l'objectif du projet

II.1. Mécanisme et importance de la perception du mouvement
chez les animaux

II.2. Travaux sur les détecteurs de mouvements animaux réalisés
dans ce laboratoire

II.3. Détecteur de mouvement passif et sans contact

III. Vision du mobile

III.1. Système de vision retenu

III.2. Champ de vision du mobile

IV. Description du système de contrôle de cap

IV.1. Calcul de la vitesse mesurée par un détecteur élémentaire
de mouvement

IV.2. Expression de la vitesse mesurée suivant la position des
photodiodes sur la barrette

IV.3. Calcul des différents paramètres du détecteur en tenant
compte des caractéristiques de la barrette réellement utilisée

IV.4. Utilisation du contrôle de cap pour le guidage

IV.5. Synoptique du contrôle de cap

V. Contrôle anti-collision

V.1. Calcul de la vitesse d'expansion des bords de l'obstacle

V.2. Utilisation du contrôle d'expansion pour le guidage

V.3. Synoptique du contrôle d'expansion

VI. Réalisation du circuit électronique
du détecteur élémentaire de mouvement (D.E.M)

- VI.1. Description globale du circuit
- VI.2. Choix des photodiodes
- VI.3. Amplificateur d'entrée
- VI.4. Monostable logique
- VI.5. Mise en forme
- VI.6. Multiplication

VII. Réflexions et problèmes soulevés

VIII. Conclusion

Annexe

Bibliographie

RESUME

Cette étude fait partie d'un projet à longue échéance qui se propose de réaliser un robot mobile autonome doté d'un système de vision reposant sur un traitement de signal similaire à celui que l'on rencontre dans l'oeil composé de la mouche.

La navigation "à vue" de cet engin sera régie par deux systèmes de contrôle inspirés directement d'études faites sur le comportement optomoteur et la réaction d'atterrissage de la mouche.

La pièce maîtresse sera un appareil visuel appelé: détecteur élémentaire de mouvement (D.E.M.). Il a fait l'objet de nombreuses recherches électrophysiologiques, notamment dans le laboratoire de Monsieur FRANCESCHINI.

Une approche interdisciplinaire a permis d'étudier et de réaliser un circuit électronique capable d'évaluer la vitesse d'objets se déplaçant dans un sens défini.

Ces travaux ont suscité de nombreuses discussions. Il est certain que lors de la réalisation du système complet de vision, de nouvelles voies de recherches naîtront dans le domaine des Neurosciences.

I. INTRODUCTION

I.1 Présentation du projet

Ce projet a été mené au sein de l'équipe autonome de Neurocybernétique (N. FRANCESCHINI) du CNRS (Chemin Joseph-Aiguier) de Marseille. Grâce à une approche bionique des processus visuels chez la mouche, nous avons réalisé un détecteur de mouvement passif et sans contact, qui sera un élément clé dans la conception d'un mobile susceptible de se déplacer de manière autonome et de naviguer "à vue" dans un environnement optique.

Cette étude vise deux objectifs:

- copier un processus naturel de vision en utilisant une autre technologie;
- essayer de mettre en évidence certaines difficultés auxquelles a dû faire face la nature et ceci afin d'essayer de mieux comprendre certains systèmes neuroniques et découvrir de nouvelles voies de recherches neurophysiologiques.

Cette approche pluridisciplinaire suit tout à fait un courant actuel qui, comme on l'a vu lors des IIIe Journées Neurosciences et Sciences de l'Ingénieur (mai 1986), rassemble de plus en plus de personnes provenant de formations diverses. En effet, nous avons retenu que la simulation de réseaux neuroniques, le traitement parallèle entre autres, suscitent un vif intérêt dans le milieu de la recherche.

I.2. But du projet

Le but de ce projet a été de réaliser un détecteur de mouvement qui sera utilisé pour le guidage visuel d'un mobile susceptible de se déplacer à vitesse constante dans un environnement optique. Son comportement optomoteur sera régi par les deux contraintes suivantes :

- 1) le mobile devra se maintenir au milieu d'un couloir indépendamment du cheminement de celui-ci, et indépendamment de sa largeur dans une certaine mesure (contrôle du cap).

2) Le mobile devra s'arrêter à une distance fixe d'un obstacle (contrôle anti-collision).

La première fonction rappelle la réaction optomotrice classique de la mouche, réaction qui lui permet par exemple de maintenir son cap dans son environnement visuel. La vitesse de déplacement du mobile étant constante, nous pouvons déterminer grâce à des microdétecteurs élémentaires de mouvement la différence des vitesses angulaires obtenues sur les senseurs gauches et droits et corriger, à partir de ce signal d'erreur, l'évolution du mobile. La deuxième fonction fait référence à la propriété d'expansion visuelle d'un objet, expansion liée à son rapprochement. C'est cette propriété qui déclenche chez la mouche la réaction d'atterrissage. A l'approche d'un objet, la vitesse angulaire liée au mouvement de ses extrémités augmente rapidement lorsqu'on arrive très près de celui-ci à vitesse constante. Dans ce cas encore, la vitesse angulaire qui est mesurée par le détecteur de mouvement est une grandeur suffisante et point n'est besoin de déterminer une vitesse absolue.

Nous voyons donc l'importance du détecteur élémentaire de mouvement au niveau des deux contrôles (cap et anti-collision) utilisés pour le guidage du mobile. Etant donnée la multiplication nécessaire de ce détecteur élémentaire, il fallait s'efforcer d'en réaliser le circuit de manière la plus performante qui soit, avec un souci de minimisation du nombre, du volume et du coût des composants.

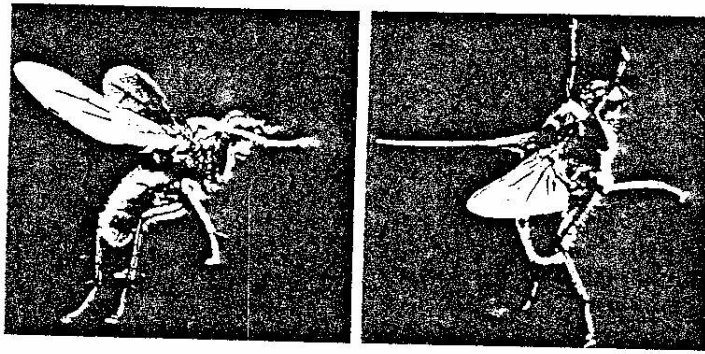
II. APPROCHE ET DESCRIPTION DE L'OBJECTIF DU PROJET

II.1 Mécanisme et importance de la perception du mouvement chez les animaux

Lorsque nous marchons, notre perception visuelle du mouvement relatif contribue grandement à notre stabilisation dynamique. De nombreux animaux, y compris les insectes, utilisent ce modèle de stabilisation à point de départ visuel, rendu possible par un câblage particulier de leur système nerveux.

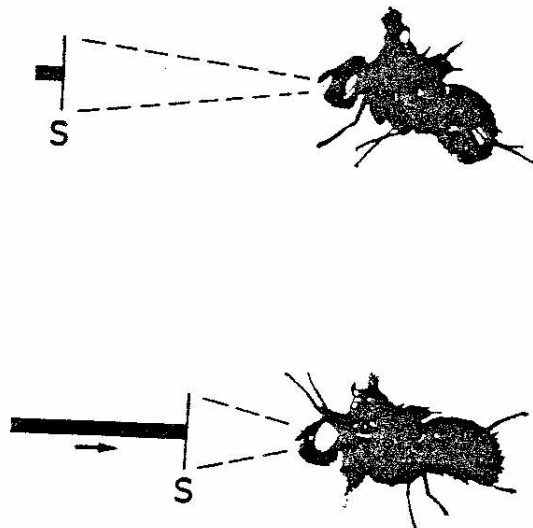
De nombreuses expériences ont été réalisées pour mettre en évidence ce phénomène. Une expérience typique consiste à placer un insecte à l'intérieur d'un tambour tournant, sur les parois duquel on a disposé une mire (bandes noires sur fond blanc). Lorsqu'on fait tourner ce tambour, l'animal cherche apparemment à compenser la rotation apparente de son environnement visuel en essayant de le suivre avec ses yeux, sa tête ou l'ensemble de son corps. Cette "réponse" est appelée la réaction optomotrice. Elle souligne avant tout la faculté qu'a le système visuel des animaux de détecter le mouvement et l'on sait depuis 25 ans maintenant que le système nerveux câblé dans l'oeil de maints animaux -vertébrés ou invertébrés- possède de véritables neurones détecteurs de mouvement qui répondent par une fréquence élevée de leurs potentiels d'action (impulsions nerveuses) lorsqu'un objet est déplacé dans un sens particulier dans leur champ visuel. Nous retiendrons ce résultat qui sera exploité pour le guidage du mobile dans un plan x, y.

Un tout autre type de réaction à point de départ visuel est constitué par la "réaction d'atterrissage" des insectes volants (Cf. BRAITENBERG et TADDEI FERRETTI, 1966).



D'après DALTON (1975)

La photo ci-dessus illustre ce phénomène. On voit à gauche une mouche en vol normal, à droite prête à se poser. La différence d'attitude apparaît dans le positionnement des pattes antérieures. A l'approche d'un objet (cas de la Fig. de droite, la mouche lance ses pattes antérieures en avant.



D'après ECKERT et HAMDORF (1980)

Ce genre de réaction peut s'étudier sur l'animal en vol au point fixe, la mouche étant suspendue par le thorax (sa tête elle-même fixée au thorax par une goutte de cire). On peut aussi simuler l'approche d'un objet, en plaçant devant l'animal un disque en rotation sur lequel a été dessinée une spirale (arithmétique) noire sur fond blanc. Face à une telle spirale en rotation, l'homme lui-même a une vive impression de rapprochement (expansion), ou d'éloignement (contraction) selon le sens de rotation.

Les réactions de la mouche montrent que :

- a) on déclenche la réaction d'atterrissage uniquement lorsque la spirale tourne dans le sens correspondant à une expansion de l'image mais jamais pour la rotation inverse.
- b) cette réaction est obtenue à partir d'une certaine vitesse de rotation. Un seuil apparaît, qui peut s'exprimer en fonction de la vitesse angulaire de l'expansion du motif vu par l'animal. Par ailleurs, on a constaté que si l'on augmente la distance entre l'animal et la spirale, on obtient la réaction pour des vitesses de rotation du tambour ou des largeurs de la spirale plus importantes.
- c) on a aussi observé une dépendance de cette réaction en fonction du niveau d'illumination : une diminution brusque du flux lumineux peut déclencher la réaction d'atterrissage.

En conclusion, il est intéressant de voir que la réaction d'atterrissage peut dépendre de plusieurs paramètres tels que le contraste du motif, l'illumination, la vitesse angulaire de l'expansion, la distance entre l'animal et le motif...

Ces considérations, nous ont amené à préciser mathématiquement les phénomènes liés à la détection du mouvement relatif à l'expansion. (Cf. Chapitre V). De nombreuses études ont mis en évidence le rôle important de la vision du mouvement pour la locomotion (Cf. GIBSON, 1973).

Avec Mr. Franceschini, nous sommes donc partis de résultats obtenus au cours d'expériences sur la vision des animaux (en particulier de la mouche) et leur analyse nous a poussés à réaliser un circuit électronique fonctionnant suivant des principes analogues.

Ainsi, dans l'étude qui suit, la détection du mouvement met en oeuvre un traitement de signal sensiblement voisin de celui qui a été dévoilé récemment dans l'oeil composé de la mouche, à la suite d'enregistrements électriques (par microélectrode) de l'activité de certains neurones détecteurs de mouvements.

II.2. Travaux sur les détecteurs de mouvement animaux réalisés dans ce laboratoire.

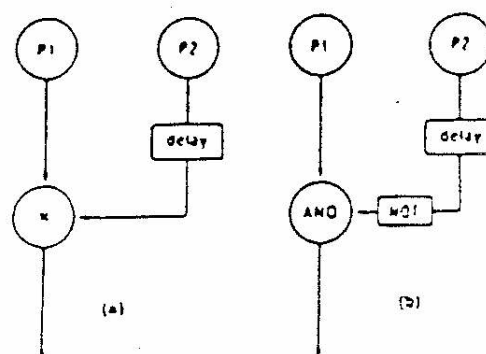
La compréhension du mécanisme de détection du mouvement d'un objet par l'oeil d'un animal faisant l'objet des études réalisées au sein de ce laboratoire, nous avons recherché quels étaient actuellement les divers schémas de principe proposés.

D'après les travaux de S. ULLMAN (1983), il a été établi qu'il existait deux schémas de principe permettant d'évaluer le mouvement chez un animal, ceux qui nécessitent la reconnaissance préalable de motifs élémentaires et ceux qui reposent sur des variations d'intensité lumineuse. Parmi ces derniers, ceux qui utilisent des méthodes de corrélation des informations provenant de deux récepteurs ont été envisagés comme structure fonctionnelle élémentaire des systèmes physiologiques.

Schéma de la détection du mouvement par comparaison retardée.

P1 et P2 sont des détecteurs qui répondent transitoirement à un créneau lumineux. (a) Quand un spot se déplace vers la gauche à la vitesse appropriée, les réponses de P1 et P2 coïncident, produisant une réponse positive sur la sortie commune.

(b) Schéma par véto. Un mouvement de P2 vers P1 inhibe la réponse continue de P1 puisque la réponse retardée de P2 annule celle de P1 (d'après ULLMAN, 1981).



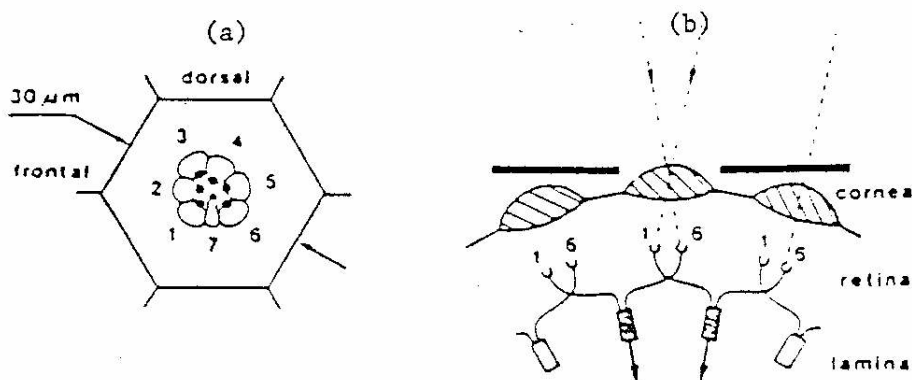
La manière dont ce principe peut être réalisé dans l'oeil d'un animal a été étudiée par N. FRANCESCHINI et ses collaborateurs (A. RIEHLE, A. LE NESTOUR) qui ont utilisé comme modèle expérimental l'oeil composé de la mouche domestique. Ces auteurs ont réussi à stimuler sélectivement deux photorécepteurs adjacents de la mosaïque rétinienne (simulant ainsi un "micromouvement apparent") et ont observé alors une forte réponse à caractère directionnel dans un neurone sensible au mouvement (Cf. Annexe).

A ce jour, cette expérience est la seule étude électrophysiologique à avoir été faite chez un animal, utilisant une technique de microstimulation de photorécepteurs identifiés in vivo.

associée à des enregistrements unitaires de l'activité électrique d'un neurone sensible au mouvement, lui-même identifié in vivo.

