

# Traitement de bas niveau intégré : Mise en œuvre d'une adaptation aux conditions lumineuses dans un capteur d'images CMOS

GILLES SICARD<sup>1</sup>, HAWRAA AMHAZ<sup>1</sup>, ESTELLE LABONNE<sup>1</sup>, ROBIN ROLLAND<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire TIMA (CNRS - Grenoble INP – UJF)

46, Avenue Félix Viallet, 38031, Grenoble, France

<sup>2</sup> CIME Nanotech

3, Parvis Louis Néel, Minatec, 38000 Grenoble, France

<sup>1</sup>[Gilles.Sicard@imag.fr](mailto:Gilles.Sicard@imag.fr), [Hawraa.Amhaz@imag.fr](mailto:Hawraa.Amhaz@imag.fr), [Estelle.Labonne@imag.fr](mailto:Estelle.Labonne@imag.fr), <sup>2</sup>[Robin.Rolland@inpg.fr](mailto:Robin.Rolland@inpg.fr)

**Résumé** – Ce papier présente un état des travaux effectués ces dernières années dans notre groupe de recherche sur les systèmes intégrés d'adaptation aux conditions lumineuses. Le but de ces systèmes est de proposer, pour une même scène, un histogramme invariant en sortie de matrice, et ce quelle que soient les conditions lumineuses moyennes. Deux architectures différentes sont présentées et deux circuits ont été fabriqués. « Imagyne 2 » propose une solution pour des applications bas coût type grand public tandis que « Imagyne 3 », plus complexe, cible plutôt les applications de type industrielles. Ces circuits ont été fabriqués en technologie AMS CMOS 0,35µm.

**Abstract** – This paper proposes a state of the art of works done in our research group on on-chip light adaptive systems. The aim of this system is to provide, at the output of the pixels array and for the same filmed scene, a constant histogram whatever the mean light condition. Two different architectures are presented and two circuits have been designed. « Imagyne 2 » proposes a solution for standard CMOS imager applications (webcam, ...). « Imagyne 3 » architecture is more dedicated to industrial applications. These circuits has been designed with a CMOS 0,35µm from AMS.

## 1 Introduction : Apport d'une adaptation aux conditions lumineuses

L'architecture des imageurs CMOS de production est figée depuis de nombreuses années. Elle est constituée de trois entités : la matrice photosensible (constituée de pixels contenant de 3 à 5 NMOS) à réponse linéaire (intégration des photons), des amplificateurs colonnes (AC, qui stockent la valeur du pixel plus une valeur de référence, ou « reset »,) et finalement un convertisseur analogique numérique (CAN). En dehors de l'étape de conversion en numérique, la seule fonctionnalité électronique intégrée est une compensation du bruit spatial fixe pixel (FPN) et colonne lié aux dispersions technologiques apparaissant pendant la fabrication [Mendis97]. Ces dernières années, nous avons travaillé sur des possibilités d'améliorations des performances de ces capteurs tout en essayant de ne pas perdre de vue les principales contraintes industrielles : surface pixel minimale, consommation raisonnable, et si une caractéristique est améliorée, les autres doivent rester proches de leurs valeurs habituelles. Ce papier présente les résultats de nos recherches sur l'implémentation de systèmes d'adaptation aux conditions lumineuses.

Le principe est très simple : l'image en sortie du capteur doit être indépendante des conditions lumineuses ambiantes, et ainsi proposer un histogramme constant. Il n'y a donc pas de correction de dynamique ou de gain à prévoir en entrée du système d'imagerie. Cela permet également de simplifier les caméras qui utilisent ces capteurs car les systèmes d'obturation mécanique ou électronique ne sont plus nécessaires.

L'état de l'art est peu abondant sur ce sujet. [Delbruck95] présente un pixel analogique avec une surface du pixel assez importante et une réponse, de type logarithmique, à faible dynamique. [Ni97] propose un système d'égalisation par histogramme adaptatif pour uniformiser la vision d'une scène quelle que soit la luminosité. Les avancées les plus récentes [Brajovic04] proposent des algorithmes permettant de traiter les images de manière à ce que le résultat soit de type vision rétinienne. Les problèmes d'adaptation locale aux conditions lumineuses sont traités et permettent l'obtention d'images à grande dynamique. Les résultats de l'implémentation silicium ne sont cependant pas publiés.

