

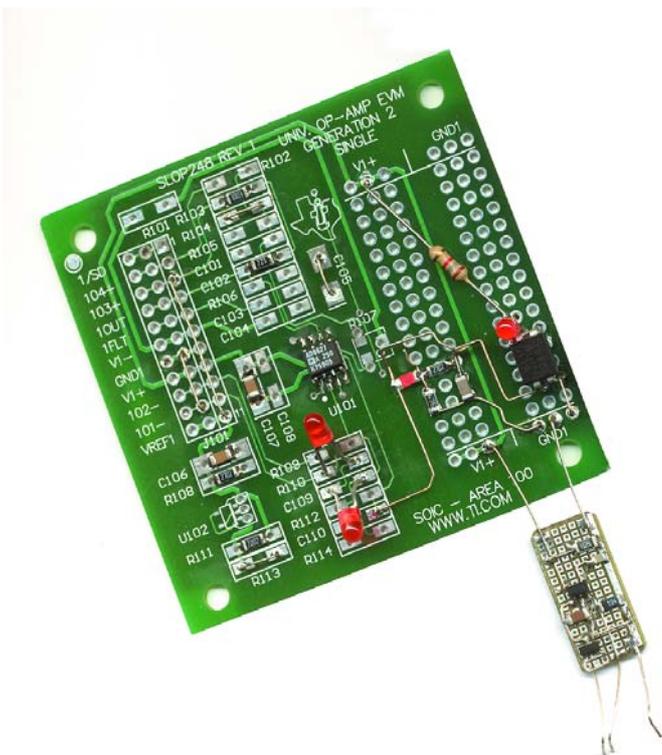
Analyse sensorielle de la lumière

Des LED pour la mesure de la lumière diurne

Klaus-Jürgen Thiesler

kjt@gmx.de

Un capteur de lumière dont la « vision » est proche de celle de l'être humain est basé, en général, sur des photo-conducteurs ou des photo-capteurs spéciaux et donc coûteux. On ignore généralement que les LED usuelles et notre œil réagissent de façon similaire à la lumière.



Les photo-détecteurs de lumière visible sont généralement basés sur des photo-résistances (*Light Dependent Resistor*, LDR), un composant assez connu. Leur spectre de sensibilité est proche de celui de l'œil humain. Inconvénients et « avantages » de ces composants à notre époque de CMS : grande taille, tolérances élevées, forte dépendance de température et courant de détection élevé. Ils sont en outre coûteux et effroyablement lents. Le changement de résistance des LDR

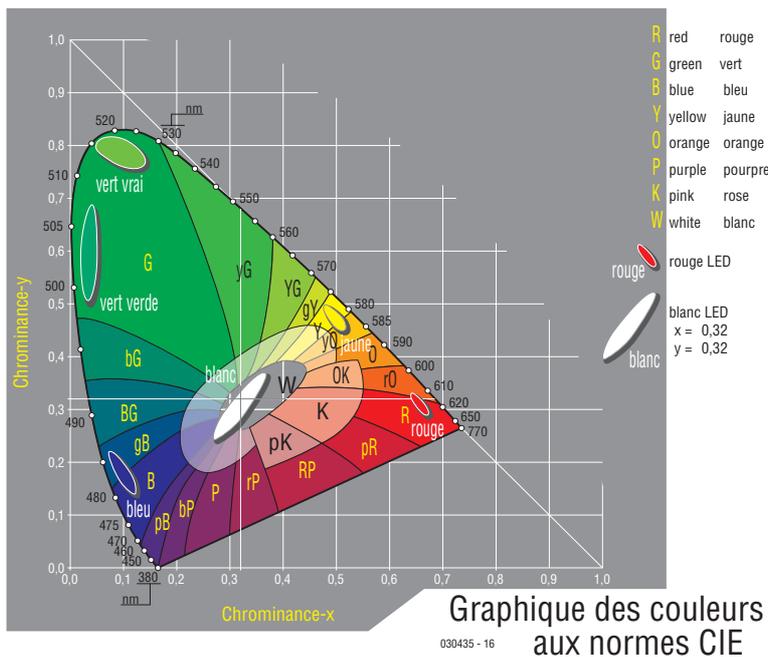
aux variations lumineuses est de l'ordre de la seconde – aussi lent que notre œil.