Ce genre d'expérience a été fait sur l'animal vivant et dans des conditions physiologiques. Une mouche est fixée sur un support et, sous contrôle visuel à l'aide d'un "microscope" très spécial (utilisant entre autres l'une des facettes -de diamètre $30\mu\text{m}$ - comme "objectif principal"), on approche une microélectrode du neurone H1 désiré. La technologie actuelle et la très bonne connaissance que l'on a des neurones sensibles au mouvement chez la mouche permettent de retrouver chaque jour le même neurone chez des individus différents. Ceci est très intéressant car on peut ainsi répéter les expériences en contrôlant le signal d'entrée et analysant toujours le même signal de sortie, cas hélas très difficile à réaliser dans le système nerveux des vertébrés.

Un résultat essentiel de ces expériences a été la mise en évidence d'une réponse ON-OFF qui s'établit lorsque la séquence des deux spots lumineux correspond à la direction et au sens préféré du neurone. La séquence opposée au contraire, n'entraîne pas de réponse ou parfois une inhibition ON-OFF de la fréquence de repos du neurone. Exprimée en termes de mécanisme, la conclusion est que la discrimination de séquence sous-jacente à la détection du mouvement dans le système nerveux de la mouche met en jeu un contrôle paramétrique sur une voie ON-OFF.

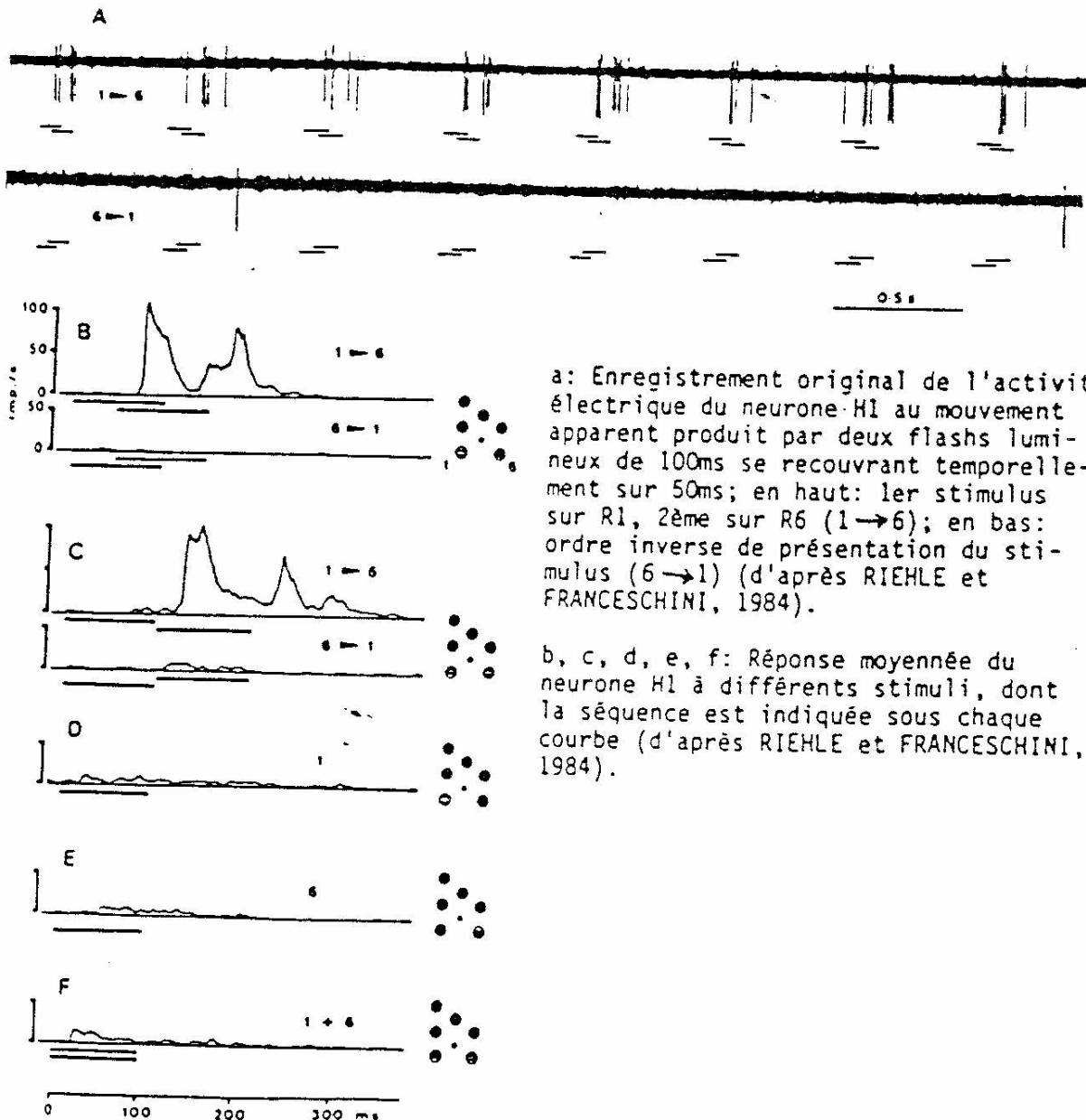


a) Structure (schématique) d'une ommatidie chez la mouche montrant sept cellules photoréceptrices dont deux sont stimulées séquentiellement par un microspot lumineux de diamètre $1\mu\text{m}$.

b) Coupe longitudinale (schématique) à travers trois ommatidies et trois "cartouches" sous-jacentes dans lesquelles se projettent avec grande précision les axones des cellules photoréceptrices.

(D'après RIEHLE et FRANCESCHINI, 1984).

Cette expérience a donc mis en évidence la directionnalité d'un détecteur de mouvement à un niveau tout à fait élémentaire et permis de préciser le déroulement temporel de sa réponse en terme de fréquence instantanée du neurone.



a: Enregistrement original de l'activité électrique du neurone H1 au mouvement apparent produit par deux flashes lumineux de 100ms se recouvrant temporellement sur 50ms; en haut: 1er stimulus sur R1, 2ème sur R6 (1 → 6); en bas: ordre inverse de présentation du stimulus (6 → 1) (d'après RIEHLE et FRANCESCHINI, 1984).

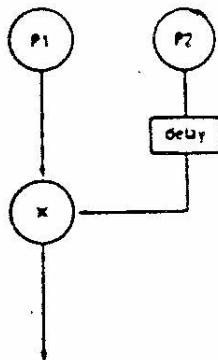
b, c, d, e, f: Réponse moyennée du neurone H1 à différents stimuli, dont la séquence est indiquée sous chaque courbe (d'après RIEHLE et FRANCESCHINI, 1984).

II.3. Détecteur de mouvement passif et sans contact

Principe

Le principe général du micro-détecteur de mouvement directionnel que nous avons conçu et réalisé avec M. FRANCESCHINI est celui du "corrélateur", mis en évidence dans l'oeil d'insecte voici 30 ans par Reichardt et ses collaborateurs, à la suite d'analyses fines du comportement optomoteur de ces animaux (REICHARDT, 1961).

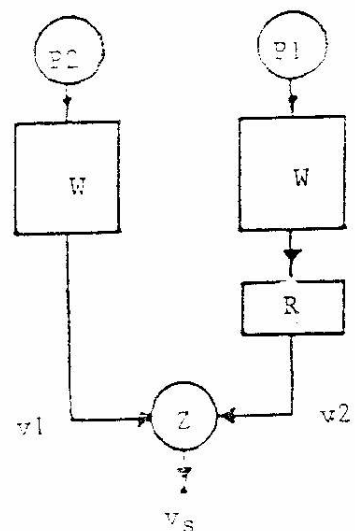
Deux entrées au minimum, un retard sur l'une d'elles et une opération de multiplication des signaux constituent l'essentiel du principe, comme l'ont rappelé POGGIO et REICHARDT (1976) et ULLMAN (1981).



Nous allons expliquer par un schéma et un chronogramme la propriété de directionalité de l'appareil.

PI, P2 : photorécepteurs
W : boîte de traitement du signal
R : boîte simulant un retard
Z : boîte réalisant la fonction
suivante :

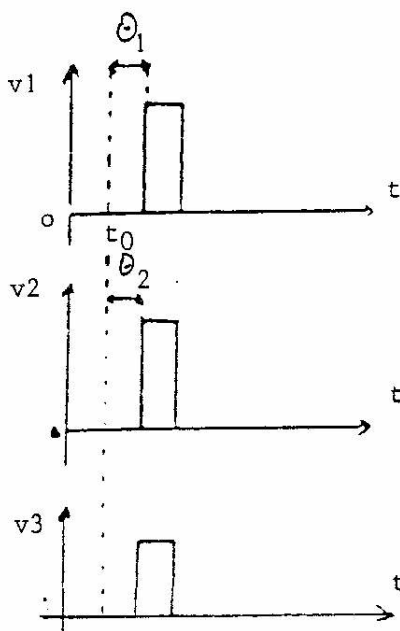
- sortie V_s nulle quand les 2 signaux n'arrivent pas en même temps ;
- sortie V_s proportionnelle à $(v_1.v_2)$ lorsque les deux signaux v_1 et v_2 arrivent en



même temps.

Suivant le sens de déplacement de l'objet, nous aurons détection ou non. Deux cas de déplacement sont à envisager :

1°) Dans la direction préférée : Supposons qu'à l'instant t_0 un objet passe devant P1 en se dirigeant vers P2.

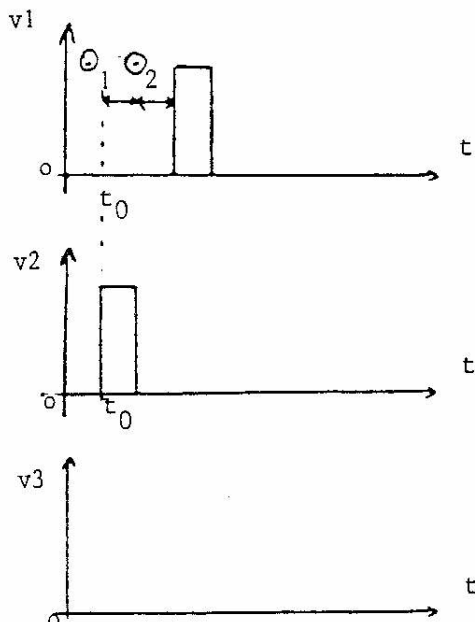


θ_1 : retard simulé par R

θ_2 : temps nécessaire à l'objet pour parcourir la distance D séparant P1 et P2

Nous nous apercevons que pour avoir un signal non nul en sortie il faut que : $\theta_1 = \theta_2 = \theta_0$

2°) Dans la direction non préférée : Supposons qu'à l'instant t_0 un objet passe devant P2 en se dirigeant vers P1.



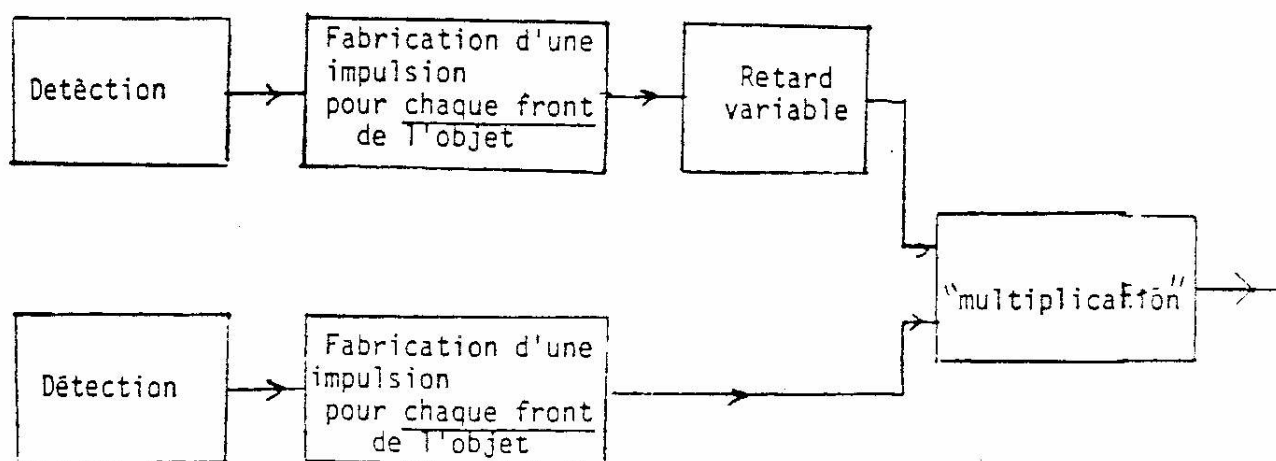
θ_1 et θ_2 définis précédemment

Nous voyons que dans ce cas la sortie v_s est bien nulle.

Synoptique de principe

Le synoptique a été fait à partir du cahier des charges que l'on s'était fixé, à savoir :

- obtenir une information sur la vitesse de l'objet en mouvement pour chaque front (début et fin) de celui-ci, et uniquement dans un sens de déplacement
- faire fonctionner ce détecteur dans une certaine gamme de vitesses et de luminances
- immuniser la mesure vis à vis du contraste (objets clairs sur fond sombre ou sombres sur fond clair)
- immuniser l'appareil vis à vis d'un bruit synchrone (par exemple une lumière papillotante présentée simultanément aux deux capteurs d'entrée)
- réaliser un détecteur à faible coût.



III. VISION DU MOBILE

La conception de ce système de vision, les calculs relatifs au système de contrôle de cap et au système de contrôle anti-collision ont fait l'objet d'une étude menée en 1985 au sein de ce même laboratoire, dans le cadre du projet de fin d'études de M. OUFAR et de moi-même, en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille.

Pour bien situer le contexte du présent travail, nous rappelons aux Chapitres IV et V ci-dessous les résultats obtenus alors.

