Physique - DS2

17/10/2026

1 Observation de plumes d'oiseau au microscope (CCINP TPC 2023)

Afin de déterminer l'origine physique de cette couleur bleue, on observe une partie AB d'une plume de perruche à l'aide d'un microscope optique.

Pour cela, on dispose :

— d'une première lentille, L_1 (centre O_1, distance focale $f'_1 = 1{,}2\,\text{cm}$), qui porte le nom d'objectif ;

— d'une deuxième lentille, L_2 (centre O_2, distance focale $f'_2 = 2{,}0\,\text{cm}$), qui porte le nom d'oculaire.

La distance qui sépare le foyer image F'_1 de l'objectif et le foyer objet F_2 de l'oculaire est appelée intervalle optique, noté Δ, avec ici $\Delta = 16\,\text{cm}$ (figure 2).

L'observation se fait à l'aide d'un oeil emmétrope (oeil à vision normale) situé derrière l'oculaire.

On se placera pour toute la suite dans les conditions de Gauss et dans l'approximation des petits angles. On note h la taille de l'objet AB observé.

1. *Afin que l'observation puisse s'effectuer sans fatigue visuelle pour l'oeil emmétrope, où doit être située l'image finale A_2 en sortie de L_2 ? Dans quel plan se situe donc l'image intermédiaire A_1B_1 ?*

   On a le schéma synoptique suivant :

   $$A \overset{(L_1)}{\rightarrow} A_1 \overset{(L_2)}{\rightarrow} A_2$$

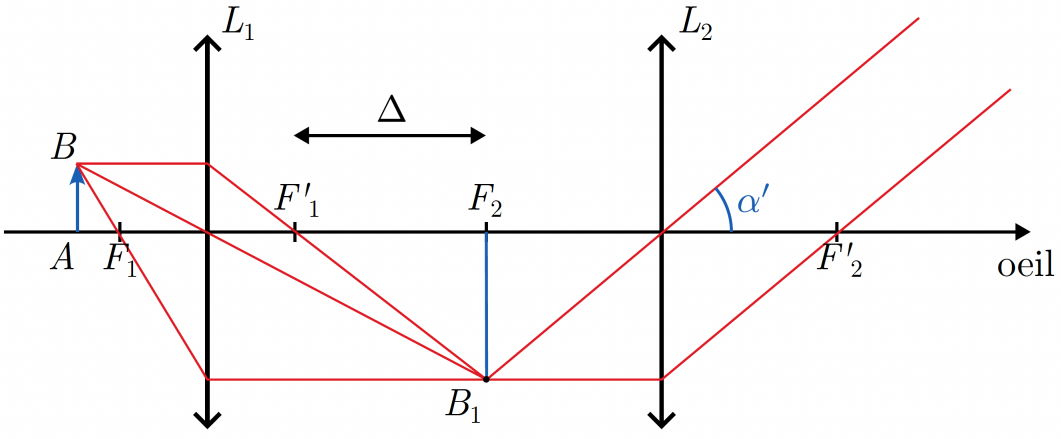
   Pour qu'un oeil émmetrope observe sans fatigue visuelle, il faut qu'il observe un objet à l'infini. Ainsi, A_2 est à l'infini et $\boxed{A_1 = F_2}$.

   L'image intermédiaitre (A_1B_1) se trouve donc dans le plan focal objet de la lentille 2.

2. *Reproduire sur la copie le schéma du microscope et tracer le chemin de deux rayons lumineux passant par l'extrémité B de l'objet, l'un parallèle à l'axe et l'autre passant par O_1. Faire apparaître sur ce schéma :*

   — *l'image intermédiaire A_1B_1 ;*

   — *le diamètre angulaire α' de l'image finale vue par l'oeil.*



3. *Exprimer, en fonction de Δ et f_1' le grandissement transversal de l'objectif défini par $\gamma_1 = \dfrac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}}$*

   D'après la formule conjugaison de Newton, on a

$$\gamma_1 = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{F_1'A_1}}{-f_1'} = \frac{\overline{F_1'F_2}}{-f_1'} \Leftrightarrow \boxed{\gamma_1 = -\frac{\Delta}{f_1'}}$$

