

MODELISATION DE LA RETINE DES VERTEBRES

Application à la détection de mouvements

G. Bouvier, A. Mhani, W. Beaudot, J. Hérault

Laboratoire de Traitement d'Images et Reconnaissance de formes,
 Institut National Polytechnique de Grenoble,
 46 Avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex 1, France

RÉSUMÉ

Nous présentons dans cet article un modèle de réseau de neurones issu d'études faites sur le traitement du signal dans les systèmes biologiques.

Ces travaux nous ont permis de trouver un modèle de réseau de neurones à deux couches de filtres, qui possède des propriétés de filtrage particulièrement intéressantes en traitement du signal bidimensionnel et notamment pour l'analyse d'objets en mouvement dans des séquences d'images. Ce traitement analogique du signal permet un filtrage temporel continu performant tout en facilitant la réalisation d'un circuit à faible consommation d'énergie.

Nous présentons le modèle de réseau utilisé, ses propriétés au sens du filtrage d'images et les résultats obtenus sur des séquences d'images ainsi qu'une étude de faisabilité VLSI en vue de la réalisation d'une rétine pour caméra, sensible aux mouvements.

ABSTRACT

In this paper, we present a model of neural network which result studying the biological systems with the signal processing tools.

This work allows us to find a two layers filtering. Properties are particularly interesting in two-dimensions signals processing provide a continuous temporal filtering and an easy implantation of a low power consumption circuit.

We will present the two layers model, these filtering images properties, and the experimental results in images sequence.

Finally we discuss a VLSI realisation of retina for motion sensitive camera.

1. Introduction

Les systèmes biologiques excellent dans la communication senso-motricielle. Des études [1] ont montré que le mouvement est détecté très tôt dans le système visuel des insectes et des vertébrés.

Les travaux effectués au laboratoire sur la modélisation de la rétine [14] ont mis en évidence des propriétés de filtrage spatio-temporel bien adaptées au domaine de la perception visuelle.

A partir des données neurobiologiques structurales, il a été défini un modèle de réseau qui utilise une structure à deux couches conformément aux données biologiques. Une première couche modélise le réseau bidimensionnel de la couche plexiforme externe et l'influence du couplage entre les photorécepteurs (cônes). Une seconde couche modélise le réseau bidimensionnel de la couche plexiforme interne.

Ce type de filtre présente des propriétés remarquables du point de vue traitement du signal et simplicité de structure. Une réalisation intégrée a été étudiée.

2. La Rétine biologique

La rétine, est le tissu neuronal tapissant le globe oculaire, elle transforme les rayons lumineux en signaux nerveux. On sait que cette minuscule structure de système nerveux extrait rapidement toutes les caractéristiques essentielles d'une scène avant transmission au cerveau.

La figure 1 montre la structure la plus couramment admise de la rétine des vertébrés.

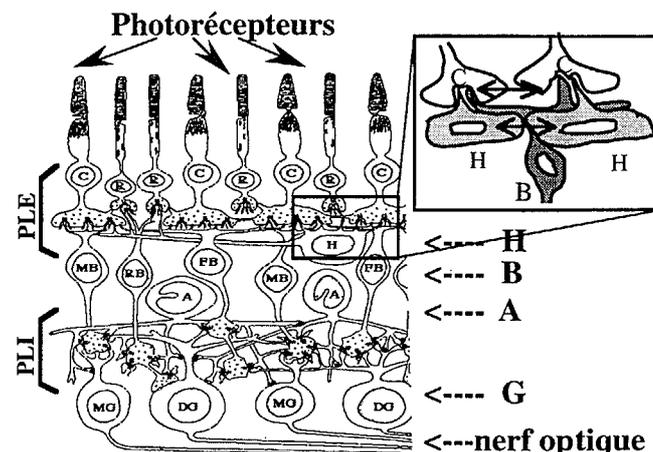


Fig. 1 : Structure de la rétine des vertébrés.



