

Gilles Boisclair



Physique **de la lumière**

L'éclairage sous les feux de la rampe

SOLUTIONS DES EXERCICES



Physique de la lumière : l'éclairage sous les feux de la rampe
Solutions des exercices



CENTRE COLLÉGIAL DE DÉVELOPPEMENT
DE MATÉRIEL DIDACTIQUE

3800, rue Sherbrooke Est, Montréal (Québec), Canada H1X 2A2
Téléphone : 514 873-2200
www.ccdmd.qc.ca

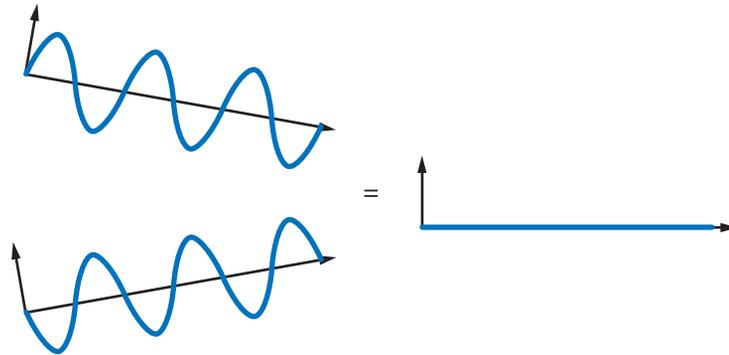
© Centre collégial de développement de matériel didactique, 2016
Collège de Maisonneuve

Il est illégal de reproduire cet ouvrage, en totalité ou en partie, quels qu'en soient la forme ou le procédé, sans l'autorisation écrite préalable du CCDMD, conformément aux dispositions de la Loi sur le droit d'auteur du Canada.

La production de cet ouvrage a été rendue possible grâce au soutien financier du ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur.

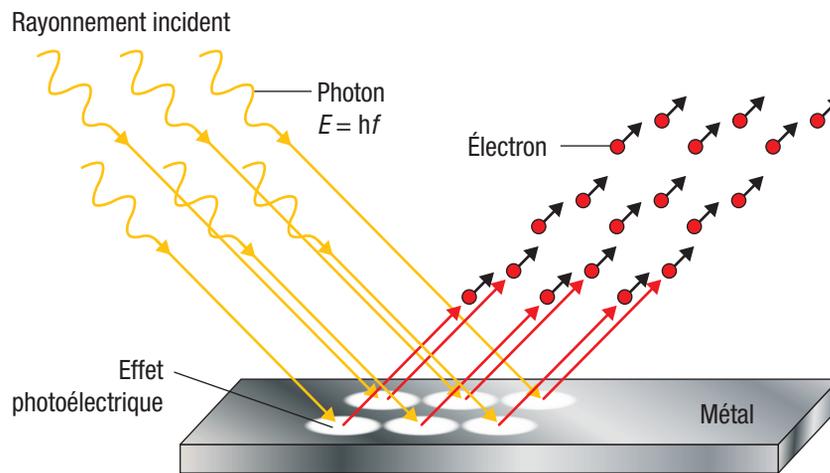
Le texte du présent ouvrage est écrit conformément aux rectifications orthographiques en vigueur depuis 1990.

- 1.1** En additionnant deux rayons de lumière, il est possible que la résultante soit nulle : on peut détruire deux rayons de lumière.



Ce phénomène est impossible à expliquer si on dit que la lumière est constituée de petits corpuscules. En effet, en additionnant deux corpuscules ayant chacun une masse, la masse totale ne peut pas être nulle !

- 1.2** La manière dont l'électricité est produite dans l'effet photoélectrique ne peut s'expliquer autrement qu'en disant que la lumière est constituée de photons d'énergie $E = hf$. Sur l'image ci-dessous, des photons  frappent une plaque de métal et arrachent des électrons.



- 1.3** On peut créer une onde électromagnétique en faisant accélérer ou osciller une charge électrique. La plupart du temps, il s'agit d'un électron.

1.4 a) Vrai : 

b) Vrai : Toutes les ondes électromagnétiques se propagent à la même vitesse dans le vide.

c) Faux : C'est le contraire, un photon « bleu » a plus d'énergie qu'un jaune.

1.5 On connaît f (98,3 MHz) et on cherche λ , il faut utiliser la formule $c = \lambda f$.

Rappel :

1 Hz = une oscillation par seconde = 1/s

1 kilohertz = 1 kHz = 1 000 oscillations par seconde = 1 000 Hz = 10^3 Hz

1 mégahertz = 1 MHz = 1 000 000 oscillations par seconde = 1 000 000 Hz = 10^6 Hz

1 gigahertz = 1 GHz = 1 000 000 000 oscillations par seconde = 1 000 000 000 Hz = 10^9 Hz

$$f = 98,3 \text{ MHz} = 98,3 \times 10^6 \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{98,3 \times 10^6 \text{ Hz}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{98,3 \times 10^6 \text{ 1/s}} = 3,05 \text{ m}$$

La longueur d'onde est de 3,05 m.

N.B. : Les antennes ont une longueur de $\lambda/2$, cette station de radio a donc une antenne de 1,55 m.

1.6 On connaît λ (580 nm), on cherche f et E ; il faut utiliser les formules $c = \lambda f$ et $E = hf$.

Rappel :

1 mm = 0,001 m = 10^{-3} m

1 μm = 0,000 001 m = 10^{-6} m

1 nm = 0,000 000 001 m = 10^{-9} m

$$\text{La fréquence: } f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{580 \times 10^{-9} \text{ m}} = 5,17 \times 10^{14} \frac{1}{\text{s}} = 5,17 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\text{L'énergie: } E = hf = (6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}) \left(5,17 \times 10^{14} \frac{1}{\text{s}} \right) = 3,43 \times 10^{-19} \text{ J (en joules)}$$

1.7 Les longueurs d'onde changent avec les couleurs. Celle du orange est autour de 650 nm et celle du bleu est autour de 450 nm.

1.8 Selon la CIE, c'est de 360 à 830 nm. En pratique, on dit que le visible va du violet (400 nm) au rouge (700 nm).

1.9 Il suffit de classer les photons en ordre croissant de fréquence, puisque l'énergie est proportionnelle à la fréquence. Dans l'ordre de la plus petite à la plus grande fréquence, on a : infrarouge, rouge, orange, jaune, vert, bleu et ultraviolet.

Un photon infrarouge a moins d'énergie qu'un photon ultraviolet.

1.10 a) C'est orange!

b) Pas de couleur! Cette longueur d'onde n'est pas dans le visible.

1.11 Spectromètre à prisme et spectromètre à réseau

1.12 Spectromètre à réseau

1.13 Le capteur CCD a une sensibilité en longueur d'onde qui lui est propre. Cela dépend du type de capteur CCD. Certains sont plus sensibles dans le rouge et d'autres dans le bleu. L'œil a également une sensibilité en longueur d'onde qui lui est propre. Par exemple, nous sommes beaucoup plus sensibles au vert qu'au rouge.

2.1 En excitant un atome, son énergie augmente. Par la suite, en le désexcitant, cette énergie est transformée en photon. Si la fréquence de ce photon est dans le visible, il y a alors production de lumière.

2.2 a) Spectre continu, spectre de bandes, spectre de raies et spectre mixte

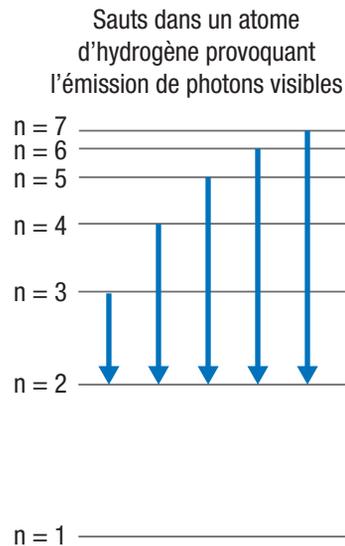
b) Mixte : un fond continu d'où émergent des raies

c) De raies

d) Continu

2.3 a) En excitant un atome, on excite en fait les électrons. Certains électrons « montent » de niveau. Ces niveaux sont discrets, un peu comme une échelle. C'est en descendant qu'il y a production de photons.

b) Sur le plan fondamental, la production de lumière vient toujours des transitions électroniques. Ce qui distingue les sources, ce sont les processus d'excitation et le type de spectre émis.



2.4 Un corps qui ne réfléchit aucune lumière ou radiation incidente ; un tel corps ne fait qu'émettre des radiations.

2.5 Non ! Par exemple, le soleil émet beaucoup plus de lumière qu'il en réfléchit. On peut facilement l'associer à un corps noir.