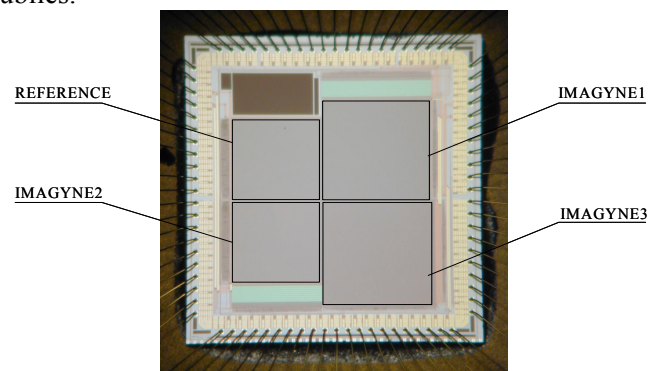


Figure 1 : Photographie du circuit « Imagyne ».

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons conçu deux matrices (figure 1) : "Imagyne 2" est dédié aux applications à caméra bas coût type "grand public". "Imagyne 3" est plutôt dédié aux applications industrielles et propose une architecture totalement repensée et beaucoup plus ouverte d'un point de vue

perspective. Ces deux circuits comportent des matrices de 128 x 128 pixels et ont été fabriqués en technologie AMS CMOS 0,35µm via CMP.

## 2 Une implémentation analogique : « Imagine 2 »

Ces dernières années, les principales innovations apportées aux capteurs CMOS destinés à des applications grand public, telles que les "webcams" ou les téléphones mobiles, ne concernent que la forte diminution de la taille du pixel, de l'augmentation de la résolution du capteur qui en découle et de l'amélioration du "packaging" de ceux-ci (qui inclus un objectif plastique). D'un point de vue électronique, la structure n'a pas changé : 3 à 5 transistors NMOS et une photodiode dans le pixel permettent la conversion photon – courant de manière linéaire via une phase d'intégration. De l'électronique en pied de colonne permet de corriger le principal défaut de cette structure : l'offset (FPN). Un des désavantages de ces capteurs est leur lenteur de réaction lors de brusques changements de conditions lumineuses. Il faut alors adapter le temps alloué à l'intégration à la luminosité moyenne de la scène filmée. Ceci se fait de manière électronique en dehors de la matrice.

Inclure un système adaptatif aux conditions lumineuses simple, donc peu coûteux en surface, afin de calculer en temps réel le temps d'intégration optimal adapté à l'illumination moyenne permettrait de faire d'une pierre, deux coups : Cet "obturateur électronique", intégré au pixel, permettrait d'améliorer le fonctionnement général du capteur et de simplifier aussi bien l'électronique située autour de la matrice que celle de la caméra.

Pour remplir ce cahier des charges, nous avons opté pour la structure proposée à la Figure 2 [Labonne07]. Cette architecture comprend une matrice de pixels à réponse linéaire « standard » (montré à la Figure 4 en haut) dans laquelle nous avons imbriqué une matrice de plus faible résolution. Cette dernière a pour but d'évaluer l'illumination moyenne de la matrice et de donner cette information sous forme de tension ( $V_{ph\_moyen}$ ). Cette dernière est ensuite convertie en numérique sur trois bits et permet le calcul du temps d'intégration optimal (Figure 3).

Pour effectuer cela, nous avons conçu une structure (Figure 4 en bas), inspirée de [Sicard99], qui a la particularité de proposer une tension de sortie correspondant au logarithme de la valeur moyenne des courants photogénérés via un nœud commun à tout le réseau. Le layout de la structure élémentaire de cette matrice est présenté à la Figure 4. Un pixel « logarithmique » est inséré parmi quatre pixels standard. Cette brique layout élémentaire, de dimensions de 24µm x 24µm, donne une surface équivalente pixel de 12µm x 12µm.

Ce circuit a été mis en œuvre dans une caméra prototype et des images extraites de deux films sont présentées à la Figure 5.

