ADAPTATION À LA LUMIÈRE, LOI DE WEBER ET SOMMATION SPATIALE

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 :

- L'adaptation à la lumière
- Les applications cliniques
- La sommation spatiale

ADAPTATION À LA LUMIÈRE

Tout comme vos yeux ajustent leur sensibilité en allant de la lumière à la noirceur, vos yeux ont aussi la capacité de s'ajuster en se déplaçant d'un endroit sombre à un endroit lumineux. C'est ce qu'on appelle **l'adaptation à la lumière**. L'adaptation à la lumière est étudiée en mesurant la capacité d'une personne à détecter une lumière très faible sur un fond uniforme (seuil d'incrément) en augmentant graduellement la luminance du fond. Ceci est illustré dans Schwartz, 2004 fig. 3-15.

La figure 3-15A dans Schwartz démontre que le stimulus est une lumière au centre d'un anneau qui sert de lumière de fond. D'abord, le sujet s'adapte à un fond complètement noir (l'anneau). La luminance du centre augmente ensuite pour dépasser légèrement le fond jusqu'à ce que le sujet puisse le détecter. Ensuite, la luminance de l'anneau est augmentée. Le sujet s'adapte à cette nouvelle luminosité du fond et détermine encore l'incrément de luminance minimal au-dessus du fond qu'il peut détecter. Le processus continue avec un fond de plus en plus lumineux.

Les résultats typiques d'une telle expérience sont montrés dans le figure 9-1. Les sections de la courbe, marquées 1 à 4, démontrent l'adaptation à la lumière pour les bâtonnets. Après, les cônes prennent le dessus.

ADAPTATION À LA LUMIÈRE (SUITE)

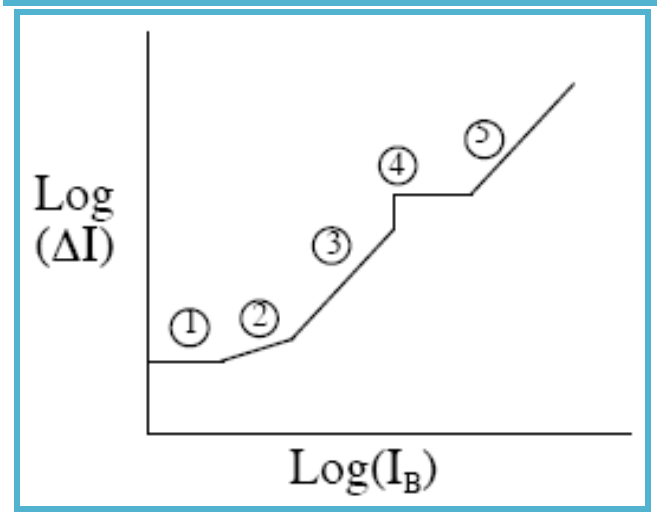

Figure 9-1 : *Log de l'augmentation de la luminance (ΔI) en fonction du log de la luminance du fond (IB). Les sections 3 et 5 ont des pentes de 1, ce qui indique que la loi de Weber tient pour la majorité de la gamme scotopique et photopique, respectivement. [Remerciements à Andrew Carkeet, PhD (Singapour) pour ses suggestions pour cette figure. Comparez à Schwartz Fig. 3- 15]*

Prenez note de ceci :

- **Section 1** – Fond très sombre, le bruit neural (ou « lumière sombre ») détermine l'incrément (ΔI) nécessaire pour la détection.
- **Section 2** – Luminance du fond très faible ; les fluctuations de la luminance du fond (l'anneau) déterminent grandement le seuil d'incrément. La loi de DeVries-Rose prédit que dans cette portion, l'incrément (ΔI) augment proportionnellement à la racine carrée de la luminance (Ib).
- **Section 3** – La longue section couvrant l'étendue de 4-log a une pente d'environ 1, lorsque tracée sur des axes logarithmiques. Ceci indique que l'incrément (ΔI) augmente en proportion constante avec le fond puisque la loi de Weber s'applique, c'est-à-dire que dans cette étendue, le seuil d'incrément correspond à une fraction constante du fond.