2.6 Il dépend uniquement de la température.

2.7 En augmentant la température, la longueur d'onde du maximum d'émissivité diminue et la puissance totale émise augmente.

2.8 a) Sachant que le vert est à $\lambda_{\max} = 540 \text{ nm}$ et que $\lambda_{\max} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m K}$, alors :

$$T = \frac{2,898 \times 10^{-3} \text{ m K}}{540 \times 10^{-9} \text{ m}} = 5366 \text{ K} \approx 5400 \text{ K}$$

b) Si la température est entre 5 000 et 6 000 K, selon la figure 2.7, il y a des longueurs d'onde émises dans tout le spectre visible. Le résultat est un blanc très prononcé.

2.9 On doit utiliser un filtre qui bloque le bleu, soit un filtre rouge.

2.10 a) $\lambda_{\max} = ?$ si $T = 2\,000\text{ K}$

Avec la formule :

$$\lambda_{\max} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m K}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \times 10^{-3} \text{ m K}}{2\,000 \text{ K}} = 0,000\,001\,45 \text{ m} = 1,450 \times 10^{-6} \text{ m} = 1\,450 \text{ nm}$$

Avec le graphique : $\lambda_{\max} \approx 1,5 \mu\text{m} = 1,5 \times 10^{-6} \text{ m}$

Ce maximum d'émissivité est à 1 450 nm ; on est loin dans l'infrarouge.

b) Oui, on pourra voir la lumière émise par ce corps noir. Le corps est plus chaud qu'une chandelle, qui est à 1 800 K, et on voit une chandelle.

Pour le comprendre, il faut transformer

$$0,4 \mu\text{m} = 0,4 \times 10^{-6} \text{ m} = 0,000\,000\,400 \text{ m} = 400 \times 10^{-9} \text{ m} = 400 \text{ nm}$$

Dans le graphique (figure 2.13), il y a de l'énergie à partir de 400 nm. On aura donc un peu de bleu et beaucoup de rouge. Le résultat sera un blanc-rouge.

3.1 L'ampoule, le filament et les gaz de remplissage.

3.2 a) La lumière est produite par un filament de tungstène chauffé en y faisant circuler un courant électrique.

b) Le spectre émis est continu et ressemble à celui d'un corps noir.

3.3 Filament droit, en hélice ou spiralé, et en hélice elle-même tournée en hélice ou bispiralée.

Les filaments spiralés et bispiralés sont les plus efficaces.

Notez que le filament spiralé plié en quatre d'une lampe HPL est conçu pour que la chaleur dégagée par une partie du filament serve à chauffer les autres parties.

3.4 On utilise un verre dépoli pour cacher le filament trop lumineux.

3.5 a) Pour empêcher le filament de brûler. L'oxygène de l'air est responsable de la combustion.

b) Les gaz de remplissage servent à retarder la sublimation du filament.

3.6 Les deux lampes éclairent en chauffant un filament de tungstène et produisent un spectre continu semblable à celui d'un corps noir. Les deux peuvent avoir un gradateur.

3.7 a) Gaz de remplissage

lampe classique : gaz inerte

lampe halogène : gaz inerte et gaz halogène

b) Matériel servant à réaliser l'ampoule

lampe classique : verre classique

lampe halogène : verre supportant les hautes températures, souvent en quartz

c) Production d'ultraviolet

lampe classique : pas d'UV produit, le peu émis par le filament est arrêté par le verre classique de l'ampoule

lampe halogène : assez d'UV pour exiger une protection. Le filament produit des UV et le quartz de l'ampoule laisse passer ces rayons.

d) Température du filament

lampe classique : $T = 2\,800\text{ K}$

lampe halogène domestique : $T = 3\,200\text{ K}$

halogène professionnelle : de $3\,000\text{ K}$ à $3\,250\text{ K}$

e) Température de couleur

lampe classique : $T = 2\,800\text{ K}$

lampe halogène domestique : $T = 3\,200\text{ K}$

halogène professionnelle : de $3\,000\text{ K}$ à $3\,250\text{ K}$

f) Grosseur de l'ampoule

lampe classique : grosse ampoule pour éloigner le verre de la chaleur du filament et laisser de la place au gaz inerte de façon qu'il joue son rôle

lampe halogène : petite ampoule. Le cycle halogène a besoin que la température de l'ampoule soit d'au moins $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour fonctionner, il faut donc que l'ampoule soit assez proche du filament.

3.8 La sublimation est le passage de l'état solide à l'état gazeux. Les atomes de tungstène sortent du filament et deviennent gazeux.

3.9 Dans les ampoules à incandescence, on veut empêcher que le tungstène sublimé se dépose sur la paroi interne de l'ampoule.

3.10 Le dépôt gris qui paraît sur la surface interne d'une ampoule à incandescence vieillie est du tungstène venant du filament. Ce dépôt se forme beaucoup plus vite dans les ampoules classiques que dans les ampoules aux halogènes. Une lampe à incandescence classique ternit plus rapidement qu'une lampe halogène. La raison : le cycle halogène régénère le tungstène gazeux et favorise son dépôt sur le filament.

3.11 Le filament se casse !

3.12 Dans les conditions normales (pas de choc), le claquage a lieu à l'allumage.

3.13 Dans un allumage progressif, la température du filament augmente graduellement. Donc, au départ, le courant augmente progressivement et ne présente pas de grande montée brusque, laquelle est responsable du claquage à l'allumage.

3.14 Si les deux lampes sont à leur voltage maximum, par exemple à 120 V , la lampe halogène dégage plus d'énergie dans les UV et dans le violet que la lampe à incandescence classique.

3.15 Si on diminue l'intensité lumineuse avec un gradateur, la température du filament diminue et, par conséquent, la température de couleur diminue aussi.

3.16 a) Oui : avec un gradateur, on peut diminuer le courant qui passe dans le filament et diminuer sa température. Il est donc possible qu'une lampe halogène ait la même température de couleur que celle d'une incandescence classique.

b) Non : si une lampe à incandescence est à $3\ 200\text{ K}$ quand elle est à pleine puissance, il est impossible de l'augmenter, puisque le gradateur ne permet que de diminuer l'intensité du courant, non pas de l'augmenter.

3.17 Si l'ampoule est claire, ceci est impossible. Dans une lampe à incandescence, la température du filament donne la température de couleur. Or, le tungstène fond à $3\ 680\text{ K}$, il est impossible d'atteindre $4\ 000\text{ K}$.

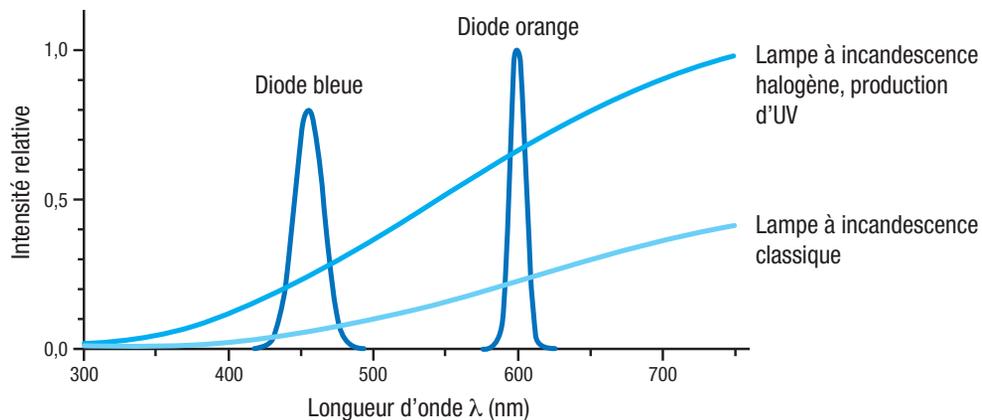
- 4.1** Il y a deux électrodes.
- 4.2** Le mercure dégage des raies visibles et des UV. Les UV servent à exciter la couche fluorescente sur la paroi intérieure du tube.
- 4.3** Contrairement à celle des lampes à incandescence, la lumière émise par un tube à décharge ne dépend pas de la température des filaments ou des électrodes. Elle dépend des atomes gazeux présents dans le tube, de la pression de ces atomes et de la composition du revêtement fluorescent, s'il en existe un.
- 4.4** Les trois familles se distinguent par la pression du gaz dans le tube : basse pression, haute pression et ultra haute pression.
- 4.5** a) Lampes aux halogénures métalliques
b) En ouvrant ou en fermant un obturateur mécanique.
- 4.6** Le gaz halogène garde les atomes métalliques en mouvement jusqu'à ce qu'ils retournent dans l'arc électrique.
- 4.7** La longueur de l'arc électrique des lampes UHP est d'environ 1 mm. C'est ce qui leur donne des caractéristiques idéales pour la projection : une source lumineuse ponctuelle fournit un meilleur contrôle de l'éclairage de l'image. Ces lampes sont très efficaces et très lumineuses.
- 4.8** $T = 4\,000\text{ K}$
- 4.9** Cela sera très difficile, surtout avec nos hivers qui vont jusqu'à -40 degrés Celsius. Si on veut le faire, il faut laisser la lampe toujours allumée, mais même alors, l'efficacité sera très réduite.
La réponse est « Non ».
- 4.10** Le tube est noté 640. Le 6 veut dire que l'IRC est entre 60 et 70. Ce n'est pas vraiment bon pour les couleurs, il faudrait au moins 85 ! Le 40 est pour la température de couleur : 4000 K. Il faut refuser la proposition.
- 4.11** Philips De luxe, Lumière du jour : 950, IRC > 90, $T = 5\,000\text{ K}$
Sylvania Deluxe blanc chaud : 830, IRC entre 80 et 89, $T = 3\,000\text{ K}$
- 4.12** L'énergie des photons émis est inférieure ou égale à celle du photon exciteur, jamais plus grande.
Donc, $E_{\text{émis}} \leq E_{\text{exciteur}}$, le photon exciteur a le plus d'énergie, ayant $E = hf$.
L'énergie est proportionnelle à la fréquence ; on obtient $f_{\text{émis}} \leq f_{\text{exciteur}}$, le photon exciteur a la fréquence la plus grande.
Le photon émis a la fréquence la plus petite, donc la longueur d'onde la plus grande.

