



Le rayonnement hertzien du soleil et l'influence de l'activité solaire sur le magnétisme terrestre

Ch. Nordmann

► To cite this version:

Ch. Nordmann. Le rayonnement hertzien du soleil et l'influence de l'activité solaire sur le magnétisme terrestre. J. Phys. Theor. Appl., 1904, 3 (1), pp.97-120. 10.1051/jphystap:01904003009700 . jpa-00240976

HAL Id: jpa-00240976

<https://hal.science/jpa-00240976>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LE RAYONNEMENT HERTZIEN DU SOLEIL ET L'INFLUENCE DE L'ACTIVITÉ
SOLAIRE SUR LE MAGNÉTISME TERRESTRE ;

Par M. Ch. NORDMANN (1).

I. — Les idées des astronomes du milieu du siècle dernier, d'après lesquelles le soleil ne nous enverrait que des radiations qui impressionnent la rétine et la plaque photographique, se sont aujourd'hui bien modifiées. La méthode bolométrique, notamment entre les mains d'observateurs comme Langley, a établi que le spectre solaire se prolonge très loin dans l'infra-rouge, de telle sorte que, même si on adopte pour la représentation du spectre l'échelle logarithmique (qui avantage pourtant les petites longueurs d'onde), la partie actuellement connue du spectre solaire calorifique occupe une étendue prépondérante. Depuis M. Rubens a découvert les « rayons restants » de longueur d'onde plus grande encore ; ces travaux, après tant d'autres, confirmaient la justesse des idées de Maxwell, qui attribue la lumière à un phénomène électromagnétique, et il m'a paru que, puisqu'il n'y a pas de base philosophique pour une distinction physique entre le rayonnement physique et le rayonnement hertzien, on peut *à priori* considérer comme une hypothèse extrêmement vraisemblable que la photosphère émet des ondes hertziennes.

D'autres considérations, indépendantes, celles-ci, de toute conception théorique, m'ont confirmé dans cette manière de voir :

Chaque fois que dans notre atmosphère des perturbations mécaniques violentes se produisent (cyclones, dépressions brusques, etc.), des décharges électriques ont lieu qui tendent à rétablir l'équilibre rompu des couches de niveau. Or les photographies du soleil montrent que les *grains de riz* qui constituent la photosphère et dont chacun a une étendue souvent plus grande que la France, sont animés de mouvements si rapides que l'aspect des clichés varie sensiblement d'une minute à l'autre et que les cyclones terrestres les plus

(1) Communication faite à la Société française de physique : Séance du 20 novembre 1903.

formidables n'ont que des vitesses infimes en comparaison. Pareillement la chromosphère et les protubérances (partie basse de l'atmosphère solaire) sont, comme le montre le spectroscopie, sujettes à de constantes et violentes éruptions. Or tous ces mouvements des gaz solaires doivent engendrer des décharges électriques semblables à celles de nos orages, mais incomparablement plus intenses.

Ce n'est pas seulement l'étude oculaire et photographique du soleil, qui montre qu'elle est le siège de décharges électriques violentes. Dès 1873, MM. Tacchini et Delarive l'ont montré⁽¹⁾ par des considérations déduites de l'analyse spectrale; Fizeau, en 1891⁽²⁾, a appuyé ces idées de preuves nouvelles que les recherches les plus récentes sur les agents de la luminescence des gaz n'ont fait que confirmer; enfin M. Deslandres a déduit de l'étude du spectre et des formes variées des protubérances éruptives que celles-ci sont illuminées électriquement et sont produites par des décharges analogues à celles des orages terrestres⁽³⁾.

Or dans ces décharges intenses de l'atmosphère solaire il doit se produire des ondes hertziennes, comme celles de nos orages atmosphériques (que MM. Popoff en Russie, Tommasina en Suisse, Fényi en Autriche, etc., enregistrent régulièrement à l'aide d'antennes et de radioconducteurs), mais incomparablement plus intenses. On sait, d'autre part, que la fréquence et l'intensité des protubérances et l'agitation de la surface solaire sont intimement liées à la présence sur le soleil de taches et de facules; l'intensité de décharges électriques dans le soleil doit donc en dépendre directement.

De tous ces faits j'ai été amené à déduire logiquement la proposition suivante :

Le soleil doit émettre des ondes hertziennes, et cette émission doit être particulièrement intense dans les régions et aux époques de la plus grande activité solaire, c'est-à-dire dans les régions des taches et des facules et au moment du maximum des taches solaires.

Cette proposition a certes le caractère d'une hypothèse, et il en sera ainsi jusqu'au jour où l'on aura pu enregistrer expérimentalement des radiations hertziennes d'origine nettement solaire. Peut-être ce jour n'arrivera-t-il jamais, car des causes naturelles (l'action

(1) *Memorie della Societa degli Spettroscopisti Italiani*, 1873.

(2) *C. R.*, 1891, p. 353.

(3) *Annales du Bureau des Longitudes*, t. VI C., *passim*.

fortement absorbante des couches raréfiées de l'atmosphère supérieure) tendent à arrêter complètement avant qu'elles arrivent au niveau du sol les ondes électromagnétiques venant de l'espace ; et les tentatives expérimentales faites jusqu'ici dans ce sens et parmi lesquelles je rappelle les expériences que j'ai exécutées, en 1901, sur le Mont-Blanc⁽¹⁾, ont, de ce fait, été condamnées à l'insuccès.

Faut-il pour cela rejeter la proposition énoncée plus haut ? Il semble au contraire qu'elle s'impose à l'esprit. Car non seulement elle est déduite immédiatement de l'étude expérimentale du soleil et de faits d'observation indépendants de ceux qu'elle veut expliquer, non seulement elle n'est en contradiction avec aucun fait connu, mais, et je pense que cela ressortira au cours de ce travail, elle explique, semble-t-il, et coordonne simplement des phénomènes restés pour la plupart fort obscurs jusqu'ici, malgré leur importance, sans que l'examen approfondi des faits d'observation se trouve une seule fois, à ma connaissance, en désaccord avec les conséquences de cette hypothèse ; enfin elle synthétise, en quelque sorte, en les rattachant à une cause unique, des phénomènes divers et multiples, qui jusqu'ici formaient autant de problèmes distincts et sans lien apparent.

II. — Nous venons de voir comment la période undécennale des taches solaires doit faire varier le rayonnement hertzien du soleil. Avant d'aborder l'étude des phénomènes magnétiques et des aurores boréales, qui sont comme on sait sous la dépendance de cette période de taches (étude qui fait l'objet principal de ce mémoire), il m'a paru indispensable de savoir si le rayonnement calorifique du soleil est également influencé par la période des taches, et quelle est cette influence qui doit se manifester, si elle existe, par des variations de température moyennes annuelles de la terre.

Depuis le mémoire bien connu de Köppen⁽²⁾, paru en 1873, il n'avait pas été publié de travail d'ensemble sur la question. J'ai entrepris de combler cette lacune en étudiant systématiquement les données thermométriques de ces trente dernières années. Il résultait du travail de Köppen que la courbe des variations des tempéra-

(1) Voir pour le détail de ces expériences le Mémoire étendu qui paraîtra prochainement dans les *Annales de l'Observatoire de Nice*.

