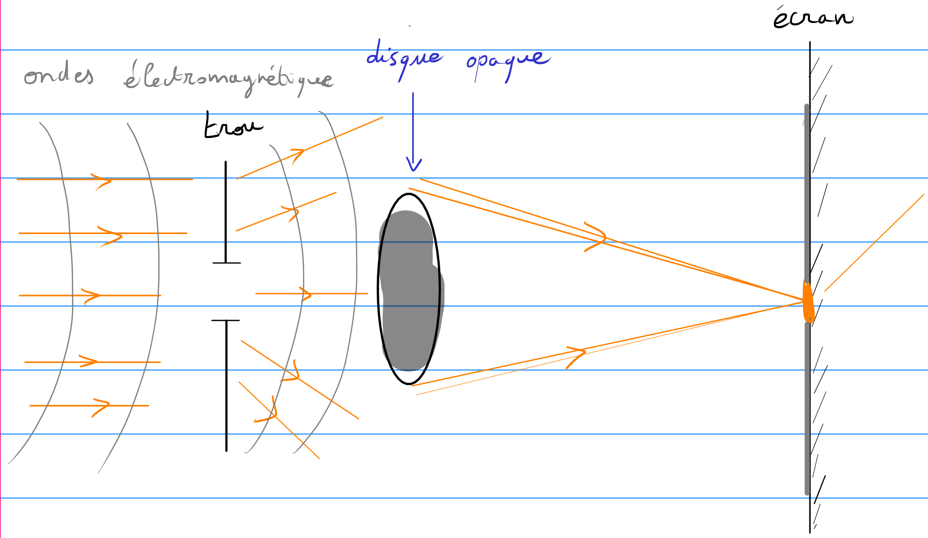
TD4 : La lumière

Généralités

Exercice 1 – Expérience de Fresnel

On place un disque opaque derrière un petit trou à travers lequel émerge de la lumière. On observe sur un écran l'ombre ainsi créée par ce disque. Qu'observe-t-on au centre de cette ombre ? Expliquer.

fin XIX^e, Newton : théorie particulaire



la lumière est aussi une onde ⇒ point lumineux au centre de l'ombre, due au disque opaque.

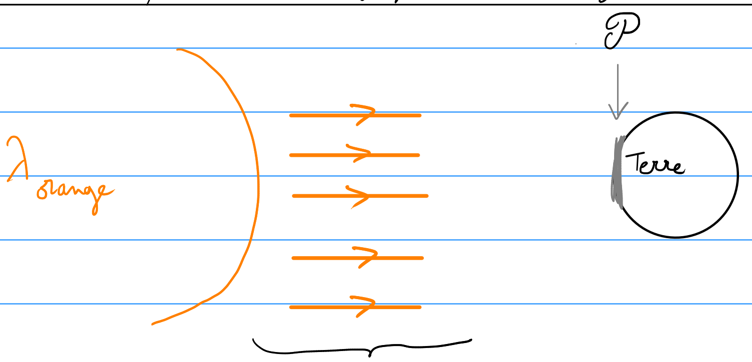
[cf vidéo]

début XX^e s : de Broglie dualité onde - corpuscule.

Exercice 2 –

La puissance par unité de surface de la lumière solaire, à la surface terrestre, vaut environ $\boxed{1400\ \mathrm{W/m^2}}$. En admettant que l'énergie moyenne des photons solaires correspond à la couleur orange, calculer le nombre de photons frappant une surface de 1 cm^2 à chaque seconde.

Nombre de photons N_{ph} frappant une surface $S = 1\ \mathrm{cm^2}$ pendant un temps $\tau = 1\ \mathrm{s}$:



$\mathcal{P}$: puissance par unité de surface

$\mathcal{P} = 1400\ \mathrm{W/m^2}$

photons : $\overline{\mathcal{E}}$ = énergie moyenne des photons solaires

$1\ cm = 10^{-2}\ m$

$1\ cm^2 = (1\ cm)^2 = (10^{-2}\ m)^2 = 10^{-4}\ m^2$

- <u>remarque</u> : la puissance p et l'énergie E sont liées par $p = \dfrac{dE}{dt}$

$\Rightarrow [p] = \dfrac{[E]}{T} = [E]\ T^{-1}$, <u>unité</u> : $W = J \cdot s^{-1}$

- or $[\mathcal{P}] = \left[\dfrac{P}{S}\right] = [P]\ L^{-2}$ $\triangle$ $\mathcal{P}$ par unité de surface

- On a N_{ph} photons qui arrive sur une surface $S = 1\,cm^2 = 10^{-4}\ m^2$ pendant $\tau = 1\ s$.

