

## 1 Solubilité

- 1) Définir la solubilité  $s$  d'un composé solide ionique  $C_x A_{y(s)}$  peu soluble.

Si on introduit  $n_i$  moles d'un composé ionique solide dans une solution aqueuse, alors  $n \leq n_i$  moles vont se dissoudre selon l'équilibre chimique :



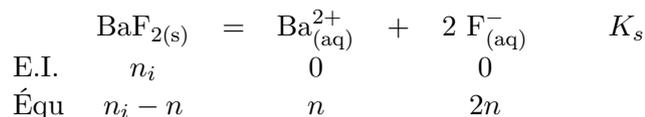
et il ne restera que  $n_i - n$  moles de solide. Si  $V$  est le volume de la solution (dans l'état final d'équilibre), alors la solubilité  $s$  est définie par :

$$s = \frac{n}{V}$$

Elle s'exprime en mol.L<sup>-1</sup>.

- 2) a) Calculer la solubilité du fluorure de baryum  $BaF_{2(s)}$  dans l'eau pure. On donne  $pK_s = 6$  pour  $BaF_{2(s)}$ .

On introduit  $n_i$  moles de  $BaF_{2(s)}$  dans de l'eau pure et on assiste à l'équilibre chimique suivant :



d'où ( $V$  étant le volume de la solution à l'équilibre chimique) :

$$[Ba_{(aq)}^{2+}]_{\text{éq}} = \frac{n}{V} = s \quad \text{et} \quad [F_{(aq)}^{-}]_{\text{éq}} = \frac{2n}{V} = 2s$$

La L.A.M. donne :

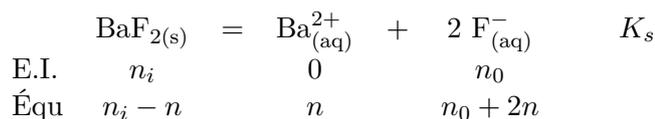
$$K_s = \frac{[Ba_{(aq)}^{2+}]_{\text{éq}} [F_{(aq)}^{-}]_{\text{éq}}^2}{(C^o)^3} = \frac{4s^3}{(C^o)^3} \quad \text{d'où} \quad s = C^o \left( \frac{K_s}{4} \right)^{1/3}$$

A.N. :  $s = 6,3 \times 10^{-3}$  mol.L<sup>-1</sup>.

- b) Le fluorure de sodium  $NaF_{(s)}$  est un composé ionique totalement soluble dans l'eau :  $NaF_{(s)} \rightarrow Na_{(aq)}^{+} + F_{(aq)}^{-}$ .

On introduit  $n_0$  moles de  $NaF_{(s)}$  dans 200 mL d'eau pure (en négligeant la variation de volume). On y ajoute (toujours sans variation de volume)  $n$  moles  $BaF_{2(s)}$ . Quelle est la valeur de  $n_0$  si la solubilité du fluorure de baryum est  $s = 5 \times 10^{-4}$  mol.L<sup>-1</sup> ?

On est presque dans la même situation que dans la question précédente mais il y a déjà au départ  $n_0$  moles de  $F_{(aq)}^{-}$  dans la solution :



d'où, en posant  $V = 200$  mL :

$$[Ba_{(aq)}^{2+}]_{\text{éq}} = \frac{n}{V} = s \quad \text{et} \quad [F_{(aq)}^{-}]_{\text{éq}} = \frac{n_0 + 2n}{V} = \frac{n_0}{V} + 2s$$

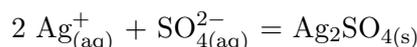
et la L.A.M. devient :

$$K_s = \frac{\left(\frac{n_0}{V} + 2s\right)^2 s}{(C^o)^3} \implies n_0 = V \sqrt{\frac{K_s (C^o)^3}{s}} - 2Vs = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

- 3) On mélange un volume  $V = 10 \text{ mL}$  d'une solution de sulfate de sodium ( $2 \text{ Na}_{(\text{aq})}^+ ; \text{SO}_{4(\text{aq})}^{2-}$ ) à  $C = 8,0 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$  et un même volume  $V = 10 \text{ mL}$  d'une solution de nitrate d'argent ( $\text{Ag}_{(\text{aq})}^+ ; \text{NO}_{3(\text{aq})}^-$ ) de concentration  $2C = 1,6 \times 10^{-1} \text{ mol.L}^{-1}$ . On donne :  $K_s(\text{Ag}_2\text{SO}_{4(\text{s})}) = 1,5 \cdot 10^{-5}$  à  $25^\circ\text{C}$ .