(2) KÖPPEN, *Zeitschrift der Oesterreich. Gesellschaft für Meteorologie*, p. 241 et 157; 1873.

tures moyennes annuelles n'affecte une allure régulière que dans les stations tropicales, et que, pour les régions extérieures aux tropiques, cette courbe devient complètement irrégulière, de sorte qu'il est impossible de reconnaître une allure périodique quelconque ⁽¹⁾. Je n'ai donc utilisé que les données des stations tropicales pendant la période étudiée (1870 à 1900). Mais, comme c'est surtout depuis une trentaine d'années que les observations météorologiques se sont partout systématisées et répandues, j'ai eu à ma disposition des matériaux beaucoup plus étendus que ceux dont disposait Köppen.

Je me bornerai à résumer ici les résultats que j'ai obtenus, renvoyant, pour plus de détail, à un mémoire complet sur ce sujet qui paraîtra prochainement ⁽²⁾. Les courbes (*fig. 1*) représentent graphiquement le résultat de ce travail :

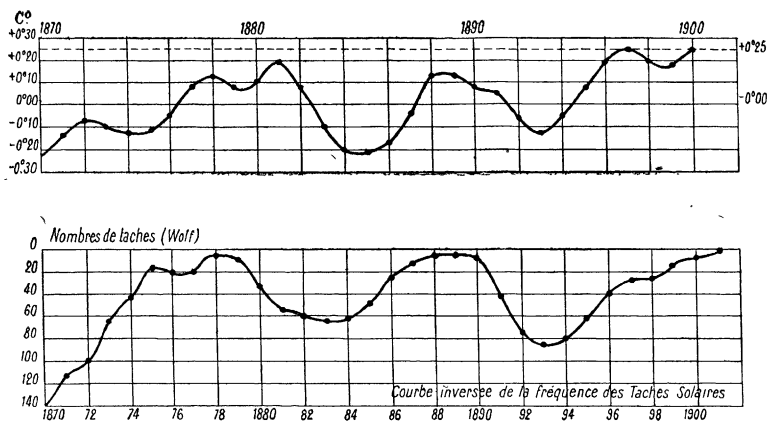


FIG. 1.

Au premier regard, le parallélisme d'allure de ces deux courbes apparaît frappant; une discussion détaillée des nombres qui ont servi à les construire m'a montré que ce parallélisme se poursuit jusque dans les détails. Je me bornerai ici à faire la remarque suivante, qui résume et renferme implicitement la plupart des résultats de cette discussion :

(1) On pouvait, en quelque sorte, prévoir ce résultat, car les régions tropicales sont caractérisées par un climat très régulier, tandis que, lorsqu'on se rapproche des pôles, et dès qu'on a dépassé les tropiques, les variations accidentelles de la température deviennent très importantes et ont une amplitude énormément plus grande que la faible variation périodique qu'il s'agit de déceler.

(2) Dans les *Annales de l'Observatoire de Nice*.

Considérons les $2\frac{1}{2}$ périodes de la courbe des températures en prenant, comme origine des ordonnées, l'ordonnée marquée $+0^{\circ},25$ (qui correspond à l'année 1900, où le nombre des taches fut très voisin de 0), et comptons les ordonnées à partir de cette origine, positivement dans le sens négatif; si nous employons le symbole $\delta\theta$ pour désigner les ordonnées ainsi considérées, on voit que $\delta\theta$ représente en quelque sorte ici, pour chaque année (et toutes choses égales d'ailleurs), la différence entre ce que serait la température de l'année s'il n'y avait pas de tache et ce qu'elle est en réalité. Faisons maintenant la moyenne des ordonnées de la portion de cette courbe correspondant à la première demi-période des taches (1870 à 1881) et multiplions cette moyenne par le nombre des années de cette demi-période, ce qui revient en somme à prendre l'intégrale de la courbe en 1870 et 1881; prenons de même l'intégrale de la courbe pour la période de 1881 à 1889, puis pour celle de 1889 à 1900, et calculons de même les intégrales correspondantes de la courbe inversée des taches solaires, les ordonnées étant de même prises positivement dans le sens négatif à partir de l'ordonnée : nombre de taches = 0. Si le symbole δT désigne le nombre des taches, on obtient une double série de trois nombres, que reproduit le tableau suivant avec, en

regard les valeurs correspondantes du rapport $\frac{\int_{t_1}^{t_2} \delta\theta}{\int_{t_1}^{t_2} \delta T}$

Périodes	$\int_{t_1}^{t_2} \delta\theta$	$\int_{t_1}^{t_2} \delta T$	$\frac{\int_{t_1}^{t_2} \delta\theta}{\int_{t_1}^{t_2} \delta T}$
$t_1 = 1870$ } $\frac{1}{2}$ période de $\theta \dots$	297	567	0,52
$t_2 = 1881$ }			
$t_1 = 1881$ } 1 période de $\theta \dots$	216	492	0,44
$t_2 = 1889$ }			
$t_1 = 1889$ } 1 période de $\theta \dots$	167	300	0,55
$t_2 = 1900$ }			

On a donc :

$$\frac{\int_{t_1}^{t_2} \delta\theta}{\int_{t_1}^{t_2} \delta T} = 0,5 \pm 0,06 = C^{\text{te}} \text{ (sensiblement).}$$

Il y a donc une proportionnalité remarquablement constante (étant donné toutes les causes d'erreurs qui interviennent dans les observations thermométriques courantes) entre le nombre total de taches solaires d'une part, et la somme de diminutions des températures annuelles d'autre part, pendant chacune des périodes successives considérées.

En définitive, je puis énoncer la loi suivante, conforme à ce qu'avait annoncé Köppen :

La température terrestre moyenne subit une période égale à celle des taches du soleil ; l'effet des taches est de diminuer la température terrestre moyenne, c'est-à-dire que la courbe qui représente les variations de celle-ci est parallèle à la courbe inverse de la fréquence des taches solaires ⁽¹⁾.

III. — Les observations dans les stations magnétiques du monde entier ont mis nettement en évidence pour tous les éléments et dans tous les lieux du globe :

1° Une période diurne (*solar diurnal variation*, comme disent les Anglais), dont les phases sont intimement liées avec l'angle horaire du soleil ;

2° Une variation annuelle de cette période diurne, telle que l'amplitude de celle-ci est bien plus grande en été qu'en hiver dans notre hémisphère et inversement dans l'hémisphère sud ;

3° Une période de la variation diurne identique à celle des taches solaires, et telle que l'amplitude est plus grande lors du maximum que lors du minimum des taches ;

4° L'existence de jours et de périodes de perturbations magnétiques irrégulières et d'orages magnétiques sur une grande portion du globe, plus nombreux d'ailleurs et d'une amplitude plus grande lors du maximum de taches solaires que lors du minimum.