<u>Energie totale E des N_{ph} photons venant du soleil</u> : $\boxed{E_{Tot} = N_{ph}\ \bar{\varepsilon}}$

or $\bar{\varepsilon}$ correspond à la couleur orange $\lambda_{orange} = 600\ nm = 600 \times 10^{-9}\ m$
$= 6 \times 10^{-7}\ m$

constante de Planck $h = 6{,}626\,070\,15\ 10^{-34}\,\mathrm{J\,s}$. $\boxed{E_{1\,photon} = h\ \nu}$

J J.s s^{-1} (ou Hz)

or dans le vide : $\lambda_{orange} = c\,T = c\,\dfrac{1}{\nu}$, ν : fréquence

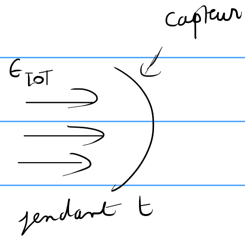
c : célérité dans le vide

$\Rightarrow \nu = \dfrac{c}{\lambda_{orange}}$ $m \cdot s^{-1}$ s^{-1} m $\Rightarrow \boxed{E_{1\,photon} = \dfrac{hc}{\lambda_{orange}}} = \bar{\varepsilon}$

<u>Energie totale</u> : $E_{ToT} = N_{ph}\ \bar{\varepsilon} = \overset{?}{N_{ph}} \left(\dfrac{hc}{\lambda_{orange}}\right)$

or $E_{ToT} = p \times t = (\mathcal{P} \times S) \times t$

1400 W/m^2 $10^{-4}\ m^2$ $\tau = 1\ s$



<u>conclusion</u> : $E_{ToT} = N_{ph} \left(\dfrac{hc}{\lambda_{orange}}\right) = (\mathcal{P}\ S)\ \tau$ avec $[N_{ph}] = 1$

$$\Rightarrow N_{ph} = (\mathcal{P} \, S \, \tau) \left(\frac{\lambda_{orange}}{h c} \right) \qquad 10^{-16}$$

A.N. : $N_{ph} = \left(\underbrace{1400 \times 10^{-4}}_{1,4 \times 10^{-1}} \times 1 \right) \times \dfrac{6 \times 10^{-7}}{(6,63 \times 10^{-34}) \times 3 \times 10^{8}}$ $\quad (1400 = 1,4 \times 10^{3}) \quad 10^{-8}$

$$= \left(\frac{1,4 \times 6}{6,63 \times 3} \right) \times \frac{10^{-1} \times 10^{-7} \times 10^{-8}}{10^{-16}} \times 10^{34}$$

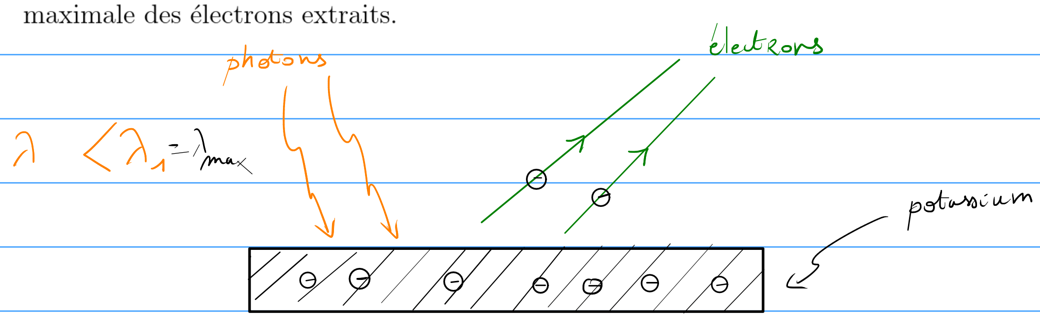
$$= \left(\frac{1,4 \times 6}{6,63 \times 3} \right) \times 10^{18} \simeq \underline{4,22 \times 10^{17}}$$