Il n'existe que peu de photodiodes dont la sensibilité soit semblable à celle de l'œil humain. La sensibilité de la plupart d'entre elles se situe dans l'infrarouge jusqu'à 1 100 nm. La photodiode spéciale au silicium BPW21 fonctionne dans le domaine visible de 425 à 675 nm et possède

un boîtier métallique rond TO5 avec une surface active de 7,5 mm². Elle sert d'élément de référence, ce qui à son prix, mais elle est précise, très linéaire, et plus rapide qu'une LDR ($t_{off} \approx 3$ s) de plusieurs ordres de grandeur ($t_{on/off} = 6$ μs). Elle sert couramment de référence d'exposition solaire dans les installations photovoltaïques. Ce phototransistor, périmé, est remplacé par le BPW21R de Vishay Semiconductors. Il est donc encore largement disponible. Son prix, avec l'ampli opérationnel de précision AD820 d'Analog Devices, n'est toutefois pas beaucoup plus bas.

Les « capteurs optiques intelligents » constituent une autre classe de détecteurs pour travaux de laboratoire. Citons le TCS230 de TAOS, le HSDL9000 d'Agilent Technologies et le TSL230 de Texas Instruments. D'autres composants fonctionnent comme convertisseurs lumière-fréquence. Le HSMF-C118 d'Agilent Technologies est une LED tricolore RVB (Rouge Vert Bleu = RGB pour Red Green Blue en anglais) en boîtier CMS. Le **tableau 1** donne un aperçu des détecteurs qui peuvent capter la lumière du jour.

Un certain nombre de fabricants de puces ont tenté jadis de remédier à



Graphique des couleurs aux normes CIE
030435 - 16

Figure 1. Gamme de couleurs du tableau normalisé de la CIE et zones étroitement délimitées des LED.

quelques inconvénients des capteurs. Des paramètres auraient permis l'adaptation à la lumière visible et le temps de réaction devait être amélioré par rapport aux LDR passives. Le MCS3xx est un capteur RVB en couleurs vraies (TrueColor) à 3 éléments de détection pour applications de laboratoire. Sa précision se paie. Il offre une normalisation de la sensibilité spectrale et un filtrage des couleurs. Il sera suivi d'autres circuits intégrés à barrettes de capteurs semblables aux détecteurs CCD (Charge Coupled Device). L'OPT301 monolithique de Burr-Brown possède une sensibilité relative de 80 % au jaune. Le maximum se situe dans l'infrarouge. Il n'existe qu'en boîtier métallique hermétique TO99. Son alimentation symétrique constitue un handicap dans de nombreux circuits actuels. Il nécessite un filtre à infrarouges pour fonctionner comme capteur de la lumière du jour.

Pleins feux sur la lumière diurne

Les IR à grande longueur d'onde constituent une fraction élevée de la lumière diurne. Les rayons solaires nous semblent chauds, mais moins à

l'aube qu'au crépuscule. La lumière lunaire, qui comporte au contraire une proportion élevée d'UV de faible longueur d'onde, nous paraît froide. Notre cerveau « voit » en effet aussi avec l'épiderme : ce n'est pas sans raison qu'on qualifie la composition spectrale de la lumière de « température de couleur ». Notre vision s'est adaptée en conséquence : le décalage subi par le spectre atténué la perception des couleurs lorsque l'intensité lumineuse décroît.

Les lampes à incandescence émettent un taux élevé d'IR ; les UV en sont presque absents. L'œil ne perçoit pas les grandes longueurs d'onde (IR/rayonnement calorifique), contrairement aux cellules de l'épiderme. Comme cet intervalle contient le pic de sensibilité de la majorité des détecteurs au silicium, ils ne conviennent pas à la détection de la lumière du jour et de la lumière artificielle.

Une LED ordinaire, quelle que soit sa couleur, émet de la lumière visible ; c'est son boulot après tout. Le rendement est misérable, car la puce convertit en chaleur presque toute sa puissance dont la faiblesse rend cet effet à peine perceptible.

Par rapport aux autres sources artificielles, les LED émettent une lumière presque monochromatique à très haute saturation de couleur. Dans le diagramme CIE de la figure 1, les champs de couleurs de la LED sont tous situés près du bord externe de la ligne en fer à cheval de la saturation maximale de couleur. La saturation tend par contre vers 0 dans la zone blanche.

