



**HAL**  
open science

# Amélioration du contraste dans les séquences d'images de luminance par modélisation de l'architecture de la couche ple de la rétine

Bernard Heit, François Devillard, Gérard Brunelot

► **To cite this version:**

Bernard Heit, François Devillard, Gérard Brunelot. Amélioration du contraste dans les séquences d'images de luminance par modélisation de l'architecture de la couche ple de la rétine. 4ème conférence internationale sur l'automatisation industrielle, AIAI 2003, Jun 2003, Montréal, Canada. pp.TS-11. hal-00119004

**HAL Id: hal-00119004**

**<https://hal.science/hal-00119004>**

Submitted on 7 Dec 2006

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**B. Heit<sup>1</sup>, F. Devillard<sup>2</sup>, G. Brunelot<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Université Henri Poincaré – Nancy 1      Equipe Instrumentation Intelligente – ESSTIN  
2 rue Jean Lamour - 54500 Vandoeuvre les Nancy Cedex  
Tél. : 03 83 68 51 31, Fax : 03 83 68 50 01      e-mail : [bernard.heit@esstin.uhp-nancy.fr](mailto:bernard.heit@esstin.uhp-nancy.fr)

<sup>2</sup> Centre de Recherche en Automatique de Nancy UMR CNRS 7039 (CRAN - CNRS) Groupe IRIS  
11 rue de l'université 88100 Saint-Dié des Vosges  
Tel: 03 29 53 60 34 , Fax: 03 29 53 60 18, Email : [francois.devillard@cran.iutsd.uhp-nancy.fr](mailto:francois.devillard@cran.iutsd.uhp-nancy.fr)

Abstract: Currently, the knowledges of the mammal visual systems allow the design of new methods for computer vision. These methods try to benefit some properties observed in the visual system. In this paper, our research works use some known mechanisms of the rétinien perception. We have designed a artificial retina that implements the first layers dedicated to the basic contrast perception. The contrast detection and estimation are very important because they are the first steps to a lot of high level treatments in image processing.

Keywords : Human visual system, biological retina, Contrast, enhancement, image formation and analysis

## 1. RESUME

Cette contribution, guidée par les aspects biologiques de la vision des mammifères, tire profit des mécanismes de perception du contraste. Elle s'appuie sur une modélisation architecturale et fonctionnelle de la couche plexiforme externe (PLE) de la rétine photopique du système visuel des mammifères. La solution originale obtenue permet d'intégrer des mécanismes d'adaptation rétinienne sous une forme d'architecture distribuée. Le filtrage, continu dans le temps, réalisé sur l'information lumineuse reçue, rend cette approche plus performante et robuste. Elle peut, de plus, satisfaire aux contraintes d'implémentation imposées par les applications de vision embarquées dans un objectif de détection de primitives élémentaires caractérisant les formes dans les images.

## 1. INTRODUCTION

Le mécanisme de la vision commence par le traitement des images mises au point sur la rétine [1] [2]. Plus qu'un simple damier de photorécepteurs qui transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique, la rétine comporte plusieurs couches de neurones qui effectuent une première analyse du message. Cette image oculaire sort de la rétine au niveau des cellules ganglionnaires dont les axones forment le nerf optique. Cette première analyse peut se faire grâce aux propriétés particulières des cellules rétinienne et surtout leur organisation en champ récepteur [3].

Une des fonctions principales de la rétine est sa capacité de transmettre un signal lumineux avec une grande sensibilité au contraste malgré une large gamme d'intensité lumineuse. Le contraste est lié à la différence de niveaux gris entre une zone claire et une zone foncée de l'image, c'est une notion avant

tout subjective pour laquelle il n'existe pas de définition. Son appréciation dans les images naturelles justifie les nombreux travaux déjà réalisés [4].