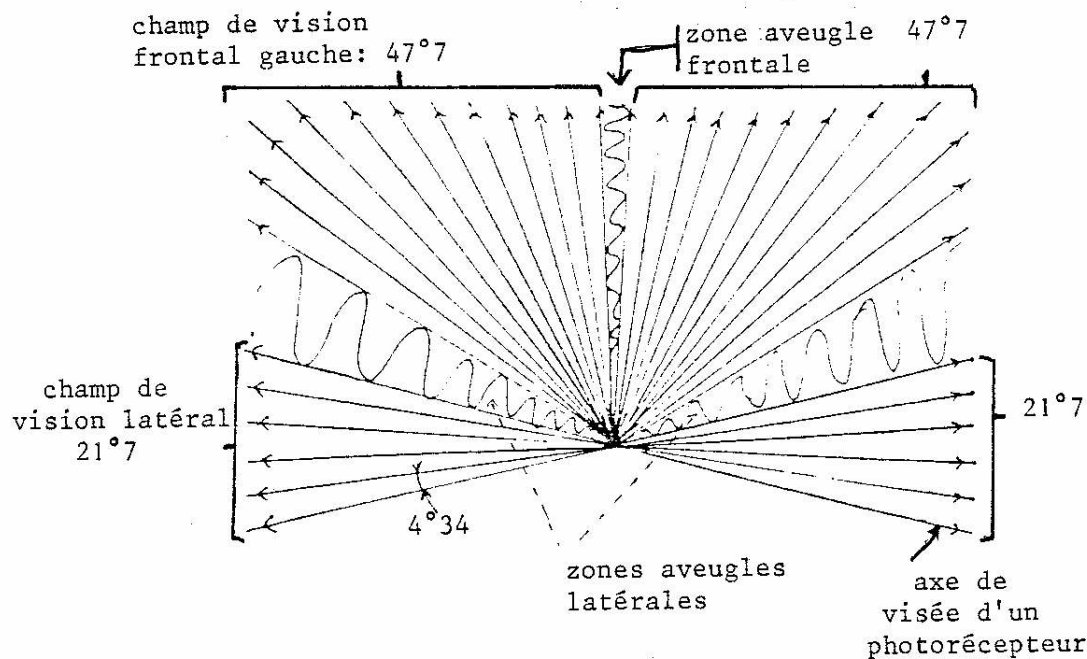
III.1. Système de vision retenu

Nous avons eu l'idée, avec M. FRANCESCHINI, de réaliser un système de vision basé sur un traitement parallèle direct. Le type de vision exploité repose exclusivement sur la détection du mouvement relatif entre le mobile et son entourage optiquement structuré. Elle devrait permettre d'effectuer le guidage automatique d'un mobile. L'intérêt d'un tel procédé de guidage réside surtout dans sa simplicité. Toute l'étude gravite autour de microdétecteurs élémentaires de mouvement, qui sont associés de façon judicieuse pour réaliser différentes fonctions visuo-motrices. Cette approche n'est pas sans rappeler, de manière beaucoup plus simple (et meilleur marché!) une des solutions d'avenir concernant la vision artificielle proposée récemment par des chercheurs de l'Université de Stanford. Celle-ci consiste à utiliser, associé à une caméra vidéo, un étage de traitement de l'image utilisant grâce à un circuit VLSI approprié, un processeur élémentaire pour chaque élément de l'image. Ceci permet d'accélérer notablement le processus de reconnaissance (2500 fois) et de se rapprocher de la vision humaine (DEJEAN, 1983). Toutefois, ce système de reconnaissance nécessite une technologie sophistiquée et complexe. Notre approche du traitement parallèle pour réaliser un système visuel n'a à notre connaissance jamais été exploitée de manière aussi élémentaire et avec un coût aussi bas.

III.2. Champ de vision

Le système de vision du mobile possède quatre yeux du type camérulaire présentant un champ visuel total de 140 degrés:

- deux yeux frontaux ayant chacun un champ de 48 degrés pour le contrôle anti-collision
- deux yeux latéraux ayant chacun un champ de 22 degrés pour le contrôle de cap.



Le choix des éléments permettant de réaliser un tel système est dicté par plusieurs contraintes résultant des diverses fonctions visuelles à réaliser:

1. champ frontal total d'environ 90°
2. champ latéral de 20 à 30° de chaque côté de la ligne médiane.

L'angle entre deux photodiodes est choisi inférieur à 6° (angle interommatidial chez la mouche: $\theta = 2^\circ$). Pour couvrir de tels angles, l'utilisation de barrettes de photodiodes s'imposait afin de rendre minimale la place occupée par ces dernières. Pour focaliser les images des objets sur les photorécepteurs, nous devons employer des lentilles légères et de courte distance focale afin de minimiser le poids et l'encombrement. Nous avons choisi des objectifs miniatures PENTAX, ultra légers (13g) de distance focale 25mm. Malgré une construction optique complexe (6 lentilles en 3 groupes) ces objectifs appartiennent au domaine "grand public" et sont, par conséquent, d'un prix abordable. Liées au choix de l'objectif, nous

avons sélectionné parmi les barrettes de photodiodes celles qui permettaient d'obéir au choix concernant l'angle de résolution. Nous avons choisi des barrettes monolithiques de photodiodes PIN, de fabrication très récente, proposées par la firme UDT. La distance entre les centres de 2 photodiodes adjacentes de 1,9mm (0,075 pouce) permettait, compte tenu de l'objectif considéré, d'avoir un angle de résolution assez fin $\Theta = \text{Arctg } 1,9/f$ avec $f=25\text{mm}$, $\Theta = 4,34^\circ$. Cet angle est à peu près équivalent à l'angle interommatidial chez la Drosophile ($\Theta = 5^\circ$). Il est évidemment beaucoup plus élevé que l'angle interrcepteur chez l'homme (1 minute d'angle entre 2 cônes fovéaux).

Pour chaque barrette, le nombre d'éléments photosensibles était imposé par les contraintes sur le champ de vision (frontal ou latéral). Nous avons donc choisi 2 barrettes de 12 photodiodes pour le contrôle frontal anti-collision et 1 barrette de 6 photodiodes de chaque côté pour le contrôle latéral.

Le champ frontal couvert est ainsi de $11 \times 4,34^\circ = 47,5^\circ$ pour chaque oeil frontal ce qui est tout à fait compatible avec le champ optique nominal (47°) des objectifs utilisés. Le champ frontal total est de $2 \times 47,5^\circ = 95^\circ$, c'est à dire beaucoup plus élevé que celui que fournirait un objectif "grand angle" unique. Le champ latéral est de: $5 \times 4,34 = 21,7^\circ$.

IV. DESCRIPTION DU SYSTEME DE CONTROLE DE CAP

Pour le contrôle de cap, on exploite le fait que le capteur mesure une vitesse angulaire. Installé latéralement sur un véhicule avançant à une vitesse donnée, le capteur délivre donc un signal de sortie inversement proportionnel à la distance séparant le mobile du mur. Ainsi, afin de réaliser le contrôle de cap pour un mobile se déplaçant dans un couloir, on met à profit la différence relative des vitesses angulaires détectées par les capteurs latéraux situés de part et d'autre du mobile lorsque celui-ci s'écarte de la ligne médiane du couloir. Cette "méthode de zéro" permet de contrôler facilement l'évolution du mobile en agissant sur la direction. La contre-réaction qui a lieu se fait "par l'environnement" (feedback visuel).

IV.1. Calcul de la vitesse mesurée par un détecteur élémentaire de mouvement

On suppose que l'objet se déplace perpendiculairement à l'axe médian de l'appareil.

Soit:

Θ : angle élémentaire entre 2 photorécepteurs

L: distance de l'objet à la lentille

l: largeur correspondant à une distance L de la lentille et dans un plan perpendiculaire à l'axe du capteur

v: vitesse de l'objet

f: distance focale de la lentille.

$$\operatorname{tg} \Theta/2 = l/2L \quad l = 2L \operatorname{tg} \Theta/2$$

$$\text{d'où } dl/d\Theta = L/\cos^2 \Theta/2 \quad (i) \quad L$$

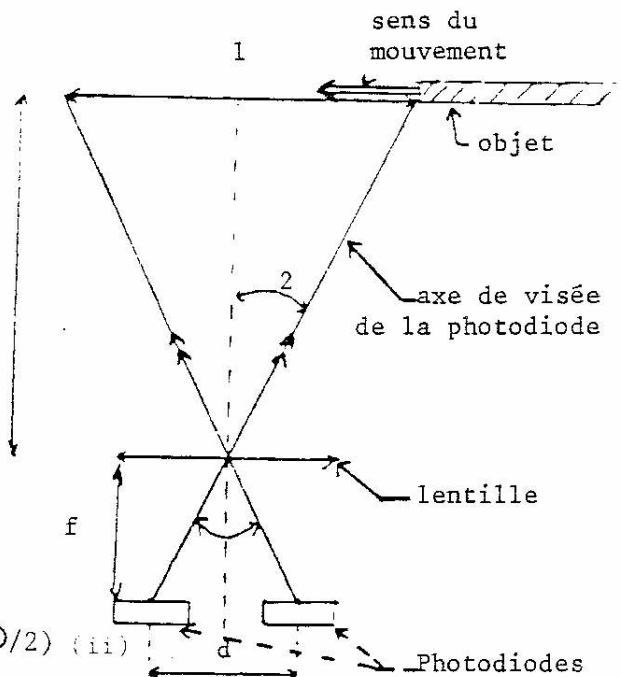
calcul de la vitesse de l'objet:

$$v = dl/dt = dl/d\Theta \cdot d\Theta/dt$$

$$v = d\Theta/dt \quad \text{vitesse angulaire}$$

$$\text{d'où } v = v_{\Theta} \cdot dl/d\Theta$$

$$\text{d'après (i) } v \text{ devient: } v = v_{\Theta} \cdot L/\cos^2(\Theta/2) \quad (ii)$$



Ce qu'on mesure avec le détecteur c'est la vitesse angulaire v_{Θ}

$$\text{d'après (ii) } v_{\Theta} = (\cos^2 \Theta/2) \cdot v/L$$

Comme l'angle interrcepteur Θ dépend non seulement de l'entre-axe des photodiodes mais aussi de la distance focale f, il est en principe réglable (en changeant la lentille par exemple), mais il est fixe pendant la mesure, donc $\cos^2 \Theta/2$ est une caractéristique du détecteur.

$$\text{Nous avons donc: } v_{\Theta} = K \cdot v/L$$

avec $K = \cos^2 \Theta/2 = \text{constante}$

v_{Θ} fonction de la vitesse absolue de l'objet et de la distance de séparation objet-détecteur.

Influence de l'angle interr cepteur sur la mesure

Lorsque $\theta \rightarrow 0$ alors $K = \cos^2 \theta/2 \rightarrow 1$

Lorsque $\theta \rightarrow \pi$ alors $K = \cos^2 \theta/2 \rightarrow 0$

Donc plus l'angle interr cepteur est petit, plus la vitesse mesurée est grande.

Supposons que la vitesse absolue de l'objet soit constante, la vitesse angulaire mesurée est alors inversement proportionnelle à la distance objet-détecteur. v_θ s'écrivant:

$$v_\theta = K_0 \cdot 1/L \text{ avec } K_0 = v \cdot \cos^2(\theta/2) = \text{constante}$$

Nous voyons que: lorsque L augmente, alors v diminue et inversement.

On comprend alors qu'il soit possible de réaliser un contrôle de maintien à distance d'un mur. L'objet figuré par les contrastes sur le mur est alors fixe, tandis que le détecteur est disposé sur un mobile se déplaçant à vitesse constante (le calcul effectué précédemment restant toujours valable).

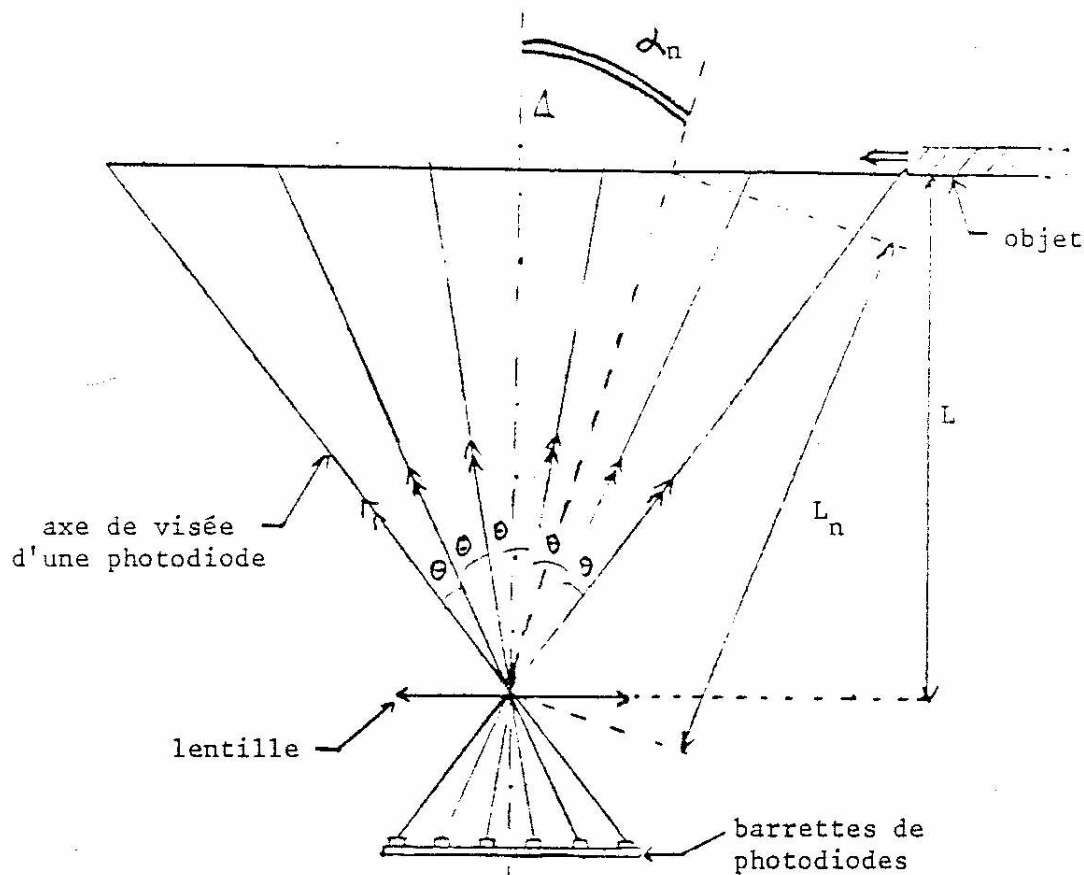
IV.2. Expression de la vitesse mesurée suivant la position des photodiodes sur la barrette.

En considérant les mêmes hypothèses que pour le détecteur élémentaire et les données suivantes:

θ : angle entre 2 photodiodes successives

v: vitesse absolue de l'objet

L: distance objet-lentille.



Soit v_{θ_n} la vitesse angulaire mesurée par le détecteur élémentaire n dont l'axe de visée fait un angle α_n avec l'axe de symétrie Δ : $\alpha_n = n\theta$.

Pour ce détecteur élémentaire n :

- la distance qui sépare l'objet de la lentille n'est plus L , mais L_n avec $L_n = L/\cos\alpha_n$
 - la vitesse v devient V_n avec $V_n = V.\cos\alpha_n$
- donc la vitesse angulaire v_{θ_n} mesurée par le détecteur élémentaire n s'écrit:

$$v_{\theta_n} = v_n \cdot \cos^2(\theta/2)/L_n = (v \cdot \cos^2(\theta/2)/L) \cdot \cos^2\alpha_n.$$

$$v_{\theta_n} = v_{\theta} \cdot \cos^2\alpha_n$$

Nous avons donc une atténuation de facteur $\cos^2\alpha_n$ pour la vitesse mesurée par les photodétecteurs des extrémités de la barrette par rapport à ceux du centre de celle-ci.

Voyons sur un tableau cette atténuation en fonction de α_n

α_n (degrés)	0	5	10	15	20	25	30
v_{θ_n}/v_{θ}	1	0,99	0,97	0,93	0,88	0,82	0,86

On remarque que si l'on tolère une variation peu différente de 10% pour la vitesse mesurée, on peut prendre jusqu'à 20° pour α_n donc 40° de visée totale pour la barrette. Pour un angle plus grand il faudra tenir compte de la loi d'atténuation établie ci-dessus.