Le modèle CIE

Le modèle CIE n'est pas idéal : il ne permet pas d'expliquer certaines couleurs comme marron ou doré. Il ne peut donc pas servir à définir et à préciser notre perception subjective des couleurs. Les couleurs sortant du cadre de RVB/CMYK/LAB et d'autres modèles sont engendrées par notre cerveau. La perception du spectre visible par les cônes sensibles à la couleur et les bâtonnets de la rétine se chevauche fortement. Ils participent donc tous à la formation de l'image. Les informations sont transmises au cerveau par les impulsions chimiques du faisceau nerveux. Les impulsions transmises au cerveau qui les

Tableau 1. Capteurs intégrés de lumière diurne

Description	Topologie	Sensibilité		Fabricant	Boîtier
		Plage en nm	Maximum en nm		
BPW 21	Photodiode PN	420 à 675	565	Vishay	TO 5 - 2 broches
OPT 101	Photodiode à OTA	280 à 1200	850	Burr-Brown	SO 8 + DIP 8 + SIP 5
OPT 301	Photodiode à OTA	200 à 1150	750	Burr-Brown	TO 99 - 8 broches
TSL 25x	Photodiode à OTA	300 à 1100	780	Texas Instr.	Plastik - 3 broches
MCS3xx	3 Photodiodes RVB PN*	400 à 510 490 à 610 590 à 750	-	Jencolour	TO 5 + SO 8

* Circuit intégré capteur de couleur RVB tri-champs Truecolor à filtre d'interférence diélectrique et sensibilité spectrale normalisée avec/sans blocage des IR.

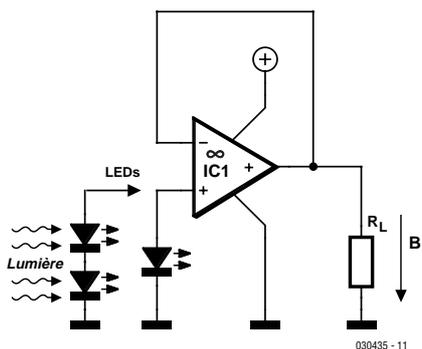


Figure 2. La résistance des entrées de l'ampli opérationnel CMOS utilisé comme convertisseur d'impédance est si élevée qu'elle n'influence presque pas la photo-tension des détecteurs LED.

reconstitue en image couleur sont préalablement assemblées par des interactions entre les cellules nerveuses. Les récepteurs ne transmettent en effet que des impulsions dépourvues d'informations couleur. Les couleurs sont engendrées dans le cerveau par la combinaison et les relations réciproques des impulsions.

Un écran plat fait de LED RVB commandées individuellement permet de créer une image en « couleurs vraies ». Mais les « couleurs spéciales » font aussi défaut. Par contre, la saturation de couleur d'un afficheur LED n'est atteinte ni par une impression artistique, ni par un afficheur LC à réflexion, ni par un moniteur à tube, ni même par des lampes à incandescence à verre coloré. La lumière du projecteur de film du cinéma provient d'un arc ! Bref, on voit dans quelle mesure les LED, comparées à l'œil humain, peuvent servir à réaliser de bons capteurs de couleur. Si la réalisation de capteurs de couleur haut de gamme basés sur des LED n'en est qu'à ses débuts, ceux-ci semblent toutefois prometteurs.

À rebours

Renversons simplement la vapeur ! Au lieu de nous servir des diodes lumineuses comme source, éclairons une LED jaune ou verte non montée et relierons-la à un voltmètre très sensible. La tension lue dépend de l'intensité lumineuse parvenant à la LED.

La tension mesurée est hélas inutilisable : la taille minuscule de la surface sensible à la lumière et le faible rendement ne permettent d'obtenir que des courants de l'ordre du femto-ampère. Même la résistance d'un voltmètre numérique n'atteint pas celle d'une LED servant de capteur. La LED détectrice du circuit de la **figure 2** est reliée à l'entrée non inverseuse d'un ampli opérationnel. Ce dernier sert de convertisseur d'impédance. L'influence de la résistance de plusieurs téraohms ($10^{12} \Omega$) des entrées JFET ou CMOS sur la

tension du capteur LED est presque négligeable. Le **tableau 2** reproduit les valeurs de tension de la LED détectrice mesurées avec ce circuit. Il n'est pas tout à fait exact de parler de convertisseur d'impédance : il s'agit d'un amplificateur à transimpédance, un quadripôle qui peut effectuer une transmission de courant, de tension et d'impédance. Dans la figure 2, l'amplificateur à transimpédance ne sert que de convertisseur d'impédance. Mais ne nous étendons pas sur ce sujet.

