

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 90 (1999)

**Heft:** 3

**Artikel:** Microélectronique inspirée de la biologie

**Autor:** Vittoz, Eric

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-901907>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 18.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Microélectronique inspirée de la biologie

Le cerveau constitue une riche source d'inspiration pour les concepteurs de circuits VLSI de traitement de l'information. Ceci est vrai en particulier pour la méthodologie de développement, les architectures, les stratégies utilisées et les modes de représentation des signaux. Il en résulte des circuits consommant très peu de puissance, à fonctionnement essentiellement analogique, dont plusieurs exemples sont décrits.

Au cours d'un demi milliard d'années d'évolution, la vie a inventé une extraordinaire variété de solutions, de complexité toujours croissante, pour améliorer la compétitivité de chaque espèce dans sa lutte continue pour la survie. Les systèmes bio-inspirés sont conçus en empruntant certaines de ces solutions et en les adaptant aux contraintes des technologies utilisées pour résoudre des problèmes d'ingénieurs. Pour le concepteur de circuits intégrés à très large échelle (VLSI, very large scale integration), la source d'inspiration la plus riche réside dans la manière dont les organismes vivants captent et traitent l'information pour percevoir leur environnement, pour en construire une image interne et pour décider et déclencher des actions pertinentes. En fait, le système nerveux constitue une source d'inspiration pour plusieurs aspects du traitement de signal par des systèmes VLSI. Les plus importants concernent la manière dont les signaux et l'information sont représentés, les stratégies utilisées pour traiter cette information, les architectures qui réalisent ce traitement et la méthodologie utilisée pour concevoir les systèmes. Nous examinerons plus en détail ces quatre aspects, dans un ordre inverse. Nous décrirons ensuite quelques exemples de réalisations de circuits développés au CSEM (Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA) par cette approche bio-inspirée, dont certains ont été conçus pour des applications industrielles réelles. D'autres ne sont encore qu'exploratoires, mais démontrent le potentiel de l'approche pour la réalisation future de produits totalement nouveaux.

## Adresse de l'auteur

Prof. Eric Vittoz, CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA  
Jaquet-Droz 1, 2007 Neuchâtel

## La bio-inspiration pour les circuits VLSI

### Aspects de méthodologie

Les méthodologies modernes de conception de circuits intégrés VLSI favorisent l'approche descendante qui part d'une description à haut niveau de la fonction à réaliser pour aboutir au plan des masques permettant de fabriquer le circuit. Or la nature procède de façon inverse: selon la théorie darwinienne de l'évolution, aujourd'hui généralement bien acceptée, la vie a construit des structures toujours plus complexes et toujours plus efficaces en utilisant comme seule règle la sélection naturelle de l'individu le mieux adapté. Ceci constitue évidemment une approche montante, par laquelle l'évolution a exploité au mieux, étape par étape, les propriétés des structures déjà obtenues comme base pour le niveau suivant de complexité.

Une façon d'appliquer cette approche à la réalisation de circuits VLSI consiste à créer de nouvelles configurations de circuits en utilisant des algorithmes génétiques. On se heurte alors à la difficulté de définir les critères pertinents pour guider cette évolution artificielle. L'approche opportuniste introduite et défendue par le professeur Carver Mead [1, 2] est plus intelligente, et certainement meilleure puisqu'elle exploite aussi les talents humains. Elle consiste, dans un premier temps, à clairement identifier et conceptualiser tout ce dont on dispose comme lois de la physique, possibilités des procédés de fabrication accessibles, propriétés et caractéristiques des dispositifs et des circuits élémentaires; ces propriétés sont cataloguées et répertoriées pour être ensuite utilisées de manière opportune comme briques de construction de circuits ou de systèmes plus complexes. L'approche opportuniste comprend aussi l'exploration des possibilités offertes par une solution au-delà de l'ap-

plication originalement ciblée, et la recherche des avantages cachés derrière des inconvénients.

On trouve de nombreux exemples d'opportunisme dans la conception de circuits intégrés. La technologie courante CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) est conçue pour fournir sur un même substrat de silicium des transistors MOS à canal p et à canal n, pour des applications essentiellement numériques. Mais elle permet de réaliser aussi, sans aucune modification, des composants passifs, des dispositifs capteurs de lumière, et des transistors bipolaires à jonction, tous très utiles au concepteur de circuits analogiques. Le transistor MOS lui-même, initialement conçu pour travailler comme interrupteur commandé par une tension (et utilisé quasi exclusivement comme tel dans les circuits numériques), peut fonctionner aussi en conductance et en source de courant commandées par une tension, en multiplieur analogique, en générateur de fonctions quadratiques et exponentielles (et des fonctions inverses) et pour mémoriser un courant. Une propriété supplémentaire et inattendue vient même d'être identifiée il n'y a que quelques années [3,4]: malgré les caractéristiques courant-tension fortement non-linéaires du transistor MOS, tout réseau de résistances linéaires conserve sa linéarité par rapports aux courants si chacune des résistances est simplement remplacée par un transistor, comme illustré par la figure 1. De plus, si on accepte de limiter les courants à des valeurs faibles, pour maintenir les transistors dans le régime dit de faible inversion, la valeur de chacune de ces «pseudo-résistances» peut être modifiée en modifiant la tension de grille. Cette nouvelle propriété s'avère extrêmement utile à la réalisation de filtres spatiaux, en particulier dans les applications de traitement d'images.

