

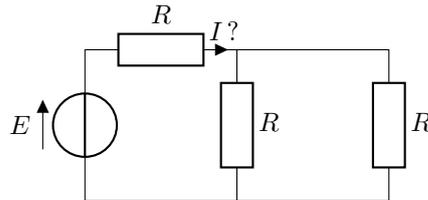
DS n° 1 de Physique-Chimie

Durée : 3h
Calculatrice interdite

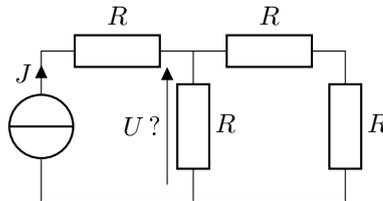
1 Échauffement

1. En quoi consiste l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) ?
2. L'ARQS est-elle vérifiée pour une ligne à haute tension, d'une longueur de 100 km, qui transporte un signal électrique à 50 Hz ?
3. Dans chaque cas, déterminer la tension U ou l'intensité I , par la méthode de votre choix.

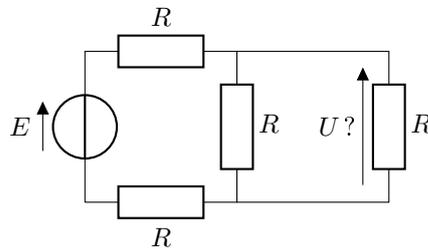
(a)



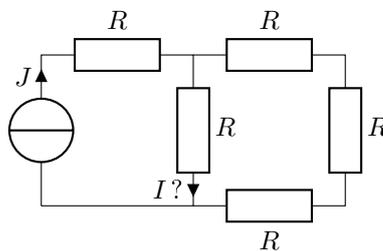
(b)



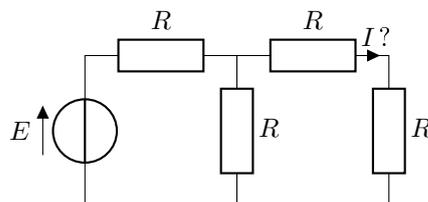
(c)



(d)

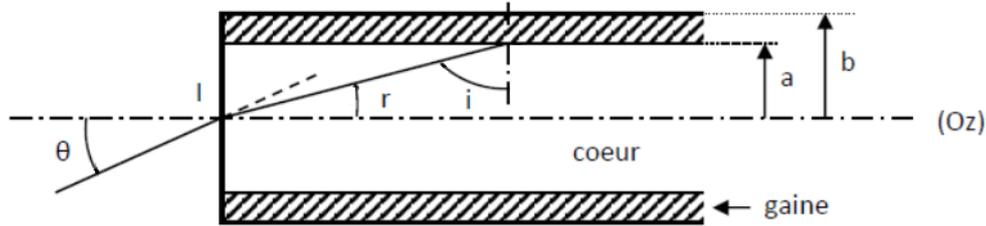


(e)



2 La fibre optique à saut d'indice

Une fibre optique à saut d'indice est constituée d'un cœur cylindrique de rayon a et d'indice n_1 , entouré d'une gaine de rayon extérieur b et d'indice $n_2 < n_1$. Les faces d'entrée et de sortie sont perpendiculaires à l'axe de révolution (Oz) commun au cœur et à la gaine. La fibre est plongée dans l'air, d'indice de réfraction n_0 . Un rayon lumineux arrive au point I de l'axe (Oz) sur la face d'entrée de la fibre, avec un angle d'incidence θ . On note r l'angle de réfraction en I .



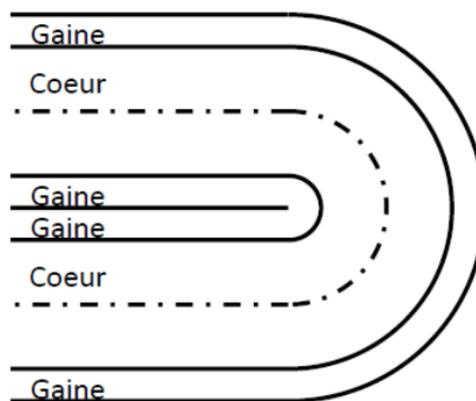
4. Montrer que le rayon lumineux est guidé dans le cœur (c'est-à-dire qu'il n'en sort pas) si l'angle i est supérieur à une valeur critique i_c que l'on exprimera en fonction de n_1 et n_2 .
5. Expliquer alors comment le rayon est guidé dans le cœur en vous appuyant sur un schéma commenté.
6. Montrer que le rayon lumineux est guidé dans le cœur si le rayon incident en I appartient à un cône d'acceptance, dont on exprimera l'angle θ_c par rapport à l'axe de la fibre en fonction de n_0 , n_1 et n_2 .

On envoie alors en entrée de la fibre des impulsions lumineuses très brèves avec une période T . Les rayons lumineux sont émis en entrée de la fibre dans toutes les directions possibles. Tous les rayons n'ayant pas le même trajet à parcourir dans la fibre optique, les impulsions en sortie de la fibre sont élargie temporellement.



7. Établir l'expression de la fréquence binaire maximale f_{\max} que peut transmettre une fibre optique à saut d'indice de longueur L , en fonction de n_1 , n_2 , c et L .
8. Justifier l'utilisation de fibres optiques monomodes, c'est-à-dire n'ayant pas de dispersion intermodale, dans les câbles sous-marins qui réalisent les liaisons intercontinentales.

