

1. Introduction

Le rapport CIE 19.2 de 1981 (*an analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance*) est complété en fonction des résultats publiés depuis, notamment sur la vision périphérique, sur les stratégies d'exploration oculaires, et sur le champ visuel. La question de pose de savoir si un même modèles de performance visuelle est adapté à la fois au voisinage du seuil de visibilité et au-dessus de ce seuil.

Contraste

Il existe plusieurs définitions du contraste de luminance. La plus commune est $C = |L_t - L_b| / L_b$ (t pour *task*, b pour *background*). L'adaptation visuelle est sensée se faire sur L_b . A partir de cette définition, C représente le contraste seuil (avec une probabilité de 0,5 de réussite de la tâche visuelle), le niveau de visibilité étant défini par $VL = C / C$. Une autre définition classique est le contraste de Michelson $m = |L_t - L_b| / |L_t + L_b|$, définition symétrique entre les contrastes positifs et négatifs, m étant toujours compris dans $[0 ; 1]$. Cette définition est adaptée aux expériences sur les fréquences spatiales, pour lesquelles la luminance d'adaptation est plus proche de $(L_t + L_b) / 2$ que de L_b . Dans ces expérimentations, m est appelée modulation. En visualisation « active » (matrices, écran), on utilise plutôt $K = L_t / L_b$. Kokoschka a introduit les notions de contraste intérieur et extérieur pour des matrices de points : si L_m est la luminance maximale de la matrice, L_1 et L_2 les luminances de deux points voisins, il note $K_a = L_m / L_b$ (contraste extérieur, proche de K) et $K_b = L_2 / L_1$ (contraste « intérieur », pertinent pour la perception des détails).

Probabilité de détection

On mesure, par des présentations de 0,3 secondes, la « probabilité par coup d'œil¹ » P_g d'accomplir une tâche visuelle. Le tracé de P_g en fonction de VL s'appelle la courbe de « fréquence de vision² ». Par définition, pour $VL = 1$, $P_g = 0,5$. En supposant que VL^2 est proportionnel au rapport signal sur bruit, les théories sur la détection permettent de proposer le modèle analytique suivant :

$$P_g(VL) = 1 - 2^{-VL^{a_0}}$$

a_0 étant un paramètre représentant la raideur de la courbe de fréquence de vision. Ces définitions correspondant à une tâche visuelle dans l'axe optique, on définit également, pour une tâche visuelle avec une excentricité β , le rapport $R(\beta) = VL_0 / VL_\beta$. En théorie, cela permet d'exprimer $P_g(VL_0, \beta)$ de manière synthétique, mais en pratique il faut prendre en compte le fait que $VL(\beta)$ dépend fortement de la tâche visuelle considérée. Par contre, on observe que la courbe $P_g(VL_0, \beta)$ dépend, elle, très peu de la tâche visuelle, à une réserve près : pour les tâches de détection, on arrive toujours, pour VL suffisamment grand, à $P_g = 1$. Par contre, pour des tâches de discrimination (par exemple, distinguer un O d'un D), on n'y arrive pas au-delà de $\beta = 12^\circ$. La notion pertinente, si on s'intéresse à l'excentricité, est le cône de visibilité³ plutôt que le niveau de visibilité.

¹ Probability per glimpse.

² Frequency of seeing curve.

³ Visibility lobe.

Exploration oculaire

On considère, pour simplifier, que l'exploration oculaire est constituée de fixations de durée T réparties aléatoirement dans un angle solide ω_F . Ce « pattern » d'exploration s'appelle la recherche « au hasard ». Le lobe de visibilité ω_e ($\omega_e \ll \omega_F$) permet d'estimer une probabilité de détection après n saccades : $P_d = 1 - (1 - [\omega_e/\omega_F])^n$, ce qui peut se simplifier avec un développement limité (avec $t_e = T \times \omega_F / \omega_e$) : $P_d(t) \approx 1 - e^{-t/t_e}$ (en pratique, on constate que des modèles de la forme $P_d(t) = A(1 - e^{-B[t/t_e]})$ correspondent mieux aux observations). Par ailleurs, ω_e s'exprime en fonction de $P_g(VL_0, \beta)$ par une intégrale. L'essentiel est que ce modèle d'exploration visuelle « au hasard » donne des résultats corrects pour des tâches de détection. Toutefois, pour une tâche réelle avec un fond structuré contenant plusieurs objets, on considère (modèle quasi-aléatoire) que la vision périphérique « accroche » les objets, avant de guider le regard, à la saccade suivante, vers l'objet détecté.

