SOMMATION TEMPORELLE, EFFET DE STILES-CRAWFORD

AUTEUR

Thomas Salmon: Northeastern State University, États-Unis

RÉVISION PAR LES PAIRS

Scott Steinman: Southern California College of Optometry, États-Unis

CE CHAPITRE INCLUT UNE RÉVISION DE :

- La loi de Ricco
- La sommation temporelle et la loi de Bloch
- L'effet de Stiles-Crawford
- Résumé de la double nature rétinienne

LOI DE RICCO

La loi de Ricco (sommation spatiale) stipule que dans un diamètre critique, le nombre total de quanta nécessaire pour un seuil de détection reste constant. Citant de la p. 47 de Schwartz :

La sommation spatiale totale est représentée mathématiquement par la loi de Ricco :

$$IA = K$$

Où,

I	=	intensité du stimulus (quanta/surface)
A	=	surface du stimulus
K	=	constante

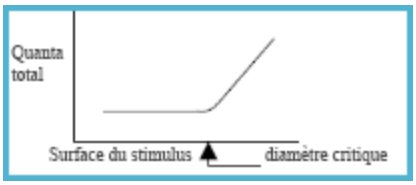

Figure 10-1: *Loi de Ricco*

Remarquez que, selon la loi de Ricco, c'est le produit de I et A qui est constant, et non simplement I. Vous pouvez vérifier ceci en calculant les unités dans l'équation. Le produit de I (quanta/surface) et A (surface) donne une valeur en quanta, puisque les unités de surface s'annulent. Comme le stipule la loi de Ricco, à l'intérieur du diamètre critique, le nombre de quanta nécessaire pour atteindre le seuil est constant.

$$\left(\frac{\text{quanta}}{\text{surface}}\right)\left(\frac{\text{surface}}{1}\right) = \text{quanta}$$

D'un autre côté, si vous changez la valeur de A (c.-à-d. le diamètre), la valeur de I ne peut pas demeurer constante, mais doit être changée pour que I multiplié par A reste constant. Pour que I fois A reste contant, I et A doivent avoir une relation réciproque. Le tableau suivant démontre ceci :

LOI DE RICCO (SUITE)

Tableau 10-1: *Relation entre I et A*

I (QUANTA/SURFACE)	SURFACE	K (CONSTANTE)
10	1	10
5	2	10
2	5	10
1	10	10

Considérons l'exemple suivant :

Q. Selon la loi de Ricco (sommation spatiale), tant que le point est plus petit que le diamètre critique, l'intensité (quanta/surface) nécessaire pour le seuil de détection...

A. Sera constante pour toutes tailles de point.

B. Doit augmenter avec l'augmentation de la taille du point.

C. Doit diminuer avec l'augmentation de la taille du point.

D. N'est pas liée à la taille du point.

SOMMATION TEMPORELLE ET LOI DE BLOCH

Alors que le système visuel additionne la lumière qu'il reçoit sur une surface, il additionne aussi la lumière qu'il reçoit à travers le temps. La période pendant laquelle la lumière est additionnée est appelée la **durée critique**. La sommation à travers le temps est appelée **sommation temporelle**.

Le système scotopique a une durée critique relativement longue de 100-200 msec; toute la lumière reçue durant cette période est additionnée et traitée comme étant un flash lumineux. Si le nombre total de quanta excède le seuil de détection, la lumière sera perçue. Peu importe le nombre de flashs qui sont présentés lors une durée critique, ils seront perçus comme étant un flash. Pour que deux flashs soient résolus temporellement comme étant distincts, ils doivent avoir au moins une durée critique entre eux.

Le système photopique a une durée critique relativement courte de 10-50 msec, tel qu'illustré à la Fig. 3-19 de Schwartz. Pour que les quanta de deux flashs s'additionnent, ils doivent être présentés dans une succession très rapide. Ceci donne une grande résolution temporelle au système photopique, mais avec une sensibilité moindre.

