À la recherche du mouvement absolu

Dans tout le problème c désigne la constante fondamentale de l'espace-temps (vitesse de la lumière dans le vide). Pour les applications numériques on utilisera $c \approx 3 \ 10^8 \ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Les 5 parties sont largement indépendantes.

Au début du XIX^e siècle, les expériences d'interférences (Young 1801, Fresnel 1815 ...) avaient convaincu les physiciens de la nature ondulatoire de la lumière. À cette époque, on n'envisageait que des ondes de nature mécanique. L'interprétation de l'onde lumineuse nécessitait alors la présence d'un milieu fluide remplissant tout l'espace dans lequel les ondes lumineuses se seraient propagées de façon analogue aux ondes acoustiques dans l'air ou dans l'eau. Ce fluide avait été nommé « l'éther » et on supposait qu'en l'absence de matière il était au repos dans un certain référentiel R° (supposé galiléen) : le « référentiel absolu ». Que se passait-il alors en présence de matière ? Comment la Terre se déplaçait-elle par rapport à R° ? Après de nombreuses études expérimentales et réflexions théoriques, la réponse cohérente à ces questions viendra un siècle plus tard.

I L'entraînement de l'éther.

On admet le résultat de mécanique newtonienne suivant (« loi de composition des vitesses »): Soit un objet se déplaçant à la vitesse \vec{v}_r par rapport à un référentiel R. Ce référentiel R est lui-même en mouvement de translation rectiligne uniforme de vitesse \vec{v}_e par rapport à R°. Alors, la vitesse \vec{v}_a de l'objet par rapport à R° est $\vec{v}_a = \vec{v}_c + \vec{v}_r$.

Un coefficient de compressibilité d'un fluide dont le volume est V sous la pression P est défini par $\chi = -\frac{1}{V}\frac{\partial V}{\partial P}$. Il en existe plusieurs car il faut préciser les conditions dans lesquelles ont fait varier la pression. Cela peut être par exemple à température constante ou bien à entropie constante.

- 1. Soit un fluide au repos. La célérité c_a des ondes planes acoustiques (« vitesse du son ») dans ce fluide dépend uniquement du coefficient de compressibilité isentropique χ et de sa masse volumique μ . Déterminer, par analyse dimensionnelle, l'expression de cette célérité (à une constante multiplicative sans dimension près).
 - On note c la célérité des ondes lumineuses dans le vide (absence de matière). Dans un milieu transparent la célérité $c_{\rm dans\; matière}$ des ondes lumineuses est différente de c. On la note $c_{\rm dans\; matière\;/R}$. Elle dépend du référentiel R par rapport auquel on la mesure. On définit l'indice optique n du milieu transparent par la relation suivante :

<u>Lorsque le milieu est au repos par rapport à R°</u>, $c_{\text{dans matière / R°}} = \frac{c}{n}$ (par rapport à R° donc par rapport à l'éther).

- 2. Augustin Fresnel, en 1818, postule que la différence de célérité de la lumière entre le vide et le milieu transparent est due uniquement au fait que l'éther est plus concentré dans la matière. Soit ρ_0 la masse volumique d'éther dans le vide et ρ_1 la masse volumique dans un milieu d'indice n. Justifier le fait que Fresnel pose $\rho_1=n^2\rho_0$.
 - On étudie maintenant un milieu transparent en mouvement de translation de vitesse V par rapport à R° . Dans la suite, l'étude sera unidimensionnelle : les mouvements envisagés se feront uniquement dans la direction de l'axe Ox, la lumière se propageant parallèlement à cet axe. V est la mesure algébrique de la vitesse du milieu transparent selon Ox. On envisage 3 descriptions différentes (questions 3, 4 et 5) du comportement de la lumière.
- 3. Si la propagation de la lumière dans la matière était un phénomène ne faisant intervenir que la matière elle-même ou si l'éther était entraîné par la matière, la relation $c_{\text{dans matière}} = \frac{c}{n}$ devrait être valable par rapport au référentiel lié à la matière. Quelle serait alors la célérité de la lumière (dans le milieu transparent) par rapport à R°?

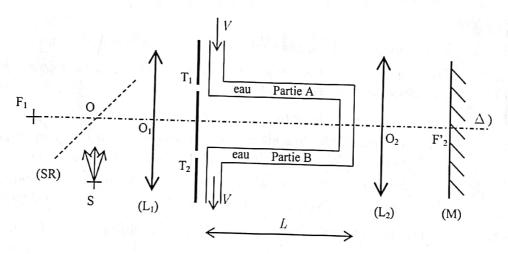
- 4. Si la propagation de la lumière était un phénomène ne faisant intervenir que l'éther et si celui-ci n'était pas entraîné par la matière (c'est-à-dire si l'éther restait immobile par rapport à R°, la présence de matière modifiant seulement sa concentration), quelle serait la célérité de la lumière (dans le milieu transparent) par rapport à R°?
- 5. Fresnel, pour expliquer certains phénomènes observés par Bradley (aberration des étoiles 1728) ou Arago (influence du mouvement d'un prisme sur la déviation de la lumière 1805–1810) envisage une troisième possibilité. Il considère que l'éther est partiellement entraîné par le milieu transparent : seul l'excès d'éther (de masse volumique ρ₁ ρ₀) se déplace à la vitesse V par rapport à R°, le reste étant immobile par rapport à R°. Exprimer alors la vitesse moyenne de l'éther (vitesse de son centre de masse) par rapport à R° en fonction de V, ρ₁ et ρ₀ puis en fonction de V et n.

