VISION TEMPORELLE

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 :

- FTM temporelle
- Sensibilité réduite aux basses fréquences temporelles
- Sensibilité réduite aux hautes fréquences temporelles

INTRODUCTION

Le domaine de la *vision spatiale* étudie la façon dont nous percevons les changements de luminance dans l'espace (images), mais la **vision temporelle** traite de la façon dont nous percevons les changements de luminance avec le temps. Ceci est lié de près à la perception des mouvements.

Nous avons vu que la vision spatiale peut être testée en utilisant une variété de stimuli (lettres, ondes carrées, etc.). Les réseaux sinusoïdaux sont toutefois le stimulus préféré des scientifiques puisque :

- Ce sont les caractéristiques de base de toute image
- Ils peuvent être utilisés pour des analyses de Fourier
- Si la cible test est un réseau sinusoïdal, l'image rétinienne sera un réseau sinusoïdal de même fréquence spatiale, bien que le contraste en sera réduit

Le stimulus de base utilisé pour étudier la vision temporelle est une lumière avec un profil de luminance qui change de façon sinusoïdale dans le temps (figure 18-1 ci-bas). Ceci nous apparaît comme étant une lumière qui clignote.

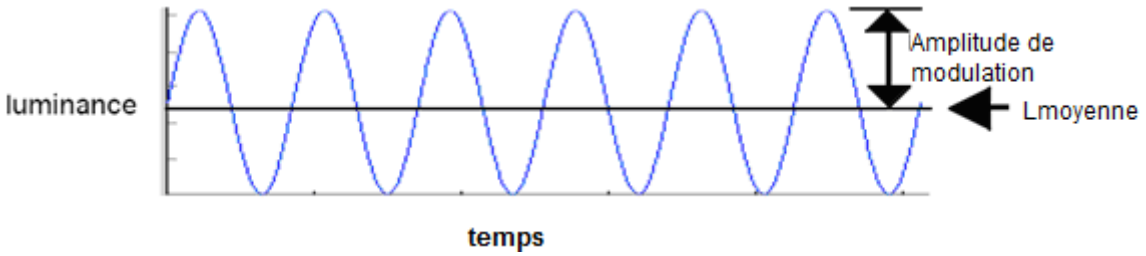

Figure 18-1 : *Le stimulus utilisé pour étudier la vision temporelle est une lumière dont la luminance est modulée de façon sinusoïdale avec le temps*

INTRODUCTION (SUITE)

En vision spatiale, nous appelons parfois le contraste « modulation ». La fonction de transfert de modulation (FTM) décrit la quantité de contraste (modulation) transférée d'un objet à une image par un système optique. Le contraste, exprimé en pourcentage, devrait avoir une valeur entre 0 et 100%.

L'équivalent temporel du contraste spatial est appelé le **pourcentage de modulation**. On peut imaginer ce concept comme étant un **contraste temporel**. Il peut être calculé de façon similaire au contraste spatial, sauf que le contraste varie avec le temps plutôt que dans l'espace. La figure 8-2 de Schwartz, 2004, montre un exemple de modulations haute et basse, c'est-à-dire de contraste haut ou bas. La formule ci-bas, pour le contraste temporel, est la même que le contraste de Michelson, sauf que le contraste varie avec le temps.

(% modulation) = (amplitude de modulation)/(luminance moyenne)*100

En plus du contraste temporel (pourcentage de modulation), un stimulus utilisé pour étudier la vision temporelle peut varier en **fréquence temporelle**. La fréquence temporelle peut être plus facile à comprendre que la fréquence spatiale. Une raison pour laquelle la vision temporelle est moins complexe que la vision spatiale est qu'il s'agit d'une fonction unidimensionnelle plutôt que bidimensionnelle. La figure 8-3 de Schwartz, 2004, montre des exemples de profils de fréquence temporelle haute et basse.

Voici les caractéristiques des stimuli temporels :

- La fréquence réfère au nombre de cycles de clignotement par seconde. L'unité pour les cycles par seconde est **l'Hertz (Hz).**
- Une faible fréquence correspond à un clignotement lent, et une haute fréquence signifie un clignotement rapide.
- À une certaine fréquence, le clignotement devient si rapide qu'il peut être impossible de percevoir le clignotement ; il semble donc n'y avoir qu'une lumière continue. Cette fréquence s'appelle la **fréquence critique de fusion du clignotement (FCF).**
- Il s'agit de la limite de résolution temporelle. Elle est analogue à la limite de résolution de la fréquence spatiale, ou la limite de haute fréquence.

FTM TEMPORELLE

Dans le cas d'une lumière clignotante, l'éclairement rétinien causé par l'image arrivant sur un point particulier de la rétine change avec le temps. La variation de l'éclairement rétinien à cet endroit peut être tracée comme une fonction unidimensionnelle.