La durée critique pour la sommation temporelle peut varier avec les conditions de test. La durée critique plus longue pour le système scotopique lui permet de collecter des photons à travers le temps, lorsque peu de photons sont disponibles. La durée critique n'est pas affectée par la longueur d'onde.

La loi temporelle équivalente à la loi de Ricco (sommation spatiale) est **la loi de Bloch pour la sommation temporelle**. Elle stipule qu'à l'intérieur de la durée critique, le nombre de quanta total nécessaire pour atteindre un seuil demeure constant pour des flashs de durées différentes. Au-delà de la durée critique, la lumière nécessaire pour une détection augmente (Fig. 3-20 de Schwartz). Ceci est exprimé par la formule suivante :

$$I(t) = K$$

Puisque 'I' est exprimé en termes de quanta/temps, le produit de 'I' et 't' représente le nombre total de quanta nécessaire pour la détection. La loi de Bloch est aussi connue sous le nom de **réciprocité temps-intensité**, puisqu'une diminution de l'intensité (I) est nécessaire pour détecter la lumière lorsque la durée (t) augmente. À l'intérieur de la durée critique, l'intensité et la durée sont inversement proportionnelles; c'est-à-dire, elles ont une relation réciproque.

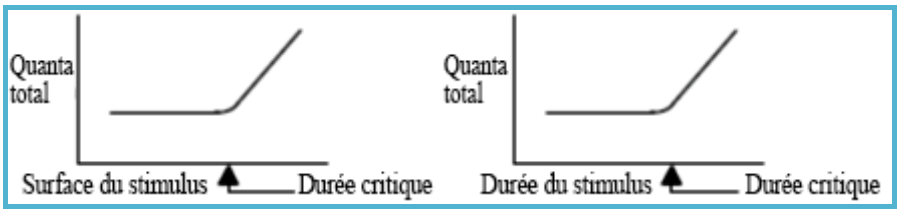

Figure 10-2: *Comparaison côte à côte des sommations spatiale et temporelle*

EXEMPLE HYPOTHÉTIQUE DE LA LOI DE BLOCH

La loi de Bloch (sommation temporelle) est valide à l'intérieur de la durée critique. Que se passe-t-il au-delà de la durée critique? La loi de Bloch ne s'applique plus et le nombre de quanta contenus dans la lumière doit être augmenté, tel qu'illustré par la portion ascendante de la courbe de droite de la Fig. 10-2.

Les Figures 10-3 à 10-7 démontrent la loi de Bloch en utilisant des données hypothétiques d'une expérience qui mesure le seuil de détection de lumière pour plusieurs temps d'exposition (durées).

Supposons que la durée critique est de 4 msec et 20 quanta doivent être livrés durant ces 4 msec pour être vus. Dans la Figure 10-3, une lumière d'une durée de 1 msec et d'une intensité de 20 quanta/msec est présentée. Le nombre total de quanta livrés durant le flash est 20 quanta/msec x 1 msec = 20 quanta. Tous ces 20 quanta tombent dans la durée critique, donc la lumière sera perçue.

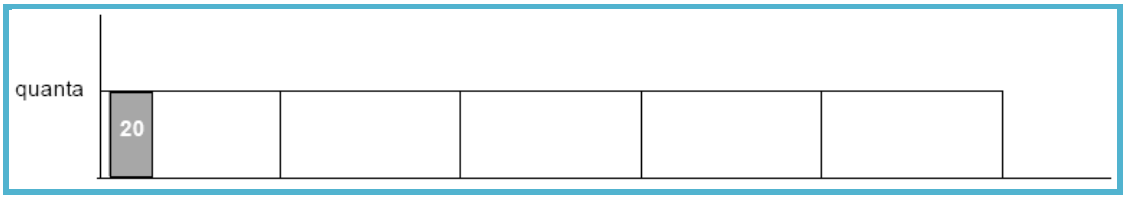

Figure 10-3: *Un flash de 1 msec ayant une intensité de 20 quanta/msec*

Dans la Figure 10-4, une lumière d'une durée de 2 msec ayant une intensité de 10 quanta/msec est présentée. Le nombre total de quanta livrés durant le flash est 10 quanta/msec x 2 msec = 20 quanta. Tous ces 20 quanta tombent dans la durée critique, donc la lumière sera perçue.