## 2. LES PROCESEURS RETINIENS

Dans le système visuel, le champ récepteur d'un neurone couvre une région rétinienne sur laquelle un stimulus visuel adéquat (forme, couleur, mouvement...) déclenche l'activité de ce neurone. Le câblage particulier mis en œuvre rend le système sensible à la différence entre l'intensité d'éclairage d'un point et celle de ses voisins. Il en est extrait le contraste spatial.

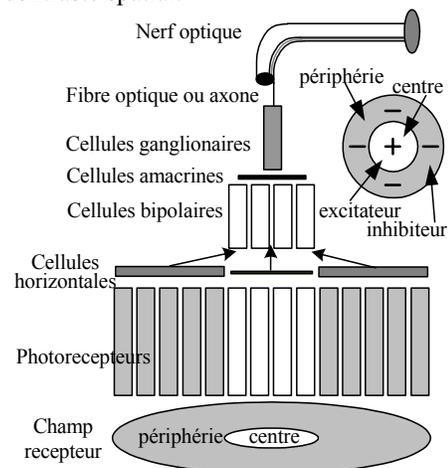


Figure 1 : Synoptique du trajet de l'information visuelle à travers les différentes couches rétinienne.

Le champ récepteur se définit par ses caractéristiques internes : son centre et sa périphérie. Chacune d'elles peut

être inhibitrice ou négative notée OFF (inhibition latérale) ou encore excitatrice ou positive notée ON (excitation latérale).

### 3. LES MECANISMES RETINIENS

Le circuit des cônes de la couche plexiforme externe, objet de nos travaux, résulte de la superposition de deux réseaux de cellules, l'un est situé dans la direction du flux d'information, tandis que l'autre est transversal. Dans la direction du flux d'information, les signaux issus des cônes alimentent les cellules bipolaires, qui assurent le rôle d'interface avec les cellules ganglionnaires. Le premier élément du circuit transversal est l'interconnexion bidirectionnelle des cônes par des synapses électriques.

Comme l'illustre la figure 1, l'action des cellules horizontales est l'inhibition latérale qui fournit une valeur de référence, laquelle est comparée avec le signal d'entrée. Soustraire une moyenne locale (spatio-temporelle) permet alors à l'œil de percevoir les détails aussi bien dans les zones illuminées ou sombres de scènes à fort contraste. La réponse non linéaire des cônes identifiée par la loi de Michaelis-Menten [4] permet à la couche d'adapter la dynamique de réponse du cône à l'intensité moyenne locale et en plus d'accentuer le lissage temporel sur les faibles contrastes. Dans des conditions d'éclaircements photopiques, cette loi par sa forme pseudo-logarithmique en statique permet aux cellules bipolaires d'estimer par une différence à la sortie le contraste local comme un rapport d'intensités du centre sur la périphérie. Cette définition du contraste et les seuils de leur perception sont donnés dans de nombreux ouvrages traitant de la perception psychocognitive [5].

### 4. APPROCHE ALGORITHMIQUE DE LA COUCHE PLE DE LA RETINE

Notre modélisation s'inspire du modèle B présenté par W. Beaudot [5] donnant une solution numérique par un filtrage de Shen et Castan [6]. Notre approche est basée sur une prise d'images continue d'une scène fixe ce qui élimine la notion de temps au sens séquence d'images. De plus, pour faciliter la compréhension, nous ne développons les équations que sur un axe. Enfin, il est important dans notre architecture de reproduire les principaux couplages afin de mieux approcher ses caractéristiques d'adaptation.

Dans notre modélisation de la rétine représentée par la figure 2, les valeurs des coefficients  $a$  et  $b$  sont les constantes (réelles  $\in \mathfrak{R}$ ) spatiales du système,  $\Delta$  le retard dû à l'échantillonnage,  $c$  et  $h$  les variables intermédiaires représentant respectivement les couches de cônes et horizontales.