Performances visuelles

Pour une tâche de lecture, le VL de la CIE n'est pas très pertinent pour prédire ce qui se passe au-dessus du seuil de visibilité. On constate en effet qu'il existe une valeur optimale du contraste, au-delà de laquelle les performances diminuent. Cette notion de performance au-dessus du seuil suppose que l'on ne s'intéresse plus seulement à une quantification binaire (réussite/échec), mais à une vraie mesure de la performance, notamment en tenant compte du temps nécessaire pour la réussite de la tâche. Rea propose un modèle du type $R = R_{max} \times I^n / (I^n + k^n)$. I est l'intensité du stimulus (la luminance), R la « réponse » (la performance visuelle), et k l'intensité du stimulus provoquant une performance deux fois plus faible que I . n , k et R_{max} dépendent de la tâche visuelle envisagée. La formule précédente se traduit, en pratique, sous la forme :

$$VP = VP_{max} \times \Delta L^n / (\Delta L^n + k^n)$$

La performance visuelle VP peut être, par exemple, l'inverse du temps nécessaire pour réussir la tâche. L'idée du modèle de Rea est que plus on est au-dessus du seuil, moins un accroissement du stimulus a d'impact sur la performance.

Les expérimentations canoniques portent sur des tâches visuelles pour lesquelles la luminance du « fond » est aussi la luminance d'adaptation. Kokoschka s'est intéressé au seuil de détection d'un contraste local (L , $L + \Delta L$) sur un fond de luminance L_a arbitraire, ce qui correspond aux situations réelles. Il propose un modèle pour estimer le seuil de détection du contraste, basé sur un modèle de luminosité permettant d'estimer le nombre de niveaux lumineux perceptibles entre L et $L + \Delta L$. **L'extension de résultats sur l'apparence lumineuse à un problème de performance visuelle est pour le moins curieux.**

2. Processus visuel

Pré-processus

Les primates ont en commun une organisation du système visuel, avant les aires corticales, qui commence à être bien connue. Concernant la visibilité, on s'intéresse notamment à la région fovéale. Les principaux éléments sont les suivants :

- La première étape de traitement de l'information visuelle a lieu *avant* les récepteurs photosensibles de la rétine : la lumière incidente traverse une couche de cellules, de taille importante par rapport à l'espacement entre les cônes de la rétine, et qui participent à l'extraction de détails fins. **Ce processus reste mystérieux.**
- Il existe dans la rétine un réseau hexagonal de photorécepteurs, qui donne rapidement au système visuel une image floue, échantillonnée, par rapport à l'image complète.
- Les photorécepteurs ont une sensibilité logarithmique par rapport à l'énergie reçue. Ils ont une dynamique de trois ordres de grandeur.
- Les neurones situés derrière la rétine sont de 4 types : cellules horizontales (reliant localement les cônes, et produisant en sortie une dérivée seconde non directionnelle), cellules bipolaires, cellules amacrines, et cellules ganglionnaires. Ces cellules sont également reliées entre elles. Des opérations de

type Laplacien (dérivées secondes) sont présentes à plusieurs échelles, ce qui suggère que le traitement de l'information lui-même est répété à plusieurs niveaux d'échantillonnage.

- Ces différents « circuits » sont sensibles aux fréquences spatiales et temporelles du stimulus, ce qui apparaît clairement avec des barres sinusoïdales. Les champs récepteurs sont équivalents, dans le domaine spatial ou temporel, à des filtres passe-bande. Mais en pratique, pour des stimuli aperiodiques, on considère que ce sont les récepteurs des hautes fréquences spatiales qui dominent (systèmes bipolaires sensibles au contraste), les autres canaux faisant seulement des corrections à partir des dérivées secondes. **On peut supposer qu'ils ont également un rôle important dans la détection des surfaces texturées.**
- Concernant la vision périphérique, il semble qu'il existe un facteur d'échelle, lié à la densité de récepteur dans la rétine, et qui permet de prévoir les performances visuelles en vision périphérique, pour une tâche donnée, en fonction des performances visuelles en vision fovéale et du rapport des densités de récepteurs photosensibles. Mais cette théorie pose un problème dans le domaine des fréquences spatiales, du fait du flou de l'image rétinienne due à un échantillonnage plus faible que dans la fovéa.
- La qualité de l'image « **dioptrique** » est à peu près constante dans une région de 10° autour de l'axe optique. Mais l'axe optique n'est pas celui de la vision fovéale, il s'en écarte de 5° environ. **Pourquoi ?**

Détection des contours

Il semble que la détection de contours, dans la vision humaine, soit le résultat de la comparaison de différents filtres passe-bande, à différentes échelles. Les champs récepteurs impliqués sont, notamment, des filtres gaussiens alternés (un bosse positive, une bosse négative), dans différentes directions et à différentes échelles. Le traitement de l'information ne serait pas une « reconstruction » du signal à partir de la décomposition par les filtres (comme ferait une transformée de Fourier), mais plutôt la sélection du filtre le mieux adapté, celui qui donne la réponse de plus forte intensité. Une métrique de la visibilité des contrastes doit s'intéresser à l'amplitude de la « réponse » en fonction de la fréquence spatiale.