Je me propose de montrer que les propositions établies ci-dessus paraissent devoir jeter une quelque clarté sur les circonstances qui produisent ces variations si complexes et si mystérieuses du magné-

(1) J'ai déduit cette loi de la discussion des observations des stations tropicales, qui seules présentent un régime suffisamment régulier pour pouvoir y déceler une variation d'aussi faible amplitude ; il semble qu'on peut légitimement l'appliquer à toute la surface de la terre, car on ne conçoit pas comment une variation de rayonnement solaire pourrait produire certains effets sur la température de la moitié environ de la surface de la terre (la portion comprise entre les tropiques est égale à 0,4 de la surface totale) sans agir dans le même sens sur le reste.

tisme terrestre. D'abord j'examinerai plus particulièrement ce qui concerne les variations régulières des éléments magnétiques (période diurne, annuelle, undécennale). Puis j'étudierai les perturbations et les orages magnétiques.

A. *Variation diurne.* — Gauss, dans son célèbre mémoire, *Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus*, a exprimé le potentiel à la surface de la terre en une série harmonique de 24 termes; il a montré également que, si les composantes horizontales de la force magnétique étaient connues sur toute la surface de la terre, on pourrait en déduire l'expression du potentiel sans qu'il soit nécessaire de connaître la composante verticale, et il établit comment la connaissance de cette dernière pouvait permettre de distinguer dans l'expression du potentiel les termes qui dépendent d'une cause extérieure de ceux qui dépendent d'une action intérieure à la terre.

Il y a quelques années, M. Arthur Schuster a appliqué cette méthode à l'étude de la période diurne de l'aiguille aimantée, et les deux mémoires étendus qu'il a publiés à ce sujet ⁽¹⁾ (et auxquels, pour plus de détails, les limites de cet article m'obligent à renvoyer le lecteur) établissent nettement, sans faire aucune hypothèse sur la nature physique des forces qui produisent la variation diurne, et sans d'ailleurs nous donner aucune indication sur le caractère physique de ces forces, que CELLES-CI SONT EXTÉRIEURES A LA TERRE.

La conclusion de M. Schuster, qui est une première et précieuse indication pour le sujet qui nous occupe est, aujourd'hui, irréfutablement admise.

Si nous examinons maintenant, au point de vue purement physique, quels peuvent être les agents qui produisent la période diurne magnétique, nous allons pouvoir resserrer le problème dans des limites plus précises.

Les principales hypothèses qui ont été proposées pour l'expliquer sont :

1° *Une action magnétique du soleil.* — Parmi les objections que soulève cette explication, signalons celles-ci : il n'est pas certain tout d'abord que le soleil soit magnétique, car les analogies terrestres ont montré expérimentalement que, aux hautes températures, la matière perd toute propriété magnétique et, étant donné la décroissance de l'action magnétique proportionnelle au cube de la distance,

(1) *Phil. Mag.*, XXI, p. 349; — *Phil. Trans.*, I, p. 467; 1889.

on calcule que le globe solaire devrait avoir une intensité moyenne d'aimantation plus de 10.000 fois plus grande que celle de l'aimant terrestre pour produire une variation du magnétisme terrestre sensible à nos appareils.

D'ailleurs Chambers et Lloyd ont tous deux montré par des méthodes distinctes et fort simples ⁽¹⁾ que, même dans l'hypothèse d'un soleil suffisamment magnétique, il est impossible de rendre compte, par une action directe de cet astre, des particularités qualitatives de la période diurne; nous verrons d'ailleurs plus loin que lord Kelvin a démontré qu'une action pareille directe du soleil ne peut pas expliquer non plus les perturbations magnétiques. Cette hypothèse est donc à rejeter.

2° *Théorie de Faraday.* — Partant de la découverte faite par lui que l'oxygène est magnétique et que ses propriétés magnétiques diminuent quand on le chauffe, Faraday a montré que le soleil doit, en chauffant successivement les portions de l'atmosphère terrestre qui l'ont à leur zénith, produire un déplacement des lignes de force magnétique de la terre, qui agit corrélativement sur l'aiguille aimantée. Faraday expliquait de cette manière la période diurne de celle-là; il a développé cette idée dans une série de mémoires ⁽²⁾, et un grand nombre de savants l'ont adopté depuis. Il est certain que cette explication, séduisante par sa simplicité, rend compte fort bien, comme l'a montré Faraday, des particularités de la période diurne aux divers lieux du globe en phase et en direction, c'est-à-dire *qualitativement*.

J'ai entrepris de soumettre cette idée à un critérium *quantitatif*, à l'aide de données qui manquaient à Faraday et qui ont été fournies par des travaux récents.

Faraday, sans d'ailleurs avoir examiné numériquement la question, pensait que si peut-être la perméabilité magnétique des couches inférieures de l'atmosphère n'était pas assez grande pour expliquer la grandeur des effets observés, celle des couches supérieures devait être bien plus grande, à cause de leur température plus basse, et devait, malgré la distance de ces couches à l'aiguille aimantée, expliquer suffisamment l'amplitude des variations de celle-ci.

Or on sait actuellement que la susceptibilité magnétique K d'un gaz est liée à sa pression P et à sa température absolue par la formule

(1) *Proc. Royal British Acad.*, feb. 22; 1858; — *Phil. Trans.*; 1863.

(2) *Phil. Trans.*, 1851. — I. *On Atmospheric Magnetism.*, p. 42-79 et 85-131.

suivante (formule de Curie), où B est une constante :

$$K = \frac{BP}{\theta^2}.$$

A la température normale et pour l'air à la pression atmosphérique :

$$K = + 0,027 \cdot 10^{-6}.$$

Pour résoudre le problème que je me suis posé, il faut trouver comment varie le rapport $\frac{P}{\theta^2}$ quand on s'élève dans l'atmosphère.

Or M. Teisserenc de Bort a publié⁽¹⁾ des nombres et des diagrammes qui représentent les températures à différentes hauteurs dans l'atmosphère et à toutes les époques de l'année, telles qu'elles résultent des données de plus de cent ascensions de ballons-sondes munis d'enregistreurs. A l'aide des nombres de M. Teisserenc de Bort, j'ai calculé les hauteurs moyennes auxquelles se trouvent respectivement les isothermes 0° C., — 25° C., — 40° C., — 50° C. (l'isotherme + 18° C. étant par hypothèse au niveau de la mer). La valeur de la pression correspondant à la hauteur moyenne des isothermes considérées est donnée sensiblement par la formule de Laplace (dans laquelle on peut supprimer le terme hygrométrique, qui ne produit que des corrections négligeables ici).

