

Physique - Devoir Surveillé 1

Le 26/09/2026

I Étude de l’œil (G2E 2019)

Ce problème aborde quelques phénomènes physiques liées au fonctionnement de l’œil humain dont le fonctionnement général est introduit sur la figure I.1.

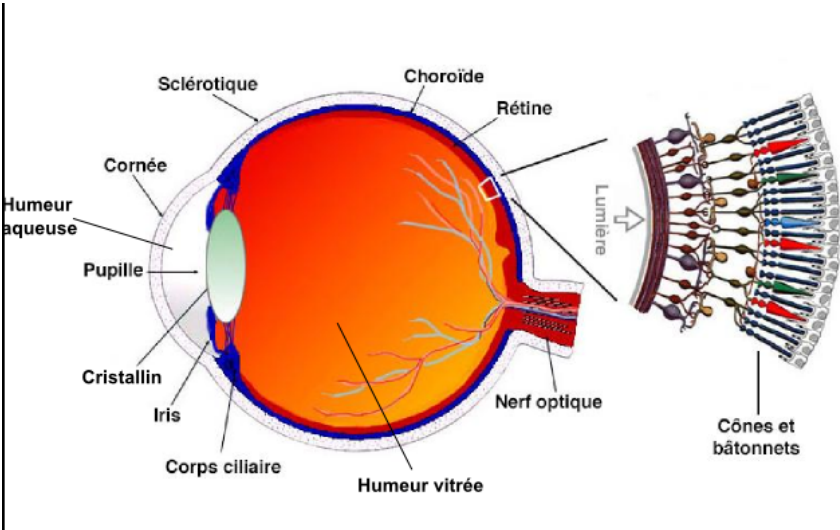


FIGURE I.1 – Les différentes parties de l’œil humain.

I.A Sensibilité de l’œil

Le fond de l’œil est tapissé par la rétine, membrane très fragile, jaunâtre et transparente. C’est la partie sensible de l’œil. Cette sensibilité est due à deux sortes de cellules :

- Les bâtonnets : comme leur nom l’indique, ces cellules ont une forme allongée. Ils sont colorés en rose par le pourpre rétinien qui les rend sensibles à la lumière. Ils ne sont pas sensibles à la couleur et travaillent essentiellement en vision crépusculaire. On compte environ 120 millions de bâtonnets dans la rétine humaine.
- Les cônes : ce sont les seuls à être sensibles à la couleur. Ils participent essentiellement à la vision diurne.

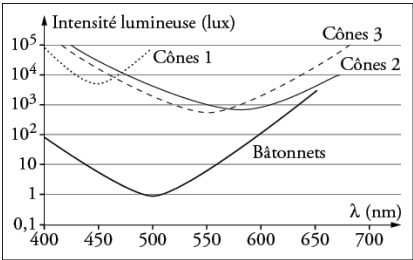


FIGURE I.2 – Éclairement lumineux minimal pour lequel les quatre types de cellules photosensibles émettent un signal électrique

1. Quel est le domaine de longueur d’onde du visible ?

Réponse :

Le visible correspond aux longueurs d’onde de 400 nm à 800 nm.

2. À partir de la figure I.2, justifier que les bâtonnets sont associés à la vision nocturne et que les cônes sont associés à la vision diurne.

Réponse :

On constate que l’éclairement minimal pour les bâtonnets est plus faible, donc plus adaptés à une vision nocturne.

Les cônes nécessitent un éclairement minimal supérieur à celui des bâtonnets. Ils sont donc plus adaptés à la vision diurne.

On peut noter par ailleurs que la répartition des cônes en trois groupes réagissant de façon préférentielle à différentes couleurs (bleu pour les cônes 1, jaune pour les cônes 2 et rouge pour les cônes 3) permet de distinguer ces couleurs, tandis que les bâtonnets non spécialisés n’autorisent pas cette distinction : c’est bien ce qu’on observe en vision nocturne, essentiellement monochrome.

