

LE JOURNAL DE PHYSIQUE

ET

LE RADIUM

SUR UN DÉPLACEMENT DE FRANGES ENREGISTRÉ SUR UNE PLATE-FORME EN ROTATION UNIFORME

Par MM. A. DUFOUR et F. PRUNIER.

Sommaire. — Dans une première série d'expériences, ici accessoires, mais qu'il fallait cependant réaliser, nous avons utilisé un circuit optique tout entier solidaire de la plate-forme tournante comme dans les travaux antérieurs de Sagnac. Dans ces conditions nous avons constaté que les déplacements de franges observés sont les mêmes à 6 % près, que la source lumineuse et le récepteur photographique soient entraînés dans la rotation de la plate-forme, comme dans les expériences de Sagnac, ou qu'ils restent fixes dans le laboratoire.

La seconde série d'expériences décrite ici a eu pour but d'étudier le déplacement des franges dû à la rotation, dans des conditions entièrement nouvelles caractérisées par le fait que le circuit optique des deux faisceaux interférents superposés est formé de deux parties en série, dont l'une reste fixe par rapport au laboratoire tandis que l'autre est solidaire de la plate-forme en rotation. Le déplacement des franges, obtenu dans ces conditions nouvelles, a été celui que permet de prévoir la théorie classique.

Dans le cas où le circuit optique est en entier solidaire du disque tournant, comme dans les expériences de Sagnac, l'observateur n'a pas le moyen de faire un choix entre les interprétations du déplacement des franges obtenu : s données respectivement par la théorie classique et par les théoriciens relativistes. Mais, dans le cas où il existe une partie du circuit qui reste fixe par rapport au laboratoire, le théoricien relativiste ne peut rester d'accord avec le théoricien classique, ni avec les résultats observés, en supposant, comme il l'avait fait jusqu'ici, que le centre, où il doit se supposer placé pour faire le calcul de l'expérience, peut être choisi arbitrairement sur la plate-forme tournante. Ce centre doit obligatoirement être confondu avec le centre de rotation de la plate-forme.

I. — Expériences dans lesquelles le circuit optique est tout entier solidaire de la plate-forme tournante.

1. **Expériences préliminaires.** — Afin de nous familiariser avec les difficultés expérimentales, nous avons d'abord répété l'expérience de Sagnac [1] dans laquelle tout l'appareil optique est, comme l'on sait, entraîné par le disque en rotation uniforme.

Nous avons employé, à cet effet, les miroirs mêmes qui avaient été utilisés par Sagnac dans ses mémorables expériences, mais la plate-forme qui nous a servi était deux fois plus large que la sienne. Elle avait ici 1 m de diamètre et pouvait tourner à une vitesse mesurable, ne dépassant pas toutefois 5 tours/sec, dans un sens, puis dans l'autre, autour de son axe de révolution disposé verticalement. Cet axe était défini par la droite passant par les pointes terminales de l'arbre rigide supportant le disque, pointes pivotant dans des godets graisseurs portés

par un bâti solide scellé au mur du laboratoire. Ce montage supprimait tout jeu lors de la rotation de l'appareil et permettait toutefois l'entretien facile de son mouvement sans vibrations nuisibles. Le couple moteur était fourni par une petite dynamo fixée au même mur; la transmission de ce couple était obtenue par l'intermédiaire d'une courroie agissant sur une poulie solidaire de l'arbre de la plate-forme. Ce matériel est resté le même pour toutes les expériences dont il sera ici question.

La figure 1 donne le schéma du dispositif optique porté tout entier par le disque et utilisé dans ces essais préliminaires. Il est à peu de chose près identique à celui de Sagnac et ne présente rien d'original. Le séparateur de Sagnac n'ayant pu être retrouvé a été remplacé ici par la glace, séparatrice et réceptrice R, non argentée, et recevant les rayons sous une incidence assez grande.

La lumière issue de la source S traverse le collimateur formé de l'ensemble de la lentille L et du

diaphragme o en son foyer, puis, après réflexion auxiliaire en m , vient donner les deux faisceaux interférents qui se séparent en C , centre du disque, pour parcourir en sens inverses, l'un le chemin $CMM'M''C$ et l'autre le chemin $CM''M'M'C$.

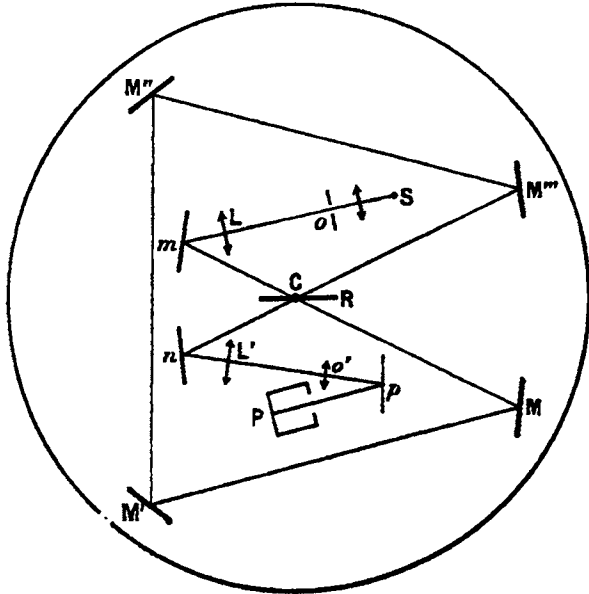


Fig. 1.

Après leur réunion en C , ces faisceaux sont renvoyés par le miroir auxiliaire n dans la lunette $L'o'$ qui permet d'obtenir, après une dernière réflexion auxiliaire en p , les franges réelles sur la plaque photographique p .

Par suite de la faible intensité disponible sur la plaque photographique, nous avons presque toujours dû opérer en lumière blanche avec des plaques *Agfa* panchromatiques de grande sensibilité. Il en résulte que les mesures de déplacements de franges faites sur tous nos clichés sont évidemment affectées d'erreurs peu importantes et variables en rapport avec la composition spectrale de la lumière utilisée et avec la sensibilité sélective des émulsions des diverses séries de plaques pour les différents longueurs d'onde. Malgré cette imperfection, la signification des résultats obtenus reste ici entière au point de vue qualitatif. D'ailleurs, même au point de vue quantitatif, les variations extrêmes des résultats numériques d'une même série d'enregistrements ne dépassant jamais 12 pour 100 de la valeur moyenne, l'ordre de grandeur de celle-ci reste donc valable et doué de signification.