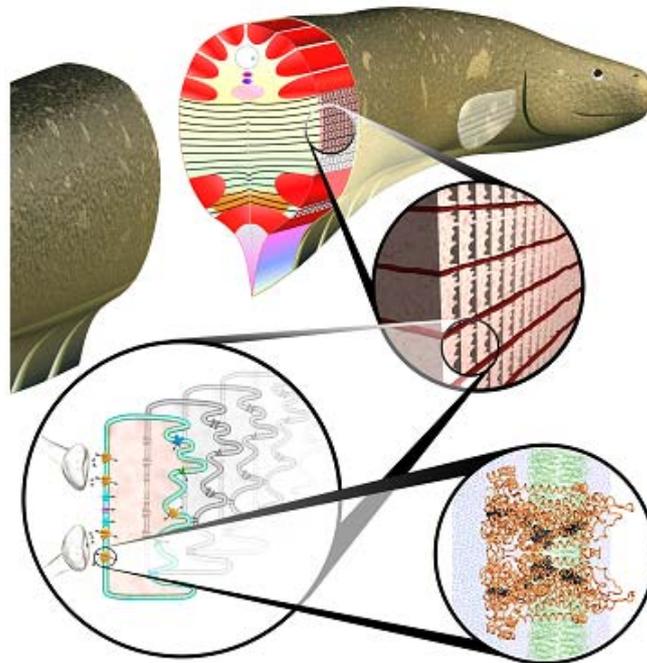
La fibre est maintenant pliée à 180° , comme sur la figure ci-dessous.



9. On considère le rayon arrivant sous incidence normale au point I de la face d'entrée de la fibre, c'est-à-dire le rayon confondu avec l'axe de la fibre dans la partie rectiligne. Déterminer la valeur minimale de b , en fonction de a , n_1 et n_2 , pour que ce rayon soit totalement réfléchi dans la partie coudée.

3 Le gymnote

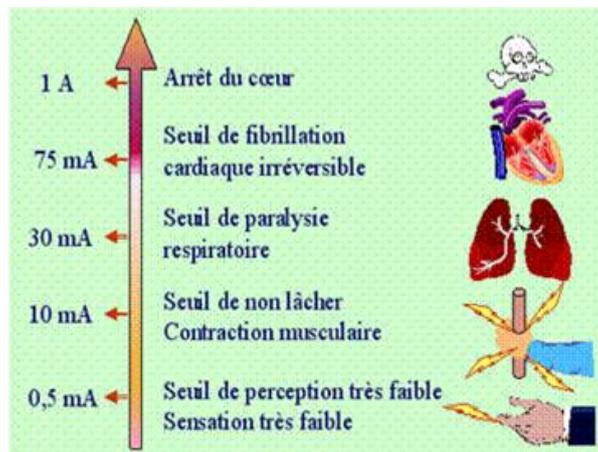
Le gymnote, ou anguille électrique, est un poisson d'eau douce d'Amérique, disposant d'organes électriques, qui peuvent produire une décharge électrique. En se propageant dans l'eau, ces décharges permettent au poisson de localiser et d'immobiliser ces proies.



L'unité structurale de base des organes électriques est l'électroplaque. Chaque électroplaque est assimilable à une minuscule pile pouvant être modélisée par un générateur de Thévenin, de force électromotrice 150 mV et de résistance interne $0,25 \Omega$. Chez le gymnote, les électroplaques, entourées par une sorte de gelée, sont groupées en 200 prismes, comprenant chacun 2000 électroplaques associées en série. Les prismes s'associent ensuite en parallèle pour constituer les organes électriques.

10. Déterminer la force électromotrice $E_{\text{éq}}$ et la résistance interne $r_{\text{éq}}$ du modèle de Thévenin équivalent à l'association série de deux générateur de Thévenin de même force électromotrice E et de même résistance interne r .
11. Déterminer la force électromotrice $E'_{\text{éq}}$ et la résistance interne $r'_{\text{éq}}$ du modèle de Thévenin équivalent à l'association parallèle de deux générateur de Thévenin de même force électromotrice E et de même résistance interne r .

Dans l'eau le corps humain se comporte comme une résistance $R \simeq 300 \Omega$. Le document ci-dessous montre l'effet d'un courant électrique sur le corps humain, en fonction de son intensité.



12. Un gymnote peut-il produire un courant suffisant pour tuer un être humain ? On explicitera clairement la démarche.
13. Justifier que le gymnote ne s'électrocute pas lui-même.

4 Le boroscope

Un boroscope est un appareil d'optique utilisé permettant l'observation, sous faible grossissement, de cavités et de conduits. Les boroscopes se retrouvent dans de nombreuses applications médicales ou industrielles. Le tube du boroscope comporte un objectif, un système optique transportant l'image objective et un oculaire. La lumière nécessaire à l'observation est conduite jusqu'à l'objet par un guide de lumière parallèle au tube boroscopique.



Dans l'intégralité du problème, l'axe optique est orienté dans le sens de propagation de la lumière (de gauche à droite). Les objets et images perpendiculaires à l'axe optique sont mesurés algébriquement sur l'axe orienté vers le haut de la page. Les angles des rayons avec l'axe principal sont évalués algébriquement, comptés positivement dans le sens trigonométrique. On supposera les conditions de Gauss vérifiées et les angles petits dans l'ensemble du problème.