- 4.13** Si l'on excite avec un photon IR, la fréquence réémise est soit égale, soit plus petite. On ne peut donc pas obtenir des photons dans le visible (dont les fréquences sont plus grandes que celles des IR).
- 4.14** Fluorescent : se désexcite rapidement
Phosphorescent : se désexcite lentement
- 4.15** Vieillissement de la peau, cancer de la peau, cataracte, etc.

- 5.1** Le spectre de la diode rouge a un pic vers 650 nm. Sa largeur à mi-hauteur est donnée par une règle de trois.
 $2,7 \text{ cm} = 100 \text{ nm}$ (mesuré sur l'axe)
 $0,7 \text{ cm} = ?$
 $0,7 \text{ cm}$ est près de quatre fois plus petit que $2,7$, donc la largeur est près de 25 nm.
 Par le calcul, on trouve que la largeur est de 22,6 nm.
- 5.2** Oui, la couleur apparente de l'enveloppe n'a rien à voir avec la lumière émise.
- 5.3** a) La fréquence des photons excitateurs est plus élevée que celle de la lumière émise par le phosphore.
 b) Dans les tubes fluorescents, les photons excitateurs sont dans les UV.
 Dans les diodes, ils sont dans le bleu.
- 5.4** Les DEL blanches sont beaucoup plus efficaces que les autres types de lampe et elles durent plus longtemps. Imaginez le marché mondial et les profits possibles si elles remplaçaient toutes les lampes à incandescence !
- 5.5** Température de couleur proximale (TCP)

5.6

Différents spectres



Diodes bleue et orange : spectre de bande dont les longueurs d'onde correspondent approximativement à celles données dans le tableau 5.1.

Lampes à incandescence : spectres continus semblables à ceux de la figure 3.6.

La lampe halogène produit plus d'UV (longueurs d'onde < 400 nm) et l'intensité qu'elle émet est plus grande (la surface sous la courbe de son spectre est plus grande).

5.7 1) Le milieu excitable

2) Le système pour exciter ce milieu

3) La cavité optique qui garde les photons dans le milieu excitable et en fait sortir une partie pour produire le faisceau laser

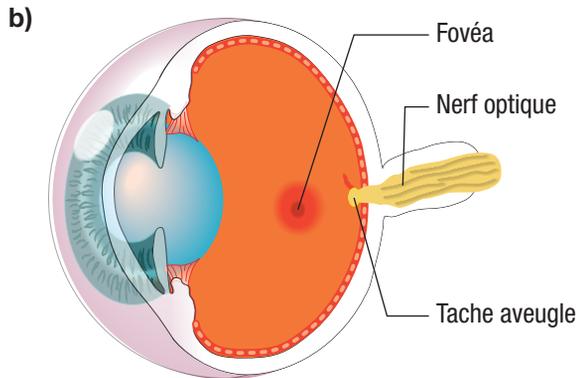
5.8 Dans une DEL, l'émission de lumière est spontanée. La lumière émise n'est pas amplifiée, donc pas dangereuse.

Dans une diode laser, l'émission est stimulée, produisant une lumière amplifiée et concentrée. Le faisceau peut alors être dangereux.

5.9 a) Au plus 0,25 s

b) Dommage quasi instantané, risque de devenir aveugle

6.1 a) 1 : Iris 2 : Cristallin 3 : Cornée 4 : Rétine



6.2 L'image doit être renversée et plus petite : elle est au numéro 3.

6.3 La nuit, les cônes ne « voient » rien, il n'y a pas assez de lumière pour les activer, seuls les bâtonnets fonctionnent. Or, les bâtonnets ne « voient » pas les couleurs.

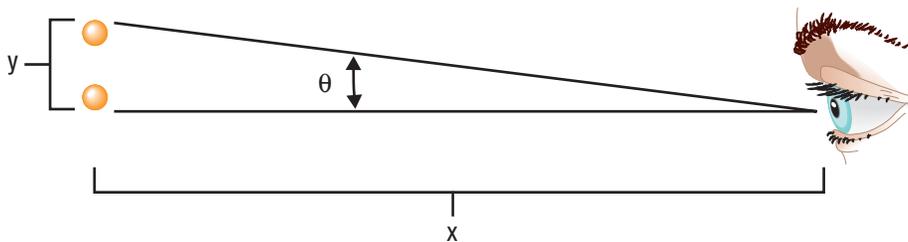
6.4 La vision colorée est attribuée aux cônes.

6.5 Rouge, vert et bleu.

6.6 La zone d'acuité maximale est la fovéa. La raison en est que dans la fovéa, le nombre de cônes par unité de surface est maximal.

6.7 Il n'y a aucun bâtonnet dans la fovéa.

6.8 Quand on étudie le pouvoir séparateur, on obtient que $\theta_{\text{minimum}} = (1/60)^\circ \approx 3 \times 10^{-4} \text{ rad}$



Or, $\tan \theta = y/x \Rightarrow \tan (3 \times 10^{-4} \text{ rad}) = 2 \text{ mm} / x \Rightarrow x = 2 \text{ mm} / \tan (3 \times 10^{-4})$

$$x = \frac{2 \times 10^{-3}}{3 \times 10^{-4}} \text{ m} \approx 6,6 \text{ m}$$

Si l'on se place à plus de 6,6 m des deux points lumineux, on ne pourra les distinguer, ils paraîtront ne former qu'un seul point.

6.9 Au cinéma, la projection des images se fait de façon saccadée, le cerveau interprète cette suite d'images comme étant un mouvement continu.

6.10 – Contraintes quant aux lunettes que doivent porter les spectateurs

Images de couleurs

Chaque œil doit percevoir la couleur correspondant à celle de l'image qu'il doit voir : lunette avec un œil bleu et l'autre rouge.

Images polarisées

Chaque œil doit percevoir la polarisation de l'image qui lui est dédiée : lunette avec un filtre de polarisation circulaire gauche et l'autre de polarisation circulaire droite.

Lunette active

Lunette spéciale rigoureusement synchronisée avec l'alternance des images gauche et droite lors de la projection

– Contraintes quant au montage du film

Images de couleurs et polarisées

Il est possible de superposer les deux images différentes l'une sur l'autre, le film ne requiert alors aucun montage particulier.

Lunette active

Le film doit être monté pour que chaque image alterne entre sa version gauche et sa version droite.