Les expériences faites avec le dispositif de la figure 1 nous ont justement servi à étalonner les indications des enregistrements photographiques en fonction de la valeur de l'effet Sagnac en lumière blanche pour les plaques particulières que nous avons utilisées.

Pour chaque sens de rotation, la durée de pose était d'une fraction de seconde. La connaissance de la vitesse de rotation constante pendant les poses était obtenue par la mesure du nombre de tours effectués par la plate-forme durant 2 min relevées à un compteur à seconde. On enregistrerait sur la même plaque les franges obtenues, d'abord pour un sens de rotation, puis pour l'autre sens. La commande magnétique à distance de deux petits volets permettait de protéger successivement chaque moitié de la plaque contre l'action de la lumière. On obtenait ainsi les deux systèmes de franges correspondant aux deux sens de rotation séparés l'un de l'autre par une ligne fine facilitant leur comparaison. La mesure des interfranges et du décalage des franges a été effectuée par pointés à la machine à diviser.

La moyenne de neuf enregistrements de l'effet Sagnac ordinaire nous a donné ainsi pour valeur de cet effet 0,082 interfrange pour une vitesse angulaire de 1 tour/sec pour les deux sens de rotation, la source lumineuse étant un filament de lampe à incandescence moyennement poussé.

L'ordre de grandeur ainsi observé pour l'effet Sagnac ordinaire apparaît bien d'accord avec ce qu'on pouvait prévoir en tenant compte de la position du centre de gravité approximatif dans le spectre, de l'action de la lumière sur les plaques panchromatiques utilisées; ce centre de gravité définit d'ailleurs la longueur d'onde efficace pour le calcul du phénomène. Dans la formule de Sagnac, qui donne en fraction d'interfrange la valeur δ du décalage total des franges pour les deux sens de rotation $\delta = \frac{16\pi NA}{C\lambda}$,

N est le nombre de tours/sec de la plate-forme, A est la valeur de l'aire intérieure au parcours fermé $CMM'M''C$ de la figure 1, c est la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde utilisée. Dans nos expériences, l'aire A était d'environ 2840 cm². Les résultats expérimentaux obtenus nous ont ainsi permis d'en déduire pour la longueur d'onde efficace λ une valeur d'environ 0,57 μ quand la source est constituée par un filament incandescent moyennement poussé, 0,54 μ s'il est plus brillant, 0,45 μ si cette lumière blanche a traversé un écran Schott en verre bleu, ne laissant passer que la région du spectre allant de 0,5 à 0,36 μ .

2. **Expériences faites avec une source lumineuse restant fixe dans le laboratoire.** — La première question que nous avons envisagée a été de rechercher si l'entraînement de la source qui crée la lumière était indispensable à la production du phénomène.

Nous avons alors réalisé le dispositif dont le schéma est donné par la figure 2. Les caractéristiques de ce montage sont d'utiliser la lumière d'une source fixe dans le laboratoire et d'envoyer cette lumière sur les parcours optiques solidaires de la plate-forme en rotation, sous la forme d'éclairs se répétant à

chaque tour du disque quand il passe dans une même position.

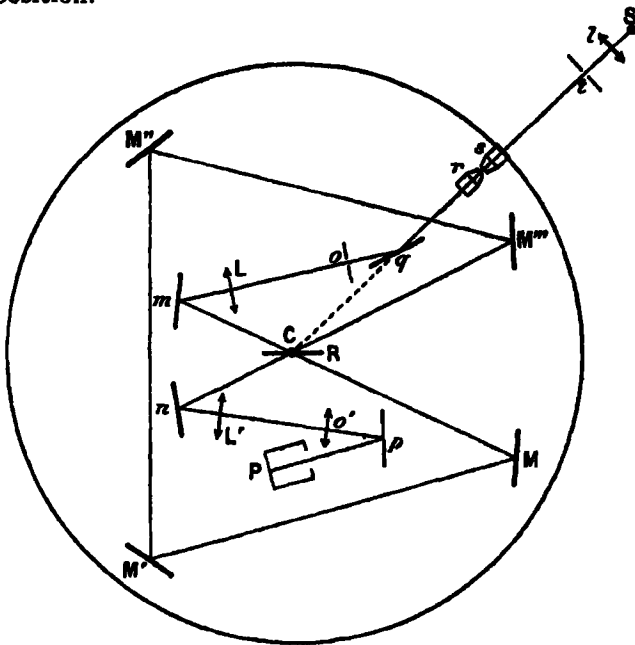


Fig. 2.

A cet effet, la lumière issue de la source S traverse la lentille *l*, le diaphragme *t* et l'objectif de microscope *s*, tous ces organes étant maintenus fixes dans le laboratoire. Un autre objectif de microscope *r*, identique au précédent, est solidaire de la plate-forme tournante et donne en *o*, grâce à la réflexion auxiliaire *q*, une image du diaphragme *t* égale à celui-ci, quand la plate-forme a justement la position indiquée dans la figure. La droite *Ssrq* est orientée de manière que son prolongement passe par le centre *C* de rotation, afin que les objectifs *r* et *s* travaillent dans de bonnes conditions au moment de l'éclair.

Si *v* est la vitesse linéaire de l'objectif *r* et *g* son grandissement, la vitesse linéaire de l'image du diaphragme *t* sur le diaphragme *o* aura pour valeur approchée *vg*. La durée τ de l'éclair sera donc de l'ordre de $\tau = \frac{v \cdot g}{\lambda}$ si *d* est le diamètre, ici commun, des

diaphragmes *o* et *t*. Dans nos expériences, *Cr* = 45 cm; *g* = 10; *d* = 1,5 mm, ce qui donne, pour une vitesse angulaire de l'ordre de 4 tours/sec, $\tau = 1,3 \cdot 10^{-3}$ sec environ.

Ainsi, même à cette vitesse, à chaque éclair, la durée τ du faisceau lumineux utile est bien supérieure au temps de parcours de la lumière le long du circuit optique. Celui-ci a, en effet, environ 3 m de long; il est par conséquent parcouru par la lumière en 10^{-8} sec. Chaque faisceau fait donc au moins 1300 fois le tour du circuit optique durant un éclair. Les franges ont ainsi largement le temps de se former sur la plaque photographique. Toutefois, pour obtenir une impression photographique suffisante dans ces conditions expérimentales, les poses devront être plus longues que dans le cas de la source entraînée. Il a fallu poser ici environ 5 min pour chaque sens de rotation, en utilisant la même source de lumière blanche que ci-dessus.