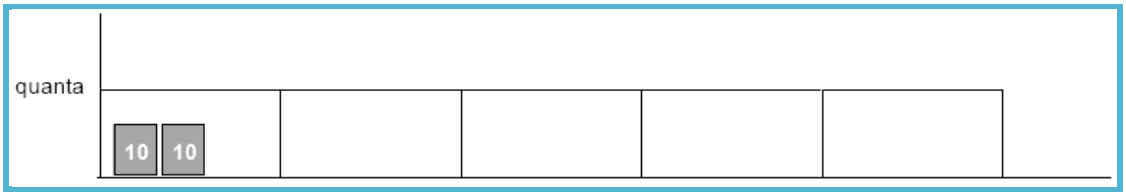

Figure 10-4: *Un flash de 2 msec ayant une intensité de 10 quanta/msec*

Dans la Figure 10-5, une lumière d'une durée de 4 msec ayant une intensité de 5 quanta/msec est présentée. Le nombre total de quanta livrés durant le flash est 5 quanta/msec x 4 msec = 20 quanta. Tous ces 20 quanta tombent dans la durée critique, donc la lumière sera perçue.

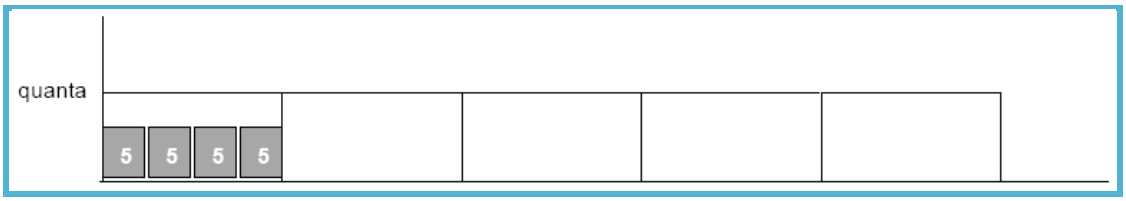

Figure 10-5: *Un flash de 4 msec ayant une intensité de 5 quanta/msec*

Dans la Figure 10-6, une lumière d'une durée de 5 msec ayant une intensité de 4 quanta/msec est présentée. Le nombre total de quanta livrés durant le flash est 4 quanta/msec x 5 msec = 20 quanta. Seulement 16 de ces quanta tombent à l'intérieur de la durée critique. Ceci n'est pas suffisant pour atteindre le seuil et la lumière ne sera pas perçue. Il faudrait augmenter l'intensité à 5 quanta/msec pour avoir une détection. Maintenant, si la lumière de 5 msec avec une intensité de 5 quanta/msec, le nombre total de quanta sera égal à 5 quanta/msec x 5 msec = 25 quanta. De ceux-ci, 20 tombent dans la durée critique et la lumière sera perçue.

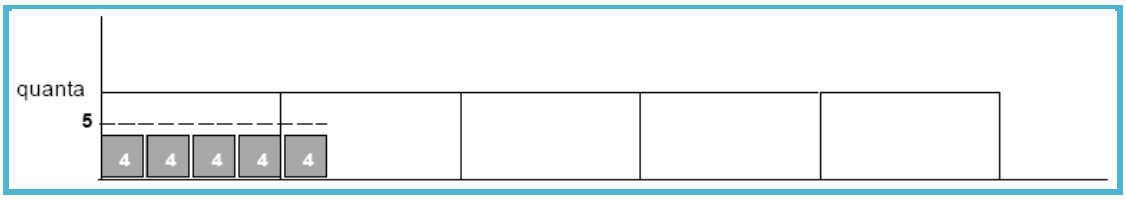

Figure 10-6: *Un flash de 5 msec ayant une intensité de 4 quanta/msec*

EXEMPLE HYPOTHÉTIQUE DE LA LOI DE BLOCH (SUITE)