Le tableau suivant, où j'ai mis en regard les valeurs correspondantes de $\frac{P}{\theta^2}$ et celles de K, synthétise mes résultats :

t° centigrade	°° absolu	Z (altitude moyenne correspondante)	P	$\frac{P}{\theta^2} \cdot 10^{-5}$	K
+ 18°	291°	0 ^m	760 ^{mm}	897	+ 0,027 . 10 ⁻⁶
— 25	248	6.100	351	571	+ 0,017 . 10 ⁻⁶
— 40	233	8.200	261	481	+ 0,014 . 10 ⁻⁶
— 50	223	10.000	148	298	+ 0,009 . 10 ⁻⁶

Il ressort nettement de ce tableau que, contrairement à ce que croyait Faraday, *la susceptibilité magnétique de l'air atmosphérique diminue à mesure qu'on s'élève*. Elle diminue même assez vite, puisqu'elle est déjà réduite du tiers de sa valeur lorsqu'on a dépassé la moitié de la masse atmosphérique, et que, lorsqu'on atteint l'altitude

(1) C. R., XXIX, p. 417.

où celle-ci est réduite à $\frac{1}{3}$, la susceptibilité magnétique n'est plus égale qu'à $\frac{1}{3}$ de sa valeur au niveau du sol.

Dans ces conditions, je peux montrer facilement que l'influence des propriétés magnétiques de l'atmosphère sur le champ terrestre est d'ordre absolument infime.

Si on considère en effet la susceptibilité magnétique de l'atmosphère comme uniforme et égale partout à sa valeur près du sol (ce qui, comme on vient de le voir, est une valeur maxima extrême), et si on envisage, en un lieu de la terre, la portion de l'atmosphère située au dessus comme un cylindre de dimensions extrêmement grandes, l'induction maxima produite par le champ terrestre H , à l'intérieur de ce cylindre, est dans les conditions les plus favorables.

$$\mathcal{H}_1 = \mathcal{H}(1 + 4\pi K),$$

(en réalité l'aiguille aimantée est non à l'intérieur, mais à la base de ce cylindre, où l'induction est encore plus faible).

Dans les conditions les plus favorables à la théorie de Faraday et qui sont des conditions limites maxima, l'effet de l'atmosphère est d'augmenter le champ terrestre de $\mathcal{H} \times 4\pi K$. Or en France la valeur de la force totale du champ terrestre est environ 0,466 C. G. S.

La fraction maxima de cette valeur due à l'atmosphère est donc :

$$\delta\mathcal{H} = 0,466 \times 4\pi \times 0,027 \cdot 10^{-6} = 0,1412 \cdot 10^{-6}.$$

Or, d'après Faraday, ce sont les variations de la valeur de $\mathcal{H}$ due au rayonnement solaire qui produiraient la période diurne de l'aiguille aimantée. Si nous supposons que la chaleur due au rayonnement du soleil dans l'atmosphère devienne capable, à un moment donné, non seulement de diminuer dans une certaine proportion la valeur de la susceptibilité magnétique de l'air, mais même de l'annuler complètement, le champ terrestre serait au maximum diminué de $0,141 \cdot 10^{-6}$ ⁽¹⁾. Or la période diurne produit (les années de minima des taches, c'est-à-dire lorsqu'elle est elle-même minima) une variation du champ terrestre égale à $0,21 \cdot 10^{-3}$, c'est-à-dire 1.500 fois plus

(1) Cette variation ne pourrait être décelée par nos appareils les plus sensibles tant elle est infime.

grande que celle qui se produirait si la susceptibilité magnétique de l'atmosphère était tout d'un coup annulée.

Les propriétés magnétiques de l'atmosphère ne peuvent donc avoir que des effets infimes sur le champ magnétique terrestre et en particulier elles ne peuvent produire qu'une fraction complètement négligeable de la période diurne de l'aiguille aimantée.

Il semble donc que la théorie de Faraday doive être abandonnée.

3° *Action des courants telluriques.* — Nous ne rappelons que pour mémoire la théorie d'après laquelle la période diurne serait due aux courants qui circulent dans l'écorce terrestre. Les travaux de M. Schuster, que nous avons rappelés plus haut et dont les résultats sont inconciliables avec cette théorie, suffiraient à la faire rejeter. D'ailleurs Airy a montré ⁽¹⁾, par une discussion détaillée, qu'il n'y a aucune connexion entre la période diurne de l'aiguille aimantée et les variations des courants telluriques, que l'on enregistre d'une manière continue à Greenwich et en d'autres stations.

Comme Faraday déjà l'avait entrevu, il semble incontestable que le soleil joue un rôle important dans la production de la période diurne ; tous les caractères de celle-ci le prouvent : d'une part, le fait, comme nous le verrons tout à l'heure, qu'elle est affectée par les variations de l'activité solaire et par la position de la terre sur l'écliptique, d'autre part aussi le fait que la période diurne en un lieu a toute son amplitude pendant les heures de la plus grande insolation (de 9 h. du matin à 3 h. du soir), tandis que l'aiguille aimantée ne varie que très peu le reste de la journée et la nuit ; ce qui démontre que l'agent de cette variation a une intensité qui varie comme l'insolation.

C'est, d'autre part, Balfour Stewart qui a émis l'idée que la période diurne serait produite par des courants électriques circulant dans l'atmosphère et sur lesquelles agirait le soleil par son rayonnement calorifique. Mais nous allons voir que, sous cette forme, cette conception soulève de graves objections. Tout d'abord peut-il exister des courants galvaniques dans l'atmosphère supérieure ? Il n'est pas douteux que les mouvements de convection des couches atmosphériques élevées doivent, sous l'influence de l'induction par la terre, y engendrer des forces électromotrices. Mais, vu la faible valeur du champ terrestre,

(1) *Phil. Trans.*, CLX, p. 226.

celles-ci doivent être extrêmement faibles par unité de longueur, comme le montre le calcul. Et d'autre part on sait ⁽¹⁾ que le passage de l'électricité à travers les gaz raréfiés ne peut se produire normalement qu'à partir d'une différence de potentiel minima, qui est toujours assez grande et de beaucoup supérieure à celle que peut produire l'induction par le champ terrestre dans l'atmosphère. C'est ce que M. J.-J. Thomson et M. Bouty notamment ont établi. Balfour Stewart pensait que c'est l'augmentation de température produite par le soleil dans l'atmosphère supérieure, qui permettrait à des courants galvaniques de s'y manifester ; mais cette explication n'est pas admissible, car il est démontré actuellement ⁽²⁾ que la différence de potentiel explosive diminue, il est vrai, sous l'influence de la température, mais de quantités très faibles et reste elle-même *très grande* tant qu'on n'atteint pas la température du rouge. D'ailleurs, si cette hypothèse était exacte, la période diurne devrait avoir sa plus grande amplitude, lors du minimum des taches solaires, puisque la chaleur rayonnée par le soleil est, comme je l'ai montré plus haut, maxima à ce moment. *Or c'est le contraire qui a lieu.*

La proposition établie au début de cet article va nous permettre d'examiner la question à un autre point de vue et de démontrer la possibilité dans l'atmosphère supérieure de courants galvaniques assez intenses : on sait qu'un gaz raréfié qui, normalement, ne laisserait passer le courant que sous des forces électromotrices très élevées, devient, à condition d'être parcouru par une décharge auxiliaire, apte à conduire un courant dont la force électromotrice est aussi faible qu'on veut. Ce résultat a été étendu, et il a été montré que, lorsqu'un gaz est parcouru par des ondes hertziennes, il se laisse traverser par un courant de force électromotrice extrêmement faible ⁽²⁾. Donc :

Sous l'influence des ondes hertziennes émanées du soleil, les couches supérieures de l'atmosphère redeviennent aptes à laisser passer les courants produits par l'induction terrestre, et l'intensité de ces courants doit varier en un lieu comme l'insolation et redevenir très faible quand le soleil est sous l'horizon.