3. L’énergie d’un photon dans une onde lumineuse de fréquence f est donnée par la relation $E = hf$ où $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ est la constante de Planck. Calculer les fréquences f_1 , f_2 et f_3 pour lesquelles chaque type de cône est le plus sensible. En déduire les énergies E_1 , E_2 et E_3 des photons associés. On donne la vitesse de la lumière dans le vide $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Réponse :

Pour un photon, $f = c/\lambda$. On en déduit :

- cône 1 : $\lambda = 450 \text{ nm}$, $f = 0,67 \times 10^{15} \text{ Hz}$, $E_1 = 4,4 \times 10^{-19} \text{ J}$.
- cône 2 : $\lambda = 580 \text{ nm}$, $f = 0,52 \times 10^{15} \text{ Hz}$, $E_2 = 3,4 \times 10^{-19} \text{ J}$.
- cône 3 : $\lambda = 550 \text{ nm}$, $f = 0,55 \times 10^{15} \text{ Hz}$, $E_3 = 3,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Dans ce type de question, pas besoin de détailler ; il faut aller à l’essentiel !

Le lux est une unité de l’intensité lumineuse adaptée à l’œil humain, correspondant à la puissance minimale détectable par l’œil. Comme le montre la figure I.2, c’est dans les verts ($\lambda = 550 \text{ nm}$), que l’œil humain est le plus sensible. À cette longueur d’onde, un éclairement de $1,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ correspond à environ 700 lux. Le diamètre moyen de la pupille de jour est de 3,0 mm. On rappelle qu’une puissance (en watt W) correspond à une énergie (en joule J) divisée par un temps (en second s).

4. Calculer la puissance minimale en Watt que doit recevoir l’œil pour détecter du vert.

Réponse :

L’éclairement minimal est alors $\mathcal{E} = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Pour la rétine de surface S , la puissance associée est : $P = \mathcal{E} \pi \frac{d^2}{4}$

A.N. : $P = 1 \times \pi \times \frac{(3.10^{-3})^2}{4} = 7,1 \times 10^{-6} \text{ W}$

Remarque : Ce sont les cônes 3 qui sont le plus sensibles au vert. Compte tenu du tracé, on peut considérer que l’intensité lumineuse nécessaire à leur fonctionnement à 550 nm est associée à la valeur de 683 lux citée dans l’énoncé ($\log 683 \simeq 2,8$, ce qui correspond à peu près au positionnement du minimum sur l’échelle semi-logarithmique).

5. À quel débit de photons cela correspond-il ? Un résultat à 1 chiffre significatif est attendu.

Réponse :

Puisque la puissance P correspond à une énergie reçue par unité de temps, le débit de photons D (nombre de photons par unité de temps) est tel que :

$$DE_3 = P \quad \text{soit} \quad D = \frac{P}{E_3}$$

$$\text{A.N. : } D = \frac{7,1 \cdot 10^{-6}}{34 \cdot 10^{-20}} = \frac{7,1}{34} \cdot 10^{14} \simeq 2,1 \times 10^{13} \text{ photonss}^{-1}$$

I.B Formation d'images

Lorsqu'ils pénètrent dans l'œil, les photons suivent la trajectoire des rayons lumineux. Cette partie étudie l'œil d'un point de vue optique géométrique.

I.B.1 Dioptré sphérique

Dans une modélisation préliminaire, on considère que l'œil est une sphère de rayon a , et d'indice n . Un rayon lumineux incident arrive sur l'œil, parallèlement à l'axe optique, avec une hauteur h petite devant a . Il est alors réfracté et atteint la rétine en son centre. Dans toute cette partie on se place dans l'approximation aux petits angles, ce qui revient à supposer $h \ll a$.

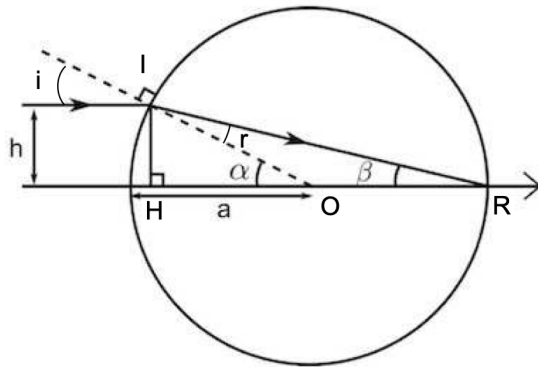


FIGURE I.3 – Rayons venant de l'infini traversant l'œil modélisé par une sphère d'indice n .

6. Donner une relation entre h , a et $\sin \alpha$ et simplifier aux petits angles. De même relier h , a et β .

Réponse :

On commence par remarquer que cet exercice utilise des angles non orientés.