Dans la Figure 10-7, la lumière a une durée de 10 msec et une intensité de 4 quanta/msec. Le nombre total de quanta livrés durant le flash est 4 quanta/msec x 10 msec = 40 quanta. Par contre, de ces 40 quanta, seulement 16 tombent dans la durée critique et ceci est insuffisant pour la détection. Il faut augmenter l'intensité à 5 quanta/msec. Alors, le nombre total de quanta livrés sera 5 quanta/msec x 10 sec = 50 quanta.

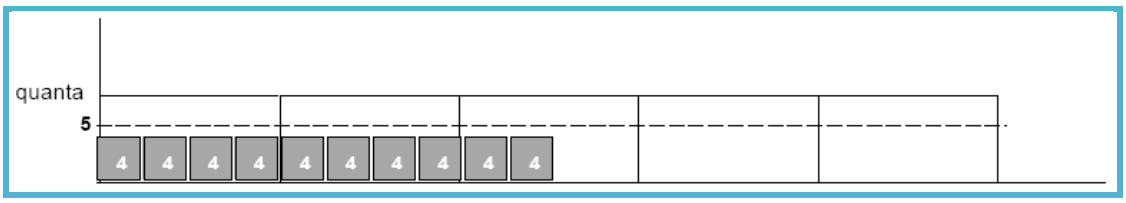

Figure 10-7: *Un flash de 10 msec ayant une intensité de 4 quanta/msec*

Les résultats de cette expérience hypothétique sont montrés dans le tableau 10.2 ci-dessous et sont illustrés sur la Figure 10.8.

Tableau 10-2: *Quanta totaux nécessaires pour la détection selon différentes durées.*

	INTENSITÉ (QUANTA/MSEC)	DURÉE (MSEC)	QUANTA TOTAUX
FIGURE 10-3	20	1	20
FIGURE 10-4	10	2	20
FIGURE 10-5	5	4	20
FIGURE 10-6	5	5	25

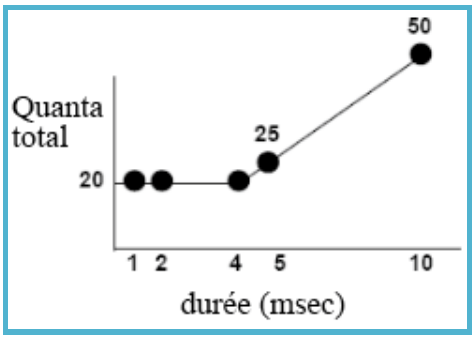

Figure 10-8: *Résultats du Tableau 10.2 dessinés sur un graphique*

EFFET DE STILES-CRAWFORD

De fins faisceaux lumineux entrent par la partie périphérique de la pupille, suite à la réfraction, frappent la rétine à des angles plus obliques par rapport aux faisceaux axiaux qui frappent la rétine de façon plus perpendiculaire. Puisque les cônes agissent comme des **guides-d'ondes** et font passer la lumière à partir de leurs segments internes vers leurs segments externes, ils sont plus efficaces pour capturer des photons lorsque le faisceau incident frappe directement suivant l'axe du cône. Ceci est illustré dans la Fig. 3-21 de Schwartz.

Des faisceaux qui n'entrent pas parallèlement dans le cône mais avec un angle sont moins efficaces pour stimuler les cônes. À cause de cela, la lumière qui entre par la périphérie de la pupille semble plus sombre que la lumière qui entre selon l'axe de la pupille. Ceci est connu sous le nom de l'effet de Stiles Crawford de type 1 ou tout simplement l'**Effet de Stiles-Crawford (ou SCE pour Stiles-Crawford Effect)**. L'effet de Stiles-Crawford de type 2 touche la vision des couleurs.

