

Annales de chimie et de physique

Annales de chimie et de physique. 1879.

1/ Les contenus accessibles sur le site Gallica sont pour la plupart des reproductions numériques d'oeuvres tombées dans le domaine public provenant des collections de la BnF. Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n°78-753 du 17 juillet 1978 :

- La réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur et notamment du maintien de la mention de source.
- La réutilisation commerciale de ces contenus est payante et fait l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

[CLIQUER ICI POUR ACCÉDER AUX TARIFS ET À LA LICENCE](#)

2/ Les contenus de Gallica sont la propriété de la BnF au sens de l'article L.2112-1 du code général de la propriété des personnes publiques.

3/ Quelques contenus sont soumis à un régime de réutilisation particulier. Il s'agit :

- des reproductions de documents protégés par un droit d'auteur appartenant à un tiers. Ces documents ne peuvent être réutilisés, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.
- des reproductions de documents conservés dans les bibliothèques ou autres institutions partenaires. Ceux-ci sont signalés par la mention Source gallica.BnF.fr / Bibliothèque municipale de ... (ou autre partenaire). L'utilisateur est invité à s'informer auprès de ces bibliothèques de leurs conditions de réutilisation.

4/ Gallica constitue une base de données, dont la BnF est le producteur, protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

5/ Les présentes conditions d'utilisation des contenus de Gallica sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

6/ L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur, notamment en matière de propriété intellectuelle. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

7/ Pour obtenir un document de Gallica en haute définition, contacter utilisationcommerciale@bnf.fr.

de Loèche, de Wildegg, de Pullna, de Hombourg, de Kissingen, de Kreusnach, de Nauchheim, de Soultzmatt.

Les eaux salines dont il vient d'être question sont les seules que j'aie pu examiner jusqu'ici, et comme, *sans une seule exception*, elles contiennent de la lithine en quantité exceptionnelle, il est infiniment probable que le fait est général, ce dont je vais, du reste, continuer à m'assurer. Dans tous les cas, le nombre des eaux salines examinées est dès aujourd'hui très-suffisant pour m'autoriser à trouver dans les résultats acquis un nouvel et puissant argument en faveur de la grande probabilité de ma conception sur l'origine et le mode de formation des eaux minérales salines et sur l'origine purement sédimentaire et marine que j'attribue aux terrains salifères de tous les âges.

RAPPORT SUR LA QUESTION 19 DU PROGRAMME POUR LE CONGRÈS MÉTÉOROLOGIQUE DE ROME :

« Y A-T-IL EU DEPUIS LE PREMIER CONGRÈS DES EXPÉRIENCES DÉCISIVES DONNANT UNE MÉTHODE SIMPLE ET EXACTE POUR MESURER LA RADIATION ? QUELLE RELATION Y A-T-IL ENTRE LA RADIATION ET LA QUANTITÉ DE VAPEUR CONTENUE DANS L'ATMOSPHÈRE ? »

PAR M. J. VIOLLE (1).

Je diviserai ce Rapport en deux Parties : dans la première Partie, j'étudierai les moyens de mesurer l'intensité

(1) Bien que ce Rapport renfermât nécessairement la reproduction littérale de certains points du Mémoire précédemment publié par l'auteur, *Sur la température moyenne de la surface du Soleil* (*Annales de Chimie et de Physique*, 5^e série, t. X, p. 289; 1877), on a cru devoir le reproduire ici tel qu'il a été édité par les soins du Congrès, sauf les corrections évidentes que l'impossibilité de revoir les épreuves avait empêché de faire sur les exemplaires imprimés à Utrecht.

de la radiation solaire; dans la seconde, j'indiquerai quelle est, d'après les estimations les plus probables, la valeur de l'absorption atmosphérique, et je chercherai la relation entre cette absorption et la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.

Dans chacune des deux Parties, tout en insistant particulièrement sur les travaux récents, je ferai précéder l'exposé de ces travaux d'une courte étude des recherches antérieures, étude nécessaire pour fixer l'exacte valeur des résultats actuels.

PREMIÈRE PARTIE.

MESURE DE L'INTENSITÉ DE LA RADIATION SOLAIRE.

La radiation solaire se compose, ainsi que Newton l'a montré le premier, d'une infinité de radiations de réfringibilités, c'est-à-dire de longueurs d'onde différentes. Chacune de ces radiations, définie par la longueur d'onde qui lui est propre, a ses propriétés individuelles comme chaleur, comme lumière et comme agent chimique, et il n'y a aucune relation jusqu'ici connue entre les diverses manières d'agir d'un même rayonnement se manifestant successivement sous ces trois aspects différents. Une évaluation exacte de la radiation solaire nécessiterait donc la *triple mesure, pour chaque radiation simple*, de l'intensité calorifique, de la puissance lumineuse et de l'énergie chimique de cette radiation.

On peut toutefois simplifier les mesures par cette première remarque que, pour chaque radiation individuelle, les trois intensités calorifique, lumineuse et chimique restent entre elles dans des rapports constants, caractéristiques de la radiation considérée, de sorte que, si la radiation prend une intensité double, par exemple, la chaleur, la lumière et la puissance chimique de cette radiation auront toutes trois également doublé. Si donc les physiciens

avaient exactement établi pour chaque longueur d'onde la valeur thermique, la valeur lumineuse et la valeur chimique de la radiation définie par cette longueur d'onde, une seule mesure d'intensité (mesure d'intensité calorifique, ou mesure d'intensité lumineuse, ou encore mesure d'activité chimique, une seule de ces trois mesures) suffirait pour définir complètement la valeur actuelle de la radiation à l'instant considéré. En tous cas, on voit que l'on peut se borner à un seul mode de mesure pour chaque radiation.

Ainsi réduit, le problème est cependant encore singulièrement compliqué. Mais, comme le rayonnement entier du Soleil n'est guère soumis, avant de nous arriver à la surface de la Terre, qu'à une seule cause ⁽¹⁾ susceptible de le modifier inégalement suivant les lieux et les heures considérés (je veux dire l'absorption par notre atmosphère et particulièrement par la vapeur d'eau de notre atmosphère), il suffira d'une seule mesure de l'intensité totale de ce rayonnement pour fixer exactement la valeur actuelle de la radiation, étant admis que la seule cause supposée agissante est parfaitement connue dans tous ses effets. Une seule mesure suffira donc, visant d'ailleurs soit l'intensité calorifique, soit l'intensité lumineuse, soit l'intensité chimique. Ce ne serait cependant point un luxe, assurément, que de faire au moins ces trois mesures d'intensité totale, car l'action de notre atmosphère est en réalité complexe et encore mal connue. Des recherches ont été effectivement poursuivies dans les trois directions; je vais les exposer.

⁽¹⁾ Je laisse ici complètement de côté les variations provenant des changements de distance du Soleil à la Terre (variations dont il est facile de tenir compte par un calcul exact) et celles qui résulteraient de modifications survenant à la surface même du Soleil; ces dernières ne pourraient être certainement établies que par un ensemble de mesures simultanées en divers points du globe.

CHAPITRE PREMIER.

MESURE DE LA LUMIÈRE DU SOLEIL.

Les premiers travaux précis sur l'intensité de la radiation solaire aux diverses heures d'un même beau jour se rapportèrent aux rayons lumineux ; nous reviendrons, dans la seconde Partie, sur ces importantes recherches de Bouguer, résumées dans l'Ouvrage qui parut après sa mort sous le titre de *Traité d'Optique sur la gradation de la lumière* (1760). Lambert, dans sa *Photométrie*, également publiée en 1760, étudie la même question et y ajoute des mesures de la radiation solaire ; mais, bien qu'unique-ment occupé de photométrie, il prend pour ses expériences l'instrument qui devait longtemps servir seul à toute étude de la radiation solaire, le thermomètre, et il évalue l'intensité du rayonnement par l'excès de la température de ce thermomètre exposé au soleil sur la température d'un deuxième thermomètre placé à l'ombre.

Quant aux mesures photométriques de la lumière du Soleil, elles ont été jusqu'ici à peu près complètement négligées.

En 1844, MM. Fizeau et Foucault ⁽¹⁾ mesurèrent : 1^o l'intensité chimique du Soleil comparativement à celles de la lampe électrique et de la lumière Drummond ; 2^o l'intensité lumineuse de la lampe électrique comparativement à celle de la lumière Drummond. Cette dernière comparaison ayant donné entre les intensités optiques de la lampe électrique et de la lumière Drummond sensiblement le même rapport qu'on avait déjà obtenu entre les intensités chimiques des deux mêmes sources, on peut admettre que dans les trois sources étudiées les intensités optiques et les intensités chimiques sont proportionnelles. Les mesures d'intensité chi-

(¹) *Ann. de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. XI, p. 370 ; 1844.

mique effectuées par MM. Fizeau et Foucault déterminent donc aussi les intensités optiques des trois sources : l'intensité du Soleil est 3 fois environ celle de la lumière électrique (obtenue avec 46 couples ordinaires) et 146 fois celle de la chaux sous le dard du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène.

Dernièrement, M. Crova ⁽¹⁾ a repris l'étude photométrique des sources les plus importantes, à l'aide du spectrophotomètre de Glahn. Il trouve, pour une même intensité de la lumière rouge ($\lambda = 676$), les intensités relatives suivantes de la lumière verte ($\lambda = 523$) :

Lampe modérateur.....	1,00
Bougie stéarique.....	1,16
Lumière Drummond.....	1,81
Lumière électrique (60 éléments Bunsen)	3,06
Lumière solaire.....	4,05

J'ai moi-même ⁽²⁾ établi que l'intensité lumineuse d'une radiation donnée ne croît pas indéfiniment avec la température; il faut donc être singulièrement réservé dans les déductions que l'on peut tirer des intensités relatives des diverses sources. Les nombres qui précèdent n'en ont pas moins en eux-mêmes une grande importance.

Récemment, M. Langley ⁽³⁾ a réussi à comparer les intensités lumineuses en différents points du Soleil, au moyen du photomètre de Bunsen; il s'est aussi servi pour la même étude du photomètre de Rumford et a reconnu ainsi que la lumière des bords a une couleur rouge, tandis que celle du centre est bleue. L'intensité de la lumière émise par le noyau soi-disant obscur d'une tache est

⁽¹⁾ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XXXVII, p. 322 et 979; 1878.