Ainsi, dans le triangle rectangle OHI (voir schéma précédent) d'angle au sommet α , de côté opposé h et d'hypoténuse a (rayon de la sphère), la relation de définition du sinus conduit immédiatement à :

$$\sin \alpha = \frac{h}{a} \quad \text{soit pour de petits angles} \quad \alpha \simeq \frac{h}{a}$$

Dans le triangle IHR, on observe :

$$\tan \beta = \frac{h}{HR}$$

avec, toujours dans l'approximation des petits angles : $HR = HO + a = a \cos \alpha + a \simeq 2a$

$$\text{On en déduit : } \tan \beta \simeq \beta \simeq \frac{h}{2a} = \frac{\alpha}{2}$$

7. Reproduire le schéma ci-dessus, et y indiquer l'angle d'incidence i et l'angle de réfraction r . Relier i et r à α et β .

Réponse :

Les angles d'incidence et de réfraction sont définis entre la normale au dioptre et le rayon associé.

On en déduit, puisque le triangle IOR est isocèle $r = \beta$ puis, à l'aide de droites parallèles, que $i = \alpha$.

Le schéma est disponible un peu plus haut, dans l'énoncé.

8. Écrire la loi de Snell-Descartes et la simplifier aux petits angles ; en déduire la valeur de l'indice n de l'œil dans ce modèle.

Réponse :

D'après la loi de Descartes : $n_{\text{air}} \sin i = n \sin r$

soit pour de petits angles et en considérant que $n_{\text{air}} = 1$: $i = nr$

$$\text{d'où en combinant avec les résultats précédents : } n = \frac{i}{r} = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{\frac{h}{a}}{\frac{h}{2a}} = 2$$

9. L'indice des humeurs aqueuse et vitrée est en fait plus faible, proche de celui de l'eau 1,33. Commenter en considérant l'effet du cristallin, qui n'a pas été pris en compte.

Réponse :

Un rayon incident parallèle à l'axe optique arrivant sur le cristallin est dévié en direction du foyer image de ce dernier. Si on considère qu'il traverse ensuite la sphère d'indice n , on remarque alors que l'angle incident i' sur cette sphère est inférieur à i (puisque le rayon est déjà dévié vers l'axe). Pour obtenir la même valeur de $\beta = r$ (et donc un point de focalisation sur la rétine en R), l'indice de l'humeur vitrée doit donc être égal à :

$$n' = \frac{i'}{r} < \frac{i}{r} < 2$$

En pratique, on combine alors la déviation liée à la lentille, et celle à la forme sphérique de l'œil.

I.B.2 Lentille convergente

L'ensemble de l'œil est à présent modélisé par une unique lentille convergente, et la rétine par un écran situé à la distance $d = 20 \text{ mm}$ de la lentille.

10. Définir les notions d'accommodation, de *punctum proximum* PP et de *punctum remotum* PR.

Réponse :

On appelle *accommodation* la capacité de déformation du cristallin conduisant à une modification de sa vergence et permettant à l'œil de former une image nette d'objets situés entre le *punctum remotum* PR (point visible le plus éloigné) et le *punctum proximum* PP (point visible le plus proche de l'œil).

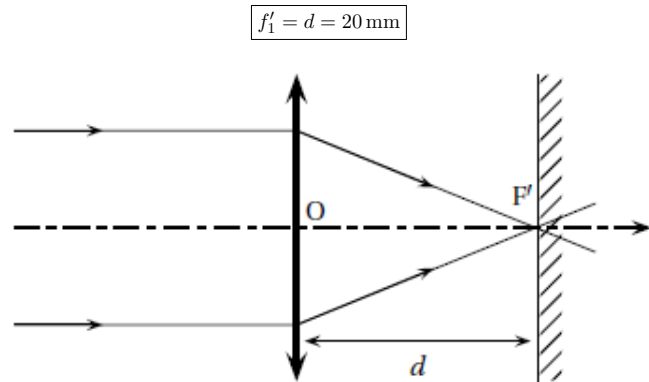
La vision au PR est obtenue lorsque le cristallin est au repos. La vision au PP est obtenue lorsqu'il est contracté au maximum.

Pour un œil sans défauts, le PP est de l'ordre de 20 cm et le PR est à l'infini.

11. Quelle est la valeur de la distance focale f'_1 lorsque l'œil regarde un objet à l'infini ? Faire une construction géométrique représentant la formation de l'image d'un objet à l'infini sur l'axe optique.