  Cette fraction constante est appelée **fraction de Weber** ou **constante de Weber** et sera expliquée en plus de détails plus tard (Schwartz ch. 11). La fraction de Weber pour les bâtonnets est d'environ 0,14. Ainsi, si la luminance du fond est de 100, un incrément de 14 au-dessus du fond est nécessaire pour pouvoir détecter le stimulus. Si la luminance est de 1 000, l'incrément doit être de 140. Ceci illustre un principe important de la perception visuelle : l'œil est fait pour répondre à des différences relatives de la luminance (ou rapports de niveau de lumière) plutôt qu'à des niveaux absolus de luminance. Ceci ressemble beaucoup au concept de contraste, qui sera également expliqué en plus grands détails plus tard.

  Cela signifie aussi que la sensibilité, en terme de la capacité à détecter un incrément absolu, diminue avec une illumination plus grande. Ce concept est nécessaire pour permettre à l'œil de fonctionner pour une grande étendue d'illumination, ce que l'on appelle la **régulation de la sensibilité** ou le **contrôle du gain**.
- La **section 4** montre une pente infinie, ce qui indique que les bâtonnets sont saturés et ont atteint leur limite. Ceci se produit lorsque seulement environ 10% de la rhodopsine est décolorée.
- La **section 5** montre la portion des cônes. Elle montre une pente constante de 1. La loi de Weber tient pour les cônes. La fraction de Weber pour les cônes est d'environ 0,015. Les cônes ont donc une baisse relative de la sensibilité plus petite que les bâtonnets.

ADAPTATION À LA LUMIÈRE (SUITE)

Le point le plus important à observer dans la figure 9-1 est que les pentes pour les sections 3 (étendue scotopique) et 5 (étendue photopique) sont égales à 1. Sur des axes logarithmiques, ceci se produit lorsque les valeurs d'incrément (ΔI) sont une fraction constante du fond (IB). Ceci est conforme à la loi de Weber, qui indique que le seuil d'incrément pour une tâche psychophysique sera une fraction fixe (fraction de Weber) (fig. 9-2) du fond.

Le tableau et les figures suivants démontrent que, lorsque la loi de Weber tient et que le log du seuil d'incrément est tracé en fonction du log de l'intensité du fond, la pente est de 1.

Tableau 9-1 : *Démonstration du fait que, lorsque la loi de Weber tient, la pente du log du seuil d'incrément en fonction du log du fond est égale à 1. Ceci est vrai pour n'importe quelle valeur de la fraction de Weber.*

FOND	LOG DU FOND	INCRÉMENT (W = 0.14)	LOG DE L'INCRÉMENT	INCRÉMENT (W = 0.015)	LOG DE L'INCRÉMENT
0.1	−1.00	0.014	−1.85	0.0015	−2.82
1	0.00	0.14	−0.85	0.015	−1.82
10	1.00	1.4	0.15	0.15	−0.82
100	2.00	14	1.15	1.5	0.18
1000	3.00	140	2.15	15	1.18
10000	4.00	1400	3.15	150	2.18
100000	5.00	14000	4.15	1500	3.18

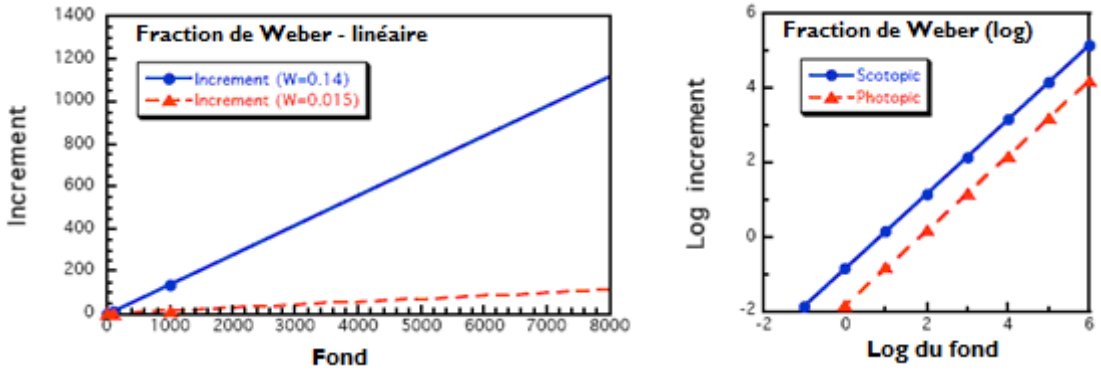

Figure 9-2 : *Lorsque la relation résumée par la loi de Weber est tracée sur des axes linéaires, la pente est égale à la fraction de Weber. Lorsque tracée sur des axes logarithmiques, la pente est égale à 1 pour les deux lignes.*