- a) Observe-t-on un précipité de chlorure d'argent  $\text{Ag}_2\text{SO}_{4(\text{s})}$  ?

Il s'agit de la situation inverse par rapport aux deux questions précédentes. On mélange les deux ions constitutifs du composé ionique solide et on peut éventuellement assister à l'équilibre de précipitation qui est l'opposé de l'équilibre de dissolution :



Cependant cet équilibre ne peut se produire que si les **concentrations introduites** vérifient l'inégalité :

$$\frac{[\text{Ag}_{(\text{aq})}^+]_I^2 [\text{SO}_{4(\text{aq})}^{2-}]_I}{(C^o)^3} \geq K_s$$

Dans le cas contraire, la réaction ne se produit pas ! On calcule :

$$[\text{Ag}_{(\text{aq})}^+]_I = \frac{2C \times V}{2V} = C = 8,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$$

et :

$$[\text{SO}_{4(\text{aq})}^{2-}]_I = \frac{C \times V}{2V} = \frac{C}{2} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$$

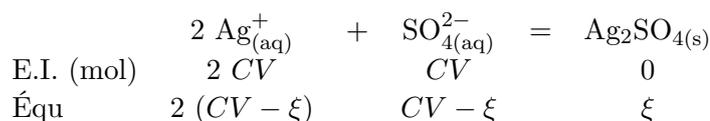
Ainsi :

$$\frac{[\text{Ag}_{(\text{aq})}^+]_I^2 [\text{SO}_{4(\text{aq})}^{2-}]_I}{(C^o)^3} = 2,56 \cdot 10^{-4} > K_s$$

La réaction peut donc avoir lieu et on observe un précipité de chlorure d'argent.

- b) Si oui, quelles sont les concentrations des ions à l'équilibre et le nombre de moles de solide formé ?

On fait un bilan de matière :



En posant  $x = \xi/V$  à l'équilibre (attention, le volume de la solution est  $2V$ !) la L.A.M. s'écrit (attention on utilise le  $K_s$  de la réaction opposée!) :

$$\frac{[\text{Ag}_{(\text{aq})}^+]_{\text{éq}}^2 [\text{SO}_{4(\text{aq})}^{2-}]_{\text{éq}}}{(C^o)^3} = K_s \quad \text{d'où} \quad \frac{(C-x)^3}{2(C^o)^3} = K_s$$

et donc :

$$x = C - C^o (2K_s)^{1/3} = 4,9 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$$

On a donc :

$[\text{Ag}_{(\text{aq})}^+]_{\text{éq}} = C - x = 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ et $[\text{SO}_{4(\text{aq})}^{2-}]_{\text{éq}} = \frac{C-x}{2} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$
--

Le nombre de moles de solide apparues est :

$n = x \times V = 4,9 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$
--

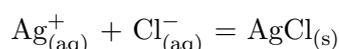
4) Pour  $\text{AgCl}_{(s)}$  :  $pK_s = 9,8$  à  $25^\circ\text{C}$ .

a) À  $V_0 = 10 \text{ mL}$  d'une solution de nitrate d'argent ( $\text{Ag}_{(\text{aq})}^+$ ;  $\text{NO}_3^-(\text{aq})$ ) de concentration  $C_0 = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ , on ajoute progressivement une solution de chlorure de potassium ( $\text{K}_{(\text{aq})}^+$ ;  $\text{Cl}_{(\text{aq})}^-$ ) à la même concentration  $C_0$ . Quel est le volume  $V_1$  de solution à ajouter pour que le précipité apparaisse ?