On pose $\alpha=1-1/n^2$ (nommé « coefficient d'entraînement partiel de l'éther » ou « coefficient de Fresnel »). En admettant que la relation $c_{\text{dans matière}}=c/n$ reste valable par rapport au référentiel où l'éther est en moyenne au repos, montrer que la célérité de la lumière par rapport à R° vaut $\frac{c}{n}+\alpha V$ (« Formule de Fresnel »).

6. On s'intéresse à l'écart entre $c_{\text{dans matière}/R^{\circ}}$ et c/n (dû à une vitesse V non nulle). La différence entre les théories des questions 3 et 5 est-elle notable pour l'eau (n=1,33)? Qu'en est-il pour l'air entre questions 4 et 5?

Il L'expérience de Fizeau (1851)

Cette expérience conçue par Hippolyte Fizeau permet de mettre à l'épreuve les 3 possibilités envisagées aux questions 3, 4 et 5.



(SR) est une lame semi-réfléchissante inclinée à 45° par rapport à l'axe optique Δ commun aux deux lentilles convergentes (L₁) et (L₂). (M) est un miroir plan placé dans le plan focal image de (L₂). Une source lumineuse ponctuelle S est placée au point symétrique du foyer objet F_1 de (L₁) par rapport à (SR). Elle éclaire, par réflexion sur (SR) suivie d'une transmission par (L₁), une double fente de traces T_1 et T_2 dans le plan du dessin. Un tube coudé transparent est rempli d'eau qu'on peut mettre en mouvement. Dans les 2 parties A et B du tube parallèles à Δ , la vitesse de l'eau est uniforme, colinéaire à Δ , de mesure algébrique $\pm V$ suivant la partie du tube envisagée. Les longueurs de ces deux parties sont identiques : L. On observe la lumière ressortant de l'appareil vers la gauche sur un écran placé dans le plan focal de (L₁) contenant F_1 .

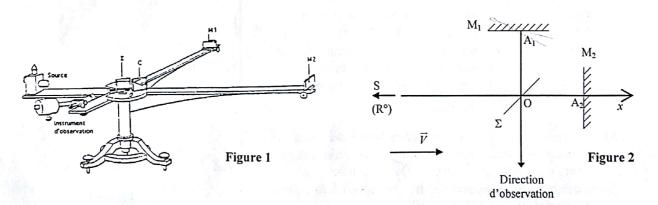
- 7. On ne tient pas compte de la diffraction par les fentes. Décrire le trajet de la lumière jusqu'au plan d'observation. Justifier la possibilité d'interférences au foyer F₁ de (L₁).
- 8. L'eau est immobile (V = 0). Quel est l'ordre d'interférence en F₁? Cet ordre est-il modifié si on tient compte d'éventuelles inhomogénéités de l'eau? T₁ et T₂ se comportant, lors du retour de la lumière vers F₁ de façon analogue à des trous d'Young, on observe en fait des franges rectilignes dans le plan d'observation. Quelle est la nature de la frange passant en F₁?

- 9. L'eau est mise en mouvement. Pour quelle raison physique (qualitative) l'ordre d'interférence en F₁ sera-t-il vraisemblablement modifié ? Quelle modification devrait-on observer sur la figure d'interférence ?
- 10. Soit n l'indice optique de l'eau. On se place dans l'hypothèse de la question 3 : on suppose que la célérité de la lumière est c/n par rapport au référentiel lié à l'eau. Quelle est, dans la partie A du tube, la vitesse c_{1A} par rapport au laboratoire du faisceau lumineux entré dans le dispositif par T₁? Quelle est la vitesse c_{1B} de ce même faisceau dans la partie B? Quelle est la durée totale de parcours pour les parties A et B? Quelle est, de même, la durée totale de parcours des parties A et B pour le faisceau lumineux entré par T₂?
- 11. On considère que la source est monochromatique (longueur d'onde dans le vide λ). Déduire de la différence des durées précédentes le déphasage φ en F_1 . En déterminer, dans le cas $\frac{V}{c} \ll 1$, une expression approchée à l'ordre 1 en $\frac{V}{c}$ de la forme $\varphi = 2\pi \frac{4L}{\lambda} \frac{V}{c} f(n)$ et donner l'expression de f(n).
- 12. AN. Lors de l'expérience de 1851 $L=1,49~\mathrm{m}$. La lumière était celle du soleil (on utilisera $\lambda=530~\mathrm{nm}$ n=1,33). Sur 19 mesures de décalage des franges entre leurs positions pour V=0 et $V=7,06~\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, Fizeau a constaté un décalage moyen de 0,23 interfrange avec un écart-type de 0,035 interfrange. Le résultat expérimental est-il en accord avec la relation de la question précédente? (Si l'expression de f(n) n'a pas été établie à la question 11, on pourra prendre $f(n)\approx 2$).
- 13. On se place dans l'hypothèse de l'entraînement partiel de l'éther (question 5) et on suppose que le référentiel du laboratoire correspond à R°. Montrer qu'il suffit pour trouver φ de remplacer f(n) par $\alpha f(n)$.
- 14. Commenter la phrase suivante concluant la publication par Fizeau de son expérience :

« Le succès de cette expérience me semble devoir entraîner l'adoption de l'hypothèse de Fresnel, ou du moins de la loi qu'il a trouvée pour exprimer le changement de la vitesse de la lumière par l'effet du mouvement des corps ; car bien que cette loi se trouvant véritable, cela soit une preuve très forte en faveur de l'hypothèse dont elle n'est qu'une conséquence, peut-être la conception de Fresnel paraîtra si extraordinaire, et, sous quelque rapport, si difficile à admettre, que l'on exigera d'autres preuves encore et un examen approfondi de la part des géomètres, avant de l'adopter comme l'expression de la réalité des choses. »

Le raisonnement de la question 13 a été fait dans l'hypothèse où R° est le référentiel du laboratoire. Cette contrainte peut être levée sans aucunement modifier le résultat. L'expérience que Fizeau a réalisée avec de l'eau mais aussi de l'air) valide la loi de Fresnel mais ne permet donc pas de se rendre compte si le référentiel du laboratoire est lié ou non à R°.