– Contraintes quant à l'écran de projection

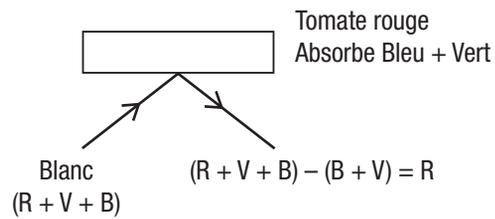
Images de couleurs et lunette active

Aucune contrainte

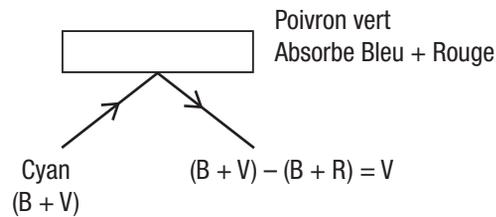
Images polarisées

Il faut un écran spécial qui conserve la polarisation de la lumière même après réflexion.

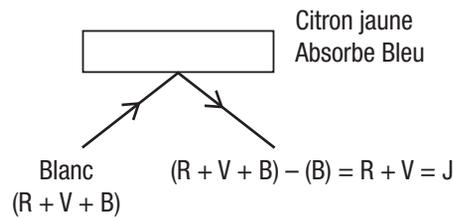
7.1 a) La tomate paraît rouge.



b) Le poivron paraît vert.

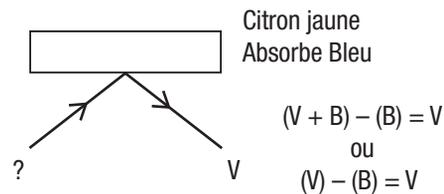


c) Le citron paraît jaune.

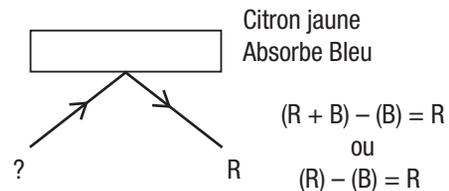


7.2 Un citron qui paraît jaune et qui est éclairé en lumière blanche absorbe le bleu.

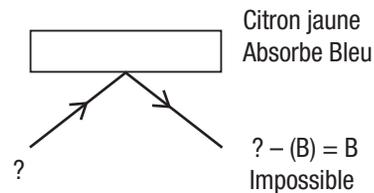
a) Pour qu'il paraisse vert, soit on l'éclaire avec du vert et du bleu (cyan), soit on l'éclaire uniquement avec du vert. L'addition du vert et du bleu donne cyan ($C = V + B$).



b) Pour qu'il paraisse rouge, soit on l'éclaire avec du rouge et du bleu (magenta), soit on l'éclaire uniquement avec du rouge. L'addition du rouge et du bleu donne magenta ($M = R + B$).



c) Impossible : le citron ne pourra jamais paraître bleu parce qu'il absorbe le bleu de toute lumière incidente.



7.3 Exercice de synthèse additive, puisqu'on superpose deux faisceaux lumineux.

a) $B + M = B + (R + B) = 2B + R$

Avec l'outil « Modifier les couleurs de Paint » ou « Boîte à couleur », on obtient $255B + 127R = \text{Indigo}$.

b) $J + M = (R + V) + (R + B) = 2R + B + V$

Avec l'outil « Modifier les couleurs de Paint » ou « Boîte à couleur », on obtient $255R + 127B + 127V = \text{Rose saumon}$.

c) $C + V = (B + V) + V = B + 2V$

Avec l'outil « Modifier les couleurs de Paint » ou « Boîte à couleur », on obtient $127B + 255V = \text{Vert printemps}$.

7.4 Exercice de synthèse soustractive avec une lumière incidente blanche (R+V+B)

a) On mélange des pigments bleu et magenta. Le bleu absorbe le rouge et le vert ($-R - V$), le magenta absorbe le vert ($-V$). Le mélange absorbe tout le vert et une bonne partie du rouge $(R + V + B) - R - V = B$, mais il reste du rouge. La couleur perçue sera bleu avec un peu de rouge.

b) On mélange des pigments jaune et magenta (deux primaires soustractives). Le jaune absorbe le bleu, le magenta absorbe le vert $(R + V + B) - B - V = R$. La couleur perçue sera rouge.

c) On mélange des pigments cyan et vert. Le cyan absorbe le rouge ($-R$), le vert absorbe le bleu et le rouge ($-B - R$). Le mélange absorbe tout le rouge et une bonne partie du bleu $(R + V + B) - R - B = V$, mais il reste du bleu. La couleur perçue sera vert avec un peu de bleu.

7.5 On ajoute une peinture noire parce que, en fait, les trois pigments CMJ n'absorbent pas parfaitement toutes les couleurs. Un mélange réel des trois primaires soustractives donne un gris foncé. En ajoutant des pigments noirs, on s'assure de la qualité des noirs en impression.

7.6 La différence s'explique par la provenance de la lumière qui entre dans notre œil. Un écran émet de la lumière, c'est un objet lumineux, tandis qu'un point d'une peinture réfléchit une partie de la lumière ambiante. L'œil effectue la synthèse additive des couleurs qu'il reçoit.

7.7 Des pigments idéaux bleus absorbent complètement le rouge et le vert ($-R - V$), tandis que des pigments verts absorbent complètement le bleu et le rouge ($-B - R$).

– Si l'on fait un mélange homogène de ces deux pigments idéaux et qu'on les éclaire en lumière blanche, on obtiendra $(R + V + B) - R - V - B - R = \text{Noir}$. Les trois primaires RVB seront absorbées, il ne restera rien.

– Si l'on place des petits points rapprochés les uns des autres, les pigments bleus et verts enverront respectivement du bleu et du vert à notre œil, qui verra du cyan. $(B + V) = C$

7.8 Il y a un lien direct entre les deux : le pouvoir séparateur donne l'angle maximum pour que deux rayons lumineux arrivent sur le même cône. Par ailleurs, pour que les images de deux points se superposent, il faut qu'elles arrivent sur le même cône. C'est pourquoi il est difficile de réaliser des peintures « pointillistes ».

8.1 On transforme des coordonnées CMJ en RVB en utilisant les trois primaires soustractives : $C = -R$ $M = -V$ $J = -B$.

a) $CMJ = (125, 75, 25) = (-125R - 75V - 25B)$

Si l'on éclaire en lumière blanche ($255R + 255V + 255B$), on obtient :

$$(255R + 255V + 255B - 125R - 75V - 25B) = (130R + 180V + 230B).$$

Avec Paint :

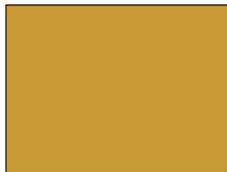


b) $CMJ = (55, 100, 200) = (-55R - 100V - 200B)$

Si l'on éclaire en lumière blanche ($255R + 255V + 255B$), on obtient :

$$(255R + 255V + 255B - 55R - 100V - 200B) = (200R + 155V + 55B).$$

Avec Paint :



8.2 Cherchons les coordonnées TSL en premier. La couleur est sur la grande roue, donc $L = 50\%$. Elle est saturée, donc $S = 100\%$. Sa teinte est de 90° ; en pourcentage, on obtient $90/360 = 25\%$, donc $T = 25\%$.

Dans Paint, le maximum d'une coordonnée T, S ou L est de 240 ; on obtient les coordonnées TSL = 60, 240, 120. On trouve que les coordonnées RVB = (128, 255, 0), ce qui donne un vert lime.



8.3 Selon l'aile xy (figure 8.12, par exemple) :

a) Le point $(x, y) = (0,3; 0,3)$ est situé près de 7 000 K, ce qui donne un blanc très froid.

b) Le point $(x, y) = (0,3; 0,6)$ se situe dans le vert, en dehors de la zone source, donc on ne peut pas lui associer une température de couleur.

8.4 a) L'orangé est situé sur le contour de l'aile, à peu près à mi-chemin entre le rouge et le jaune. On trouve ses coordonnées RVB en calculant les moyennes des coordonnées des couleurs jaune et rouge :

$$\text{coordonnée R} = (255 + 255)/2 = 255$$

$$\text{coordonnée V} = (255 + 0)/2 = 128$$

$$\text{coordonnée B} = (0 + 0)/2 = 0$$

Résultat : coordonnées (RVB) de l'orangé = (255, 128, 0)

- b)** Le carré 1 est situé entre le blanc E (255, 255, 255) et le rouge (255, 0, 0).
La moyenne de ces coordonnées donne (255, 128, 128).



- c)** Dans la figure 8.13, le carré 2 est dans la zone du bleu saturé (voir la figure 8.9) entre le carré 1 et le carré bleu. On ne peut connaître les coordonnées RVB du carré 2 en calculant la moyenne des coordonnées du carré bleu et du carré 1 parce que ces deux carrés sont dans deux zones différentes (bleu et rouge).