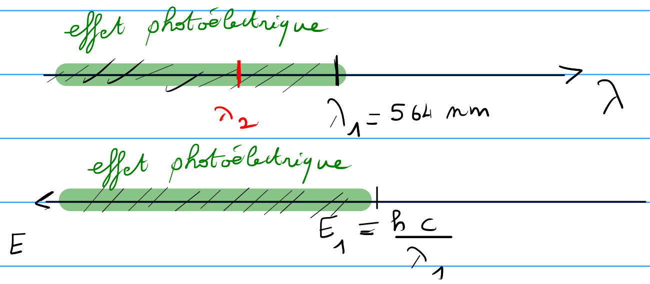
Exercice 3 – Travail d'extraction

La longueur d'onde maximale pour observer l'effet photoélectrique en éclairant du potassium est de $\lambda_1 = 564$ nm. *métal*

1/ Calculer le travail d'extraction ϕ (énergie minimale pour extraire un électron).

2/ Si la longueur d'onde de la lumière utilisée est de $\lambda_2 = 400$ nm, déterminer l'énergie cinétique maximale des électrons extraits.





$\lambda_1 = 564$ nm : longueur d'onde maximale

$E = h\nu = h\left(\frac{c}{\lambda}\right)$, $\boxed{\lambda = cT = \frac{c}{\nu}}$

constante de Planck $h = 6{,}626\,070\,15\,10^{-34}$ J s.

1/ Travail d'extraction Φ : $\quad \Phi = E_{minimal} = E_1 = \dfrac{hc}{\lambda_1}$

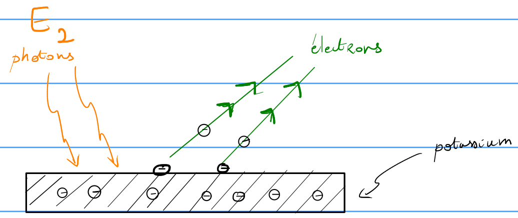
Tant que $E > E_1$ (énergie minimale) ou $\lambda < \lambda_1$, on a l'effet photoélectrique.

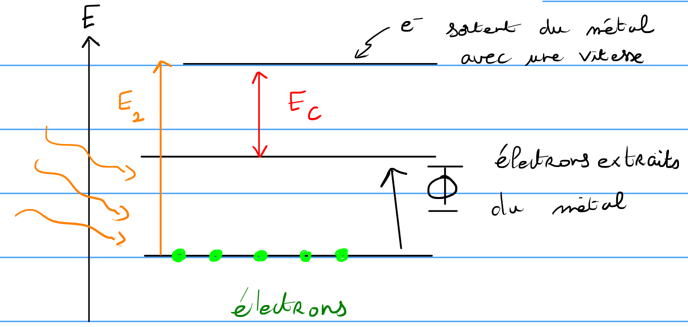
$$\Rightarrow \Phi = E_1 = \frac{hc}{\lambda_1} \simeq \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{5,64 \times 10^{-7}} \simeq 3,5 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\simeq \frac{3,5 \times 10^{-19}}{1,6 \times 10^{-19}} \simeq \underline{2 \text{ eV}}$$

eV : électron-volt, $\quad 1$ eV $= 1{,}6\,10^{-19}$ J.

2/ Si la longueur d'onde de la lumière utilisée est de $\lambda_2 = 400$ nm, déterminer l'énergie cinétique maximale des électrons extraits.





• $\lambda_2 < \lambda_1$: il y a de l'effet photoélectrique

$$\boxed{E_2 = \Phi + E_c} \Rightarrow E_c = E_2 - \Phi$$: énergie cinétique des électrons.

constante dépendant du métal choisi

1 eV = 1,6 × 10^{-19} J
<-> x J

$$E_c = E_2 - \Phi = h\nu_2 - \Phi = \frac{hc}{\lambda_2} - \Phi$$

A.N : $\Phi \simeq 2$ eV

$$E_2 = \frac{hc}{\lambda_2} \simeq 4,97 \times 10^{-19} \text{ J} \simeq 3,1 \text{ eV}$$

$$\hookrightarrow E_c = E_2 - \Phi = 3,1 - 2 = 1,1 \text{ eV}$$ pour des photons de $\lambda_2 = 400$ nm

---

Exercice 4 –
Sachant que le travail d'extraction du zinc vaut $\boxed{\phi = 4{,}33 \text{ eV}}$ peut-on observer l'effet photoélectrique avec de la lumière visible ? On donne 1 eV = $1{,}6\,10^{-19}$ J.

