

# Études sur les forces de pression de la lumière

P. LEBEDEV\*

1901

Annalen Der Physik, 4. Vol 6, <sup>1</sup>.

## Table des matières

1 Les tests préliminaires.....	2
2 Le dispositif expérimental et l'appareillage.....	3
3 Les essais.....	6

Lors de l'élaboration de sa théorie électromagnétique de la lumière, Maxwell (1873) a également pris en considération les forces qui se produisent en tant que forces ponderomotrices dans un milieu polarisé électriquement ou magnétiquement ; comme conséquence nécessaire de sa théorie, il en résulte que ces forces doivent se produire dans un faisceau de rayons, et MAXWELL<sup>2</sup> dit :

« Dans un milieu où une onde se propage, il existe une pression dans le sens de la propagation qui est numériquement aussi grande en tout point que l'énergie présente dans ce milieu, rapportée à l'unité de volume »

O. HEAVISIDE,<sup>3</sup> H. A. LORENTZ<sup>4</sup>, E. COHN<sup>5</sup> et D. GOLDHAMMER<sup>6</sup> se sont récemment penchés sur la dérivation de ces forces de pression de MAXWELL du rayonnement électromagnétique.

BARTOLI (1876)<sup>7</sup> est arrivé à la même conclusion par un tout autre chemin, et, semble-t-il, sans connaître le résultat de MAXWELL : il donne des procédés circulaires qui doivent permettre de transférer, par des miroirs en mouvement, l'énergie rayonnante d'un corps plus grand à un corps plus petit, et il calcule le travail à fournir à cet effet selon le deuxième principe. La nécessité d'un travail lors du déplacement des miroirs dans la direction de la radiation incidente oblige à supposer des forces de pression exercées par cette radiation sur le miroir. BARTOLI a calculé l'importance de ces forces de pression ; son résultat

correspond parfaitement à celui obtenu par Maxwell.

La méthode de BARTOLI a été suivie par BOLTZMANN<sup>8</sup>, puis par le prince GALITZIN<sup>9</sup>, GUILLAUME<sup>10</sup>, pour calculer les forces de pression exercées par le rayonnement ; DRUDE<sup>11</sup> a étendu cette méthode aux corps absolument noirs.

Si un faisceau de rayons parallèles tombe normalement sur une surface plane, la grandeur de cette pression de MAXWELL-BARTOLI  $p$  est déterminée si la quantité d'énergie incidente  $E$  par unité de temps, la réflectivité  $\rho$  de la surface et la vitesse de propagation  $V$  du rayonnement sont connues ; on a alors

$$p = \frac{E}{V} (1 + \rho), \quad (1)$$

où  $\rho$  est compris entre 0 pour un corps absolument noir et 1 pour un corps absolument réfléchissant.

Ces forces de pression sont très faibles. MAXWELL et BARTOLI ont tous deux calculé que le rayonnement solaire, lorsqu'il tombe normalement sur 1 m<sup>2</sup>, exerce une pression qui est de 0,4 mg pour une surface parfaitement noire et de 0,8 mg pour un miroir plan.

Les suppositions selon lesquelles de telles forces de pression du rayonnement doivent exister ont déjà été formulées bien avant. Ainsi KEPLER (1619) croyait devoir chercher la force répulsive que le soleil exerce sur les queues des comètes dans les forces de pression de son rayonnement,

\*Professeur à l'Université de Moscou

1. Traduit de P. LEBEDEV, *Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes* DOI:10.1002/ANDP.19013111102 et mis en page par M. SCHNEIDER

2. J. C. MAXWELL, *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus* § 792. Deutsch von B. W einstein, Berlin 1883.

3. O. HEAVISIDE *Electromagnetic Theorie* 1. p. 334. London 1898.

4. H. A. LORENTZ, *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern* p. 29. Leiden 1895

5. E. COHN, *Das elektromagnetische Feld* p. 548. Leipzig 1900.

6. D. GOLDHAMMER, *Ann. d. Phys.* 4., p. 884. 1901.

7. A. BARTOLI, *Exner's Rep. d. Phys.* 21. p. 198. 1884, übersetzt aus *Nuovo Cimento* 15. p. 195. 1888.

8. L. BOLTZMANN, *Wied. Alm.* 22. p. 33, 291 u. 616. 1884.

9. B. GALITZIN, *Wied. Anu.* 47. p. 479. 1892.

10. CH.-ÉD. GUILLAUME, *Archives des Sc. phys., et natur. de Genève* 31. p. 121. 1894.

11. P. DRUDE, *Lehrbuch der Optik* p. 447. Leipzig 1900

une conception qui était en accord avec la théorie dominante de l'émission de la lumière et qui fut défendue avec zèle par LONGOMONTANUS (1622)<sup>12</sup>. La même raison conduisit EULER (1746)<sup>13</sup> à attribuer des forces de pression au rayonnement solaire et il tenta de justifier la nécessité de telles forces de pression à partir du mouvement de la lumière considéré comme une oscillation longitudinale.

De Mairan (1754)<sup>14</sup> a fait, avec DU FAY, des tentatives très intéressantes pour vérifier expérimentalement ces suppositions, mais il s'est vite rendu compte que le réchauffement de l'air ambiant ne permettait pas de démontrer avec certitude la force ponderomotrice directe de la lumière; pour les moyens auxiliaires du 18 siècle, l'admiration est grande. Les expériences de DE MAIRAN méritent la plus grande admiration. A. FRESNEL (1825)<sup>15</sup> a également entrepris de telles expériences et s'est heurté aux mêmes difficultés; une étude approfondie de phénomènes similaires a conduit CROOKES<sup>16</sup> à la découverte des forces radiométriques.

Les applications que les forces de pression de MAXWELL-BARTOLI du rayonnement peuvent acquérir aussi bien en physique qu'en astronomie font paraître tout à fait souhaitable une étude expérimentale de ces forces, car les déductions théoriques, aussi bien celles de MAXWELL que celles de BARTOLI, s'appuient sur certaines propriétés simples des surfaces absorbantes et réfléchissantes, et il pouvait encore sembler douteux que ces seules propriétés déterminent aussi les forces pondéromotrices qui se produisent pour les rayons lumineux. Ces questions ne peuvent être résolues que par d'autres études complémentaires; le moyen le plus simple pour atteindre le but est une expérience directe.

Les efforts de ZOLLNER<sup>17</sup> et de BARTOLI (l. c. p. 205) dans ce sens n'ont pas donné de résultat positif; c'est pourquoi j'ai entrepris l'étude expérimentale suivante des forces de pression de la lumière.<sup>18</sup>

## 1 Les tests préliminaires

Dans son manuel §798, MAXWELL dit :

*« La lumière électrique concentrée exercera probablement une pression encore plus grande (que le rayonnement solaire) et il n'est pas impossible que les rayons d'une telle lumière, lorsqu'ils tombent sur une mince feuille métallique finement suspendue dans un vide, exercent sur elle un effet mécanique observable ».*

Lorsque je voulus commencer mes expériences, le dispositif expérimental proposé par MAXWELL me sembla sans espoir, car ZÖLLNER<sup>19</sup> avait déjà emprunté cette voie sans succès et avait également attiré l'attention *« sur le fait que la valeur (de la pression de la lumière) obtenue théoriquement par MAXWELL était environ 10<sup>5</sup> fois plus petite que la valeur des résultats observée par CROOKES dans un cas particulier »*.<sup>20</sup> Même si l'on pouvait compter sur une réduction considérable de ces effets radiométriques perturbateurs, je pensais néanmoins que seul un dispositif dans lequel ces forces radiométriques seraient compensées pouvait conduire au but.