La couche F1 (circuit des cônes) possède 3 coefficients que sont  $b_1$ ,  $r_1$  et  $a_1$  :

- Les coefficients  $b_1$  et  $r_1$  règlent respectivement les réponses statique et dynamique du cône.
- Le couple  $b_1$  et  $r_1$  paramètre la composante de réponse directe du synapse du cône excité par de la lumière (phototransduction du cône).
- Le coefficient  $a_1$  contribue au couplage entre 2 cônes voisins.

- Le coefficient  $a_1$  paramètre la composante de la réponse créée par le synapse latéral du cône excité par son voisin (couplage latéral).

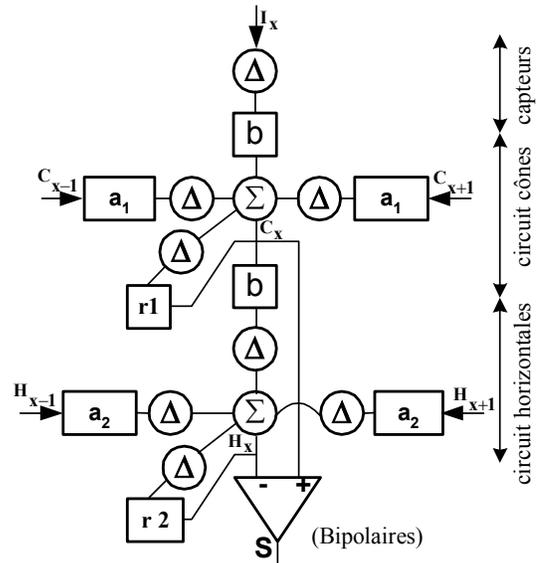


Figure 2 : schéma de la couche PLE sur l'axe X

La couche F2 (circuit des cellules horizontales) possède aussi 3 coefficients  $b_2$ ,  $r_2$  et  $a_2$  :

- Les coefficients  $b_2$  et  $r_2$  règlent respectivement les réponses statique et dynamique de l'horizontale.
- Le couple  $b_2$  et  $r_2$  paramètre la réponse directe de la synapse chimique de la cellule horizontale excitée par les cônes.
- Le coefficient  $a_2$  contribue au couplage entre 2 cellules horizontales voisines.
- Le coefficient  $a_2$  paramètre la composante de réponse créée par la synapse latérale de l'horizontale excitée par sa voisine.

Pour finir, la différence entre les 2 couches correspond à l'action de la cellule bipolaire qui différencie les informations transmises par les synapses du cône et des horizontales.

La structure du filtre rend le calcul obligatoirement itératif et la récurrence sur l'axe X de la PLE est donnée par l'équation suivante :

$$c_{x,t} = a_1 (c_{x-1,t-\Delta t} + c_{x+1,t-\Delta t}) + b_1 i_{x,t-\Delta t} + r_1 c_{x,t-\Delta t}$$

$$h_{x,t} = a_2 (h_{x-1,t-\Delta t} + h_{x+1,t-\Delta t}) + b_2 c_{x,t-\Delta t} + r_2 h_{x,t-\Delta t}$$

$$s_{x,t} = h_{x,t} - c_{x,t}$$

avec  $r_1 = e^{-\Delta t / T_1}$  et  $r_2 = e^{-\Delta t / T_2}$

Les variables des équations récurrentes correspondent à :

- $x$  : la position du pixel sur l'image avec  $\Delta x=1$
- $n$  : indice d'échantillon lié au calcul  $t = n \cdot \Delta t$
- $T$  : périodicité de renouvellement de l'image d'entrée : périodicité de la séquence d'images
- $T_1$  et  $T_2$  : constantes de temps des deux filtres
- $r$  : persistance rétinienne

## 5. CARACTERISATION DU FILTRE

En posant  $\Delta_t = 1$  et  $\Delta_x = 1$ , nous pouvons représenter une des couches de la figure 2 (schéma de la couche PLE sur l'axe X) par le graphe de fluence de la figure 3 :

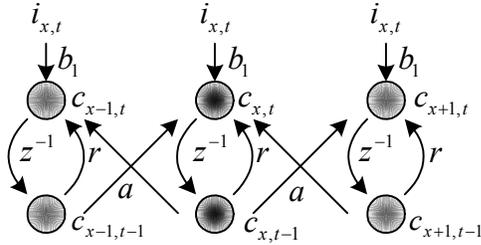


Figure 3 : diagramme de fonctionnement d'une couche de la rétine

La fonction de transfert de chaque couche est exprimée pour le temps en transformée en z et l'espace en transformée de Fourier discrète.