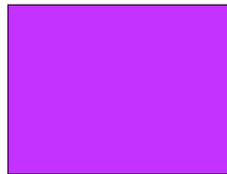
De plus, ce carré 2 est entre M et le milieu de la ligne rejoignant B et E. Supposons un carré 3 situé entre B et E et dont les coordonnées sont (128, 128, 255). La moyenne des coordonnées des carrés 3 et M donne (191, 64, 255), ce sont approximativement les coordonnées du carré 2.



Bien que ces coordonnées soient approximatives, elles donnent une bonne idée de la couleur cherchée. Pour vous en convaincre, regardez les trois rectangles colorés ci-dessous : bien que leurs coordonnées ne soient pas identiques, on perçoit très peu de différence entre leurs couleurs.



RVB = (191, 64, 255)

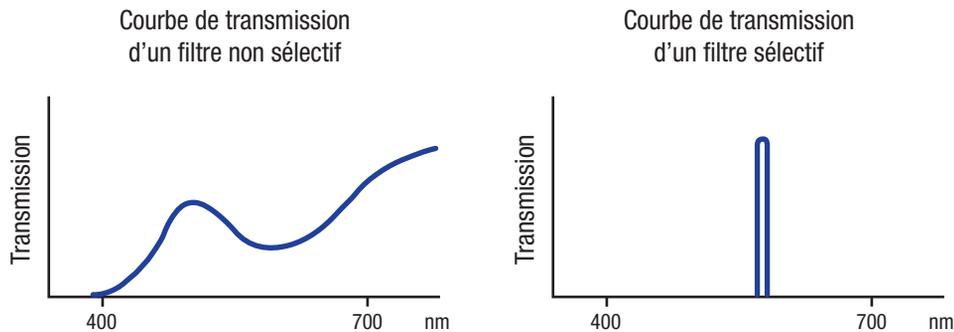


RVB = (195, 50, 255)



RVB = (187, 67, 255)

- 9.1** Pour l'éclairage des scènes, au lieu d'employer des filtres faits de verre, on utilise généralement des filtres faits de plastique. Notez que ces derniers filtres sont souvent nommés « gélamines », bien qu'ils ne soient plus faits de gélatine.
- 9.2** Tous les filtres colorés laissent passer ou transmettent une large plage de longueurs d'onde. Pour être sélectif, il faut qu'un filtre transmette une plage très étroite de longueurs d'onde, par exemple une plage dont la largeur est de un nanomètre (1 nm).



- 9.3** Le filtre Lee n° 119 (figure 9.12) transmet 3,10 % de l'énergie lumineuse incidente.
- 9.4** On ne peut se fier ni sur le nom ni sur le numéro, puisqu'ils diffèrent d'une compagnie à une autre. Il faut se baser sur leurs courbes de transmission : pour que deux filtres aient le même effet, il faut que leurs courbes de transmission dans le visible soient équivalentes.
- 9.5** En considérant que le visible s'étend de 400 à 700 nm.
- Filtre n° 106. La longueur d'onde moyenne du visible transmise est autour de 650 nm.
 - Filtre n° 139. La longueur d'onde où il y a le maximum de transmission dans le visible est autour de 520 nm.
 - Filtre n° 119. Les longueurs d'onde minimale et maximale du visible transmises par ce filtre sont 400 nm et à peu près 530 nm.
 - Pour savoir quel filtre transmet le plus les infrarouges, il faut évaluer la surface sous la courbe de 700 nm à 800 nm en comptant le nombre de carreaux.
- Filtre n° 106 : 8 carreaux
 Filtre n° 139 : ≈ 4 carreaux
 Filtre n° 119 : ≈ 6 carreaux
- C'est donc le filtre n° 106 qui laisse passer le plus les infrarouges.
- 9.6** Les projecteurs robots munis d'une lampe à décharge haute pression sont équipés d'un filtre dichroïque. On voit aussi des filtres dichroïques dans les caméras tri CCD, où ils servent à séparer la lumière en RVB. Plusieurs réflecteurs présents dans les projecteurs de scène ayant une lampe à incandescence ou une lampe à décharge haute pression sont, en fait, des filtres dichroïques qui servent à évacuer la chaleur. Ces réflecteurs réfléchissent le visible et transmettent les infrarouges.

- 9.7** Un bon filtre polarisant est neutre ou gris en théorie. En pratique, ces filtres coupent un peu plus de longueurs d'onde dans le bleu que dans les autres couleurs, donc ils ne sont pas parfaitement neutres.
- 9.8** a) Ce filtre laisse passer les longueurs d'onde entre 450 nm et 480 nm.
b) S'il est éclairé en lumière blanche, sa couleur apparente sera le bleu.
- 9.9** Pour éteindre une raie, il faut que le pourcentage de transmission à cette longueur d'onde soit nul. Les courbes de transmission des trois filtres dichroïques sont illustrées à la figure 9.6.
- a) Pour éteindre les raies vertes, jaunes et orange, il faut un filtre ayant 0 % de transmission pour des longueurs d'onde plus grandes que 520 nm. Il s'agit du filtre bleu.
- b) Pour éteindre les raies violet bleu et vertes, il faut un filtre ayant 0 % de transmission pour des longueurs d'onde plus petites que 520 nm. Il s'agit du filtre rouge.
- 9.10** Si l'on place un filtre polarisant devant une lampe au mercure basse pression, aucune raie ne sera éteinte. Le filtre, approximativement neutre, diminuera l'intensité de toutes les raies.

- 9.11** a) Si l'on filtre seulement le fluorescent,
 $T_i = 4\ 000\ \text{K}$; $T_f = 6\ 200\ \text{K}$.

$$\text{Décalage en mireds} = \frac{10^6}{6200} - \frac{10^6}{4000} = -89$$

Le filtre 202 conviendra.

- b) Si l'on filtre tous les projecteurs,
 $T_i = 6\ 200\ \text{K}$; $T_f = 4\ 000\ \text{K}$.

$$\text{Décalage en mireds} = \frac{10^6}{4000} - \frac{10^6}{6200} = +89$$

Le filtre 442 conviendra.

Numéros de quelques filtres LEE

Numéro	Décalage en mireds
441	+160
204	+159
285	+124
205	+109
442	+81
206	+64
443	+42
223	+26
444	+20
218	-18
203	-35
202	-78
281	-113
201	-137

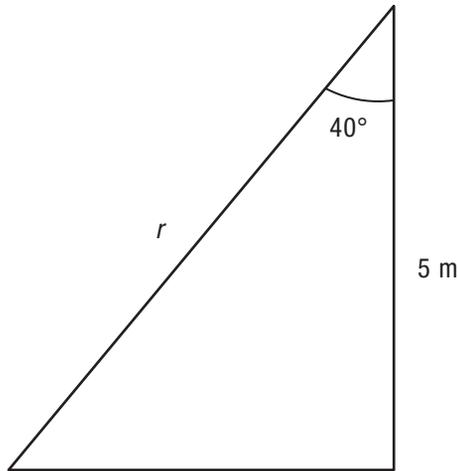
10.1 $E_V = I_V \cos\theta / r^2$

a) Au point A, $\theta = 0^\circ \Rightarrow I_V = 5\,000 \text{ cd}$ et $r = 5 \text{ m}$

$$E_V = 5\,000 \cos 0 / 5^2 = 200 \text{ lx}$$

b) Au point B, $\theta = 40^\circ \Rightarrow I_V = 3\,000 \text{ cd}$

Pour trouver r , on peut utiliser les formules de trigonométrie ou faire un dessin à l'échelle.



$$\cos 40^\circ = 5 \text{ m} / r$$

$$r = 5 \text{ m} / \cos 40^\circ = 6,527 \text{ m}$$

Dans un dessin à l'échelle, on trouve 6,5 m.

$$E_V = 3\,000 \cos 40 / 6,5^2 = 54,4 \text{ lx}$$

10.2 On sait que $d\phi = 200 \text{ lm}$ et $d\Omega = 1 \text{ stéradian}$; de plus, on sait que l'intensité visuelle (qui ne dépend pas de la distance) $I_V = d\phi / d\Omega = 200 \text{ cd}$.

a) L'éclairement reçu par l'aire A, à une distance r de 1 m :

$$E_V = I_V \cos\theta / r^2 = 200 \text{ cd} \cos 0 / (1 \text{ m})^2 = 200 \text{ lx}$$

b) L'éclairement reçu par l'aire A, à une distance r de 2 m :

$$E_V = I_V \cos\theta / r^2 = 200 \text{ cd} \cos 0 / (2 \text{ m})^2 = 50 \text{ lx}$$

10.3 On sait que $d\phi = 200 \text{ lm}$ et $d\Omega = 2 \text{ stéradians}$, alors l'intensité visuelle (qui ne dépend pas de la distance) $I_V = d\phi / d\Omega = 100 \text{ cd}$.

a) L'éclairement reçu par l'aire A, à une distance r de 1 m :

$$E_V = I_V \cos\theta / r^2 = 100 \text{ cd} \cos 0 / (1 \text{ m})^2 = 100 \text{ lx}$$

b) L'éclairement reçu par l'aire A, à une distance r de 2 m :

$$E_V = I_V \cos\theta / r^2 = 100 \text{ cd} \cos 0 / (2 \text{ m})^2 = 25 \text{ lx}$$

10.4 a) L'efficacité d'un projecteur est le rapport entre le flux émis par le projecteur et le flux émis par la lampe. Selon les informations des fiches techniques, la lampe HPL 575/115 émet un flux de 16 520 lm.