Les enregistrements que nous avons réalisés ainsi montrent un décalage des franges net et tout à fait comparable à celui fourni par le montage classique de Sagnac. La moyenne des résultats des mesures faites sur une série de neuf clichés a conduit à la valeur 0,088 interfrange pour le décalage des franges correspondant aux deux sens de rotation et à une vitesse angulaire de la plate-forme de 1 tour/sec. Les écarts des résultats individuels atteignent au plus 15 pour 100 de cette moyenne. On voit qu'à 5 ou 6 pour 100 près, le décalage moyen observé est ici de même valeur que celui obtenu ci-dessus avec le montage ordinaire de Sagnac.

Les spécimens d'enregistrements reproduits ici dans la figure 3 représentent, agrandis quatre fois, deux des clichés originaux. Les sens de rotation relatifs respectivement aux parties supérieures et inférieures d'un même cliché sont opposés. Le cliché 57 (vitesse de rotation 4,13 tours/sec) montre l'effet Sagnac obtenu avec le dispositif classique où la source est entraînée par le disque. Le cliché 45 (vitesse de rotation 4,39 tours/sec) est un enregistrement obtenu dans les conditions actuelles, c'est-à-dire quand la source est fixe dans le laboratoire. On voit que le décalage des franges est sensiblement le même dans ces deux preuves.

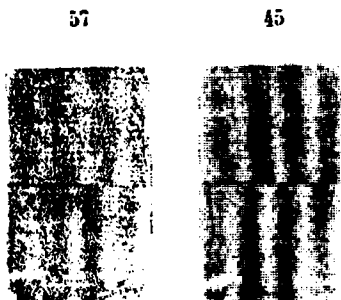


Fig. 3.

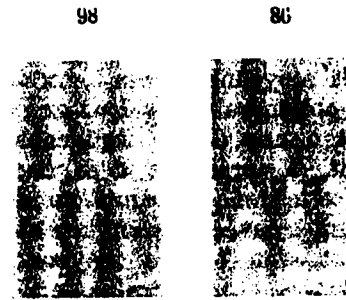


Fig. 4.

En résumé, ces dernières expériences démontrent qu'il est permis d'utiliser pratiquement la lumière émise par une source n'appartenant pas au système du disque mobile, lors de l'étude de la propagation de la lumière sur ce disque pour un observateur entraîné dans la rotation, notable quoique assez lente, de la plate-forme, sans que les résultats expérimentaux soient modifiés pour lui d'une manière appréciable.

3. Expériences faites en utilisant une source et un enregistreur photographique restant fixes dans le laboratoire. — On pouvait même se demander si le phénomène interférentiel restait le même pour l'observateur entraîné dans la rotation et pour un observateur maintenu fixe dans le laboratoire.

Pour effectuer cette étude, le dispositif représenté schématiquement dans la figure 2 a subi les modifications suivantes : le miroir p étant supprimé, la lunette formée de l'objectif L' et de l'oculaire o' ainsi que la chambre photographique P ont été enlevées de la plate-forme et fixées à un support immobile scellé au mur du laboratoire, de manière à se trouver placées en ligne droite aux endroits convenables sur le trajet de la lumière réfléchi par le miroir n au moment de l'éclair. Dans cette disposition, la source lumineuse et l'observateur opérant la photographie des franges avec lunette et chambre photographiques, sont fixes tous deux par rapport au laboratoire.

Mais pendant la durée de l'éclair, très courte quoique non nulle, la plate-forme a tourné d'un petit angle et les franges obtenues sur la plaque photographique ont subi une légère modification car lunette et plaque sont immobiles, tandis que l'interféromètre tourne. Pour éliminer dans la mesure du possible l'effet de cette cause d'erreur, nous avons utilisé le changement connu de signe de l'effet Sagnac quand on fait pivoter d'un petit angle ε autour d'un axe vertical la glace séparatrice R de part et d'autre de sa position moyenne fournissant la frange centrale étendue dans tout le champ interférentiel. Pour les clichés obtenus quand l'angle ε est positif, le décalage des franges dû à la rotation de l'interféromètre durant l'éclair s'ajoutera, par exemple, à l'effet Sagnac. Au contraire, pour les clichés obtenus quand l'angle ε est négatif, le décalage des franges dû à la rotation se retranchera de l'effet Sagnac. En prenant la moyenne de ces deux séries d'enregistrements, on obtiendra une valeur de l'effet Sagnac correspondant à une durée négligeable de l'éclair. Naturellement, la précision des résultats se ressent un peu de cette difficulté supplémentaire. Malgré cela, les valeurs trouvées restent semblables aux précédentes. C'est ainsi que la moyenne du décalage des franges donné par une dizaine de clichés dans chaque série pour les deux sens de rotation et pour une vitesse angulaire de 1 tour/sec est égale

à 0,098 interfrange pour un certain signe de ε , et à 0,084 interfrange pour l'autre signe de ε . La moyenne de ces deux valeurs est 0,091 interfrange, ne différant que de 3 à 4 pour 100 du nombre obtenu précédemment dans le cas où la source lumineuse était fixe dans le laboratoire.

Les spécimens 98 et 86 (vitesse angulaire d'environ 3,7 tours/sec), donnés dans la figure 4, représentent agrandis quatre fois, deux des clichés originaux obtenus dans ces conditions, et pour lesquels le sens de rotation de la plate-forme est le même en ce qui concerne les régions supérieures des enregistrements; pour les parties inférieures de ces spécimens le sens de rotation est opposé au précédent. L'angle ε était d'un certain signe pour le cliché 86, du signe contraire pour le cliché 98. On se rend compte, à simple vue, que la moyenne des valeurs absolues des décalages de franges sur les clichés 86 et 98 est du même ordre de grandeur que le décalage des franges décelé par le cliché 45 de la figure 3.

Ce résultat est lié au fait que la plate-forme tourne d'un très petit angle pendant la durée de l'éclair.

II. — Expériences dans lesquelles le circuit optique comprend, en série, une partie fixe dans le laboratoire et une partie entraînée par la plate-forme en rotation.