⁽²⁾ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXXXVIII, p. 171; 1879.

⁽³⁾ *Rapport sur les recherches faites à l'Observatoire d'Allegheny en 1875*; Introduction.

énorme : elle est au moins 5000 fois plus grande que celle de la Lune.

Ce qui fait presque complètement défaut, ce sont des mesures comparatives de la lumière du Soleil en divers lieux et à diverses heures et époques de l'année. Ces études ne présentent cependant aucune difficulté exceptionnelle et elles offriraient un grand intérêt, les radiations les plus lumineuses étant précisément celles qui intéressent le plus la vie végétale ⁽¹⁾.

A Montsouris, le seul observatoire que nous connaissions où l'on ait cherché à établir des mesures photométriques, M. Marié-Davy ⁽²⁾ a installé :

1° Un photomètre d'Arago. Cet instrument a été confié à M. Trépied, qui s'en est servi d'abord pour déterminer la transparence de l'atmosphère (*voir II^e Partie*) pendant quelques nuits d'un ciel très-pur. Le même instrument doit aussi être employé à mesurer l'éclat relatif du Soleil : à cet effet, on a établi dans le parc un disque horizontal blanc, sur lequel se projette l'ombre d'un disque de cuivre ; avec le photomètre, on peut comparer l'ombre à la lumière sur le disque, et par suite la lumière venant directement du Soleil à celle qui est envoyée par l'ensemble du ciel. Ces mesures n'ont pas encore été faites d'une manière suivie.

2° Un cyanomètre d'Arago, pour déterminer le degré de pureté du ciel d'après ce principe que la teinte du ciel se rapproche d'autant plus du bleu noir que le ciel est plus pur, tandis que cette même teinte tire au contraire de plus en plus sur le blanc à mesure que le ciel se voile davantage. Cette couleur bleue du firmament, dont les belles expériences de M. Tyndall sur les *nuages naissants* ont montré

⁽¹⁾ Voir RADAU, *la Lumière et les Climats*. Paris, Gauthier-Villars; 1877.

⁽²⁾ *Annuaire de l'Observatoire de Montsouris* pour l'an 1876, p. 330.

la véritable cause, avait déjà été étudiée par de Saussure ⁽¹⁾. Son cyanomètre est une simple échelle de 53 nuances de bleu, allant du blanc au noir, et que l'on compare à vue d'œil avec le ciel. L'appareil d'Arago est beaucoup plus précis; en outre, il est exactement comparable à lui-même, et les divers modèles que l'on en peut construire sont comparables entre eux si la lame de quartz, qui donne dans la lumière polarisée la teinte à égaler à celle du ciel, est de même épaisseur dans ces différents instruments.

CHAPITRE II.

MESURE DE LA PUISSANCE CHIMIQUE DU SOLEIL.

Dès 1841, sir John Herschel ⁽²⁾ proposa de faire usage du papier sensible pour la construction d'un *actinographe* qui donnerait chaque jour le degré d'éclairement du ciel. Depuis, divers physiciens ont cherché à créer un instrument propre à mesurer l'activité chimique des rayons solaires et celle de la lumière diffuse, en utilisant quelque une des réactions qui ont lieu sous l'influence de la lumière ⁽³⁾.

En 1843, M. Draper ⁽⁴⁾, de New-York, essaya de mesurer l'intensité des radiations chimiques du Soleil par la quantité d'acide chlorhydrique qu'elles produisent dans le *tithonomètre*, contenant un mélange à volumes égaux de chlore et d'hydrogène. Mais l'application de ce procédé présente de grandes difficultés, qui n'ont été vaincues que dix années plus tard par MM. Bunsen et Roscoë ⁽⁵⁾. Après avoir établi la proportionnalité entre la quantité d'acide

⁽¹⁾ *Journal de Physique de de la Métherie*, t. XXXVIII; 1791.

⁽²⁾ *Philosophical Transactions for the year* 1842.

⁽³⁾ Voir RADAU, *les Radiations chimiques du Soleil*. Paris, Gauthier-Villars; 1877.

⁽⁴⁾ *Silliman's Journal*; 1843.

⁽⁵⁾ *Poggendorff's Annalen*, t. XCVI, 1855, et t. C, 1857.

produit et l'intensité de la lumière employée (que l'on faisait varier en changeant sa distance à l'appareil), les auteurs ont exécuté avec leur *photomètre* une remarquable série de mesures de l'intensité chimique de la lumière solaire, sur lesquelles j'aurai à revenir (II^e Partie).

Le photomètre à gaz acide chlorhydrique est un instrument beaucoup trop délicat pour des observations météorologiques courantes; aussi MM. Bunsen et Roscoë ont-ils cherché un autre moyen plus simple d'évaluer les effets chimiques de la lumière: ils l'ont trouvé dans l'emploi du papier au chlorure d'argent, indiqué par Herschel. L'intensité d'une source lumineuse étant, ainsi que l'avaient reconnu MM. Fizeau et Foucault dans les recherches rappelées plus haut, en raison inverse du temps nécessaire pour obtenir avec cette source une teinte déterminée, il est facile, à l'aide d'une gamme de teintes régulièrement décroissantes et de valeurs connues (d'après les temps d'exposition nécessaires pour les obtenir avec une même lumière), de fixer l'intensité chimique d'une lumière quelconque par la teinte que prend le papier sensible exposé à cette lumière pendant un temps donné, trois secondes par exemple. Si cette teinte est identique à l'une des épreuves types exposées six secondes, la lumière proposée sera deux fois plus intense que la source qui a servi à établir le type. M. Roscoë a fait avec l'*actinomètre photographique* un grand nombre d'observations sur la puissance chimique du Soleil: nous en indiquerons plus loin les résultats les plus importants.

Enfin, M. Roscoë a construit un *actinomètre enregistreur*, dont il a publié la description en 1874⁽¹⁾. Une longue et étroite bande de papier sensible, mue par une horloge électrique, avance par saccade sous une plaque métallique percée d'un trou de 4 millimètres de diamètre.

(¹) *Philosophical Magazine*, 4^e série, t. XLVIII, p. 220; 1874.

Toutes les heures, la bande se met en mouvement pendant deux minutes, offrant à la lumière une série d'espaces qui restent exposés pendant des temps croissants, puis le papier s'arrête pendant une heure, et la lumière marque sur la bande un petit disque très-noir. A la fin de la journée, on détache la feuille de papier, et l'on compare les diverses taches avec une épreuve type. Quand le temps est humide, l'actinomètre doit être abrité sous une cage de verre; il en résulte un affaiblissement de la lumière dont il faut tenir compte. Avec l'appareil de M. Roscoë, on devait multiplier par 1,94 les nombres trouvés avec la cage de verre, pour les rendre comparables à ceux que donnaient les rayons solaires venant directement frapper le papier sensible. Ce facteur 1,94 ne saurait toutefois être regardé comme constant, et la cage de verre nuit certainement à l'exactitude des mesures.

Modifiant un procédé indiqué par Draper, M. Marchand ⁽¹⁾, de Fécamp, a institué une méthode assez simple pour mesurer à chaque instant la force chimique du Soleil. Cette méthode, que l'auteur a baptisée du nom bizarre de *photantitupimétrie*, a été exposée par lui d'abord en 1874, puis avec plus de détails en 1875 : elle repose sur le dégagement d'acide carbonique que donne à la lumière une dissolution aqueuse d'acide oxalique et de perchlorure de fer. Le mélange est introduit avec de l'eau chargée d'acide carbonique dans un flacon plat en verre blanc; on recueille le gaz sur une petite cuve à glycérine. Le Livre de M. Marchand contient plusieurs séries horaires d'observations faites en 1870 et de nombreux Tableaux et calculs que nous examinerons plus loin. Je remarquerai dès maintenant toutefois que, *convenablement calculées*, les quan-

⁽¹⁾ *Étude sur la force chimique contenue dans la lumière du Soleil*, par Eugène Marchand, 1875; et, par extrait, *Annales de Chimie et de Physique*, 5^e série, t. II, p. 160; 1874.

tités totales de lumière reçues par une même surface horizontale pour diverses hauteurs du Soleil, d'après les mesures de M. Marchand, sont assez bien d'accord avec celles qui résultent des mesures de MM. Bunsen et Roscoe. Toutefois la comparaison doit s'arrêter là, et aucune des réactions employées jusqu'à ce jour ne peut nous donner une mesure absolue de l'énergie chimique de la lumière solaire.

D'après M. Berthelot⁽¹⁾, on ne peut espérer arriver à cette mesure que par l'emploi de phénomènes tout différents de ceux que l'on a jusqu'ici employés, lesquels sont tous *exothermiques*, c'est-à-dire dégageant de la chaleur. « Dans ce groupe de réactions, la lumière détermine le phénomène chimique, mais ce n'est pas elle qui effectue le travail principal, c'est-à-dire qui fournit la chaleur mise en jeu; la lumière, en un mot, joue un rôle analogue à celui d'une allumette qui servirait à incendier un bûcher. » Dans les réactions *endothermiques* au contraire (décomposition de l'acide carbonique dans la nutrition aérienne des végétaux), c'est la lumière qui effectue elle-même le travail chimique : c'est donc à ces réactions qu'il faudrait s'adresser pour mesurer l'énergie chimique de la lumière.

Au lieu de recueillir les produits d'une réaction, M. E. Becquerel⁽²⁾ mesure le courant électrique développé sous l'influence des réactions que provoque la lumière : tel est le principe de l'*actinomètre électrochimique*. Tout récemment, M. Egoroff⁽³⁾ a repris cet appareil, et, en combinant deux actinomètres de Becquerel, il a construit un instrument différentiel d'une grande sensibilité. Il ne l'a encore guère appliqué qu'à l'étude de l'absorption des rayons ultra-violet pour différents corps; mais il est clair que cet *électro-actinomètre différentiel* peut servir à la me-

(¹) *Annales de Chimie et de Physique*, 4^e série, t. XVIII, p. 83.

(²) E. BECQUEREL, *la Lumière, ses causes et ses effets*.