IV.3 Calcul des différents paramètres du détecteur en tenant compte des caractéristiques de la barrette réellement utilisée:

Atténuation des détecteurs extrêmes par rapport au central

Aux vues du résultat précédent et de la barrette utilisée, on a pour le détecteur extrême ($\alpha_2 = 8,68^\circ$), une atténuation négligeable de v_{θ_n}/v_{θ} (2,3%). On n'en tiendra donc pas compte, et l'on considérera que: $v_{\theta_n} = v_{\theta}$.

Vitesse angulaire centrale

Pour la barrette utilisée, la distance entre les centres de 2 photodiodes adjacentes vaut 1,9mm. D'autre part, l'objectif ayant une distance focale de 25mm, l'angle d'échantillonnage élémentaire est:

$$\theta = \arctg d/f = 4,34^\circ$$

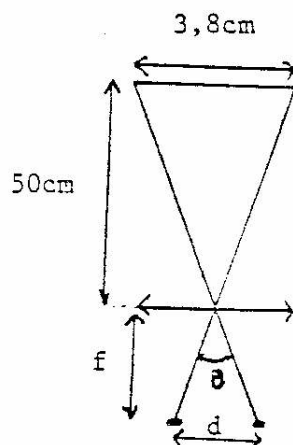
$$\text{donc } K = \cos^2 \theta/2 = 0,998$$

On peut donc considérer que:

$$v_{\theta} = v/L$$

Largeur minimale imposée pour les bandes de la mire:

Si le couloir mesure 1 mètre de large, le mobile aura sa position d'équilibre à 50cm des murs. Or à 50cm, l'angle d'échantillonnage représente 3,8cm



Pour éviter le "phénomène de repliement" -conséquence d'un sous échantillonnage spatial (Cf. SHANNON)- il faut que la période spatiale de la mire, soit supérieure à 2 fois la période spatiale du détecteur. Par conséquent, la période de la mire devra être supérieure à 7,6cm. On prendra par exemple 15cm pour être sûr de vérifier cette condition, et tenant compte par ailleurs du fait que le mobile doit percevoir correctement la mire (sans risque de "repliement") à une distance supérieure à 50cm, pour le cas où il aurait dévié considérablement de sa trajectoire de consigne.

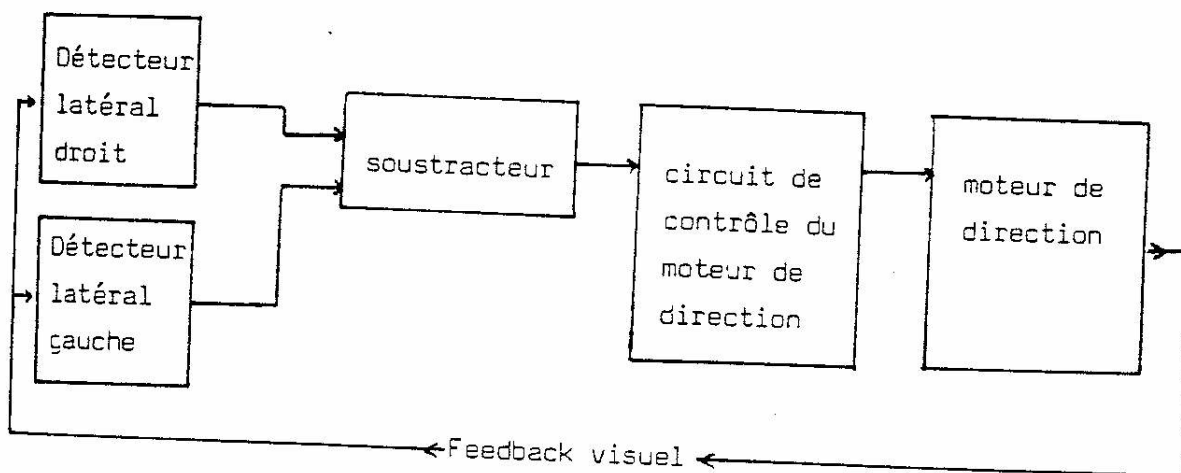
. Remarque: Une manifestation de ce phénomène de repliement a été observée par VON GAVEL dès 1936 dans le comportement visuo-moteur des insectes. Mais son étude quantitative repose sur les travaux de GOTZ (1964) chez la drosophile. Cet auteur a montré que la réaction optomotrice de l'insecte s'annule lorsqu'on fait tourner autour de lui une mire dont la période spatiale est égale à 2 fois l'angle interommatidial (égal à l'angle entre 2 photodétecteurs élémentaires). Il a d'ailleurs exploité ceci comme une "méthode de zéro" très sensible pour déterminer l'angle interommatidial d'un insecte par une expérience de comportement.

IV.4. Utilisation du contrôle de cap pour le guidage

La sortie de chaque oeil latéral donnant, pour une vitesse constante du mobile, une amplitude inversement proportionnelle à la distance séparant ce dernier du mur, on met à profit la différence d'amplitude qui existe entre les signaux provenant des deux yeux latéraux, quand le mobile se trouve à des distances différentes de chaque mur du couloir.

Supposons que le mobile, s'étant écarté de sa trajectoire de consigne, se trouve plus près du côté droit que du côté gauche. L'amplitude du signal provenant de l'oeil latéral droit sera supérieure à celle de l'oeil latéral gauche. On se sert donc de la différence d'amplitude de ces 2 signaux comme signal d'erreur pour corriger la trajectoire, en faisant tourner le mobile du côté gauche, afin de le rapprocher de la ligne médiane du couloir. En régime établi, lorsque le mobile aura atteint cette ligne, les vitesses angulaires mesurées par les deux détecteurs latéraux seront égales et, leur différence étant nulle, le mobile gardera sa trajectoire de consigne et suivra les sinusoïdes du couloir. On voit donc, qu'il est possible de réaliser un contrôle extrêmement simple... à condition toutefois de posséder une batterie de détecteurs élémentaires de mouvement.

IV.5. Synoptique du contrôle de cap



V. CONTROLE ANTI-COLLISION

La finalité de ce contrôle est de faire arrêter le mobile à une distance fixée D_0 d'un obstacle, quelle que soit la largeur de celui-ci.

Pour cela, on exploite l'idée (issue d'expériences réalisées chez les animaux: cf la réaction d'atterrissage de la mouche, paragraphe II.1) que si l'on se déplace à vitesse constante en direction d'un obstacle, on voit la vitesse angulaire des extrémités de ce dernier augmenter rapidement par rapport à celle du centre.

Le contrôle de distance d'arrêt consiste à détecter la distance entre le détecteur mobile et l'obstacle pour laquelle la vitesse des extrémités de ce dernier dépasse un certain seuil, ceci pour une vitesse donnée du mobile.

V.1. Calcul de la vitesse d'expansion des bords de l'obstacle

On suppose que le mobile se déplace suivant l'axe de symétrie de l'obstacle soit:

L : largeur de l'obstacle

D : distance entre l'obstacle et le détecteur

v : vitesse du mobile détecteur

Nous avons $\tan \theta = L/2D$ (i)

$v = dD/dt$

pour une variation dD de D θ varie de $d\theta$.

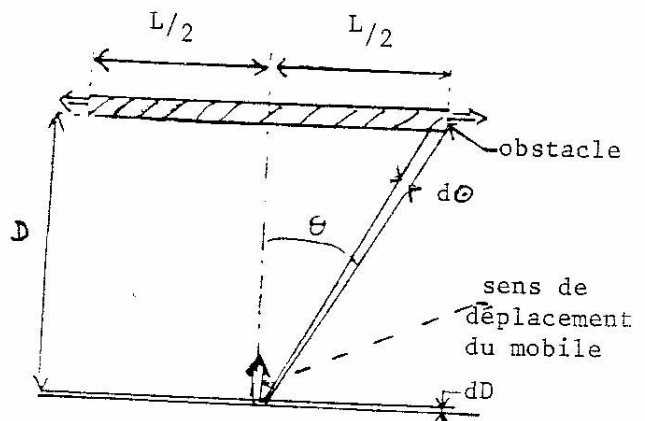
Calculons la vitesse angulaire V_θ des extrémités de l'obstacle

$v_\theta = d\theta/dt$

On peut écrire $v_\theta = d\theta/dD \cdot dD/dt = v \cdot d\theta/dD$

or d'après (i) $D = L/2 \tan \theta$ $dD = (-L/2 \cdot \sin^2 \theta) d\theta$

d'où $d\theta/dD = -2 \sin^2 \theta / L$



On a alors $v_{\theta} = (-2\sin^2\theta/L).v$

Exprimons v_{θ} en fonction de D et de v

car $L = 2D\operatorname{tg}\theta$

$$v_{\theta} = -(\sin^2\theta / D\operatorname{tg}\theta) v = (-\sin\theta\cos\theta/D)v$$

$$v_{\theta} = -v.\sin 2\theta / 2D$$

pour un angle θ donné la vitesse angulaire détectée est fonction de la distance et de la vitesse v du mobile. Si on suppose que v est constante, v_{θ} ne dépend alors que de la distance D.

Si le mobile doit s'arrêter à une distance de consigne D_0 de l'obstacle, il suffit que le détecteur élémentaire dont l'axe de visée fait un angle θ avec l'axe médian de la tête détecte une vitesse $v_{\theta} = v.\sin 2\theta / 2D_0$.

Mais on s'aperçoit que si l'on dispose d'un seul détecteur regardant dans la direction faisant un angle θ avec la direction de déplacement, le mobile ne pourra s'arrêter que devant des obstacles de largeur bien déterminée L_0 , telle que $L_0 = 2D_0\operatorname{tg}\theta$

De façon à ne pas être limité par la largeur de l'obstacle, nous avons choisi également une barrette de photodiodes pour le contrôle d'expansion. Ainsi, nous disposons de multiples détecteurs élémentaires de mouvement couvrant un champ visuel étendu. Si la sortie de chacun d'eux est affectée d'un coefficient adéquat conforme à la loi en $\sin 2\theta$ et si toutes ces sorties convergent sur un simple "circuit OU" contrôlant l'arrêt du moteur de propulsion, on conçoit qu'il sera possible d'arrêter le mobile si un obstacle de largeur quelconque se présente à ses yeux (la largeur de l'objet restant toutefois supérieure à la distance sous-tendue par 2θ comme pour le contrôle de cap).

V.2. Utilisation du détecteur d'expansion comme système anticollision

On utilise le fait que tout détecteur donne, pour une vitesse constante V du mobile et une direction de visée d'angle Θ par rapport à l'axe Δ_0 , une amplitude inversement proportionnelle à la distance séparant le mobile de l'obstacle. La vitesse d'expansion détectée s'exprime en effet par:

$$v_{\Theta} = v \cdot \sin 2\Theta / 2D = K/D \quad (v: \text{vitesse du mobile} = \text{constante})$$

Pour la même distance d'arrêt D_0 , chaque détecteur élémentaire devra être affecté d'un seuil fonction de sa direction de visée. Mais le résultat essentiel est que la loi de réglage de ces seuils ne change pas avec la distance D_0 . Elle ne dépend que de Θ .

Loi des seuils de vitesse à imposer

On dispose dans chaque oeil frontal d'une barrette de 12 photodiodes permettant de réaliser 11 détecteurs élémentaires de mouvement.

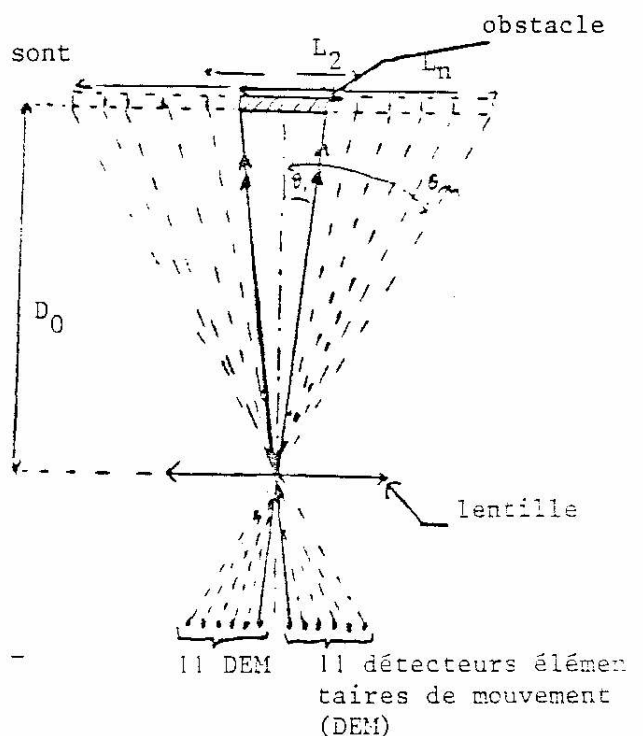
Si on veut s'arrêter à une distance fixe D_0

$$v_{\Theta} \text{ s'écrit } v_{\Theta} = v \cdot \sin 2\Theta / 2D_0$$

la vitesse v du mobile étant constante

le facteur $v/2D_0$ est constant

Les seuils des différents détecteurs sont alors fixés par $\sin 2\Theta$.

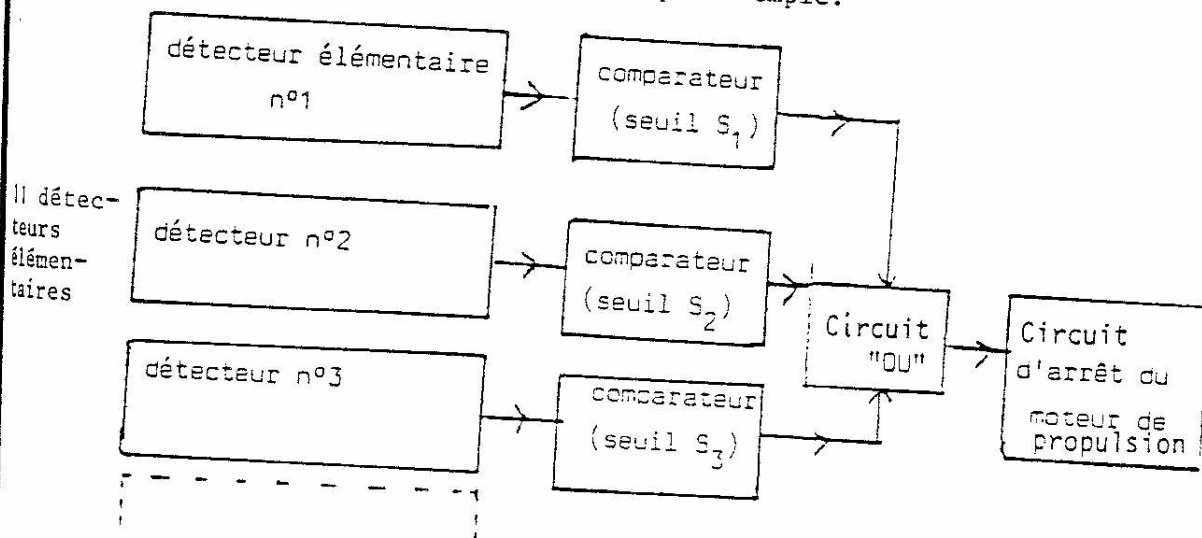


L'angle entre 2 détecteurs élémentaires est égal à l'angle interrécepteur soit $\Theta = 4,34^\circ$, $v_{\Theta_n} = \sin(2n\Theta)v/2D_0$, d'où le tableau suivant pour les différents seuils:

détecteurs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$n\Theta = \Theta_n$	4,64	8,68	13,02	17,36	21,7	26,04	30,38	34,72	39,06	43,4	47,74
seuils	0,15	0,3	0,44	0,57	0,69	0,79	0,87	0,94	0,99	1	0,99

V.3. Synoptique du contrôle d'expansion

pour l'expansion droite par exemple:



On retrouve le même synoptique pour l'expansion gauche.