Soient  $F_1$  la fonction de transfert de la couche des cônes et  $F_2$  celle de la couche des cellules horizontales :

$$F_1(\omega_x, z) = \frac{c(\omega_x, z)}{i(\omega_x, z)} = \frac{b_1 z^{-1}}{1 - 2a_1 \cos(\omega_x) z^{-1} - r_1 z^{-1}}$$

$$F_2(\omega_x, z) = \frac{h(\omega_x, z)}{c(\omega_x, z)} = \frac{b_2 z^{-1}}{1 - 2a_2 \cos(\omega_x) z^{-1} - r_2 z^{-1}}$$

avec  $z = e^{p\Delta t}$  correspondant au retard et  $\Delta_x = 1$ .

La réponse des cellules bipolaires s'exprime comme la différence de la couche des cônes et des horizontales.

Le spectre F du filtre résultant peut être exprimé par l'équation suivante :

$$F(\omega_x, z) = F_1(\omega_x, z) (1 - F_2(\omega_x, z))$$

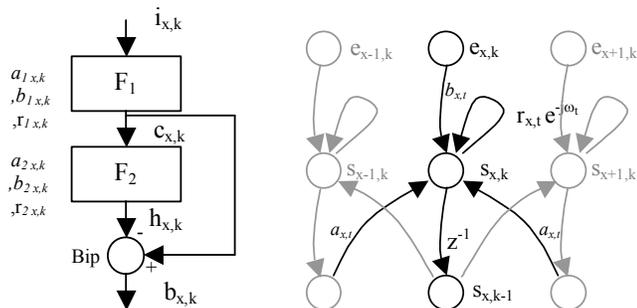


Figure 4 : [a] Architecture globale de la rétine modèle B composée des 2 couches de lissage Fc et Fh - [b] Fonction de transfert d'une couche de lissage d'entrée e et de sortie s sous forme d'un graphe de fluence.

La fonction de transfert globale de la couche PLE :

$$F(\omega_x, z) = b_1 \cdot \frac{(z - z_2 - b_2)}{(z - z_1)(z - z_2)}$$

$$\text{avec } z_1 = 2a_1 \cos(\omega_x) + r_1$$

$$z_2 = 2a_2 \cos(\omega_x) + r_2$$

Cette fonction est composée de 2 pôles d'instabilité  $z_1$  et  $z_2$  et d'un zéro égal à  $z_2 + b_2$ . Le coefficient  $b_1$  agit comme un gain proportionnel de la rétine.

La fonction de transfert doit être stable dans le temps quelles que soient les fréquences spatiales des images traitées. La condition de stabilité pour une réponse non oscillante est obtenue par l'inéquation suivante : pour  $a, b, r$  réels alors

$$\forall \omega_x [\pi, -\pi] \quad 0 \leq z_1 \text{ et } z_2 \leq 1$$

$$\text{alors } 0 \leq \pm 2a_1 + r_1 \leq 1 \text{ et } 0 \leq \pm 2a_2 + r_2 \leq 1$$

### Conditions de réglage du filtre

La fonction de transfert spatiale en régime stabilisé, donc pour  $z = 1$ , nous donne pour gain :

$$F(\omega_x, \omega_t = 0) = b_1 \cdot \frac{(1 - z_2 - b_2)}{(1 - z_1)(1 - z_2)}$$