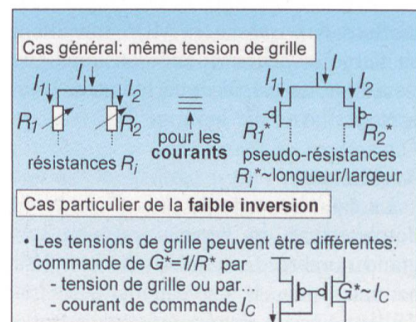


Fig. 1 Utilisation de transistors MOS en pseudo-résistances



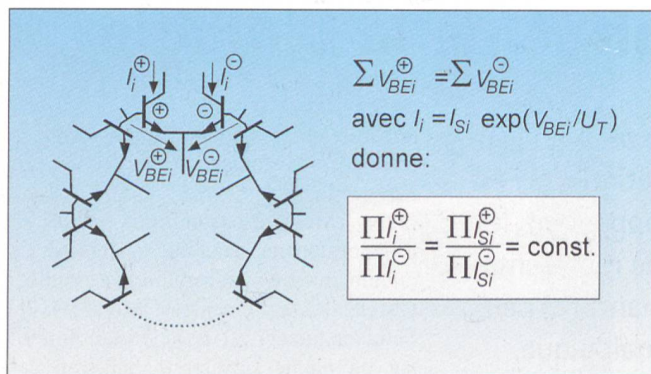


Fig. 2 Principe des circuits translinéaires: un exemple classique de l'exploitation opportuniste d'une propriété particulière des transistors

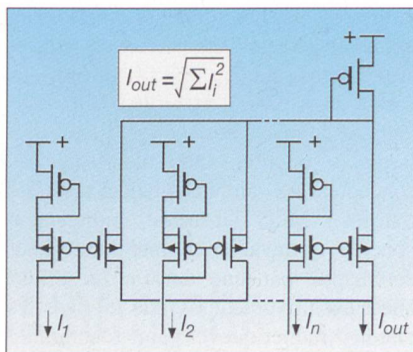


Fig. 3 Calcul de la longueur d'un vecteur ( $I_{out}$ ) à l'aide de boucles translinéaires formées de transistors MOS travaillant en faible inversion

Dès qu'on combine entre eux quelques transistors, on obtient des circuits élémentaires possédant nombre de propriétés intéressantes. Un des exemples les plus connus, et aussi l'un des plus utiles, est celui des circuits dits translinéaires «découverts» par Barrie Gilbert il y a 25 ans [5]. Habitué à utiliser la bonne vieille règle à calcul, et confronté à la caractéristique tension-courant intrinsèquement exponentielle du transistor bipolaire, Barrie a imaginé d'utiliser cette règle à calcul électronique pour transformer la somme des tensions dans une boucle fermée de jonctions base-émetteur en un produit de courants de collecteur, comme l'illustre la figure 2. Simple mais très générale, cette idée permet de réaliser littéralement des centaines de fonctions différentes de manière extrêmement compacte. Elle s'applique avec quelques restrictions aux transistors MOS travaillant en faible inversion comme en témoigne l'exemple du calcul de la longueur d'un vecteur illustré par la figure 3.

## Architectures

La caractéristique la plus évidente de l'architecture du cerveau est son très grand nombre de cellules (environ  $10^{11}$  neurones pour le cerveau humain) travaillant à basse vitesse (correspondant à une fréquence de 1 kHz) avec, très probablement, une faible précision indi-

viduelle. Ces cellules sont organisées en une architecture massivement parallèle qui traite collectivement la masse d'informations reçues pour atteindre un consensus sur la meilleure interprétation de celles-ci. Le traitement est essentiellement analogique, bien que les signaux soient représentés par la fréquence ou la phase de «digits» (courtes impulsions de potentiel d'action). Si elle conserve, comme c'est très probable, son taux de croissance exponentielle des trente dernières années, la technologie des circuits intégrés sur silicium permettra, dans quelques années, de rassembler sur une seule puce plusieurs milliards de transistors. L'architecture du cerveau suggère de construire les futurs systèmes de traitement de l'information en organisant ces transistors en très grands réseaux de cellules ( $10^3$  à  $10^8$ ) relativement simples ( $10$  à  $10^6$  transistors). Grâce au haut degré de parallélisme, la vitesse locale peut alors être limitée, permettant une réduction de la consommation. La précision nécessaire étant réduite grâce au calcul collectif, les réalisations par circuits analogiques deviennent plus efficaces que les réalisations numériques, des points de vue de la puissance consommée et de la surface de silicium occupée.

Un traitement de signal véritablement collectif demande un haut degré d'interconnexions entre les cellules (chaque neurone du cerveau reçoit l'information provenant de  $10^2$  à  $10^5$  autres neurones). Une telle densité est mal compatible avec la nature essentiellement bi-dimensionnelle de la technologie VLSI. Ce problème peut être abordé de plusieurs manières complémentaires. Certaines opérations collectives (recherche d'un maximum, normalisation d'un grand vecteur) peuvent s'effectuer par des cellules analogiques distribuées qui contrôlent collectivement le potentiel d'un seul nœud électrique; la communication n'exige alors qu'un seul fil passant par toutes les cellules. La communication peut être limitée aux cellules voisines, et propagée de part en part à l'ensemble du

réseau. Elle peut aussi être organisée de manière hiérarchique, comme on le trouve dans le système nerveux: la densité d'interconnexions est localement très forte, mais décroît fortement avec l'augmentation de la distance.

Il est possible d'augmenter considérablement la densité de communication en exploitant la très grande rapidité intrinsèque de l'électronique (par rapport à l'«ionique» des neurones) pour multiplexer des données analogiques sur un nombre limité de connexions. La manière traditionnelle de représenter des valeurs analogiques par des tensions ou des courants exigerait une horloge pour gérer leur multiplexage et résulterait en une communication peu robuste car sensible aux perturbations. Au contraire, la technique de modulation par densité d'impulsions que l'évolution a élaborée pour le système nerveux s'avère tout aussi excellente pour la VLSI analogique. Sa forme la plus intéressante est la communication par événements codant une adresse (address-coding events) [6] illustrée par la figure 4. L'activité de chaque cellule du réseau est représentée par la densité de courtes impulsions. Durant chaque impulsion, l'adresse de la cellule qui l'a produite est envoyée sur un bus à  $m$  fils et décodée par les cellules qui doivent la recevoir. Aucune horloge n'est nécessaire: chaque cellule accède au bus commun avec un niveau à priorité proportionnel à son activité (donc jamais pour les cellules inactives); la communication est déclenchée par les événements à transmettre et l'instant précis de chaque événement est conservé. Si seules quelques cellules du réseau sont actives (par exemples lors d'événements ponctuels dans l'image d'une scène), elles peuvent utiliser toute la largeur de bande du bus pour communiquer plus rapidement leur activité. Des collisions sont possibles, malgré la durée très courte des impulsions. Elles peuvent être évitées par des techniques d'arbitrage, ou simplement tolérées si elles ne produisent que des codes non utilisés [7]. Dans ce cas, la solution la plus simple consiste à n'utiliser que des codes utilisant un nombre de