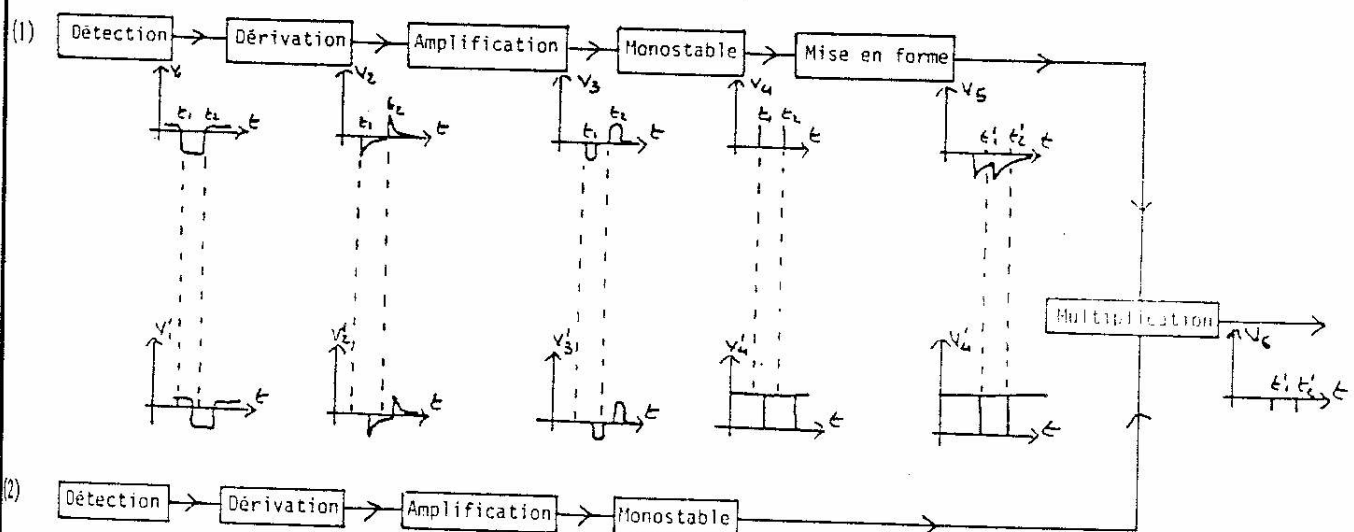
VI. REALISATION DU CIRCUIT ELECTRONIQUE DU DETECTEUR ELEMENTAIRE DE MOUVEMENT (D.E.M)

Après une description globale du circuit, nous allons décrire pour chaque étage du détecteur élémentaire le circuit retenu.

VI.1. Description globale du circuit

La détection s'effectue grâce à des photodiodes PIN. Le signal recueilli est dérivé puis amplifié. Le premier étage permet de considérer uniquement le bord d'attaque et le bord de fuite de l'objet (début et fin). Les signaux viennent ensuite déclencher un monostable réarmable sur front montant et sur front descendant, afin d'avoir un traitement identique dans la suite du circuit pour les 2 bords et ceci quel que soit l'objet (clair ou sombre). Sur la voie (1) on réalise par une mise en forme une onde évanescgente dont le signal de la voie (2) va venir prendre un échantillon au moment adéquat. L'amplitude de cet échantillon est une fonction monotone de la vitesse de l'objet en déplacement.

Synoptique du circuit réalisé



VI.2. Choix des photodiodes

Nous avons opté pour des photodiodes PIN dans la partie détectrice car elles sont plus stables et génèrent moins de bruit à faible signal que les photorésistances ou les phototransistors. D'autre part, Mr. Franceschini, lors d'un récent voyage au Japon a appris l'existence de barrettes de photodiodes monolithiques de faible encombrement et de prix abordable. Nous avons donc opté pour ce choix. Plusieurs firmes présentent ce genre de détecteurs notamment Hamamatsu, Centronic et UDT. Nous avons, après examen minutieux de leurs caractéristiques, choisi les barrettes de la firme UDT. Notre choix a été guidé par un ensemble de contraintes quant à :

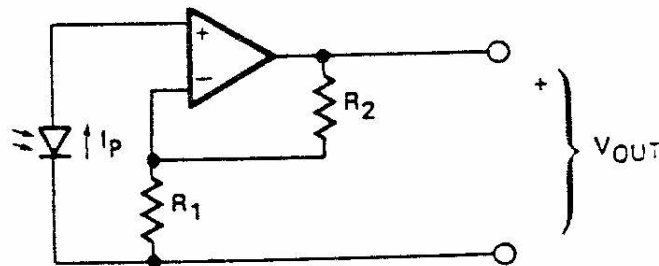
- la distance séparant les surfaces photosensibles
- les dimensions (largeur et hauteur) des surfaces photosensibles élémentaires
- le faible bruit
- le prix
- le nombre de photodiodes par barrettes

VI.3. Amplificateur d'entrée

Initialement, nous avons choisi un mode d'amplification logarithmique dont la sortie s'exprimait par :

$$V_{out} = (1+R_2/R_1) \cdot (kT/e) \cdot \ln(1+I_P/I_s)$$

I_p : courant de photoconduction



De par sa sortie logarithmique, cet amplificateur présentait l'avantage de fonctionner dans une large gamme de luminosité (4 décades). Mais l'inconvénient majeur de ce circuit était sa distance de détection assez réduite aux faibles contrastes. Ce problème vient du fait que la composante continue du signal issu de la photodiode et correspondant à la lumière ambiante n'est pas éliminée dès le départ. Celle-ci est donc amplifiée, et si l'on choisit un gain trop élevé, la composante continue suffit à saturer l'amplificateur. Ce dernier ne fonctionne alors que pour des contrastes déterminés: supposons que l'amplificateur se sature au niveau haut, seuls les contrastes "négatifs" correspondants à des objets sombres provoquent une réponse en sortie.

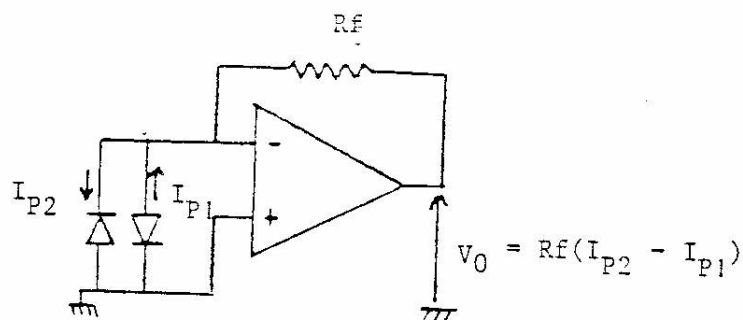
Ceci nous avait contraints à diminuer le gain afin de pouvoir détecter aussi bien les objets clairs que sombres, mais avait entraîné hélas une diminution de sensibilité de l'appareil du point de vue distance de détection aux faibles contrastes.

Ce montage étant trop dépendant de la lumière ambiante, nous avons cherché à nous affranchir d'emblée (c'est-à-dire avant même amplification) de la composante continue (lumière ambiante), ce qui permettait ainsi d'accroître considérablement le gain donc la détection des faibles contrastes.

Nous avons sélectionné les deux montages suivants:

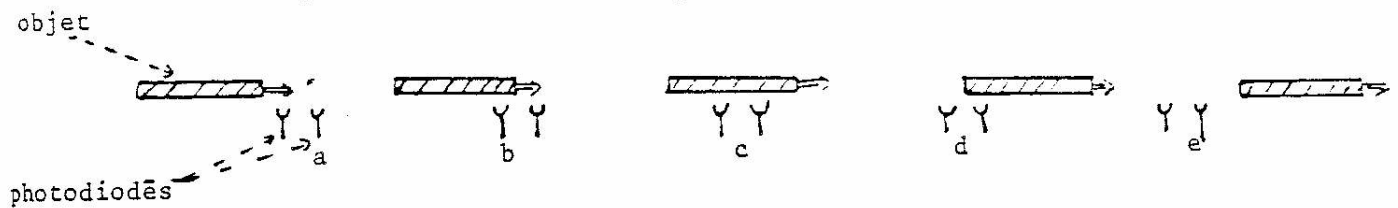
- amplificateur différentiel à 2 photodiodes
- amplificateur à liaison capacitive.

Amplificateur différentiel

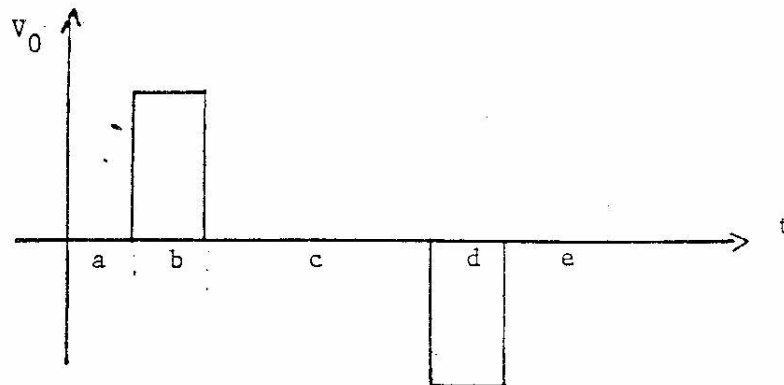


On voit que les photodiodes sont montées en mode photovoltaïque. Les diodes étant disposées tête-bêche, on trouve en sortie un signal proportionnel à la différence des courants de photoconduction.

Si les photodiodes sont appairées, on a pour un même éclairement $I_{p1} = I_{p2}$, et par conséquent zéro volt en sortie. Voyons sur un schéma simple la forme du signal de sortie pour un objet sombre étendu passant devant les deux photodiodes.



sortie de l'amplificateur en fonction des différentes étapes du mouvement.



Pour un objet clair on aurait:

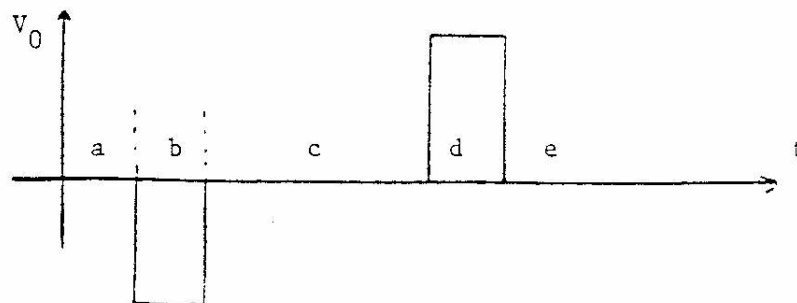
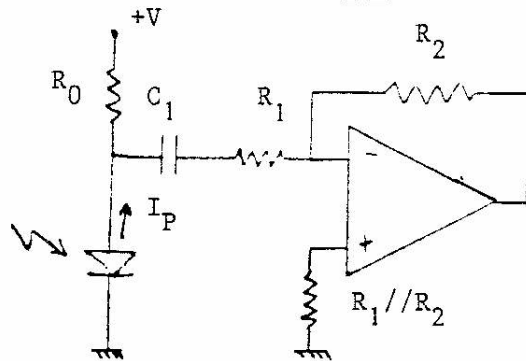


Schéma de l'amplificateur alternatif



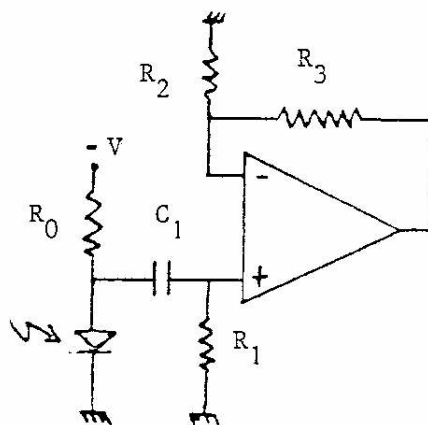
La photodiode est ici montée en mode photoconductif. Ainsi sa résistance dynamique reste pratiquement constante et ne fait pas, par conséquent, varier de manière indésirable, la fréquence de coupure du filtre $R_1 C_1$, celle-ci étant calculée pour éliminer le continu.

Seules les variations, correspondant à des contrastes sont amplifiées avec un gain égal à $-R_2/R_1$.

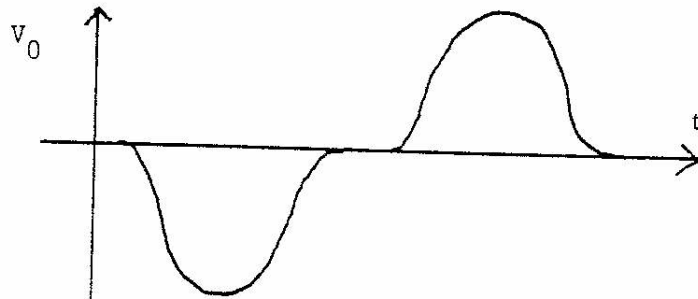
On positionne la droite de charge de la photodiode par la tension de polarisation et la résistance R_0

Dans ce montage la résistance R_1 intervient aussi bien dans le calcul de la fréquence de coupure $f_c = 1/2 R_1 C_1$ que dans celui du gain égal à $-R_2/R_1$.

Désirant que ces deux paramètres soient indépendants, nous avons pensé à une variante de ce montage constituée par une dérivation obtenue par un filtre passe-bas de $f_c = 1/R_1 C_1$, suivie d'une amplification de gain R_3/R_2 :



Forme du signal de sortie pour un objet sombre par rapport à son arrière plan:



De ces deux montages nous avons retenu l'amplificateur alternatif, car d'une part, il ne nécessite qu'une seule photodiode pour chaque direction de visée (ce qui le rend bien adapté à la solution "barrettes") et d'autre part, l'utilisation de l'amplificateur différentiel impose des photodiodes appairées sinon il entre vite en saturation lorsque la luminance change.

VI.4. Monostable logique

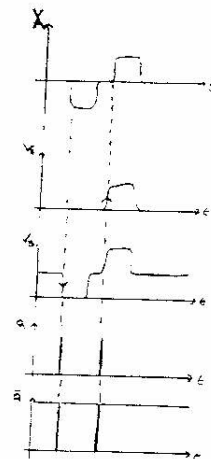
Nous avons besoin de traiter de manière identique les parties positives et négatives du signal et nous voulons un étage capable de délivrer une impulsion calibrée. Nous avons pensé utiliser un monostable analogique, mais ce dernier ne pouvait délivrer des impulsions de largeur inférieure à celles des signaux d'entrées. Nous avons donc été amenés à choisir un monostable logique. Ce dernier génère une impulsion sur un front montant et sur un front descendant à condition de respecter certaines contraintes logiques.

On dispose de 2 entrées A et B et de 2 sorties Q et $\bar{Q}$.