L'efficacité du projecteur est donc de $7\,628 \text{ lm} / 16\,520 \text{ lm} = 0,46 = 46 \%$.

b) On résout ce problème en utilisant les formules du tableau 10.3,

$$D_{\text{faisceau}} = 2z \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right), d \approx D_{\text{faisceau}}, n \approx \frac{D_{\text{recouvrement}}}{D_{\text{faisceau}}} + 1$$

On sait que $z = 4,2$ m.

Il faut séparer le problème selon x et selon y .

Selon x ,

$$D_{\text{recouvrement}} = 4,8 \text{ m}; \alpha = 20^\circ. D_{\text{faisceau}} = 2 \times 4,2 \text{ m} \tan(20^\circ/2) = 1,48 \text{ m}.$$

$$d = 1,48 \text{ m} \quad n = (4,8/1,48) + 1 = 4,2$$

Selon y ,

$$D_{\text{recouvrement}} = 9 \text{ m}; \alpha = 32^\circ. D_{\text{faisceau}} = 2 \times 4,2 \text{ m} \tan(32^\circ/2) = 2,4 \text{ m}.$$

$$d = 2,4 \text{ m} \quad n = (9/2,4) + 1 = 4,75$$

Il faut donc 5 projecteurs distants de 1,48 m selon x

et 5 projecteurs distants de 2,4 m selon y .

c) Le projecteur est équipé d'une lampe HPL 375/115X, une lampe de 375 W ; l'intensité visuelle au point chaud est alors plus petite que les 36 656 cd dus à une lampe de 575 W.

Ici, $I_V = 36\,656 \text{ cd} \times 0,84 = 30\,791 \text{ cd}$ et le filtre transmet 10,9 % de cette intensité.

L'intensité visuelle au point chaud est donc de 3 356 cd. De plus, l'angle $\theta = 25^\circ$.

On veut un éclairage d'au moins 650 lx ; selon $E_V = I_V \cos\theta/r^2$, on obtient :

$$r^2 = I_V \cos\theta/E_V = 3\,356 \text{ cd} \cos 25^\circ/650$$

$$r^2 = 4,68 \quad r = 2,16 \text{ m}$$

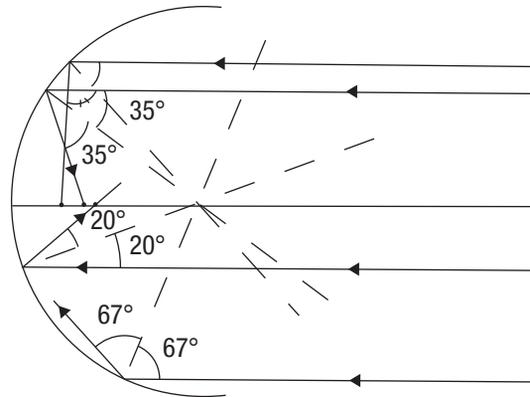
Le projecteur ne doit pas être à plus de 2,16 m du point de visée.

11.1 Un miroir produit une réflexion spéculaire.
Un mur blanc mat produit une réflexion diffuse.

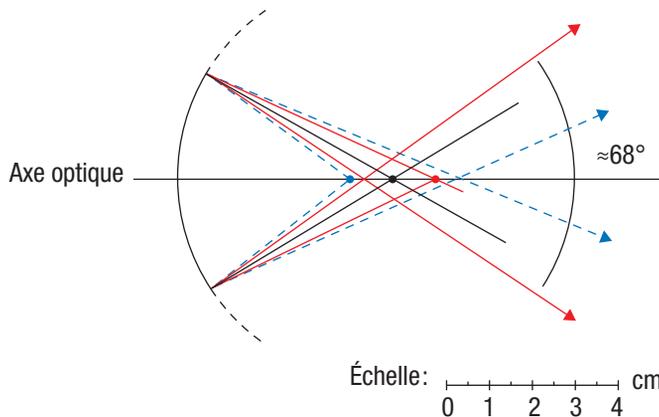
11.2 On constate que les rayons réfléchis ne coupent pas tous l'axe optique au même point ; plus les rayons incidents parallèles à l'axe optique s'éloignent de cet axe, plus les rayons réfléchis coupent l'axe optique en se rapprochant du sommet du miroir.

On voit aussi que le rayon ayant un angle d'incidence de 67° est réfléchi et ne coupe même pas l'axe optique. Pour qu'un foyer soit ponctuel, il faut que tous les rayons incidents parallèles à l'axe optique se rencontrent, après réflexion, en un seul point de l'axe optique.

Le foyer d'un miroir sphérique n'est pas ponctuel.



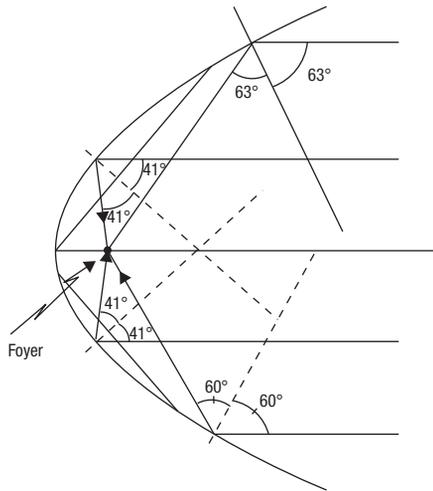
11.3 Le miroir sphérique a un rayon de courbure de 5 cm.



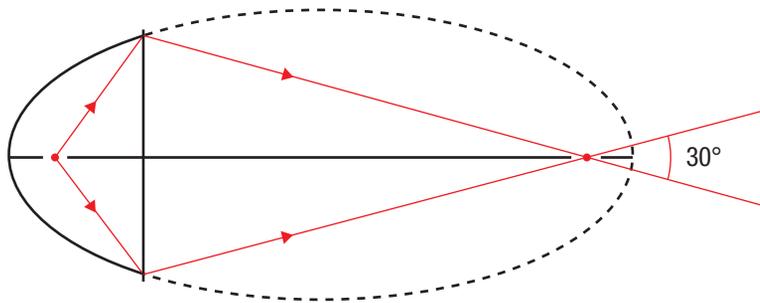
Les deux rayons issus d'une source ponctuelle placée au centre de courbure et séparés de 60° nous indiquent les bords du miroir. De plus, chacun de ces rayons tracés en noir donne la direction de la normale au miroir pour tous les rayons arrivant aux bords de celui-ci.

On a tracé deux points à 1 cm, de part et d'autre du centre de courbure. Les rayons issus du point le plus rapproché du sommet sont en bleu (pointillés), ceux issus du point le plus éloigné sont en rouge (lignes pleines). Ce sont les rayons en rouge qui bornent le faisceau réfléchi, ils forment un angle de 68° . L'angle d'ouverture du faisceau réfléchi par la source étendue est de 68° .

11.4 Tous les rayons réfléchis se rencontrent en un point, le foyer est ponctuel.

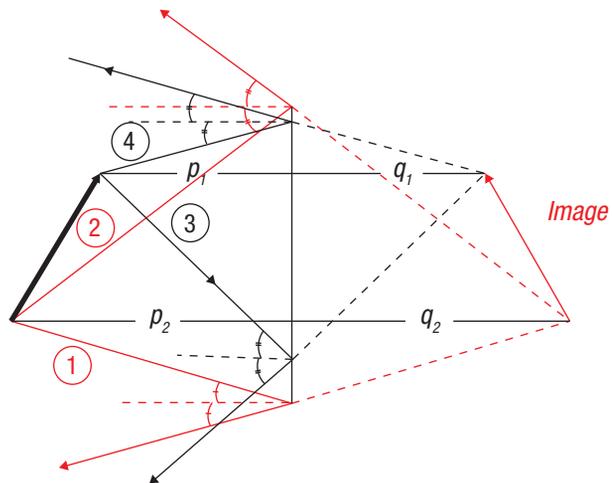


11.5 Quand une source ponctuelle est placée au foyer de gauche du miroir ellipsoïdal, l'angle d'ouverture du faisceau réfléchi est de 30° .