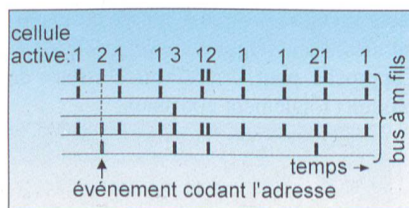


Fig. 4 Communication de signaux analogiques par densité d'impulsions; chaque impulsion correspond à un événement codant l'adresse de la cellule émettrice



«uns» égal à la valeur arrondie de  $m/2$  (3 dans l'exemple de la figure).

Les solutions biologiques peuvent inspirer des architectures plus détaillées pour des traitements particuliers. Les exemples connus sont des circuits de traitement à bas niveau d'images ou de sons, inspirés des structures de la rétine [8] ou de la cochlée [9,10]. Les niveaux plus élevés du traitement perceptif cérébral sont aussi en cours d'exploration en vue de leur application aux circuits VLSI.

### Stratégies

On sait que le cerveau emploie de nombreuses stratégies inhabituelles pour les ingénieurs. L'avènement des algorithmes de neurones artificiels a montré l'avantage de remplacer la programmation par un apprentissage sur la base d'exemples pour traiter certains problèmes complexes. En fait, peu d'utilisateur de circuits intégrés VLSI accepteraient de les «éduquer» avant de pouvoir les utiliser. Il n'est donc pas très utile de développer des circuits capables d'apprentissage pour les applications industrielles courantes. Par contre, les techniques d'apprentissage peuvent être utilisées en simulation sur ordinateur pendant la conception d'un circuit. Les valeurs des «poids synaptiques», résultat de cet apprentissage, sont ensuite fixées dans le circuit par les dimensions de certains composants, constituant une sorte de mémoire morte (ROM) analogique distribuée.

Proche de l'apprentissage, l'adaptation est une autre stratégie développée par la vie qui peut s'appliquer aux circuits VLSI. L'adaptation dans le temps est une forme de filtre «passe-haut», éventuellement non linéaire. Elle joue le rôle de détecteur de nouveauté, éliminant l'information constante venant de l'extérieur ou due à certains défauts du système lui-même.

La capacité de s'adapter au niveau du signal est omniprésente dans les systèmes sensoriels biologiques. Elle les rend capables de comprimer la très grande gamme dynamique des excitations venant du monde extérieur (pouvant atteindre 140 dB) dans la gamme limitée de l'activité neuronale (de l'ordre de 40 dB). Une telle stratégie est extrêmement utile pour traiter l'information par des circuits analogiques qui sont d'autant plus efficaces qu'on réduit les exigences en précision et en rapport signal sur bruit. Comme exemple, la figure 5 représente le schéma de principe d'une rétine artificielle s'adaptant localement à l'intensité de la lumière reçue, selon un principe inspiré de la rétine biologique [11]. Chacune des

Fig. 5 Schéma de principe d'une rétine artificielle à adaptation locale

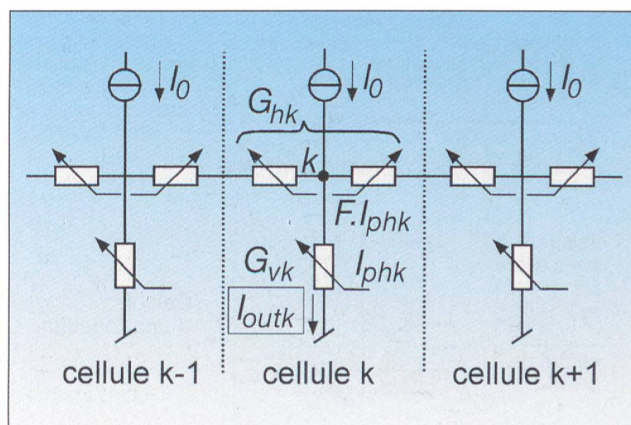
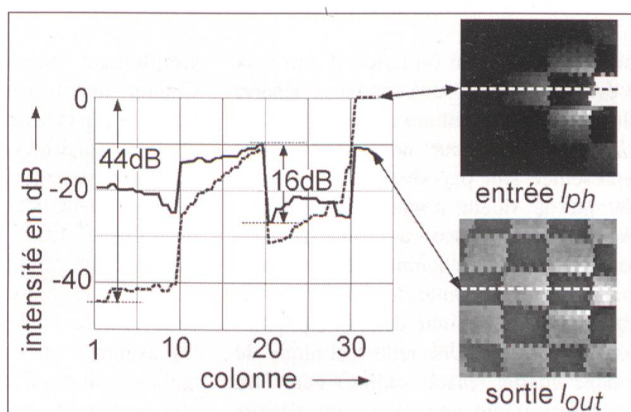


Fig. 6 Comportement de la rétine à adaptation locale: l'effet d'un fort gradient d'illumination est supprimé.



résistances réglables qui constituent ce réseau de diffusion est réalisée en pratique par deux transistors, selon le principe des «pseudo-résistances». Un courant constant  $I_0$  est injecté en chaque nœud de ce réseau bi-dimensionnel (représenté ici en une dimension). L'intensité lumineuse reçue localement par la cellule  $k$  est transformée, par effet photoélectrique dans une simple jonction pn, en un photo-courant  $I_{phk}$  qui commande la valeur de la conductance verticale  $G_{vk}$  ( $G_{vk}$  proportionnel à  $I_{phk}$ ). La sortie de la cellule est le courant  $I_{outk}$  traversant cette conductance. Si les conductances horizontales  $G_{hk}$  étaient toutes infinies (un seul nœud interne), la somme constante des courants  $I_0$  serait distribuée proportionnellement à l'intensité locale, et on obtiendrait une normalisation globale de l'intensité. Lorsque ces conductances sont finies, chaque source de courant  $I_0$  est distribuée sur une surface équivalente  $A$  proportionnelle au rapport  $F$  entre les conductances horizontales et verticales. On obtient alors une normalisation locale dans la surface  $A$ .