Table de vérité:

Inputs			Outputs	
Reset	A	B	Q	$\bar{Q}$
H	L	H		
H	H	L	Not Triggered	Not Triggered
H	L, H,	H	Not Triggered	Not Triggered
L	X	X	L	H

Chronogramme:



Pour satisfaire les conditions:

- nous avons injecté en A le signal X issu de l'étape d'amplification, en prenant soin d'éliminer la partie négative;
- nous avons injecté en B le même signal X auquel nous avons rajouté une composante continue de façon à ce que le niveau initial bas devienne un niveau haut.

Synoptique:

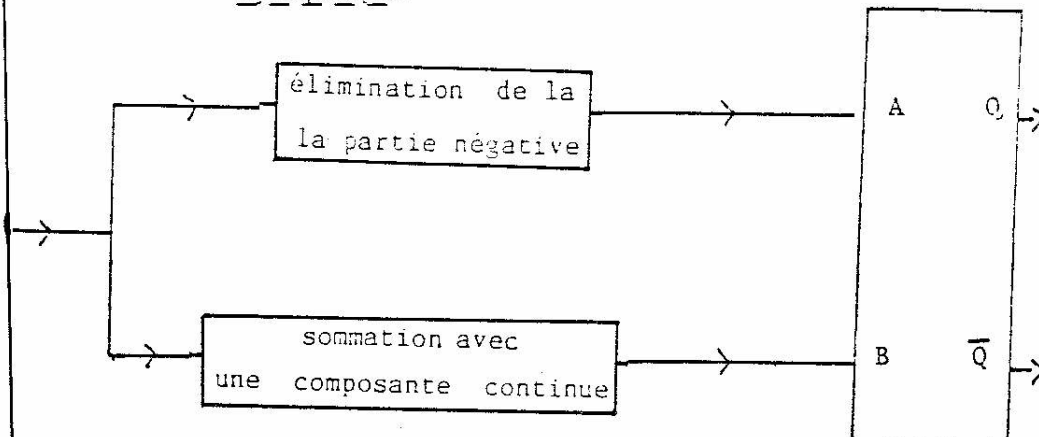
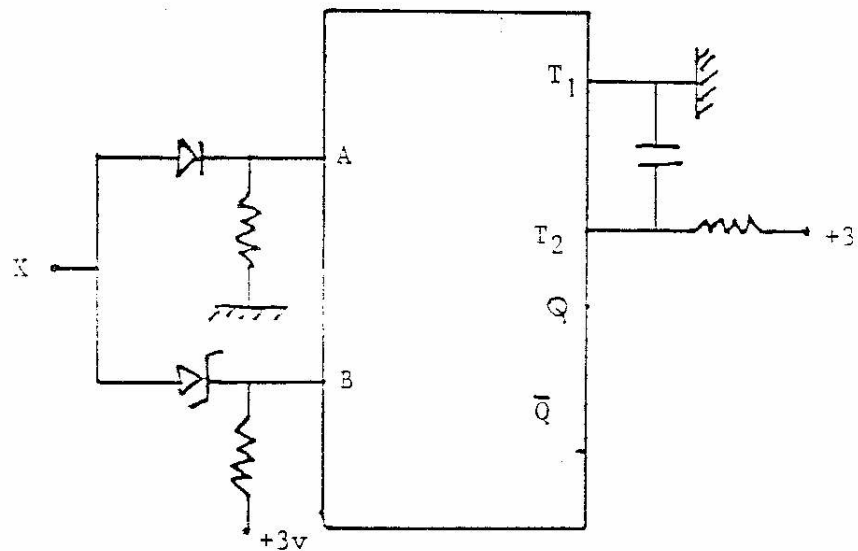


Schéma électronique:

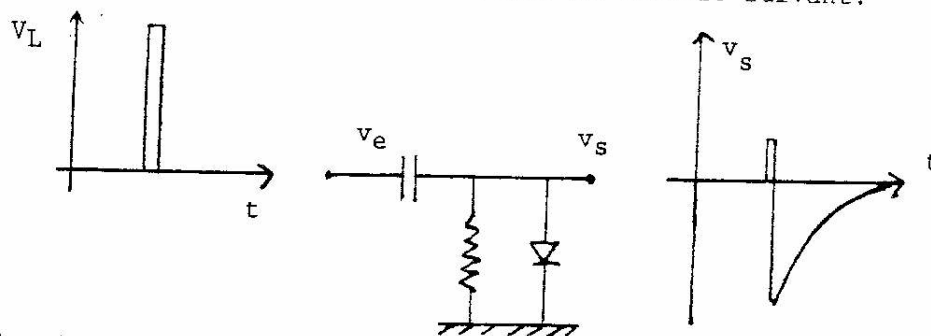


On obtient deux impulsions calibrées (l'une correspondant au bord d'attaque, l'autre au bord de fuite) dont la largeur est fixée simplement par une résistance et une capacité en sortie du monostable. On a fixé la largeur $\approx 2\text{ms}$.

VI.5. Mise en forme

Pour l'application du capteur élémentaire aux deux types de contrôle prévus, il suffit d'avoir une sortie croissant de manière monotone avec la vitesse. Nous avons donc réalisé une mise en forme en "exponentielle décroissante" au lieu d'une mise en forme hyperbolique, qui seule aurait permis d'avoir une sortie véritablement proportionnelle à la vitesse.

Ainsi la mise en forme se réduit au circuit suivant:



D'après ce schéma, le signal issu du monostable est dérivé. Seule l'exponentielle négative est conservée par la diode.

On a donc une exponentielle affectée d'un retard correspondant à la durée de l'impulsion provenant du monostable.

Le temps de décroissance de l'exponentielle est fixé par les éléments R et C: $\tau = RC$

Le choix de τ a été fixé par plusieurs conditions:

- pour la vitesse minimale de détection, l'exponentielle ne doit pas être complètement retombée:
- autour du point de fonctionnement moyen et correspondant à une vitesse détectée de 50cm/s la pente de la tangente à la courbe représentant la valeur de la tension de sortie en fonction de la vitesse doit être assez importante.

Ainsi $RC \approx 200\text{ms}$

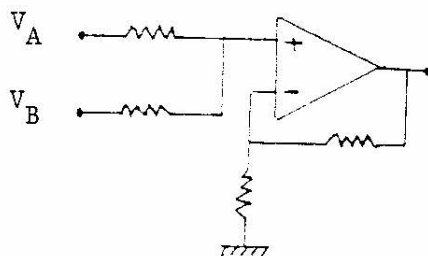
$C = 1\ \mu\text{F}$ $R = 180\ \text{k}\Omega$.

VI.6. Multiplication

On dispose maintenant sur une voie (A) d'un signal exponentiel et sur l'autre (B) d'une impulsion dont le rôle est de venir prendre en compte la valeur de l'exponentielle à l'instant adéquat.

Plusieurs solutions -plus ou moins coûteuses en composants- ont été envisagées pour réaliser cette opération. Celle qui a été finalement retenue est la suivante.

Nous avons utilisé un amplificateur sommateur:

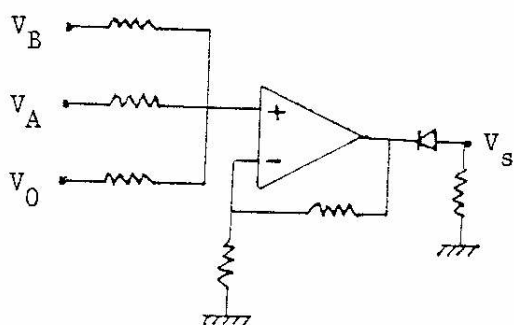


Cet étage est utilisé d'une façon peu usuelle. En effet, il joue le rôle de porte analogique. Pour ce faire, nous avons calculé les gains de chaque voies A et B de telle sorte que quel que soit le signal sur A, lorsque B est au niveau haut, l'amplificateur sature à une valeur positive. Lorsqu'une impulsion arrive en B, cette voie passe au niveau 0, de sorte que seule la valeur de A (négative) est prise en compte. Ainsi la sortie est en permanence positive sauf au début ou à la fin des objets, instants durant lesquels elle délivre un signal négatif correspondant à la valeur de l'exponentielle.

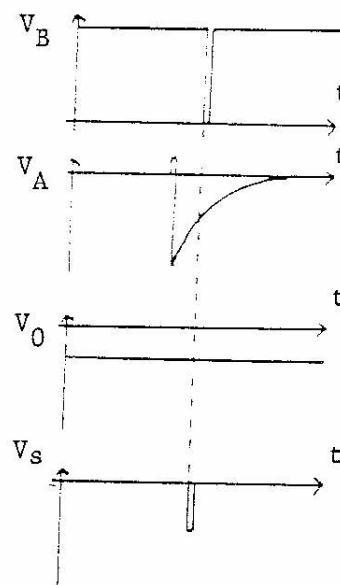
Pour un bon usage de ce signal nous éliminons au moyen d'une diode la partie positive. Ceci a l'inconvénient d'entraîner une baisse de potentiel $\simeq 0,6V$. Dans ce cas, les faibles vitesses délivrant un signal $> -0,6V$ ne sont plus détectées. Nous avons donc injecté un signal continu de $-0,6V$ à l'entrée de l'amplificateur pour compenser cette chute de potentiel.

Le schéma retenu est donc le suivant:

Schéma:



Chronogramme:



Le D.E.M. ainsi réalisé (Cf. circuit électronique page 34. 1) possède les propriétés suivantes :

- il effectue sa mesure à distance et sans contact;
- il est passif donc discret. En effet, il ne nécessite ni émission (de quelque rayonnement que ce soit) de la part du système de mesure ou de l'objet en mouvement ni aucune modification "adéquate" de l'objet dont on veut détecter le mouvement. Il requiert toutefois que son environnement soit optiquement contrasté;
- il délivre un signal croissant avec la vitesse angulaire de l'objet uniquement si ce dernier se déplace dans un sens particulier dit "sens préféré";
- il délivre un signal nul pour tout autre sens du mouvement.

Remarque:

Afin d'immuniser l'appareil vis-à-vis d'une lumière papillotante, le monostable de la voie (1) fournit une impulsion de largeur très légèrement inférieure à celui de la voie (2) (réglage de la résistance extérieure).

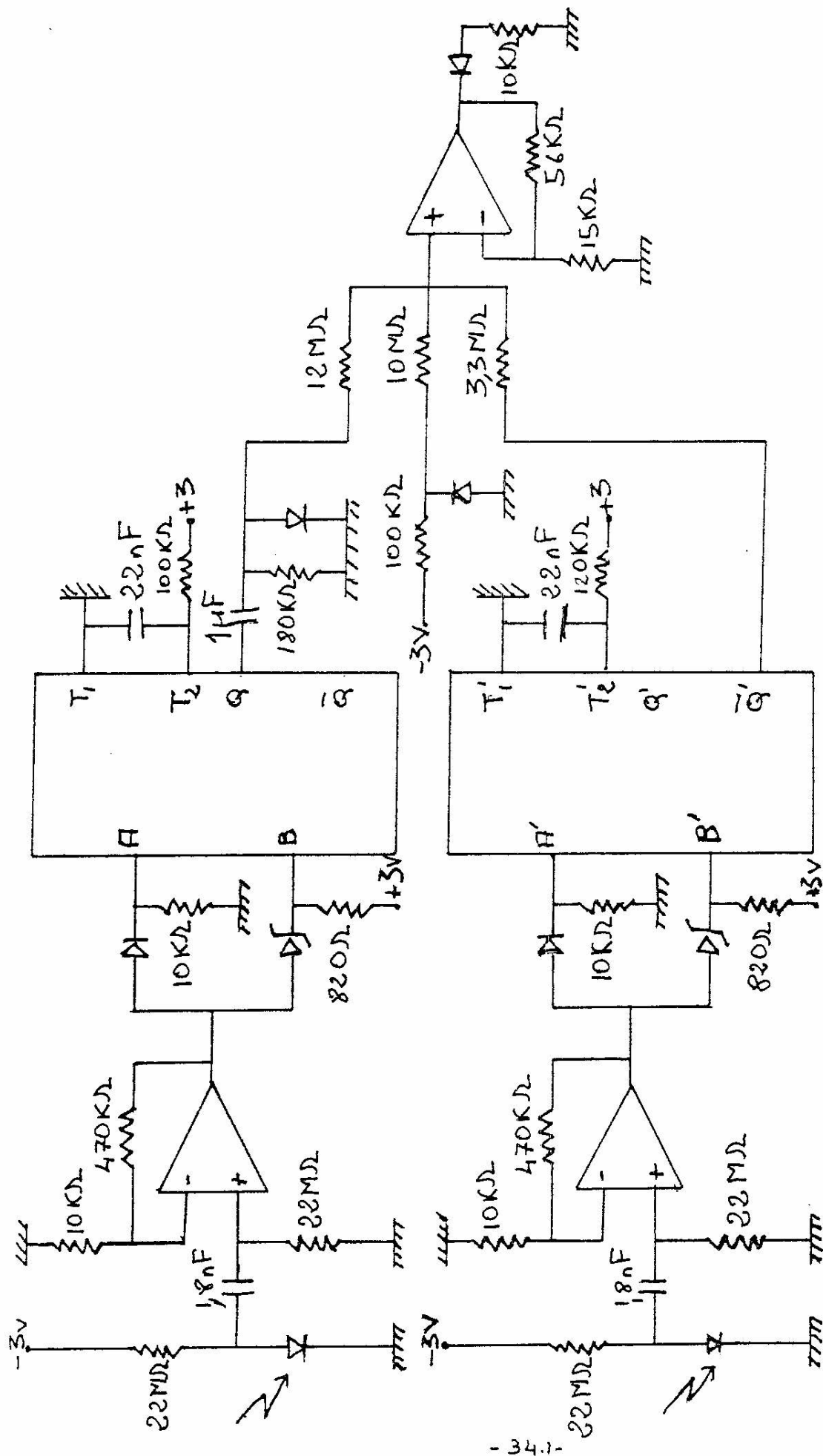


Schéma du détecteur élémentaire

VII. REFLEXIONS ET PROBLEMES SOULEVES

Lors de la réalisation du circuit électronique du détecteur élémentaire de mouvement, nous nous sommes heurtés à des problèmes généraux auxquels la nature a nécessairement dû faire face dans les systèmes visuels animaux, en particulier chez la mouche. Il est du plus haut intérêt de comprendre comment elle a pu les résoudre.

Différentes idées de recherches sont apparues et ont conduit à mettre sur pieds des expériences électrophysiologiques et à en envisager d'autres. Voici quelques observations relevées et ayant suscité une problématique neurophysiologique:

1) Domaine de fonctionnement:

Le premier problème est celui de la polarisation des photodiodes. En effet, cette dernière est réalisée de manière à optimiser la réponse des photocapteurs dans une gamme de luminance la plus large possible. La mouche semble avoir résolu ce problème partiellement en effectuant une régulation d'intensité à l'intérieur même de chacune de ses 50.000 cellules photoréceptrices, et ceci grâce à une migration de pigment ultra-rapide découverte en 1969 (KIRSCHFELD, FRANCESCHINI, 1969; FRANCESCHINI, KIRSCHFELD, 1976). Des recherches sont en cours dans ce laboratoire pour essayer d'éclaircir ce point chez l'animal et de définir en particulier la zone précise de luminance où entre en action ce mécanisme d'adaptation par rapport à la zone de luminance du "potentiel de récepteur".