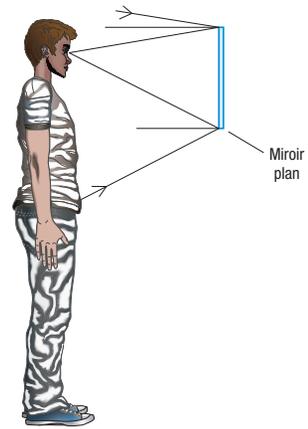
11.6 a) Les rayons 1 et 2 partent de la base de la flèche, l'image des points se situe au point de rencontre des deux rayons réfléchis (rayons en pointillés rouges). Les rayons 3 et 4 partent de la pointe de la flèche, l'image se situe au point de rencontre des deux rayons réfléchis (rayons en pointillés noirs).

b) Les distances objets p_1 (pointe) et p_2 (base) sont tracées à un angle de 90° par rapport au miroir. Ces distances sont reportées derrière le miroir et indiquent les positions des deux extrémités de l'image de la flèche.



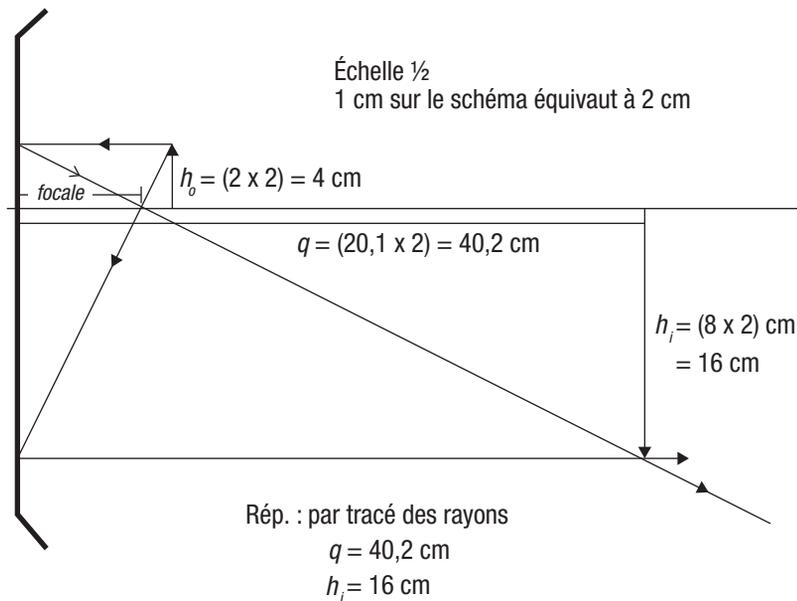
11.7 Jules se verra de sa ceinture au haut de sa tête.

Les deux rayons limitant l'image se trouvent facilement en inversant leurs directions. En partant de l'œil, on trace une ligne qui rejoint le bas du miroir, on applique la loi de la réflexion (deux angles égaux) et on trouve que le rayon lumineux est issu de la ceinture. Par la suite, on oriente les rayons correctement, ils ne sortent pas de l'œil ! On répète l'opération avec une autre ligne partant de l'œil et rejoignant le haut du miroir.



11.8 Hauteur et position de l'image produite par un miroir concave ayant une focale de foyer 8 cm quand un objet de 4 cm de haut est placé à 10 cm du sommet du miroir :

a) en traçant un schéma et les rayons principaux ;



b) en utilisant les formules des miroirs sphériques.

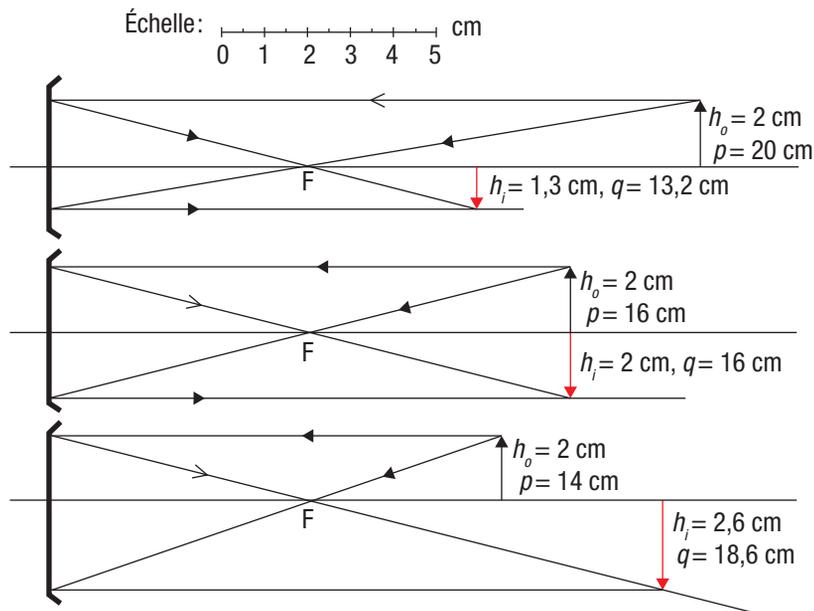
On sait que $f = 8$ cm, $p = 10$ cm et $H_o = 4$ cm, on cherche q et H_i ,

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad \frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} \quad q = \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{10} \right)^{-1} \text{ cm} = 40 \text{ cm}$$

$$\frac{H_i}{H_o} = -\frac{q}{p} = -\frac{40}{10} = -4 \quad H_i = -4H_o = -16 \text{ cm}$$

L'image est réelle à 40 cm devant le miroir, elle est renversée et sa hauteur est de 16 cm.

11.9 Les tracés :



Caractéristiques des images produites par un miroir concave de focale $f = 8$ cm

p	q	h_i	$(1/p)+(1/q)$	h_i/h_o	$-q/p$
cm	cm	cm	cm ⁻¹		
20	13,2	-1,3	0,1257576	-0,65	-0,66
16	16	-2	0,125	-1	-1
14	18,6	-2,6	0,125192	-1,3	-1,33

p = distance objet

q = distance image

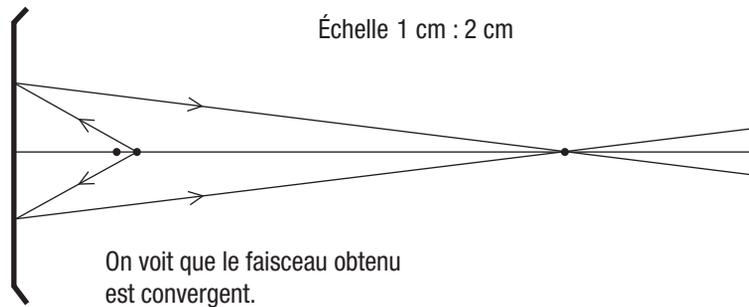
h_i = hauteur de l'image

$h_o = 2$ cm

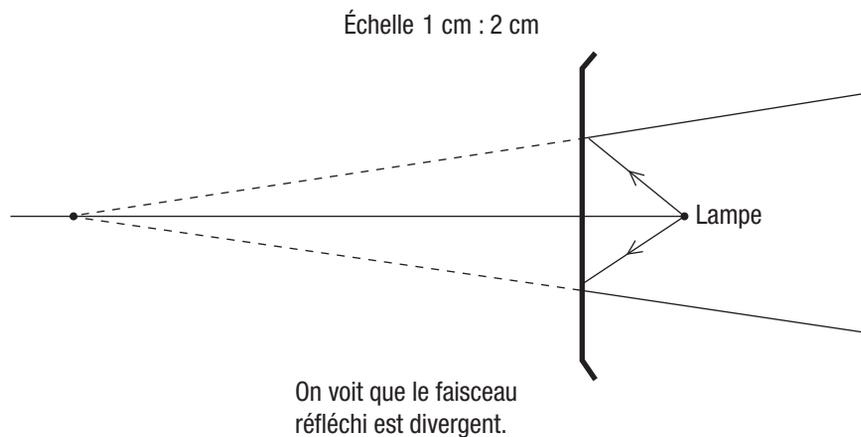
La colonne $(1/p) + (1/q)$ correspond à $1/f$, soit $0,125 \text{ cm}^{-1}$; de plus, les deux colonnes (h_i/h_o) et $(-q/p)$ sont semblables. Les chiffres ne sont pas toujours identiques, ce qui est dû à l'imprécision des tracés et aux incertitudes des valeurs mesurées avec une règle graduée au millimètre; par exemple, il est impossible de mesurer précisément 1,32 cm avec une telle règle.