Dans l'étude des forces radiométriques, SCHUSTER<sup>21</sup> a démontré que ces forces sont des forces internes au radiomètre; RIGHI<sup>22</sup> a confirmé cette proposition d'une manière élégante : *« J'ai fait flotter un radiomètre sur l'eau, la tête en bas, de sorte que la cloche de verre du moulin repose sur le tube, ce qui empêche ce dernier de tomber de sa position normale, créant ainsi un frottement qui empêche le moulin de tourner. Lorsqu'un faisceau intense de rayons a été dirigé sur le moulin, je n'ai pas obtenu la moindre rotation (du radiomètre) »*. BERTIN et GARBE obtinrent le même résultat en répétant ces expériences.

J'ai utilisé le dispositif expérimental de RIGHI pour déterminer les forces de pression de MAXWELL-BARTOLI de la lumière de la manière suivante : entre deux couvercles circulaires découpés dans une tôle de nickel très mince, un morceau de mica était plié en un cylindre et serré – il se formait ainsi un corps de radiomètre cylindrique –, dans lequel se trouvait l'aile reliée de manière rigide à l'enveloppe. Ce radiomètre était suspendu à un fil de verre dans un ballon de verre évacué : si la lumière d'une lampe à arc était dirigée sur l'aile, on observait toujours des rotations du radiomètre<sup>23</sup> dont l'ordre de grandeur correspondait

12. Ygl. hierüber weiter unten bei De Mairan, p. 355–356.

13. L. EULER, Histoire de l'Académie Royale de Berlin 2. p. 121. 1746.

14. DE MAIRAN, Traité physique et historique de l'Aurore Boréale (Seconde Édition) p. 871. Paris 1754.

15. A. FRESNEL, Ann. de Chim. et de Phys. (2) 20. p. 57 u. 107. 1825.

16. W. CROOKES, Phil. Trans. 164. p. 501. 1874; die einschlägige Litteratur ist hier ausführlich angegeben.

17. F. ZÖLLNER, Pogg, Ann. 160. p. 154. 1877

18. Ein vorläufiger Bericht über diese Untersuchung findet sich in Rapports présentés au Congrès International de Physique Paris 2. p. 138. 1900.

19. F. ZÖLLNER, l. c. p. 155.

20. Bei seiner Berechnung hat Zöllner die Energie der Gesamtstrahlung einer Kerze zu klein angenommen. Vergleicht man die von E. NICHOLS (Wied. Ann. 60. p. 405. 1897) beobachteten radiometrischen Kräfte, mit denen aus den Strahlungsmessungen von K. ÅNGSTRÖM (Wied. Ann. 67. p. 647. 1899) für eine Hefnerlampe berechneten MAXWELL-BARTOLI'schen Druckkräften, so erhält man ein Verhältnis von ca. 10000.

21. A. SCHUSTER, Phil. Mag. (5) 2. p. 818. 1876.

22. A. RIGHI, in wörtlicher Uebersetzung angeführt bei BERTIN u. GARBE weiter unten p. 51

23. Si RIGHI, ainsi que BERTIN et GARBE, n'ont pas observé d'effet des forces de pression de MAXWELL-BARTOLI dans leurs expériences, c'est uniquement parce que leurs dispositifs expérimentaux, calculés sur des forces radiométriques beaucoup plus grandes, n'étaient pas suffisamment sensibles aux forces de la lumière.

24. Les résultats de ces essais préliminaires ont été présentés à la Société Vaudoise de Lausanne le 17 mai 1899 (Archives des Sc. phys. etnat. de Genève S. p. 184. 1899). La parution en temps utile de la note détaillée qui y était annoncée a été empêchée par des causes accidentelles et a

aux forces de pression de MAXWELL-BARTOLI.<sup>24</sup>

Lorsque, lors de ces essais, j'ai examiné les ailes du radiomètre en tant que telles, sans enveloppe de mica, j'ai constaté que les forces radiométriques qui se produisaient étaient bien inférieures à celles indiquées par ZÖLLNER et qu'elles représentaient elles-mêmes une perturbation nettement plus faible que les perturbations dues à la convection qui se produisent avec l'enveloppe du radiomètre, relativement très grande. J'ai donc abandonné cette méthode et repris les expériences sous la forme simple proposée par MAXWELL.

## 2 Le dispositif expérimental et l'appareillage

L'étude des pressions de MAXWELL-BARTOLI de la lumière se heurte à deux difficultés : les perturbations dues à la convection et les variations radiométriques. Aux dilutions les plus élevées, ces forces perturbatrices deviennent faibles, mais doivent néanmoins être prises en compte lors des mesures.

Les perturbations dues à la convection proviennent du fait que, lors de l'échauffement de l'aile par l'éclairage, les couches de gaz adjacentes s'échauffent également et provoquent un flux lentement ascendant ; si le plan de l'aile ne présente qu'une faible inclinaison (difficilement évitable) par rapport au plan vertical, le flux de gaz ascendant exerce sur l'aile une rotation qui ne dépend que de l'échauffement, mais pas de la direction dans laquelle les rayons chauffants sont incidents. La direction des rayons de la même source peut être éliminée en les dirigeant alternativement d'un côté et de l'autre de l'aile.

La perturbation par les forces radiométriques a été réduite au minimum en prenant un ballon de verre aussi grand que possible ( $D = 20$  cm)<sup>25</sup>, en excluant tous les rayons qui peuvent être absorbés par la paroi de verre du ballon par un filtre à rayons<sup>26</sup>, en fabriquant les ailes en tôle métallique mince pour une meilleure compensation de la chaleur et, en outre, en réduisant au maximum l'évacuation<sup>27</sup> à l'aide d'une pompe à mercure et de l'application de froid.

Si les forces radiométriques sont faibles, la correction correspondante peut être calculée de la manière suivante : les forces radiométriques sont directement proportionnelles à la différence de température entre la surface exposée et la surface sombre de l'aile, ou, pour deux ailes de même matériau et de même état de surface, à leur épaisseur<sup>28</sup> ; si nous faisons des observations identiques sur deux ailes

donc été supprimée.

25. Vgl. W. CROOKES, Phil. Trans. 170. p. 113. 1879.

26. Vgl. W. CROOKES, Phil. Trans. 168, p. 26G. 1878.

27. 1. c. p. 300.

28. Dans nos expériences, la différence de température entre l'aile exposée et le ballon était beaucoup plus grande que la différence de température entre les deux surfaces de l'aile. Quelle que soit la fonction des forces radiométriques proportionnelle à la première différence de température, leur effet ponderomoteur sur l'aile représente la différence sur les deux surfaces de l'aile et celle-ci est donc directement proportionnelle à la deuxième différence de température, avec une approximation suffisante.