(³) *Journal de Physique*, t. V, p. 283; 1876.

sure des radiations chimiques d'une source quelconque, et par conséquent du Soleil. L'auteur cite déjà, à ce sujet, quelques observations; dans la région violette et ultraviolette du spectre solaire, il a trouvé, le 12 juin 1876, à 4^h 25^m du soir, les déviations suivantes en divisions de la règle de galvanomètre :

	Divisions.
Entre g et H.....	270
Pour la raie R.....	28
Entre T et V.....	4

CHAPITRE III.

MESURE DE LA CHALEUR DU SOLEIL.

C'est particulièrement sous la forme de chaleur qu'a été étudiée la radiation solaire. Cette étude, d'ailleurs, peut se faire de deux manières différentes, suivant que l'on opère par la *méthode statique* ou la *méthode dynamique*, c'est-à-dire suivant que l'on attend que le thermomètre exposé au soleil ait pris l'excès statique de température dû à la radiation, ou bien que l'on suit pendant un temps donné l'échauffement du même thermomètre insolé. Mais, dans un cas comme dans l'autre, il est essentiel de remarquer que ni l'excès statique dans le premier cas ni la vitesse d'échauffement dans le deuxième ⁽¹⁾ ne suffisent à mesurer la radiation, cet excès ou cette vitesse dépendant essentiellement des conditions de l'expérience.

I. — *Méthode statique.*

Le principe de la méthode statique est le suivant : lorsqu'un thermomètre est placé au soleil, il prend, relativement à la température qu'il indiquerait à l'ombre, un

(¹) La *vitesse initiale* d'échauffement suffit cependant à elle seule pour une mesure relative, comme Herschel l'a indiqué. (Voir plus loin, p. 420.)

excès stationnaire tel, que *la perte égale le gain*, c'est-à-dire que, à chaque instant, le thermomètre perd, par contact avec l'air et par rayonnement, précisément autant de chaleur qu'il en gagne du Soleil.

D'après cela, on voit que la température accusée par un thermomètre au soleil n'a aucun sens par elle-même et ne mesure rien : deux thermomètres différents donneront pour une même radiation deux excès différents, et les indications d'un même thermomètre ne seront généralement pas comparables entre elles. Il faudra donc de toute nécessité mesurer, outre l'excès de température du thermomètre insolé, la perte par contact et par rayonnement, à moins que l'on n'ait réussi à rendre cette perte toujours la même pour un même excès, dans lequel cas l'excès stationnaire serait proportionnel à la quantité de chaleur reçue, et l'on aurait immédiatement une *mesure relative* de l'intensité du rayonnement. C'est généralement dans ces conditions d'un rayonnement régulier qu'ont cherché à se placer les divers physiciens qui ont tenté d'appliquer la méthode statique à la mesure de la radiation.

J'ai déjà rappelé les quelques mesures qu'effectua Lambert, en 1756, avec un thermomètre au soleil et un autre à l'ombre ⁽¹⁾. Des observations semblables furent faites par Flaugergues ⁽²⁾, en 1815 et 1816, à Viviers; par Daniell ⁽³⁾, de 1820 à 1822, dans les environs de Londres; et à la même époque par le capitaine Sabine à Bahia et à Port-Royal (Jamaïque), tandis que Parry observait à l'île Melville. Mais ces diverses mesures ne sont pas comparables entre elles et n'ont qu'une valeur très-restreinte.

(¹) Près d'un siècle avant Lambert, Newton avait déjà observé le thermomètre successivement à l'ombre et au soleil, dans l'espoir d'arriver ainsi à la connaissance de la température même du Soleil.

(²) *Journal de Physique de de la Métherie*, t. LXXXVII; 1818.

(³) *Quarterly Journal of Science*, t. XVIII; 1825.

De Saussure ⁽¹⁾ chercha à protéger le thermomètre insolé contre l'action refroidissante de l'air, en l'enfermant dans une boîte de liège, enduite de noir de fumée et fermée en avant par trois glaces superposées. L'héliothermomètre, d'abord porté à une température déterminée, 60 degrés par exemple, était orienté de manière à recevoir les rayons du Soleil normalement aux lames de verre, et, une heure après, on notait l'échauffement du thermomètre. Les lames de verre, qui modifient très-inégalement les rayons transmis, suffiraient à elles seules pour enlever toute exactitude à l'appareil. De Saussure put cependant constater ainsi que la radiation solaire est plus intense sur les sommets élevés que dans la plaine. Le 16 juillet 1774, à 3 heures de l'après-midi, l'héliothermomètre, primitivement chauffé à 62°,5, marquait sur le Cramont (2735 mètres), après une heure d'exposition au soleil, 87°,5, la température de l'air étant 6 degrés. Le lendemain, à Courmayeur (1495 mètres), à la même heure, le même appareil, porté d'abord à 62°,5 comme la veille, marquait 86 degrés après une heure d'insolation, le thermomètre en plein air accusant 24 degrés. Quelques jours plus tard, le 23 juillet 1774, de Saussure répétait son expérience sur la Chenalette, sommité voisine du Saint-Bernard et dont l'élévation est précisément la même que celle du Cramont : le résultat fut identique.

C'est un instrument semblable à celui de de Saussure qu'a employé M. Waterston ⁽²⁾ dans les très-remarquables mesures qu'il fit aux Indes à des températures croissantes de l'enceinte. Nous retrouvons encore l'héliothermomètre entre les mains de M. Frankland ⁽³⁾ à Davos, où, avec les thermomètres *in vacuo*, il lui a servi pour comparer les

⁽¹⁾ DE SAUSSURE, *Voyages dans les Alpes*, Neuchâtel, t. IV, p. 88 et 227; 1803.

⁽²⁾ *Philosophical Magazine*, 4^e série, t. XIX, p. 338; 1860.

⁽³⁾ *Philosophical Magazine*; 1874.

intensités de la radiation aux diverses heures de la journée.

Leslie ⁽¹⁾ a essayé d'appliquer son thermomètre différentiel à la mesure statique de la radiation solaire : il fit une série d'observations à Edimbourg avec cet instrument, dont une boule était noircie et l'autre brillante. Mais l'influence considérable des courants d'air si on laisse l'appareil librement exposé au soleil, l'action perturbatrice d'une enveloppe de verre si on le protège par une cloche, l'inégale absorption des rayons solaires par la boule brillante, le refroidissement inégal des deux boules par le rayonnement et par le contact de l'air, toutes ces causes font du thermomètre différentiel de Leslie un appareil absolument impropre aux mesures dont il s'agit. Kæmtz ⁽²⁾ l'a cependant employé à la mesure de l'intensité relative des rayons solaires directs et de la lumière diffuse au sommet du Faulhorn (septembre 1832), mais il n'a pu éviter les erreurs inhérentes à l'appareil. M. l'abbé Allégret a repris dernièrement le thermomètre de Leslie et en a fait un *compteur solaire* assez ingénieux : « Le siphon pivote autour d'un axe horizontal, quand l'insolation déplace le liquide qui remplit le tube recourbé et une partie des deux boules ; le système constitue donc une espèce de balance folle dont l'inclinaison marque la force du Soleil. La boule qu'on expose au soleil est peinte en noir, l'autre est couverte d'un enduit jaunâtre et protégée par un écran ; la chaleur solaire chasse le liquide de la boule noire et fait trébucher la balance du côté opposé » ⁽³⁾.

M. de Gasparin ⁽⁴⁾ a employé comme actinomètre une sphère en cuivre mince de 18 centimètres de diamètre, noircie à l'intérieur et logeant à son centre la boule d'un

⁽¹⁾ *Edinburgh Transactions*, t. VII; 1814.

⁽²⁾ *Schweiger's Journal*, t. LXIX; 1833.

⁽³⁾ RADAU, *Actinométrie*. Paris, Gauthier-Villars; 1877.

⁽⁴⁾ *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XXXVI, p. 974; 1853.

thermomètre dont la tige passe au dehors. L'appareil est porté par un piquet que l'on plante au soleil; il se trouve toujours orienté, et l'on n'a plus ces glaces de verre qui constituent le plus grave défaut de l'héliothermomètre et de tous les instruments analogues. On ne peut cependant encore soumettre à aucun calcul rigoureux les résultats de l'observation, rien dans ces mesures ne fixant le refroidissement par l'air, et l'on ne peut attacher aucun sens précis à cette *faculté d'accumulation* pour laquelle M. de Gasparin trouvait au mois d'août 1852 :

A Versailles	5,74
A Orange	7,13
Au Grand Saint-Bernard (2500 mètres)	13,27

On ne peut malheureusement pas attribuer un sens plus net aux indications des instruments couramment employés aujourd'hui en Angleterre et en France pour mesurer statiquement la radiation.

L'actinomètre anglais passe pour être de l'invention de sir John Herschel. Il consiste en un thermomètre à boule noire, logé dans un récipient en verre où l'on a fait le vide. L'enveloppe en verre sert à empêcher l'effet des courants d'air, de l'humidité, de toutes les causes accidentelles qui agissent fortement sur un thermomètre nu; en outre, elle a le très-grand avantage de régulariser le rayonnement, lequel, s'opérant ainsi dans le vide et pour de faibles excès, suit certainement la loi de Newton *avec un coefficient constant*. Il semble donc que, si l'on connaissait la température de l'enceinte, c'est-à-dire de l'enveloppe du thermomètre, l'excès de la température du thermomètre sur celle de l'enceinte mesurerait à chaque instant l'intensité de la radiation. Mais d'abord la température de cette enceinte est difficile à connaître, et elle n'est certainement pas donnée par un thermomètre nu placé à côté, à l'ombre. D'autre part, l'emploi d'une enveloppe de verre entraîne,

à côté des avantages que nous avons signalés, l'inconvénient déjà plus d'une fois mentionné, d'altérer dans une proportion inconnue et variable la radiation à mesurer, de sorte qu'il n'y a plus de mesure exacte possible.