La figure 6 montre les résultats de mesure d'une réalisation expérimentale de  $35 \times 35$  cellules. La rétine reçoit l'image d'un échiquier noir et blanc illu-

miné par un fort gradient de lumière. On constate que la gamme d'illumination d'environ 30 dB est éliminée en sortie, pour ne laisser que les 16 dB de contraste (gamme de réflectivité) de l'échiquier.

Une autre stratégie de la vie est la large utilisation du principe de compétition entre cellules, associée à l'usage généralisé d'actions excitatrices et inhibitrices. Cette approche est déjà exploitée dans les réseaux de neurones artificiels. Son potentiel plus général pour les applications d'ingénieurs est aussi en phase d'exploration.

### Représentation des signaux et de l'information

On a vu plus haut que la représentation de la valeur de signaux par la densité ou par la phase de courtes impulsions convient bien à la transmission de ces signaux. Le système nerveux exploite probablement cette forme de représentation non seulement pour la communication mais pour le traitement lui-même. Ceci est certain dans le cas du traitement auditif, et des résultats intéressants ont été obtenus récemment dans des réalisations expérimentales de circuits VLSI émulant certaines structures du chemin auditif [12]: on peut extraire, comme le



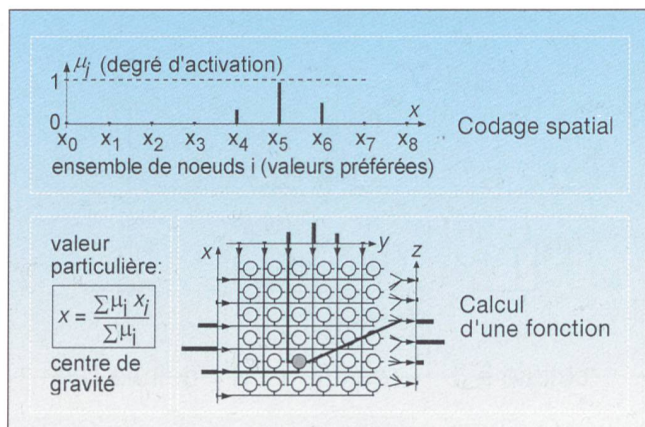


Fig. 7 Représentation de variables et calcul de fonctions à l'aide du principe bio-inspiré de codage spatial

fait l'oreille, le ton («pitch») d'une voix et éventuellement, sur cette base, séparer plusieurs voix simultanées.

Pour un ingénieur, une variable  $x$  est représentée soit par un code numérique soit par la valeur d'une grandeur physique (représentation analogique). Le cerveau utilise fréquemment une autre forme de représentation basée sur la répartition de l'activité dans une population de cellules. Une telle technique de codage spatial (place coding) peut être avantageusement appliquée aux circuits VLSI, comme l'illustre la figure 7 [13]. On utilise ici un ensemble de nœuds, chacun correspondant à une valeur préférée  $x_i$  de la variable  $x$ . Chaque nœud est caractérisé par son degré d'activation  $\mu_i$  (correspondant par exemple à une valeur de courant). Par convention, la valeur de  $x$  est donnée par le centre de gravité de la distribution des activités. Comme le montre aussi la figure, le calcul d'une fonction quelconque  $z = z(x, y)$  s'effectue

simplement par un réseau de liens. Chaque lien utilise un opérateur «ET» flou, simple circuit de coïncidence formé de deux transistors en série, pour calculer l'activité résultante du nœud de sortie correspondant. Dans le cas d'une fonction d'une seule variable, le lien se ramène à une simple connexion.

Une telle représentation, proche de celle utilisée en logique floue, combine les avantages des représentations habituelles analogique et numérique. En effet, elle permet d'obtenir la continuité des niveaux de l'analogique avec la tolérance élevée aux bruits et autres perturbations du numérique. Cette tolérance peut être accrue à volonté, simplement en augmentant le nombre de nœuds. Cette technique offre aussi la possibilité de réaliser n'importe quelle fonction d'une manière systématique et accessible à la synthèse par ordinateur. La puissance consommée peut rester très faible puisque seuls quelques nœuds (au minimum deux)

doivent être actifs simultanément, ceci quelle que soit la gamme de variation totale des variables. On peut s'attendre à ce que cette caractéristique soit particulièrement intéressante pour réaliser des systèmes sensoriels à très faible consommation de puissance si le même type de codage est utilisé pour les capteurs eux-mêmes, sous forme de réseaux de capteurs à gammes de sensibilités étagées.

## Exemples de circuits réalisés

On trouve beaucoup d'applications des circuits bio-inspirés dans les domaines des capteurs optiques intelligents et de la vision. Le circuit représenté à la figure 8 mesure l'intensité locale maximum dans une image, pour commander l'atténuation par un écran à cristaux liquides (LCD) [14]. Son cœur est un réseau de  $26 \times 26$  cellules dont chacune comprend un capteur de lumière et un élément d'un comparateur de courants distribué. Le reste de la puce englobe tous les circuits nécessaires à la gestion du fonctionnement et au test du circuit, ainsi qu'un générateur de tension élevée (18 V) pour commander l'écran LCD. La consommation est inférieure à 1 mW pour un temps de réponse inférieur à 50  $\mu$ s.