1. Essais préliminaires. — La figure 5 donne,

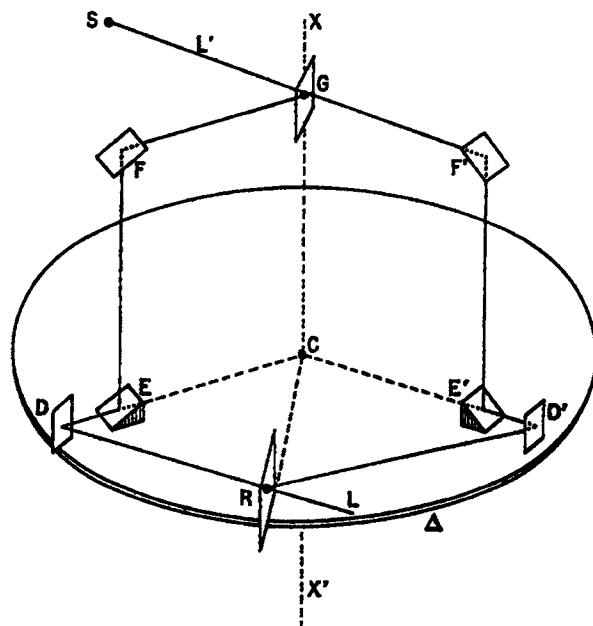


Fig. 5.

en perspective, le schéma du premier dispositif que nous avons essayé.

La lumière issue de la source S traverse le collima-

teur L' non dessiné et vient fournir, par l'action de la glace séparatrice G, les deux faisceaux interférents à trajets distincts, l'un GFEDR et l'autre GF'E'D'R. Les franges sont observées dans la lunette L.

La source S, le collimateur L' et les miroirs G, F, F' sont fixes dans le laboratoire. Les autres miroirs, ainsi que la lunette L et la plaque photographique sont portés par la plate-forme et tournent avec elle. Par conséquent, seules les portions EDR et E'D'R du parcours de la lumière sont solidaires du disque en rotation. Enfin, la disposition des miroirs est supposée parfaitement symétrique par rapport au plan GCR dans lequel la droite CG est confondue avec l'axe de rotation XX' du disque.

L'expérience réalisée conformément à ce montage n'a pu conduire à des enregistrements effectifs, car il a fallu opérer en lumière monochromatique dont l'intensité aurait été insuffisante ici pour impressionner la plaque sans durées de pose excessives, et surtout parce que les moindres trépidations du sol brouillaient le système de franges, ce qui aurait supprimé toute signification à la discussion des résultats.

2. Dispositif effectivement utilisé. — Les inconvénients précédents résultaient du fait que les deux faisceaux interférents suivaient des chemins distincts. Ils ont disparu quand nous avons obligé les deux faisceaux à suivre le même parcours en sens opposés.

La figure 6 donne, en perspective, le schéma du montage expérimental qui nous a servi. Le colli-

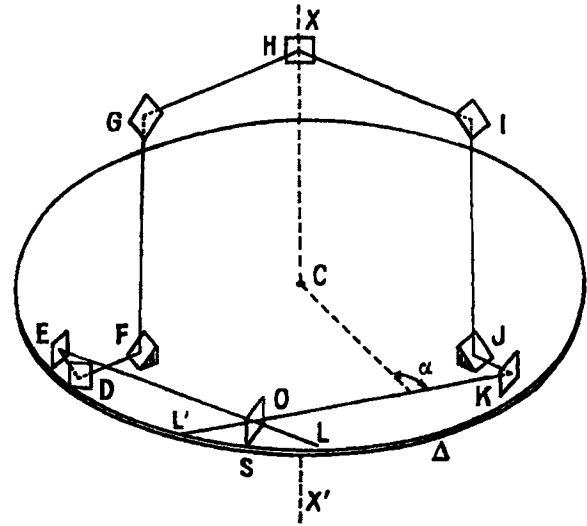


Fig. 6.

mateur L' et la lunette L non dessinés, la glace S (séparatrice et réceptrice) où est supposé se trouver l'observateur O, les miroirs plans K, J, D, E, F sont tous solidaires de la plate-forme et tournent avec

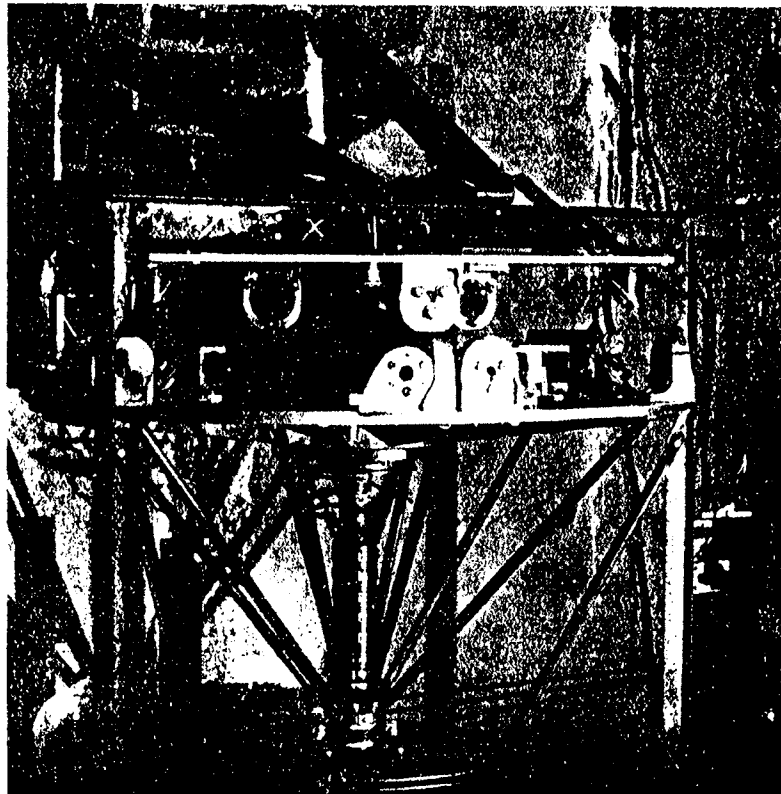


Fig. 7.

elle. La glace plane S est à peu près à égale distance des miroirs F et J. D'autre part, les longueurs radiales CF et CJ sont égales entre elles. Les miroirs plans G, H, I restent fixes dans le laboratoire. Pour tous les miroirs autres que F, G, I, J, les plans d'incidence sont horizontaux, parallèles à la plate-forme. Seuls les plans d'incidence des miroirs F, G, I, J sont verticaux et contiennent l'axe de rotation X $\overline{C}X'$. Ces derniers miroirs sont inclinés à 45° sur la verticale, le miroir F se trouvant parallèle au miroir G, et le miroir J parallèle au miroir I au moment de l'éclair en lumière blanche fourni par une source non dessinée, fixe dans le laboratoire et constituée par le cratère positif d'un arc à charbons. Enfin, les longueurs FG et IJ sont parallèles à l'axe de rotation, égales entre elles et de valeur 10 cm.