Même problématique qu'à la question précédente. Tant que les concentrations introduites vérifient :

$$\frac{[\text{Ag}_{(\text{aq})}^+]_I [\text{Cl}_{(\text{aq})}^-]_I}{(C^0)^2} < K_s$$

la réaction de précipitation :



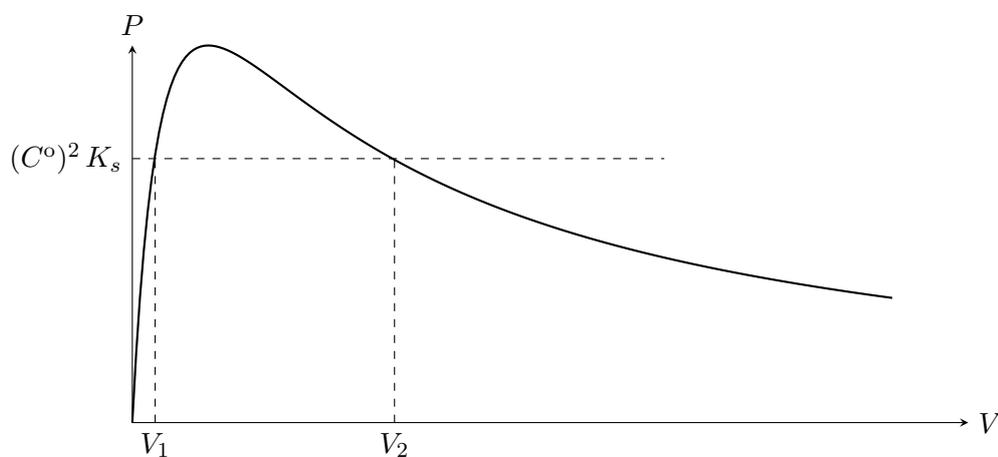
ne se produit pas. En notant  $V$  le volume de chlorure de potassium ajouté, on a :

$$[\text{Ag}_{(\text{aq})}^+]_I = \frac{C_0 V_0}{V + V_0} \quad \text{et} \quad [\text{Cl}_{(\text{aq})}^-]_I = \frac{C_0 V}{V + V_0}$$

on en déduit :

$$P = [\text{Ag}_{(\text{aq})}^+]_I [\text{Cl}_{(\text{aq})}^-]_I = (C_0)^2 \frac{V_0 V}{(V + V_0)^2}$$

La représentation de  $P$  en fonction de  $V$  a l'allure ci-dessous :



On constate qu'il existe deux valeurs particulière du volume,  $V_1$  et  $V_2$  qui sont les deux racines de l'équation  $P = (C^0)^2 K_s$ . Le précipité n'apparaît pas (ou se redissout) si  $V \in [0, V_1] \cup [V_2, +\infty[$ .

En posant  $x = V/V_0$ ,  $x$  est solution de l'équation :

$$\frac{x}{(1+x)^2} = 1,585 \cdot 10^{-8}$$

La première racine  $x_1$  doit être proche de 0, donc on peut la négliger devant 1 pour obtenir :

$$x_1 = 1,585 \cdot 10^{-8} \quad \text{donc} \quad \boxed{V_1 = 1,585 \cdot 10^{-7} \text{ mL}}$$

On peut donc dire que la précipitation se produit dès l'ajout de la première goutte (volume d'une goutte  $\approx 0,05 \text{ mL}$ )

- b) On continue à ajouter ( $K_{(aq)}^+$ ;  $Cl_{(aq)}^-$ ). Montrer que le précipité disparaît à partir d'un volume  $V_2$ . Déterminer numériquement ce volume.

$V_2$  correspond à la deuxième racine de l'équation. En supposant que  $x_2 \gg 1$  on obtient :

$$\frac{1}{x_2} = 1,585 \cdot 10^{-8} \quad \text{soit } x_2 = 6,3 \cdot 10^7 \quad \text{donc } \boxed{V_2 = 6,3 \cdot 10^5 \text{ L}}$$

Ce volume n'est pas du tout réaliste ! En pratique on n'observe jamais la redissolution du précipité !

## 2 Interféromètre de Michelson en lame d'air

On étudie un interféromètre de Michelson éclairé par une source étendue et qui émet une lumière dont le spectre est formé d'une seule raie longueur d'onde centrale  $\lambda = 550 \text{ nm}$ .

On observe la figure d'interférence sur un écran situé dans le plan focal image d'une lentille mince convergente  $L$  de distance focale image  $f' = 50 \text{ cm}$  et d'axe  $Oy$ . L'ensemble est placé dans l'air, dont l'indice est pris égal à 1.

- 1) On observe des anneaux sur l'écran. En déduire l'orientation relative des deux miroirs. Pourquoi faut-il placer l'écran dans le plan focal image de la lentille ?