4. *En déduire l'expression du diamètre angulaire α' de l'image vue par l'observateur au travers du microscope en fonction de f_1', f_2', h et de Δ.*

   On a dans l'approximation des petits angles $\alpha' \approx \tan\alpha'$ soit

$$\alpha' = \frac{A_1B_1}{f_2'}$$

   Or, $A_1B_1 = AB \times |\gamma_1| = h \times \dfrac{\Delta}{f_1'}$

   Ainsi, on a $\boxed{\alpha' = \dfrac{h\Delta}{f_1'f_2'}}$

   En l'absence de dispositif, l'oeil voit net un objet situé à une distance comprise entre d_m et d_M, avec $d_m < d_M$.

5. *Quels noms donne-t-on aux points objets correspondant à ces distances ? Donner une valeur à d_m et d_M pour un oeil emmétrope.*

   Le point situé à une distance d_m s'appelle le ponctum proximum et le point situé à une distance d_M le ponctum remotum.

   Pour un oeil émmetrope, d_M est infinie et $d_m = 0,25$ m.

6. *Déterminer le diamètre angulaire α de l'objet AB vu sans instrument et situé à une distance d_m de l'oeil (figure 3).*

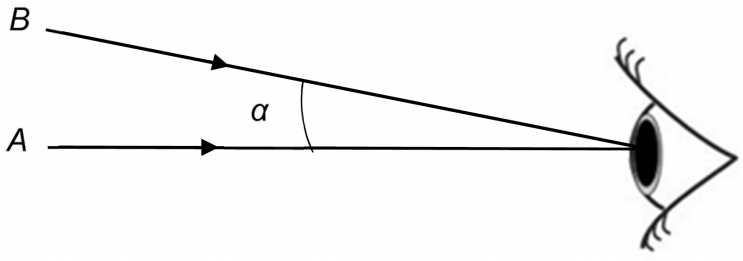


Figure 3 - Diamètre ou distance angulaire

   D'après l'approximation des petits angles, on a $\alpha \approx \tan\alpha$ soit $\boxed{\alpha = \dfrac{h}{d_m}}$

7. *En déduire que la grandeur $G_C = \frac{\alpha'}{\alpha}$, appelée grossissement commercial du microscope, s'écrit :*

$$G_C = \frac{d_m\Delta}{f_1'f_2'}.$$

   Faire l'application numérique avec $d_m = 25\,\text{cm}$.

On a $G_c = \dfrac{\alpha'}{\alpha} = \dfrac{h\Delta}{f_1' f_2'} \times \dfrac{d_m}{h} = \frac{d_m \Delta}{f_1' f_2'}$

L'application numérique donne $\underline{G_c = 167}$.

8. *Un oeil peut distinguer deux images ou deux objets si la distance angulaire les séparant est supérieure à la limite de résolution angulaire de l'oeil $\varepsilon = 1'$ (une minute d'arc $= 1/60°$). Déterminer quelle sera la distance angulaire minimale α_m entre ces deux objets qaund ils seront observés au travers de ce microscope.*

   Si les objets sont séparés d'une distance angulaire $\alpha = \varepsilon$, en sortie du microscope ils seront séparés d'une distance angulaire $\alpha' = \varepsilon \times G_c$. Ainsi, $\boxed{\alpha_m = \varepsilon \times G_c}$

   L'application numérique donne $\underline{\alpha_m = 2,8°}$.

   L'image d'une partie d'une plume est donnée ci-après (photo 3).