Les photorécepteurs (**Cônes**) transforment la lumière incidente en potentiel électrique. Les cellules horizontales (**H**) sont connectées aux photorécepteurs et aux cellules bipolaires voisines (**B**), elles assurent le couplage spatial au niveau de la couche plexiforme externe (**PLE**).

Chaque cellule bipolaire (**B**) assure la liaison entre les couches **PLE** et **PLI** (plexiforme interne). Ces cellules reçoivent les signaux en provenance des cônes et des cellules ganglionnaires (**G**), pour générer un signal proportionnel à la différence de ces deux signaux. Les cellules amacrines (**A**) assurent les interactions spatiales et temporelles au niveau de la couche **PLI**.

La rétine peut être modélisée par deux couches de réseaux à interactions latérales, une au niveau de la **PLE**, avec couplage spatial par les cellules horizontales et une couche au niveau de la **PLI**, avec couplage spatial par les cellules amacrines.

3. Un modèle électrique de rétine

Des modèles de rétine de vertébrés ont déjà été proposés dans la littérature scientifique, [2], [3], [7]. Ces modèles ne tiennent compte bien souvent que de la couche plexiforme interne **PLI** (figure 2).

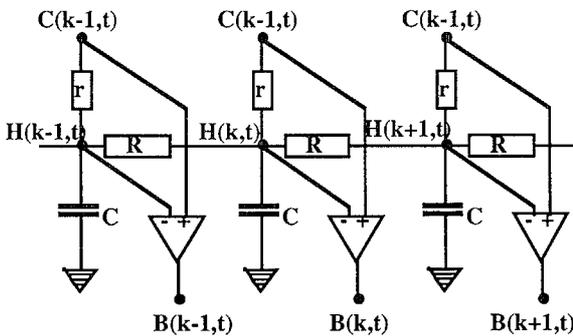


Fig. 2 : Modèle électrique simplifié de rétine.

La fonction de transfert de ce réseau est donnée par les expressions suivantes dans lesquelles les paramètres des réseaux, sont :

$$\alpha_h = r/R \quad \text{constantes d'espace des réseaux (filtrage spatial),}$$

$$\tau_h = r.C \quad \text{constantes de temps des réseaux (filtrage temporel).}$$

Sachant que la fonction de transfert entre l'entrée d'une cellule photosensible et le noeud correspondant du réseau est :

$$F_h(f_x, f_t) = \frac{H(f_x, f_t)}{C(f_x, f_t)} = \frac{1}{1 + 2\alpha_h(1 - \cos(2\pi f_x)) + 2j\pi f_t \tau_h}$$

La fonction de transfert du réseau est alors

$$G(f_x, f_t) = \frac{B(f_x, f_t)}{C(f_x, f_t)} = 1 - \frac{H(f_x, f_t)}{C(f_x, f_t)} = 1 - F_h(f_x, f_t)$$

Le comportement spatial est donné pour $f_t = 0$, et le comportement temporel $f_x = 0$.

Un certain nombre d'observations ont mises en évidence l'existence d'un couplage entre les cellules photo réceptrices [14]. Pour développer un modèle plus réaliste et plus performant, nous l'avons complété en prenant en compte le couplage au niveau de la couche **PLE** réalisé par les cellules horizontales, conformément au modèles biologiques (figure 3).

Ce couplage a été introduit dans le modèle par l'ajout d'une couche entre les photorécepteurs: résistance R_c qui modélise le couplage entre les cônes, C_c et r_{fc} , qui modélisent la capacité et la résistance de fuite membranaire.