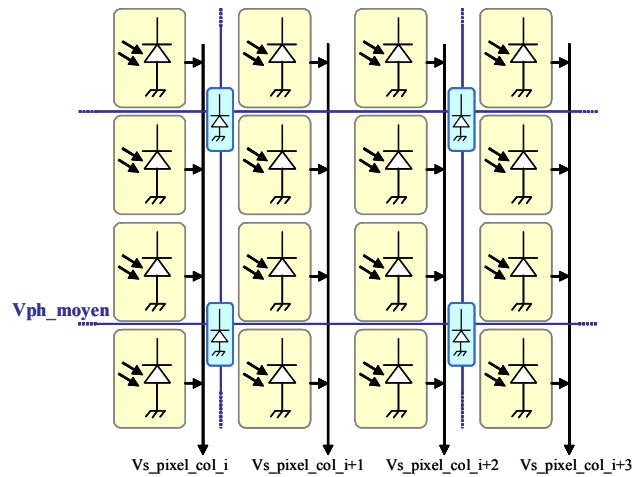


Figure 2 : Architecture du cœur du circuit Imagine 2.

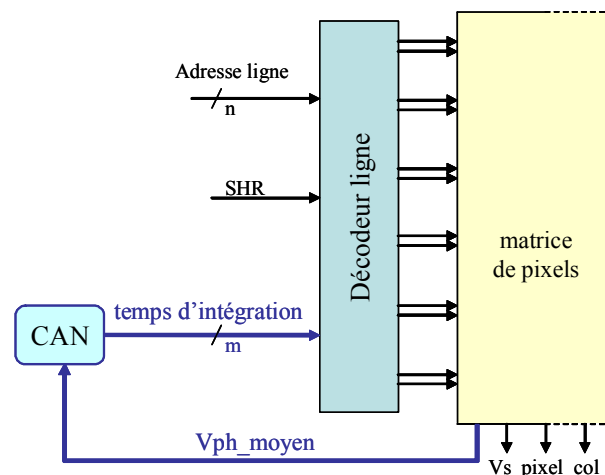


Figure 3 : Architecture générale du circuit Imagine 9

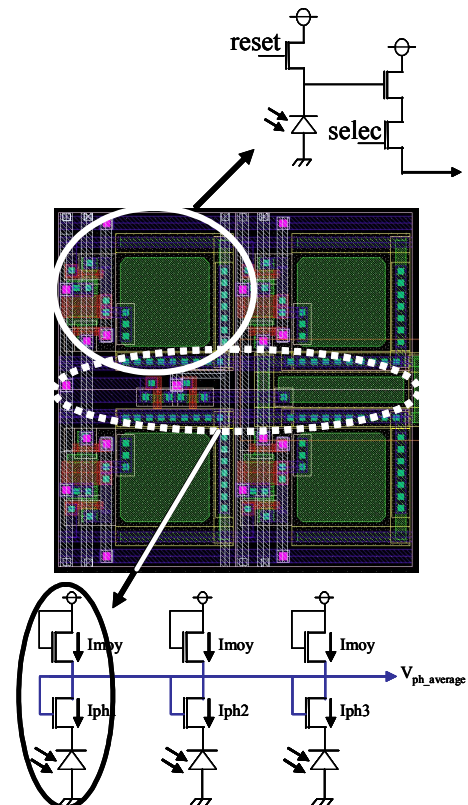


Figure 4 : Vue layout du pixel du circuit Imagine2 ; en trait plein, le pixel « standard », en trait pointillé, le pixel logarithmique.

La séquence choisie pour ces deux films est la suivante : nous démarrons avec une puissance lumineuse « normale » (éclairage néons) et les deux matrices proposent le même temps d'intégration (a). En (b), nous sur-éclairons la scène avec une puissante lampe halogène. La matrice standard sature immédiatement (son temps d'intégration étant trop long) alors que la matrice Imagyne 2 adapte automatiquement son temps d'intégration. En (c), nous diminuons manuellement le temps d'intégration de la matrice standard afin de re-obtenir une image correcte.