29. PH. LENARD u. M. WOLF, Wied. Ann. 37. p. 456. 1889.

identiques d'épaisseur très différente, nous pouvons calculer quelle serait la déviation de la lumière si l'épaisseur de l'aile était nulle et donc si la force radiométrique était également nulle. J'aimerais tout de suite faire remarquer que cette correction ne peut être effectuée que pour les ailes platinées ; pour les ailes métalliques, les forces radiométriques étaient, contre toute attente, infiniment petites.

En plus des influences perturbatrices connues mentionnées, il ne faut pas négliger une hypothèse selon laquelle la pulvérisation des surfaces exposées à la lumière, démontrée par LENARD et WOLF<sup>29</sup>, pourrait provoquer des forces de réaction ponderomotrices notables, qui devraient toujours accompagner les forces de pression de MAXWELL-BARTOLI de la lumière ; mais ces forces de réaction hypothétiques doivent dépendre aussi bien de la couleur de la lumière frappante que de la nature chimique de l'aile ; les expériences suivantes avec de la lumière colorée et avec différentes ailes n'ont pas permis de découvrir un effet démontrable de ces forces de réaction hypothétiques.

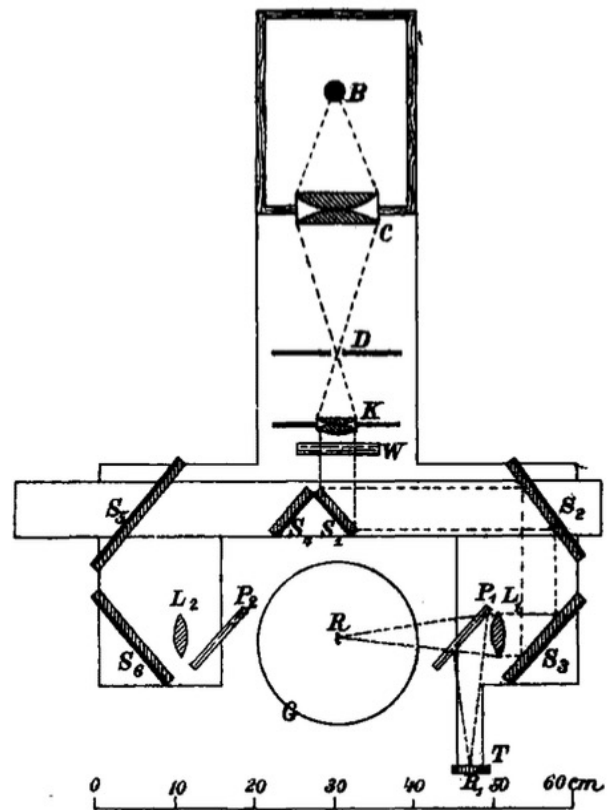


FIGURE 2.1 - Plan

L'agencement était le suivant (Fig. 2.1) :

L'image du cratère d'une lampe à arc à courant continu  $B$  (30 A) a été projetée sur un diaphragme métallique  $D$  ( $d = 4$  m) à l'aide d'un condensateur  $C$ . Le cône de lumière sortant du diaphragme a été transformé en un faisceau de rayons parallèles par la lentille  $K$ ; pour éliminer les rayons infra-rouges de la lumière, on a placé derrière la lentille  $K$  un récipient en verre  $W$  plan et parallèle contenant de l'eau pure<sup>30</sup> (épaisseur de la couche : 1 cm); on peut aussi insérer un verre rouge rubis dans cette stalle ou remplacer l'eau pure par une solution de cuivre ammoniacale.<sup>31</sup>

Au cours de son trajet, le faisceau lumineux était réfléchi par les miroirs en verre plans  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  et était réuni par la lentille  $L_1$  en une image réelle agrandie ( $d' = 10$  mm) du diaphragme  $D$ , à l'intérieur du ballon en verre, en  $R$ ; si la paire de miroirs  $S_1$   $S_4$  était déplacée, les rayons parcouraient un trajet analogue et tombaient de l'autre côté sur l'aile suspendue dans le ballon en verre  $G$ . Les lentilles  $L_1$  et  $L_2$  avaient chacune une distance focale de 20 cm et une ouverture libre de 5 cm, de sorte que le cône de lumière frappant avait un angle d'ouverture d'environ  $15^\circ$ .

L'appareil à miroir était fixé à la lampe à arc. La lampe était placée sur un chariot sur lequel elle pouvait être déplacée ou éloignée du ballon de verre; des vis de réglage permettaient de soulever et d'abaisser le cône de lumière. Les variations aléatoires de l'intensité lumineuse, inévitables avec une lampe à arc, ne peuvent être éliminées qu'en multipliant les observations.

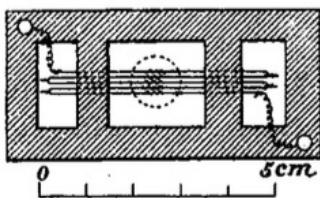


FIGURE 2.2 - Plan

Pour pouvoir réduire les différentes séries de mesures à une intensité lumineuse moyenne constante, on a utilisé le dispositif suivant : entre la lentille  $L_1$  et le ballon de verre  $G$ , on a placé une mince plaque de verre plane  $P_1$  à  $45^\circ$  par rapport à la direction des rayons. La plus grande partie du rayonnement traversait la plaque de verre sans obstacle, tandis que la lumière réfléchiée se combinait en une image réelle  $R_1$  et tombait sur la thermopile  $T$ . La thermopile (Fig. 2.2) était composée de cinq éléments en fer de Constantan (épaisseur du fil  $d = 0,025$  mm), montés dans un cadre en ébonite et fermés par des plaques de verre; l'intensité lumineuse relative était mesurée par les

30. Cela permet d'exclure tous les rayons ultraviolets avec  $\lambda > 1,2 \mu\text{m}$ ; d'autre part, les lentilles en verre retiennent les rayons ultraviolets

31. Avec le filtre rouge et le filtre bleu, l'énergie disponible se réduit à environ un cinquième de celle de la lumière blanche, ce qui prouve que le rayonnement utilisé appartient presque exclusivement au domaine visible.

32. Cf. F. KURLBAUM, Wied. Il est conseillé, au début de la platinisation, de remuer violemment l'aile dans le bain pendant 30 secondes sans interruption : l'aile obtient une couche supérieure légèrement gris acier, sur laquelle l'éponge de platine se pose très bien lors de la platinisation ultérieure.

excursions d'un galvanomètre d'ARSONVAL. Afin d'affaiblir de la même manière le faisceau lumineux provenant de la lentille  $L_2$  (Fig. 2.1), une plaque de verre  $P_2$  correspondante a été insérée. Le contrôle de l'intensité lumineuse n'a été effectué que lorsque le double miroir  $S_1$   $S_4$  (Fig. 1) se trouvait dans la position dessinée; lorsque le double miroir est déplacé, aucune lumière ne tombe sur la thermopile et cette position sert à déterminer le zéro du galvanomètre.