La figure 9 montre un autre exemple de capteur de lumière intelligent qui exploite le calcul collectif au sein d'un réseau de cellules pour déterminer la position du soleil et son intensité [15]. Le circuit comprend un réseau hexagonal de 1365 cellules captrices organisées en coordonnées polaires pour obtenir directement l'azimut et la hauteur. Une optique semi-sphérique très simple projette sur le circuit une tache de surface approximativement constante (couvrant environ 15 cellules), centrée sur la position du soleil. La coordonnée radiale du centre de gravité est déterminée à l'aide d'un réseau linéaire radial de (pseudo-)résistances. On injecte en chacun de ses nœuds la somme de tous les photocourants délivrés par les capteurs situés sur le même rayon; la coordonnée est directement donnée par la proportion des courants aux deux extrémités du réseau linéaire. La coordonnée angulaire est déterminée de manière similaire en utilisant un réseau de (pseudo-)résistances suivant la périphérie. L'intensité solaire est mesurée en sommant tous les photocourants, après les avoir pondérés selon leur position pour compenser les pertes dues à l'angle d'incidence. Ce circuit, destiné au réglage de la climatisation des véhicules, consomme moins de 100  $\mu$ A, réagit en une milliseconde et fournit les deux coordonnées sous forme d'une

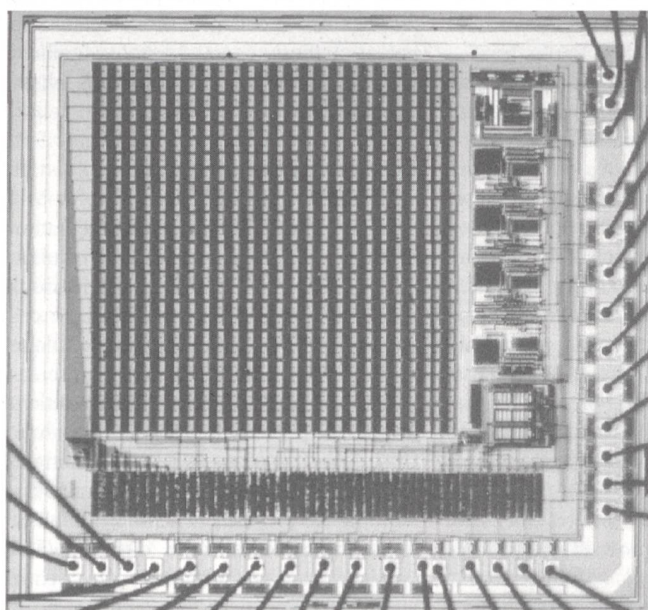


Fig. 8 Réseau VLSI mesurant l'intensité locale maximum d'une image projetée; application à la commande d'un écran à cristaux liquides



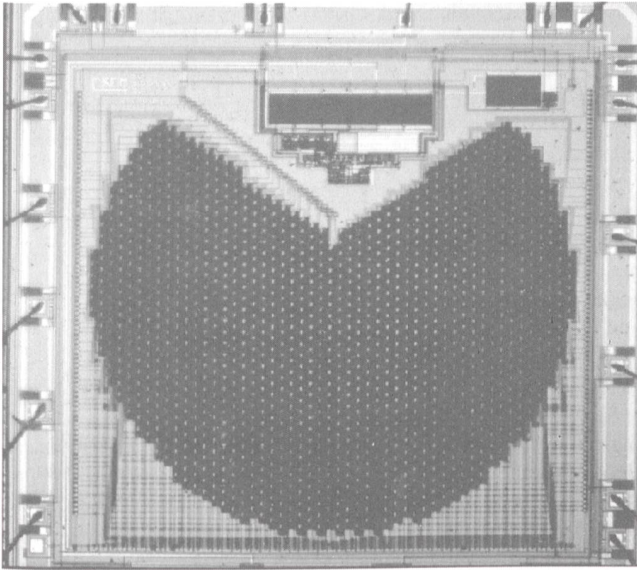


Fig. 9 Réseau de capteurs déterminant la présence, la position et l'intensité du soleil; application à la climatisation des véhicules

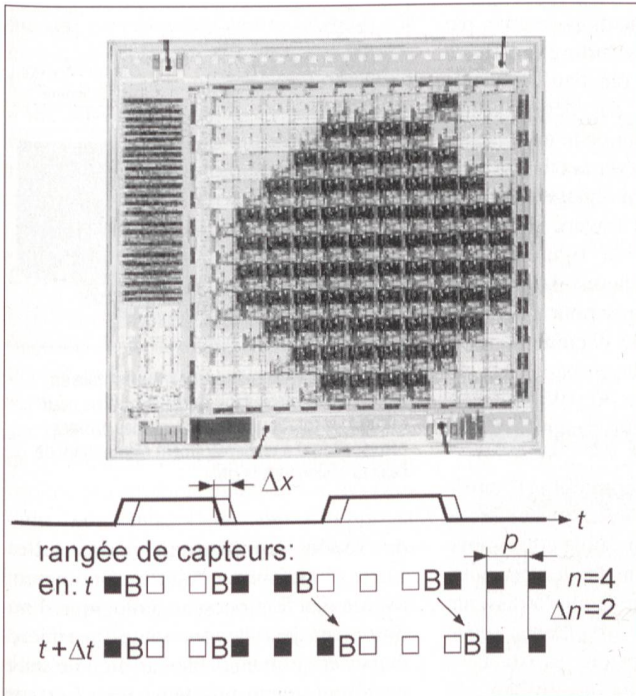


Fig. 10 Rétine artificielle déterminant les deux composantes du mouvement d'un ensemble de taches aléatoires; application à un «trackball» commercial

tension avec une précision meilleure que 15°.