• $E_1 = \Phi = E_{minimale}$ pour observer l'effet photoélectrique : $E > E_1 = \frac{hc}{\lambda_1} = \Phi$

J $\hookrightarrow$ $\Phi = \frac{hc}{\lambda_1}$ (h : J.s ; c : m.s⁻¹ ; λ_1 : m) $\Rightarrow$ $\boxed{\lambda_1 = \frac{hc}{\Phi}}$ visible ?

• visible : $400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$
violet — rouge

A.N :

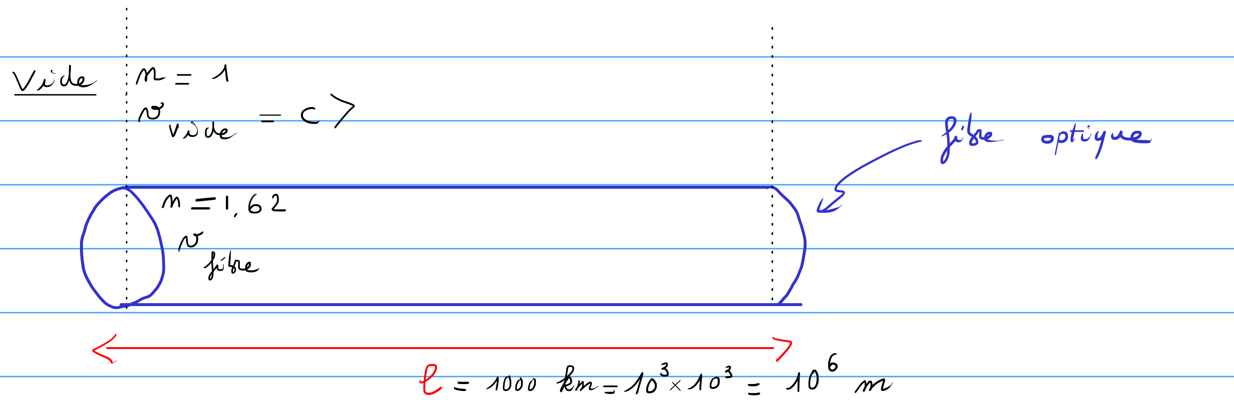
$$\lambda_1 = \frac{hc}{\Phi} \simeq \frac{(6,63 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)}{(4,33 \times 1,6 \times 10^{-19})} = \left(\frac{6,63 \times 3}{4,33 \times 1,6}\right) \times 10^{\overbrace{-34+8+19}^{27}}$$

$$\simeq 2,87 \times 10^{-7} m = 287 \text{ nm}$$

ici $\lambda_1 < 400$ nm donc pas d'effet photo-électrique dans le visible pour le zinc.

Indice

Exercice 5 –
Quel est la différence de temps de propagation de la lumière dans le vide et dans une fibre optique de longueur 1000 km et d'indice $n = 1{,}62$?



indice : $n = \dfrac{c}{v_{milieu}} \longrightarrow t_{vide} = \dfrac{\ell}{c}$

$n = 1{,}62 = \dfrac{c}{v_{fibre}} \longrightarrow t_{fibre} = \dfrac{\ell}{v_{fibre}} = \dfrac{\ell}{\left(\frac{c}{n}\right)} = n\dfrac{\ell}{c}$

$$\Delta t = |t_{vide} - t_{fibre}| = \left|\frac{\ell}{c} - n\frac{\ell}{c}\right| = \frac{\ell}{c}|1-n| = \frac{\ell}{c}\underbrace{(n-1)}_{>0}$$