Parmi les instruments trouvés après la mort d'Arago dans ses collections à l'Observatoire de Paris, figuraient les restes d'un appareil signé *Bunten*, 1844 : c'étaient deux thermomètres parfaitement égaux, l'un à boule noircie, l'autre à boule incolore, enfermés chacun dans une enveloppe de verre qui se renflait en boule vis-à-vis de la boule du thermomètre. Lors de l'organisation de l'Observatoire de Montsouris, M. Charles Sainte-Claire Deville fit restaurer l'appareil d'Arago avec des ballons plus grands (10 centimètres de diamètre), pour donner plus de régularité au rayonnement, et entreprit des observations journalières. Ces observations furent continuées par M. Marié Davy, son successeur à Montsouris, avec des ballons plus petits toutefois. L'appareil actuel se compose de deux thermomètres égaux, l'un à boule noire, l'autre à boule incolore, enveloppés chacun d'un tube de verre vide d'air et renflé à la hauteur du réservoir en une boule de 4 centimètres de diamètre. Les deux thermomètres avec leurs enveloppes se fixent, les réservoirs regardant le ciel, parallèlement à deux tiges métalliques disposées en forme de V sur un support dressé au-dessus d'un sol gazonné, loin de tout abri. La différence des deux thermomètres est prise comme mesurant la radiation à l'instant de la lecture. En procédant ainsi, on suppose que le thermomètre incolore donne la température de l'enceinte du thermomètre noir (ce qui est fort douteux) ; on suppose, en outre, que l'enveloppe de verre laisse arriver au thermomètre noir une fraction constante de la radiation (ce qui est tout à fait inexact).

Il serait cependant bien précieux d'avoir un instrument propre à mesurer la radiation suivant la méthode statique,

c'est-à-dire par de simples lectures, sans expérimentation aucune, l'appareil donnant constamment la quantité cherchée.

Voici, je crois, une solution. Dans un lieu bien découvert, au-dessus d'un sol gazonné, installons deux boules identiques en cuivre rouge mince, de 1 décimètre de diamètre extérieur, l'une noircie au noir mat, l'autre couverte d'une mince couche d'or poli; dans chacune de ces boules, noircies à l'intérieur, mettons un thermomètre dont le réservoir sphérique noirci soit au centre de la boule et dont la tige sorte par une petite tubulure horizontale dirigée vers le nord. Les deux boules recevront toutes deux la radiation solaire, et, rayonnant inégalement, elles prendront des températures différentes. Le thermomètre de la boule noire marquera un excès u sur la température de l'air (donnée par le thermomètre-fronde); le thermomètre de la boule dorée indiquera un excès moindre u' .

La boule noire reçoit en une minute une quantité Q de chaleur; la perte qu'elle éprouve pendant le même temps par rayonnement et par contact de l'air est égale à $(e + r)u$, e et r étant deux facteurs respectivement proportionnels au pouvoir émissif de la boule et au pouvoir refroidissant de l'air; la perte étant égale au gain dans l'état stationnaire, on a

$$Q = (e + r)u.$$

Pendant le même temps, la boule dorée reçoit la même quantité de chaleur Q , mais elle n'en absorbe qu'une fraction aQ , a étant le pouvoir absorbant de l'or poli; et ce pouvoir absorbant est constant, bien que la radiation arrive à l'appareil inégalement modifiée par l'atmosphère aux diverses heures de la journée.

J'ai constaté, en effet, que mes boules dorées absorbaient une fraction constante de la chaleur incidente. J'ai mesuré

directement leur pouvoir absorbant aux différentes heures du jour par la méthode de MM. de la Provostaye et Desains. Un couple de boules conjuguées, l'une dorée, l'autre enfumée, identiques d'ailleurs en tout point, étant au soleil depuis un temps suffisant pour que l'état stationnaire soit établi, on cache successivement chacune des boules avec un écran pendant quelques minutes et l'on observe le refroidissement : le rapport des vitesses de refroidissement ν' et ν de l'une et de l'autre boule pour les excès u' et u est égal à a . J'ai opéré ainsi d'abord sur les boules telles que je les ai décrites, puis sur les mêmes boules transformées en réservoirs de thermomètre à alcool. Dans les deux cas, a s'est montré constant : ainsi les boules pleines d'alcool me donnaient le 18 mars 1879 :

	h	m	a .
A	12.	35	0,315
	3.	05	0,306
	4.	01	0,305

J'ai aussi fait tomber successivement sur les boules conjuguées : 1° la radiation solaire directe ; 2° la radiation solaire tamisée à travers une lame d'eau de 1 centimètre d'épaisseur, comprise entre deux glaces parallèles, et je trouvais, par exemple, le 14 mars 1879, dans le premier cas $a = 0,308$ et dans le second $a = 0,303$.

Cette constance de a est d'autant plus remarquable que, dans d'autres conditions, l'or présente au contraire un pouvoir absorbant très-variable : MM. de la Provostaye et Desains ont trouvé que l'or battu en feuilles, déposé sur la boule d'un thermomètre, absorbe 0,13 de la chaleur solaire totale et 0,04 seulement de la radiation d'une lampe à modérateur. Cet or absorbe donc de préférence les radiations les plus réfrangibles, réfléchissant au contraire, dans une énorme proportion, les rayons définis par ces grandes longueurs d'onde qui caractérisent les radiations des sources à basse température et les portions les moins réfrangibles

du spectre solaire. Avec deux gros thermomètres à alcool, dont les boules en verre étaient recouvertes, l'une de noir de fumée, l'autre d'or battu en feuilles, j'ai eu, en effet, le 2 mars 1879 :

^h	^m	^{a.}
9.45	du matin	0,176
10.45		0,130
12.		0,128
1.25	du soir	0,150
2.40		0,163
3.25		0,192
4.20		0,195

Il y aurait là un moyen très-simple et très-exact de définir à chaque instant la composition du rayonnement solaire, moyen que je crois préférable à celui que fournissent les expériences de transmissibilité.

Le même jour, 2 mars 1879, mes boules conjuguées donnaient une valeur de a égale à 0,20 ⁽¹⁾ toute la journée (un peu plus faible vers le soir, mais d'une quantité tout à fait négligeable).

Nous pouvons donc représenter par aQ , a étant une constante pour le couple considéré, la quantité de chaleur absorbée en une minute par la boule dorée. Quand l'équilibre est atteint, cette boule perd par rayonnement et par contact $(e' + r) u'$, r étant le même que plus haut, et l'on a

$$aQ = (e' + r) u'.$$

On a, par conséquent,

$$Q = (e - e') \frac{uu'}{u' - au'}$$

⁽¹⁾ Les boules employées ce jour ne sont pas celles qui ont servi aux expériences rapportées plus haut.

Le facteur constant $(e - e')$, inutile à connaître si l'on se contente de mesures relatives, se déterminera une fois pour toutes soit par comparaison avec un actinomètre absolu admettant la radiation totale (c'est le procédé à la fois le plus simple et le plus exact), soit sur l'appareil même, en mesurant séparément la masse en eau M de l'une ou l'autre boule (les deux boules ont même masse) et les coefficients de refroidissement $\varepsilon + \rho$, $\varepsilon' + \rho$ des deux boules dans une même enceinte; le produit $M[(\varepsilon + \rho) - (\varepsilon' + \rho)]$ est précisément égal à $e - e'$.

a se mesurera facilement toutes les fois qu'on le désirera par la méthode de MM. de la Provostaye et Desains: on opérera de préférence vers midi, ou mieux un peu avant midi, la radiation variant alors très-peu pendant assez longtemps.

La quantité de chaleur qui tombe sur 1 centimètre carré de surface normale aux rayons est, en appelant S la surface d'un grand cercle des boules,

$$q = \frac{e - e'}{S} \frac{uu'}{u' - au},$$

ou, en désignant par K une constante dépendant de l'appareil et toujours facile à connaître par l'un ou l'autre des deux procédés indiqués plus haut,

$$(1) \quad q = K \frac{uu'}{u' - au}.$$

Le calcul numérique de cette formule (1) est très-simple. On peut, d'ailleurs, construire une Table à double entrée, contenant sur une ligne horizontale les valeurs de u , sur une ligne verticale les valeurs de u' , et, à l'intersection des deux lignes marquées l'une d'une valeur numérique de u , l'autre d'une valeur numérique de u' , la valeur correspondante de q .

Si le refroidissement par l'air reste constant pendant

plusieurs heures (et il en sera ainsi dans toutes les belles journées), $e + r$ et $e' + r$ seront l'un et l'autre constants pendant tout ce temps, ce que l'on reconnaîtra immédiatement à ce que le rapport $\frac{u}{u'}$ restera constant; u et u' seront alors, l'un et l'autre, à chaque instant proportionnels à q .

Si le pouvoir refroidissant de l'air vient à changer, le rapport $\frac{u}{u'}$ varie aussitôt, le coefficient de refroidissement étant toujours déterminé par ce rapport :

$$e + r = K \frac{u}{u' - au} = K \frac{1}{1 - a \frac{u}{u'}}$$

Il est clair enfin que l'appareil que je propose indiquera la *radiation totale*, c'est-à-dire la radiation directe du Soleil plus la radiation du ciel. Mais ce rayonnement total est précisément l'élément qui intéresse réellement la Météorologie et l'Agriculture; c'est lui qui règle la marche de la végétation et qui, tenant tous les autres éléments météorologiques sous sa dépendance, donne à chaque climat son caractère particulier ⁽¹⁾.

Pour mesurer la radiation directe du Soleil seule, il

(¹) Le 2 mars 1879, à Grenoble, je relevais pour la radiation les intensités relatives I (K n'a pas été mesuré) consignées dans le tableau suivant avec les excès observés u et u' :

Heures.	ε .	u .	u' .	$\frac{u}{u'}$.	I .
12 ^h	1,64	14,5	7,2	2,02	24,2
1.....	1,73	13,1	5,9	2,22	23,4
2.....	1,94	12,3	5,7	2,16	21,6
3. 30 ^m ...	2,96	12,0	6,6	1,82	18,8
4.....	3,69	9,6	5,3	1,81	15,0
4. 30.....	5,41	7,3	3,9	1,87	11,6

L'intensité avait été plus forte le matin et le maximum avait eu lieu avant midi, comme cela se présente le plus souvent.

faut nécessairement éliminer la lumière de l'atmosphère par une enveloppe percée d'un trou, ne laissant arriver que les rayons du Soleil, et, par suite, il faut pour chaque mesure orienter l'appareil. Nous rencontrerons dans l'exposé de la méthode dynamique des instruments construits sur ce principe et propres également à mesurer statiquement la radiation directe du Soleil. Un même instrument peut, en effet, servir à l'une ou à l'autre méthode. La méthode statique préfère toutefois les appareils ne demandant ni orientation ni manipulation quelconques.