Ayant ainsi démontré la possibilité de courants électriques circu-

(1) Voir notamment, à ce sujet, les beaux travaux de M. Bouty.

(2) Righi, *Rend. della R. Acad. dei Lincei*, 7 nov. 1897 ; — et *Rend. della R. Acad. di Bologna*, 29 mai 1898.

lant dans l'atmosphère supérieure et dont l'intensité est régie par le rayonnement solaire, on peut se demander quelles doivent être la direction et l'intensité de ces courants en chaque lieu, pour expliquer les phases de la période diurne. Or on trouve, en appliquant la loi d'Ampère, qu'il existe une infinité de systèmes de courants répondant à cette condition. Le problème est donc indéterminé sous cette forme et admet un grand nombre de solutions. Il appartient à l'avenir de déterminer quelle est celle qui correspond le mieux à la réalité physique ; pour cela, il faudra que, par l'étude approfondie du baromètre et de la direction des vents aux grandes altitudes, on ait augmenté nos connaissances si minimes jusqu'ici sur les mouvements de convection des hautes couches de l'atmosphère.

B. *Variation annuelle.* — Si ma conception de la variation diurne est exacte, l'amplitude de celle-ci doit, en chaque lieu, varier avec l'intensité de l'insolation, c'est-à-dire avec les saisons : cette amplitude doit avoir sa plus grande valeur en été dans l'hémisphère nord et en hiver dans l'hémisphère sud et a sa valeur minima en hiver dans notre hémisphère et en été dans l'autre. *Or l'observation vérifie point pour point ces conséquences de ma théorie.* On a, en effet, depuis longtemps universellement constaté ce caractère de la période diurne dans les deux hémisphères.

A titre d'exemple je donne ci-dessous, pour chacun des mois de l'année 1895, l'amplitude moyenne de la période diurne de l'aiguille de déclinaison, résultant des observations faites dans une station de chaque hémisphère.

	Nice	Batavia
Janvier.....	5' 7	29' 0
Février.....	7' 3	29' 3
Mars.....	11' 4	21' 7
Avril.....	13' 5	15' 2
Mai.....	13' 2	15' 4
Juin.....	14' 6 max.	14' 7 min.
Juillet.....	13' 1	17' 2
Août.....	11' 3	19' 3
Septembre.....	10' 9	22' 5
Octobre.....	10' 2	25' 9
Novembre.....	6' 9	26' 4
Décembre.....	5' 2	25' 3
Moyenne annuelle.....	10' 3	21' 9

Les autres éléments montrent dans leur période diurne une variation annuelle analogue.

Cet exemple montre également que la période diurne a une amplitude toujours plus grande à Batavia qu'à Nice. Si, au lieu de Batavia, nous avons considéré une station (telle que Hobarton) dont la latitude sud fût égale à la latitude nord de Nice, on aurait trouvé que la valeur moyenne annuelle de la période diurne de la déclinaison y est sensiblement la même qu'à Nice. Il y a là une loi générale, comme le montre l'observation : l'amplitude moyenne de la période diurne de la déclinaison diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur. Or c'est la composante horizontale H du magnétisme terrestre, qui maintient l'aiguille de déclinaison dans sa position normale, et l'on sait que la valeur de H diminue dans les deux hémisphères en s'éloignant de l'équateur (elle est en effet en C. G. S. 0,374 à Bombay ; 0,232 à Rome ; 0,223 à Perpignan ; 0,196 à Saint-Maur ; 0,184 à Greenwich, etc.) Puisque, d'autre part, l'amplitude moyenne de la variation diurne de la déclinaison diminue quand on s'éloigne de l'équateur, il s'ensuit nécessairement et *a fortiori* que *l'agent de la variation diurne doit avoir en moyenne sa plus grande intensité à l'équateur*. Ce qui est complètement d'accord avec ce que faisait prévoir ma théorie : l'insolation ayant en moyenne son intensité maxima dans les régions équatoriales, il s'ensuit en effet que, toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité des courants électriques de l'atmosphère et par suite l'amplitude moyenne de la course diurne de la déclinaison doit avoir la plus grande valeur à l'équateur.

C. *Variation undécennale*. — Ici l'influence du soleil se manifeste d'une manière beaucoup plus nette encore. Depuis les travaux de Lamont, qui signala le parallélisme entre la valeur de la période diurne de la déclinaison et le nombre des taches solaires, ce rapport a été partout et sans cesse confirmé par les observations, et il a été étendu à tous les éléments magnétiques ; ces faits sont aujourd'hui incontestés ; c'est donc uniquement à titre d'exemple que nous reproduisons ci-dessous, d'après M. Moureaux, la valeur des variations diurnes moyennes de trois éléments pendant une récente période de douze années, avec en regard les nombres relatifs correspondants de taches solaires.

*Variation diurne des éléments magnétiques et nombre de taches solaires
de 1887 à 1898.*

	Déclinaison	Composante horizontale	Composante verticale	Force totale	Nombre de taches (Wolf)
1887.....	8' 4	26	19	24	13.1
1888.....	7' 8	24	18	22	6.8
1889.....	7' 2	20	18	21	6.3
1890.....	7' 8	23	18	22	7.1
1891.....	9' 2	30	23	30	35.6
1892.....	10' 3	39	25	34	73.0
1893.....	11' 2	37	25	34	84.9
1894.....	10' 6	37	24	33	78.0
1895.....	10' 0	34	22	29	64.0
1896.....	9' 0	30	22	28	41.8
1897.....	8' 1	25	18	24	26.2
1898.....	8' 2	24	19	23	26.7

Malgré la netteté des faits, établie depuis longtemps d'une manière convaincante, malgré l'intérêt que la question a suscité dans tous les esprits, l'explication rationnelle du mécanisme de ce rapport, qui lie ainsi les mouvements de la surface solaire à ceux de nos aiguilles aimantées, a paru jusqu'à ces derniers temps inabordable; si bien qu'en 1892 lord Kelvin pouvait écrire à ce propos : « Jusqu'ici tous les efforts tentés dans cette direction ont été infructueux. »

Il est clair en effet que tant qu'on n'a considéré le soleil que comme capable, en dehors de la gravitation, d'agir à travers l'espace interplanétaire uniquement par son rayonnement calorifique et lumineux, la question ne pouvait faire un pas. Il est impossible d'expliquer ces actions par un effet de température; j'ai examiné plus haut, à propos de la période diurne, quelques-unes des objections qui conduisent à exclure complètement l'idée d'un effet de ce genre. La considération des phénomènes électriques qui se produisent dans le soleil m'ont conduit logiquement à déduire de toutes les circonstances reconnues par l'analyse optique et spectrale du soleil et des analogies de la météorologie électrique terrestre comme une chose infiniment probable que le soleil émet des radiations hertziennes et que celles-ci doivent avoir leur plus grande intensité lors du maximum de l'activité solaire. Il semble que ceci, qui nous a déjà permis de jeter quelque lumière sur la période diurne magnétique, résout d'une manière fort simple le problème de la variation undécennale de cette période.