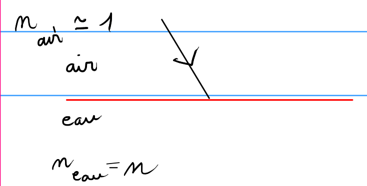
A.N. : $\Delta t = \dfrac{\ell}{c}(n-1) = \dfrac{10^6}{3 \times 10^8}(1{,}62 - 1) = \dfrac{0{,}62}{3} \times 10^{-2} \simeq 0{,}207 \times 10^{-2}$ s

(ℓ en m, c en m.s^{-1})

$\Delta t \simeq 2{,}07 \times 10^{-3}$ s $= 2{,}07$ ms

Exercice 6 – Dioptre plan
Un rayon lumineux de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 589$ nm passe de l'atmosphère à une cuve d'eau. La vitesse de propagation de la lumière dans l'eau est de $2{,}25\,10^8$m/s. $= v_{eau}$

1/ Quel est l'indice optique n associé à ce rayon lumineux dans l'eau ?



$n \geq 1$

indice : $n_{eau} = n = \dfrac{c}{v_{eau}} = \dfrac{3 \times 10^8}{2{,}25 \times 10^8} = \dfrac{3}{2{,}25}$

$\underline{n = 1,33}$

2/ Quelle est la fréquence de ce rayon lumineux ? Dépend-elle du milieu ?

vitesse de propagation dans le milieu

$$\underbrace{\lambda}_{\text{longueur d'onde}} = v \underbrace{T}_{\text{période}} = \frac{v}{f} \quad ; \quad f = \frac{1}{T} \text{ fréquence}$$

$$n_{eau} = \frac{c}{v} \Leftrightarrow v = \frac{c}{n_{eau}}$$

vide : $\lambda_{vide} = \frac{c}{f_{vide}} = 589 \text{ nm}$ orange

période inchangée

eau : $\lambda_{eau} = \frac{v}{f_{eau}} = vT = \left(\frac{c}{n_{eau}}\right) T = \frac{\lambda_{vide}}{n_{eau}}$ car $\lambda_{vide} = cT$

$$\underline{f_{eau}} = \frac{v}{\lambda_{eau}} = \frac{(c/n_{eau})}{(\lambda_{vide}/n_{eau})} = \frac{c}{\lambda_{vide}} = \underline{f_{vide}} = f$$

A.N : $f = \frac{c}{\lambda_{vide}} = \frac{3 \times 10^8}{589 \times 10^{-9}} \simeq \underline{5,1 \times 10^{14} \text{ Hz}}$

La fréquence est indépendante du milieu.

3/ Quelle est la longueur d'onde de ce rayon dans l'eau ?

$$\underline{\lambda_{eau}} = \frac{\lambda_{vide}}{n_{eau}} = \frac{589}{1,33} = \underline{442,9 \text{ nm}} \quad \text{violet}$$

ou $\lambda_{eau} = \frac{v}{f} = \frac{2,25 \times 10^8}{5,1 \times 10^{14}}$

4/ Quelle couleur voit un observateur si ce rayon lumineux lui parvient dans l'air ? Même question s'il lui parvient dans l'eau ?

dans l'air, $n_{air} \approx n_{vide} = 1$, l'observateur voit un rayon orange (589 nm)

dans l'eau, $n_{eau} = 1,33$, " " " " violet (442,9 nm)

Exercice 7 – Dioptre plan

On considère un rayon lumineux traversant le plan séparant deux milieux homogènes 1 et 2 d'indices de réfraction respectifs $n_1 = 1{,}5$ et $n_2 = 1$.

1/ Donner un exemple de milieux ayant ces indices.