4.1 Objectif et oculaire

On assimile l'objectif à une lentille mince convergente \mathcal{L}_{ob} , de distance focale $f'_{ob} = 10,0$ mm. L'objet AB (réel) assimilé à un segment de droite perpendiculaire à l'axe optique (A sur l'axe), est placé, pour les conditions standard d'utilisation, à $50,0$ mm du centre optique O_{ob} de \mathcal{L}_{ob} .

14. Déterminer la position $\overline{O_{ob}A'}$ de l'image A' de A donnée par l'objectif.
15. Calculer le grandissement transversal γ_{ob} de l'objectif.

L'image $A'B'$ est observée à travers un oculaire assimilé à une lentille mince convergente \mathcal{L}_{oc} de centre optique O_{oc} et de distance focale $f'_{oc} = 20,0$ mm. L'observation est réalisée par un utilisateur emmétrope.

16. Où l'image $A'B'$ par l'objectif doit-elle se former par rapport à l'oculaire pour que l'utilisateur puisse observer sans fatigue visuelle?
17. Sur un schéma, à l'échelle 1 : 1, et en prenant $AB = 2$ cm, construire l'image $A''B''$ de l'objet AB par le système {objectif + oculaire} en faisant figurer également l'image intermédiaire $A'B'$.

On note α le diamètre apparent de l'objet AB placé à une distance $d_m = 25,0$ cm de l'œil et α' le diamètre apparent de l'image $A''B''$ par le système {objectif + oculaire}. On définit alors le grossissement commercial du système par $G_c = \frac{\alpha'}{\alpha}$.

18. Comment s'appelle le point situé à la distance d_m de l'œil? En quoi est-il pertinent d'évaluer le diamètre apparent de l'objet AB en ce point?
19. Exprimer algébriquement α en fonction de d_m et \overline{AB} .
20. Exprimer algébriquement α' en fonction de \overline{AB} , f'_{oc} et γ_{ob} .
21. Exprimer, puis calculer, le grossissement commercial G_c de l'appareil.

4.2 Transport de l'image donnée par l'objectif

Pour augmenter la distance entre l'objet et l'oculaire, on intercale une association de lentilles entre l'objectif et l'oculaire. L'image $A'B'$ fournie par l'objectif est d'abord reprise par une lentille mince convergente de centre O_1 , de distance focale image f' , placée à une distance $\overline{A'O_1} = 2f'$ derrière A' , qui en donne une image A_1B_1 .

22. Déterminer la position $\overline{O_1A_1}$ de l'image A_1B_1 , et sa taille $\overline{A_1B_1}$. On posera $y = \overline{A'B'}$ pour alléger les notations.

On utilise une série de k lentilles identiques à la précédente, de centres optiques $O_1, O_2, \dots, O_n, O_{n+1}, \dots, O_k$, équidistants : $O_n O_{n+1} = 4f'$. L'image obtenue après passage de la lumière à travers l'objectif et les n premières lentilles est notée $A_n B_n$, avec $n \in \llbracket 1, k \rrbracket$.

23. Exprimer $y_n = \overline{A_n B_n}$ en fonction de y et n .
24. On note α_{n-1} l'angle formé entre l'horizontale et le rayon quelconque issu de B_{n-1} représenté sur la figure en annexe. Sur cette même annexe – à rendre avec votre copie – représenter la marche de ce rayon à travers les deux lentilles en faisant figurer l'angle α_n correspondant à l'angle formé entre l'horizontale et le rayon émergent de la lentille \mathcal{L}_n ainsi que les images intermédiaires $A_n B_n$ et $A_{n+1} B_{n+1}$.
25. Calculer l'angle α_n en fonction de α_{n-1} , y_{n-1} et f' .
26. Montrer que l'angle α_k du rayon sortant du système des k lentilles et qui provient de B' où il faisait l'angle α_0 avec l'axe optique, vaut

$$\alpha_k = (-1)^k \left(\alpha_0 + k \frac{y}{f'} \right)$$

27. Sachant que les lentilles ont toutes le même diamètre, quel est l'inconvénient de ce dispositif de transport de l'image ?

On remplace le dispositif précédent par une série de $2k$ lentilles convergentes identiques, de distance focale f' , telles que le foyer image de l'une soit confondu avec le foyer objet de la suivante.