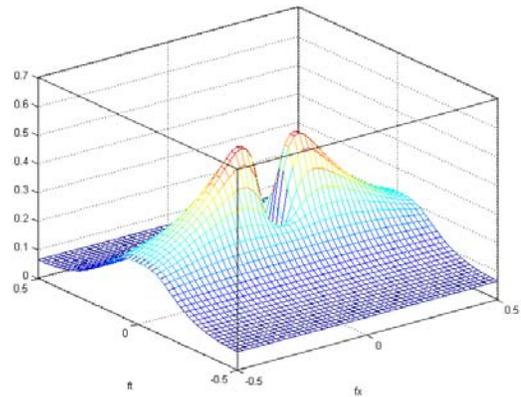


Figure 5 : gain du spectre spatial en fonction Ft et Fx avec les coefficients  $b_1$  et  $b_2$  de réglage adapté tout en conservant la stabilité par les coefficients  $a$  et  $r$ .

- Pour obtenir une réponse stable dans le temps lorsque l'image d'entrée  $i$  est constante dans le temps, on doit avoir :  $1 - z_1 \leq 1$  et  $1 - z_2 \leq 1$  soit pour  $\omega_x \in [-\pi, +\pi]$

Les racines sont alors :

$$z_1 = 2a_1 \cos(\omega_x) + r_1 \leq 0$$

$$\text{et } z_2 = 2a_2 \cos(\omega_x) + r_2 \leq 0$$

- Pour obtenir une réponse non oscillante

$$0 \leq \pm 2a_1 + r_1 \leq 1$$

$$0 \leq \pm 2a_2 + r_2 \leq 1$$

- Pour obtenir une réponse nulle dans le temps lorsque l'image d'entrée  $i$  est constante dans le temps et spatialement, on doit avoir :

$$1 - (z_2 + b_2) = 0 \text{ qui nous donne pour } \omega_x = 0 :$$

$$z_2 + b_2 = 2a_2 \cos(\omega_x) + r_2 + b_2 = 1$$

d'où  $2a_2 + b_2 + r_2 = 1$

### Equilibre en régime statique

La réponse indicielle montre le temps durant lequel le réseau est en régime transitoire  $\tau$  qui doit respecter  $\tau = n \cdot \Delta t < i_1 - i_0$  sachant que  $i_1 - i_0 = T (ms)$  qui est le temps entre deux images vidéo acquises, pour ne pas introduire un défaut de convergence du filtre.

Pour une réponse donnée, la valeur «  $n$  » au-delà de laquelle on a l'équilibre statique est fonction des 2 coefficients  $a_1$  et  $a_2$  utilisés. La couche utilisant une valeur «  $a$  » maximale conditionnera la durée «  $n$  » du régime transitoire de l'ensemble. Le nombre d'itérations à effectuer pour obtenir la solution statique est maximisé par la valeur «  $n$  » (figure 6). Il est à noter qu'en pratique les séquences d'images  $i$ , échantillonnées dans des conditions de variations situées au-dessous des limites de Shannon, nécessiteront un nombre d'itérations plus faible et contrôlé par calcul.

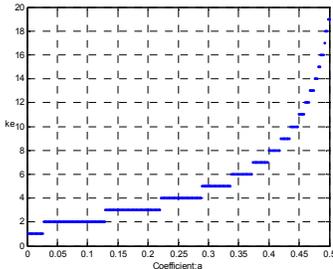


Figure 6 : Nombre maximal d'itérations «  $n$  » nécessaires à l'équilibre statique ( $r=0$ ) d'une couche de régularisation de gain BF statique égal à 1. La réponse indicielle est obtenue à 95% en fonction du coefficient «  $a$  » et indépendante de «  $b$  ».

### 6. RESULTATS

L'algorithme décrit précédemment est appliqué à la 2D. La rétine répond à un stimulus par un champ récepteur ON/OFF représentant la réponse de bipolaires naines de la couche PLE. Cette réponse est caractérisée par une forme comparable à une réponse d'opérateur de type DOG.