La **figure 3** représente un interrupteur électronique qui enclenche la charge R_L au crépuscule et la déclenche à l'aube. Le réseau R1 à R3 fournit une tension de référence $U_{REF} = 2,25 \text{ V}$ à l'entrée non inverseuse avec une hystérésis mesurée d'environ 250 mV. Ce seuil n'est pas critique, il est prévu pour 2 LED faible courant jaunes en série. Deux capteurs à LED orientés dans

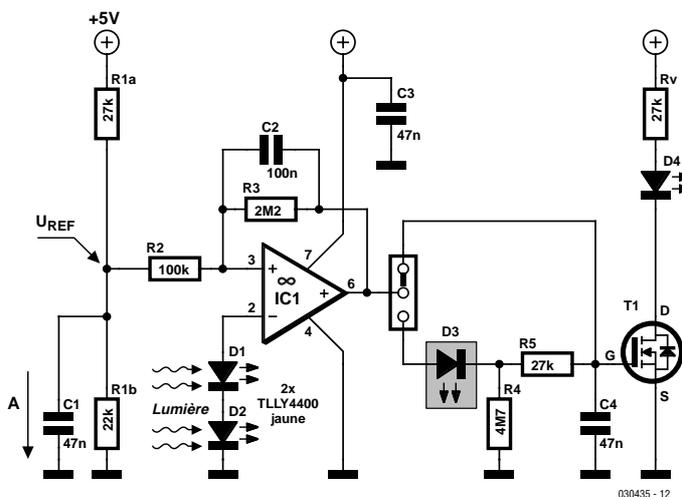


Figure 3. Commutateur « lumière du jour » fonctionnant avec presque tous les amplis opérationnels JFET/CMOS.

Tableau 2. Tension de LED équivalente à lumière aube/crépuscule moyenne et nuit sans lune (sortie de la figure 1)

LED	Type	$U_{BIAS} [V]$ pour 1 LED		$U_{BIAS} [V]$ pour 2 LED	
		crépuscule	noir	crépuscule	noir
jaune	TLLY4400 (3 mm faible courant)	1,1	0,8	2,2	1,0
rouge	TLLR4400 (3 mm faible courant)	1,0	- 1	2,0	- 1
vert	TLLG4400 (3 mm faible courant)	1,2	0,8	2,4	1,4
bleu ³	LF-59EBGBC (5 mm RVB)	1,5	- 2	2,4	- 2

1 : une LED rouge détecte le rayonnement calorifique proche, ce qui rend impossible une mesure de la lumière nocturne !

2 : non mesuré

3 : bleu n'a été connecté qu'une fois

2 directions différentes commuteront assez rapidement à l'aube ou au crépuscule. Une tolérance des résistances de 10 % suffit pour ce circuit. Les 2 LED rendent le circuit insensible à la lumière artificielle (réverbères, phares de voitures) qui ne tombera que sur une seule LED. Le « circuit de retard » constitué par LED3, R4, R5 et C4 accentue cet effet. La gaine thermorétractable de LED3 améliore considérablement ses propriétés de blocage par rapport à une diode normale.

Quel amplificateur opérationnel ?

Un TLC271 à MOSFET canal P à l'entrée devrait être adéquat car son courant de polarisation à l'entrée est aussi faible que celui du AD820. Il tend toutefois à osciller au point de commutation. Cette tendance à osciller est aussi impossible à éliminer

des TLC271, OPA132, AD8035, AD8510 et TLE2081. Le réseau R2, R3 et C2 engendre l'hystérésis des AD8065, AD820 et AD8610 qui élimine de la commutation les battements dus à l'approche « furtive » de l'aube ou du crépuscule. Ces derniers amplificateurs opérationnels peuvent se passer de circuit de retard.

Le TL081 n'utilise pas l'élément d'intégration comme indicateur de la valeur de seuil mais uniquement comme réinjecteur pour la valeur de gain. C'est pourquoi il faut qu'un trigger de Schmitt commute la valeur de seuil entre la sortie de IC1 et LED3 comme dans la figure 2. Les oscillations du TL081 ne sont de toute façon pas très prononcées.