L'un des faisceaux interférents suit le chemin SKJ sur le disque, puis JIHGF (parcours restant fixe dans le laboratoire), et revient par le trajet FDES effectué sur le disque. L'autre faisceau marche en sens inverse du précédent sur le même parcours. Les franges sont enregistrées sur une plaque photographique liée à la plate-forme Δ et située dans le plan focal de la lunette L.

La figure 7 reproduit une photographie du dispositif expérimental tel qu'il nous a servi. La source lumineuse n'y est pas visible, se trouvant trop à gauche, hors du champ. Le disque tournant, d'axe vertical, est surmonté d'une seconde plate-forme fixée au bâti scellé au mur du laboratoire et qui porte les miroirs de l'étage supérieur. Ceux-ci sont, en réalité, au nombre de cinq et non de trois comme l'indique la figure schématique 6. En effet, dans l'impossibilité évidente de placer un miroir plan fixe H sur l'axe même de rotation de la plate-forme tournante, ce miroir unique H a été remplacé, en fait, par trois miroirs plans qu'on aperçoit dans la figure 7 et qui permettent aux faisceaux interférents de contourner l'arbre de la plate-forme mobile, pour ne pas être interceptés par lui. Mais comme le parcours supérieur des faisceaux est fixe dans le laboratoire, et que les azimuts des plans d'incidence des miroirs G, I sont restés inchangés, il est plus commode d'utiliser dans le raisonnement (et c'est ce que nous ferons), le miroir plan fictif H de la figure 6, en remplacement des trois miroirs réels fixes de la figure 7 qui lui sont équivalents dans l'expérience.

On peut se demander toutefois s'il est raisonnable d'espérer obtenir des franges utilisables avec un tel interféromètre déjà assez compliqué et dont les deux parties sont en mouvement relatif notable. Il faut donc, de toute nécessité, arriver à obtenir des franges suffisamment définies, restant inchangées pendant la durée des éclairs, et ceci malgré le mouvement de la plate-forme tournante.

Ces deux conditions ont pu être satisfaites en constituant l'étage supérieur du dispositif par un nombre impair de miroirs plans et en dotant l'appa-

reil du miroir plan supplémentaire D. Voici les raisons qui ont motivé de telles dispositions :

1° Pendant la durée, courte, mais non nulle, de l'éclair lors de la rotation de la plate-forme, la direction du faisceau lumineux incident ne change guère, mais les miroirs F et J solidaires du disque tournant se sont un peu déplacés par rapport aux faisceaux qu'ils reçoivent respectivement de l'étage supérieur. Or, les franges utilisées sont localisées à l'infini et chacune d'elles est fournie par tout un groupe de rayons. Pour que ces franges ne subissent pas de modifications, il faut que l'ensemble des rayons de chaque faisceau interfèrent reste dans les mêmes positions relatives par rapport aux miroirs qu'ils rencontrent, condition qui concerne tout particulièrement les miroirs à 45° F et J solidaires du plateau tournant. Or, si l'on observe en J la tache lumineuse fournie par le faisceau marchant dans le sens de F à G vers J, et la tache lumineuse en F fournie par le faisceau marchant en sens contraire de J à I vers F, l'on constate que ces taches lumineuses se déplacent un peu par suite de la rotation de la plate-forme mobile Δ , et en sens inverses quand le miroir fictif H est remplacé par un nombre pair de miroirs plans, deux par exemple, pour transmettre la lumière de G à I et de I à G. Dans de telles conditions, on peut bien obtenir des franges (le miroir D étant alors supposé inexistant), mais ces franges se rétrécissent ou s'élargissent suivant le sens de la rotation, même très lente, imprimée à la plate-forme mobile. Ces modifications de franges résultent du fait que le groupe des rayons lumineux ne rencontre pas chacun des miroirs F et J toujours dans les mêmes positions relatives lors de la rotation de la plate-forme.

Mais si le parcours optique de G à I et de I à G est réalisé cette fois dans l'étage supérieur par un nombre impair de miroirs plans, il y a changement de sens du déplacement en F ou J pour l'un des faisceaux, de sorte que pendant la durée de l'éclair, les régions d'arrivée des faisceaux sur les miroirs F et J accompagnent bien ces derniers pendant leur rotation. Et les franges qu'on obtient alors (le miroir D étant supposé remis en place, on verra pourquoi plus loin) restent inchangées pendant la durée de l'éclair si la vitesse de rotation est négligeable, ainsi que le montre le cliché 142 (ici agrandi environ quatre fois) de la figure 9.

2° Si le miroir plan D n'existait pas, le nombre des miroirs situés sur les trajets lumineux serait impair, ici égal à 9; et l'on sait que dans ce type d'interféromètre, le nombre des miroirs doit être pair pour que les rayons correspondants se retrouvent sur la glace séparatrice. La présence de ce miroir est donc nécessaire pour que les rayons qui se sont séparés aux divers points de la lame séparatrice ne fournissent pas à leur retour sur cette lame deux faisceaux retournés l'un par rapport à l'autre.

3° Mais l'existence du miroir supplémentaire D est rendue obligatoire pour un autre motif : son rôle est aussi de compenser la modification des points d'impact des rayons sur les miroirs à 45° F et J, modification due au déplacement de ces miroirs pendant la durée des parcours de la lumière au-dessus de la plate-forme mobile Δ , dans l'étage supérieur porté par une autre plate-forme fixe dans le laboratoire.

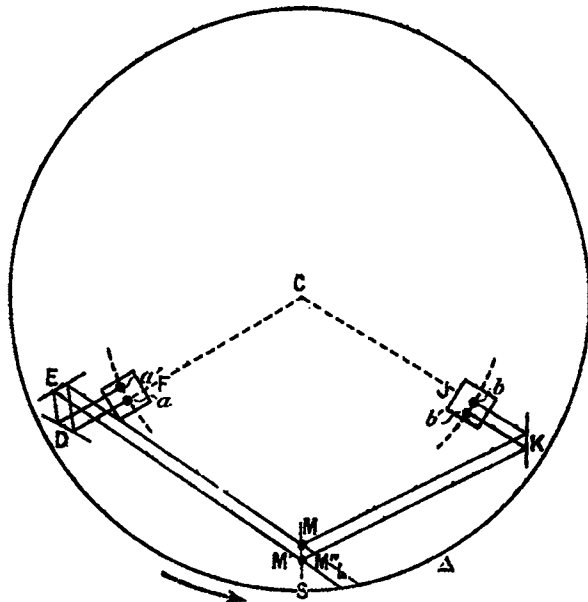


Fig. 8.