Nous avons, de plus, la capacité à régler avec notre architecture la taille des champs de récepteur. Ainsi, en fonction du réglage des coefficients  $a_1$  et  $a_2$  on peut moduler :

- La taille du champ périphérique constituant la zone des cellules inhibées dite OFF (diamètre > 30 pixels).
- ou la taille du champ central de type ON (diamètre maximal de 6 pixels). Le réglage du centre ON est par contre plus limité.

La cellule bipolaire, par la différenciation de ces 2 zones, estime donc le contraste local [7].

Les résultats obtenus par cette architecture modélisent les connexions proches des cellules rétinienne de la PLE. Le champ récepteur généré par cette organisation spécialise la rétine dans une résolution relativement fine. L'estimation de l'intensité moyenne autour du centre peut-être très étendue pour réduire l'influence des perturbations locales. Mais

l'augmentation de la taille du champ récepteur pour travailler à plus faible résolution est possible, mais va augmenter le coût calcul entraîné par une convergence plus lente du filtre entre deux modifications de l'entrée.

### 7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les travaux présentés offrent une alternative aux techniques classiques de traitements tout en utilisant des opérateurs connus, en les modifiant selon les propriétés du modèle biologique, tout en conservant les caractéristiques essentielles qui engendrent la dynamique du comportement. L'approche choisie par le traitement de signal offre des outils bien adaptés à la mise en évidence des caractéristiques tout en conservant la composante temporelle continue. De plus, nous recherchons des algorithmes facilement implémentables en temps réel sur calculateurs.

La structure du filtre présenté modélise la couche PLE de la rétine. Son architecture distribuée autorise des adaptations localisées des paramètres et une implantation aisée sur calculateur. Les premiers résultats obtenus nous permettent d'envisager quelques modifications qui nous apporteront des propriétés intéressantes. Nous avons réalisé des essais visant à simuler des réactions locales de la rétine à la moyenne de l'intensité d'éclairement. Ces essais sont :

- la modulation de la taille des champs récepteurs équivalents (action de la dopamine).
- et l'introduction de la loi phototransduction de Michaelis-Menten au niveau de la couche F1.

La modulation de la taille des champs récepteurs permet de détecter les contrastes locaux avec une résolution variant en fonction de l'intensité moyenne de l'éclairement. Dans les zones sombres à faible rapport signal sur bruit, la rétine a tendance à étaler le champ récepteur pour mieux évaluer les contrastes.

L'introduction de la phototransduction des cônes apportera deux avantages. D'une part, d'adapter la réponse du cône à l'éclairement local par une compression de dynamique et par sa nature logarithmique de mieux discriminer les réflectances par la différenciation des bipolaires. D'autre part, elle réduit le bruit dans les zones faiblement lumineuses.

### REFERENCES

- [1] C.A. Mead and M.A. Mahowald - "A silicon model of early visual processing", Neural Networks, n°1, pp. 91-97, 1988.
- [2] D. Marr and E. Hildreth - "Theory of edge detection", Proc. R. Soc. Lond., B 207, pp.187-217, 1980.
- [3] Edward H. Adelson - "Lightness Perception and Lightness Illusions" - In The New Cognitive Neurosciences, 2<sup>nd</sup> ed., M. Gazzaniga, ed. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 339-351, 2000.
- [4] A. Le Negrate, A. Beghdadi, K. Boussaïde-Belkacem - "Quelques traitements bas niveau basés sur une analyse du contraste local- Vision Interface'99, Trois rivières, Canada, 19-21 mai, 2000.
- [5] W.H.A. Beaudot - "Le traitement neuronal de l'information dans la rétine des vertébrés", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1994
- [6] J. Shen. and S. Castan - "Un nouvel algorithme de détection de contours". AFCET INRIA, 5ème congrès, 1985.
- [7] W.F. Shreiber - "Fundamentals of Electronic Imaging Systems". Information Sciences, Third Edition - Springer Verlag.