L'interféromètre est réglé en lame d'air, les deux miroirs étant donc orthogonaux à leur axe respectif  $Ox$  ou  $Oy$ . On doit placer un écran dans le plan focal image de la lentille car la source est étendue : à distance finie les anneaux sont partiellement brouillés et ce n'est que dans le plan focal image de (L) qu'ils resteront parfaitement contrastés comme c'est le cas avec une source ponctuelle.

- 2) On suppose que  $|\delta(M)| \ll \ell_c$  et on note  $e$  l'épaisseur optique.

- a) On relève le rayon du 1<sup>er</sup> anneau sombre à partir du centre de la figure :  $r_1 = 1,5 \text{ cm}$  et celui du 9<sup>ème</sup> anneau sombre :  $r_9 = 4,8 \text{ cm}$ . Calculer numériquement  $e$ .

Dans la zone de cohérence temporelle de la raie d'émission, le rayon  $r_p$  d'un anneau d'ordre  $p$  est calculable par les deux équations :

$$p = \frac{\delta(M)}{\lambda} = \frac{2e \cos(i_p)}{\lambda} \quad \text{et} \quad \tan(i_p) = \frac{r_p}{f'}$$

d'où :

$$p = \frac{2e}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_p}{f'}\right)^2}}$$

L'ordre du premier anneau sombre étant  $p_1$  (demi-entier), celui du 9<sup>ème</sup> anneau sombre est  $p_1 - 8$  et donc :

$$p_1 = \frac{2e}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_1}{f'}\right)^2}} \quad \text{et} \quad p_1 - 8 = \frac{2e}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_9}{f'}\right)^2}}$$

On soustrait :

$$8 = \frac{2e}{\lambda} \left( \underbrace{\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_1}{f'}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_9}{f'}\right)^2}}}_{\text{noté } A} \right)$$

et donc :

$$e = \frac{4\lambda}{A} \stackrel{\text{A.N.}}{=} 5,33 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,53 \text{ mm}$$

**Remarque :**

Compte tenu du fait que les rayons vérifient  $r \ll f'$ , on peut se contenter d'un développement limité des racines carrées.  $A$  peut donc s'écrire de façon approchée :

$$A \approx 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{r_1}{f'} \right)^2 - 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{r_9}{f'} \right)^2 = \frac{r_9^2 - r_1^2}{2f'^2}$$

b) *Quel est le rayon du 2<sup>ème</sup> anneau sombre ?*

Il y a plusieurs façons de faire ce calcul. Par exemple, connaissant  $e$  d'après la question précédente, on en déduit l'ordre au centre des anneaux :  $p_0 = 1938,597\dots$  (garder tous les chiffres significatifs pour  $e$ ). On en déduit que l'ordre du premier anneau sombre est  $p_1 = 1938,5$  et celui du deuxième anneau sombre est  $p_2 = 1937,5$

On calcule ensuite :

$$p_2 = \frac{2e}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{r_2}{f'} \right)^2}} \approx p_0 \left( 1 - \frac{r_2^2}{2f'^2} \right) \quad \text{d'où} \quad r_2 = f' \sqrt{2 - 2 \frac{p_2}{p_0}} = 1,68 \text{ cm}$$

c) *On constate que l'intervalle entre les anneaux successifs se resserre quand on passe du centre au bord de la figure d'interférences. Expliquer ce phénomène.*

Si  $r_n$  est le rayon du  $n^{\text{ième}}$  anneau sombre d'ordre  $p_n = p_1 - (n - 1)$ , alors :

$$p_n = p_1 - (n - 1) = \frac{2e}{\lambda} \left( 1 - \frac{r_n^2}{2f'^2} \right) \quad \text{et} \quad p_1 = \frac{2e}{\lambda} \left( 1 - \frac{r_1^2}{2f'^2} \right)$$

d'où par soustraction :

$$n - 1 = \frac{e}{\lambda} \frac{r_n^2 - r_1^2}{f'^2} \quad \text{soit} \quad r_n = \sqrt{r_1^2 + f'^2 \frac{\lambda}{e} (n - 1)}$$

La concavité de la racine carrée montre que les rayons se resserrent au fur et à mesure que  $n$  augmente. On peut aussi constater que  $r_{n+1} - r_n \rightarrow 0$  si  $n \rightarrow \infty$ .