APPLICATIONS CLINIQUES

La loi de Weber a des applications importantes en optométrie :

RECHERCHE DE CELLULES DANS LA CHAMBRE ANTÉRIEURE LORS DE LA BIOMICROSCOPIE

Des lésions à la cornée ou au segment antérieur peuvent causer une iritite, ce qui libère des leucocytes dans la chambre antérieure. Les praticiens utilisent ce signe (la présence de cellules dans la chambre antérieure) pour diagnostiquer et surveiller l'iritite. Pour des iritites de faible grade, les cellules sont très difficiles à voir, surtout pour les cliniciens ayant moins d'expérience. C'est parce que le contraste entre les cellules blanches minuscules et le fond (la pupille) est très faible. On peut augmenter le contraste en augmentant l'intensité du biomicroscope. Ceci augmente la valeur de ΔI, alors que le fond (la pupille noire) reste le même. Si ΔI augmente jusqu'à dépasser la fraction de Weber, le clinicien sera capable de voir les cellules.

APPLICATION CLINIQUE (SUITE)

ÉVALUATION DES CHAMPS VISUELS

Il s'agit aussi d'une considération importante dans la conception de l'analyseur de champs visuels Humphrey. Cité des pp. 21 et 22 de *Automated Static Perimetry*, par DR Anderson et VM Patella (2e Éd., Mobsy, St. Louis, 1999) :

> *L'intensité de l'illumination de fond du périmètre affecte le seuil visuel. Elle détermine l'état de la rétine adaptée à la lumière comparée à la rétine adaptée à la noirceur. La visibilité du stimulus n'est pas seulement une question d'intensité lumineuse ; elle est également affectée par son contraste par rapport à l'illumination du fond.*

Le contraste d'un objet regardé (stimulus) avec son fond est en fait le facteur principal de visibilité sous des conditions fortement scotopiques. Lorsque la visibilité seuil est seulement fonction du contraste, la représentation mathématique de l'intensité seuil du stimulus est une constante si elle est exprimée comme rapport de contraste (appelé fraction de Weber) de l'intensité du stimulus par rapport à l'intensité du fond (loi de Weber).

Il existe des avantages théoriques si la périmétrie est faite avec un fond suffisamment intense pour que la loi de Weber fonctionne. D'abord, le changement de diamètre pupillaire a peu d'effet sur le contraste du stimulus puisque le fond et le stimulus sont affectés de façon égale. Deuxièmement, de légers changements de l'intensité du fond de changent pas la visibilité du stimulus si son intensité change d'un pourcentage égal. Goldmann a pris avantage de ce principe pour améliorer la fiabilité de son périmètre. Il n'a qu'une ampoule qui fournit l'éclairage du stimulus et du fond, et si l'intensité de l'ampoule varie (p. ex. en variant le voltage), l'intensité du stimulus et celle du fond seront affectées de façon égale. Le contraste, et donc la visibilité du stimulus, restent ainsi plus ou moins constants.

SOMMATION SPATIALE

Afin de voir sous une grande gamme de niveaux d'éclairage, nous avons besoin des caractéristiques spéciales offertes par les systèmes scotopique et photopique.

SYSTÈME PHOTOPIQUE

- Fonctionne lorsque l'illumination rétinienne est forte
- La lumière est abondante
- Conçu pour offrir une vision hautement détaillée : AV, sensibilité aux contrastes, vision des couleurs, etc.
- Compromet la sensibilité absolue

SYSTÈME SCOTOPIQUE

- Fonctionne lorsque l'illumination rétinienne est faible
- La lumière est limitée et il y a peu de photons
- Conçu pour fournir une sensibilité maximale avec des seuils de détection bas
- Compromet la qualité de la vision (mauvaise AV, donc mauvaise résolution spatiale, pas de perception des couleurs, etc.)