La figure 8 représente, à cet effet, la plate-forme tournante vue en plan. En a et b sont marqués les points respectifs de départ et d'arrivée des faisceaux interférents, réduits ici à un seul rayon, la plate-forme étant supposée immobile, et le réglage étant tel que les rayons de retour provenant d'un rayon incident viennent se couper sur la glace séparatrice. Dans ces conditions, le rayon circulant dans le sens direct part de M , arrive en a sur le miroir F, monte à l'étage supérieur, redescend en b sur le miroir J et revient en M . Le rayon circulant dans le sens opposé arrive en b sur le miroir J, monte à l'étage supérieur, redescend en a sur le miroir F et revient en M . La frange correspondante est vue dans la direction ML .

Supposons maintenant que le disque Δ soit animé de la vitesse angulaire ω dans le sens indiqué par la flèche. Soient encore a et b , dans ces nouvelles conditions, les points de départ respectifs des rayons interférents se dirigeant vers l'étage supérieur.

Faisons abstraction pour l'instant dans ce qui suit, de ce qui peut se passer dans ce parcours supérieur des rayons.

Pendant la durée du trajet de la lumière en dehors du disque Δ , celui-ci aura tourné d'un certain angle.

Le rayon parti de a ne reviendra plus en b , mais en b' sur le miroir J et suivra ensuite le chemin $b'KM'$ supposé tracé sur la plate-forme Δ elle-même. Le rayon parti de b vers l'étage supérieur ne reviendra plus en a , mais en a' sur le miroir F, et suivra ensuite le chemin $a'DEM''$ supposé tracé sur la plate-forme Δ elle-même. Si la glace séparatrice est à égale distance des miroirs F et J, l'on a $aa' = bb'$.

Il convient de remarquer que les rayons de retour gardent une même direction, à condition de les supposer tracés sur la plate-forme Δ , que celle-ci tourne ou ne tourne pas.

De ce parallélisme et de la condition $aa' = bb'$, on déduit que les rayons de retour $b'KM'$ et $a'DEM''$ coupent la glace séparatrice au même point, de sorte que M' et M'' sont confondus. Il en résulte aussi que la frange à l'infini correspondante reste, sur le disque Δ , dans la même direction ML que lorsque la plate-forme était immobile. Mais la question qui se pose aussitôt est de savoir si l'aspect de la frange est resté inchangé.

Deux hypothèses sont alors à envisager :

Première hypothèse. — La vitesse de la lumière sur la plate-forme reste constante et égale à c , que cette plate-forme soit immobile ou en mouvement. La fréquence lumineuse conservant sur le disque une valeur constante, l'on déduit, dans ce cas, du parallélisme signalé ci-dessus, que les rayons de retour arrivant en $M'M''$ sont, vis-à-vis l'un de l'autre, dans les mêmes conditions relatives de phases que si la plate-forme ne tournait pas. Il en résulte que les franges enregistrées par la plaque photographique ne sont modifiées ni en aspect, ni en position par le seul fait de la rotation de la plate-forme Δ .

Deuxième hypothèse. — La vitesse de propagation de la lumière sur la plate-forme tournante dépend du sens dans lequel elle chemine. Dans ce cas, la marche des rayons, tracée sur la plate-forme, ne change pas, il est vrai, mais un nouveau facteur intervient : c'est le retard apporté entre les rayons lumineux par l'inégalité des vitesses de propagation de la lumière, retard qui modifie l'ordre d'interférence de la frange visée dans la direction restée cependant constante ML . Il en résulterait donc ici l'équivalent d'un déplacement effectif des franges sur la plaque photographique.

Mais, en définitive, on voit que, dans ces deux hypothèses, la modification des positions des points de retour a' et b' des rayons, résultant de la rotation, ne peut, à elle seule, déterminer une variation quelconque de l'aspect ou de la position des franges sur la plaque photographique solidaire de la plate-forme mobile.

Dans le cas plus général où les deux rayons interférents quitteraient l'un après l'autre les points a et b , un raisonnement analogue au précédent montrerait que les points M' et M'' ne seraient plus confondus, mais la conclusion donnée ci-dessus serait toujours valable.

Enfin, il convient de signaler l'existence possible d'un effet d'aberration le long des trajets verticaux FG et JI de la figure 6. Mais la vitesse linéaire des miroirs entraînés F et J ne dépassant pas dans nos expériences 9 m/sec, l'obliquité qui pourrait en résulter pour les rayons FG ou JI n'atteint que 6 millièmes de seconde d'arc, et est considérée ici comme tout à fait négligeable.

En résumé, le dispositif ainsi complété ne détermine aucune modification dans l'aspect et la position des franges quand la vitesse angulaire de la plate-forme Δ dans un sens ou dans l'autre, est extrêmement petite. Il en résulte que si des expériences, faites quand la vitesse angulaire est notable, donnent une variation des franges sur la plaque photographique solidaire du disque mobile, il faudra en rechercher la cause dans l'influence du facteur vitesse relative du disque par rapport au laboratoire dans lequel il tourne.

3. Résultats expérimentaux. — Nous avons effectué dans les conditions précédentes, deux séries d'enregistrements, l'angle FCJ étant égal à 120° .

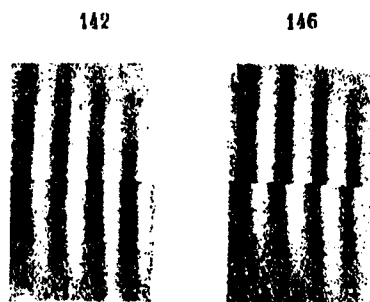


Fig. 9.

La seconde série ne diffère de la première que par les positions des miroirs verticaux de l'étage supérieur. Les vitesses de rotation ont varié de 1,43 à 4 tours/sec. Les poses successives dans les sens opposés de rotation ont été croisées de manière à éliminer autant que possible les variations accidentelles des franges pendant les 5 min que durait en tout chaque pose pour un sens de rotation. La source lumineuse était comme précédemment le cratère positif d'un arc à charbons. Les plaques étaient les mêmes que ci-dessus, des *Agfa* panchromatiques sensibles.

Le cliché 146 de la figure 9 représente, agrandi quatre fois, l'un des enregistrements réalisés, la vitesse de rotation étant d'environ 3,6 tours/sec. Les franges du haut et celles du bas de cette épreuve correspondent respectivement à des sens opposés de rotation de la plate-forme mobile Δ . Le décalage des deux systèmes de franges, nul pour le cliché 142 obtenu comme on l'a vu plus haut quand la vitesse de rotation est négligeable, est au contraire très apparent pour le cliché 146 correspondant à une vitesse angulaire notable.