La haute précision de l'OPA655 est complètement superflue pour un capteur de lumière diurne (et il est coûteux). Il permet de réaliser un détecteur rapide pour arcs électriques. Il est par ailleurs conçu pour

une alimentation bipolaire de ± 5 V.

La photo en début d'article montre une platine d'expérimentation (EVM) de Texas Instruments utilisée par l'auteur pour tester différents amplis op à JFET dans le circuit du capteur de lumière diurne.

Le **tableau 3** donne un aperçu des amplificateurs opérationnels testés avec succès dans ce circuit. Les autres types d'amplificateurs opérationnels à transistors d'entrée bipolaires ou à MOSFET complémentaires sont inadéquats : leurs entrées possèdent une résistance trop basse ou un courant de décalage (offset) bien trop élevé. Ces courants de décalage sont dus à la différence inévitable entre les courants de grille des transistors complémentaires de l'étage d'entrée.

Le redimensionnement de R1a/b permet d'ajuster le point de commutation à d'autres intensités lumineuses ou LED. Il vaut mieux alors court-circuiter l'élément de temporisation (LED3, R4, R5). Celui-ci cause un délai d'extinction d'environ 3 s. Cela peut paraître court par rapport à la durée de l'aube sous nos latitudes, mais ça marche. Ne perdons

Tableau 3. Sélection d'ampli op à étage d'entrée JFET utilisables

Type	PBP en MHz	Offset en μ V	Bias d'entrée en pA	U_{CC} en V	I_{CC} en mA	U_{IN} max. en V	Fabricant	Boîtier	Testé	Notes
AD8033	80	1.000	1,5	+5 à 24	3,3	0 à $+U_{CC}-3$	Analog Devices	SO 8 + SOT 23	oui	Shutdown
AD8065	145	400	2	+5 à 24	6,4	0 à $+U_{CC}-3$	Analog Devices	SOT 23	oui	
AD820	1,8	100	2	+3 à 36	0,65	-0,2 à $+U_{CC}-1$	Analog Devices	SO 8 + DIP 8	oui	
AD8610	25	85	2	+5 à 26	3,5	0 à $+U_{CC}-3$	Analog Devices	SO 8 + MSOP8	oui	
AD8627	5	500	0,5	+5 à 26	0,75	0 à $+U_{CC}-1$	Analog Devices	SO 8 + SC70	oui	
OPA132	8	250	5	+5 à 36	4	rail à rail (entrée et sortie)	Burr-Brown	SO 8 + DIP 8	oui	THD = 0,000 08%
TLE2071	10	500	6	+4,5 à 36	1,7	0 à $+U_{CC}$	Texas Instr.	SO 8 + DIP 8	oui	Offset ajustable
TLE2081	10	1.100	6	+4,5 à 36	1,7	0 à $+U_{CC}$	Texas Instr.	SO 8 + DIP 8	oui	Offset ajustable
TL081C	3	3.000	5	+4,5 à 16	1,4	0 à $+U_{CC}$	Texas Instr.	SO 8 + DIP 8	oui	Offset ajustable
TLC271C	0,09	1.100	0,1	+3 à 16	1	-0,2 à $+U_{CC}-1$	Texas Instr.	SO 8 + DIP 8	oui	Offset ajustable
OPA655	240	1.000	-5	$\pm 4,75$ à 5,25	25	$\pm 2,75$	Burr-Brown	SO 8 + DIP 8	non	
INA121	-	200	4	$\pm 2,25$ à 18	0,45	$-U_{CC}+2$ à $+U_{CC}-1$	Burr-Brown	SO 8 + DIP 8	non	InAmp de précision

pas de vue le fait que la vision colorée de notre œil couvre une plage dynamique d'intensité lumineuse d'approximativement 100 dB (environ 0,1 à 20 000 lux) !

À l'aube et au crépuscule, la tension de polarisation de la LED augmente ou diminue rapidement. L'hystérésis du point de commutation est donc assez rapidement franchie. Il faut recourir à des amplificateurs opérationnels modernes tels que le AD8610 lorsque la durée du crépuscule (du matin ou du soir) est très longue. Leur commutation est très stable et leur hystérésis lumineuse très courte. Dans ce cas, il est possible de se passer de temporisation.