Il est évident en effet que l'intensité des courants galvaniques de

l'atmosphère supérieure varie comme l'intensité des ondes électromagnétiques reçues du soleil. *La période diurne de l'aiguille aimantée doit donc avoir sa plus grande amplitude lors de la plus grande activité solaire et sa plus faible valeur lors du minimum des taches.*

C'est en effet ce qu'établit l'observation.

D. *Orages magnétiques.* — La relation qui lie l'activité solaire à la période diurne de l'aiguille aimantée se précise d'une manière encore plus remarquable avec des phénomènes d'un caractère bien différent : les perturbations magnétiques. Parmi les perturbations qu'on observe, il en est qui paraissent d'origine purement locale et terrestre et sont enregistrées à une station donnée, sans qu'on les perçoive à une autre très voisine ; elles n'ont d'ailleurs jamais qu'une faible amplitude ; je n'en parlerai pas ici. D'autres, et c'est le plus grand nombre, ont des caractères bien différents. Elles se produisent fréquemment pendant une période de calme magnétique, et débutent brusquement et avec une grande violence pour les trois éléments ; leur amplitude est souvent très grande ; elle dépasse souvent celle de la période diurne et peut atteindre jusqu'à $1/20$ de l'intensité totale du magnétisme terrestre ; de plus, et c'est surtout ce qui les caractérise, *elles se produisent simultanément en des stations très éloignées et débutent avec une égale brusquerie au même instant physique sur tous les points du globe.*

Or on a depuis longtemps observé qu'il y a un parallélisme complet entre la fréquence moyenne de ces perturbations et celle des taches du soleil : la relation de cause à effet de ces deux ordres de phénomènes est incontestée, et de nombreux travaux, depuis ceux de Sabine jusqu'à ceux plus récents de W. Ellis ⁽¹⁾ Sidgreaves ⁽²⁾, etc., l'ont mise hors de doute.

Pour avoir une indication précise sur le caractère exact de cette relation, le seul moyen rationnel était l'étude systématique des perturbations isolées et des taches correspondantes. Or voici ce que démontre une pareille étude :

1° Existe-t-il une relation entre l'apparition des perturbations et la position des taches correspondantes sur le disque solaire ? Des opinions contradictoires ont été émises sur ce point. Tandis que M. Marchand ⁽³⁾ a conclu de ces observations que les principales

⁽¹⁾ *Monthly Notices of Roy. Astroph. Society*, t. LII, p. 191.

⁽²⁾ *The Observatory*, t. XXIV, p. 39.

⁽³⁾ *C. R.*, 10 janvier 1887.

perturbations coïncident toujours avec le passage d'un groupe de taches ou de facules au méridien central du soleil, M. Veeder, au contraire ⁽¹⁾, a trouvé une coïncidence parfaite entre les perturbations et l'apparition de taches ou de facules au bord est du soleil. M. Tacchini, enfin, a soutenu que la position de la région active sur le disque solaire est indifférente.

Or c'est M. Tacchini qui a raison sans que d'ailleurs les opinions de MM. Verder et Marchand cessent de renfermer une part de vérité : M. G.-E. Hale a montré en effet ⁽²⁾, par l'étude de ses clichés spectrohéliographiques, qu'il y a une grande probabilité pour que les années de grande activité solaire — et ce sont ces années que MM. Marchand et Veeder ont étudiées — une facule au moins existe toujours au méridien central ou au bord est du soleil. Sur cent quarante-deux clichés pris en 1892 par M. Hale, dix seuls ne montraient pas de facules. Comme d'autre part le nombre de groupes de facules sur le disque solaire est indépendant de la longitude héliocentrique de la terre, il en résulte qu'aux années de grande activité solaire la probabilité qu'à un instant donné un ou plusieurs groupes de facules se trouveront sur un méridien quelconque du soleil est 93 0/0. Enfin, dans un travail étendu et récent ⁽³⁾, M. Sidgreaves, utilisant dix-huit années d'observations solaires et magnétiques interrompues à l'observatoire de Stonyhurst a montré que des nombres à peu près égaux de perturbations correspondent à l'existence de centres d'activité, soit au méridien central, soit au bord est, soit au bord ouest du soleil.

2° Tous les observateurs s'accordent à reconnaître que la grandeur et l'importance des perturbations magnétiques dépendent beaucoup de l'état plus ou moins grand d'*activité* des taches correspondantes : fréquemment de grandes taches, lorsqu'elles sont calmes, existent sans qu'il se produise d'orage magnétique; en revanche l'aiguille aimantée est parfois violemment perturbée lorsqu'il n'y a que des taches petites, mais qui sont le siège d'une vive agitation : on décèle celle-ci soit par l'étude directe (visuelle ou photographique), qui montre des variations rapides de la configuration photosphérique au point du disque considéré, soit par l'étude spectrale où les mou-

(1) *Astronomy and Astrophysics*, p. 331; 1892.

(2) *C. R.*, CXVI, p. 240.

(3) *Loc. cit.*

vements radiaux violents de la basse atmosphère du soleil se manifestent par l'aspect distordu des raies vers le rouge ou le violet.

3° Il est une autre question, à tous égards essentielle et sur laquelle cependant les astronomes n'avaient pas jusqu'ici suffisamment porté leur attention : c'est celle de la *vitesse avec laquelle les perturbations du soleil se transmettent au magnétisme terrestre*. J'ai entrepris, par l'étude détaillée et parallèle de tous les documents magnétiques et des observations solaires de la seconde partie du siècle dernier, d'apporter, dans la mesure du possible, un éclaircissement sur ce point si important.

Ce n'est que depuis une quinzaine d'années environ que l'on possède en France et dans quelques pays un enregistrement continu des phénomènes magnétiques. Quant au soleil, l'étude continue de sa surface n'est réalisée nulle part ; on ne l'observe d'une manière un peu suivie que dans quelques observatoires d'Europe et d'Amérique, c'est-à-dire que pendant douze heures par jour, nous n'avons aucun renseignement sur ce qui se passe dans le soleil. Nous n'avons eu d'autre part, depuis vingt ans, que deux époques d'activité solaire, vers 1881 et vers 1892, et ce n'est que pour cette dernière que l'on possède, en Europe et en Amérique, l'enregistrement continu des perturbations magnétiques. Pour toutes ces raisons, le champ de cette recherche était singulièrement limité.

Enfin, et pour éviter toute cause d'erreur, toute équivoque dans l'interprétation des faits, j'ai volontairement laissé de côté tous les phénomènes d'activité solaire d'ailleurs nombreux, dont on n'a pas rigoureusement observé le DÉBUT, tous ceux qui ne se sont pas manifestés d'une manière BRUSQUE et pour ainsi dire instantanée. Des considérations exposées il résulte que la probabilité pour qu'une manifestation soudaine d'activité ainsi caractérisée, se produisant sur le soleil, soit observée sur un point de la terre, est évidemment très faible.