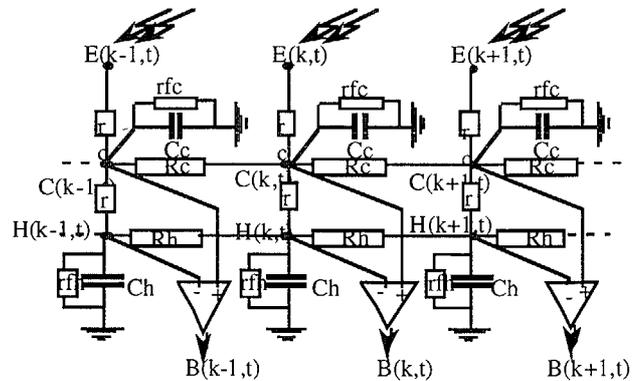


Fig. 3: Modèle utilisé pour la détection de mouvement

On peut pour cette rétine définir les paramètres suivants :

$$\alpha_c = r_c/R_c, \alpha_h = r/R_h \quad \text{constantes d'espace des réseaux (filtrage spatial),}$$

$$\beta_c = r_c/r_{fc}, \beta_h = r_h/r_{fh}, \quad \text{constantes de fuite des réseaux,}$$

$$\tau_c = r_c.C_c, \tau_h = r.C_h \quad \text{constantes de temps des réseaux (filtrage temporel).}$$

La fonction de transfert pour chacune des couches est :

$$F_h(f_x, f_t) = \frac{C(f_x, f_t)}{E(f_x, f_t)} = \frac{1}{1 + \beta_h + 2\alpha_h(1 - \cos(2\pi f_x)) + j2\pi f_t \tau_h}$$

$$F_c(f_x, f_t) = \frac{H(f_x, f_t)}{C(f_x, f_t)} = \frac{1}{1 + \beta_c + 2\alpha_c(1 - \cos(2\pi f_x)) + j2\pi f_t \tau_c}$$

soit pour la rétine complète :

$$G(f_x, f_t) = \frac{B(f_x, f_t)}{E(f_x, f_t)} = F_c(f_x, f_t) [1 - F_h(f_x, f_t)]$$

La figure 4 présente la fonction de transfert du modèle qui reflète le caractère de filtre spatio-temporel.

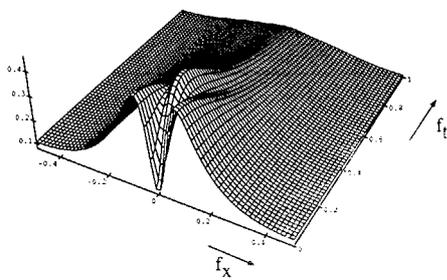


Fig. 4 : Réponse spatio-temporelle du modèle de rétine.
 ft : la fréquence temporelle
 fx : la fréquence spatiale

Les caractéristiques essentielles de ce type de réseau sont :

- comportement spatial passe-bande aux basses fréquences temporelles,
- comportement temporel passe-bande à bande large aux faibles fréquences spatiales,
- comportement spatial passe-bas pour une gamme de hautes fréquences temporelles,
- comportement temporel passe-bas pour une gamme de hautes fréquences spatiales.

Ces propriétés confèrent au réseau des propriétés intéressantes dans le domaine du traitement des séquences d'images.

Application à la détection d'objets en mouvement dans une image

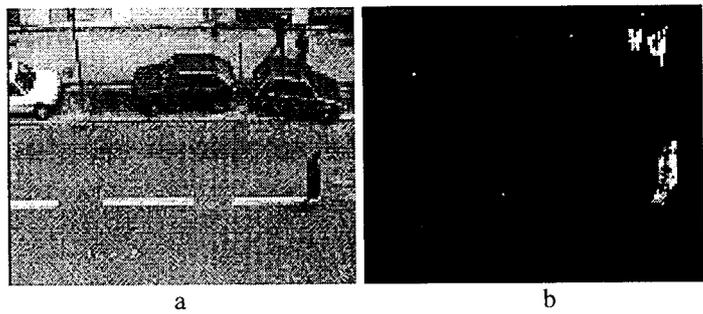


Fig. 5 : Application de ce filtre à une image réelle.
 a) scènes source
 b) Objets détectés en mouvement dans la séquence d'images sources.

4. Réalisation VLSI

La structure matricielle de la rétine, les signaux délivrés par les photocapteurs sont tout à fait compatibles avec une réalisation analogique, [13]. Le traitement local de l'information au niveau de chaque

pixel est intéressant pour effectuer ces traitements directement au niveau des capteurs et en temps réel [3], [4], [5], [6], [8].