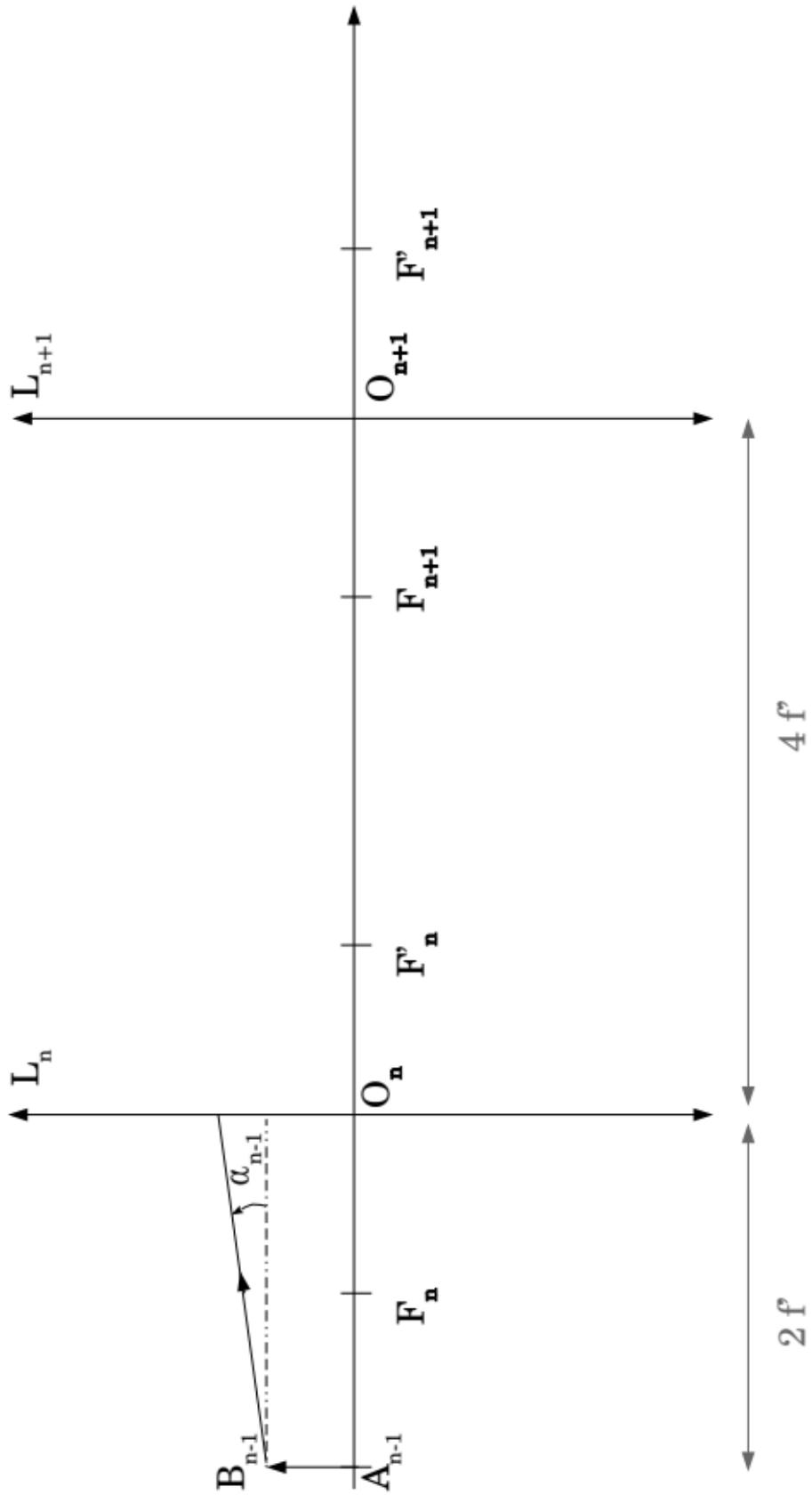
Le foyer objet F_1 de la première lentille est placé en A' . On note $A_1 B_1$ l'image de $A'B'$ donnée par les deux premières lentilles.

28. Faire un schéma donnant la marche d'au moins 3 rayons passant par B' , allant en B_1 en traversant les deux premières lentilles. Où se situe l'image $A_1 B_1$? Que vaut le grandissement ? Exprimer α_1 en fonction de α_0 . Ce dispositif remédie-t-il au problème de la question 27 ?

On utilise 30 lentilles semblables ($k = 15$) de distance focale $f' = 15,0$ mm.

29. Sur quelle longueur est transportée l'image par cette association ? Y a-t-il une inversion dans l'observation à travers l'appareil ?

Annexe à rendre avec la copie



Correction du DS n° 1

1 Échauffement

1. L'ARQS consiste à négliger la durée de propagation des ondes électromagnétiques dans le circuit devant la durée caractéristique de variation d'un signal.

2. $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{50 \text{ Hz}} = 6 \times 10^6 \text{ m}.$

$L = 1 \times 10^5 \text{ m} \ll \lambda$ donc l'ARQS est vérifiée.

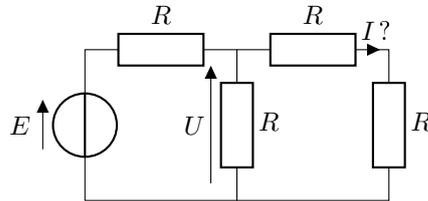
3. (a) $E = [R + (R \parallel R)]I$ avec $R + (R \parallel R) = R + \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \frac{3}{2}R$, d'où $I = \frac{2E}{3R}$

(b) $U = R \parallel (R + R)J = \frac{J}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R+R}}$ donc $U = \frac{2}{3}RJ$

(c) Diviseur de tension : $U = \frac{R \parallel R}{R + (R \parallel R)} E$ avec $R \parallel R = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}}$, d'où $U = \frac{E}{5}$

(d) Diviseur de courant : $I = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R+R}} J$, d'où $I = \frac{3}{4}J$

(e)



Diviseur de tension : $U = \frac{R \parallel (R+R)}{R + R \parallel (R+R)} E = \frac{2}{5} E$