III À la recherche du référentiel absolu (R°). L'expérience de Michelson-Morley.

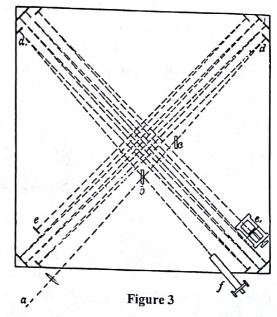


Les expériences de Michelson (Berlin 1881) puis Michelson et Morley (Cleveland 1887) étaient destinées à mettre en évidence le mouvement de la terre par rapport à l'éther immobile dans R°.

L'interféromètre utilisé par Albert A. Michelson en 1881 est représenté sur la figure 1 et modélisé sur la figure 2. La source S est quasi-monochromatique, immobile dans R°. L'interféromètre est animé par rapport à R° d'un mouvement de translation rectiligne uniforme de vitesse parallèle à l'axe Ox de mesure algébrique V. On note R le référentiel de l'interféromètre. Les miroirs (à 90° des axes) sont équidistants de la séparatrice Σ (qui est à 45° des axes) et on note L la distance commune $OA_1 = OA_2$.

L'air qui entoure l'appareil se comporte comme le vide c'est-à-dire que la lumière se propage à la célérité c par rapport à R° (ceci est dû à l'application de la formule de Fresnel à l'air – voir question 6).

- 15. À quelle(s) vitesse(s) dans R la lumière parcourt-elle les deux trajets $O \rightarrow A_2$ et $A_2 \rightarrow O$? Calculer la durée t_2 mise par la lumière pour parcourir l'aller-retour OA_2O le long de l'axe Ox.
- 16. Le long de l'autre bras, la lumière met la durée t₁ pour parcourir l'aller-retour. On se place dans le référentiel R°. Placer sur un même dessin la position du centre de l'interféromètre O lorsque la lumière arrive (en O) sur Σ puis la position O' de ce centre lorsque la lumière y revient après réflexion sur M₁ (donc après la durée t₁). Placer également le miroir M₁ au moment où la lumière s'y réfléchit en A₁ et dessiner le trajet de la lumière. Calculer t₁.
- 17. Déterminer l'expression de la différence $\Delta t = t_2 t_1$ en fonction de L, V et c, en supposant $V \ll c$.
- 18. L'interféromètre est en fait réglé en « coin d'air » par une légère rotation de M_1 autour d'un axe passant par A_1 . Montrer que la différence Δt se traduit par un décalage δX de la position des franges d'interférences. Exprimer le rapport $\frac{\delta X}{i}$ où i est l'interfrange.
- Pourquoi est-il nécessaire de faire tourner le montage d'un quart de tour autour d'un axe vertical (perpendiculaire à OA₁A₂) pour mettre en évidence le décalage précédent ?
- 20. La source est le soleil immobile dans R°. Le référentiel R est lié à la terre qui est animée de la vitesse $V=30~{\rm km\cdot s^{-1}}$ par rapport à R°. $L=1~{\rm m}$ et la lumière solaire a une longueur d'onde moyenne $\lambda=500~{\rm nm}$. Quel est le déplacement attendu (en nombre de franges) associé à la rotation de l'interféromètre d'un quart de tour?
- 21. Lors de l'expérience de 1881, il était nécessaire de toucher l'appareil pour le faire tourner, ce qui provoquait le défilement de plusieurs franges. Les vibrations causées par la circulation berlinoise entraînaient des variations dans la longueur des bras de l'interféromètre de l'ordre de 10⁻⁷ m. Une variation de température de 0,02°C provoquait une variation de longueur des bras de 10⁻⁷ m. Ces différents facteurs remettent-ils en cause la fiabilité des résultats?
- 22. Dans l'expérience de 1887, le montage flottait sur une cuve de mercure lui permettant de tourner lentement pendant plusieurs heures sans qu'il soit nécessaire de relancer la rotation. Le schéma de principe du dispositif est dessiné figure 3. La source est dans la direction a et f est une lunette permettant à l'expérimentateur d'observer la figure d'interférence superposée à une échelle finement graduée (l'interfrange représentait environ 50 graduations). Commenter les améliorations du dispositif (la distance cd est légèrement inférieure à 1 m).
- 23. L'expérience, réalisée de nombreuses fois, à des moments différents de l'année (pourquoi ?), ne donna aucun déplacement mesurable des franges. Qu'en conclure sur le mouvement du référentiel terrestre par rapport à R°? Que penser de la théorie de l'éther?



IV La relativité restreinte.

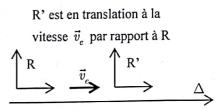
L'expérience de Michelson-Morley a montré la nécessité de renoncer à la notion d'éther et de référentiel absolu R° puisque la lumière a une célérité dans le vide qui semble être la même dans plusieurs référentiels. Elle fait, du coup, apparaître une incompatibilité de la propagation de la lumière dans le vide avec les lois de la mécanique. La solution est venue de la refonte par Einstein (1905) des lois de la mécanique. Il restait à comprendre les raisons de la validité expérimentale de la théorie de Fresnel (l'entraînement partiel de l'éther).