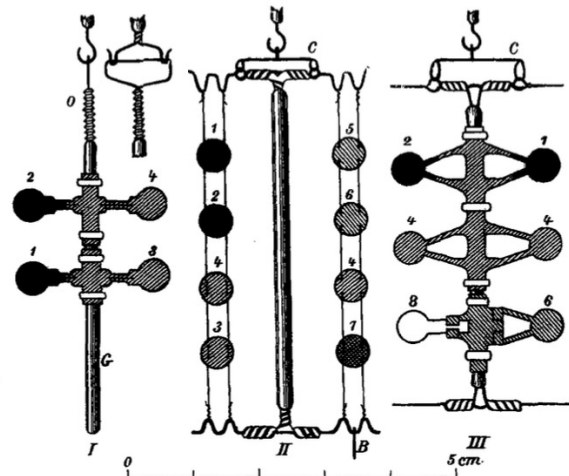


FIGURE 2.3 - Plan

Trois appareils à ailettes différents (Fig. 2.3) ont été utilisés.

L'appareil à ailes I (Fig. 2.3) était constitué d'une tige de verre  $G$  sur laquelle deux croix fabriquées en tôle de platine de différentes épaisseurs étaient fixées au moyen d'anneaux de fil de platine (sans mastic); pour rendre les disques circulaires (diamètre égal à 5 mm) de tous les appareils de même taille, on utilisait un poinçon en acier. Deux disques étaient nus des deux côtés, deux autres platinés des deux côtés<sup>32</sup>, le plus épais étant cinq fois plus résistant que le plus mince. Pour suspendre l'appareil aux doubles crochets du dispositif de torsion, on utilisait un œillet de platine  $O$  fondu sur la tige de verre  $G$  et placé perpendiculairement à la direction des bras de l'aile, afin que, lors de la suspension, la tige de verre  $G$  se règle librement en vertical dans le plan de ces bras.

L'appareil à ailettes II (Fig. 2.3) se compose d'une tige de verre sur laquelle sont soudés des bras en fil de platine. Entre ces bras de platine étaient tendus des fils de platine minces (0,05 mm) qui passaient par des petits trous de quatre rondelles métalliques et les maintenaient en position verticale dans le plan des bras de platine; les soudures de platine porteuses étaient si minces que leur effet radiométrique pouvait être négligé. L'appareil à ai-

lettes était muni d'une suspension de CARDANI *C* en fil de platine et suspendu au moyen de celle-ci aux crochets de platine du fil de torsion ; la position verticale de la tige de verre *G* était assurée par un poids supplémentaire *B* (fil de platine).

L'appareil à ailes III était construit de la même manière que l'appareil I et avait une suspension de CARDANI. Les bandes de tôle laissées en guise de bras sur les disques avaient une très faible largeur (0,3 mm) et assuraient néanmoins suffisamment la verticalité des disques ; l'aile en mica(8) était maintenue par une monture en aluminium. En haut et en bas, il y avait encore des bras en aluminium qui empêchaient les ailes de heurter la paroi en verre du ballon lors de l'accrochage de l'appareil.

Les ailes suivantes ont été étudiées :

N°	Matériel	
1	Platine	platiné épais
2	"	platiné cinq fois plus fin
3	"	blanc Ep. = 0,10 mm
4	"	" " = 0,02 "
5	Aluminium	" " = 0,10 "
6	"	" " = 0,02 "
7	Nickel	" " = 0,02 "
8	Mica	" " < 0,01 "

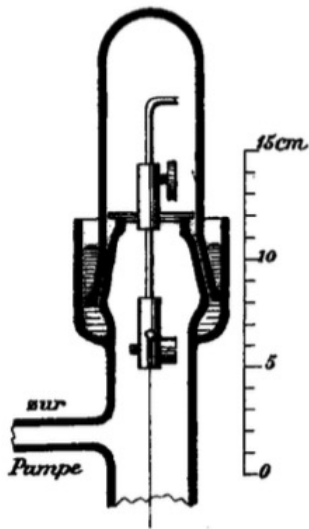


FIGURE 2.4 – Plan  
 Le miroir se trouvait dans une fine monture en aluminium noircie au chlorure de platine et a été platiné par pulvérisation cathodique, car même les miroirs en argent cachés sont rapidement détruits par les vapeurs de mercure. La faible réflexion d'un tel miroir et l'interposition d'une paroi bombée dans le ballon de verre ont permis à l'éclairage scalène de WELLMANN-

Un fil de verre (longueur 30 cm), qui portait en bas un miroir plan et était enchâssé en haut dans une pince en fer à l'intérieur de la coupe de mercure dans le col du ballon, servait de dispositif de torsion ; pour fixer le fil de torsion<sup>33</sup> (Fig. 2.4) sans mastic, ses extrémités étaient enchâssées chacune entre deux morceaux de carton d'amiante recuit et maintenues en haut par la pince, en bas par un anneau de fil de platine fixé au support du miroir.

La quantité d'énergie du rayonnement tombant sur l'aile a été mesurée par calorimétrie : la lampe avec l'appareil à miroir (Fig. 2.1) a été reculée sur le chariot jusqu'à ce que l'appareil à aile puisse être remplacé par un diaphragme *D* (Fig. 2.6 ou Fig. 2.7), qui était exactement aussi grand que chaque aile ( $d = 5$  mm) ; tous les rayons qui traversaient le diaphragme *D* ont été absorbés par un calorimètre. Une plaque de verre *G* compensait la réflexion sur la paroi de verre du ballon, mais elle était intercalée entre le diaphragme et le calorimètre afin de bloquer le rayonnement thermique du diaphragme.

MARTENS<sup>34</sup> de faire ses preuves.

Pour déterminer la force directionnelle à partir d'observations de vibrations, le fil de torsion a été retiré du ballon, l'appareil à ailettes a été enlevé et le fil a été chargé d'un fil de cuivre de 4,0 cm de long et de 0,314 g de masse.

Les observations ont été effectuées avec trois fils de torsion différents, dont les forces de direction étaient choisies de telle sorte que l'on pouvait observer les ailes nues avec un double débattement de 40 à 90 Sct. pour un écart d'échelle de 1200 Sct. Dans ce cas, les trois appareils à ailes avaient des durées d'oscillation de 15, 35 et 13 secondes.

Une pompe de KAHLBAUM<sup>35</sup> a servi à l'évacuation ; les mesures effectuées avec un manomètre de MCLEOD – KAHLBAUM<sup>36</sup> ont montré qu'une pression partielle de l'air de  $10^{-2}$  Pa (à peine un quinzième de la pression de vapeur de QUEEKSILVER à température ambiante) pouvait être facilement atteinte.

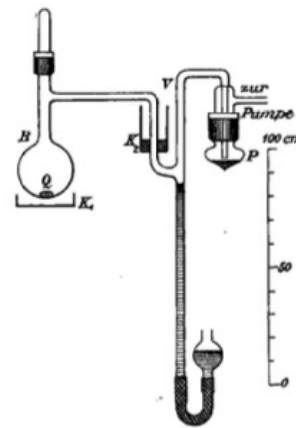


FIGURE 2.5 – Plan

Pour obtenir une plus grande évacuation, on a utilisé le procédé suivant (Fig. 2.5) : On a versé un peu de mercure *Q* au fond du ballon *B*, on l'a évacué et la goutte de mercure a été chauffée à environ 5 °C au-dessus de la température ambiante par un bain-marie *K*<sub>1</sub> placé en dessous ; le mercure distille dans la pompe qui agit sans interruption et entraîne l'air encore présent dans le ballon. Si, en soulevant le mercure dans la fermeture du baromètre *V*, on isole le ballon de la pompe et du récipient

sec *P*, il ne reste dans le ballon que de la vapeur de mercure : on peut alors, de la manière habituelle, faire en sorte que la tension de la vapeur de mercure restante soit très faible en la refroidissant au moyen de glace et de sel de cuisine dans *K*<sub>1</sub> et *K*<sub>2</sub>.