### 3 Expérience de Michelson et Morley - CCINP MP (Facultatif)

#### Partie I - L'expérience "MM" : Michelson et Morley (1887)

**Configuration  $\alpha$  :** *l'interféromètre est positionné de telle sorte que le trajet lumineux sur le bras n° 1 soit colinéaire au vent d'éther. Le bras n° 2 est perpendiculaire à cette direction.*

**Configuration  $\beta$  :** *on fait subir à l'ensemble  $S = \{\text{Source, interféromètre, observateur}\}$  une rotation de  $90^\circ$  autour de l'axe  $Oz$  dans le sens horaire, de telle sorte que ce soit le bras n° 2 qui devienne colinéaire au vent d'éther.*

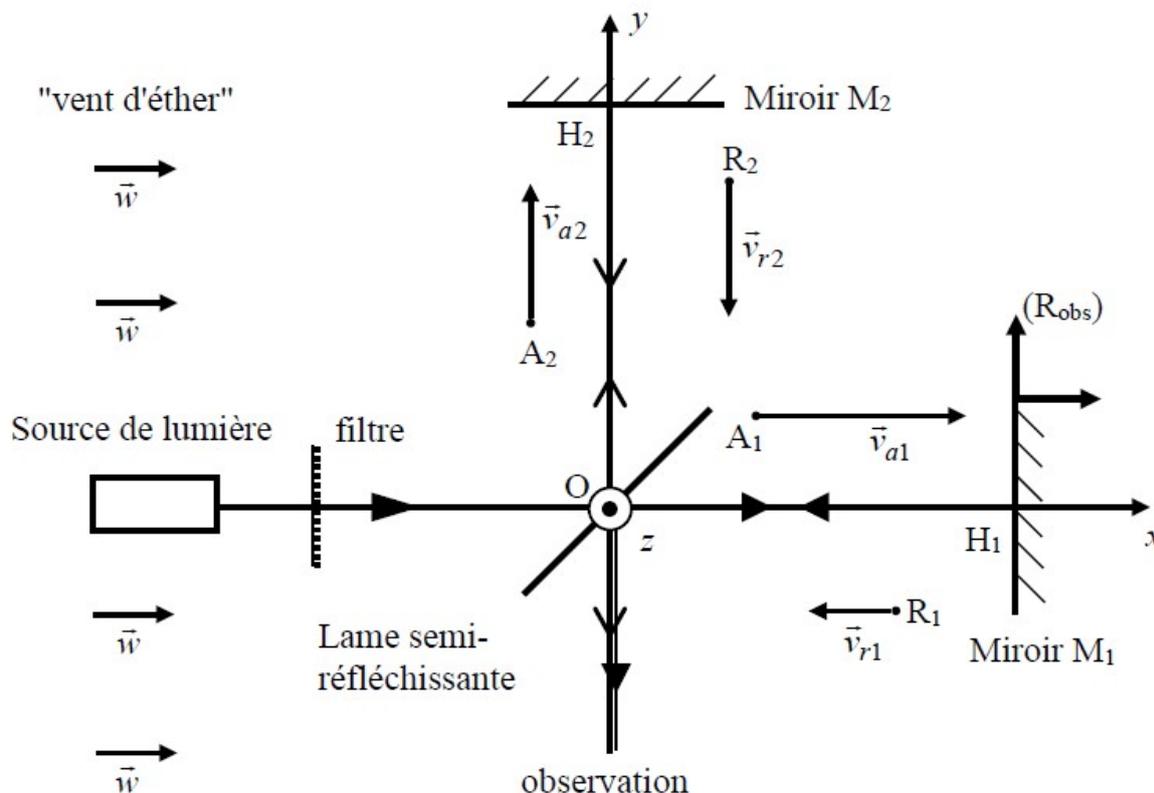


Figure 1-Schéma de l'interféromètre de Michelson dans la configuration  $\alpha$

- 1) À l'aide de la loi galiléenne de composition des vitesses, donner la relation entre les vecteurs  $\vec{v}_{\varepsilon i}$ ,  $\vec{c}_{\varepsilon i}$  et  $\vec{w}$  aux points aux points  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $R_1$  et  $R_2$ . Attribuer à chaque expression fournie ci-dessous la norme  $v_{\varepsilon i}$  correspondante :