Considérons l'exemple d'une personne regardant un seul flash d'un spectacle de feux d'artifice (fig. 18-2) :

- Au début, la personne regarde un ciel noir. L'éclairement rétinien à ce moment est près de zéro. Soudainement, le feu d'artifice explose et il y a une augmentation instantanée de l'éclairement rétinien (flash dans la fig. 18-2).
- Le haut niveau d'illumination fovéale persiste pour une fraction de seconde.
- L'intensité diminue ensuite rapidement (déclin dans la fig. 18-2). Après quelques secondes, elle est près de zéro à nouveau.

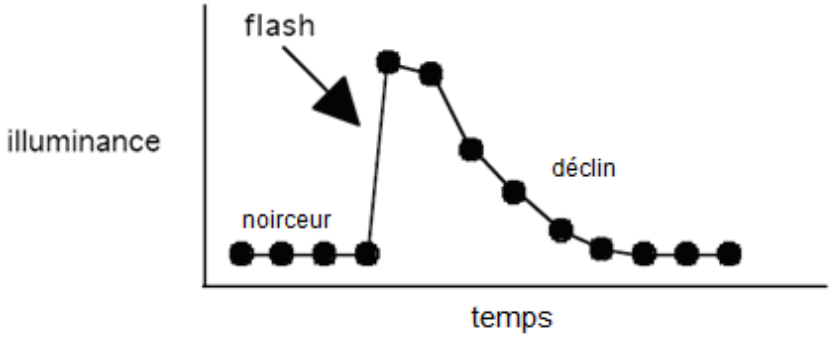

Figure 18-2 : *Illumination rétinienne sur une portion de la rétine, tracée en fonction du temps, par exemple lors d'un spectacle de feux d'artifice*

FTM TEMPORELLE (SUITE)

Comme pour toute fonction, cette fonction unidimensionnelle pourrait aussi faire l'objet d'une analyse de Fourier.

- La fonction peut être décomposée en composantes fondamentales.
- Chaque composante serait une fonction sinusoïdale montrant l'éclairement rétinien en fonction du temps. Puisque toute fonction (dans ce cas l'éclairement en fonction du temps) peut être décomposée en courbes sinusoïdales, il est logique d'utiliser des stimuli temporaux sinusoïdaux pour étudier les réponses temporelles de base du système visuel.
- En d'autres mots, le stimulus de base utilisé pour étudier la façon dont le système visuel perçoit les changements de luminance dans le temps est une lumière clignotante dont la luminance varie de façon sinusoïdale avec le temps.

Les deux paramètres du stimulus de base pour un stimulus temporel sinusoïdal sont :

- Contraste temporel (pourcentage de modulation)
- Fréquence temporelle (vitesse de clignotement)

Pour étudier comment le système visuel perçoit les changements de luminance avec le temps, nous devons tester l'œil avec diverses lumières clignotantes variant de façon sinusoïdale qui ont des modulations et des fréquences variées. Ceci mène au concept de **fonction de transfert de modulation temporelle (FTMT).** Elle démontre la limite de notre capacité à percevoir le clignotement lorsque le stimulus varie en modulation (contraste temporel) et en fréquence. La FTMT est analogue à la fonction de sensibilité aux contrastes, qui démontre la limite de notre capacité à percevoir un réseau sinusoïdal de divers contrastes et fréquences spatiales.

En se référant à la figure 18-3, on peut voir comment construire une FTM temporelle :

- Le sujet regarde une tache lumineuse qui clignote à une basse fréquence et a une modulation très faible (contraste temporel). Le contraste peut être de tout juste ± 1 nit par rapport au fond. Ce changement subtil de luminance (contraste) est si petit que le sujet ne sera pas capable de détecter le clignotement.
- On garde la même fréquence mais on augmente le contraste (modulation) jusqu'à ce que le sujet détecte le clignotement. Ceci donne le seuil de contraste temporel (modulation) pour cette fréquence.
- Répéter pour d'autres fréquences et tracer un graphique des seuils en fonction de la fréquence (figure 18-3, gauche).
- La réciproque du seuil est la sensibilité, on peut donc aussi tracer le graphique de la sensibilité en fonction de la fréquence (figure 18-3, droite). Il s'agit alors de la FTM temporelle pour le système visuel.