§ II. — *Méthode dynamique.*

La méthode dynamique, employée pour la première fois par sir John Herschel ⁽¹⁾, consiste essentiellement à observer l'échauffement du thermomètre au soleil pendant un temps déterminé et le refroidissement à l'ombre pendant le même temps, avant et après l'exposition au soleil; en ajoutant au réchauffement constaté sous l'action directe du Soleil la moyenne des refroidissements observés avant et après, on a l'effet dû aux rayons solaires.

L'actinomètre d'Herschel n'était autre qu'un héliothermomètre à thermomètre très-sensible, ayant d'ailleurs tous les défauts de l'appareil de de Saussure. Ce fut malheureusement cet instrument dont Forbes ⁽²⁾ se servit dans sa longue série de recherches sur l'absorption des rayons par l'atmosphère. Suivant l'avis d'Herschel et muni de deux de ses actinomètres soigneusement comparés l'un à l'autre, Forbes fit, en 1832 et en 1841, de très-nombreuses observations en divers points des Alpes. Les plus importantes sont celles qu'il effectua avec Kæmtz, en septembre 1832, sur le sommet du Faulhorn (2680 mètres) et à Brienz (560 mètres). Dans toutes ces observations, l'influence de

⁽¹⁾ *Edinburgh Journal of Science*, t. III, p. 107; 1825.

⁽²⁾ *Philosophical Transactions for the year 1842*, Part II, p. 225.

refroidissement fut soigneusement corrigée. Prenant, par exemple, une minute pour durée de l'exposition au soleil, on notait la marche du thermomètre à l'ombre une minute avant, puis une minute après la minute d'insolation. Pour éviter les erreurs d'observation, on observait pendant onze minutes : le thermomètre était exposé à la radiation solaire dans les deuxième, quatrième, sixième, . . . minutes; les échauffements observés étaient corrigés des variations relevées pendant les première, troisième, cinquième, . . . minutes, durant lesquelles un écran était interposé entre le Soleil et l'héliothermomètre, et l'on prenait la moyenne des cinq mesures ainsi effectuées. Il est très-regrettable que l'usage de l'actinomètre d'Herschel ne permette pas d'attacher un sens bien net à des mesures si soigneusement faites; nous dirons cependant plus bas (II^e Partie) quelques mots des résultats auxquels elles ont conduit. Citons encore les observations faites à l'Observatoire de Bruxelles par M. Quetelet avec un actinomètre du même genre, construit par Robinson. Pendant douze années consécutives (1842-1853), on observa chaque jour à midi, suivant la méthode de Forbes, alternativement une minute à l'ombre, une minute au soleil. Les résultats ont été publiés dans l'*Annuaire météorologique de la France pour 1850* et la *Météorologie de la Belgique* (1867); ils ont, comme ceux de Forbes, l'unique défaut d'avoir été obtenus avec un actinomètre ne comportant aucune exactitude.

Bien supérieur était l'instrument employé dès 1837 par Pouillet, à qui l'on doit les premières mesures un peu exactes de la radiation. Le *pyrhéliomètre* de Pouillet consiste en un vase plat très-mince, d'argent ou de plaqué d'argent, rempli d'eau et muni d'un thermomètre. Le bouchon qui fixe le thermomètre au vase s'adapte à un tube de métal soutenu par deux collets, dans lesquels il joue librement, en sorte qu'on peut faire tourner tout l'appareil autour de

l'axe du thermomètre pour agiter l'eau du vase et rendre la température uniforme dans toute sa masse. La base supérieure du vase qui reçoit l'action solaire est soigneusement noircie au noir de fumée; on la maintient perpendiculaire aux rayons, en s'arrangeant de manière que l'ombre du vase couvre toujours un cercle monté perpendiculairement à l'axe vers l'autre extrémité du tube. L'expérience se fait de la manière suivante. L'eau du vase étant à peu près à la température ambiante, on tient le pyrhéliomètre à l'ombre, mais très-près du lieu où il doit recevoir le Soleil; on le dispose de manière qu'il voie la même étendue du ciel, et là, pendant quatre minutes, on note de minute en minute son réchauffement ou son refroidissement; pendant la minute suivante, on le place derrière un écran et on l'oriente de telle sorte qu'en ôtant l'écran à la fin de cette minute, qui sera la cinquième, les rayons solaires le frappent perpendiculairement. Alors, pendant cinq minutes, sous l'action du Soleil, on note de minute en minute son réchauffement, qui devient très-rapide, et l'on a soin de maintenir l'eau sans cesse en agitation; à la fin de la cinquième minute on remet l'écran, on retire l'appareil dans la première position, et pendant cinq minutes encore on observe son refroidissement.

« Soient g le réchauffement qu'il a éprouvé pendant les cinq minutes de l'action solaire, r et r' les refroidissements qu'il a subis pendant les cinq minutes qui ont précédé cette action et pendant les cinq minutes qui l'ont suivie; l'élévation de température t produite par la chaleur du Soleil est

$$t = g + \frac{r + r'}{2},$$

et, si M est la masse en eau de l'appareil, cette élévation de température t correspond à une quantité de chaleur Mt , tombée en cinq minutes sur la surface S du vase, c'est-

à-dire à une quantité

$$\frac{M}{5S}^t,$$

reçue en une minute par 1 centimètre carré de surface.»

Lorsque l'air est agité, Pouillet emploie un pyréliomètre à lentille se composant d'une lentille de 25 centimètres de diamètre et 60 centimètres environ de distance focale, au foyer de laquelle se trouve un vase d'argent ou de plaqué d'argent contenant 600 grammes d'eau; la forme du vase et la disposition de la lentille sont combinées de telle sorte que, pour toutes les hauteurs du Soleil, les rayons tombent perpendiculairement sur la lentille et sur la face du vase qui est destinée à les recevoir au foyer et à les absorber.

« Les expériences se font comme avec l'appareil précédent, et les quantités de chaleur qui tombent en une minute sur chaque centimètre carré se déterminent par une formule analogue; seulement il y a une correction de plus à faire pour la quantité de chaleur que la lentille absorbe, et cette correction, *qui est au minimum le huitième de la chaleur incidente*, se fait par la comparaison des résultats obtenus avec la lentille et avec l'appareil direct. »

C'est donc au pyréliomètre direct que se rapportent finalement toutes les mesures de Pouillet, et cet instrument est défectueux sous plus d'un rapport. Le défaut le plus grave, si grave même qu'il doit faire renoncer entièrement à l'appareil, consiste en ce que le thermomètre de l'instrument n'indique nullement la température de la surface exposée aux rayons solaires. Cela saute aux yeux dans toute expérience faite avec le pyréliomètre : que l'on expose, en effet, l'instrument au soleil pendant cinq minutes, en ayant soin d'agiter tout le temps, comme le recommande Pouillet, qu'on retire ensuite le pyréliomètre à l'ombre, et l'on verra le thermomètre monter

pendant encore près d'une minute; quand ensuite on reviendra au soleil, on observera un retard analogue dans la marche du thermomètre. J'ai fait un assez grand nombre d'observations avec un pyrhéliomètre que Ruhmkorff m'avait construit bien exactement sur le modèle de celui de Pouillet, et qui était muni d'un excellent thermomètre de Fastré : j'ai toujours observé ce retard. Je ne citerai que quelques nombres :

1 ^{er} mai 1874.		Température de l'air : 17 degrés.	
h	m	°	
1.	0.	33,0	ombre.
1.	1.	32,6	»
1.	2.	32,2	»
1.	3.	31,8	»
1.	4.	31,5	»
1.	5.	31,20	soleil.
1.	6.	31,45	»
1.	7.	31,70	»
1.	8.	32,00	»
1.	9.	32,25	»
1.	10.	32,5	ombre.
1.	11.	32,3	»
1.	12.	32,0	»
1.	13.	31,7	»
1.	14.	31,4	»
1.	15.	31,1	soleil.
1.	16.	31,4	»
1.	17.	31,6	»
1.	18.	32,0	»
1.	19.	32,2	»

Dans ces conditions, il me semble impossible d'évaluer l'échauffement ou le refroidissement de la surface rayonnante pendant chaque phase de l'expérience.

M. Dufour ⁽¹⁾ a essayé dernièrement de remédier à ce vice de l'appareil de Pouillet, en modifiant la manière d'expérimenter : « A la cinquième minute, l'instrument était ramené à l'ombre; sa température continuait à s'élever et le maximum était atteint à six minutes, plus ou moins quelques secondes. Lorsque l'appareil avait sûrement fourni son maximum, on le remplaçait quelques moments au soleil, de manière à le réchauffer d'environ 1 degré, puis on le retirait à l'ombre et l'on observait le refroidissement. » Cette observation servait à corriger, comme d'habitude, les indications fournies par l'instrument au soleil. L'avantage de ce mode opératoire est douteux; l'auteur reconnaît lui-même que « sa méthode n'est assurément pas irréprochable et laisse place encore à des incertitudes ».

On ne s'étonnera pas, d'ailleurs, de voir la température de l'eau du pyrhéliomètre si différente de celle de la face rayonnante de l'appareil, pendant toute l'expérience, si l'on se rappelle la mésaventure arrivée à Péclet lors de ses premières expériences pour mesurer les conductibilités calorifiques des métaux. La plaque à étudier formant le fond d'un calorimètre plongé dans un grand vase plein d'eau à 100 degrés, la nature de la plaque se montra sans influence sur la quantité de chaleur transmise au calorimètre dans un temps donné. Frappé de ce résultat singulier, Péclet en chercha la cause et reconnut qu'elle résidait dans la viscosité de l'eau, qui, malgré les agitateurs employés, ne se renouvelait pas facilement au contact de la lame métallique, de sorte que la chaleur avait en réalité trois plaques à traverser, la plaque en expérience et deux plaques d'eau immobilisées sur les deux faces du métal. On ne put se débarrasser à peu près de ces deux lames d'eau que par

⁽¹⁾ DUFOUR, *Réflexion de la chaleur solaire à la surface du lac Léman* (Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles, n° 69, vol. XII, et Archives de Genève, t. XLI, p. 129; 1873.