Cité de Schwartz, 2004 p. 44-45:

> *Bien que la résolution visuelle et la sensibilité aux constrastes soient supérieures en condition photopique, la sensibilité absolue est meilleure sous condition scotopique. Ce compromis entre la résolution visuelle et la sensibilité visuelle est largement due à la façon avec laquelle les bâtonnets et les cônes sont connectés aux éléments post-récepteurs de la rétine. Les bâtonnets sont connectés de manière à additionner les informations dans l'espace et dans le temps. Ceci permet une grande sensibilité, mais une faible résolution. Les cônes, d'un autre côté, ont des connections qui maximisent la résolution visuelle aux dépens de la sensibilité.*

La figure 3-16 de Schwartz (haut) illustre le flux d'informations d'une grande quantité de bâtonnets qui captent la lumière sur une grande surface et concentrent leurs données à une cellule ganglionnaire. Pour interpréter cette figure, rappelez-vous l'étude par Hecht *et al.* qui démontre qu'il doit y avoir un minimum de 10 photos absorbés par

un groupe de bâtonnets placés près l'un de l'autre pour détecter la lumière. Deux lumières séparées par un espace relativement grand illuminent la rétine contenant plusieurs bâtonnets qui sont chacun connectés à une cellule ganglionnaire. Puisque ces bâtonnets envoient les informations à la même cellule ganglionnaire, l'effet de la stimulation lumineuse de ces bâtonnets est additionné et traité comme un signal et un point de lumière. Dans ce cas, le signal pour 10 absorptions de photons est combiné. Prenez note que la cellule ganglionnaire peut seulement signaler la présence d'une lumière, même si deux points de lumière de 5 photons chacun illuminent cette zone de la rétine.

Le bas de la figure 3-16 de Schwartz démontre l'organisation correspondante pour les cônes. Peu de cônes sont connectés à une seule cellule ganglionnaire. Ils couvrent chacun une plus petite surface de la rétine. Présumons que le seuil de détection de la lumière reçue par une cellule ganglionnaire équivaut au signal de 10 photons sur les photorécepteurs. On voit que dans cet exemple, chaque groupe de cônes allant sur chaque cellule ganglionnaire reçoit seulement le signal de 5 quanta de son lot de cônes respectif. Le seuil n'est pas atteint donc il n'y aura pas de perception lumineuse. Si toutefois on double l'intensité de façon à ce qu'il y ait 10 photos sur chaque surface, ce sera suffisant pour stimuler chaque cellule ganglionnaire. Puisque deux cellules ganglionnaires distinctes sont stimulées, les deux lumières seront effectivement perçues comme étant séparées.

Dans le système scotopique, les cellules ganglionnaires reçoivent des données d'un grand nombre de bâtonnets (> 300). Les cellules ganglionnaires intègrent (ajoutent) toutes les entrées d'informations reçues de cette région. C'est ce qu'on appelle la sommation spatiale : les informations colligées d'une certaine surface sont additionnées et traitées comme étant un seul signal.

Le bénéfice de la sommation spatiale est qu'elle permet de voir même lors d'une très faible illumination. Par contre, une grande sommation spatiale résulte en une faible résolution spatiale, c'est-à-dire une faible acuité visuelle. L'acuité visuelle scotopique est d'au mieux 20/200. Les patients ayant une dystrophie des cônes ont des acuités de ce niveau.

Moins de cônes sont connectés à une seule cellulaire ganglionnaire, la sommation spatiale des régions contenant des cônes est donc plus petite que celles ayant des bâtonnets. La taille des régions de sommation spatiale varient pour différentes parties de la rétine et elle est la plus petite à la fovéa, où chaque cône a sa propre cellule ganglionnaire. Ceci permet d'avoir une très bonne acuité visuelle (20/15 ou mieux) dans la fovéa, mais une faible sensibilité pour détecter de faibles lumières. En général, les maladies qui affectent la rétine périphérique en premier, comme le glaucome, préservent l'acuité visuelle.

LOI DE RICCO

Lorsque vous voulez déterminer le nombre minimal de quanta que l'oeil peut voir, comme Hecht *et al.* ont fait, comment la taille de la cible affecte-t-elle les résultats? Cela dépend de la taille de l'aire de sommation spatiale. Dans le cas de Hecht, il a trouvé que si la lumière arrive dans une surface de 10 minutes d'arc de diamètre, le nombre total de quanta nécessaire pour atteindre le seuil était constant.