2) Nous avons dû créer un signal calibré dépendant uniquement des "fronts d'attaque et de fuite" des objets en mouvement. Pour ce faire, nous nous sommes affranchis, dans un premier temps, de la composante continue de la luminosité ambiante et ceci au moyen d'un filtrage passe-haut. Mais les impulsions obtenues restaient dépendantes de la pente (liée à la vitesse) et de l'amplitude (liée au contraste) du créneau issu de la photodiode. Pour rendre le signal invariant vis-à-vis de ces deux paramètres (pente et amplitude) nous avons dû générer des "pulses" calibrés à partir d'un seuillage des impulsions précédentes. Ainsi notre traitement nécessite 3 étapes: filtrage passe-haut, amplification, déclenchement d'un monostable. Parallèlement, des expériences sont en cours chez l'animal, dont le but est de mettre en évidence comment il a pu résoudre cette étape de

prise en compte de l'information provenant "du bord d'attaque et de fuite" d'un objet en déplacement, et ceci indépendamment de la largeur, de la vitesse et du contraste de ce dernier.

3) Dans le principe de base du D.E.M., énoncé par Ullman (Cf. II.3), un retard est nécessaire. Pour notre circuiterie électronique nous utilisons "une mise en forme" exponentielle (Cf. VI.5) et ceci afin d'obtenir un signal de sortie du D.E.M. variant de manière monotone avec la vitesse. Cette idée est issue assez directement d'expériences effectuées dans ce laboratoire et qui ont pu mettre en évidence l'allure de l'équivalent de cette mise en forme chez la mouche. D'autres expériences sont faites actuellement sur l'animal in vivo, qui permettront de déterminer le signal de sortie du neurone H1, en fonction du retard entre la stimulation de deux photorécepteurs d'un même D.E.M..

4) Nous envisageons de réaliser une sorte d'étage "inhibiteur" dans chaque D.E.M.: lorsque l'information concernant la vitesse a été prise en compte par la deuxième photodiode, celle-ci vient annuler le signal de la voie (1) de manière à réinitialiser le D.E.M.. Ceci évite certains problèmes dus à des aléas de fonctionnement et diminue les risques d'informations indésirables. Cette suggestion nous est venue, car a priori, nous ne voyons aucune raison pour qu'un signal continue d'être véhiculé sur la voie (1), une fois l'information "consommée". Pareillement, on peut envisager une expérience électrophysiologique qui vérifierait s'il n'y aurait pas un contrôle d'un photorécepteur par un autre dans chacun des milliers de D.E.M. de la mouche.

VIII. CONCLUSION

Cette étude, à caractère bionique, montre qu'il peut être profitable d'appliquer des données concernant certains processus biologiques à des réalisations utilisant d'autres technologies (électronique entre autres). Les combinaisons pluridisciplinaires (physique-biologie dans ce cas) permettent d'avoir une approche différente et parfois nouvelle de certains phénomènes. L'approche, aujourd'hui classique, des systèmes de vision pour robots est basée sur un traitement de signal d'une part digital, d'autre part séquentiel (facilité bien sûr par l'existence des microordinateurs!). L'approche présentée ici se distingue radicalement de cette approche "classique". En effet, il s'agit d'un traitement qui est d'une part analogique, d'autre part parallèle à l'instar du traitement de signal (réalisé en technologie neuronique) effectué par le système visuel de tous les animaux, vertébrés ou invertébrés. Le mobile dont nous envisageons la réalisation ne doit réaliser que deux fonctions visuelles: contrôle de cap et contrôle anti-collision. Ce n'est là évidemment qu'un début. Avec des algorithmes tout aussi simples il devrait être possible par la suite de lui faire effectuer des tâches visuelles beaucoup plus ardues telles que l'évitement d'obstacles sans aucun ralentissement, la poursuite d'autres mobiles du même genre ou la fuite accélérée devant un danger menaçant. Quant à la miniaturisation de l'appareil sensoriel réalisé, il est certain qu'elle demanderait à être poussée, au moins jusqu'au niveau "circuits hybrides" pour ne pas parler d'une intégration LSI ou VLSI dont les coûts de réalisation seraient exorbitants. Quoiqu'il en soit, on est loin encore de pouvoir câbler, comme c'est le cas dans l'oeil de la mouche, 10 000 détecteurs de mouvement dans un dixième de mm³!

En réfléchissant à la conception du système de vision du robot et à la réalisation du D.E.M., nous avons avec M. FRANCESCHINI vécu une expérience intéressante. En effet, nos réflexions nous aident dans la compréhension de certains problèmes fondamentaux qu'ont nécessairement dû résoudre tous les systèmes visuels du monde animal. Ces réflexions théoriques ont d'ailleurs déjà permis de mieux définir

les questions intéressantes qui méritent d'être analysées plus finement, au moyen de microélectrodes, dans la microcircuiterie neuronique de la rétine. C'est là un juste retour des choses, de la conception d'appareils visuels artificiels vers l'analyse microphysiologique des systèmes visuels naturels. Et ceci souligne tout l'intérêt qu'il y a à travailler dans un même laboratoire, tant sur l'analyse de systèmes naturels que sur la conception de systèmes artificiels.

ANNEXE

SYSTEME VISUEL DE LA MOUCHE

Pourquoi etudier l'appareil visuel de la mouche?

L'oeil composé de la mouche présente de nombreux avantages pour l'analyse fine du traitement de l'information dans un système sensoriel.

Un système sensoriel est constitué au départ de plusieurs capteurs (cellules réceptrices) qui permettent de sélectionner l'information utile. Il est particulièrement avantageux d'étudier les systèmes visuels car il est plus facile de contrôler la lumière, porteuse de l'information utile (cas des photorécepteurs) qu'une odeur (cas des chimiorécepteurs), un déplacement (cas des mécanorécepteurs) ou une température (cas des thermorécepteurs).

Un oeil composé tel que celui de la mouche est en fait un type d'appareil visuel extrêmement répandu dans le règne animal puisqu'il compte non seulement les insectes (1 million d'espèces!) mais aussi les crustacés et certains myriapodes et arachnides. Il est formé par la juxtaposition de petits systèmes visuels élémentaires appelés ommatidies, dont le nombre varie de quelques dizaines à quelques dizaines de milliers. Dans chacune d'elles se trouve un nombre limité de cellules photoréceptrices (8 chez de nombreuses espèces d'insectes).

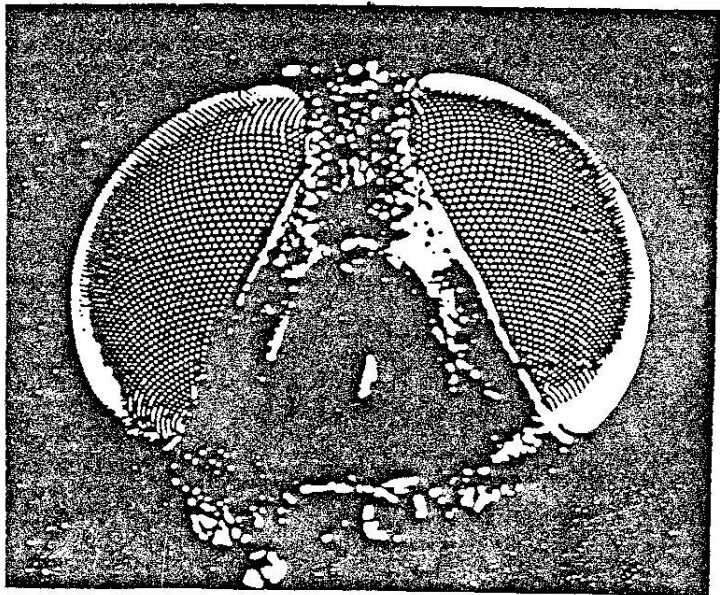
L'étude neuroanatomique de l'oeil est facilitée par sa structure périodique. La mosaïque, si évidente au niveau des facettes de la cornée, se perpétue en effet dans toute la profondeur du système visuel, aux trois niveaux où sont traités les signaux nerveux relatifs à la vision (ganglions optiques). Chez la plupart des insectes il n'existe pas de nerf optique mais une succession de couches bien délimitées, correspondant aux diverses étapes du traitement de l'information. Une intégration très poussée est réalisée et permet d'obtenir des filtrages, des sommations, des redressements et autres opérations qui rappellent celles utilisées couramment en électronique.

Parmi les insectes, la mouche a été choisie parce que c'est l'un des animaux les mieux connus sur le plan biologique (anatomie, embryologie, physiologie, génétique, comportement) et, qui plus est, facile à élever.

Description du système visuel chez la mouche

Dans la description suivante, qui s'inspire largement du mémoire de DEA de A. LE NESTOUR, réalisé en 1984 dans ce même laboratoire, nous allons suivre le trajet de la lumière et de l'information visuelle, c'est-à-dire que nous nous déplacerons de la partie distale (près de l'extérieur) à la partie proximale (près du cerveau) du système visuel.

Tout d'abord les rayons lumineux arrivent sur la cornée composée de 3000 facettes dans chaque oeil.



Tête de *Musca domestica*
photographiée avec un
microscope de Lieberkühn
(FRANCESCHINI, 1984).

Nous voyons que les yeux occupent la majeure partie de la tête, ce qui lui permet de capter les rayons lumineux, provenant de presque toutes les directions de l'espace correspondant à un angle solide de 4 stéradians).

La présence du cou et du corps produit une zone aveugle de 3 à 4% seulement par rapport à l'espace entier chez Musca domestica (BEERSMA, 1979). Chaque facette est en fait une lentille constituée comme le cristallin, de matière inerte, et elle est d'une précision telle que l'homme ne sait pas encore la reproduire. Pour donner une idée de cette finesse nous pouvons donner l'exemple de la facette, utilisée par Mr. FRANCESCHINI, comme objectif principal dans son microscope de stimulation.

De forme hexagonale, ces lentilles sont du type "plan-convexe" et présentent:

- un indice de réfraction égal à 1,5
 - un diamètre d'environ $30\mu\text{m}$
 - une distance focale de 30 à $50\mu\text{m}$: qui permet d'avoir les photorécepteurs proches de la cornée, 1 millimètre ($20\times f$) représente déjà l'infini, l'image est au point à partir de 1 mm;
 - un angle interommatidial: c'est l'angle entre les axes optiques de 2 lentilles adjacentes.
- $\theta = 1^\circ$ (région dorso-frontale)
 $\theta = 2^\circ$ (lateralement)

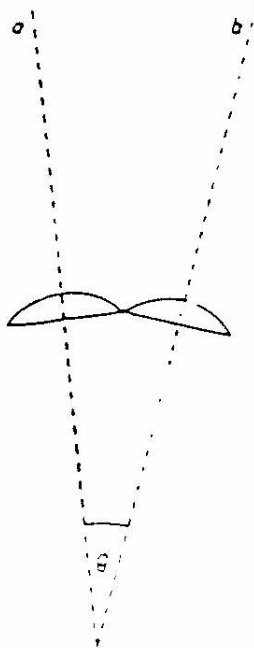


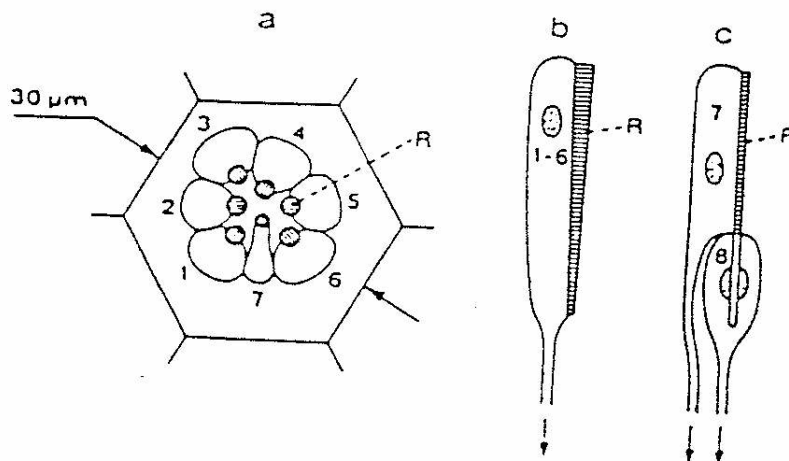
Illustration géométrique de
l'angle interommatidial
(d'après BRAITENBERG, 1967)

Comme l'angle interommatidial est petit, il vaut $\approx \theta/R$

D: diamètre de la lentille $30\mu\text{m}$

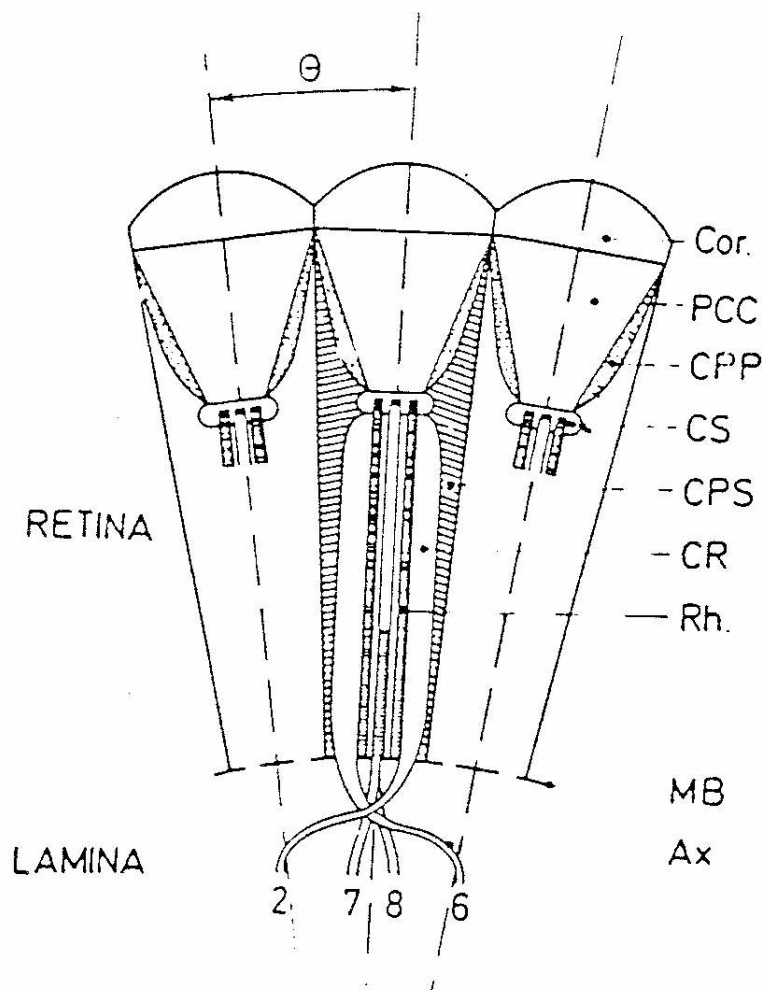
R: rayon de courbure local de l'oeil

Dans le plan focal de chaque lentille nous trouvons l'embouchure des 8 photorécepteurs de la rétine.