Les mesures des divers clichés utilisés, faites à la machine à diviser, ont fourni les résultats suivants exprimant en interfranges le décalage mutuel δ des deux systèmes de franges pour les deux sens de rotation et une vitesse angulaire de 1 tour/sec pour la plate-forme mobile. La première série d'expériences a donné pour δ , comme moyenne des mesures de 15 enregistrements, la valeur $\delta = 0,058$. La seconde série, composée de 7 enregistrements, a fourni la valeur $\delta = 0,054$. Dans la première série, les valeurs individuelles de δ s'échelonnent entre $\delta = 0,052$ valeur minima et $\delta = 0,071$ valeur maxima. Celles de la seconde série, moins bonne que la première, restent entre $\delta = 0,046$ valeur minima et $\delta = 0,078$ valeur maxima.

Ces expériences mettent donc en évidence l'existence, dans ces conditions, d'un décalage des franges d'environ 0,056 interfrange en lumière blanche, pour les deux sens de rotation et une vitesse angulaire de 1 tour/sec. Bien que la précision des opérations ne permette pas de dépasser l'approximation de quelques pour cent sur la valeur moyenne, le phénomène est hors de doute et sa cause doit être recherchée dans l'influence de la vitesse de rotation de la plate-forme sur la propagation de la lumière, en faisant appel aux diverses interprétations possibles. C'est ce que nous allons envisager maintenant.

III. — Interprétation des résultats expérimentaux.

Rappelons d'abord les éléments des théories qu'il y a lieu d'appliquer ici.

La théorie classique suppose, comme l'on sait, que pour l'observateur lié au disque, la vitesse de la lumière en un point du disque tournant diffère de la vitesse c de la lumière dans le laboratoire, d'une quantité égale à $\pm v$, si v représente en valeur absolue la projection de la vitesse linéaire d'entraînement du point considéré sur la plate-forme, sur l'élément de parcours envisagé.

Nous utiliserons comme théorie relativiste de ces phénomènes, celle donnée par M. Langevin [2] en 1921 et rappelée par lui plus récemment [3]. Dans cette forme d'interprétation, l'observateur entraîné par le disque en mouvement est supposé adopter un temps central t qui est celui des observateurs galiléens par rapport auxquels le centre O choisi sur la plate-forme est immobile. (Remarquons en passant que ce centre choisi O n'est pas nécessairement le centre C de rotation de la plate-forme, mais qu'il est un point quelconque, arbitrairement choisi sur le disque.) La forme que prend l'invariant fondamental ds^2 implique une anisotropie dans la propagation de la lumière dont la vitesse varie avec la direction entre $C + \omega r$ et $C - \omega r$ au premier ordre d'approximation en ω . Dans ces expressions, ω est la vitesse angulaire de rotation de la plate-

forme, r est la distance du centre O arbitrairement choisi, au point de passage, sur le disque, du rayon lumineux considéré. M. Langevin trouve ainsi que la durée dt de parcours lumineux de longueur dl est donnée pour un sens de circulation de la lumière par l'expression $dt = \frac{dl}{c} + \frac{2\omega}{c^2} dA$, où dA est l'aire du triangle de base dl et de sommet le centre O arbitrairement choisi. En intégrant le long du parcours lumineux fini solidaire du disque tournant, et en tenant compte de l'autre sens de propagation, on peut en déduire la valeur du déplacement des franges attribuable au parcours considéré.

En définitive, les deux théories conduisent, comme l'on sait, respectivement aux prévisions suivantes pour ce qui concerne le trajet fini solidaire du disque tournant : le décalage attendu de ce chef pour les franges est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnel à une aire ayant pour base le chemin parcouru par la lumière sur la plate-forme mobile, mais dont le sommet n'est pas le même pour ces deux théories : en théorie classique, ce sommet est le point C centre de rotation de la plate-forme, et est indépendant de la position du point O, où est supposé se trouver l'observateur classique solidaire de cette plate-forme mobile; d'après la théorie relativiste rapportée plus haut, ce sommet est arbitraire; nous le choisissons, comme de juste, sur la glace S au même point O, où sera supposé se placer également l'observateur relativiste solidaire de la plate-forme mobile.

Nous avons alors à faire l'application de ces considérations aux deux cas suivants :

1° *Le circuit optique, fermé, est en entier solidaire du disque tournant.* — C'est le cas bien connu des expériences de Sagnac.

Les deux théories sont ici d'accord entre elles et d'accord avec l'expérience, en ce qui concerne le décalage total δ des franges enregistré sur le disque tournant. Toutefois, le théoricien classique et le théoricien relativiste ne sont pas d'accord entre eux sur la répartition qu'ils font, de la cause du phénomène, entre les divers éléments constitutifs du parcours total. Mais pour que l'opérateur physicien qui fait l'expérience ait la possibilité de faire un choix entre ces deux interprétations théoriques, il faudrait qu'il effectuât une mesure expérimentale directe de la vitesse de la lumière sur la plate-forme en rotation, opération qui est évidemment impossible à réaliser avec la précision nécessaire, dans l'état actuel de la technique.

2° *Une partie du circuit optique, fermé, est solidaire du disque tournant, l'autre partie du circuit optique restant fixe par rapport au laboratoire.* — Dans ces conditions, qui sont celles de nos expériences, le décalage des franges est dû évidemment au parcours optique solidaire du disque tournant. Nous allons calculer les valeurs qui lui reviennent d'après les deux théories.

Dans les expériences faites conformément au montage de la figure 6, l'aire comprise dans le secteur ayant pour base le trajet lumineux entraîné FDEOKJ et pour sommet le centre C de rotation de la plate-forme avait pour valeur totale algébrique (car l'aire du petit triangle de base ED dans cette figure doit être comptée comme négative), $A' = 1777 \text{ cm}^2$ environ, tandis que l'aire du secteur de même base du trajet lumineux FDEOKJ et dont le sommet est le point O où se trouve l'observateur entraîné par le disque, avait pour valeur totale algébrique

$$A = 168 \text{ cm}^2 \text{ environ.}$$

En introduisant ces valeurs numériques dans l'expression du décalage δ des franges, on trouve avec $\lambda = 0,56 \mu$, pour les deux sens de rotation et pour une vitesse angulaire de 1 tour/sec,

$$\delta = \frac{16\pi A'}{c\lambda} = 0,053 \text{ interfrange,}$$

d'après la théorie classique,

$$\delta = \frac{16\pi A}{c\lambda} = 0,005 \text{ interfrange,}$$

d'après la théorie relativiste; soit une valeur de δ environ dix fois plus petite, d'après cette dernière théorie que d'après la précédente.