La quantité d'énergie du rayonnement tombant sur l'aile a été mesurée par calorimétrie : la lampe avec l'appareil à miroir (Fig. 2.1) a été reculée sur le chariot jusqu'à ce que l'appareil à aile puisse être remplacé par un diaphragme *D* (Fig. 2.6 ou Fig. 2.7), qui était exactement aussi grand que chaque aile ( $d = 5$  mm) ; tous les rayons qui traversaient le diaphragme *D* ont été absorbés par un calorimètre. Une plaque de verre *G* compensait la réflexion sur la paroi de verre du ballon, mais elle était intercalée entre le diaphragme et le calorimètre afin de bloquer le rayonnement thermique du diaphragme.

Le premier calorimètre (Fig. 2.6) était constitué d'un

33. Tous les vaisseaux en verre ont été livrés par C. KRAMER à Fribourg-en-Brigau dans une exécution impeccable.

34. F. MARTENS, Wied. Ann. 82. p. 206. 1897 ; 64. p. 625. 1898. Fourni par SCHMIDT & HAENSEL à Berlin.

35. G. Kahlbaum, Wied. Ann. 53. p. 199, 1894. Le robinet graissé servant à l'amorçage pouvait être fermé après l'amorçage par une fermeture barométrique de la pompe ; le tuyau de descente comportait un insert en glace. Fourni par C. KRAMER à Fribourg-en-Brigau.

36. G. Kahlbaum, Zeitschr. f. Instrumentenk. 15. p. 192. 1895.

bloc de cuivre  $C$  dans le trou vertical duquel, rempli de mercure, se trouvait le récipient d'un petit thermomètre  $T$  divisé en  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; la surface absorbante était roussie. La valeur totale calculée de l'eau du calorimètre (en supposant que la chaleur spécifique du cuivre est égale à  $388\text{ J K}^{-1}\text{ g}$ ) était de  $3,13\text{ g}$ . Le calorimètre a été utilisé pour mesurer la température de l'eau.

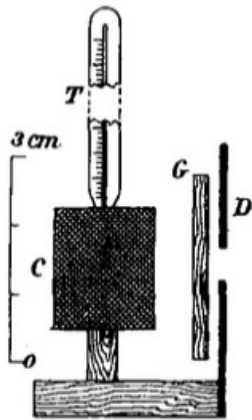


FIGURE 2.6 – Plan

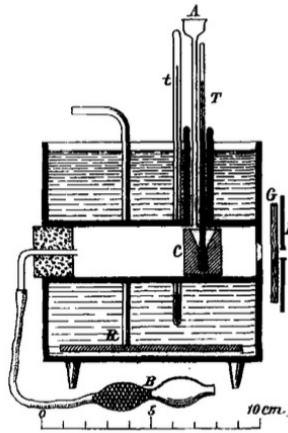


FIGURE 2.7 – Plan

Les mesures ont montré que la quantité d'énergie du rayonnement tombant sur le diaphragme ( $d = 5\text{ mm}$ ) est de  $1,2$  à  $1,8\text{ g-Cal/min}$ , c'est-à-dire que cette intensité représente environ le double ou le triple du rayonnement total du soleil à la surface de la Terre.

Un photomètre de RITCHIE (Fig. 2.8) a été utilisé pour mesurer la réflectivité des tôles métalliques examinées. La lumière de deux petites lampes à incandescence  $L_1$  et  $L_2$  tombait à travers deux diaphragmes  $D_1$  et  $D_2$  (diamètre  $3\text{ mm}$ ) sur un petit prisme  $K$  en craie, dont le bord était observé à l'aide d'une loupe  $B$ ; en déplaçant la lampe  $L_1$ , on obtenait la même luminosité. Ensuite, la lampe  $L_2$  a été tournée d'environ  $130^{\circ}$  vers  $L'_2$ , le diaphragme  $D_2$  a été scellé de l'extérieur par la tôle métallique à examiner et réglé à nouveau sur la même luminosité en déplaçant la lampe  $L_1$  vers  $L'_1$ . Pour l'angle d'incidence appliqué de  $25^{\circ}$ , on obtient le pouvoir de réflexion  $\rho$  de la tôle métallique

$$\rho = \left( \frac{KL_1}{KL'_1} \right)^2 \quad (2)$$

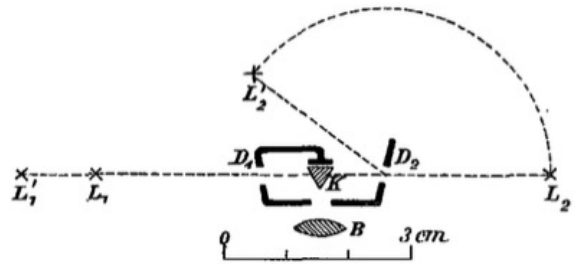


FIGURE 2.8 – Photomètre de RITCHIE

### 3 Les essais

Le dispositif expérimental décrit ci-dessus permet de répondre expérimentalement à deux questions fondamentales :

1. est ce que le rayonnement lumineux peut exercer des forces indépendantes des forces secondaires (convectives et radiométriques) déjà connues ?
2. et est ce que les forces pondéromotrices de la lumière correspondent aux forces de pression calculées par MAXWELL et BARTOLI ?

Avant de commencer l'examen, on a déplacé un thermocouple de HULFST (relié à un galvanomètre d'ARSONVAL) le long des axes des deux lentilles  $L_1$  et  $L_2$  (Fig. 2.1) et on a déterminé leurs distances focales pour le rayonnement principal; on a ensuite ajusté les miroirs et les lentilles de l'appareil (Fig. 2.1) de telle sorte que les images réelles des diaphragmes des rayons venant de droite et de gauche tombent au même endroit.

Pour comparer l'intensité des deux faisceaux lumineux, le thermocouple auxiliaire a été placé à la place des images réelles du diaphragme et exposé alternativement à droite et à gauche; un grand nombre de mesures individuelles ont donné habituellement une faible différence ( $< 1\%$ ) : avec le grand nombre de surfaces de verre réfléchissantes, il suffit d'une pulvérisation asymétrique pour provoquer une différence d'intensité similaire.

Si l'on déplace le thermocouple de  $\pm 0,5\text{ cm}$  par rapport à sa position initiale dans la direction du cône de lumière, dans la zone où le réglage sur l'appareil à ailettes peut être incertain, l'intensité lumineuse diminue d'environ  $5\%$  pour les deux directions d'irradiation. Les examens préliminaires décrits sont absolument nécessaires.

L'aile a été suspendue de manière à ce que les rayons provenant de la lampe et renvoyés par la surface concave du ballon ne puissent pas éclairer certaines parties de l'aile.