Le schéma précédent 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 est une structure membranaire (à microvillosités) de la cellule photoréceptrice et il agit comme un véritable guide d'ondes optique (son diamètre d'environ $1\mu\text{m}$ est voisin de la longueur d'onde de la lumière visible!) qui absorbe petit à petit la lumière grâce au pigment visuel qu'il contient (on peut estimer qu'il y a déjà à ce stade un début de traitement de l'information).



Coupe schématique de trois ommatidies, selon un plan passant par leur axe. Cor.= Cornéule; PCC= Pseudocône cristallin; CPP= Cellules pigmentaires principales; CS= cellules de SEMPER; CPS= Cellules pigmentaires secondaires; CR= Cellules rétinienne; Rh.= Rhabdomère; MB= Membrane basale; Ax.= Axone de la cellule rétinienne n°6. (FRANCESCHINI, 1972).

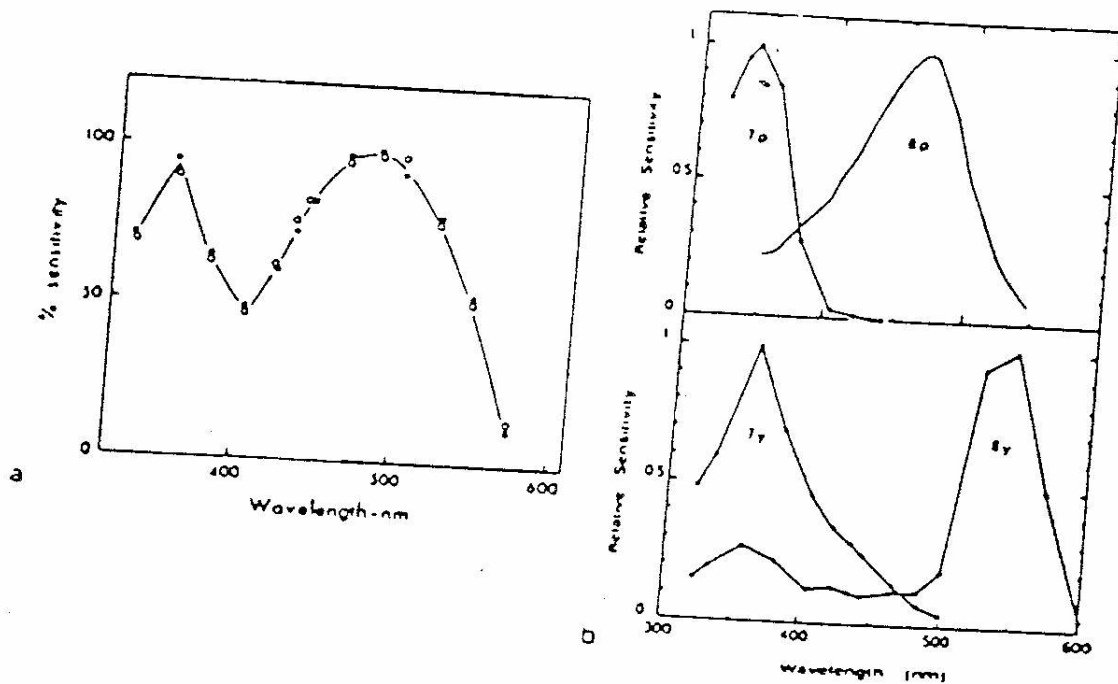
Des cellules pigmentaires forment un manchon autour de chaque ommatidie et permettent de l'isoler optiquement des autres sensibilités spectrales des cellules.

• Sensibilité spectrale des cellules:

On peut distinguer deux sous-systèmes visuels:

-R1 à R6 de toutes les ommatidies ont la même sensibilité spectrale à deux pics: 490 nm et 350 nm. La mouche voit dans l'ultraviolet jusqu'à 300 nm et voit peu au delà de 600 nm.

R7,R8 présentent une variété spectrale dont la répartition est aperiodique.



Sensibilité spectrale des photorécepteurs R1 à R6 (a) et R7/R8 (b) (HARDIE et al., 1981; Franceschini, 1984).

Le premier sous-système visuel (R1 à R6) ne participe probablement pas à la vision des couleurs, mais il intervient dans la détection du mouvement (ECKERT, 1971; KIRSCHFELD, 1972; McCANN et ARNETT, 1972; HEISENBERG et BUCHNER, 1977; RIEHLE et FRANCESCHINI, 1984).

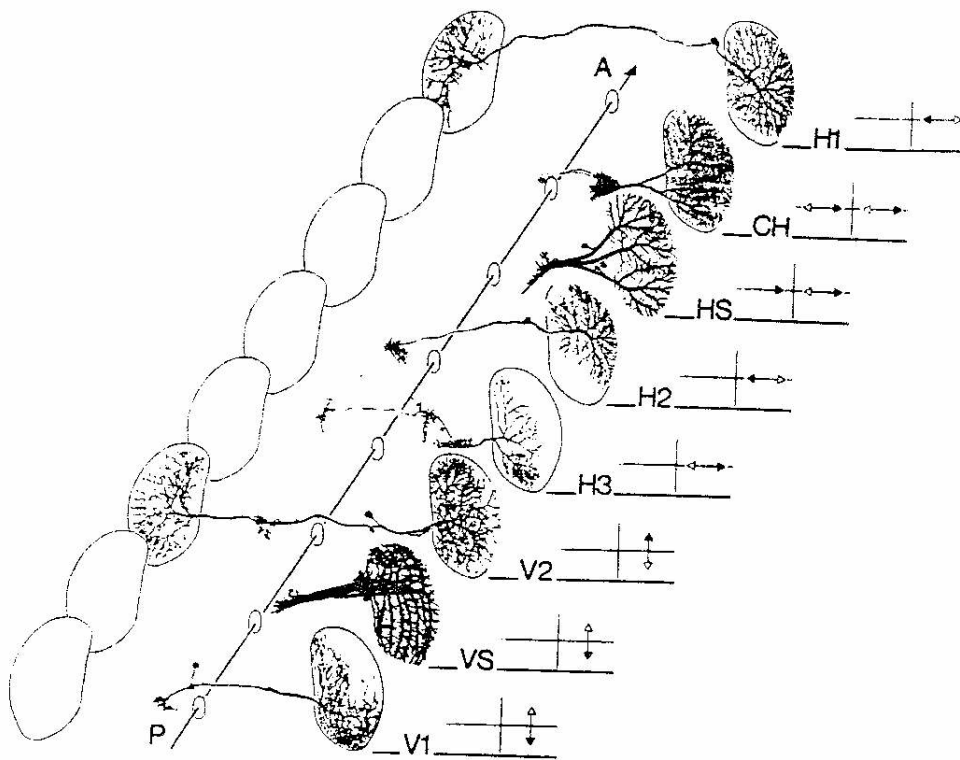
Nous arrivons ensuite au premier ganglion optique, appelé la lamina, dans lequel a lieu la première étape du traitement nerveux de l'information visuelle.

Dans ce ganglion on trouve 3000 colonnes nerveuses appelées "cartouches". Certains récepteurs R1 à R6 envoient leurs axones vers une même cartouche, dans laquelle se produit probablement une sommation de ces six signaux électriques ce qui a pour effet d'améliorer le rapport signal sur bruit par un facteur 6 (moyennage spatial), et par là-même d'augmenter la sensibilité aux faibles contrastes. Les récepteurs R7 et R8 envoient directement leurs axones vers une colonne du second ganglion optique (la medulla) qui correspond à l'étape suivante du traitement de l'information visuelle.

La medulla, avec ses 3000 colonnes, communique avec la lamina par l'intermédiaire du chiasma externe. Toute cartouche de la lamina est reliée à une colonne sous-jacente de la medulla par au moins 7 neurones qui semblent lui transmettre des informations très spécifiques. Il a été démontré que la détection du mouvement a déjà lieu au niveau de la medulla.

Nous terminons cette description par le complexe lobulaire qui constitue le troisième ganglion optique. Une quarantaine de neurones "géants" occupent la plaque lobulaire. Empilés en sandwich sur une épaisseur de 50 μ m ces neurones sont tous sensibles au mouvement d'un objet dans le champ visuel: mouvements horizontaux, d'avant en arrière par exemple, ou bien verticaux de bas en haut par exemple.

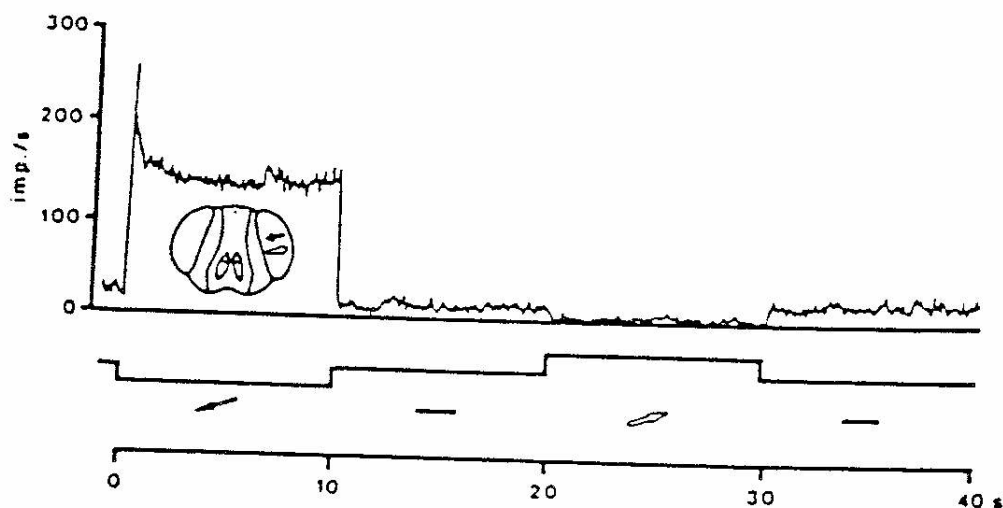
La réponse de ces neurones consiste soit en une dépolarisation (ou hyperpolarisation) soutenue, selon le sens du déplacement de l'objet, soit en un train d'impulsions nerveuses dont la fréquence dépend de la vitesse.



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 cellules. A= antérieur, P= postérieur. (HAUSEN, 1981).

C'est sur ces neurones, très bien connus sur le plan de la neuroanatomie et de l'électrophysiologie, et plus particulièrement sur le neurone H1, que des évaluations précises de la détection du mouvement ont été faites récemment. Nous voyons que chaque neurone a une direction et un sens de mouvement préféré. Le neurone H1, qui transmet son signal à l'autre oeil, existe en un seul exemplaire dans chaque oeil.

Comme le montre la Figure ci-dessous, il répond par un vif accroissement de fréquence au déplacement horizontal d'une mire à bandes parallèles, pourvu que ce mouvement ait lieu dans le bon sens, c'est à dire d'arrière en avant.



(d'après RIEHLE et FRANCESCHINI, 1984)

BIBLIOGRAPHIE

- BRAITENBERG, V. and TADDEI FERRETTI, C. (1966). Landing reaction of Musca domestica induced by visual stimuli. Naturwiss.: 53, 155-156.
- BRAITENBERG, V. (1967). Patterns of projection in the visual system of the fly. I. Retina-lamina projections. Exp. Brain Res., 3: 271-298.
- DALTON, S. (1975) "Pris au vol". Ed. Pierre Horay.
- DEJEAN, P. (1983). "Systèmes de vision par ordinateur: le point aux Etats-Unis". Sciences et Techniques, n°99-100.
- ECKERT, H. (1971). Spektrale Empfindlichkeit des Komplexauges von Musca. Kybernetik, 9: 145-156.
- ECKERT, H. and HAMDORF, K. (1980). Interaction of excitation and inhibition in the neural circuitry controlling the landing response of the blowfly, Calliphora erythrocephala: a behaviour study. J. comp. Physiol.
- FRANCESCHINI, N. (1972). Sur le traitement optique de l'information visuelle dans l'oeil composé de la Drosophile. Thèse Grenoble.
- FRANCESCHINI, N. (1983). In vivo microspectrofluorimetry of visual pigments. In: "Biology of photoreception". Eds. D. Cosens and D. Vince-Price, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 53-85.

- FRANCESCHINI, N. (1984). Chromatic organization and sexual dimorphism of the fly retinal mosaic. In: "Photoreceptors". Eds. A. Borsellino and L. Cervetto, Plenum, 319-350.
- FRANCESCHINI, N. (1985). Early processing of colour and motion in a mosaic visual system. Neurosci. Res. Suppl. 2, 17-49.
- FRANCESCHINI, N. and KIRSCHFELD, K. (1976). Le contrôle automatique du flux lumineux dans l'oeil composé des Diptères. Biol. Cybern. 21, 181-203.
- GIBSON, J.J. (1973). "The ecological approach to visual perception", Ed. Houghton Mifflin Company.
- HARDIE, R.C., FRANCESCHINI, N., RIBI, N., KIRSCHFELD, K. (1981). Distribution and properties of sex-specific photoreceptors in the fly *Musca Domestica*. J. comp. Physiol., 145: 139-152.
- HAUSEN, K. (1981). Monocular and binocular computation of motion in the lobula plate of the fly. Verh. Dtsch. Zool. Ges., 1981: 49-70.
- HEISENBERG, M., BUCHNER, E. (1977). The role of retinula cell types in visual behaviour of *Drosophila melanogaster*. J. comp. Physiol. 117: 127-162.
- KIRSCHFELD, K. and FRANCESCHINI, N. (1969). Ein Mechanismus zur Steuerung des Lichtflusses in den Rhabdomeren des Komplexauges von *Musca*. Kybernetik, 6, 13-22.
- Mc CANN, G.D., ARNETT, D.W. (1972). Spectral and polarization sensitivity of the dipteran visual system. J. gen. Physiol., 59: 534-558.
- POGGIO, T., REICHARDT, W. (1976). Visual control of orientation behaviour in the fly. Quart. Rev. Biophys., 9, 311-375 et 377-438.

- REICHARDT, W. (1961). Autocorrelation a principle for the evaluation by the control nervous system. In: "Sensory communication", Ed. W.A. Rosenblith. J. Wiley, New York, 303-318.
- RIEHLE, A., FRANCESCHINI, N. (1984). Motion detection in flies: parametric control over ON-OFF pathways. Exp. Brain Res., 54: 390-394.
- ULLMAN, S. (1981). Analysis of visual motion by biological and computer systems. Computer, August: 58-69.

RESUME

Cette étude fait partie d'un projet à longue échéance qui se propose de réaliser un robot mobile autonome doté d'un système de vision reposant sur un traitement de signal similaire à celui que l'on rencontre dans l'oeil composé de la mouche.

La navigation "à vue" de cet engin sera régie par deux systèmes de contrôle inspirés directement d'études faites sur le comportement optomoteur et la réaction d'atterrissage de la mouche.

La pièce maîtresse sera un appareil visuel appelé: détecteur élémentaire de mouvement (D.E.M.). Il a fait l'objet de nombreuses recherches électrophysiologiques, notamment dans le laboratoire de Monsieur FRANCESCHINI.

Une approche interdisciplinaire a permis d'étudier et de réaliser un circuit électronique capable d'évaluer la vitesse d'objets se déplaçant dans un sens défini.

Ces travaux ont suscité de nombreuses discussions. Il est certain que lors de la réalisation du système complet de vision, de nouvelles voies de recherches naîtront dans le domaine des Neurosciences.