Des spectres et des êtres

La **figure 4** montre la différence de sensibilité lumineuse entre l'œil humain de jour et de nuit et divers composants électroniques. La sensibilité de notre œil à la couleur varie en fonction de l'intensité lumineuse. Cela n'a rien d'étonnant : il est conçu pour s'adapter à la lumière bleuâtre de la lune proche des UV tout comme à la lumière jaunâtre du soleil qui tire sur l'infrarouge. La rétine, qui s'adapte à différentes luminosités, s'accoutume aussi aux couleurs après une plus longue exposition. Une feuille de papier blanc est blanche, même éclairée par une lampe à incandescence. Notre mémoire dit « feuille blanche », même si celle-ci reflète une lumière tirant sur le jaune-rouge.

En passant de la vision nocturne à la vision diurne, notre œil fait montre d'une faculté d'adaptation hors du commun aux changements de luminosités. De 0,000 01 à 1 000 000 cd/m², une dynamique de 220 dB hors de portée de n'importe quel élément artificiel ! La vision des couleurs et des contrastes croît avec l'intensité lumineuse, puis décroît lorsque la lumière devient très intense. L'œil traite une grande partie des différences de luminosités en noir et blanc. Sa dynamique couleur atteint « seulement » 100 dB.

La perception des couleurs chez l'être humain est individuelle. Un vert consensuel, un gris mondialement neutre, un blanc vraiment blanc ? Chimères ! Le calibrage d'un écran s'effectue toujours en fonction de la perception subjective de son utilisateur. Il est par contre parfaitement possible de normaliser les sources d'émission les unes par rapport aux autres : le gris d'un ciel couvert à midi, le blanc d'une lampe à incandescence, le jaune Sahara d'une carrosserie de voiture sont techniquement mesurables, (parfois) modifiables et reproductibles.

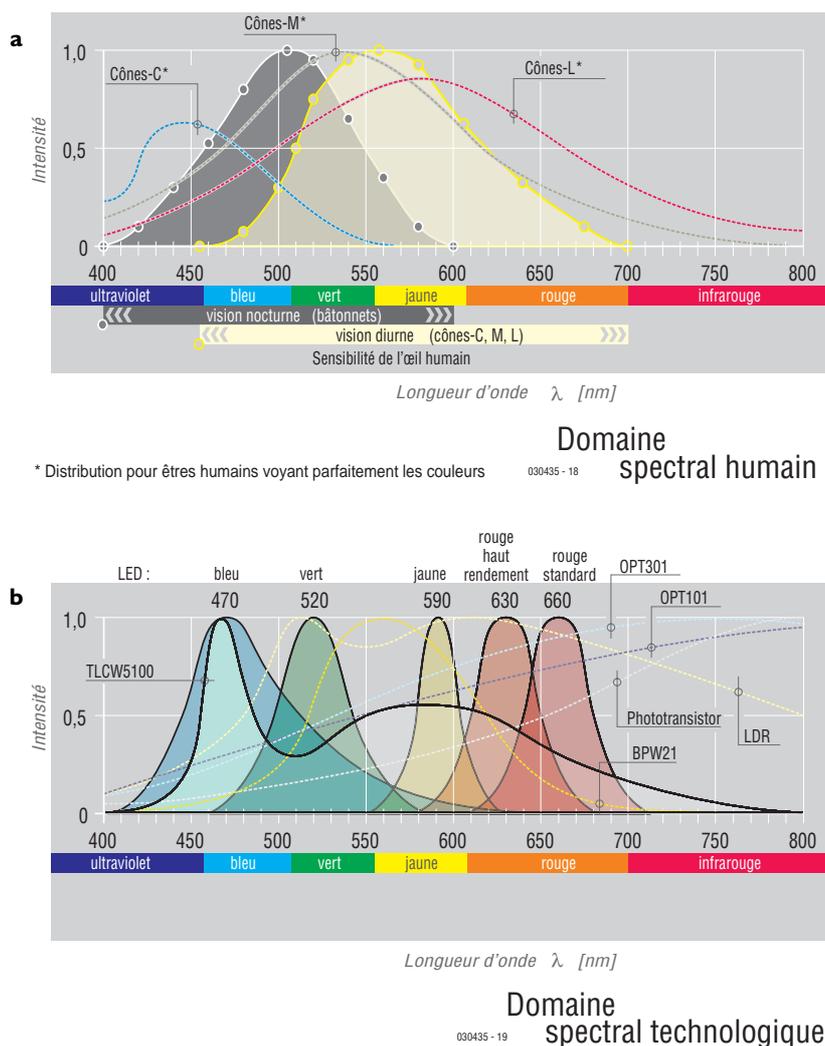
La rétine, qui tapisse le fond de l'œil, est un réseau de cellules réceptrices en forme de