Après avoir accroché l'appareil à ailettes, le ballon a été fermé et mis sous vide élevé pendant plusieurs jours, en dernier lieu en chauffant légèrement l'ensemble de l'enveloppe de verre et en exposant les différents disques des ailettes. Avant chaque série d'expériences, la partie inférieure du ballon de verre, où se trouve le mercure, a été chauffée

37. Lors de l'examen de la même aile à différentes dates, la taille et la direction de la migration du point zéro pouvaient être très différentes.

dans un bain d'eau à une température supérieure d'environ 5 °C à la température ambiante, puis pompée pendant 1 à 2 heures, fermée par le bouchon du baromètre *V* (fig. 2.5) et refroidie par de la glace avec du sel de cuisine. p16(448)

La principale incertitude des mesures est causée par des perturbations dues à la convection ; elles se manifestent par des décalages constants du point zéro, dont l'ampleur et la direction dépendent de circonstances aléatoire<sup>37</sup>, mais qui sont suffisamment faibles pendant la durée d'une mesure et peuvent être éliminées par des séries d'observations plus longues ; la convection du résidu de vapeur de mercure est provoquée aussi bien par l'échauffement de l'aile exposée que par des échauffements extérieurs irréguliers des parois du ballon et notamment par des différences de température des deux surfaces de mercure. Si l'on essaie d'observer sans refroidir le mercure, les perturbations dues à la convection sont considérables<sup>38</sup>, alors qu'elles sont beaucoup plus faibles avec le refroidissement par la glace et le sel de cuisine.

Une autre raison de l'incertitude réside dans la constance insuffisante de la source lumineuse<sup>39</sup> ; des variations soudaines de l'intensité lumineuse entraînent des changements brusques de l'amplitude des oscillations de l'aile ; elles ne peuvent être évitées qu'en multipliant les

observations.

L'observateur pouvait lire alternativement l'appareil à ailettes et le galvanomètre à l'aide de deux télescopes placés de manière appropriée ; un assistant, qui utilisait la lampe à arc, déplaçait le double miroir  $S_1S_4$  sur commande (Fig. 2.4). L'éclairage intermittent permettait de régler l'amplitude des oscillations de l'appareil à ailettes à la valeur souhaitée.

Le tableau I présente le début d'un protocole d'observation.

Dans ce cas : *R* et *L* sont les points d'inversion sur l'échelle, lorsque la lumière vient de la droite (*R*) ou de la gauche (*L*). Les lignes centrales « ber » donnent la position de repos calculée à partir de trois points d'inversion adjacents. Les « déviations » donnent les déviations du système lorsque l'exposition change de droite à gauche.

$G_b$  et  $G_n$  indiquent les réglages du galvanomètre lorsque la thermopile est exposée ou reste non exposée (zéro du galvanomètre). Sous « Galv. » sont indiquées les valeurs du galvanomètre.

Les deflexions réduites ( $G = 100$ ) mentionnées ci-dessus sont ramenées à un écart constant de 100 sct. au galvanomètre.

R		L				R		L		R	
	ber.	306	115					307	174		
176	240			206	295	184	245			210	244
	239	302	118	207			244		177	211	
177	239			208	296	184	243			212	245
	240	302	124	209			243		180	213	
178					294	189					247
	240			208			244			212	
Déflexion		32 Sct		36 Sct		32 Sct		...			
Gb		Gn				Gb		Gn		Gb	
308						314					
305						312					
312		201				314		201			
314						316					
310						314					
Galv.		109 Sct		113 Sct		113 Sct		...			
Déflexion Réduite (G=100)		29,3 Sct		31,8 Sct		28,3 Sct		...			

TABLEAU 1 – Appareil 3 : aile platinée (2). Distance entre le centre du disque et l'axe de rotation  $a = 9,2$  mm, refroidissement avec de la glace et du sel de cuisine. Distance entre les échelles  $A=1195$  Sct.

38. Pour des pressions de gaz plus élevées, les observations par convection sont rendues très incertaines et ne permettent pas d'effectuer des mesures fiables.

39. Le charbons *A* de Siemens a bien fait sa preuve ; les mesures ne sont pas réalisables avec des charbons de moindre qualité.

Comme on peut le voir dans le tableau 1, sept observations de  $R$  et  $L$  ont été faites pour chaque aile et les déflexions réduites obtenues ont été réunies en une moyenne globale, avec indication de la  $\pm$  déviation moyenne de toutes les observations individuelles par rapport à la moyenne globale. (Pour l'aile du tableau 1, la double déviation est égale à  $29,4 \pm 1,6$  sct.

Afin de pouvoir comparer plus clairement les mesures effectuées avec les différents disques, certains calculs de réduction sont encore nécessaires.

Dans les appareils I et III, un halo de lumière (d'une largeur d'environ 3 mm) tombe sur les bras porteurs, ce qui augmente le débattement; en mesurant la toile exposée et sa distance à l'axe, on peut calculer et déduire cette quantité, qui est de 5 à 10 % pour différentes ailes: on obtient alors la déviation provoquée par le seul disque circulaire. (L'appareil II est exempt de ce calcul de correction.) Pour l'aile du tableau 1, cette correction serait de 1,9 Sct; la double déviation calculée serait de 27,5 Sct.

Les mesures des distances entre les centres des disques et l'axe de rotation ont été effectuées de la manière suivante: l'appareil à miroir (Fig. 2.1) a été retiré sur le chariot, un fil d'argent fin a été suspendu du côté de la lumière incidente juste devant le ballon, une lunette a été placée perpendiculairement aux bras des ailes à une distance d'environ 4 m et le fil a été déplacé jusqu'à ce qu'il semble coïncider avec le fil de torsion; La distance apparente entre le centre du disque et l'axe de rotation, qui correspond à la distance réelle, a pu être déterminée avec une précision de 0,5 mm; les dimensions de ces distances étaient comprises entre 9 et 11 mm.

En se basant sur ces mesures, les débattements observés ont été réduits à ceux qui seraient valables pour une distance entre les axes de précisément 1 cm. Pour l'aile du tableau 1, le double débattement réduit est de 29,9 Sct.

Afin d'exprimer en valeur absolue la pression observée que la lumière exerce sur l'aile examinée, une mesure de la force directionnelle du fil de suspension a été effectuée au moyen d'observations d'oscillations<sup>40</sup>, en obtenant les durées d'oscillation à partir de trois séries d'observations de 10 oscillations chacune.

Demi période d'oscillation		Corps porteur
Miroir seul	$\frac{T_1}{2} = 5,100 \pm 0,005$ s	Fil de cuivre $L = 4,0$ cm
Miroir + corps porteur	$\frac{T_2}{2} = 29,4 \pm 0,1$ s	$M = 0,314$ g
Force de déplacement $D = 4,94 \times 10^{-3}$ Dynescm		

TABLEAU 2

En se basant sur cette force directionnelle, nous obtenons pour l'aile du tableau 1 la grandeur de l'impression

pour une exposition unilatérale exprimée en Newton:

$$p = 3,08 \times 10^{-10} \pm 1,7 \times 10^{-11} \text{N}$$

Pour vérifier la relation établie par MAXWELL et BARTOLI, il faut calculer les forces de pression que le rayonnement lumineux appliqué lors des essais devrait exercer selon MAXWELL-BARTOLI et comparer ce calcul avec les résultats des essais. Pour ce faire, il est nécessaire de procéder à une mesure calorimétrique de l'énergie et à une détermination photométrique du facteur de réflexion des ailes examinées.