C'est Max Von Laue, en 1907, qui en a fait le lien avec la théorie de la relativité restreinte. Dans ce cadre, dans le cas particulier où toutes les vitesses sont colinéaires à un

axe Δ , la relation de changement de référentiel pour les

vitesses s'écrit
$$v_a = \frac{v_e + v_r}{1 + \frac{v_e v_r}{c^2}} \quad \text{où} \quad v_a, \, v_r \, \, \text{et} \, \, v_e \, \, \, \text{sont}$$

respectivement les mesures algébriques de la vitesse absolue (par rapport à R), de la vitesse relative (par rapport à R') et de la vitesse d'entraînement (mouvement de R' par rapport à R). (Einstein 1905)



- 24. Vérifier (en se limitant à des déplacements selon Δ) que cette formule est cohérente avec le fait que n'importe quel référentiel peut jouer le rôle de R°: si la vitesse de la lumière dans le vide est c dans un référentiel, elle vaut également c dans tout autre référentiel en translation par rapport au premier.
- 25. Un milieu transparent d'indice n se déplace par rapport à R en translation à la vitesse $v_e \ll c$. Par définition de l'indice, la célérité de la lumière par rapport au milieu transparent vaut $\frac{c}{n}$. Donner une expression approchée valable à l'ordre 1 en $\frac{v_e}{c}$ de la célérité de la lumière par rapport à R. (Van Laue 1907).
- 26. Commenter le lien de cette expression avec la théorie de Fresnel (partie I) et compléter éventuellement le commentaire sur la conclusion de Fizeau (question 14).

V Rotation par rapport à un référentiel galiléen. L'effet Sagnac (1913).

D'après l'expérience de Michelson et Morley et selon la théorie de la relativité restreinte, la notion de « référentiel absolu » (et donc celle de « translation absolue ») n'existe pas. Tous les référentiels galiléens sont équivalents : la célérité de la lumière dans le vide est la même (c) dans tous ces référentiels. Il est par contre possible de donner un sens à la notion de « rotation absolue » par des expériences d'optique grâce à l'« effet Sagnac ».

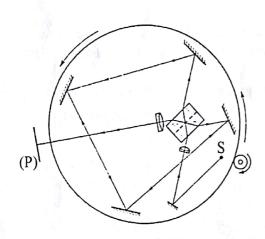


Figure 4

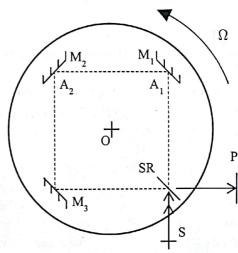
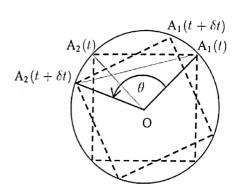


Figure 5

L'interféromètre utilisé par Georges Sagnac en 1913 est représenté sur la figure 4 et modélisé sur la figure 5. Une lame semi-réfléchissante (SR) et trois miroirs plans (M_1,M_2,M_3) sont placés aux sommets d'un carré de côté a, de centre O. Ils sont inclinés à 45° par rapports aux côtés du carré. La source S, quasi-monochromatique, placée au foyer d'une lentille éclaire (SR) sous une incidence de 45°. L'onde est décomposée par (SR) en deux parties, parcourant le carré dans des sens opposés avant de se recombiner sur (SR) pour être recueillie sur une plaque photographique (P). L'ensemble de l'interféromètre (y compris S et P) est animé, par rapport à un référentiel galiléen R, d'un mouvement de rotation uniforme de vitesse angulaire Ω autour de l'axe Oz perpendiculaire au plan du dessin.

L'étude est faite dans le référentiel galiléen R. L'air qui entoure l'appareil se comporte comme le vide (la lumière se propage à la célérité c par rapport à R). On étudie l'onde se propageant dans le sens direct de M_1 à M_2 . On considère un rayon lumineux allant du coin A_1 (atteint à la date t) du carré au coin A_2 . Soit δt la durée du parcours. Entraînés par la rotation de l'interféromètre, les points A_1 et A_2 se déplacent sur un cercle de rayon $R=\frac{a}{\sqrt{2}}$. La lumière va donc en fait de $A_1(t)$ à $A_2(t+\delta t)$. Le dessin ci-contre représente en pointillés les positions du carré aux dates t et $t+\delta t$.



- 27. Montrer que la distance entre $A_1(t)$ et $A_2(t+\delta t)$ vaut $2R\sin\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\Omega\delta t}{2}\right)$.
- 28. En déduire, en supposant que $\frac{\Omega a}{c} \ll 1$, qu'une approximation valide à l'ordre 1 en $\frac{\Omega a}{c}$ de δt est $\delta t \approx \frac{a}{c} \Big(1 + \frac{\Omega a}{2c} \Big)$.
- 29. Déterminer la durée totale du parcours du carré pour l'onde se propageant dans le sens direct et montrer que l'écart de durée $t^+ t^-$ entre l'onde se propageant dans le sens direct et celle se propageant dans le sens indirect vérifie $t^+ t^- = \frac{4A\Omega}{c^2}$ où A est l'aire du carré.
- 30. En déduire l'ordre d'interférence sur la plaque photographique.