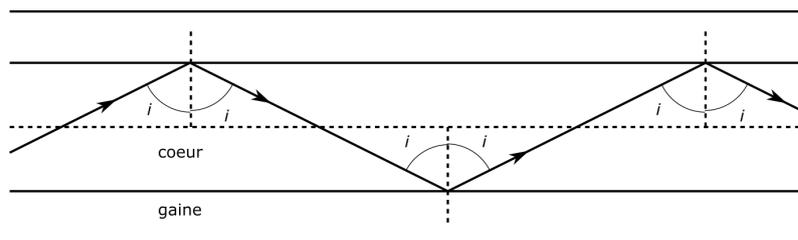
Or $U = (R + R)I$, donc $I = \frac{E}{5R}$

2 La fibre optique à saut d'indice

4. Le rayon est guidé dans le cœur s'il y a réflexion totale sur la gaine, c'est-à-dire si $\frac{n_1}{n_2} \sin(i) > 1$, c'est-à-dire

si $i > \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = i_c$

5. D'après la loi de la réflexion, le rayon réfléchi arrive avec le même angle d'incidence i sur la gaine et subit donc une nouvelle réflexion totale. Le rayon est ainsi guidé dans le cœur par réflexions totales successives.



6. La loi de la réfraction à l'entrée de la fibre s'écrit : $n_0 \sin(\theta) = n_1 \sin(r)$.

Or $r = \frac{\pi}{2} - i$, donc $n_0 \sin(\theta) = n_1 \cos(i)$

Il y a réflexion totale sur la gaine si $\sin(i) > \frac{n_2}{n_1}$

Or $\cos(i) = \sqrt{1 - \sin^2 i}$ ($i \in [0, \frac{\pi}{2}]$ donc $\cos(i) \geq 0$).

La condition de réflexion totale devient :

$$\sqrt{1 - \sin^2 i} < \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}, \text{ (car la fonction } x \mapsto \sqrt{1 - x^2} \text{ est décroissante sur } \mathbb{R}_+)$$

c'est-à-dire $n_0 \sin(\theta) < n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$

c'est-à-dire $\theta < \arcsin\left(\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}\right) = \theta_c$

7. La distance parcourue par un rayon faisant un angle i avec la normale est $d = \frac{L}{\sin i}$.

La distance minimale, correspondant à $i = \frac{\pi}{2}$, est $d_{\min} = L$.

La distance maximale, correspondant à $i = i_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$, est $d_{\max} = \frac{n_1 L}{n_2}$.

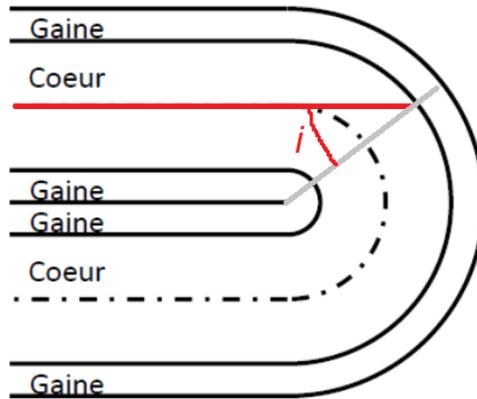
En sortie de la fibre, à cause de la dispersion intermodale, les impulsions sont élargies de $\Delta t = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{v_1}$,

où $v_1 = \frac{c}{n_1}$ est la vitesse de propagation de la lumière dans le cœur, d'où $\Delta t = \frac{n_1 L}{c} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1\right)$.

Les impulsions successives ne se recouvrent pas si $\Delta t < T$, c'est-à-dire $f < \boxed{\frac{c}{n_1 L \left(\frac{n_1}{n_2} - 1\right)}} = f_{\max}$.

8. $f_{\max} \rightarrow 0$ quand $L \rightarrow +\infty$, donc pour transmettre des débits importants sur de longues distances, il faut utiliser des fibres ne présentant pas de dispersion intermodale.

9.

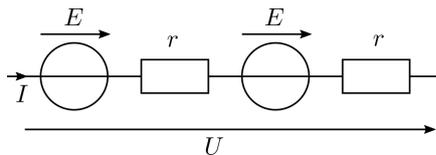


L'angle d'incidence sur la gaine vérifie $\sin(i) = \frac{b}{b+a}$.

Il y a réflexion totale si $\sin i > \frac{n_2}{n_1}$, donc si $\frac{b}{b+a} > \frac{n_2}{n_1}$, c'est-à-dire si $\boxed{b > \frac{n_2 a}{n_1 - n_2}}$

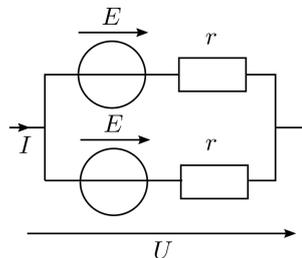
3 Le gymnote

10.



On a $U = 2E - 2rI$. On identifie $\boxed{E_{\text{éq}} = 2E \text{ et } r_{\text{éq}} = 2r}$.

11.

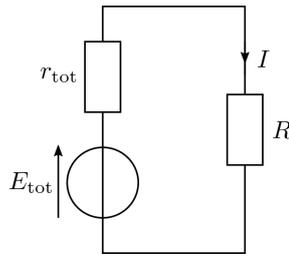


Par symétrie, l'intensité dans chaque branche est $I/2$

On a $U = E - r \frac{I}{2}$. On identifie $\boxed{E'_{\text{éq}} = E \text{ et } r'_{\text{éq}} = \frac{r}{2}}$.

12. Chaque prisme constitué de 2000 électroplaques en série est équivalent à un modèle de Thévenin de fem $E_{\text{prisme}} = 2000E$ et de résistance interne $r_{\text{prisme}} = 2000r$.