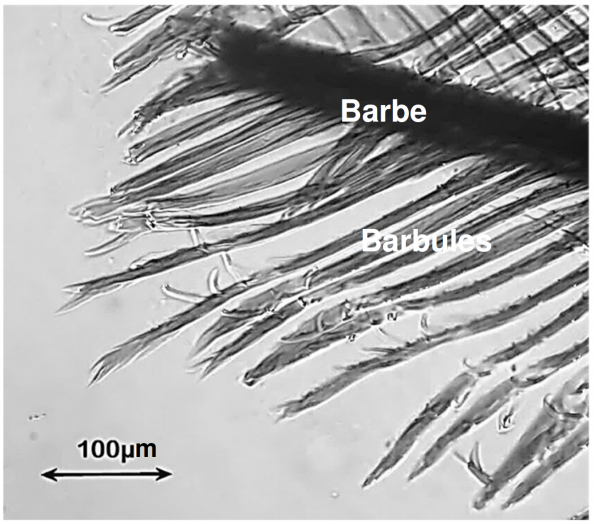


Photo 3 - Image d'une plume de perruche à l'aide d'un dispositif non précisé

9. *Par mesure sur la photo 3, donner une estimation de la distance entre deux crochets situés au bout des barbules.*

   D'après l'échelle de la photo, on voit que la distance entre 2 crochets est de l'ordre de 30 μm.

10. *On rappelle que la résolution angulaire de l'oeil nu est $\varepsilon = 1'$. Ces crochets peuvent-ils être distingués directement sans instrument ? Pourront-ils être distingués avec le microscope utilisé précédemment ?*

    Sans instrument, ces deux crochets sont séparés d'une distance angulaire $\alpha = h/d_m = \dfrac{30.10^{-6}}{0,25} = 1,2.10^{-4}$ rad soit $7.10^{-3°}$.

    Or, $\varepsilon = 1/60° = 0,02°$.

    On a donc $\boxed{\alpha < \varepsilon}$ et les crochets $\underline{\text{ne peuvent pas être distingués à l'oeil nu}}$.

    Si on les regarde au miscroscope, ils sont vus avec une séparation angulaire $\alpha' = G_c \alpha \approx 0,02$ rad, soit $1,1° > \varepsilon$.

    $\boxed{\alpha' > \varepsilon}$: $\underline{\text{On peut donc distinguer les crochets avec le microscope}}$ précédemment étudié.

2 Réfractomètre de Pfulrich (adapté de Agrégation interne 2021)

Le réfractomètre de Pulfrich (voir figure 2) est un dispositif optique qui permet de mesurer l'indice de réfraction n d'un liquide. Il est composé d'un cube de verre, d'indice de réfraction n_0 connu, sur lequel on dépose une goutte (supposée hémisphérique) du liquide d'indice à déterminer. Lorsque de la lumière issue de la goutte liquide pénètre dans le bloc par la face horizontale, l'observation des rayons émergeant du cube (sous certaines conditions à étudier) permet d'accéder à l'indice n cherché.

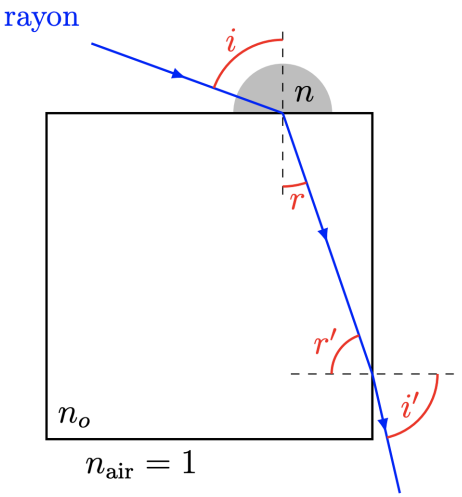


FIGURE 2 – Schéma optique du réfractomètre de Pulfrich

Note : dans ce qui suit, les angles sont non-orientés et compris entre 0 *et* $\pi/2$.

1. *Rappeler les lois de Snell-Descartes pour la réflexion et pour la réfraction.*

   Lois pour la réflexion :

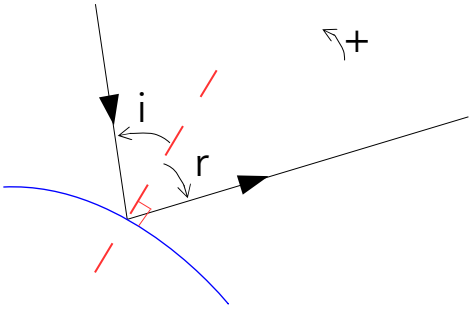
   — Le rayon réfléchi se trouve dans le plan d'incidence