Cet ordre d'interférence non nul se traduit par un décalage de franges. C'est « l'effet Sagnac ». Il permet de mesurer la rotation d'un référentiel par rapport aux référentiels galiléens. La mesure des rotations par effet Sagnac est exploité actuellement en particulier pour le guidage inertiel dans les gyromètres à fibre optique (un gyromètre de performance moyenne − précision 0,1° par heure − coûte environ 10 000 €) et les gyrolasers.

31. On admet que l'expression de la question 29 s'applique quelle que soit la forme du parcours des deux ondes à condition de noter A l'aire délimitée par ce parcours. Reproduire les parties utiles de la figure 4 et hachurer l'aire que Sagnac a dû prendre en compte.

AN. $A=866~{\rm cm^2}$. Au cours d'une des mesures, la vitesse de rotation était de 2,35 tours par seconde. Sagnac a mesuré un décalage de 0,077 interfrange pour $\lambda\approx432~{\rm nm}$ lorsqu'il a inversé le sens de rotation de l'interféromètre. Commenter

32. Michelson et Gale ont utilisé l'effet Sagnac pour mesurer la rotation propre de la Terre en 1925. Le parcours de la lumière entourait un champ rectangulaire de longueur 613 m et de largeur 339 m situé dans l'Illinois à la latitude 41°46¹. Seule la composante verticale du vecteur rotation de la Terre contribuait dans ces conditions à l'effet Sagnac. Quel était le décalage attendu des franges pour λ = 570 nm? Une étude statistique portant sur 269 mesures a conduit à la valeur expérimentale 0,230 ± 0,005 interfrange. Commenter.

Augustin Fresnel

Physicien français né le 10 mai 1788 à Broglie et mort le 14 juillet 1827 à Villed'Avray.

Il entre à l'École centrale de Caen à l'âge de 13 ans puis à l'École Polytechnique à 16 ans et demi. En 1815 il rencontre François Arago à Paris et y débute sa carrière scientifique. Il réalise de nombreuses expériences sur les interférences lumineuses, indépendamment de celles de Thomas Young. Il s'oppose à la théorie corpusculaire de la lumière de Newton en vigueur jusque-là, et par des expériences sur la diffraction de la lumière, pose les bases de sa théorie « vibratoire » de la lumière, à laquelle il apportera compléments et corrections en 1818.

Il prouve le premier que deux faisceaux de lumière polarisés dans des plans différents n'ont aucun effet d'interférence et en déduit en 1821 que les ondes

lumineuses sont transversales et non longitudinales (comme les ondes sonores). Il est le premier à produire une lumière polarisée circulaire.

Il invente la lentille à échelon (dite lentille de Fresnel) utilisée pour accroître le pouvoir de l'éclairage des phares. Ses formules, dites de Fresnel, sur la réfraction sont utilisées pour déterminer les coefficients de réflexion et

Il est élu membre de l'Académie des sciences en 1823. La Royal Society, qui lui décerne la Médaille Rumford en 1824, l'élit membre étranger l'année suivante.



Albert Abraham Michelson

Physicien américain, d'origine polonaise, né le 19 décembre 1852 à Strelno, en Prusse (aujourd'hui Strzelno, en Pologne) et mort le 9 mai 1931 à Pasadena en Californie.

Professeur à l'université de Chicago, inventeur de l'interféromètre qui porte son nom, Albert Abraham Michelson a mené de nombreuses recherches expérimentales en optique, caractérisées par la rigueur des méthodes utilisées et des résultats obtenus. Sa mesure (avec René Benoît) du mètre étalon de Sèvres en longueurs d'onde de la raie rouge du cadmium (1893) marque une étape en métrologie.

L'expérience « de Michelson » (1881), répétée avec plus de précision avec E.W.Morley (1887), et ensuite par d'autres chercheurs, a démontré l'inexistence d'un mouvement relatif de la Terre par rapport à l'éther (milieu hypothétique de propagation des ondes lumineuses) et a constitué l'un des points de départ de la théorie de la relativité restreinte, dans laquelle l'hypothèse de l'éther est abandonnée.

Il a contribué au développement de la technique de la synthèse d'ouverture, imaginée par Hippolyte Fizeau, pour déterminer le diamètre apparent des étoiles par des méthodes interférométriques.

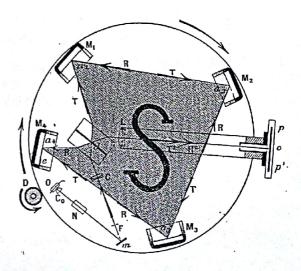
Il a reçu le prix Nobel de physique en 1907. Il fut également lauréat de la Médaille Franklin en 1923.



Georges Sagnac

Physicien français né 14 octobre 1869 à Périgueux et mort le 26 février 1928 à Meudon.

Élève de l'École Normale Supérieure de 1890 à 1893, il a laissé son nom à l'effet Sagnac (découvert en 1913), un phénomène qui est la base de gyromètres optiques et des gyrolasers développés à partir de la fin des années 1970. Il fut également le découvreur en 1896 de la fluorescence X.



Hippolyte Fizeau

Physicien français né le 23 septembre 1819 à Paris et mort le 18 septembre 1896 à Jouarre.

En 1848, il découvre le décalage de fréquence d'une onde lorsque la source et le récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre1 (effet Doppler-Fizeau). Il réalise trois expériences d'optique mémorables :

En 1849, il met au point une méthode de mesure de la vitesse de la lumière utilisant une roue dentée tournant à vitesse constante pouvant occulter la lumière. En utilisant un parcours de 8 000 m entre le mont Valérien à Suresnes et Montmartre il obtient une valeur pour la vitesse de la lumière proche de 315 300 km/s.