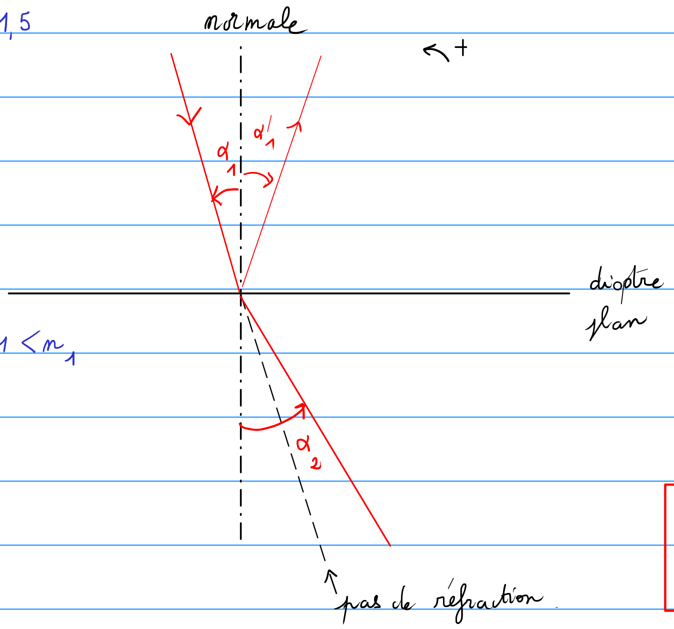
Indice de réfraction de quelques substances à 20°C

Air	1.00	Opaline	1.45
Acétone	1.36	Plexiglass	1.51
Alcool pur	1.32	Polystyrène	1.20
Ambre	1.54	Rubis	1.78
Cristal	1.60 à 2.00	Quartz	1.55 ou 1.64
Diamant	2.42 à 2.75	Saphir	1.77
Eau	1.33	Topaze	1.61
Emeraude	1.57	Tourmaline	1.27
Glace	1.31	Verre	1.50
Glycérine	1.47	Verre crown	1.52
Lapis lazuli	1.61	Verres flint	1.56 - 1.65 -1.89

- $n_2 = 1$: air, vide
- $n_1 = 1{,}5$: verre, silice

2/ On suppose que le rayon incident arrive sur le plan depuis le milieu 1 sous un angle d'incidence $\alpha_1 = \pi/6$. Calculer l'angle α_2 sous lequel il est réfracté dans le milieu 2. Tracer les rayons incidents et réfractés. $\alpha_1 = \frac{\pi}{6} = 30°$

$n_1 = 1{,}5$ verre



$n_2 = 1 < n_1$

- $n_1 > n_2 \Rightarrow \alpha_1 < \alpha_2$

2e loi de Descartes :

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

$$\hookrightarrow \sin \alpha_2 = \underbrace{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)}_{>1} \sin \alpha_1$$

$$\boxed{\alpha_2 = \arcsin\left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \sin \alpha_1\right]}$$

A.N. : $\alpha_2 = \arcsin\left[\left(\frac{1{,}5}{1}\right) \underbrace{\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}_{0{,}5}\right] = \arcsin \underbrace{(0{,}75)}_{\leq 1} \simeq 0{,}85 \text{ rad} = 48{,}6° > \alpha_1$

ok pour arcsin(...)

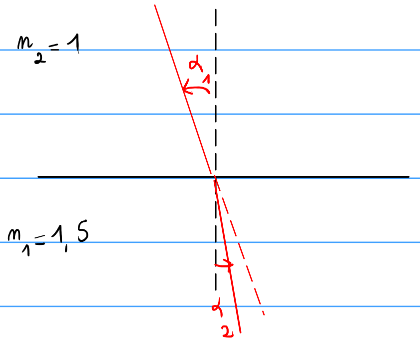
3/ Reprendre la question précédente pour un angle d'incidence $\beta_1 = \pi/3 = 60°$

$$\beta_2 = \arcsin\left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \sin(\beta_1)\right] = \arcsin\left[\underbrace{\frac{1{,}5}{1} \times 0{,}866}_{1{,}299 > 1}\right]$$

β_2 non défini

$\Rightarrow$ pas de réfraction : réflexion totale.

4/ Reprendre les questions précédentes si l'on suppose maintenant que le rayon incident arrive sur le plan depuis le milieu 2.