La théorie relativiste semble donc être en désaccord complet avec la théorie classique et aussi avec le résultat fourni par l'expérience. Mais c'est que, comme paraissent le permettre les notes de Langevin rapportées plus haut, nous avons considéré que le centre où doit être supposé placé le théoricien relativiste peut être arbitrairement choisi. La théorie relativiste se retrouve au contraire d'accord avec la théorie classique et avec l'expérience si ce centre doit obligatoirement être confondu avec le centre de rotation du disque, le seul point du disque qui puisse être l'origine permanente d'axes galiléens non soumis au mouvement de rotation de l'ensemble. C'est d'ailleurs la conclusion à laquelle M. Langevin nous a dit être arrivé après avoir eu connaissance du résultat de nos expériences.

Manuscrit reçu le 1^{er} août 1942.

BIBLIOGRAPHIE.

[1] SAGNAC, *Journal de Physique*, 1914, t. 4, p. 177.
[2] LANGEVIN, *C. R. Acad. Sci.*, 1921, t. 173, p. 831.

[3] LANGEVIN, *C. R. Acad. Sci.*, 1937, t. 205, p. 304.

(Voir Note page suivante.)

NOTE.

M. Langevin nous fait remarquer que, si des observateurs liés à un point quelconque O du disque tournant peuvent se considérer comme immobiles lorsqu'il s'agit d'expériences du premier ordre en fonction de la vitesse angulaire de rotation ω , et c'est le point de vue auquel il s'est placé dans ses Notes de 1921 et de 1927, ils doivent au contraire, en théorie classique comme en relativité, tenir compte de leur distance r à l'axe de rotation C lorsqu'il s'agit d'expériences du

second ordre, ou lorsque, comme dans les expériences dont il s'agit ici, le dispositif expérimental n'est qu'en partie lié au disque tournant. Si l'on veut, en théorie relativiste, se placer au point de vue des observateurs O, il est nécessaire de considérer la partie du dispositif extérieure au disque, comme étant, au premier ordre, animée d'un mouvement de translation de vitesse ωr . Le raisonnement qui suppose cette partie immobile exige que les observateurs soient liés au centre C.

LES ÉCOULEMENTS GAZEUX CYLINDRIQUES

Par M. JEAN VILLEY,

Professeur à la Faculté des Sciences de Paris.

Sommaire. — L'auteur a donné, dans une Note antérieure (1), les expressions générales des différentielles logarithmiques des caractéristiques thermodynamiques (p, v, T) et de la vitesse (u) d'un gaz parfait en écoulement linéaire, en fonction des variations de section ds , de l'apport de chaleur δq par unité de masse, et de l'énergie δw décoordonnée par unité de masse, dans le parcours élémentaire, dx .

Ces équations sont utilisées ici pour étudier le cas particulier des écoulements dans une canalisation cylindrique ($ds = 0$).

Le cas particulier de l'adlabaticité ($\delta q = 0$) donne lieu à des observations intéressantes relatives à la vitesse sonique limite.

Les échanges de chaleur δq sont ensuite envisagés, soit qu'ils soient réglés en fonction de δw pour obtenir une évolution thermodynamique déterminée, soit qu'ils se produisent spontanément en fonction de l'écart de température ($T - T_0$) entre le gaz et le milieu extérieur.

Dans tous les cas, les diverses variations logarithmiques s'expriment en fonction de $\frac{\delta w}{u^2}$, déterminée elle-même en fonction du déplacement dx par la loi de Blasius qui résume les résultats de l'étude expérimentale des écoulements cylindriques turbulents. On peut alors traiter les divers problèmes pratiques par des calculs menés de proche en proche pour de petits déplacements finis successifs dx .

1. Écoulements cylindriques adiabatiques. — Les équations générales (5), (6), (7), (8) de l'écoulement linéaire d'un gaz parfait, données dans une Note antérieure (2), s'appliqueront au cas des écoulements cylindriques adiabatiques en y faisant $ds = \delta q = 0$. On peut d'ailleurs les réduire à trois, car l'équation

de continuité donne, pour une canalisation cylindrique $\rho \cdot u = \text{const}$, ou $\frac{u}{v} = \text{const}$, d'où $\frac{du}{u} = \frac{dv}{v}$, et il est inutile de conserver l'équation (6) qui devient identique à l'équation (5) lorsque les termes en ds ont disparu.

(1) *J. de Physique*, 1942, 3, p. 79.

(2) Précisons ici le calcul, effectué à partir des équations de base (1), (2), (3), (4) et dont on a seulement donné les résultats.

On a

$$U + p v = C T,$$

et l'on peut écrire (3) sous la forme

$$\frac{C T}{u^2} \frac{dT}{T} + \frac{du}{u} = \frac{\delta q}{u^2}.$$

Or

$$\gamma u^2 = \gamma R T,$$

d'où

$$C T = \frac{C}{\gamma R} \gamma u^2 = \frac{1}{\gamma - 1} \gamma u^2,$$

et (3) devient

$$\frac{1}{k} \frac{1}{\gamma - 1} \frac{dT}{T} = \frac{\delta q}{u^2} - \frac{du}{u}. \tag{3'}$$

De même, (4) peut s'écrire

$$\frac{du}{u} = - \frac{p v}{u^2} \frac{dp}{p} - \frac{\delta w}{u^2};$$

mais

$$\frac{p v}{u^2} = \frac{R T}{u^2} = \frac{1}{\gamma} \frac{\gamma u^2}{u^2} = \frac{1}{k \gamma},$$

et (4) devient

$$\frac{1}{k \gamma} \frac{dp}{p} = - \frac{\delta w}{u^2} - \frac{du}{u}. \tag{4'}$$

En portant dans (1) les résultats de (2), (3') et (4'), on obtient

$$- k \gamma \left(\frac{\delta w}{u^2} + \frac{du}{u} \right) + \frac{ds}{s} + \frac{du}{u} = k (\gamma - 1) \left(\frac{\delta q}{u^2} - \frac{du}{u} \right)$$

ou

$$\frac{du}{u} [-k \gamma + 1 + k (\gamma - 1)] = k (\gamma - 1) \frac{\delta q}{u^2} + k \gamma \frac{\delta w}{u^2} - \frac{ds}{s}$$

qui donne (5), et, de là (6), (7) et (8).