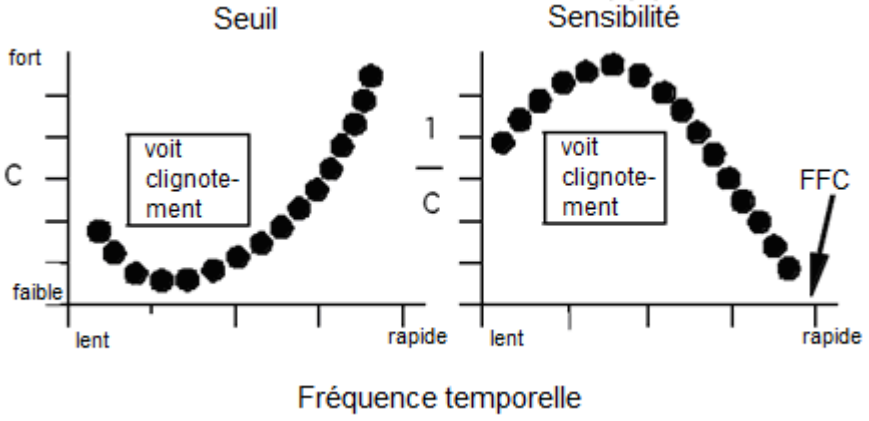

Figure 18-3 : *Exemple de données d'une expérience pour déterminer le seuil utilisé pour tracer la FTMT*

FTM TEMPORELLE (SUITE)

En portant attention au graphique de gauche, nous pouvons observer les éléments suivants :

- Sur l'ordonnée, les hautes valeurs représentent une haute modulation (fort contraste temporel) ; les valeurs faibles représentent une faible modulation (bas contraste temporel).
- *Pour la vision spatiale, les forts contrastes sont toujours plus faciles à détecter que les faibles contrastes.* De façon similaire, *pour la vision temporelle, une haute modulation est toujours plus facile à voir qu'une faible modulation.*
- Toutes les valeurs de modulation au-dessus de la courbe du seuil représentent les modulations qui peuvent être vues. La courbe représente la plus faible modulation qui peut être vue.
- Les stimuli ayant une modulation en dessous de la courbe ne peuvent pas être détectés. Le clignotement n'est pas vu et la lumière paraît constante.

De la même façon, nous pouvons examiner certaines des caractéristiques de la FTMT (figure 18-3, droite, ou Schwartz fig. 8-4) :

- Puisque l'ordonnée correspond à l'inverse de la modulation, les hautes valeurs correspondent à une faible modulation (faible contraste temporel) et les faibles valeurs représentent une forte modulation.
- Une grande sensibilité signifie que le sujet peut voir une faible modulation.
- Les valeurs de modulation correspondant à l'aire sous la courbe représente la vitesse de clignotement et les valeurs de contraste que la personne peut voir. Les valeurs de sensibilité au-dessus de la courbe représentent les stimuli pour lesquels le clignotement n'est pas visible. La lumière semble constante.
- Notez la similitude avec la fonction de sensibilité aux contrastes. Le pic de sensibilité se trouve dans les fréquences moyennes mais la sensibilité est moindre pour les fréquences plus hautes et plus basses.

La plus haute fréquence spatiale qu'une personne peut voir est indiquée par la valeur à l'extrême droite de la courbe de la FTMT. C'est ce qu'on appelle la fréquence critique de fusion du clignotement (FCF), et est montrée, pour un fort contraste temporel, dans la figure 18-3 à droite. Habituellement, lorsque l'on parle de la FCF, on traite souvent de la FCF de fort contraste, tel que montré dans la figure ci-haut. Toutefois, tel que démontré dans Schwartz fig. 8-7, si l'on utilise un clignotement à faible contraste, la FCF pourrait être en lien avec le clignotement le plus haut ou le plus bas détectable.

SENSIBILITÉ RÉDUITE AUX BASSES FRÉQUENCES TEMPORELLES

Les fréquences temporelles basses sont des lumières qui changent de luminance très lentement. Voici quelques exemples :

- **« Clignotement » du jour et de la nuit** : On pourrait considérer que les cycles d'illumination du jour et de la nuit causés par le soleil est un clignotement de très faible fréquence. Si on observe une tache de lumière sur un trottoir lors d'une journée où le ciel est clair, sa luminance changerait très graduellement, à cause du rayonnement variable du soleil lors de son cycle de 24 heures. Il n'est pas nécessaire d'observer la tache pour un plein cycle, la vitesse du changement serait tout de même basée sur une fréquence très basse de 1 cycle/24 heures, ce qui est égal à 1,0 cycle/86 400 secondes, soit une fréquence de 0,000016 Hz. Il est évident qu'il est très difficile de percevoir ce changement de luminance au cours de la journée.
- **Objet se déplaçant lentement** : On peut fixer un point sur une horloge alors que l'aiguille des minutes passe devant. Elle bouge si lentement qu'il serait très difficile de détecter le changement de l'éclairement rétinien qui accompagne ce mouvement.

Il est intuitivement évident que des changements très lents de la luminance sont difficiles à détecter. La sensibilité réduite aux fréquences temporelles basses semble être causée par les processus d'inhibition latérale de la rétine (semblable à la vision spatiale). Les **images rétiniennes stabilisées** en sont un exemple.