Cependant des précautions doivent être prises, pour maîtriser les effets photoélectriques dans une technologie CMOS, pour restreindre l'effet photoélectrique aux cellules réceptrices, ce qui nécessite une protection de l'ensemble du circuit, pour limiter la consommation de courant dans le cas d'une matrice de grandes dimensions (100x100), les transistors sont utilisés en régime de faible inversion (sous la tension de seuil).

Les photorécepteurs sont des diodes de (100µm/100µm), deux transistors effectuent la conversion photocourant/tension selon une loi logarithmique. Les résistances horizontales et verticales sont des circuits actifs pour des valeurs de résistances de l'ordre de 10⁹ Ω. Les capacités utilisent pour leur réalisation la capacité grille-substrat du transistor MOS, ce qui donne le meilleur rapport surface/capacité, [11],[12].

La sensibilité de la rétine aux vitesses est fonction des constantes de temps du réseau. Pour des constantes τ = 0.15ms, nous devons prendre des dimensions de capacités importantes : 230µm/30µm. La largeur de la bande passante des filtres est éloignée des valeurs biologiques (τ = 1ms), de ce fait le circuit réalisé présente une faible sensibilité aux vitesses de déplacement des objets de la scène, nous ne pouvons détecter que les objets ayant une vitesse relativement grande (70km/h).

Dans le réseau monodimensionnel de la figure 6, la surface est principalement utilisée pour les capacités des deux couches et les photodiodes.

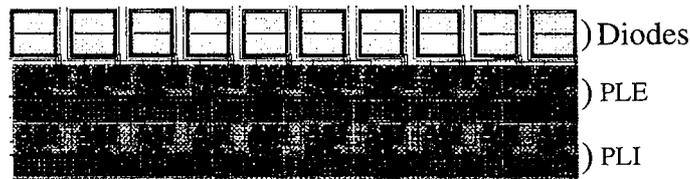


Fig. 6 : Rétine monodimensionnelle du modèle à deux couches.

5. Résultats expérimentaux

La biologie donne la réponse d'une cellule bipolaire de la rétine des vertébrés à un stimulus lumineux (figure 7).

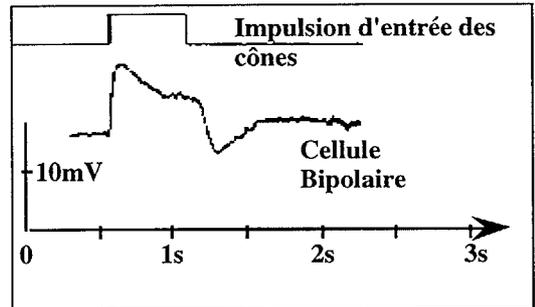


Fig. 7 : Données sur la réponse d'un réseau



Les mesures effectuées sur le réseau réalisé montrent (figure 8) la similitude des réponses mesurées avec la biologie, à un facteur d'échelle temporel près.

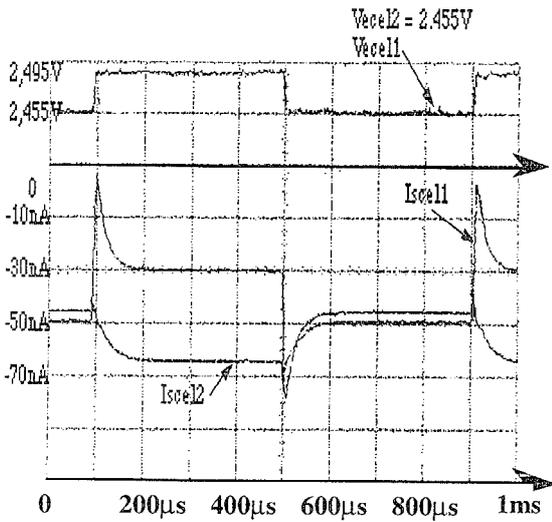


Fig. 8: Réponse de la rétine électronique à une impulsion de la tension d'entrée (V_{cell}).