(α_1) (α_2)

$n_2 < n_1 \longrightarrow \alpha_1 > \alpha_2$

$n_2 \sin \alpha_1 = n_1 \sin \alpha_2$

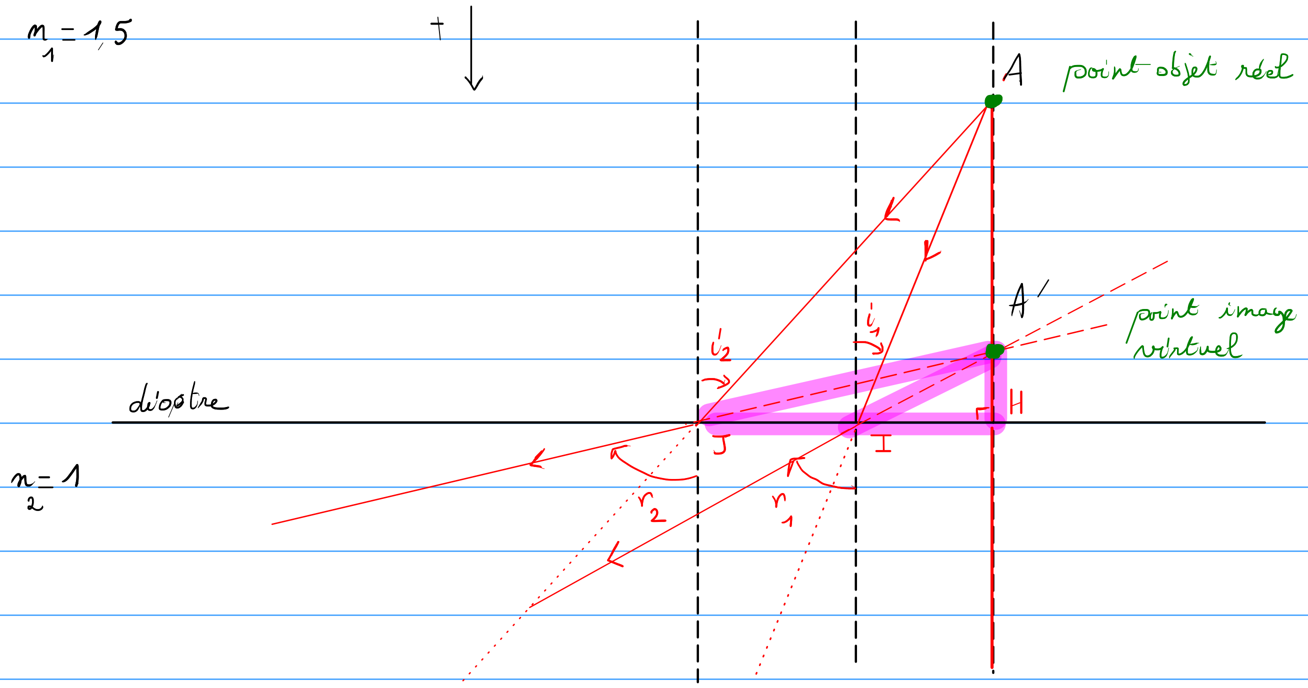
$$\hookrightarrow \boxed{\alpha_2 = \arcsin\left(\underbrace{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)}_{\frac{1}{1,5}} \sin \alpha_1\right)}$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{1}{1,5} \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)\right) \simeq 0{,}34 \text{ rad} \simeq 19{,}5° < \alpha_1 = 30°$$

$$\beta_2 = \arcsin\left(\frac{1}{1,5} \times 0{,}866\right) \simeq 0{,}61 \text{ rad} \simeq 35° < \beta_1 = 60°$$

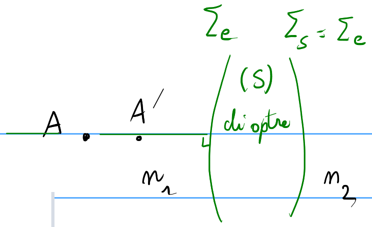
Exercice 8 – Stigmatisme *

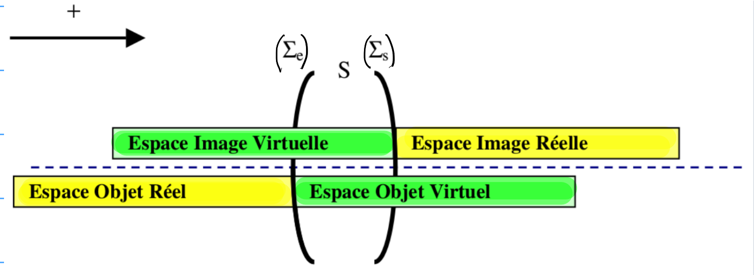
On considère le dioptre plan d'un milieu plus réfringent (verre d'indice $n = 1{,}5$) à un milieu moins réfringent (air d'indice $n = 1$).
On considère trois rayons issus d'un point objet A réel : le rayon AH normal au dioptre, le rayon AI tombant sous une incidence de 10^o sur le dioptre et le rayon AJ tombant sous une incidence de 40^o sur le dioptre. Les droites support des trois rayons émergents se coupent-elles en un même point ? Commenter le résultat.