Réponse :

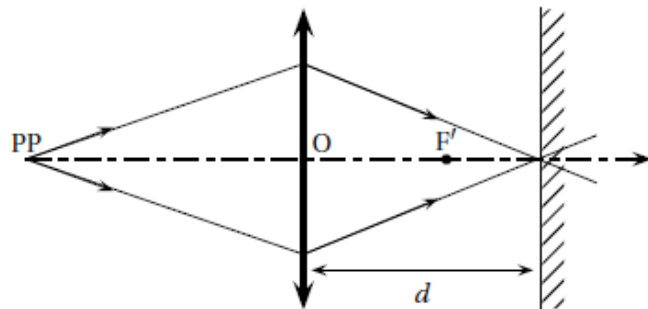
Lorsque l'œil regarde un objet à l'infini, l'image se forme dans le plan focal image (du cristallin au repos), qui doit donc être confondu avec la rétine pour conduire à une vision nette :



12. Quelle est la valeur de la distance focale f'_2 lorsque l'œil regarde au PP. Faire une construction géométrique représentant la formation de l'image d'un objet au PP sur l'axe optique.

Réponse :

Lorsque l'œil regarde au PP, l'image se forme derrière le foyer image. Pour qu'elle soit placée sur la rétine, il faut donc que F' se rapproche de O , ce qui correspond à une augmentation de la vergence du cristallin par contraction.



Remarque : Notons que l'image ne peut être située devant F' , car cette position n'est obtenue que pour un objet virtuel.

D'après la relation de conjugaison, on a :

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{\overline{OP_P}} = \frac{1}{f'_2} \quad \text{d'où} \quad f'_2 = \frac{d\overline{OP_P}}{\overline{OP_P} - d}$$

$$\text{A.N. : } f'_2 = \frac{20.10^{-3} \times (-20.10^{-2})}{-20.10^{-2} - 20.10^{-3}} = \frac{4}{220} \simeq 18 \text{ mm}$$

13. Calculer l'écart relatif entre ces deux valeurs.

Réponse :

L'écart relatif entre les deux distances focales est :

$$r = \frac{f'_1 - f'_2}{f'_1} \simeq 10\%$$

Un patient myope voit flou les objets situés à plus d'un mètre de distance. Il cherche des lentilles de contact pour corriger ce défaut. On rappelle que deux lentilles accolées sont équivalentes à une lentille unique dont la vergence est la somme des vergences des deux lentilles.

14. Rappeler ce qu'est la vergence d'une lentille.

Réponse :

La vergence est l'inverse de la distance focale : $V = \frac{1}{f'}$

15. Calculer la vergence de l'œil du patient lorsqu'il regarde un objet à 1 mètre de distance.

Réponse :

Puisque le patient voit net en deçà de $D = 1$ m, cela signifie que son PR est situé à cette distance : $\overline{OPR} = -D$. D'après la relation de conjugaison, puisque l'image se forme alors sur la rétine, la distance focale f'_m de l'œil du patient est telle que :

$$\frac{1}{f'_m} = V_m = \frac{1}{d} - \frac{1}{\overline{OPP}} = \frac{1}{d} + \frac{1}{D}$$

$$\text{A.N. : } V_m = \frac{1}{20.10^{-3}} + \frac{1}{1} = 50 + 1 = 51 \delta$$

16. Calculer la vergence de la lentille de contact à placer sur l'œil du patient pour qu'il puisse voir net un objet à l'infini.

Réponse :

Un objet A à l'infini donne une image A' située au foyer F' de la lentille de contact. On souhaite que l'image de A' par le cristallin au repos se forme sur la rétine.

D'après ce que l'on vient de voir, il faut pour cela que $A' = \text{PR}$. Le foyer image de la lentille doit donc être situé au PR, d'où :

$$V = \frac{1}{f'} = \frac{1}{\overline{OPR}} = -\frac{1}{D} = -1 \delta$$

Remarque : On peut également raisonner à partir de la vergence du système lentille + œil, comme le suggère l'énoncé : la distance focale d'un œil emmétrope étant de 20 mm, sa vergence est égale à 50δ . Pour retrouver cette valeur à partir de $V_m = 51 \delta$, il faut logiquement y accoler une lentille divergente de vergence -1δ .