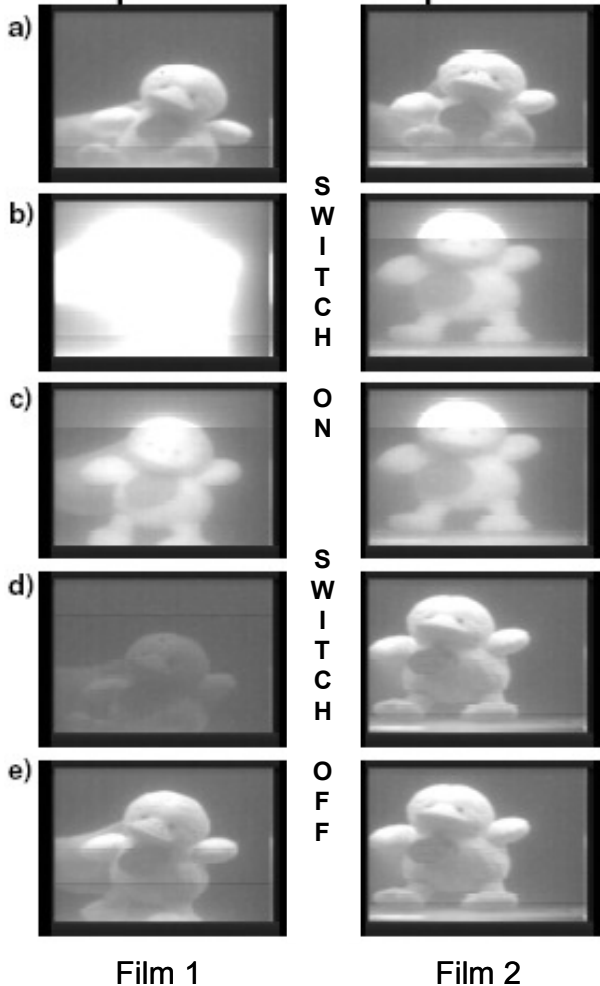


Figure 5 : Film 1 : séquence filmée avec un capteur standard.  
Film 2 : séquence filmée avec notre capteur Imagyne 2.

En (d), nous éteignons la lampe halogène et le capteur standard donne une image très sombre, son temps d'intégration étant trop court. Le capteur Imagyne 2 corrige immédiatement (dès l'image suivante, à 25 images par seconde). En (e), on re-augmente manuellement le temps d'intégration de la matrice standard afin de re-obtenir une image correcte.

### 3 Une implémentation mixte analogique – numérique : « Imagyne 3 »

Cette architecture d'imageur intègre une adaptation aux conditions lumineuses qui est répartie entre le pixel et le CAN. Ce pixel est à réponse logarithmique et fournit l'information photogénérée ainsi que la luminosité moyenne via un nœud commun à toute la matrice. Le pixel contient 12 transistors CMOS pour

une dimension de  $15 \times 15 \mu\text{m}^2$  et un facteur de remplissage de 16%.

Cette adaptation se fait en même temps que la conversion en numérique de la valeur du pixel [Labonne07]. Cette structure propose également un gain en consommation ainsi qu'une moindre sensibilité au FPN colonne. Cela est dû à l'utilisation d'une structure symétrique dans le pixel et d'une paire différentielle dans les pieds de colonne (Figure 6).

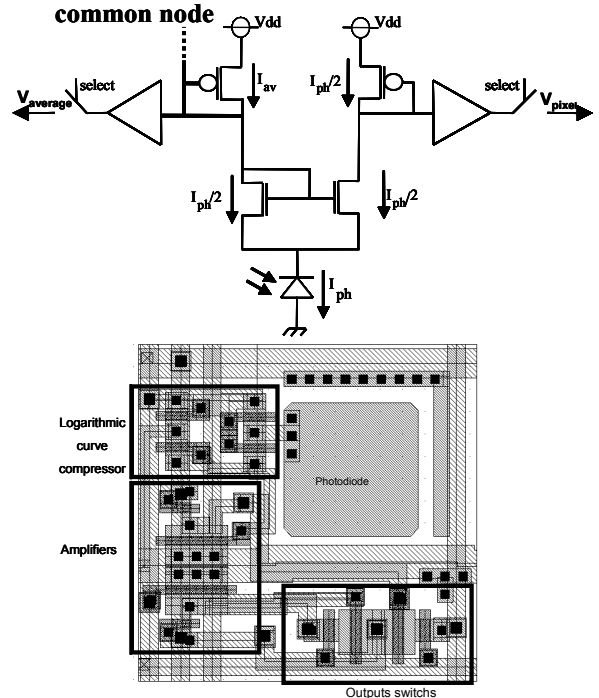


Figure 6 : Schéma et vue layout du pixel « Imagyne 3 »

Le fonctionnement du système adaptatif est montré à la Figure 7. L'idée générale est de fournir en sortie du capteur la différence entre la valeur du pixel sélectionné et la valeur moyenne. Les deux exemples donne les valeurs de deux pixels (A et B) d'une même scène, mais illuminée de deux manières différentes. Le système implémenté donne les mêmes valeurs de tension en sortie du capteur ( $V_{ph\_A}$  et  $V_{ph\_B}$ ).