La détection de mouvement est une opération importante en vision. Sa forme la plus simple consiste à évaluer les deux composantes de la vitesse de translation d'un objet rigide dont l'image couvre complètement la fenêtre de vision. Le détecteur illustré à la figure 10, qui constitue le cœur d'un dispositif de pointage pour ordinateur, utilise pour ce faire une technique inspirée de l'œil du lapin [16]. Cette rétine artificielle évalue séparément les composantes horizontale et verticale de mouvement d'un ensemble aléatoire de taches, image de la surface d'une bille mobile («trackball»). Pour chacune des deux directions orthogonales, elle détecte et compte à l'instant  $t$

le nombre  $n$  de bords visibles  $B$  (correspondant à une forte transition d'intensité entre deux capteurs consécutifs). A l'instant suivant  $t + \Delta t$  (prochain flash éclairant la bille), elle détecte et compte le nombre  $\Delta n$  de bords qui se sont déplacés et elle calcule le déplacement correspondant de l'image  $\Delta x = \Delta n / n$ , mesuré en pas  $p$  du réseau. Le traitement est essentiellement analogique, par sommation et comparaison de courants pondérés. Grâce à l'évaluation collective au sein des 75 cellules et à la répartition aléatoire des taches, la résolution atteinte est de 800 dpi. Cette résolution n'est pas affectée si quelques cellules sont inactives parce que défectueuses, et ne se dégrade que très lentement et très progressivement lorsque le nombre de défauts

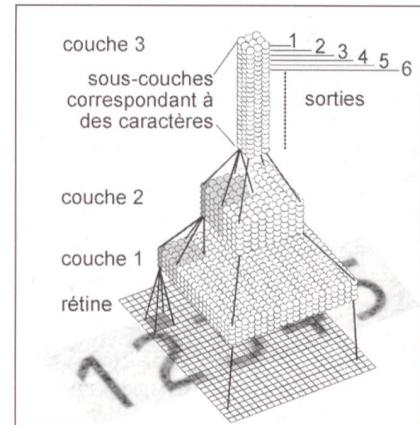


Fig. 11 Architecture d'un système VLSI de reconnaissance optique de caractères

augmente. Le courant consommé est inférieur à 2  $\mu A$  en régime d'attente qui correspond à l'essentiel du temps d'utilisation du «trackball».

L'exemple suivant est un système de reconnaissance de caractères à très faible consommation de puissance, développé pour une application commerciale, dont l'architecture est représentée à la figure 11 [17]. Il comprend une rétine artificielle et un réseau de neurones classifieur analogique. La rétine normalise l'intensité de l'image reçue et extrait ses contours en binarisant le gradient d'intensité dans quatre directions orthogonales. Cette information prétraitée alimente le réseau de neurones artificiels à trois couches, qui effectue la reconnaissance par des opérations successives de convolution et de seuillage. Chacune des trois couches est divisée en plusieurs sous-couches traitant la même information venant de la couche précédente, mais avec des poids synaptiques différents. Toutes les cellules (neurones) d'une même sous-couche ont les mêmes poids synaptiques, assurant ainsi l'invariance par rapport à un décalage. Les trois couches de ce réseau de neurones sont implantées sur une même puce représentée à la figure 12. Les quelque cent mille valeurs de poids synaptiques déterminées par apprentissage sur ordinateur sont reportées dans le circuit sous la forme de rapports de capacités. Consommant quelques milliwatts, ce circuit peut traiter 1000 images par seconde, correspondant à  $10^8$  opérations d'addition et de multiplication par seconde. Il consomme donc  $10^5$  fois moins de puissance qu'un ensemble de microprocesseurs modernes exécutant la même tâche.

La fovéa de l'œil humain, seule partie de la rétine à haute définition spatiale, ne couvre qu'un angle de vision correspondant à peu près à la surface de l'ongle du



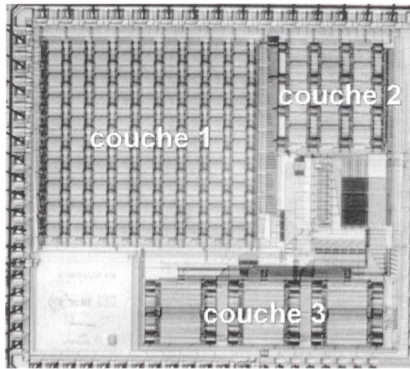


Fig. 12 Microphotographie du réseau de neurones classifieur à trois couches. Ce circuit VLSI analogique consomme 100 000 fois moins de puissance qu'un ensemble de microprocesseurs exécutant la même tâche.

pouce à la distance d'un bras tendu. Pour couvrir tout l'espace de vision nécessaire à explorer une scène, l'évolution a développé un système oculomoteur qui déplace la direction du regard en faisant tourner l'œil. La scène est explorée par saccades successives vers les points intéressants. De plus, la présence de micro-saccades crée une image toujours mobile sur la rétine; cette dernière peut donc écarter (par adaptation temporelle) toute information spatiale constante dans le temps, y compris son propre bruit spatial. Les micro-saccades aident probablement aussi à accroître la résolution spatiale en interpolant entre les photorécepteurs.

La technologie VLSI est loin de pouvoir réaliser autant de cellules que n'en contient la rétine. Dans un système de vision artificielle, il est donc d'autant plus intéressant d'utiliser une approche comparable à celle de l'œil mobile. La figure 13 illustre l'architecture d'un microsystème oculomoteur expérimental en voie de développement [13]. Il est formé d'une première rétine 1 qui, associée à une lentille à angle étroit, fournit une information visuelle à haute définition (fovéa). Pour éviter les connexions électriques flexibles qu'exigerait un déplacement de cette rétine, l'axe de vision est déplacé par une optique mobile formée de deux réseaux de micro-prismes