Pour les mesures avec le premier calorimètre (Fig. 2.6), on a procédé de la manière suivante: l'appareil à miroir (Fig. 2.1) a été reculé sur le chariot jusqu'à ce que l'appareil à ailettes puisse être remplacé par le diaphragme D du calorimètre. Le calorimètre a ensuite été exposé pendant 5 minutes et le thermomètre (et entre-temps le galvanomètre) a été lu de minute en minute, puis l'irradiation a été interrompue par un écran et la baisse du thermomètre (et la position zéro du galvanomètre) a été observée de minute en minute pendant les 5 minutes suivantes. Une série complète d'observations comprenait cinq expositions successives.

Toutes les observations ont été traitées graphiquement en reportant les lectures du thermomètre sur du papier à coordonnées et en les reliant par une courbe aussi lisse que possible (Fig. ??); il est évident qu'après 10 secondes déjà, la marche du thermomètre indique l'irradiation ou l'aveuglement par un point d'inversion.

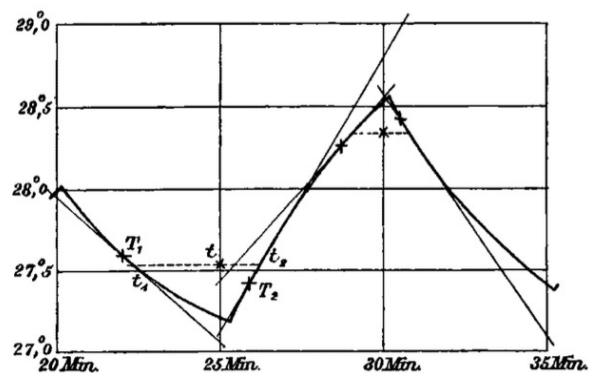


FIGURE 3.1

La très grande vitesse de refroidissement du calorimètre nécessite un traitement particulier, car même dans l'intervalle d'une observation, ni la vitesse de réchauffement ni celle de refroidissement ne sont constantes. Pour une température moyenne donnée de la surface du calorimètre, les deux vitesses ont des valeurs constantes qui sont représentées par des tangentes - faciles à tracer sur la figure - : pour ces valeurs constantes, les points d'intersection des tangentes avec les coordonnées limites donnent les différences de température qui seraient atteintes en 5 minutes si les deux vitesses étaient constantes, et la

40. Cf. F. KOHLRAUSCH, Lehrbuch der praktischen Physik, §29 et notes 11 et 12. B. G. Teubner, Leipzig 1901.



somme des deux différences donne l'élévation totale de température du calorimètre, corrigée des pertes.

Mais il y a ici une incertitude dans l'estimation de la vraie température moyenne de la surface : le thermomètre reste un peu en deçà de cette température, car il indique une température plus basse lors de l'exposition et une température plus élevée lors du refroidissement. Le fait que le thermomètre indique un point d'inversion après 10 secondes permet de supposer, comme première approximation suffisante pour nos expériences, que le thermomètre est en retard de 20 secondes ; pour une température de surface  $t$ , il ne faudrait donc pas comparer les points de courbe  $t_1$  et  $t_2$ , mais les points de courbe  $T_1$  et  $T_2$  décalés de 20 secondes en arrière.

	Vitesse de chauffage [°C]	Vitesse de refroidissement [°C]	Échauffement total [°C]	Déviations du galvanomètre [Sct.]	Réduction du réchauffement global (G=100) [°C]
I	1,67	0,63	1,30	140	1,64
	1,49	0,80	2,29	128	1,79
II	1,44	0,85	2,29	128	1,79
	1,31	1,10	2,40	122	1,97
III	1,38	1,08	2,46	129	1,91
	1,00	1,37	2,37	126	1,88
IV	1,30	1,15	2,45	123	1,99
	1,04	1,45	2,49	127	1,96
V	1,26	1,27	2,54	129	1,97
	0,93	1,50	2,43	126	1,93
Échauffement total en 5 min (G=100)					1,88° ± 0,09°

TABLEAU 3 – Calorimètre I. Valeur de l'eau = 3,13 g.

	Élévation de la température en 5 min		Valeur Moyenne	Déviations du galvanomètre	Réduction de l'élévation de la température (G=100)
	Tangentes	Différences			
	°C	°C	°C	Sct.	°C
I	2,40	2,41	2,40	159	1,51
II	2,55	2,57	2,56	163	1,57
III	2,43	2,50	2,46	158	1,56
Élévation moyenne de la température en 5 min (G=100)					1,55 °C ± 0,02 °C

TABLEAU 4

De telles déterminations graphiques ont été effectuées pour deux températures à chaque échauffement ; le tableau 3 présente une série de mesures.

Avec le deuxième calorimètre (Fig. 2.7), les mesures étaient beaucoup plus simples : le calorimètre était refroidi avec de l'éther éthylique, puis irradié et le thermomètre était lu de minute en minute (entre le galvanomètre et la température du bain). Les observations ont été reportées sur un graphique, le point pour lequel la température du calorimètre coïncide avec celle du bain a été marqué (en tenant compte du fait que le thermomètre est en retard d'environ 20 secondes) et pour ce point, la tangente de la vitesse de réchauffement réelle a été tracée et la différence des réglages du thermomètre en retard de 2,5 minutes a été prise. Une telle série d'observations a été répétée trois fois ; le tableau 4 présente une telle série de mesures.<sup>41</sup>

Il en résulte la quantité d'énergie produite par seconde.

$$E = \frac{1,55 \times 3,61 \times 4,18}{300} = 7,74 \times 10^{-2} \text{ W}$$

Dans nos expériences, les rayons ne tombent pas parallèlement, mais en un faisceau convergent ; la faible inclinaison des rayons incidents nécessiterait une correction<sup>42</sup> (d'environ 1 Proc.), qui doit être négligée par rapport aux autres incertitudes des mesures. Nous pouvons effectuer le calcul avec une précision suffisante selon la formule de MAXWELL et de BARTOLI pour un bidule à rayons parallèles.

Pour un corps absolument noir, on obtiendrait la pression en se basant sur la valeur du tableau 4 :

$$p = 2,58 \times 10^{-10} \text{ N}$$

Afin de résumer clairement les résultats obtenus, nous avons choisi comme unité arbitraire la valeur de la pression de MAXWELL-BARTOLI calculée à partir de mesures calorimétriques pour un corps absolument noir et avons désigné cette unité par « unité M-B ».

41. Les résultats du tableau 3 et du tableau 4 ne peuvent pas être comparés directement entre eux, car ils se réfèrent à des traitements différents de la thermopile.