On peut ainsi résumer le résultat de ce travail (je renvoie pour le détail et la discussion systématique des observations à mon mémoire détaillé des *Annales de l'observatoire de Nice*).

Chaque fois que l'on a observé une perturbation violente et soudaine de la surface solaire et dont le début a été nettement enregistré, cette perturbation a été accompagnée sur toute la terre de perturbations magnétiques également soudaines et dont le début a nettement coïncidé avec la minute où l'on a observé le début de la

perturbation solaire. De plus, chaque fois, les perturbations magnétiques ont été observées dans diverses stations éloignées les unes des autres au même instant physique, et elles ont été caractérisées par l'inflexion subite et abrupte donnée simultanément à leur début aux courbes des trois éléments (ce qui, comme l'ont montré Sabine et Ellis, caractérise les perturbations d'origine cosmique).

Il s'en suit que, dans les limites des erreurs d'observations (dont j'ai discuté l'influence dans mon mémoire détaillé), LES PERTURBATIONS SOLAIRES SE TRANSMETTENT A NOTRE MAGNÉTISME AVEC LA VITESSE DE LA LUMIÈRE.

Nous pouvons, avec ces éléments résultant de l'observation, examiner maintenant les diverses théories qui ont été proposées de l'action immédiate du soleil sur le magnétisme terrestre.

M. Arrhénius a proposé d'expliquer les perturbations magnétiques et les aurores boréales par des particules chargées négativement, qui, repoussées loin du soleil par la pression de radiation (pression de Maxwell-Bartoli), arriveraient jusque dans les hautes régions de l'atmosphère et s'y déchargeraient. J'examinerai d'une façon détaillée cette théorie dans un autre article, à propos des aurores boréales (car c'est plus spécialement à propos de ces derniers phénomènes que M. Arrhénius a développé son ingénieuse hypothèse). Je me contenterai ici de remarquer que cette théorie ne peut guère, semble-t-il, expliquer la relation entre les taches et les perturbations magnétiques, car, en attribuant aux particules de M. Arrhénius, la plus grande vitesse qu'elles puissent posséder, sous l'action de la pression de radiation solaire, et dans les conditions les plus favorables d'après l'auteur lui-même, le calcul montre qu'il leur faudrait au moins seize heures pour nous parvenir du soleil, c'est-à-dire un temps incomparablement plus grand que celui qui résulte, comme on vient de le voir, de l'observation des phénomènes.

Donc (en dehors de la doctrine d'une action magnétique directe du soleil, sur laquelle nous reviendrons tout à l'heure) deux théories restaient en présence : celle qui est basée sur l'hypothèse d'un rayonnement cathodique émané du soleil, et qui a été émise par Goldstein et développée sur divers points par MM. Deslandres et Birkeland (et que j'appellerai pour abrégé *théorie cathodique*) et celle que j'ai proposée et que j'appellerai *théorie hertzienne*.

Si nous comparons aux résultats de l'observation les conséquences

logiques de ces deux théories, on trouve ce qui suit. L'observation a été établie, comme on l'a vu plus haut, que :

1° *Les orages magnétiques sont produits par des perturbations actives de la surface solaire.* L'émission des rayons cathodiques (dans les idées de Goldstein), comme celles des ondes hertziennes (voir ci-dessus, § I), doit, en effet, être particulièrement intense dans ces conditions. Ici donc les deux théories sont également d'accord avec les faits ;

2° *La longitude héliocentrique des centres d'activité solaire n'a pas d'influence sur la production des perturbations magnétiques,* c'est-à-dire que l'agent solaire des perturbations magnétiques se propage également dans toutes les directions, à partir du point du soleil où il a pris naissance. Ici encore, la *théorie hertzienne* est bien d'accord avec les faits. (On sait, en effet, que les ondes hertziennes produites par une décharge se propagent indifféremment dans tous les sens, quelle que soit l'orientation de la décharge.) Il n'en est pas de même pour la *théorie cathodique* ; comme l'ont indiqué M. Goldstein ⁽¹⁾, puis M. Deslandres ⁽²⁾, les rayons cathodiques doivent dans leur hypothèse être émis normalement à la surface solaire, suivant un faisceau très limité. M. Goldstein ⁽³⁾ a même indiqué qu'on pourrait dans cette limitation du faisceau cathodique solaire (et à laquelle ne correspond, lorsque la distance augmente, qu'une diminution très faible d'intensité) chercher l'explication de la grandeur des effets produits dans certains cas par le soleil sur notre magnétisme. De son côté M. Deslandres a indiqué ⁽⁴⁾, suivant ses propres expressions, « une « conséquence de cette théorie, qui se prête à une vérification ; les « variations passagères d'éclat des comètes doivent correspondre au « passage de fortes taches près de la ligne qui joint la comète au « centre du soleil ». Or non seulement cette vérification n'a jamais été faite, en ce qui concerne les comètes, mais la preuve du contraire a été faite, pour ce qui est des perturbations magnétiques ; puisqu'il résulte des observations (voir ci-dessus) que le nombre et la grandeur des perturbations magnétiques sont indépendants de la position des centres d'activité du soleil, par rapport au méridien de cet astre, contrairement à ce qui devait avoir lieu, si la *théorie cathodique*

⁽¹⁾ *Wied. Ann.*, XII, p. 266 ; 1881.

⁽²⁾ *C. R.*, CXXVI, p. 1325.

⁽³⁾ *Loc. cit.*

⁽⁴⁾ *Loc. cit.*, p. 1326.

était exacte. Je montrerai dans mon prochain article que l'étude, non plus seulement des perturbations magnétiques isolées, mais de leur fréquence et des périodes de celle-ci, conduit à des résultats identiques ;

3° *Les perturbations solaires se transmettent dans les limites des erreurs d'observations au magnétisme terrestre avec la vitesse de la lumière.*

On sait que les ondes hertziennes ont précisément cette vitesse, ce qui tend à confirmer la *théorie hertzienne*. En est-il de même pour la *théorie cathodique* ? On peut admettre avec beaucoup de vraisemblance, d'après la théorie actuelle des rayons cathodiques, que ceux-ci, lorsqu'ils sont produits sous une différence de potentiel suffisante, doivent se propager avec une vitesse voisine de celle de la lumière ; en fait, leur plus grande vitesse mesurée jusqu'ici expérimentalement, ne dépasse pas 100.000 kilomètres par seconde. Il n'en reste pas moins que : 1° Pour que des rayons cathodiques produits par les décharges électriques de la surface solaire puissent se propager vers l'extérieur dans l'espace, il faudrait que le champ électrique de l'atmosphère solaire ait le même sens que celui de la terre (les expériences de M. Villard, sur le champ antagoniste et la chute de potentiel à la cathode et la théorie des rayons cathodiques ont établi, en effet, que la propagation des rayons cathodiques est rapidement arrêtée par un champ antagoniste, de valeur égale à la chute de potentiel qui a engendré ces rayons). Or il est évident que la différence de potentiel des décharges de l'atmosphère solaire ne peut être qu'inférieure ou à la limite égale à la valeur du champ électrique de cette atmosphère, puisque les décharges sont dues aux perturbations de ce champ lui-même ; 2° Or tous ceux [MM. Deslandres⁽¹⁾, Siemens⁽²⁾, Arrhénius⁽³⁾], qui ont étudié la question du champ électrique de l'atmosphère solaire, ont été amenés à conclure, des considérations les plus différentes, que ce champ doit avoir un sens opposé à celui de la terre (on sait que dans celui-ci les potentiels augmentent à mesure qu'on s'élève au-dessus du sol), et s'opposer par suite à toute propagation de rayons cathodiques vers l'extérieur. On sait, au contraire, que la propagation des

(1) *Annales du Bureau des Longitudes*, V, C, p. 71.