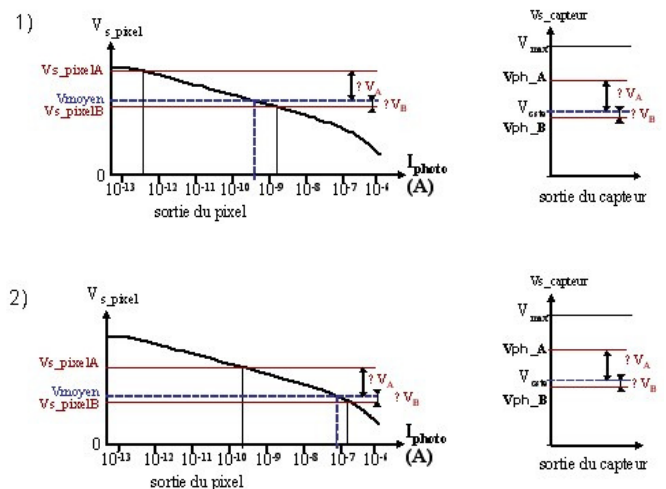


Figure 7 : Illustration de la sortie du pixel et du capteur Imagyne 3 pour deux pixels A et B, 1) pour une matrice faiblement éclairée, 2) pour une matrice fortement éclairée.

Pour implémenter cette fonctionnalité, nous utilisons les schémas de principe donnés aux Figure 8 et 9. La matrice de pixel fournit les informations de luminances locale et moyenne à l'amplificateur colonne qui en

calcule la différence et la compare avec la tension de retour du CNA. Cette valeur est alors le point d'entrée du CAN à approximation successive. Cette architecture a été répartie entre le pixel, l'amplificateur colonne et enfin une partie commune à toute la matrice. La principale nouveauté, par rapport à une architecture d'imageur standard, est que la partie analogique du CAN est dans l'amplificateur colonne. Cet étage informe l'algorithme de conversion si la valeur d'entrée du CAN est supérieure, inférieure ou égale à la valeur courante du CAN via deux sorties binaires  $V^+$  et  $V^-$ . Afin d'implémenter le système adaptatif, une tension fixe  $V_{cste}$  est soustraite à la valeur courante du CAN afin de la comparer à la différence ( $V_{s-pixel} - V_{moyen}$ ).

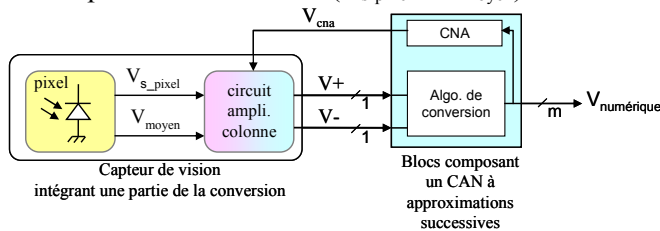


Figure 8 : Architecture de la chaîne de lecture du circuit Imagyne 3.

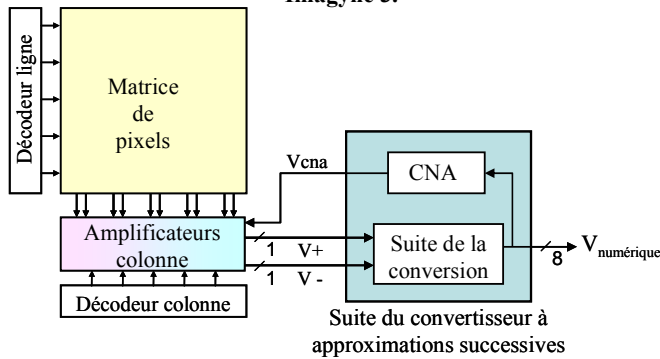


Figure 9 : Architecture Générale du même circuit

La Figure 10 montrent les résultats de simulation électrique de l'ensemble de la chaîne de lecture. Les deux exemples montrent l'extraction d'un pixel dans des conditions de luminosité différente pour une même scène. On note les huit phases de conversion du CAN à approximation successive. Les deux exemples donnent un résultat identique sur l'évolution des signaux  $V_{CNA}$ ,  $V^+$  et  $V^-$ , ce qui montre le bon fonctionnement de l'adaptation aux conditions lumineuses.

#### 4 Conclusion

Deux capteurs de vision CMOS intégrant deux architectures différentes d'adaptation aux conditions lumineuses ont été présentés.