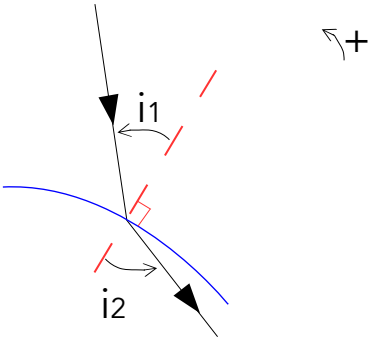
   — $r = -i$ (cf schéma de gauche)

   Lois pour la réfraction :

   — Le rayon réfracté trouve dans le plan d'incidence

   — $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ (cf schéma de droite)





2. *Définir le phénomène de réflexion totale.*

Le phénomène de réflexion totale peut se produire lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent.

Si l'angle d'incidence est supérieur à une angle limite appelé angle limite de réflexion totale, alors il n'existe pas de rayon réfracté et toute la lumière est réfléchie, d'où le nom de réflexion totale.

3. *Donner une relation entre r et r', puis entre i et r'.*

On note I le point d'incidence sur le dioptre n/n_0, J le point d'incidence sur le dioptre n_0/air, et K le point d'intersection des normales aux deux dioptres.

Dans le triangle IJK, on a $r + r' + \dfrac{\pi}{2} = \pi$ soit $\boxed{r + r' = \dfrac{\pi}{2}}$

D'après la loi de la réfraction sur le dioptre n/n_0, on a $n \sin i = n_0 \sin r$

Ainsi, avec la première relation, on a $n \sin i = n_0 \sin(\dfrac{\pi}{2} - r') = n_0 \cos r'$, d'où $\boxed{\sin i = \dfrac{n_0}{n} \cos r'}$

4. *En déduire qu'un rayon peut sortir du réfractomètre à condition que l'angle d'incidence i soit supérieur à une valeur minimale i_m définie par :* $\sin i_m = \dfrac{1}{n}\sqrt{n_0^2 - 1}$

Pour qu'il n'y ait pas réflexion totale sur le dioptre n_0/air, il faut que r' soit inférieur à i_l avec i_l tel que

$$n_0 \sin i_l = 1 \times \sin \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow \boxed{i_l = \arcsin(\frac{1}{n_0})}$$

Or, si $r' < i_l$, on a $\dfrac{\pi}{2} - r' > \dfrac{\pi}{2} - i_l$ soit $r > \dfrac{\pi}{2} - i_l$

On a donc $\sin r > \sin(\dfrac{\pi}{2} - i_l)$ car la fonction sinus est croissante sur l'intervalle de définition des angles étudiés.

Ainsi, $\sin r > \cos i_l$

Or, $\cos i_l = \sqrt{1 - \sin^2 i_l} = \sqrt{1 - \dfrac{1}{n_0^2}}$

On a donc $\sin r > \sqrt{1 - \dfrac{1}{n_0^2}} \Leftrightarrow n_0 \sin r > \sqrt{n_0^2 - 1}$

Or, $n_0 \sin r = n \sin i$, d'où $n \sin i > \sqrt{n_0^2 - 1}$

On a donc $i > i_m$ avec i_m vérifiant $\boxed{n \sin i_m = \sqrt{n_0^2 - 1} \Leftrightarrow \sin i_m = \dfrac{1}{n}\sqrt{n_0^2 - 1}}$

5. *Quelle contrainte est imposée sur l'indice n_0 du cube en verre vis-à-vis de l'indice n pour être certain que le rayon puisse sortir du cube ? Interpréter physiquement.*

On a $\sin i > \dfrac{1}{n}\sqrt{n_0^2 - 1}$

Or, $\sin i \leq 1$, donc si $\dfrac{1}{n}\sqrt{n_0^2 - 1} > 1$, il n'existe aucune solution à cette inégalité et aucun des rayons ne pourra ressortir du cube de verre.