EFFET DE STILES-CRAWFORD (SUITE)

En citant un extrait d'un article du *Journal of the Optical Society of America* par He, Marcos et Burns (numéro d'octobre 1999, p. 2363-2369)

> *La luminosité apparente d'une lumière change selon son point d'entrée dans la pupille d'un oeil humain. Ce changement dans l'efficacité lumineuse relative en fonction de la position dans la pupille est appelé l'effet de Stiles-Crawford du premier type. Le changement du point d'entrée dans la pupille pour la lumière incidente est associé au changement d'angle de la lumière à la rétine et donc, le changement de luminosité selon la position d'entrée dans pupille est une mesure de la sensibilité angulaire des cônes. Le pic de la fonction d'efficacité lumineuse est interprété comme étant la position dans la pupille vers laquelle les cônes sont orientés. La fonction d'efficacité lumineuse est typiquement modélisée comme étant une distribution gaussienne (ou, de façon équivalente, la sensibilité log est représentée par un changement parabolique avec la position de la pupille); c'est-à-dire,*

$$S_{pupille} = S_0 \times 10^{-\rho\{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2\}}$$

Où S_0 est la sensibilité à cet endroit dans la pupille avec l'efficacité lumineuse maximale (à la position x_0 , y_0), x et y sont les positions test dans la pupille, et rho (en l'inverse de millimètres carré) représente une constante spatiale (plus rho est élevé, plus la directivité est grande).

Si on considère uniquement une section transversale en deux dimensions de la pupille, deux exemples du SCE sont dessinés dans un graphique dans la Figure 10.9 ci-dessous. La courbe moins élargie (plus grande directivité) montre l'effet mesuré objectivement (ρ = 0.1), et l'autre courbe montre les résultats des mesures psychophysiques (ρ = 0.06).

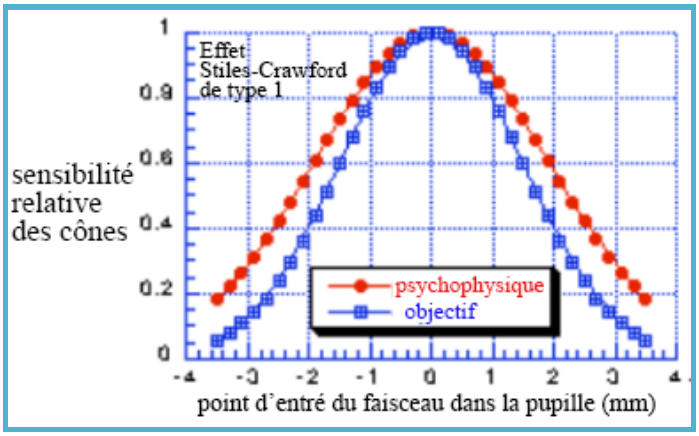

Figure 10-9: *Section transversale horizontale de l'effet de Stiles-Crawford pour des valeurs de rho de 0.06 (courbe rouge du haut) et de 0.1 (courbe bleue du bas).*

IMPORTANCE CLINIQUE DE L'EFFET DE STILES-CRAWFORD

Susana Marcos, une scientifique de l'Instituto de Optica 'Daza de Valdéz' (CSIC) à Madrid, Espagne, suggère que la mesure de l'effet de Stiles-Crawford pourrait permettre la détection précoce des maladies des photorécepteurs : « Puisque la directivité normale des photorécepteurs nécessite une morphologie normale des cônes ainsi qu'une relation normale avec l'espace extracellulaire, la directivité des photorécepteurs est pertinente au niveau clinique. »

(Marcos S, Burns SA. Cones spacing and waveguide properties from cone directionality measurements. J Opt Soc Am A16, 995-1004 (1999).)