$$c - w ; \sqrt{c^2 - w^2} ; c + w ; \sqrt{c^2 - w^2}$$

Prenons  $(\mathcal{R}_{\text{obs}})$  comme référentiel absolu et le référentiel lié au vent d'éther (c'est à dire le référentiel dans lequel l'éther est immobile) comme référentiel relatif. La vitesse d'entraînement est donc  $\vec{w} = w \vec{e}_x$  et la loi de composition des vitesses s'écrit :

$$\vec{v}_{\varepsilon i} = \vec{c}_{\varepsilon i} + \vec{w} \iff \vec{c}_{\varepsilon i} = \vec{v}_{\varepsilon i} - \vec{w}$$

On distingue alors les 4 cas de vitesses possibles :

- **Aller - bras 1** :  $\vec{v}_{a1} = v_{a1} \vec{e}_x$  avec  $v_{a1} > 0$

$\vec{c}_{a1} = \vec{v}_{a1} - \vec{w} = (v_{a1} - w) \vec{e}_x$ . En prenant la norme :  $\|\vec{c}_{a1}\| = c = |v_{a1} - w|$ . Si on suppose que  $v_{a1} > w$  (ce qui est raisonnable vu l'ordre de grandeur de la vitesse de la lumière) on obtient  $c = v_{a1} - w$  et donc :

$$\boxed{v_{a1} = c + w}$$

- **Retour - bras 1** :  $\vec{v}_{r1} = -v_{r1} \vec{e}_x$  avec  $v_{r1} > 0$

$\vec{c}_{r1} = \vec{v}_{r1} - \vec{w} = -(v_{r1} + w) \vec{e}_x$ . La norme est alors  $\|\vec{c}_{r1}\| = c = v_{r1} + w$ . Il vient :

$$\boxed{v_{r1} = c - w}$$

- **Aller - bras 2** :  $\vec{v}_{a2} = v_{a2} \vec{e}_y$  avec  $v_{a2} > 0$

$\vec{c}_{a2} = \vec{v}_{a2} - \vec{w} = v_{a2} \vec{e}_y - w \vec{e}_x$ . On a donc :  $\|\vec{c}_{a2}\| = c = \sqrt{v_{a2}^2 + w^2}$ , ce qui entraîne :

$$v_{a2} = \sqrt{c^2 - w^2}$$

- **Retour - bras 2** :  $\vec{v}_{r2} = -v_{r2} \vec{e}_y$  avec  $v_{r2} > 0$

$\vec{c}_{r2} = \vec{v}_{r2} - \vec{w} = -v_{r2} \vec{e}_y - w \vec{e}_x$ . On a donc :  $\|\vec{c}_{r2}\| = c = \sqrt{v_{r2}^2 + w^2}$ , ce qui entraîne à nouveau :

$$v_{r2} = \sqrt{c^2 - w^2}$$

- 2) En déduire l'expression du décalage temporel  $\tau(\alpha) = \tau_1(\alpha) - \tau_2(\alpha)$  entre les durées de parcours de la lumière arrivant à l'oculaire en suivant la voie 1 et la voie 2 dans la configuration  $\alpha$ . Faire un développement limité de  $\tau(\alpha)$  à l'ordre 2 en  $w/c$ .

De  $S$  à  $O$  puis de  $O$  au point d'observation les temps de parcours sont identiques pour les deux voies (mêmes distances parcourues et mêmes vitesses). Le décalage temporel se fait au cours des aller-retours dans les deux bras. On a :

$$\tau_1(\alpha) = \frac{L}{c+w} + \frac{L}{c-w} = \frac{2Lc}{c^2 - w^2}$$

et

$$\tau_2(\alpha) = \frac{L}{\sqrt{c^2 - w^2}} + \frac{L}{\sqrt{c^2 - w^2}} = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - w^2}}$$

On a donc :

$$\tau(\alpha) = \frac{2L}{c} \left( \frac{1}{1 - \frac{w^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{w^2}{c^2}}} \right) \approx \frac{2L}{c} \left( 1 + \frac{w^2}{c^2} - 1 - \frac{w^2}{2c^2} + \dots \right)$$

d'où :

$$\tau(\alpha) \approx \frac{Lw^2}{c^3}$$

En déduire le déphasage entre les deux signaux puis l'ordre d'interférence  $p(\alpha)$  en fonction de la fréquence  $\nu$ ,  $L$ ,  $c$  et du rapport  $w/c$ .