L'ensemble des organes électriques constitué de 200 prismes en parallèle est équivalent à un modèle de Thévenin de fem $E_{\text{tot}} = E_{\text{prisme}} = 300 \text{ V}$ et de résistance interne $r_{\text{tot}} = \frac{r_{\text{prisme}}}{200} = 10r = 2,5 \Omega$.



D'après la loi des mailles : $E_{\text{tot}} - r_{\text{tot}}I - RI = 0$ donc

$$I = \frac{E_{\text{tot}}}{R + r_{\text{tot}}}$$

$R \gg r_{\text{tot}}$ donc $I \simeq E_{\text{tot}}/R = 1 \text{ A}$.

D'après le doc c'est l'ordre de grandeur de l'intensité nécessaire pour tuer un être humain.

13. L'intensité du courant dans une cellule du gymnote est l'intensité circulant dans un prisme d'électroplaques. L'intensité $I = 1 \text{ A}$ se répartit entre les 200 prismes en parallèle, donc chaque prisme est parcouru par une intensité de $\frac{1}{200} \text{ A} = 5 \text{ mA}$. C'est pourquoi le gymnote ne s'électrocute pas lui-même.

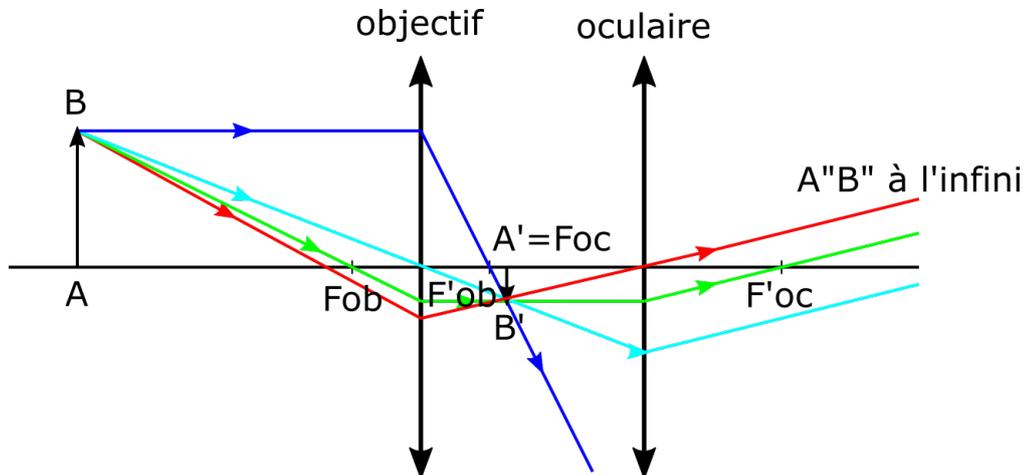
4 Le boroscope

14. Relation de conjugaison : $\frac{1}{O_{\text{ob}}A'} - \frac{1}{O_{\text{ob}}A} = \frac{1}{f'}$, avec $\overline{O_{\text{ob}}A} = -50 \text{ mm}$ et $f' = 10 \text{ mm}$

Donc $\overline{O_{\text{ob}}A'} = \frac{f'O_{\text{ob}}A}{f' + O_{\text{ob}}A}$, soit $\overline{O_{\text{ob}}A'} = 12,5 \text{ mm}$

15. $\gamma_{\text{ob}} = \frac{\overline{O_{\text{ob}}A'}}{\overline{O_{\text{ob}}A}} = -0,25$

16. L'image intermédiaire $A'B'$ doit se former dans le plan focal objet de l'oculaire, pour que son image par l'oculaire se forme à l'infini et puisse être observée sans accommodation.
17. (Le schéma n'est pas à l'échelle.)



18. Le point situé à d_m de l'œil s'appelle le punctum proximum. C'est le point le plus proche sur lequel l'œil parvient à accommoder, donc c'est en ce point qu'on obtient le diamètre apparent le plus grand pour une observation à l'œil nu.

19. $\alpha \approx \tan \alpha = -\frac{\overline{AB}}{d_m}$

20. D'après le schéma, $\alpha' \approx \tan \alpha' = -\frac{\overline{A'B'}}{f'_{\text{oc}}}$, or $\gamma_{\text{ob}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$, donc $\alpha' = -\frac{\gamma_{\text{ob}}\overline{AB}}{f'_{\text{oc}}}$