Il y a d'autres applications cliniques importantes pour le SCE. En chirurgie réfractive, les patients peuvent avoir une baisse de vision s'ils ont des pupilles larges à cause de la quantité d'aberrations optiques dans la cornée périphérique. Les patients avec de plus petites pupilles auront une meilleure vision suite à une chirurgie réfractive que ceux ayant de grandes pupilles. Le SCE aide à mitiger les effets secondaires des aberrations périphériques, car il réduit l'intensité des rayons lumineux qui entrent par la périphérie de la pupille; les rayons qui entrent par les milieux optiques périphériques sont alors plus sombres et seront moins dérangeants. C'est comme si la pupille était couverte d'un **filtre de densité neutre apodisé** (Figure 10-10). Le SCE peut alors réduire la **taille effective de la pupille** pour qu'elle soit plus petite que la taille réelle de la pupille. Des recherches par Salmon et West donnent des exemples sur les différences entre les tailles réelles et effectives des pupilles.

EFFET DE STILES-CRAWFORD (SUITE)

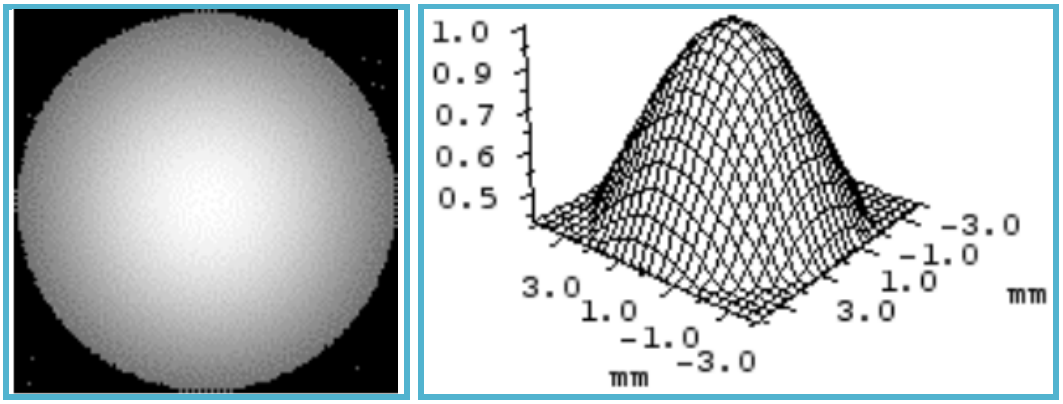

Figure 10-10: *Le SCE est parfois décrit comme étant une apodisation de la pupille, montré sur la représentation en niveaux de gris (gauche) ou le tracé de surface (droite)*

Un autre bénéfice du SCE est qu'il aide à réduire l'effet intraoculaire de dispersion lumineuse sur l'image rétinienne. La lumière dispersée dans l'œil frappe la cornée avec un angle oblique, mais à cause du SCE, cette lumière n'interfère pas beaucoup avec la lumière qui forme l'image rétinienne. Sans le SCE, la lumière dispersée blanchirait l'image, réduirait le contraste de l'image et dégraderait la vision.

Les cônes sont normalement pointés vers le centre de la pupille pour maximiser la capture de photons. Si, pour quelque raison, la pupille est décentrée, les cônes vont graduellement se réorienter pour pointer vers le nouveau centre de la pupille. Des expériences ont montré que si le centre de la pupille est déplacé en temporal, les cônes vont changer d'orientation et si la pupille est rétablie à sa position de base, les cônes vont se réorienter selon leur position originale (Fig. 3-22 de Schwartz). Ceci montre que les cônes peuvent bouger et s'orienter pour avoir une efficacité maximale.