En 1850, en collaboration avec Foucault, il travaille sur les interférences et aussi la détermination de la vitesse de la lumière, au moyen d'un miroir tournant.

En 1851 il mesure l'entraînement de la lumière par l'eau en mouvement

Il est élu membre de l'Académie des sciences en 1860, du Bureau des longitudes en 1878. Lauréat de la Médaille Rumford en 1866, il est élu membre étranger de la Royal Society en 1875.



Albert Einstein

Physicien allemand, puis apatride (1896), suisse (1901), et enfin helvético-américain (1940), né le 14 mars 1879 à Ulm, Wurtemberg, et mort le 18 avril 1955 à Princeton, New Jersey.

Il publie en 1905 (« annus mirabilis ») 4 articles fondateurs de la physique du XX^e siècle traitant de :

L'étude de l'effet photoélectrique qui présente un point de vue nouveau sur la nature corpusculaire de la lumière et introduit ce qui sera appelé en 1920 le photon.

L'étude théorique du mouvement brownien dont la vérification expérimentale par Jean Perrin montrera l'existence des atomes et des molécules

La théorie de la relativité restreinte.

L'équivalence entre masse et énergie résumée par la célèbre formule $E=mc^2$. Il est l'auteur avec l'aide de Marcel Grossmann de la théorie relativiste de la gravitation (relativité générale 1913-1916). Se théorie de l'Amirie de la gravitation (relativité générale 1913-1916).

gravitation (relativité générale 1913–1916). Sa théorie de l'émission stimulée de lumière par les atomes (1917) est à l'origine du développement des lasers. Il contribue largement au développement de la mécanique quantique et de la cosmologie, et reçoit le prix Nobel de physique de 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique. Sa renommée dépasse largement le milieu scientifique. Elle est en particulier liée à son engagement politique marqué par son pacifisme et sa lutte contre la discrimination raciale.



Physicien allemand né le 9 octobre 1879 dans un faubourg de l'actuelle Coblence, Allemagne et mort le 24 avril 1960 à Berlin. Il obtint le prix Nobel de physique de 1914 « pour sa découverte de la diffraction des rayons X par des cristaux ».



À la recherche du mouvement absolu

Corrigé

- 1. $\chi = -\frac{1}{V}\frac{\partial V}{\partial P}$ a la dimension de $\frac{1}{P}$. PV est une énergie (voir $\delta W = -P\mathrm{d}\,V$), mc^2 aussi donc $\left[\frac{mc^2}{PV}\right] = 1$ c'est-à-dire $\left[\mu\chi c^2\right] = 1$ donc $c_a = \frac{1}{\sqrt{\mu\chi}}$ (à une constante sans dimension près).
- D'après la question précédente, à compressibilité donnée, la masse volumique est proportionnelle au carré de l'inverse de la célérité c'est-à-dire au carré de l'indice.
- 3. Avec une célérité $\frac{c}{n}$ par rapport à la matière, la composition des vitesses conduit à une célérité $\frac{c}{n} + V$ dans R°.
- 4. La célérité par rapport à l'éther donc aussi par rapport à R° est $\frac{c}{n}$
- $\text{5.} \quad \text{En moyenne (pondérée par les masses), } V_{\text{moyenne}} = \frac{\left(\rho_1 \rho_0\right) \times V + \rho_0 \times 0}{\left(\rho_1 \rho_0\right) + \rho_0} = \frac{\left(\rho_1 \rho_0\right)}{\rho_1} V = \left(1 \frac{1}{n^2}\right) V \,.$

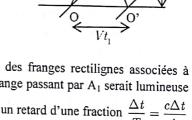
Par composition des vitesses la célérité de la lumière vaut maintenant $\frac{c}{n} + V_{\text{moyenne}} = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)V$.

- 6. La correction de célérité due à la matière passe de V (question 3) à αV (question 5). Pour l'eau $\alpha \approx 0,43$. La correction est donc environ deux fois plus faible. Pour l'air, l'indice est très proche de 1 donc α est très proche de 0. Le modèle de la question 5 devient équivalent à celui de la question 4. La célérité est $\frac{c}{n} \approx c$ même si l'air est en mouvement. Il n'y a pratiquement pas d'entraînement de l'éther par l'air.
- 7. Après réflexion sur (SR) la lumière semble venir de F₁. Après traversée de (L₁) elle forme donc un faisceau parallèle. Sans diffraction, les rayons passés par T₁ traversent <u>la partie</u> A en restant parallèles à Δ et se dirigent donc après (L₂) vers le foyer F'₂. La réflexion sur (M) les renvoie alors symétriquement par rapport à Δ. Du coup ils vont faire un trajet de retour exactement symétrique par rapport à Δ de l'aller et vont donc traverser <u>la partie B</u> avant de passer par T₂ puis (L₁) et converger au foyer F₁. De même, les rayons passés par T₂ parcourent à l'aller la partie B, au retour la partie A et ressortent par T₁.