Nous avons une réponse à antagonisme centre-périphérie analogue à celui qui existe au niveau de la rétine des vertébrés.

6. Conclusion

Les systèmes biologiques mettent en oeuvre des méthodes de filtrage différentes des méthodes classiques en traitement du signal.

Ces traitements analogiques semblent a priori manquer de précision, mais dans bien des cas de pré traitement de matrices de données, ils présentent l'avantage de pouvoir être associés directement aux capteurs qui font alors partie intégrante de la chaîne de traitement et les résultats obtenus satisfont largement les besoins.

Les résultats obtenus soit par simulations logicielles, soit par simulations électriques, montrent :

- la validité des résultats du traitement analogiques,
- la robustesse des algorithmes de filtrage spatio-temporel neuromimétiques pour la détection d'objets en mouvements dans des séquences d'images,
- la faisabilité d'une rétine intégrée, bien que subsistent comme prévu des difficultés de réalisation

des capacités (C_c, C_h) pour obtenir des constantes de temps plus proches de la biologie, nécessaires pour détecter des vitesses de quelques mètres par secondes.

D'après les résultats obtenus en simulation pour des propriétés d'extraction de contours, de détection de mouvements en temps réel et par les tests des composants élémentaires, sur la matrice ligne de 10 pixels, nous avons conçu une matrice carrée de taille 10x10 pixels. Cette matrice contient toutes les fonctionnalités d'un réseau matriciel, accès en entrée par photodiodes et sortie par balayage analogique des

pixels du réseau. Cette rétine est en cours de tests.

La réalisation de ces rétines a été faite en collaboration avec le CNET-CNS et bénéficie de son support au titre du marché n° 93 3B.

7. Références

- [1] P.B. Detweiler et A.L. Hodgkin. "Electrical coupling between cones in turtle retina." *Journal of physiology*, Londre, 291:75 -100 1979.
- [2] J.E. Dowling. "The retina: An approachable part of the brain." MA: Harvard University Press, Cambridge 1987.
- [3] C. Mead. "Analog VLSI and Neural Systems." Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [4] A. G. Andreou. "Synthetic neural systems using current-mode circuits." in Proc. IEEE 1990 Int. Symp. Circuits and Syst. (New Orleans), May 1990.
- [5] M. A. Mahowald. "Silicon rétine with adaptative photorecepteur." Symposium on electronic science and technologie, Orlando avril 1991.
- [6] M. Sami et J. Calzadilla. "Silicon Architectures for Neural Nets." Elsevier Science Publishers B.V. North-Holland édition, 1991.
- [7] K.A. Bohaen, A.G. Andreou. "A contrast Sensitive Retina with Reciproqual Synapses." In D.S Touretzky, editor, *Advances in Neural Information Processing Systems 4*, 764-772, CA: Morgan Kaufmann, 1992.
- [8] T. Bernard. "Des rétines artificielles intelligentes." Thèse Université, Paris-sud, Centre d'Orsay, Octobre 1992.
- [9] Jin Luo and Christof Koch. "Figure-Ground Segregation Using an Analog VLSI Chip." *IEEE Micro* 1992.
- [10] T. Delbuk, and C. A. Mead. "Scanners for use in visualizing analog VLSI circuitry." in press, 1992.
- [11] A. Mhani. "Rétine en silicium pour la compression d'image." DEA micro-électronique, INPG, juin 1993.
- [12] B. Pellat. "Conception d'une cellule neuromimétique pour une rétine en silicium." DEA micro-électronique, INPG, juin 1993.
- [13] E. Vittoz and X. Arreguit. "Linear networks based on transistors." *Electronics letters*, vol. 29, pp. 297-299, February 4, 1993.
- [14] W. Beaudot. "Le traitement neuronal de l'information dans la rétine des vertébrés." Thèse INPG, Décembre 1994.
- [15] A. Mahni, G. Bouvier, J. Herault. "A contrast and motion-sensitive silicon rétine." (acceptée à ESSIRC-95, Lille, septembre 1995).