11.10 On sait que $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$ $q = \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{p} \right)^{-1}$

a) $f = 5 \text{ cm}, p = 6 \text{ cm}, q = \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{6} \right)^{-1} = +30 \text{ cm}$



b) $f = 5 \text{ cm}, p = 4 \text{ cm}, q = \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{4} \right)^{-1} = -20 \text{ cm}$



Si $D = 10 \text{ cm}$, $\alpha = 2 \arctan\left(\frac{D}{2q}\right) = 2 \arctan\left(\frac{10 \text{ cm}}{-40 \text{ cm}}\right) = -28^\circ$

L'angle d'ouverture du faisceau réfléchi est de 28° , le signe $-$ signifie que le faisceau réfléchi est divergent.

12.1 Il faut commencer par tracer la normale. On mesure ensuite :

$$\theta_1 = 50^\circ \text{ et } \theta_2 = 15,5^\circ$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$\frac{1 \sin 50^\circ}{\sin 15,5^\circ} = n_2 = 2,86$$

12.2 Le rayon rencontre la première interface et continue en ligne droite (angle d'incidence nul).

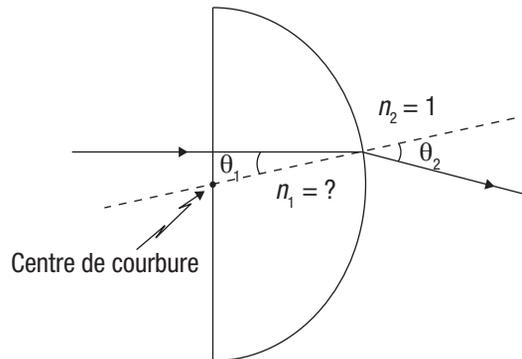
La lentille étant hémisphérique, le centre de courbure de la deuxième interface est au milieu du côté vertical de la lentille.

On trace la normale qui passe par le centre de courbure (en pointillés) et on mesure :

$$\theta_1 = 12^\circ \text{ et } \theta_2 = 21^\circ$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_1 = \frac{1 \sin 21^\circ}{\sin 12^\circ} = 1,72$$



12.3 La lentille illustrée à droite (figure 12.34) est faite de verre dont l'indice de réfraction est $n = 1,5$.

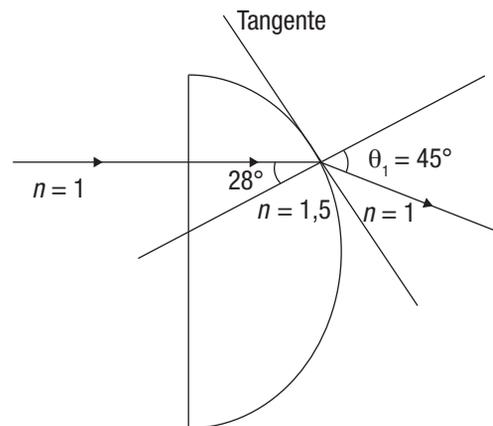
a) Quand le rayon rentre dans la lentille (interface $n = 1$ à $n = 1,5$), les angles d'incidence et de réfraction sont nuls, le rayon continue en ligne droite.

b) Pour trouver l'angle d'incidence à la deuxième interface, il faut tracer la tangente, puis la normale. Ici, contrairement à l'exercice 12.3, la lentille n'est pas hémisphérique, par conséquent le centre de courbure de la deuxième interface n'est pas au milieu de la face verticale de la lentille. On mesure l'angle d'incidence $\theta_1 = 28^\circ$.

On sait que $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, alors,

$$\theta_2 = \arcsin (n_1 \sin \theta_1 / n_2) = \arcsin (1,5 \sin 28^\circ / 1) = 44,76...^\circ \approx 45^\circ$$

L'angle d'incidence à la deuxième interface est de 28° , l'angle de réfraction est de 45° .

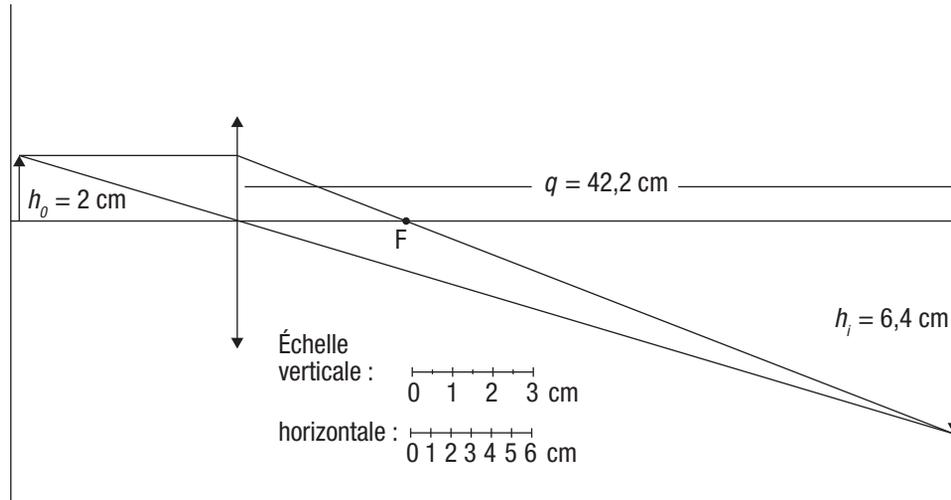


12.4 a) Une lentille divergente est plus épaisse à ses extrémités qu'en son centre : lentille A.

b) Une lentille convergente est plus épaisse en son centre : lentilles B et D.

12.5 Trouvez la hauteur et la position de l'image produite par une lentille convergente ayant une focale de 10 cm si l'objet est placé à 13 cm de la lentille et qu'il a une hauteur de 2 cm.

- a) En traçant au moins deux rayons principaux, on trouve une image réelle renversée, à une distance de 42,2 cm devant la lentille et d'une hauteur de 6,4 cm.



- b) Avec les formules des lentilles minces

On sait que $f = 10$ cm, $p = 13$ cm et $h_o = 2$ cm ; on cherche q et h_i .

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad \frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} \quad q = \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{13} \right)^{-1} \text{ cm} = 43,33... \text{ cm}$$

$$\frac{h_i}{h_o} = -\frac{q}{p} = -\frac{43,33...}{13} = -3,33... \quad h_i = -3,33h_o = -6,66... \text{ cm}$$

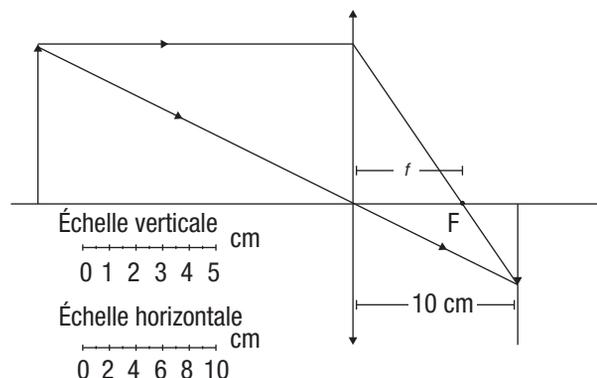
L'image est réelle à 43,33... cm devant le miroir, elle est renversée et sa hauteur est de 6,66... cm.

12.6 Un objet de 5 cm de haut est situé à 20 cm d'une lentille convergente. La lentille forme une image réelle à une distance de 10 cm par rapport à son centre.

- a) Pour déterminer le foyer de la lentille en traçant des rayons, on dessine un objet, le symbole de la lentille (à 20 cm) et un écran placé à 10 cm de la lentille.

On trace ensuite le rayon principal qui passe par le milieu de la lentille ; on trouve alors la position de l'image de la pointe de la flèche. On trace ensuite le rayon principal qui est parallèle à l'axe optique ; ce rayon forme l'image de la pointe de la flèche.

Il reste à mesurer la distance focale, $f = 6,6$ cm.



b) Avec les formules, on sait que $p = 20$ cm et que $q = 0$ cm, on cherche f .

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad \frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} \quad f = \left(\frac{1}{20} + \frac{1}{10} \right)^{-1} \text{ cm} = 6,66... \text{ cm}$$

12.7 Selon la méthode du rayon oblique, l'angle d'ouverture du faisceau est approximativement de 40° .