42. Cf. L. BOLTZMANN, Wied. Ann 22, p. 292. 1884 réf. D. GOLDHAMMER, l. c. p. 844.

Le résultat du tableau I est exprimé dans ces unités :

$$p = \frac{3,08 \times 10^{-10} \pm 1,7 \times 10^{-11}}{2,58 \times 10^{-10}} = 1,19 \pm 0,07MB$$

	Mesures photométriques		D'après Hugon & Rubens	
	$\rho$	P [MB]	$\rho$	P [MB]
Platine	0,5 ± 0,05	1,5	0,64	1,64
Aluminium	0,6 ± 0,05	1,6	0,83	1,83
Nikel	0,35 ± 0,05	1,4	0,65	1,65

TABLEAU 5

Une mesure directe de la réflectivité des ailettes utilisées était rendue impossible par les irrégularités des minces tôles métalliques. C'est pourquoi j'ai déterminé au photomètre (Fig. 2.8) la réflectivité des tôles dont les ailettes ont été fabriquées; les irrégularités se sont également fait fortement sentir chez celles-ci, ainsi qu'une coloration prononcée de la lumière réfléchie (notamment dans le cas du nickel); la réflectivité observée pour un angle d'incidence de 25° est donc indiquée sans autres réductions dans le tableau 5 et les forces de pression de la lumière auxquelles on peut s'attendre en unités MB sont calculées sur cette base. A titre de comparaison, la réflectivité de surfaces parfaitement réfléchissantes pour une incidence normale ( $\lambda = 600 \mu\text{m}$ ) selon HAGEN et RUBENS<sup>43</sup> et les forces de pression calculées à partir de celle-ci sont indiquées (les chiffres du magnésium étant utilisés pour l'aluminium).

Pour le mica, j'ai omis de faire les calculs, car les observations n'ont été faites que sur une ailette et il manque un contrôle pour une ailette plus épaisse.

Les résultats des différentes séries d'essais que j'ai effectués avec les trois appareils à ailettes sont présentés ci-dessous. Lorsque je suis passé des résultats irréguliers de l'examen à température ambiante aux mesures à froid, j'espérais ne pas obtenir une concordance aussi grande des essais avec les calculs de MAXWELL-BARTOLI que celle qui s'est produite lors des premiers essais avec l'appareil II; j'ai cru au début que cette concordance était fortuite et j'ai donc remplacé le calorimètre I par le calorimètre II et ensuite l'appareil II par l'appareil III.

		I App.		II Appareil						III App.	
		I Calorimètre		II Calorimètre							
		Blanc	Blanc	Blanc	Rouge	Blanc	Bleu	Blanc	Blanc		
1	Ailette en platine épais	1,8 ±0,2	1,6 ±0,1	1,5 ±0,1						1,5 ±0,1	1,4 ±0,1
2	Ailette en platine fin	1,3 ±0,2								1,2 ±0,1	1,1 ±0,1
	Calcul	1,2								1,1	1,0
3	Platine, épais		1,8 ±0,1								
4	Platine, fin		2,0 ±0,1	1,9 ±0,2	1,8 ±0,1	1,9 ±0,1	1,8 ±0,8	1,7 ±0,1	1,5 ±0,5	1,7 ±0,1	2,0 ±0,1
5	Aluminium, épais			2,3 ±0,4	1,9 ±0,1						
6	Aluminium, fin			2,0 ±0,1	2,3 ±0,1	2,0 ±0,2	2,9 ±0,8	2,1 ±0,1	2,5 ±0,5	1,4 ±0,2	1,7 ±0,1
7	Nickel, fin			1,7 ±0,3	1,2 ±0,2	1,4 ±0,1	2,3 ±0,5	1,4 ±0,2	2,7 ±0,9		
8	Mica									0,08 ±0,05	0,13 ±0,03

TABLEAU 6 – Résultats

43. E. HAGEN u. H. RUBENS, Ann. d. Phys. 1. p. 373. 1900.

Les nombreuses déterminations que j'ai effectuées avec l'appareil I à température ambiante sont nettement inférieures aux mesures ultérieures et ne sont donc pas mentionnées. Les mesures effectuées avec l'aile (2) de l'appareil II ne sont pas non plus mentionnées, car un examen microscopique ultérieur a révélé un platinage spongieux insuffisant. Malheureusement, seules deux séries de mesures ont été effectuées avec l'appareil III, car le dispositif a ensuite été détruit par accident.

Les résultats sont exprimés en unités MB; sous chaque valeur est également indiquée la variation moyenne du réglage de l'ailette dans les mêmes unités, toutes les variations inférieures à 0,15 MB étant désignées par 0,1 MB, toutes celles inférieures à 0,25 MB par 0,2 MB, etc.

Les estimations suivantes permettent d'évaluer la précision des résultats finaux : Les variations de la déviation sont indiquées dans le tableau; la valeur absolue de la pression résultant de la déviation (force de direction du fil, distance de l'échelle, bras de levier de l'aile et corrections sur la surface irradiée) peut être déterminée avec une précision de  $\pm 8\%$ ; le calcul de la valeur absolue de l'unité MB à partir de mesures calorimétriques (valeur de l'eau, augmentation de la température du calorimètre et rapport du diaphragme à l'ailette presque égal à 1) est probablement à  $\pm 7\%$ . L'incertitude dans la détermination de la réflectivité est d'environ 10%. A ces incertitudes des mesures s'ajoutent les imprécisions dans le réglage de l'ailette sur le centre de l'image réelle du diaphragme et la possibilité que le rayonnement thermique d'une aile exposée soit concentré par la surface du ballon sur d'autres parties de l'ailette et que ce réchauffement se modifie à chaque oscillation de l'ailette. Pour la lumière blanche, l'erreur absolue de mesure encore admissible serait estimée à environ  $\pm 20\%$ .<sup>44</sup>

Dans les essais avec la lumière rouge et bleue, où l'énergie de rayonnement disponible est à peine un cinquième de celle de la lumière blanche, les perturbations dues à la convection sont les mêmes et les incertitudes sont donc plus grandes; il en va de même pour les très petites déviations (à peine 4 sct. de double déviation) avec le mica. Ces expériences de contrôle suffisent néanmoins à constater que, même dans ces cas, il n'y a pas de nouvel effet ponderomoteur de la lumière qui soit comparable aux forces de MAXWELL-BARTOLI.

En outre, j'ai fait plusieurs essais comparatifs avec des ailettes de platine et d'aluminium épaisses et minces, mais je n'ai pas réussi à constater avec certitude une différence radiométrique notable; dans le cadre des erreurs d'observation, l'effet radiométrique des ailettes métalliques minces doit donc être considéré comme nul.

Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

1. Un faisceau lumineux frappant exerce une pression aussi bien sur un corps absorbant que sur un corps réfléchissant; cette action ponderomotrice est indépendante des forces de CROOKES secondaires déjà connues, provoquées par l'échauffement, et des phénomènes de convection.
2. Ces forces de pression de la lumière sont directement proportionnelles à la quantité d'énergie produite et indépendantes de la couleur de la lumière.
3. Ces forces de pression de la lumière correspondent quantitativement, dans les limites des erreurs expérimentales, aux forces ponderomotrices du rayonnement calculées par MAXWELL et BARTOLI.

L'existence des forces de pression de MAXWELL-BARTOLI pour les rayons lumineux est ainsi prouvée expérimentalement.

44. Un ajustement des différentes méthodes de mesure n'augmenterait pas sensiblement la fiabilité des résultats obtenus que si la lampe à arc était remplacée en premier lieu par une autre source lumineuse constante.