Il n'y a pas de SCE pour les bâtonnets, car le segment interne de ceux-ci n'agit pas comme un guide-d'onde, donc les bâtonnets ne bénéficient pas d'une réduction des aberrations avec le SCE. Ceci n'est pas problématique par contre, puisque la vision scotopique n'offre pas une bonne acuité visuelle de toute façon, à cause des plus grandes zones de sommation spatiale. Si par exemple, les aberrations rendent l'image rétinienne floue à un niveau de 20/40, les effets de ces aberrations ne seront pas remarqués, puisque le système scotopique est uniquement capable de voir 20/200.

Dans le cas de la vision scotopique, c'est plutôt bénéfique pour les bâtonnets de NE PAS AVOIR de SCE. Ils acceptent la lumière dans un plus grand angle et donc, ils peuvent collecter plus de photons que les cônes. En effet, ils profitent du diamètre complet de la pupille. Le résultat est une meilleure sensibilité sous une illumination réduite.

Échantillon de questions de test sur le SCE du *Optometry Examination Review book*, par Casser et al, 1986 (Old review book):

#418 Lequel des facteurs suivants qui contribuent aux lumières parasites dans un jeune œil a le moins d'impact sur la vision à cause de l'effet de Stiles-Crawford?

A. Dispersion de la cornée

B. Dispersion du cristallin

C. **Réflexions de l'intérieur la rétine**

D. Transmission à travers l'iris

E. Aucune de ces réponses

#453 L'effet visuel d'une lumière parasite intraoculaire qui a pour origine la dispersion de la lumière par une rétine neutre peut être diminué par

A. La tache de Maxwell

B. **L'effet de Stiles-Crawford**

C. La birefringence des fibres de Henle

D. Le phénomène Troxler

E. L'effet de Broca-Sulzer

RÉSUMÉ DE LA DOUBLE NATURE RÉTINIENNE

La double nature de notre rétine nous permet de voir dans un large spectre de luminosité, des très basses luminances d'une nuit sombre à celles d'une journée ensoleillée. Nos yeux peuvent s'adapter et voir une différence qui est bien au-delà de 10 unités de log en termes de luminance.

Le système scotopique a été optimisé pour opérer dans des conditions d'illumination faibles. Sa spécialité est sa grande sensibilité; c'est-à-dire la détection des objets à faible illumination lorsqu'il y a peu de photons. Les caractéristiques suivantes propres au système scotopique augmentent la sensibilité, mais compromettent la résolution visuelle :

- Grandes zones de sommation spatiale, qui collectent les photons dans une région large
- Longue période critique pour la sommation temporelle, pour pouvoir collecter des photons sur une longue période de temps
- Absence de SCE, pour que les bâtonnets puissent collecter des photons dans un plus grand angle

Le système photopique opère lorsque la lumière est abondante, alors il n'y a pas un besoin de « chasser » des photons. Il est conçu pour donner de l'information détaillée sur la scène visuelle. La vision photopique nous donne une excellente résolution spatiale (acuité visuelle), une grande résolution temporelle (détection des mouvements) et une vision des couleurs. Les caractéristiques suivantes augmentent la résolution et la vision détaillée au détriment de la sensibilité :

- Des zones plus petites pour la sommation spatiale (au niveau de la fovéa, un cône par cellule ganglionnaire)
- Une période critique plus courte pour la sommation temporelle
- La structure guide-d'onde des cônes et leur motilité donnent lieu au SCE, qui réduit l'influence des aberrations optiques et de la dispersion de la lumière (mais réduit aussi la capture de photons)
- Trois classes de photorécepteurs ayant chacune un photopigment différent. Ceci est la base de la vision des couleurs.

LITTÉRATURE RECOMMANDÉE/OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

- Casser Locke L, Chang FW, Gerstman DR and Pietsch PA. **Optometry Examination Review. Appleton & Lange**, 1986

- Marcos S, Burns SA. **Cones spacing and waveguide properties from cone directionality measurements**. J Opt Soc Am A16, 995-1004 (1999)

- Schwartz SH. **Visual Perception - A Clinical Orientation, 3rd Edition**. Appleton & Lange, Stamford, Connecticut, 2004