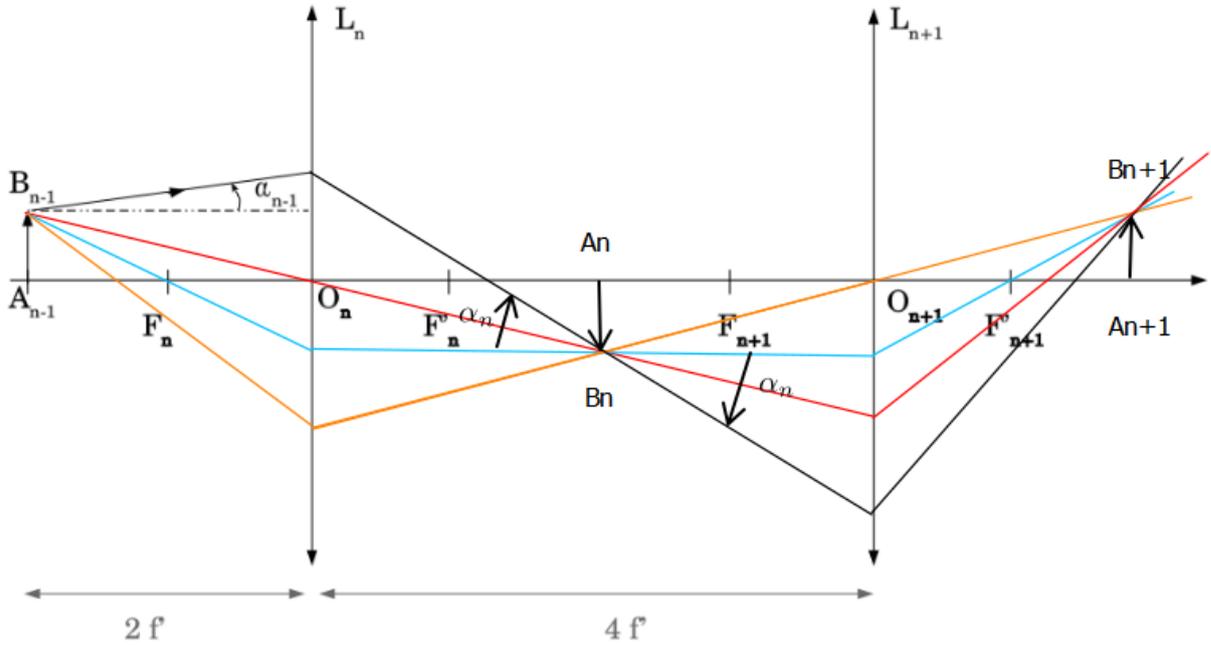
21. Ainsi, $G_c = \gamma_{\text{ob}} \frac{d_m}{f'_{\text{oc}}} = -\frac{5}{16}$. Cette valeur paraît faible, mais le boroscope sert a priori à observer des objets à moins de 5 cm de l'objectif. Dans ce cas γ_{ob} est beaucoup plus grand.

22. Relation de conjugaison : $\frac{1}{O_1A_1} - \frac{1}{O_1A'} = \frac{1}{f'}$, d'où $\overline{O_1A_1} = 2f'$.

$\gamma_1 = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{A'B'}} = \frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A'}} = -1$, d'où $\overline{A_1B_1} = -y$

23. Chaque image intermédiaire est située à $2f'$ de la lentille suivante, donc le grandissement de chaque lentille est -1 . On en déduit $y_n = (-1)^n y$.

24.



25. Attention aux signes : $\alpha_{n-1} > 0$ et $\alpha_n < 0$ sur le schéma.

$$\tan(\alpha_n) = -\frac{2y_{n-1} + 2f' \tan(\alpha_{n-1})}{2f'}, \text{ donc } \alpha_n \approx -\alpha_{n-1} - \frac{y_{n-1}}{f'}$$

26. $y_{n-1} = (-1)^{n-1} y$ donc $\alpha_n = -\alpha_{n-1} + (-1)^n \frac{y}{f'}$.

On suppose que $\alpha_{n-1} = (-1)^{n-1} (\alpha_0 + (n-1) \frac{y}{f'})$. On a alors, d'après la relation de récurrence précédente :

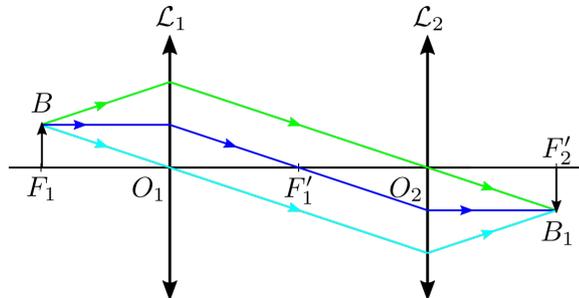
$$\begin{aligned} \alpha_n &= -\alpha_{n-1} + (-1)^n \frac{y}{f'} \\ &= -(-1)^{n-1} (\alpha_0 + (n-1) \frac{y}{f'}) + (-1)^n \frac{y}{f'} \\ &= (-1)^n (\alpha_0 + n \frac{y}{f'}) \end{aligned}$$

Ainsi, par récurrence : $\forall k, \alpha_k = (-1)^k (\alpha_0 + k \frac{y}{f'})$

27. α_n augmente avec n , donc une grande partie des rayons lumineux est perdue après un grand nombre de lentilles, d'où une perte importante de luminosité.

28. $A' \equiv F_1 \xrightarrow{\mathcal{L}_1} A_1' \xrightarrow{\text{à l'infini}} A_1 \equiv F_2'$

L'image A_1B_1 par les deux premières lentilles se trouve dans le plan focal image de la deuxième lentille.