On doit donc avoir

$$\frac{1}{n}\sqrt{n_0^2 - 1} < 1 \Leftrightarrow \sqrt{n_0^2 - 1} < n$$

$$\Leftrightarrow n_0^2 - 1 < n^2 \Leftrightarrow n_0^2 < n^2 + 1 \Leftrightarrow \boxed{n_0 < \sqrt{n^2 + 1}}$$

Physiquement, il ne faut pas que l'indice n_0 soit trop fort, sinon le rayon se rapproche trop de la normale lors du passage du premier dioptre, et il arrive alors forcément avec un angle supérieur à i_l sur le second dioptre.

Plus précisément, cela provient du fait que l'on veut $r' < i_l$, soit $r > \frac{\pi}{2} - i_l$ avec r inférieur à l'angle de réfraction maximale sur le premier dioptre, dont on peut montrer qu'il vaut $r_{max} = \arcsin \frac{n}{n_0}$

Ainsi, si $\frac{\pi}{2} - i_l > r_{max}$, il ne peut y avoir de solution.

On doit donc avoir

$$\sin(\frac{\pi}{2} - i_l) < \sin r_{max} \Leftrightarrow \cos i_l < \frac{n}{n_0}$$

$$\Leftrightarrow \sqrt{1 - \sin^2 i_l} < \frac{n}{n_0} \Leftrightarrow \sqrt{1 - \frac{1}{n_0^2}} < \frac{n}{n_0} \Leftrightarrow 1 - \frac{1}{n_0^2} < \frac{n^2}{n_0^2}$$

$$\Leftrightarrow n_0^2 - 1 < n^2 \Leftrightarrow n_0 < \sqrt{n^2 + 1}$$

On retrouve bien la condition précédente, obtenue par des arguments plus mathématiques.

6. *Donner une relation entre l'angle i, l'angle i' et les indices n_0 et n.*

   On a $n \sin i = n_0 \sin r = n_0 \sin(\frac{\pi}{2} - r') = n_0 \cos r' = n_0 \sqrt{1 - \sin^2 r'}$

   Or, $n_0 \sin r' = \sin i'$ d'où

$$\boxed{n \sin i = n_0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 i'}{n_0^2}}}$$

7. *A quelle condition sur i a-t-on un angle d'émergence i' minimal ?*

   Plus i' est faible, plus r' est faible, plus r est grand donc plus i est grand.

   Pour avoir i' minimal, il faut i maximal, c'est-à-dire égal à $\pi/2$.

   On note par la suite i'_m l'angle d'émergence minimal.

8. *Montrer que l'on a $n^2 = n_0^2 - \sin^2 i'_m$.*

   D'après la relation de la quesiton 6, quand $i' = i'_m$, on a $i = \pi/2$ donc

$$n = n_0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 i'_m}{n_0^2}} \Leftrightarrow \frac{n^2}{n_0^2} = 1 - \frac{\sin^2 i'_m}{n_0^2} \Leftrightarrow \boxed{n^2 = n_0^2 - \sin^2 i'_m}$$

9. *La goutte est éclairée avec une lumière diffuse et un angle $i'_m = 67,85°$ est relévé à l'aide d'un goniomètre (appareil permettant de mesurer des angles). Déterminer l'indice n du liquide sachant que le cube est en verre de type flint ($n_0 = 1,6231$).*

   L'application numérique donne $\underline{n = 1,33}$

10. *Quel pourrait être ce liquide ?*

    Cet indice correspond à celui de l'eau.

11. *La mesure est effectuée à l'aide d'une source de lumière monochromatique de longueur d'onde 589 nm. Est-il possible d'utiliser une source polychromatique ? Pourquoi ?*

Il n'est pas possible d'utiliser une source polychromatique car si n et n_0 diffèrent selon la longueur d'onde (le verre flint en particulier est dispersif), la valeur de i'_m dépendra elle aussi de la longueur d'onde.

Si la source polychromatique a un spectre continu, on ne pourra donc pas identifier i'_m (la lumière sera dispersée comme à la sortie d'un prisme).