cônes et de bâtonnets qui transforment la lumière incidente en substances électrochimiques (énergie neuronale). Leur disposition et leur quantité sur la demi-sphère antérieure de l'œil ne sont pas uniformes. Elles varient selon l'emplacement sur la rétine mais aussi entre individus.

Environ 120 millions de bâtonnets assurent la vision nocturne, environ 6 millions de cônes la vision diurne. Tout comme les LED de couleurs différentes, possédant chacune sa bande étroite et son intensité de rayonnement propre, les cellules sensorielles sont subtilement différenciées en fonction de la luminosités, du contraste et des couleurs, mais leurs bandes sont plus étendues. Les spectres des 3 types de cônes sensibles à la lumière du jour se chevauchent fortement là où la longueur

d'onde passe de courte à moyenne à longue (cônes C/M/L, Court/Moyen/Long), à l'inverse des LED au rayonnement presque monochromatique.

Comme les cellules sensorielles « S » sont moins sensibles aux stimuli, les couleurs proches du bleu semblent plus sombres que celle de la gamme vert-rouge. Le recouvrement important de sensibilité spectrale des cônes C, M, L place le maximum de sensibilité diurne aux couleurs (vision photopique) d'un « œil moyen » à 555 nm (vert). La photorésistance BPW21 et le système de signalisation lumineuse du rail et de la navigation sont des exemples d'application de ce fait. Les feux de circulation actuels dont le vert est accompagné d'un pourcentage élevé de bleu sont, au contraire, conçus pour tenir compte des personnes



* Distribution pour êtres humains voyant parfaitement les couleurs

030435 - 18
Domaine spectral humain

030435 - 19
Domaine spectral technologique

Figure 4. Comparaison des domaines spectraux : (a) humain, (b) technique.

dont la perception des couleurs est anormale.

Le cristallin absorbe les UV. Un implant plastique remplaçant la lentille cornée naturelle d'une personne souffrant de cataracte permettra aux cônes S de celle-ci de percevoir les UV jusqu'à moins de 300 nm. Les insectes sont particulièrement sensibles à la lumière UV. Le maximum de sensibilité spectrale d'un œil normal en vision nocturne (vision scotopique) est situé à 507 nm.

Des interactions entre bandes de cellules nerveuses voisines se produisent dans la rétine, les nerfs optiques et les cellules cérébrales lors de la transmission des données des cellules sensorielles au cerveau. Une image virtuelle n'est formée que lorsque le cerveau convertit les impulsions nerveuses reçues et les traite en fonction des informations déjà présentes. L'œil n'est qu'un capteur, les cellules sensorielles sont complètement insensibles aux couleurs et aux formes. Elles ne font que convertir l'énergie lumineuse en excitations électrochimiques dépourvues d'informations picturales. On peut établir une analogie avec un processeur graphique et les 3 lignes RVB reliées au moniteur : seules des tensions sont transférées, à l'exclusion de toute information picturale. L'œil convertit pour ainsi dire numériquement l'image photoréaliste transmise aux récepteurs par la pupille et le cristallin. L'interaction entre récepteurs voisins, nerfs optiques et cellules cérébrales recrée une image photoréaliste dont le tramage, les effets de moiré et les limites de dégradé sont complètement exclus, contrairement à un écran ou à une impression. Ces derniers ne disposent malheureusement pas d'un cerveau. L'excitation chromatique du cerveau n'est donc due qu'à la combinaison des informations de tous les récepteurs et nerfs optiques.

Isaac Newton : « La lumière évoque les couleurs qui sont en nous ».

La complexité de ces conversions et transmissions électrochimiques rendent toute normalisation impossible. Les variations de taux de substances corporelles (par exemple avitaminose) peuvent en outre modifier la perception des couleurs. Lors de l'épuisement des substances corpo-

relles, qui se traduit finalement par un « voile noir », le cerveau perçoit les choses toujours plus en blanc, les couleurs pâlisent et les tons de gris s'éclaircissent.