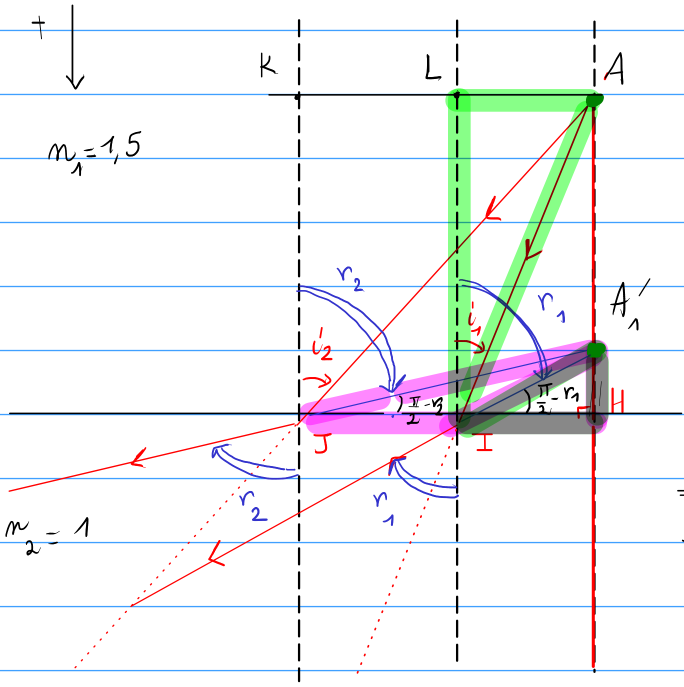


$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin r_1 \longrightarrow n_1 > n_2 : i_1 < r_1$

$(S) = \{\text{dioptre}\}$ système optique







en I ou J,

$$n_1 \sin i_{1(2)} = \underbrace{n_2}_{=1} \sin r_{1(2)}$$

$$\boxed{\sin r_{1(2)} = n_1 \sin i_{1(2)}} \quad , \quad n_2 = 1$$

$A'H$ en fonction de AH : $A' = A'_1 = A'_2$?

<u>triangle A'_1IH</u> $\quad A'_1$ cf $i_1 = 10°$

$$\tan\left(\frac{\pi}{2} - r_1\right) = \frac{A'_1H}{IH} = \frac{\cos(r_1)}{\sin(r_1)} = \frac{1}{\tan(r_1)}$$

<u>triangle ALI :</u>

$$\tan(i_1) = \frac{\sin(i_1)}{\cos(i_1)} = \frac{AL}{LI} = \frac{IH}{AH}$$

$$IH = A'_1H \tan r_1 = AH \tan(i_1)$$

position de l'image →

$$\boxed{A'_1H = AH\left(\frac{\tan i_1}{\tan r_1}\right)} = AH \frac{\tan(i_1)}{\tan(\arcsin(n_1 \sin i_1))}$$

position de l'objet

de même

$$\boxed{A'_2H = AH\left(\frac{\tan i_2}{\tan r_2}\right)} = AH \frac{\tan(i_2)}{\tan(\arcsin(n_2 \sin i_2))}$$

La position de l'image dépend de l'angle d'incidence

↳ <u>pas de stigmatisme</u>

Sauf si <u>angles petits</u> : $\sin i \simeq \tan i \simeq i$ $\Rightarrow A'_1H = AH \frac{i_1}{r_1} = AH \frac{n_2}{n_1}$

car $r_1 = n_1 i_1$

$\Rightarrow A'_2H = AH \frac{i_2}{r_2} = AH \frac{n_2}{n_1}$

⟶ même point image <u>$A'_1 = A'_2 = A'$</u>