FTM TEMPORELLE (SUITE)

Les vaisseaux rétiniens créent une ombre sur les photorécepteurs, mais on ne peut la voir. Puisque les ombres rétiniennes ne bougent pas, elles ont une fréquence temporelle de 0 et l'œil est très peu sensible aux patrons de luminance immobiles (non changeants). Parfois, tel qu'est le cas lors de l'ophtalmoscopie ou lors de la biomicroscopie, la lumière entre dans l'œil avec un angle inhabituel et les ombres bougent. Avec le changement soudain (haute fréquence temporelle) d'illumination locale, les ombres deviennent visibles. Ils ont l'air de branches, ce que l'on appelle **l'arbre de Purkinje**. Ce concept est basé sur les principes de la perception décrits par la FTM temporelle.

L'insensibilité du système visuel aux fréquences temporelles faibles est aussi à la base du **phénomène de Troxler** ou **l'effet de Troxler**. Le Dictionnaire des sciences visuelles le définit comme : « l'affaiblissement ou la disparition temporaire et irrégulière d'un petit objet dans le champ visuel lors de la fixation stable d'un autre objet, par exemple lors de la fixation de plusieurs points dessinés sur une feuille de papier avec la disparition et la réapparition des autres points. » (Hofstetter, 2000)

Ce concept est également bien décrit par William Hart, dans *l'Adler's Physiology of the Eye* (9e édition), 1992, à la page 509. *Un phénomène de bordures contrastantes est appelé « phénomène de Troxler ». Si un point de lumière est présenté dans le champ visuel périphérique avec une intensité fixe au-dessus d'une lumière de fond, et si la position du point de lumière demeure inchangée pour plusieurs secondes, il disparaîtra lentement de la vue du sujet. Aussitôt que la position de la lumière change, ou si le point de fixation de l'œil est changé, le point réapparaît immédiatement. Le sujet peut d'abord penser que ce phénomène peut être expliqué par une décoloration locale des photorécepteurs au point où le stimulus se trouve sur la rétine. Toutefois, le fait que le point réapparaît immédiatement au mouvement de l'œil démontre que le recouvrement de la sensibilité est presque instantanée et ne prend pas le temps normal de régénération des photopigments. Ceci semble être plutôt un mécanisme rapide qui a une base neurale*.

Vous pouvez vous apercevoir de cet effet lorsque vous regardez la scène d'un spectacle. Lorsque vous observez un acteur, les autres personnages immobiles vus par votre vision périphérique vont disparaître jusqu'à ce que vous les refixiez.

La figure 18-4 ci-dessous (et dans Schwartz, 2004, fig. 8-5) aide à démontrer l'insensibilité relative de l'œil aux fréquences temporelles faibles. Si vous fixez le point noir à gauche, les bords de la région grise disparaissent rapidement. Dans le patron de droite, la ligne brisée ne disparaît par contre pas.

Q. Pourquoi?

Figure 18-4 : *L'insensibilité relative de l'oeil aux basses fréquences temporelles*

SENSIBILITÉ RÉDUITE AUX HAUTES FRÉQUENCES TEMPORELLES

Qu'est-ce qui cause la réduction de la sensibilité de l'oeil aux hautes fréquences temporelles? Par exemple, les plafonniers à lumière fluorescente clignotent à environ 60 Hz mais ils semblent émettre une lumière constante. Ils ont en fait dépassé la FCF, ce qui fait que le clignotement ne peut pas être détecté. La **limite en haute fréquence** de la FTM temporelle représente le clignotement le plus élevé qui peut être détecté lorsque la modulation est de 100%. *Lorsque vous entendez parler de la FCF sans qu'il n'y ait spécification de la modulation, vous pouvez présumer que l'on fait référence à une limite en haute fréquence à 100% de modulation.* La limite en haute fréquence est causée par la limitation du système nerveux à traiter des informations de cette vitesse.

Plus un neurone peut conduire et traiter rapidement les données, plus la FCF sera élevée, et meilleure sera la détection du mouvement. Les données des cônes rétiniens (vision photopique) sont relayées au cerveau via deux catégories de neurones : les neurones **magnocellulaires** et **parvocellulaires**. Les neurones magnocellulaires transportent les informations des cônes à la périphérie et les axones ont un diamètre plus grand et ils transportent les signaux plus rapidement que les neurones parvo. Le système magnocellulaire est donc meilleur pour détecter les mouvements que le système parvocellulaire.

LECTURES RECOMMANDÉES/OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

- Schwartz SH. **Visual Perception - A Clinical Orientation, 3rd Edition**. Appleton & Lange, Stamford, Connecticut, 2004
- Hofstetter HW. **Dictionary of visual science and related clinical terms**. Butterworth-Heinemann. 2000
- Adler FH and Hart WM. **Adler's physiology of the eye. 9th Edition**. Mosby, St Louis. 1992