La matrice « Imagyne 2 » a été mise en œuvre et montre l'intérêt de son système d'adaptation. Cet obturateur électronique contrôle de manière très simple le temps alloué à l'intégration des photons dans chaque photodiode. Le surcoût en terme de surface du pixel est de l'ordre de 50% dans le cas de notre prototype. Cependant, ce surcoût peut être facilement inférieur à 20% en dessinant un layout beaucoup plus agressif. De plus, ce système permet d'éviter l'utilisation de systèmes anti-éblouissement et / ou de contrôle mécanique du diaphragme, ce qui impliquerait une baisse conséquente du coût total de la caméra.

La matrice « Imagyne 3 » propose un pixel à grande dynamique associé à un système d'adaptation aux conditions lumineuses. La partie analogique de ce système est répartie physiquement entre le pixel et le pied de colonne. Seul reste commun à toute la matrice la partie numérique du CAN à approximations successives. Ce système doit permettre d'obtenir un histogramme indépendant des conditions moyennes de luminosité. L'autre innovation de cet imageur consiste en un pixel fournissant la valeur photogénérée et la valeur d'illumination moyenne de manière symétrique. Ce détail, ajouté à une nouvelle structure différentielle de pied de colonne, doit diminuer la sensibilité du capteur au FPN colonne. Ce capteur est en cours de test.

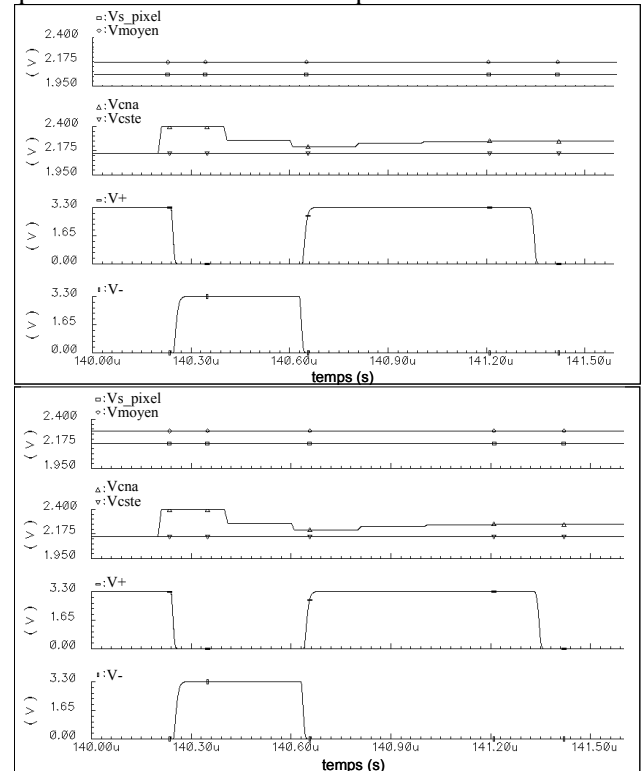


Figure 10 : Simulation du comportement des sorties  $V^+$  et  $V^-$  de la chaîne de lecture de « Imagyne 3 »

#### Références :

- [Ni97] Y Ni, F Devos, M Boujrad, and J.H Guan. "Histogram-equalization-based adaptive image sensor for real-time vision". IEEE journal of solid state circuits, Vol. 32(7) :1027-1036, July 1997.
- [Mendis97] S. K. Mendis, S. E. Kemeny, R. C. Gee, B. Pain, C. O. Staller, Q. Kim, E. R. Fossum, "CMOS Active pixel image sensors for highly integrated imaging systems", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 32, No. 2, pp 187-197, février 1997.
- [Delbruck95] T. Delbrück and C.A.Mead "Analog VLSI phototransduction by continuous-time, adaptive, logarithmic photoreceptor circuits", in Vision Chips: Implementing vision algorithms with analog VLSI circuits, C. Koch and H. Li editors, IEEE Computer Society Press, 1995, pp. 139-161
- [Brajovic04] V. Brajovic, "Brightness perception, dynamic range and noise: a unifying model for adaptive image sensors", Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '04), Vol. 2, pp. 189 - 196, juin 2004.
- [Sicard99] G. Sicard, "De la biologie au silicium : une rétine bio-inspirée analogique pour un capteur de vision "intelligent" adaptatif", thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble
- [Labonne07] E. Labonne, "Contributions à la conception de capteurs de vision CMOS à grande dynamique", thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble (INPG), effectuée au laboratoire TIMA, juillet 2007, Grenoble,