tournant indépendamment. Une seconde rétine 2, associée à une lentille à grand angle, surveille l'ensemble du champ de vision et transmet l'image reçue à un circuit chargé d'en extraire les points saillants. Cette information est utilisée par un circuit de commande de saccades qui agit sur les moteurs. Représenté par la figure 14, ce circuit utilise la technique de codage spatial pour calculer la relation non-linéaire entre la position  $R$  à atteindre dans le champ visuel de la rétine 2 et les positions angulaires correspondantes  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  des deux prismes tournants [13]. Le temps passé à explorer chaque cible est proportionnel à son degré d'intérêt. Intégrée en technologie  $0,5 \mu\text{m}$ , cette puce expérimentale de  $45 \text{ mm}^2$  comprend 160 000 transistors et 15 000 capacités. Sa consommation totale de  $5 \text{ mW}$  est essentiellement due à une réalisation non optimale de la communication interne par impulsions («address-coding events»). Comme les saccades ont lieu en boucle ouverte, la précision des déplacements effectués est limitée par celle des circuits analogiques. Pour amener la cible bien au centre de la rétine 1, un réglage en boucle fermée est effectué à travers un second circuit, représenté à la figure 15, qui calcule les pas angulaires  $\Delta\varphi_1$  et  $\Delta\varphi_2$  des moteurs nécessaires pour centrer la cible d'un élément de chemin  $\Delta r$  [13]. Utilisant aussi le codage spatial, ce circuit ne consomme que  $30 \mu\text{W}$  et calcule les pas angulaires avec une précision meilleure que  $3^\circ$ .

On envisage de nombreuses applications pour de tels microsystèmes de vision qui, grâce à leur faible consommation de puissance, sont facilement autonomes en énergie donc faciles à disséminer. On peut citer la surveillance (environnement, feu, intrusion, assistance à la conduite), l'automation (robots industriels, domestique, circulation) et le contrôle industriel (inspection, tri et comptage de pièces, vérification des équipements).

Les réalisations artificielles bio-inspirées d'autres modalités de perception comme l'audition n'ont pas encore trouvé

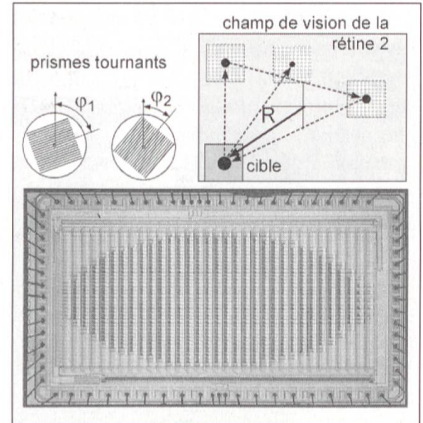


Fig. 14 Circuit de commande de saccades utilisant le codage spatial pour calculer l'angle des deux prismes correspondant à un point donné du champ de vision global.

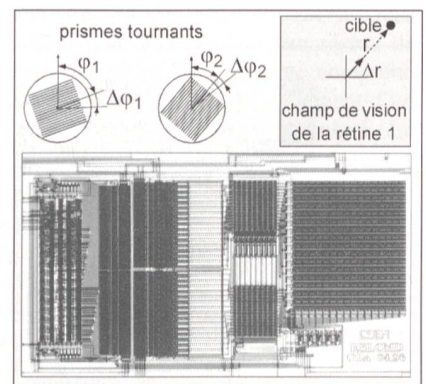


Fig. 15 Circuit de commande incrémentale en boucle fermée; le codage spatial est utilisé pour calculer les rotations élémentaires des prismes correspondant à un déplacement élémentaire de l'axe de vision vers la cible.

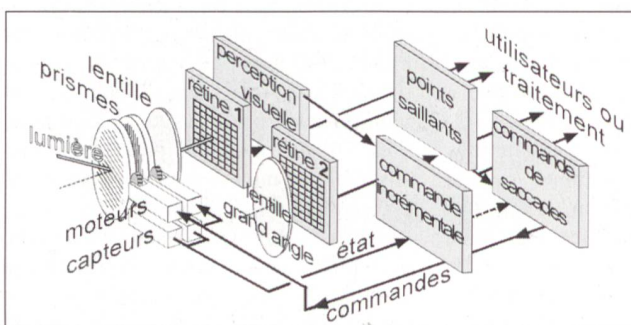


Fig. 13 Système oculomoteur expérimental

de réelles applications industrielles. L'une des raisons en est qu'on comprend encore peu le processus biologique d'audition au-delà de ses toutes premières étapes et qu'une cochlée artificielle seule ne résout aucun problème réel. Certains travaux exploratoires ouvrent cependant des perspectives intéressantes [12].

L'automation est un autre domaine qui peut bénéficier de la bio-inspiration. Comme exemple, la figure 16 illustre le schéma électrique d'un processeur «flou» utilisant une technique très voisine de celle du codage spatial [18]. Chacune des  $n$  règles qu'il permet d'exprimer est réalisée par un porte «ET» flou (formée de transistors branchés en série), commandée par des circuits de coïncidence qui matérialisent ce qu'on appelle les fonctions d'appartenance. Une unique source de courant  $I_0$  est répartie entre les  $n$  règles, proportionnellement à leurs degrés d'activation. Les courants  $I_i$  correspondants sont ensuite pondérés séparément (à partir de coefficients numériques à 4 bits) et sommés pour pro-



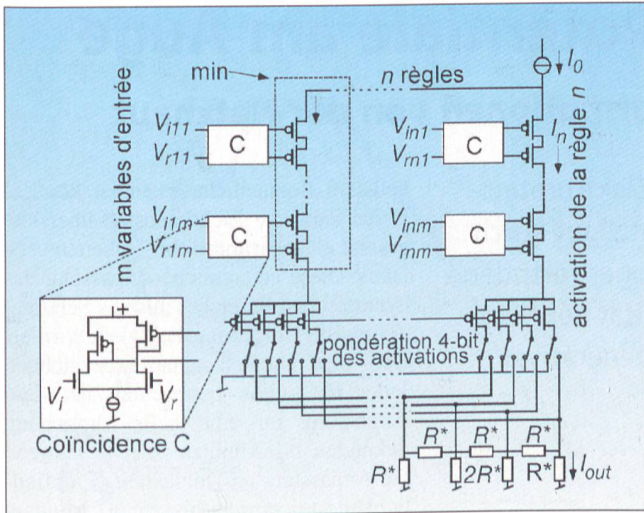


Fig. 16 Schéma d'un processeur flou analogique

duire chaque courant de sortie  $I_{out}$  (dont un seul est représenté sur le schéma). Ce circuit expérimental réagit en moins de 0,5 ms pour une consommation inférieure à 0,5  $\mu$ W. Une variante est actuellement en développement pour commander un micro-actuateur destiné à une application médicale.