Ann. de Chim. et de Phys., 5^e série, t. XVI. (Juillet 1879.)

l'emploi d'un double système de brosses frottant les deux faces de la plaque métallique. L'agitation très-imparfaite du liquide dans le pyrhéliomètre de Pouillet laisse de même, sans aucun doute, une couche d'eau adhérente à la face supérieure de la boîte, et cette couche, mauvaise conductrice, est certainement le principal obstacle à un équilibre rapide de température. M. Tyndall a cherché à remédier à cet inconvénient capital en remplaçant l'eau par du mercure dans la boîte du pyrhéliomètre. Mais, si le mercure conduit mieux la chaleur que l'eau, il ne mouille pas le fer, le seul métal avec lequel on puisse alors construire l'appareil, et l'on est bien plus exposé encore aux différences de température entre la surface extérieure de la boîte et le liquide intérieur. L'absence de contact entre le mercure et le fond supérieur de la boîte est d'autant plus à craindre que, d'après M. Crova, qui s'est beaucoup servi de cet appareil, « afin d'éviter la rupture possible de l'instrument par la dilatation du mercure, le bouchon qui porte le thermomètre n'est vissé à fond qu'après que la température de la boîte pleine de mercure a été élevée à 60 degrés environ ».

Il paraît donc singulièrement difficile d'obtenir du thermomètre la température de la face insolée; aussi me semble-t-il sans intérêt d'entrer dans le détail des autres critiques assez nombreuses que l'on peut adresser, et que l'on a adressées en effet, à l'appareil de Pouillet.

Le pyrhéliomètre a été employé par Otto Hagen à Madère en 1861 et par M. Althans ⁽¹⁾ aux environs de Bonn en 1852. Les observations de Hagen s'accordèrent entièrement avec celles de Pouillet, tandis que M. Althans trouva pour la radiation un nombre beaucoup plus élevé. Le pyrhéliomètre à lentille a été utilisé par MM. Bravais et Martins ⁽²⁾ dans les expériences comparatives qu'ils

⁽¹⁾ *Poggendorff's Annalen*, t. XC, p. 544; 1853.

⁽²⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. LVIII, p. 210; 1860; et Bravais, *Voyages en Scandinavie*, t. III, p. 337.

firent en 1844 au Grand-Plateau (3930 mètres) et à Chamonix (1040 mètres). Ils établirent, comme de Saussure l'avait déjà montré, mais avec plus de précision, que le rayonnement solaire devient plus intense quand on s'élève au-dessus du niveau de la mer. Vingt ans plus tard (1864), M. Martins a vérifié le même fait par des mesures de l'échauffement du sol au sommet du Pic du Midi et à Bagnères : la différence de niveau des deux stations étant 2330 mètres, l'excès thermométrique moyen du sol à 5 centimètres de profondeur fut aux deux stations dans le rapport de 22 à 10, c'est-à-dire plus du double sur la montagne de l'excès dans la plaine.

Avant de se servir du pyréliomètre, Pouillet ⁽¹⁾ avait d'abord fait quelque usage d'un thermomètre dont la boule était placée au centre d'une double enceinte, maintenue à zéro et percée d'un trou par lequel arrivaient les rayons solaires.

Cet instrument fut repris en 1862 par M. Ericsson ⁽²⁾ en Amérique et par le P. Secchi ⁽³⁾ à Rome; toutefois M. Ericsson plaça devant le trou livrant passage aux rayons une glace que le P. Secchi se hâta avec raison d'enlever. C'est avec cet actinomètre que le P. Secchi crut vérifier le fait annoncé par Waterston, que l'excès du thermomètre insolé est indépendant de la température de l'enceinte. J'ai montré que cela n'est point exact.

De 1867 à 1869, M. Soret ⁽⁴⁾ fit, avec des actinomètres analogues à celui du P. Secchi, de nombreuses mesures de chaleur solaire à Genève et sur plusieurs sommets des Alpes. Comme le P. Secchi, M. Soret opère de préférence par la méthode statique; il ne tient pas davantage compte

⁽¹⁾ POUILLET, *Éléments de Physique expérimentale et de Météorologie*, 1^{re} édit., t. II, p. 703; 1830.

⁽²⁾ *Nature*, t. IV, V, XII et XIII.

⁽³⁾ SECCHI, *le Soleil*, 2^e édit., Paris, Gauthier-Villars; 1877; t. II, 233.

⁽⁴⁾ *Association française*, Congrès de Bordeaux, p. 282; 1872.

des changements du pouvoir refroidissant de l'air en un même lieu d'un instant à l'autre, et, quand il passe d'un lieu à un autre beaucoup plus élevé, c'est par une correction peu certaine (cette correction s'élève dans certains cas jusqu'à $2^{\circ},5$) qu'il évalue l'influence du changement de pression sur la perte par l'air. Ces négligences de méthode, jointes à quelques imperfections de l'appareil, ne permettent pas d'attribuer une exactitude absolue aux résultats numériques obtenus par M. Soret dans cette longue série, si riche d'ailleurs en importantes observations, parmi lesquelles nous devons citer dès maintenant les mesures de transmissibilité à travers l'eau. Melloni avait constaté l'inégale transmissibilité des rayons solaires à travers les corps diathermanes aux diverses heures de la journée; M. Soret a repris et systématisé ces observations, et son exemple a été bien des fois suivi depuis.

A côté de ces actinomètres à enceinte isotherme se place la pile thermo-électrique. Déjà utilisée par le P. Secchi ⁽¹⁾ pour déterminer la température relative des différents points du Soleil, elle a été particulièrement appliquée par M. Desains ⁽²⁾ à l'étude de la radiation solaire. Un actinomètre à pile thermo-électrique a également été installé à l'Observatoire de Montsouris, où il est confié à M. Lescœur. Dernièrement enfin, M. Rossetti ⁽³⁾ a appliqué le même appareil à des mesures d'intensités comparées, en vue d'obtenir la température du Soleil. La pile thermo-électrique, reliée à un galvanomètre sensible, est évidemment l'instrument le plus sensible que l'on puisse employer à la réalisation de la méthode imaginée par Herschel et fondée

(¹) SECCHI, *le Soleil*, 2^e édit, t. I, p. 203. « La température, comme la lumière, diminue dans le disque solaire, du centre à la circonférence. La chaleur n'est pas symétriquement répartie dans les deux hémisphères. »

(²) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXIX, p. 1133; 1869; t. LXXVIII, p. 1455; 1874; t. LXXX, p. 1420; 1875.

(³) *Memorie della Società degli Spectroscopisti italiani*, t. VII; 1878.

sur l'observation de la vitesse initiale de réchauffement du thermomètre soumis à la radiation : l'action impulsive communiquée à l'aiguille du thermo-multiplicateur est proportionnelle à cette vitesse et proportionnelle par conséquent à l'intensité de la radiation. Remarquons en outre que, la pile thermo-électrique étant un thermomètre différentiel convenablement protégé contre les variations brusques des influences extérieures, on retrouve sous une autre forme la précision que présentent les actinomètres pourvus d'une enceinte à température invariable. Mais la constante de l'appareil ne pouvant se déterminer que par comparaison avec un thermomètre ordinaire, et cette comparaison devant être répétée avant chaque série d'expériences, la pile thermo-électrique ne présente aucun avantage pour une mesure absolue de l'intensité calorifique de la radiation solaire, et elle ne convient, en réalité, qu'à des mesures d'intensité relative auxquelles suffisent ordinairement des instruments moins délicats. Les mesures absolues se font au contraire sans difficulté avec l'actinomètre dont je me suis servi, et que j'appellerai en conséquence *actinomètre absolu*.

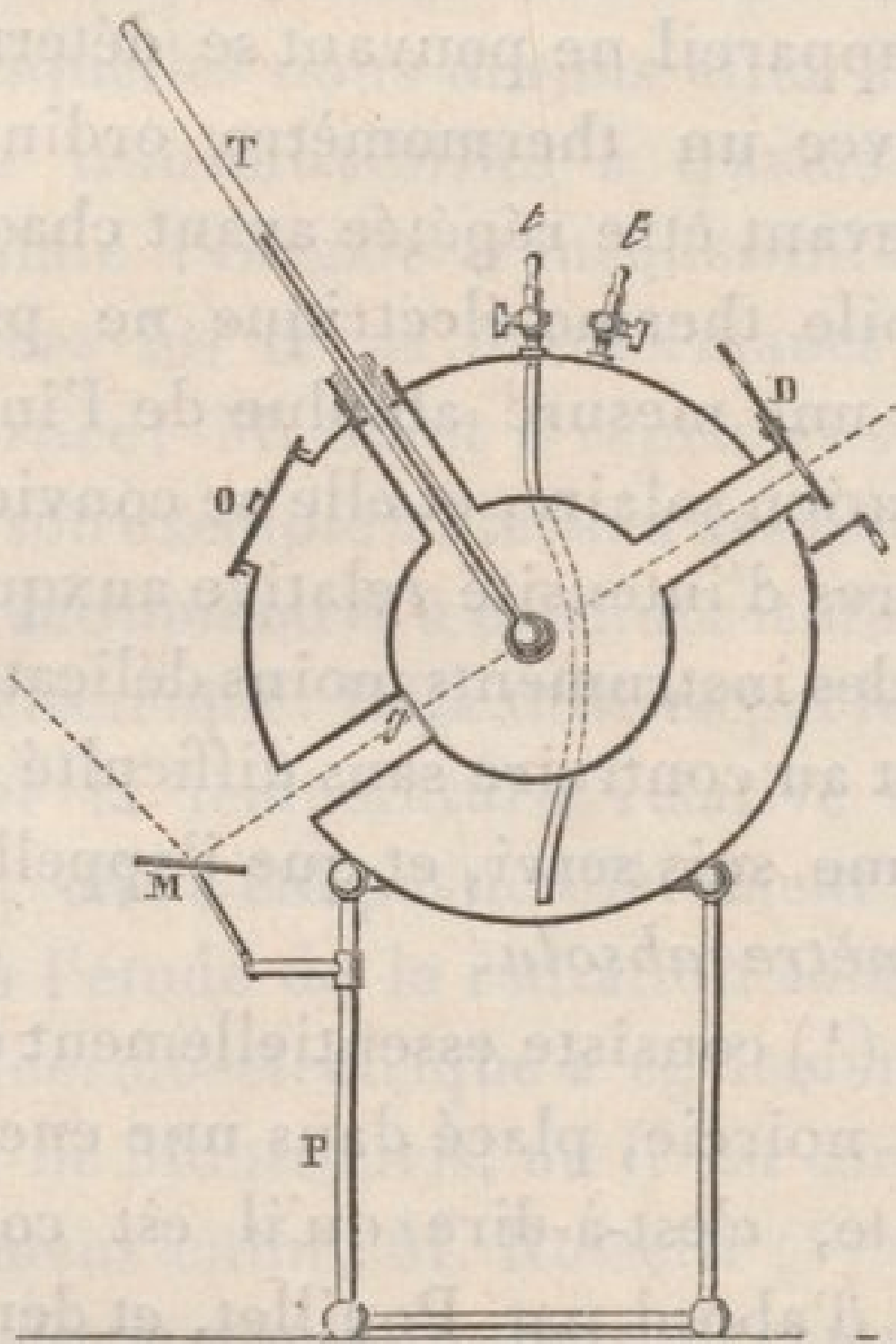
Cet appareil ⁽¹⁾ consiste essentiellement en un thermomètre à boule noircie, placé dans une enceinte à température constante, c'est-à-dire qu'il est construit sur le modèle adopté d'abord par Pouillet, et dernièrement repris par MM. Ericsson, P. Secchi et Soret. Il ne suffit pas toutefois de donner à l'enceinte une température uniforme et constante pour régulariser le rayonnement de l'enveloppe, de manière à rendre l'appareil toujours comparable à lui-même. Si l'on néglige les dispositions prises par Dulong et Petit dans leur grand travail sur le rayonnement, si l'on oublie les résultats de l'importante révision