En lumière monochromatique de pulsation  $\omega = 2\pi\nu$ , le déphasage est donné par :

$$\Delta\varphi(\alpha) = \omega\tau(\alpha) = 2\pi\nu \frac{L}{c} \frac{w^2}{c^2}$$

d'où :

$$p(\alpha) = \frac{\Delta\varphi(\alpha)}{2\pi} = \nu \frac{L}{c} \frac{w^2}{c^2}$$

- 3) Avec le moins possible de calculs, donner de même les expressions :

- de la différence  $\tau(\beta) = \tau_1(\beta) - \tau_2(\beta)$  des durées de parcours de la lumière arrivant à l'oculaire en suivant la voie 1 (respectivement 2) dans la configuration  $\beta$  ;
- du développement limité de  $\tau(\beta)$  à l'ordre 2 en  $\frac{w}{c}$  ;
- de l'ordre d'interférence  $p(\beta)$  en fonction de  $\nu$ ,  $L$ ,  $c$  et du rapport  $\frac{w}{c}$ .

Cette rotation revient à permuter les rôles des bras 1 et 2 et donc à faire  $\tau_1(\beta) = \tau_2(\alpha)$  et  $\tau_2(\beta) = \tau_1(\alpha)$ . On aura donc :

$$\tau(\beta) = -\tau(\alpha) \approx -\frac{Lw^2}{c^3}$$

et

$$p(\beta) = -p(\alpha) = -\nu \frac{L}{c} \frac{w^2}{c^2}$$

- 4) Soit  $\Delta p = p(\beta) - p(\alpha)$  la variation de l'ordre d'interférence produite lors du passage de l'interféromètre de la configuration  $\alpha$  à la configuration  $\beta$ . Montrer que :

$$\Delta p = 2L \frac{\nu}{c} \left(\frac{w}{c}\right)^2$$

Réponse évidente d'après les résultats des deux questions précédentes.

- 5) En faisant l'hypothèse d'un éther immobile dans le référentiel héliocentrique et ne subissant aucun effet d'entraînement par l'atmosphère terrestre, Michelson et Morley comptaient observer cette modification avec une vitesse de vent d'éther de norme  $w = 30,0 \text{ km.s}^{-1}$  environ.

a) Retrouver cette valeur numérique à partir des données suivantes :

- Constante universelle de la gravitation :  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2} \cdot \text{m}^2$
- Masse du Soleil :  $M_S = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
- Durée de l'année terrestre :  $T_{\text{an}} = 365,25 \text{ jours}$

La Terre décrit une trajectoire quasi-circulaire de rayon  $R$  autour du centre du Soleil. Le principe fondamental de la dynamique conduit à (en projection sur  $\vec{e}_r$ ) :

$$-M_T \frac{v_T^2}{R} = -G \frac{M_T M_S}{R^2} \implies v_T^2 = \frac{GM_S}{R}$$

D'autre part, le mouvement étant uniforme on a :  $v_T = \frac{2\pi R}{T_{\text{an}}}$ . On peut donc éliminer le rayon  $R$  pour trouver :

$$v_T = \left(\frac{2\pi GM_S}{T_{\text{an}}}\right)^{1/3} \stackrel{\text{A.N.}}{=} 29,8 \text{ kms}^{-1} \approx 30 \text{ km.s}^{-1}$$

On obtient bien la bonne valeur.

La sensibilité du dispositif était de l'ordre de  $\Delta p = 0,01$ .

- b) Avec  $w = 30,0 \text{ km.s}^{-1}$ ,  $L = 11,2 \text{ m}$  et  $\nu = 4,57 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ , donner la valeur numérique de la variation  $\Delta p$  de l'ordre d'interférence escomptée par Michelson et Morley.

L'application numérique donne :  $\Delta p = 0,34$ . Cette valeur est très supérieure à la sensibilité du dispositif.

Aucune variation de l'ordre d'interférence ne fut jamais détectée. Le résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley a révélé la mise en défaut de la transformation de Galilée appliquée à la célérité de la lumière.