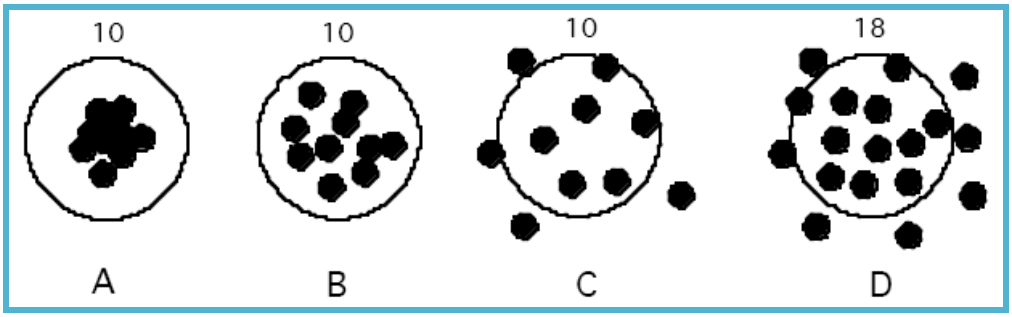

Figure 9-3 : *Distribution variable de 10 photons dans un champ de sommation spatiale sur la rétine*

La figure 9-3 démontre le patron de lumières de diverses tailles illuminant une région de sommation. Chaque point représente un photon. En A, la taille de la tache est petite et tous les photons tombent dans la région de sommation. En B, la tache est plus grande mais elle est tout de même plus petite que la zone de sommation, ce qui fait que tous les photons sont recueillis et leur signal est envoyé à une cellule ganglionnaire. En C, le diamètre de la tache excède la zone de sommation et quelques photons arrivent à l'extérieur de la zone de sommation. Celle-ci recueille donc moins de 10 photons et un signal de moindre amplitude que le seuil sera envoyé à la cellule ganglionnaire. La lumière ne sera donc pas perçue ; la lumière qui est maintenant plus large n'est plus suffisamment intense pour que la personne la détecte. En D, la taille de la tache est la même qu'en C, mais la densité de photons est plus grande et un nombre suffisant de photons arrive dans la zone de sommation.

Si un total de 10 absorptions quantiques sont nécessaires dans la zone de sommation pour qu'il y ait détection, la largeur de la lumière importe peu en autant que les photons arrivent tous dans la zone de sommation. Si la lumière est plus grande que la zone de sommation, quelques photos arriveront à l'extérieur de l'aire de sommation et le nombre réel d'absorptions quantiques dans la zone sera de moins de 10. Une lumière plus grande doit contenir plus de photons pour qu'au moins 10 photons tombent dans la zone de sommation.

La figure 9-4 illustre la **loi de Ricco** basée sur le principe illustré à la figure 9-3. La loi de Ricco est aussi décrite par l'équation mathématique (I*A = K) qui dicte que, dans un **diamètre critique**, le produit de la surface de l'image et de l'intensité de la lumière (quanta/surface) est constant. En d'autres mots, pour n'importe quelle taille de surface plus petite que le diamètre critique, le nombre total de quanta (I*A) nécessaire pour détecter la lumière est constant. Si la surface illuminée excède le diamètre critique, plus de quanta seront nécessaires, tel qu'indiqué par la portion ascendante de la courbe de la figure 9-4.

SOMMATION SPATIALE (SUITE)

I*A = K

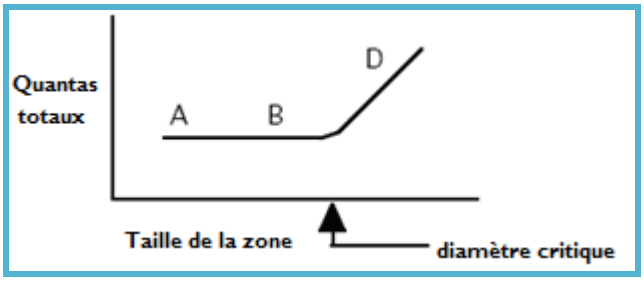

Figure 9-4 : *Loi de Ricco*

Tableau 9-2 : *Résumé du compromis entre la sensibilité et l'acuité visuelle pour les systèmes photopique et scotopique*

SYSTÈME	AIRES DE SOMMATION	SENSIBILITÉ	RÉSOLUTION SPATIALE
Scotopique	grande (jusqu'à 300+ bâtonnets)	excellente	mauvaise (20/200)
Photopique	petite (fovéa : 1 cône)	mauavise	excellente (20/15)

LECTURES RECOMMANDÉES/OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

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