## Conclusion

La microélectronique VLSI analogique inspirée de la biologie n'en est qu'à ses débuts, et l'effort de recherche limité qui lui est consacré ne lui permet de progresser que très lentement. Elle a cependant déjà débouché sur des applications industrielles et a atteint le marché avec des produits innovants. Cette approche paraît intéressante en premier lieu pour développer une nouvelle génération de micro-systèmes intelligents, où les possibilités qu'elle offre de traiter des signaux complexes en ne consommant que très peu de puissance prennent toute leur importance. Par la suite, l'approche pourrait bien entrer en compétition avec le traitement numérique traditionnel pour résoudre des problèmes complexes de perception, ceci même lorsque la puissance disponible n'est pas limitée. Le traitement numérique lui-même pourrait tirer avantage des architectures inspirées du cerveau, en particulier sous la forme de réseaux massivement parallèles de processeurs asynchrones à mémoire distribuée.

## Références

- [1] C.A. Mead: Analog VLSI and Neural Systems. Reading: Addison-Wesley 1989.
- [2] R. Colin Johnson: Full Speed ahead, Mead Sees a Future without Boundaries. Electronic Engineering Times, September 30, 1998, p. 19.
- [3] K. Bult, G. Geelen: An Inherently Linear and Compact MOST-only Current Division Technique. Dig. ISSCC Tech. Papers, February 1992, pp. 198-199.
- [4] E. Vittoz, X. Arreguit: Linear Networks Based on Transistors. Electronics Letters 29(1993), pp. 297-299.
- [5] B. Gilbert: Translinear Circuits: a Proposed Classification. Electronics Letters 11(1975), p. 14.
- [6] M. Mahowald: VLSI Analogs of Neuronal Visual

Processing: a Synthesis of Form and Function. Ph.D. dissertation, Computation and Neural Systems, California Institute of Technology, 1992.

[7] A. Mortara and E. Vittoz: A Communication Architecture Tailored for Analog VLSI Artificial Neural Networks: Intrinsic Performance and Limitations. IEEE Trans. on Neural Networks 5(1994), pp. 459-466.

[8] C.A. Mead, M.A. Mahowald: A Silicon Model of Early Visual Processing. Neural Networks 1(1988), 91-97.

[9] D. Lyon: Filter Cascades as Analogs of the Cochlea. Analog Integrated Circuits and Signal Processing 13(1997), pp.9-17.

[10] E. Fragnière: Analog VLSI Simulation of the Cochlea. Ph.D. Thesis No 1796, EPF-Lausanne, 1998.

[11] P. Venier: A contrast Sensitive Silicon Retina Based on Conductance Modulation in a Diffusion Network. Proc. MicroNeuro '97, Dresden, pp. 163-173.

[12] F.A. Van Schaik: Analogue VLSI Building Blocks for an Electronic Auditory Pathway. Ph.D. Thesis N° 1764, EPF-Lausanne, 1998.

[13] O. Landolt: Place Coding in Analog VLSI: A Neuromorphic Approach to Computation. Boston: Kluwer Academic Publishers 1998.

[14] M. Chevroulet et al.: A battery-operated optical spot intensity measurement system. Proc. ISSCC '95, February 1995, pp. 154-155.

[15] P. Venier et al.: Analog CMOS Photosensitive Array for Solar Illumination Monitoring. ISSCC '96, San Francisco 1996, Dig. Tech. Paper, pp. 96-97.

[16] X. Arreguit et al.: A CMOS Motion Detector System for Pointing Devices. IEEE J. Solid-State Circuits SC-31(1996)12, pp. 1916-1921.

[17] P. Masa et al.: 10 mW CMOS Retina and Classifier for Handheld, 1000 Images per Second Optical Character Recognition System. Proc. ISSCC '99, San Francisco, 1999.

[18] O. Landolt: Low-Power Analog Fuzzy Rule Implementation Based on a Linear Transistor Network. Proc. MicroNeuro '96, Lausanne 1996, pp. 86-93.

## Bio-inspirierte Mikroelektronik

Die Biologie ist für den Ingenieur eine reichhaltige Quelle der Inspiration. Besonders kann die Entwicklung von VLSI- (very large scale integration) Schaltungen für die Signalverarbeitung von der Funktionsweise des Gehirns profitieren. Angeregt durch die Evolution folgt die «opportunistische» Nutzung unterschiedlicher Technologie einem Entwicklungsmodus, der zu Analogschaltungen mit sehr hoher Leistungsfähigkeit führt. Die hochgradig parallele Signalverarbeitung des Gehirns eignet sich hervorragend zur Übertragung auf integrierte Schaltkreise, die heute Millionen oder sogar Milliarden Transistoren auf einem Siliziumchip integrieren. VLSI-Systeme sind in der Lage, Lern- und Anpassungsstrategien zu befolgen. Einige verwenden sogar ungewöhnliche Methoden des Gehirns (z.B. place coding), um Informationen und Signale zu repräsentieren. Dieser Artikel erläutert verschiedene Aspekte der bio-inspirierten Mikroelektronik. Ein Schwerpunkt liegt auf der Beschreibung der Vorteile dieses Ansatzes für die Verwirklichung von intelligenten Mikrosystemen mit sehr kleinem Energieverbrauch. Einige der beschriebenen und nach diesem Ansatz entstandenen Schaltungen werden bereits in industriell gefertigten Produkten verwendet.