⁽¹⁾ *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXXVIII, p. 1425 et 1816; 1874; t. LXXXII, p. 729 et 896; 1876; t. LXXXVI, p. 818; 1878; et *Annales de Chimie et de Physique*; mars 1877.

de ce travail par MM. de la Provostaye et Desains, on emploiera des enceintes cylindriques et de petites dimensions, causes de perturbations inévitables au moindre changement dans la disposition relative des diverses pièces de l'instrument. On évite toute erreur en prenant une enceinte sphérique de dimensions suffisantes.

Mon actinomètre se compose donc de deux enveloppes sphériques concentriques en laiton. L'enveloppe intérieure

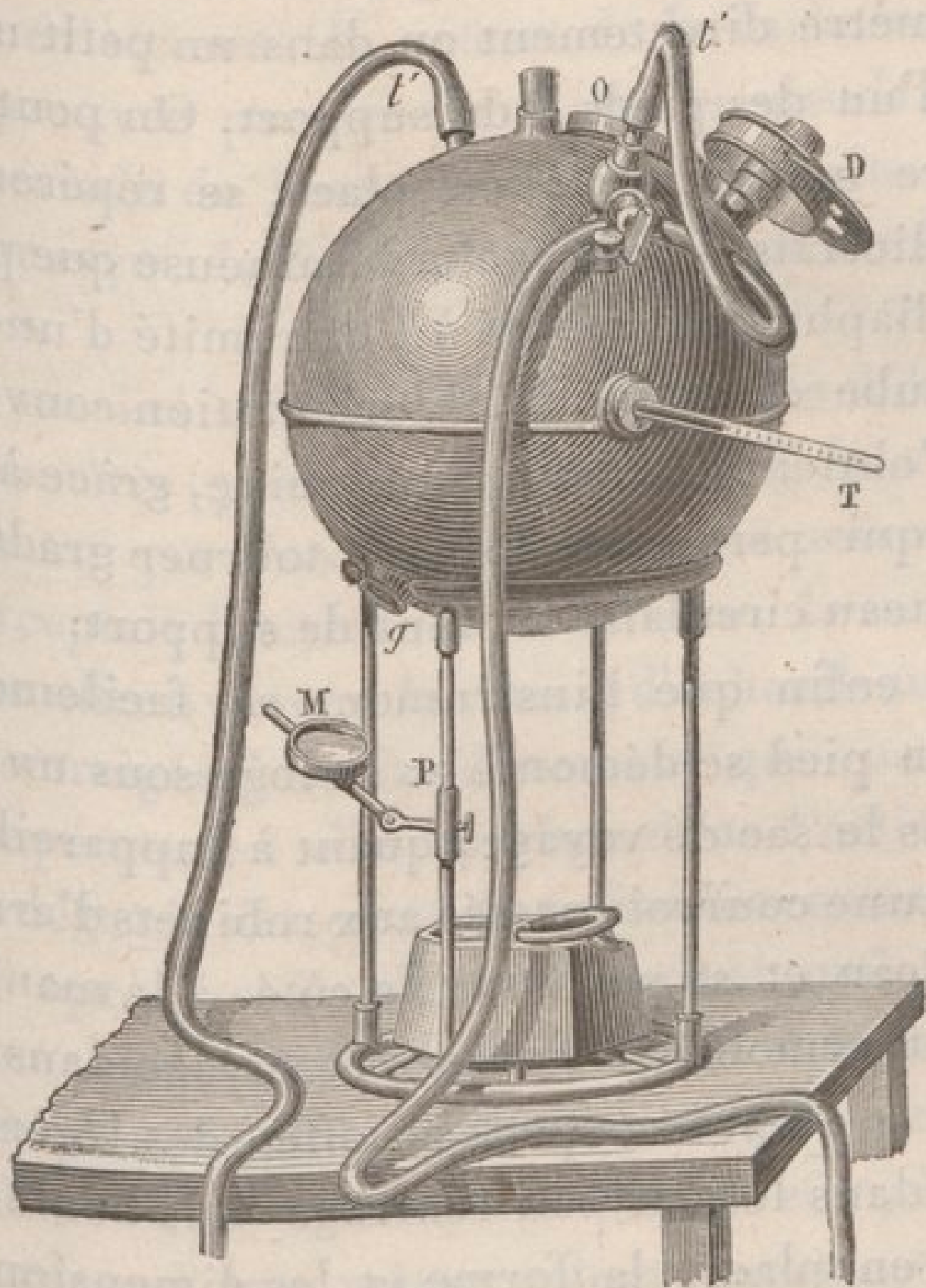
Fig. 1.



de 15 centimètres de diamètre, constitue l'enceinte au centre de laquelle se trouve la boule du thermomètre (fig. 1 et 2) soumis à l'expérience. C'est un thermomètre à réservoir sphérique et à tige cylindrique étranglée extérieurement, au voisinage de la boule, sur une longueur d'environ 15 millimètres. Le diamètre du réservoir varie de 5 à 15 millimètres; la tige est divisée en cinquièmes de degré; on pourra donc toujours, dans les circonstances les plus défavorables, faire les lectures à $\frac{1}{10}$ de degré près. La boule du thermomètre est recouverte de noir de fumée; l'enceinte

est également noircie intérieurement, et elle est maintenue à une température constante par de la glace ou du névé entassé entre les deux enveloppes, ou par un courant d'eau continu circulant entre les deux boules; un trou O muni d'un bouchon à vis et deux tubes à robinet *t* et *t'* satisfont à l'un ou l'autre usage. La boule extérieure a 23 centimètres de diamètre; elle a été soigneusement polie sur sa

Fig. 2.



surface externe et elle est en outre protégée par des écrans, non représentés sur la figure, qui laissent libre seulement l'ouverture d'admission. Cette ouverture est à l'une des extrémités d'un tube de laiton de 17^{mm},5 de diamètre, dirigé suivant l'un des rayons de la sphère et débouchant, d'autre part, dans la boule intérieure. L'extrémité libre du tube d'admission porte un diaphragme mobile D, percé de trous circulaires de diverses grandeurs. Trois autres tubes traversent encore, suivant des rayons,

l'espace compris entre les deux sphères : deux d'entre eux, placés l'un à 45 degrés, l'autre à 90 degrés du tube d'admission, servent l'un ou l'autre, suivant les circonstances, à laisser passer la tige du thermomètre ; le troisième, fermé par une glace dépolie et légèrement noircie *g*, est dirigé suivant le prolongement du tube d'admission et permet de constater que les rayons solaires tombent bien exactement sur la boule du thermomètre : il laisse voir en effet l'ombre du thermomètre directement ou dans un petit miroir *M*, articulé à l'un des pieds *P* du support. On peut aussi, le thermomètre une fois mis en place, se repérer, comme dans les héliostats, sur la tache lumineuse que projette le trou d'un diaphragme monté à l'extrémité d'une tige parallèle au tube d'admission. L'orientation convenable de l'appareil s'obtient d'ailleurs sans peine, grâce à sa forme sphérique, qui permet de le faire tourner graduellement dans un anneau circulaire servant de support.

Ajoutons enfin que l'instrument est facilement transportable : le pied se démonte et se loge sous un très-petit volume dans le sac de voyage ; quant à l'appareil même, il se saisit par une courroie passée aux robinets d'arrivée et de sortie de l'eau et se porte sur le côté, à la manière d'une gourde. Le thermomètre s'enlève et voyage dans un étui ; on n'a pas à se préoccuper, en effet, des légères erreurs inévitables dans le nouveau centrage de la boule lorsqu'on le remettra en place, la forme et les dimensions de l'enceinte assurant dans tous les cas la parfaite comparabilité des résultats.

La marche d'une expérience est la suivante. Tous les tubes étant soigneusement fermés et le thermomètre installé, on lit la température (laquelle est stationnaire si tout est bien réglé depuis un temps suffisant) ; puis on ouvre le tube d'admission, après avoir amené en face du tube tel trou du diaphragme que l'on juge convenable. Maintenant dès lors l'appareil toujours exactement orienté,

on note de minute en minute (ou de demi-minute en demi-minute) la température accusée par le thermomètre, jusqu'à ce que cette température soit devenue stationnaire, ce qui demande environ un quart d'heure. L'état stationnaire atteint, on supprime la radiation solaire par un jeu convenable du diaphragme et l'on suit la marche descendante du thermomètre en opérant exactement comme dans la première phase de l'expérience. De ces mesures on déduit immédiatement la vitesse de la variation de température éprouvée par le thermomètre pendant l'une et l'autre période de l'expérience, et par suite la quantité de chaleur reçue du Soleil, en s'appuyant sur la remarque suivante.