 Il y a donc deux façons de parvenir en F₁. Il s'agit d'un dispositif d'interférence à division de front d'onde analogue aux trous d'Young.
- 8. Les deux parcours sont absolument identiques. Les chemins optiques aussi. La différence de marche est nulle. Les rayons passent exactement aux mêmes endroits; les inhomogénéités n'ont donc aucune influence (les franges sont très stables, insensibles aux perturbations). La frange en F₁ est une frange brillante (ordre d'interférence nul).
- 9. Il y a une dissymétrie entre les deux types de trajets. Les rayons entrés par T₁ parcourent à la fois la partie A et la partie B dans le même sens que l'eau alors que les rayons entrés par T₂ sont toujours à contre-courant. L'ordre d'interférence en F₁ risque de ne plus être nul. Les franges vont sans doute se décaler compte tenu d'un déphasage à la sortie entre T₁ et T₂.
- 10. Par composition des vitesses ou en utilisant la question 3, $c_{1A} = \frac{c}{n} + V = c_{1B}$ (dans les deux cas l'eau et la lumière vont dans le même sens). La durée de parcours est donc $t_1 = \frac{2L}{\frac{c}{n} + V}$. Pour les rayons entrés par T_2 , avec

$$\text{un parcours à contre-courant } t_2 = \frac{2L}{\frac{c}{n} - V} \quad \text{et } t_2 - t_1 = 2L \left(\frac{1}{\frac{c}{n} - V} - \frac{1}{\frac{c}{n} + V} \right) = \frac{4LV}{\frac{c^2}{n^2} - V^2} \,.$$

- 11. L'écart de durée t_2-t_1 se traduit par un retard de phase $\varphi=\omega(t_2-t_1)=kc(t_2-t_1)=\frac{2\pi c}{\lambda}(t_2-t_1)$. En négligeant V^2 devant $\frac{c^2}{r^2}$, $\varphi \approx 2\pi \frac{4LV}{Vc} n^2$. CQFD avec $f(n) = n^2$.
- 12. Un décalage d'une frange intervient pour une variation de phase valant 2π . Le décalage en nombre de franges vaudrait donc $\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{4LV}{\Gamma}f(n) \approx 0.47$. Cette valeur sort nettement de l'intervalle de confiance des mesures de Fizeau. Le modèle de la question 3 (entraînement total de l'éther) est invalidé. En fait, on verra dans la partie IV que c'est surtout la loi de composition des vitesses de la mécanique classique qui est invalidée.
- 13. Puisque le référentiel du laboratoire est confondu avec R°, on peut exprimer la vitesse dans le laboratoire par la relation de la question 5 : $\frac{c}{n} \pm \alpha V$. C'est exactement la même formule que celle qu'on a utilisé à la question 10 en remplaçant V par αV . On peut donc directement remplacer dans le résultat final V par αV c'est-à-dire, in fine, f(n) par $\alpha f(n)$.
- 14. Le décalage vaudrait alors $\frac{\varphi}{2\pi}=0,47\alpha\approx0,20$ interfrange ce qui est cette fois compatible avec les mesures de Fizeau. Celui-ci constate le bon accord entre les prévisions de la formule de Fresnel et la réalité. Néanmoins il montre un certain scepticisme. Il précise que les hypothèses de Fresnel sont suffisantes pour décrire la réalité mais qu'elles ne sont pas nécessaires.
- 15. Par composition des vitesses, la vitesse de la lumière est (en module) c-V de O à A_2 et c+V de A_2 à O. $t_2 = \frac{L}{c + V} + \frac{L}{c - V} = \frac{2Lc}{c^2 - V^2}$
- 16. Dans R° la distance OO' est Vt_1 et la longueur parcourue par la lumière est ct_1 . Le théorème de Pythagore s'écrit $\left(\frac{ct_1}{2}\right)^2 = L^2 + \left(\frac{Vt_1}{2}\right)^2$ donc $t_1 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - V^2}}$.
- 17. $\Delta t = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{1 V^2/c^2} \frac{1}{\sqrt{1 V^2/c^2}} \right) \text{ d'où, si } \frac{V}{c} \ll 1, \ \Delta t \approx \frac{L}{c} \frac{V^2}{c^2}.$



- 18. En coin d'air, si on observe par exemple au voisinage de M1, on observe des franges rectilignes associées à l'épaisseur variable du « coin d'air ». Si on ne tenait pas compte de Δt , la frange passant par A_1 serait lumineuse puisque la différence de marche y est nulle. Δt non nul correspond à ajouter un retard d'une fraction $\frac{\Delta t}{T} = \frac{c\Delta t}{\lambda}$ de la période. Une variation d'une période correspondrait à un décalage d'un interfrange. Ici, on a donc un décalage δX tel que $\frac{\delta X}{i} = \frac{c\Delta t}{\lambda} = \frac{L}{\lambda} \frac{V^2}{c^2}$
- 19. Le décalage n'est pas observable dans l'absolu car il n'est pas certain que les longueurs des bras soient identiques à une fraction de longueur d'onde près donc, même en l'absence de Δt , il n'y a pas, a priori, une frange lumineuse en A₁. Par contre, si on fait un quart de tour, on échange les rôles des deux bras de l'interféromètre ce qui revient à changer le signe de Δt et donc on doit observer un déplacement des franges double de celui qui a été calculé à la question 18.
- 20. Le déplacement attendu est $2\frac{L}{\lambda}\frac{V^2}{r^2} = 0,04$ frange.
- 21. $10^{-7}~{\rm m}$ d'allongement d'un bras correspond (aller-retour) à une différence de marche $2~10^{-7}~{\rm m}=0,4~\lambda~{\rm c'est-à-}$ dire un déplacement des franges de 0,4 interfrange. Le résultat attendu est complètement noyé dans les variations dues aux vibrations ou aux chocs subis par l'interféromètre. L'expérience ne peut pas permettre de conclure.
- 22. Les multiples allers-retours reviennent à prendre une valeur de L beaucoup plus grande. Sur la figure 3, on constate que la distance effective L correspond à 15 fois la distance cd c'est-à-dire presque 15 mètres. Le « support » en mercure isole sans doute des vibrations mais il permet surtout la rotation du dispositif sans nécessiter d'y toucher donc sans le déformer ou le faire vibrer. N.B. On remarque la présence de la compensatrice c et le miroir e' chariotable permettant de régler l'égalité des longueurs des bras.