Modèles de performance visuelle

Un modèle général de performance visuelle n'a de sens que relativement aux caractéristiques spécifiques de la tâche visuelle demandée : les caractéristiques du stimulus (contraste, forme, texture, etc.), la luminance d'adaptation et les caractéristiques du « fond », les caractéristiques du système de visualisation, les paramètres visuel de l'observation (acuité, accommodation, excentricité, mouvement, vision binoculaire, etc.), la nature de la tâche (détection, reconnaissance, identification, etc.).

Overington⁴ a proposé un modèle général prédictif de la performance visuelle, baptisé ORACLE. Ce modèle donne, dans un grand nombre de cas, des prédictions proches des résultats expérimentaux.

Bruit visuel

Si on prolonge l'analogie entre le système visuel et le traitement du signal, on peut dire qu'il existe trois sources de « bruit » susceptibles de diminuer les performances visuelles : « **photon noise** », du à la luminance de la scène (?), bruit inhérent au protocole de visualisation, et « bruit » interne au système visuel.

La pertinence des expérimentations portant sur des stimuli visuels à base de sinus verticaux pour prédire les performances visuels avec des stimuli aperiodiques a été remise en question, mais elle semble robuste. Par prudence, Overington propose de distinguer selon la tâche visuelle demandée, partant du principe que pour des tâches grossières au moins, ce sont les basses fréquences qui sont les plus pertinentes pour définir le seuil de détection.

Contrast Sensibility Function

Le modèle proposé est basé sur la sensibilité au contraste à partir de stimuli sinusoïdaux, et débouche donc sur des fonctions de sensibilité au contraste (*CSF*) en fonction de la fréquence spatiale. Par définition, la « sensibilité » au contraste est l'inverse du contraste au seuil de visibilité (contraste de Michelson). Les expérimentations correspondantes sont inspirées par des tests usuels d'audition.

⁴ *Toward a complete model of photopic visual threshold performance.* Opt. Eng., 21, 2-13, 1982.

Les tests de détection, comme les expérimentations canoniques de Blackwell, ne doivent pas être confondus avec des tests de lisibilité, comme ceux utilisant un anneau de Landolt. La distinction de plusieurs niveaux de tâches visuelles est liée, dans le modèle proposé ici, à la finesse des détails nécessaire à son accomplissement. La question de fond est de savoir, selon le type de tâche, si des différences portant sur la sensibilité au contraste entraînent des différences sur la performance visuelle. La pertinence de la sensibilité au contraste a été démontrée pour la visibilité de cibles fixes, la détection et l'identification de lettres et de silhouettes d'avions, et la détection de cibles mobiles. D'autre part, la légitimité du passage de *CSF* uni-dimensionnelles à une fonction de transfert de modulation (*MTF*) bi-dimensionnelle a été validée. Enfin il a été établi que le système visuel fonctionne comme une multitude de filtres passe-bande, de 1 à 2 octaves chacun en fréquence spatiale. Des chartes standard de tests de sensibilité au contraste sont disponibles sur le marché.

Filtres passe-bande

Dans une tâche de discrimination (par exemple, distinguer les lettres D et O), Fleck a montré qu'il existait une limite en excentricité au-delà de laquelle la tâche était impossible, quelque soit le contraste. Si Φ est la dimension angulaire du détail discriminant et β_N la limite d'excentricité, il propose (dans un cas particulier) la relation : $\beta_N = (37,7 \times \Phi) - 4,6^\circ$.

3. Discussion

L'enjeu de ce rapport était de tracer la voie pour redéfinir la métrique CIE de la visibilité des contrastes. La notion de « cône de visibilité » et de « coup d'œil » semblent particulièrement pertinentes. La difficulté spécifique des tâches visuelles demandées peut être intégrée comme un paramètre du modèle de perception visuelle, avec notamment la notion de « charge mentale », difficile à quantifier mais pertinente par exemple en conduite automobile. Il est apparu également qu'il était possible d'unifier les métriques pour la vision fovéale et pour la vision périphérique. L'existence d'une limite en excentricité pour les tâches de discrimination a également été mise en évidence. La notion de « contraste interne », permettant de s'affranchir des expérimentations canoniques pour lesquelles la luminance d'adaptation, est un outil très utile. Il est envisagé de remplacer la notion de VL de la CIE par une mesure du nombre de niveau lumineux qui peuvent être distingués entre un contraste donné et le contraste seuil. Le lien entre performance visuelle et fréquence spatiale a été mis en évidence.

Il est proposé de donner la priorité, dans les recherches futures, sur l'étude du « cône de visibilité » en fonction de la tâche visuelle, et notamment de la structure du « fond ». Le développement de modèles informatiques de prédiction de la visibilité, du type d'ORACLE, doit être poursuivi.

*Compte rendu : Roland Brémond
Juillet 2003*