II Détermination de la masse du soleil

On rappelle que l’expression de la norme de la force exercée par une masse ponctuelle M_1 (de masse m_1) sur une masse ponctuelle M_2 (de masse m_2), distantes de r s’écrit :

$$F = -\mathcal{G} \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

1. *Exprimer la dimension de la constante de gravitation universelle $\mathcal{G}$ en fonction des grandeurs de base du système international. En quelle unité s’exprime-t-elle ?*

Réponse :
L’équation aux dimension associée à l’expression précédente est

$$[F] = [\mathcal{G}] \frac{M^2}{L^2}$$

Or, on sait que $[F] = MLT^{-2}$, d’où

$$[\mathcal{G}] = \frac{MLT^{-2}L^2}{M^2} = L^3M^{-1}T^{-2}$$

Elle s’exprime donc en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$

2. *On considère une planète de masse m en orbite circulaire autour du Soleil (de masse M_s) à la distance r de son centre. Son énergie potentielle peut s’écrire $E_p = -\frac{\mathcal{G}mM_s}{r}$. Vérifier l’homogénéité de cette expression.*

Réponse :
On a d’une part $[E_p] = [E_c] = ML^2T^{-2}$, et d’autre part

$$\left[\frac{\mathcal{G}mM_s}{r}\right] = \frac{L^3M^{-1}T^{-2}M^2}{L^2} = MLT^{-1}$$

Finalement, les 2 termes ont la même dimension, donc l’expression est homogène.

3. *La période T de son mouvement dépend de la masse du Soleil M_s , du rayon r de son orbite et de la constante de gravitation universelle $\mathcal{G}$. Proposer une expression de T de la forme*

$$T = k \times M_s^\alpha \mathcal{G}^\beta r^\gamma$$

où k est une constante sans dimension que l’on ne cherchera pas à déterminer.

Réponse :

$$T = k \times M_s^\alpha \mathcal{G}^\beta r^\gamma$$

où k est une constante sans dimension.
On cherche T de la forme $T = kM_s^\alpha \mathcal{G}^\beta r^\gamma$. L’équation aux dimensions associée est :

$$T = M^\alpha (L^3T^{-2}M^{-1})^\beta L^\gamma$$

On obtient donc le système suivant :

$$\begin{cases} \alpha - \beta = 0 \\ 3\beta + \gamma = 0 \\ 1 = -2\beta \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \alpha = \beta = -\frac{1}{2} \\ \gamma = -3\beta = \frac{3}{2} \\ \beta = -\frac{1}{2} \end{cases}$$

On a donc finalement :

$$T = k \frac{\sqrt{r^3}}{\sqrt{M_s \mathcal{G}}} \Leftrightarrow \boxed{\frac{T^2}{r^3} = \frac{k^2}{M_s \mathcal{G}}}$$

On donne pour les différentes planètes du système solaire le rayon moyen de leur orbite ainsi que leur période de révolution. On utilisera les données suivantes (USI = unité du système international) :

- 1 *u.a* (unité astronomique)= $1,5.10^{11}$ m
- $\mathcal{G} \simeq 6,7 \times 10^{-11}$ USI
- $k \simeq 40$.

Planète	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
T (jours)	88	225	365	687	4335	10758	30687	60224
r (u.a.)	0,4	0,7	1	1,5	5,2	9,5	19,6	30,1

4. *À partir des données pour la planète de votre choix, déterminer la valeur de la masse du soleil. Un chiffre significatif est attendu.*

Réponse :
On doit trouver une masse du Soleil d’environ 2×10^{30} kg.

On cherche à trouver une expression de la vitesse de la libération v_ℓ d’un corps, qui correspond à la vitesse minimale à communiquer à un corps à la surface de la Terre (soit à une distance R_T du centre de la Terre, où R_T est le rayon de la Terre) pour qu’il échappe à l’attraction de la Terre. On pourra noter M_T la masse de la Terre.

5. *Proposer une expression plausible de v_ℓ .*

Réponse :
L’expression à trouver est : $v_\ell = \sqrt{\frac{\mathcal{G}M_T}{R_T}}$. On peut l’obtenir soit par tatonnement, ou mieux, par analyse dimensionnelle.

III Constructions graphiques

1. *Compléter les schémas 1 à 3, pour placer les images $A'B'$ ou bien les objets AB .*

Réponse :

2. Construire pour le **schéma 4** le foyer principal objet F et le foyer principal image F' du système global composé des deux lentilles.

Réponse :