La perception des couleurs par notre cerveau ne joue qu'un rôle secondaire. On s'en aperçoit lorsqu'on essaie (vainement) de déterminer l'éloignement d'une source lumineuse. Nous savons approximativement quel est l'éloignement d'une étoile dans le ciel nocturne. Nous pouvons à la rigueur, grâce à son environnement, estimer la distance nous séparant d'une lampe. Outre les couleurs rayonnées par un objet, le cerveau a besoin d'informations sur sa structure et la nature de sa surface. Toutes ces informations de couleur, placées dans le cadre des expériences déjà mémorisées, sont nécessaires pour créer une image. Dans un cas de ce genre, il se peut que l'encéphale ait aussi recours à des impulsions du toucher, du goût, de l'odorat et de l'ouïe. Et n'oublions le second œil.

Environ 8 à 10 % des européens et 0,5 à 1 % des européennes souffrent de daltonisme héréditaire. Le rapport de sensibilité des 3 types C/M/L de cônes diurnes est : bleu 10 %, vert 48 % et rouge 42 %. La sensibilité des 3 types de cônes d'un daltonien est différente (par exemple, déficience du vert, avec bleu 30 %, vert 30 % et rouge 40 %). Cette différence varie considérablement. Une personne sera encore capable de distinguer le vert du rouge, une autre non. Chez d'autres, les symptômes se limitent à la fovéa (zone de meilleure vision). La répartition des cônes varie entre individus et aussi selon l'emplacement sur la rétine : la reconnaissance du rouge-vert décroît à mesure de leur éloignement du centre de la fovéa (bord externe de la demi-sphère antérieure de l'œil).

Les cas de daltonisme intégral sont très rares : 0,003 % de la population. Il existe aussi un daltonisme dans le jaune-bleu (0,004 %). Ces anomalies sont présentes à la naissance, ne se modifient pas et ne s'acquièrent pas au cours de la vie. Elles sont héréditaires

La « normalité » rouge-vert s'applique au centre de l'Europe. À l'époque préhistorique des chasseurs et cueilleurs, il était vital de

reconnaître des traces sanglantes dans les bois et d'apercevoir les baies rouges sous les feuilles vertes. Cette normalité, rien qu'une acuité visuelle particulière aux contrastes rouge-vert, est superflue dans d'autres environnements comme le désert ou la banquise. Cette espèce de daltonisme est donc principalement liée à la nature de la vision dans un environnement déterminé.

Concepteurs de sites Web et d'appareils, un conseil ! Ne négligez jamais ces phénomènes lorsque vous traitez les aspects optiques d'un appareil : les personnes souffrant de daltonisme constituent une importante minorité de la population. Blanc, c'est quoi ? Bleu, c'est quoi ? Et un gris neutre ? Ces aspects influencent le contraste simultané (modification de la couleur d'une surface en fonction du fond), la chromostéréoscopie (le rouge semble proche, le bleu lointain), l'illisibilité d'un texte rouge sur fond vert et autres variations de teinte. C'est pourquoi il vaut mieux voir la vie en rose plutôt qu'en noir...

Les principes de nos médias électroniques sont semblables à la biologie de l'œil. Seule la conversion par nos nerfs et notre cerveau en une image photographique échappe à la technique.

Dernier regard

Le raccordement direct de LED ordinaires comme capteurs de lumière à des amplificateurs opérationnels à entrées JFET ou simple étage d'entrée MOSFET doit être élaboré avec soin. Les différentes topologies de puces se distinguent par leur comportement oscillatoire lors de la commutation.

La fréquence d'oscillation des anciens IC au point de commutation ne peut être fixée par C2 et R3 que par intégration. Dans les amplificateurs opérationnels modernes, au contraire, l'élément RC à l'entrée non inverseuse offre un comportement de commutation bien défini avec une fonction d'hystérésis pour la luminosité. Les systèmes de compensation nécessaires sont internes, donc invisibles.

Tous les amplificateurs opérationnels listés permettent de réaliser le détecteur de lumière simple de la figure 2 avec temporisation de 3 secondes. Les déviations entre les types sont bien moindres que celles des composants passifs externes. Ils permettent de réaliser un montage CMS plus précis, plus économique, plus compact et comportant moins de composants qu'un JFET BF245 discret, un ampli opérationnel standard et un potentiomètre trimmer.

(030435)