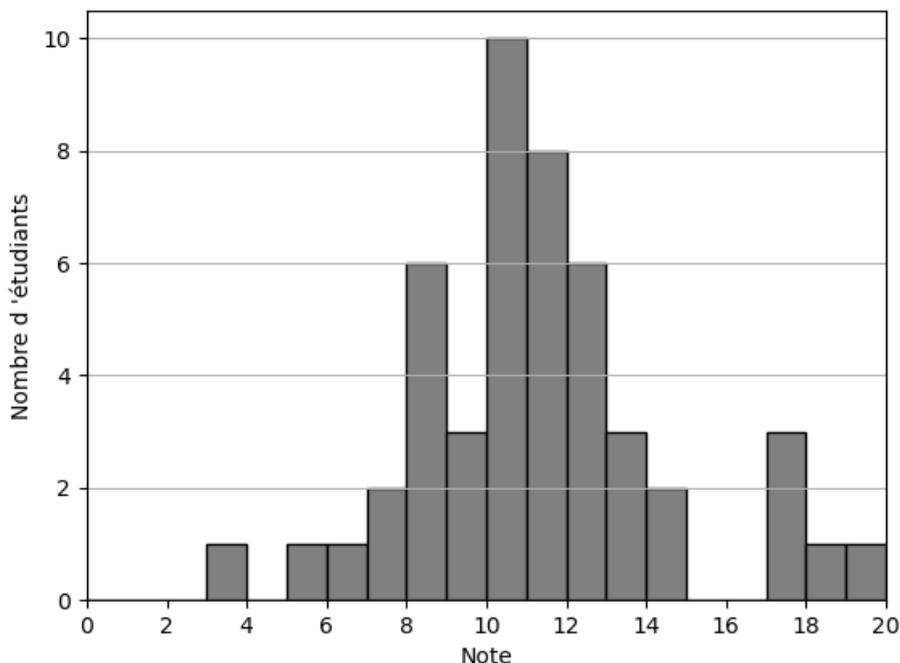
L'image A_1B_1 est le symétrique de $A'B'$ par rapport à F_1' . On a donc $\gamma = -1$ et $\alpha_1 = -\alpha_0$. Ainsi les rayons qui passent à travers la première lentille passent à travers toutes les lentilles, ce qui remédie au problème de la question 27.

29. Chaque couple de lentille transporte l'image sur la distance $4f'$, donc la longueur totale est $k \times 4f' = 0,9$ m. Il y a inversion de l'image à chaque couple de lentille, donc le transport par les 30 lentilles renverse l'image, mais comme l'objectif renverse également l'image, l'image de l'objet à travers le boroscope est droite.

Commentaires du DS n° 1 de Physique-Chimie

Moyenne : 11,2/20

Max : 20/20



Il est vain d'apprendre par cœur un raisonnement sans l'avoir préalablement compris. La seule voie possible est de s'efforcer de bien comprendre chaque étape, la mémorisation suivra alors naturellement.

1. Les phrases du genre : « L'ARQS consiste à négliger la vitesse des ondes électromagnétiques devant la taille du circuit » n'ont pas de sens : on ne peut comparer que des grandeurs homogènes.
2. Le plus important dans une application numérique, c'est l'unité ! Par ailleurs, évitez de mélanger les lettres et les valeurs numériques dans une même équation, car cela pose un problème d'homogénéité.

Bien que correcte d'un point de vue logique, la rédaction suivante n'est pas très élégante :

$$\begin{aligned} \text{ARQS valable} &\Leftrightarrow L \ll \lambda \\ &\Leftrightarrow L \ll \frac{c}{f} \\ &\Leftrightarrow 10^5 \text{ m} \ll 6 \times 10^6 \text{ m} \end{aligned}$$

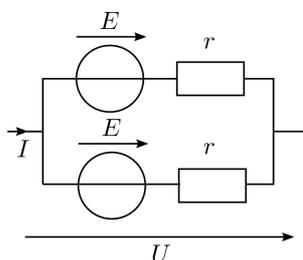
C'est vrai, donc l'ARQS est bien valable...

La meilleure rédaction est la plus simple :

$$\begin{aligned} L &= 10^5 \text{ m} \\ \lambda &= \frac{c}{f} = 6 \times 10^6 \text{ m} \end{aligned}$$

$L \ll \lambda$, donc l'ARQS est valable

3. La tension aux bornes d'une source de courant est inconnue, et *a priori* non nulle.
6. $\cos^2(i) = 1 - \sin^2(i)$ n'est pas équivalent à $\cos(i) = \sqrt{1 - \sin^2(i)}$, mais à $\cos(i) = \pm \sqrt{1 - \sin^2(i)}$. De manière générale, à moins que vous n'ayez vraiment besoin de démontrer une équivalence, évitez l'utilisation du symbole \Leftrightarrow à tout bout de champ.
10. Il ne faut pas considérer le dipôle formé par l'association des 2 modèles de Thévenin, en court-circuit.
- 11.



Ici, les deux résistances r ne sont pas parallèle : elles n'ont pas les mêmes bornes, à cause des sources.¹

On ne peut donc pas appliquer la formule du diviseur de courant.

La seule méthode au programme de MPSI pour identifier un modèle de Thévenin équivalent est d'établir la loi de comportement $u(i)$ aux bornes du dipôle, pour tout u ou i .

13. Les couches de gelée entre les plaques sont parallèles aux prismes d'électroplaques : elles n'empêchent pas les porteurs de charges de circuler. Elles séparent simplement les différentes branches de l'association des prismes en parallèle.
16. « Les rayons doivent ressortir à l'infini » ne veut rien dire. C'est l'image qui doit être à l'infini.
17. Ne pas oublier de flécher les rayons.
19. Les angles doivent être orientés. Attention au signe!

1. Il est vrai qu'en utilisant le théorème de superposition, on peut montrer que la résistance de sortie du modèle de Thévenin équivalent, est la résistance équivalente au dipôle quand on éteint les sources, mais ce théorème est hors programme.