Soit, à un instant donné, V la vitesse d'échauffement du thermomètre pour l'excès actuel θ , U la vitesse de refroidissement que l'on observerait à ce même excès θ si l'on interceptait l'action de la source; la somme $V + U$ représente effectivement la vitesse d'échauffement du thermomètre corrigée du refroidissement qui correspond à la même température : elle exprime donc l'action constante du Soleil dégagée des effets du refroidissement. Par conséquent, si après avoir observé pendant quelques minutes l'échauffement du thermomètre exposé à la radiation solaire on intercepte cette radiation, et qu'on observe alors le refroidissement, on trouvera que, en effet, à chaque valeur de θ répond une même valeur constante de $V + U$, quoique séparément V et U changent avec θ . En multipliant cette somme constante par la valeur en eau M de la portion du thermomètre qui s'échauffe et en la divisant par la section de cette boule, on aura la quantité de chaleur solaire qui tombe en une minute sur 1 centimètre carré de surface normale aux rayons, c'est-à-dire la *mesure absolue* de la quantité de chaleur reçue par notre globe au point et à l'instant considérés.

Voici, par exemple, les observations faites dans la ma-

tinée du 16 août 1875 au sommet du Mont-Blanc (les temps t sont comptés à partir de l'ouverture ou de la fermeture du tube d'admission) :

Temps	Échauffements	Refroidissements	
$t.$	$\theta.$	$\theta'.$	$\theta + \theta'.$
m	°	°	°
0.....	0,0	18,0	18,0
5.....	14,9	3,0	17,9
10.....	17,6	0,6	18,2
15.....	17,9	0,1	18,0
20.....	18,0	0,0	18,0

La somme $\theta + \theta'$ est constante et égale à θ_0 : l'échauffement et le refroidissement se sont faits avec la même vitesse. Les températures d'échauffement sont données par la formule

$$\theta = \theta_0 (1 - e^{-mt}) = 18 (1 - e^{-0,36t}),$$

et les températures de refroidissement par la formule

$$\theta' = \theta_0 e^{-mt} = 18 e^{-0,36t}.$$

Les vitesses d'échauffement et de refroidissement sont donc respectivement

$$V = m\theta_0 - m\theta = 6^{\circ},552 - 0,36\theta$$

et

$$U = m\theta' = 0,36\theta,$$

d'où il suit que, pour une même température $\theta = \theta'$, on aura

$$V + U = m\theta_0 = 6^{\circ},552.$$

Un avantage précieux de la méthode est l'emploi de toutes les données au calcul de la quantité cherchée : il y a là un contrôle rigoureux dont l'importance ne saurait échapper.

La somme $V + U$ représente l'action du Soleil; multipliée par la valeur en eau M de la portion du thermomètre qui s'échauffe ⁽¹⁾ et divisée par la surface d'un

(¹) M avait été soigneusement déterminée; on l'avait mesurée indirecte-

grand cercle, elle constituera l'expression numérique de la quantité absolue de chaleur I reçue à 10^h 22^m du matin, le 16 août 1875, au sommet du Mont-Blanc,

$$I = 2^u, 392,$$

l'unité de chaleur étant la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 gramme d'eau. En unités C. G. S., I serait exprimée par un nombre 60 fois plus petit, soit

$$J = 0,03987.$$

Cet exemple suffit pour montrer comment on peut, avec mon actinomètre, obtenir facilement une évaluation absolument rigoureuse de la radiation en valeur absolue, laquelle évaluation donne en même temps, comme nous le verrons plus bas, la quantité de vapeur contenue au même instant dans l'atmosphère.

Il est manifeste toutefois qu'un tel appareil, s'il a sa place marquée dans tous les grands observatoires météorologiques, ne convient pas aux stations de second ordre, dans lesquelles devraient être installées au contraire les *boules conjuguées* dont j'ai parlé plus haut (I).

Depuis plusieurs années, M. Crova ⁽¹⁾ poursuit à Montpellier des mesures actinométriques dont nous aurons plus loin à discuter les résultats. L'appareil dont il se sert est un gros thermomètre à alcool, avec index de mercure, à boule très-soigneusement noircie, protégée par une enveloppe sphérique en laiton, et recevant les rayons solaires par une ouverture étroite pratiquée dans l'enveloppe. Cet

ment par des expériences de refroidissement, et directement sur un thermomètre tout semblable à celui qui avait servi, rompu à la naissance de la tige; or on a trouvé dans les deux cas $M = 0^s, 222$, et l'on avait

$$\frac{M}{S} = 0,365.$$

⁽¹⁾ *Mémoires de l'Académie de Montpellier*, 1876, et *Annales de Chimie et de Physique*, 5^e série, t. XI, p. 433; 1877.

appareil, très-sensible, n'est peut-être pas exempt de toutes les imperfections que nous a présentées le pyrhéliomètre de Pouillet. Lorsque la radiation solaire est admise sur la boule du thermomètre, l'index ne prend sa marche régulière qu'après un certain temps; il y a un retard que M. Crova corrige un peu arbitrairement en opérant comme il suit : l'instrument, placé à l'ombre, ayant pris à peu près la température de l'air, on l'observe une première minute, puis on écarte l'écran qui arrêtaient les rayons solaires, *on attend une minute* et l'on note le réchauffement pendant la troisième minute; on replace l'écran, *on attend encore une minute* et l'on prend le refroidissement pendant la cinquième minute. Ajoutons que les mesures relatives fournies par l'instrument sont converties en mesures absolues par étalonnement avec un pyrhéliomètre à mercure, ce qui nous ramène aux incertitudes de l'appareil de Pouillet.

Citons enfin l'application du calorimètre à glace de Bunsen à la mesure de la chaleur solaire par MM. Exner et Roentgen ⁽¹⁾. Le calorimètre consiste alors en une petite cloche de verre, surmontée d'un couvercle d'argent noirci au noir de fumée et munie d'un tube horizontal gradué; l'eau de la cloche étant primitivement congelée, si l'on expose l'appareil aux rayons solaires, une certaine quantité de glace fond et le liquide se retire dans le tube horizontal, mesurant par son recul la quantité de glace fondue et par conséquent la chaleur absorbée. On opère, cela va sans dire, alternativement au soleil et à l'ombre, et l'on prend pour mesure de l'effet cherché la différence des nombres observés dans les deux cas. La méthode est en apparence excellente; mais la couche d'eau liquide qui se forme sous la surface insolée introduit des irrégularités dans les résul-

⁽¹⁾ *Sitzungsberichte der K. Akademie der Wissenschaften*. Wien, 26 feb. 1874.

tats. Ainsi une série d'observations faites à Strasbourg le 2 avril 1873, et commencée à 10 heures du matin, a donné successivement les valeurs suivantes de la radiation, en unités de chaleur :

1,387, 1,246, 1,110, 1,144, 1,153, 1,207,

c'est-à-dire, au lieu de nombres régulièrement croissants à mesure que le Soleil s'élevait au-dessus de l'horizon, des nombres d'abord décroissants, puis lentement croissants.

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE.

NOUVEAU POLARISEUR EN SPATH D'ISLANDE. — EXPÉRIENCE DE FLUORESCENCE ⁽¹⁾.

PAR M. LÉON FOUCAULT.

Extrait du *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*.

Quand on se propose de polariser d'une manière complète un faisceau de lumière blanche, le meilleur moyen connu est de recourir à l'usage du prisme de Nicol ; cependant, dès qu'on cherche à opérer sur un faisceau d'un certain volume, de 0^m,04 à 0^m,05 de diamètre par exemple, le prisme de Nicol devient dispendieux et difficile à se procurer, en raison de la rareté des beaux échantillons de spath.

La coupe adoptée pour la construction du prisme de Nicol entraîne nécessairement une assez grande dépense

(¹) Voir *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLV, p. 238. Une Note sur cette question a également été présentée à la Société philomathique le 25 juillet 1857. Voir le journal *l'Institut et Procès-verbaux de la Soc. phil.*, p. 104; 1857.

de matière. Pour que le prisme soit entier, il faut qu'il soit pris dans un canon de spath dont les arêtes longitudinales égalent au moins trois fois l'un des côtés égaux qui terminent les bases. On coupe alors la pièce d'angle en angle obtus par un plan incliné à 88 degrés sur le plan des bases et perpendiculaire au plan de leurs petites diagonales. On polit les deux faces ainsi obtenues, et on les recolle au moyen de baume de Canada.

Quand on dirige un parallélépipède ainsi préparé sur un fond uniformément éclairé et qu'on regarde à travers la pièce suivant l'axe de figure, on voit se dessiner un champ de polarisation compris entre deux bandes courbes, l'une rouge et l'autre bleue, qui répondent aux directions limites suivant lesquelles se transmettent le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire. Ces bandes comprennent un espace angulaire de 22 degrés, ce qui fait du prisme de Nicol un analyseur applicable dans toutes les circonstances où l'inclinaison des rayons que l'on veut observer simultanément ne dépasse pas les 22 degrés.

Mais cette étendue angulaire du champ de polarisation que l'on recherche dans le prisme de Nicol, considéré comme analyseur, ne présente plus le même intérêt quand l'appareil doit jouer simplement le rôle de polariseur, car alors l'action qu'il s'agit de produire ne porte en général que sur un faisceau de lumière à peu près parallèle. En sorte qu'il y aurait avantage en pareille circonstance à augmenter l'étendue des dimensions transversales du prisme, lors même qu'il en résulterait une certaine réduction dans l'étendue du champ angulaire de polarisation.

En réfléchissant aux données de la question, j'ai en effet reconnu qu'on peut modifier dans sa coupe le prisme de Nicol, de manière à en diminuer considérablement la longueur, sans nuire aux effets qu'il peut produire en qualité de polariseur.

Je prends donc un parallélépipède de spath dont les