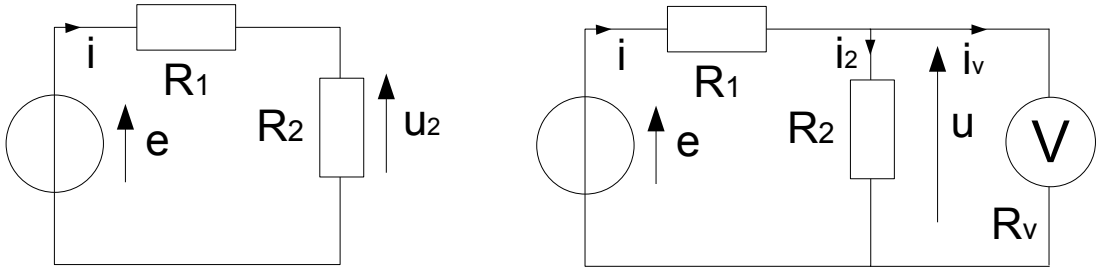
Si elle possède un spectre discret, il faudra mesurer i'_m en identifiant à quelle raie il correspond afin d'y associer une valeur précise de λ et donc de n_0 correspondante pour faire l'application numérique.

3 Mesures électriques

On s'intéresse à 2 montages électriques permettant de déterminer les résistances internes d'un ampèremètre et d'un voltmètre.

1. **Mesure de la résistance interne d'un voltmètre**

   Deux résistors, de résistances respectives R_1 et R_2 sont montés en série avec une source indépendante de tension de $f.e.m.$ e constante (figure de gauche).



   (a) *Donner, en fonction de e, R_1 et R_2, l'expression de la tension u_2 aux bornes de la résistance R_2. Comment se nomme cette relation ?*

   D'après un pont diviseur de tension, on a $\boxed{u_2 = \dfrac{R_2}{R_1 + R_2} e}$

   (b) Afin de mesurer la tension aux bornes de R_2, un voltmètre, noté V, et de résistance interne R_v est branché en dérivation (figure de droite). L'appareil indique la tension u.

   Montrer que l'expression de u peut se mettre sous la forme

$$u = \frac{e}{\frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R_v} + 1}$$

   L'association de la résistance R_2 et de la résistance R_v est équivalente à une résistance R_{eq} telle que $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_v}$

   Ainsi, en regroupant ces 2 résistances, on se retrouve dans le cas précédent d'un pont diviseur de tension et on a

$$u = \frac{R_{eq}}{R_1 + R_{eq}} e = \frac{e}{\frac{R_1}{R_{eq}} + 1}$$

$$\boxed{\Leftrightarrow u = \frac{e}{1 + \frac{R_1}{R_v} + \frac{R_1}{R_2}}}$$

(c) *On se place dans le cas où $R_1 = R_2 = 440\ k\Omega$. La f.e.m. de la source vaut $e = 3\ V$. On mesure alors $u = 1,369\ V$. Déterminer la résistance interne du voltmètre et faire l'application numérique.*

La relation précédente se simplifie : $u = \frac{e}{2+\frac{R_1}{R_v}}$, d'où

$$2 + \frac{R_1}{R_v} = \frac{e}{u} \Leftrightarrow \frac{R_1}{R_v} = \frac{e}{u} - 2 \Leftrightarrow \boxed{R_v = \frac{R_1}{\frac{e}{u} - 2}}$$

L'application numérique donne : $\underline{R_v = 2,3\ M\Omega}$.

L'ordre de grandeur est cohérent, car un voltmètre possède une grande résistance interne.

(d) *A quelle condition sur R_v le voltmètre indique-t-il une tension u identique à la valeur u_2 (tension calculée à la question 1.(a)) ? Que dire alors de la valeur de l'intensité i_v ?*

Avec le voltmètre, on avait : $u_2 = \frac{R_2}{R_1+R_2}e = \frac{e}{1+\frac{R_1}{R_2}}$

Sans le voltmètre, on avait : $u = \frac{e}{1+\frac{R_1}{R_v}+\frac{R_1}{R_2}}$

Pour que ces 2 tensions soient égales, il faut $\boxed{\frac{R_1}{R_v} \ll 1}$.