- 23. Le déplacement attendu est maintenant environ 15 fois plus grand soit 0,6 interfrange. La précision de lecture (une graduation) est de 0,02 interfrange. La mesure qui ne montre pas de déplacement prouve donc bien que l'effet prévu est absent. Si on ne faisait qu'une seule mesure (à une seule date de l'année), le résultat nul pourrait être une coïncidence due au fait que la vitesse instantanée de la terre pourrait être nulle dans R°. En refaisant de nouvelles mesures à d'autres périodes de l'année cette coïncidence ne peut plus se produire puisque la vitesse de la terre change de direction. Alors que la formule de Fresnel (validée par l'expérience de Fizeau) appliquée à l'air mène à l'hypothèse que l'éther n'est pas entraîné par l'air, cette hypothèse est invalidée par l'expérience de Michelson-Morley. Le modèle de l'éther semble donc incapable de décrire la lumière. Le référentiel R° n'existe pas ou, plutôt, tout référentiel semble pouvoir jouer ce rôle. Le résultat négatif de l'expérience de Michelson montre que la lumière a une célérité c dans le référentiel terrestre.
- **24.** En remplaçant v_r par c, $v_a = \frac{v_e + c}{1 + \frac{v_e}{c}} = c$! $v_a = \frac{v_e + c / n}{1 + \frac{v_e}{nc}} = \frac{c}{n} \left(\frac{1 + nv_e / c}{1 + \frac{v_e}{nc}} \right) \approx \frac{c}{n} \left(1 + \frac{nv_e}{c} \frac{v_e}{nc} \right) = \frac{c}{n} + v_e \frac{v_e}{n^2} = \frac{c}{n} + v_e \left(1 \frac{1}{n^2} \right).$
- 26. La formule précédente est exactement celle de Fresnel. Par contre sa justification ne repose pas sur la présence de l'éther (qui était incohérente avec l'expérience de Michelson) mais sur la cinématique relativiste qui (questions 24 et 25) est cohérente à la fois avec l'expérience de Michelson et celle de Fizeau. Fizeau avait raison, de mettre en doute les hypothèses de Fresnel.

 $A_1(t)$

0

- 27. Dans le triangle isocèle $\Lambda_1(t)$ O $\Lambda_2(t+\delta t)$ la longueur de la base est $2R\sin\frac{\theta}{2}$. Or θ correspond à l'angle $\Lambda_1\mathrm{O}\Lambda_2$ dans le carré augmenté de $\Omega\delta t$ à cause du déplacement de Λ_2 pendant δt . Soit $\theta=\frac{\pi}{2}+\Omega\delta t$.
- 28. Par ailleurs, la distance calculée ci-dessus est parcourue par la lumière pendant la durée δt donc $c\delta t = 2R\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Omega\delta t}{2}\right)$. On suppose $\Omega\delta t \ll 1$ et on utilise un développement limité à l'ordre 1: $\sin\left(\frac{\pi}{4} + \varepsilon\right) \approx \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + \varepsilon\cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}}(1+\varepsilon) \text{ qui permet d'écrire } c\delta t = a\left(1 + \frac{\Omega\delta t}{2}\right) \text{ d'où :}$ $\delta t = \frac{a}{c \frac{\Omega a}{2}} \approx \frac{a}{c}\left(1 + \frac{\Omega a}{2c}\right). \text{ Remarque : } \frac{\Omega a}{2c} \ll 1 \text{ est ici équivalent à } \Omega\delta t \ll 1 \text{ car } \delta t \sim \frac{a}{c}.$
- 29. La durée de parcours complet du carré est $t^+=4\delta t \approx \frac{4a}{c}+\frac{2\Omega a^2}{c^2}$. Pour le parcours dans le sens inverse, il suffit de changer Ω en $-\Omega$ et, alors $t^+-t^-\approx \frac{4\Omega a^2}{c^2}$.
- 30. L'ordre d'interférence est $p=rac{arphi}{2\pi}=rac{\omega\left(t^{+}-t^{-}
 ight)}{2\pi}=rac{c}{\lambda}\left(t^{+}-t^{-}
 ight)pproxrac{4\Omega A}{c\lambda}$.
- 31. Voir le dessin à côté de la notice de Georges Sagnac. Par inversion du sens de rotation de l'interféromètre, on passe de $p=\frac{4\Omega A}{c\lambda}$ à $p=-\frac{4\Omega A}{c\lambda}$ soit une variation de $\frac{8\Omega A}{c\lambda}=0,079$. C'est parfaitement en accord avec un décalage de 0,077 interfrange (moins de 3% d'écart).
- 32. Le vecteur rotation de la Terre a pour module $\Omega_T = \frac{2\pi}{\text{période}} = \frac{2\pi}{1 \text{ jour sidéral}} = \frac{2\pi}{86164 \text{ s}}$ (voir le cours de MPSI). À la latitude β sa composante verticale est $\Omega_T \sin \beta$. Le décalage attendu des franges est $\frac{4\Omega_T \sin \beta A}{c\lambda} = 0,236$ interfrange en bon accord avec l'expérience. Admirez la mesure de position des franges à

mieux que 1/100 d'interfrange! On peut donc, grâce à l'effet Sagnac, repérer la rotation par rapport à un référentiel galiléen. Cela avait bien sûr été fait auparavant par des méthodes mécaniques (pendule de Foucault, déviation vers l'Est ...).