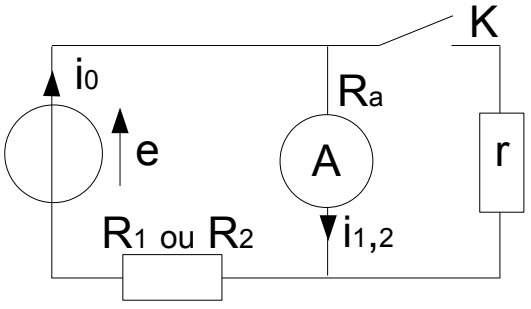
En effet, si la résistance interne du voltmètre est très grande devant la résistance R_2, la majeure partie de l'intensité i va passer dans la branche avec l'intensité R_2, et on aura $i_v \ll i_2$, c'est-à-dire $\boxed{i_v \approx 0}$. La branche du volmètre se comporte alors comme un interrupteur ouvert et ne perturbe pas le fonctionnement du circuit.

2. **Mesure de la résistance interne d'un ampèremètre**

On mesure l'intensité dans le circuit ci-dessous à l'aide d'un ampèremètre A de résistance interne R_a.

L'ampèremètre donne la même indication lorsque l'interrupteur est ouvert avec $R = 50\ \Omega$ (valeur notée R_1) que lorsque l'interrupteur est fermé avec $R = 40\ k\Omega$ (valeur notée R_2).

On veut en déduire la valeur de R_a.



(a) *Déterminer l'intensité i_1 qui parcourt l'ampèremètre lorsque l'interrupteur est ouvert en fonction de R_1 et e.*

Lorsque l'interrupteur est ouvert, la branche comportant la résistance r n'influe pas sur le fonctionnement du circuit. On a donc un circuit à une maille, ainsi, $i_1 = i_0$.

La loi des mailles s'écrit

$$e = u_A + u_1 = R_a i_1 + R_1 i_1 = (R_a + R_1) i_1 \Leftrightarrow \boxed{i_1 = \frac{e}{R_1 + R_a}}$$

(b) *Déterminer l'intensité i_2 qui parcourt l'ampèremètre lorsque l'interrupteur est fermé en fonction de r, R_2 et de l'intensité i_0 qui parcourt la branche du générateur, fléchée en convention générateur.*

Les résistance R_2 et R_a sont en parallèle, d'après un pont diviseur de courant, on a

$$\boxed{i_2 = \frac{G_a}{G_a + g} i_0 = \frac{r}{r + R_a} i_0}$$

(c) *Toujours dans le cas où l'interrupteur est fermé, utiliser les associations de résistances pour réduire le circuit à un circuit équivalent à une seule maille. Montrer alors que*

$$i_0 = \frac{e(R_a + r)}{R_2 R_a + R_2 r + r R_a}$$

On regroupe R_a et r qui sont en parallèle, et donc équivalentes à une résistance unique $R_{eq} = \frac{R_a r}{r + R_a}$. Il ne reste alors plus qu'une maille dans le circuit, et on peut écrire :

$$e = R_2 i_0 + R_{eq} i_0 \Leftrightarrow i_0 = \frac{e}{R_2 + R_{eq}} = \frac{e}{R_2 + \frac{R_a r}{r + R_a}}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{i_0 = \frac{e(r + R_a)}{R_2(R_a + r) + R_a r} = \frac{e(R_a + r)}{R_2 R_a + R_2 r + r R_a}}$$

(d) *En déduire l'expression de i_2 puis de R_a.*

Finalement, on a

$$i_2 = \frac{r}{r + R_a} i_0 = \frac{r}{r + R_a} \frac{e(R_a + r)}{R_2 R_a + R_2 r + r R_a} = \boxed{\frac{re}{R_2 R_a + R_2 r + r R_a} = i_2}$$

On sait que $i_2 = i_1$, d'où

$$\frac{re}{R_2 R_a + R_2 r + r R_a} = \frac{e}{R_1 + R_a}$$

$$\Leftrightarrow R_1 + R_a = \frac{R_2}{r} R_a + R_2 + R_a \Leftrightarrow R_1 = \frac{R_2}{r} R_a + R_2 \Leftrightarrow \boxed{R_a = (R_1 - R_2)\frac{r}{R_2}}$$

L'application numérique donne $\underline{R_a = 50\Omega}$.