(2) *Sitzungsber. derk. preussisch Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, t. XXVI, 1883.

(3) *Rev. Gén. des Sciences*, p. 69 ; 1902.

ondes hertziennes se fait avec la même vitesse dans toutes les directions, et quel que soit le champ électrique.

La *théorie cathodique* semble donc en défaut.

En 1892, à la Société Royale de Londres, lord Kelvin s'est demandé si, « guidé par la théorie électromagnétique de la lumière et la théorie ondulatrice de la force magnétique, on ne pourrait pas espérer résoudre le problème, pendant depuis cinquante ans, de l'action magnétique directe du soleil sur les orages magnétiques terrestres, quoique jusqu'ici tous les efforts tentés dans cette direction aient été infructueux ⁽¹⁾ ». Et l'illustre savant s'est livré à ce sujet à une discussion célèbre, sur l'action possible du soleil considéré comme un aimant. Au cours de cette discussion, lord Kelvin a étudié une perturbation donnée (relativement peu intense d'ailleurs), d'origine nettement cosmique, c'est-à-dire enregistrée simultanément par les enregistreurs de divers points du globe, dont il s'était procuré les courbes.

À l'aide de ces documents, lord Kelvin a calculé que les variations d'intensité des divers éléments pendant cette perturbation (qui dura quelques heures) représentaient de la part de l'agent d'origine solaire un travail moyen de 12×10^{33} ergs par seconde, c'est-à-dire environ 364 fois l'énergie totale du rayonnement solaire (qui est environ $3,3 \times 10^{33}$ ergs par seconde). Et lord Kelvin conclut de la sorte : « Ainsi, dans les huit heures de cet orage magnifique, qui fut relativement modéré, il faudrait que le soleil ait produit, sous forme d'ondes magnétiques, autant d'énergie qu'il en produit régulièrement sous forme de lumière et de chaleur rayonnées dans l'espace, en quatre mois. Ce résultat me paraît exclure complètement (is absolutely conclusive against) l'hypothèse que les orages magnétiques terrestres sont dus intrinsèquement à une action magnétique directe du soleil ou à n'importe quelle action dynamique directe de cet astre.

La conclusion de lord Kelvin et sa démonstration semblent absolument irréfutables; tout le monde les admet actuellement. Ainsi pas plus pour les perturbations magnétiques que pour la période diurne des trois éléments (comme nous l'avons vu) la théorie d'une action magnétique directe du soleil n'est soutenable.

(1) *Proced. of the Roy. Society*, LII, p. 303; 1892-1893.

Grâce à la conception d'un rayonnement solaire hertzien, je vais pouvoir, semble-t-il, examiner la question sous un autre jour, et montrer que, dans les perturbations magnétiques, l'effet du soleil doit être simplement, et grâce à une énergie initiale relativement faible, de produire, par une sorte de déclenchement, la mise en jeu de forces qui existent à l'état latent sur notre globe; de même que dans la télégraphie, un courant électrique très faible est capable, grâce à l'intermédiaire du relai, de produire des effets mécaniques relativement considérables; ou pour employer une comparaison encore plus adéquate à ma conception: de même que, dans la télégraphie sans fil, des ondes hertziennes extrêmement faibles, grâce à l'action du cohéreur, peuvent mettre en jeu une quantité d'énergie très grande et disproportionnée avec l'intensité minime des ondes excitatrices, car cette énergie peut être aussi grande que l'on veut et ne dépend que du nombre des éléments de pile mis en circuit avec le cohéreur.

Nous avons vu déjà, à propos de la période diurne, que Righi ⁽¹⁾ et d'autres ont montré que les gaz raréfiés passent, sous l'influence des ondes hertziennes, d'une résistance pratiquement infinie à une résistance extrêmement faible, et que lorsque un tube à gaz raréfié est mis en circuit avec une pile et un galvanomètre, celui-ci restant au zéro, l'aiguille est violemment déviée si on produit des ondes hertziennes dans le voisinage (ce tube se comportant comme une sorte de radioconducteur). Quelque chose d'identique doit se produire dans l'atmosphère: quand, comme nous l'avons établi, par l'effet des perturbations brusques de la surface solaire, le rayonnement hertzien du soleil devient bien plus intense, la conductibilité des couches atmosphériques supérieures est notablement augmentée, et l'effet des courants électriques qui y circulent, sur nos aiguilles aimantées devient lui-même très grand. Non seulement, comme nous venons de le voir, tous les caractères généraux des perturbations solaires et magnétiques concordent avec cette manière de voir, mais les particularités mêmes des orages magnétiques semblent parfaitement d'accord avec elle. D'une part, en effet, on a démontré, [Schmidt notamment ⁽²⁾] que les perturbations magnétiques sont, comme la période diurne, dues à une cause extérieure à la surface de la terre. D'autre part les caractères si particuliers des courants tel-

⁽¹⁾ *Loc. cit.*

⁽²⁾ *Meteorologische Zeitschrift*, XVI, 385-397; 1899.

luriques que l'on enregistre, à Greenwich et à Saint-Maur entre autres, simultanément avec les perturbations, sont conformes à notre conception et sont expliqués par elle : il suffit de jeter un coup d'œil sur les courbes qui représentent les variations de ces courants telluriques, et en regard sur les courbes magnétiques correspondantes, pour voir que les courants telluriques ont tous les caractères de courants induits⁽¹⁾ : ils sont d'autant plus intenses que les *variations* des mouvements de l'aiguille aimantée sont plus *brusques*, et ils n'ont aucun rapport comme intensité avec l'*amplitude* des mouvements de l'aiguille. M. Ellis était déjà arrivé à cette conclusion par l'étude détaillée des courbes telluriques de Greenwich⁽²⁾, c'est-à-dire que, pas plus pour les perturbations que pour la période diurne, les courants telluriques ne sont l'agent des variations de l'aiguille aimantée ; mais ils sont induits par cet agent.

Enfin il semble que cette conception de l'action solaire sur la production des perturbations magnétiques explique simplement l'allure hachée et irrégulière des courbes magnétiques au moment des perturbations (on sait, comme le montre l'étude de ces courbes, que l'aiguille aimantée est animée alors de mouvements successifs, irréguliers, se suivant fréquemment en *sens inverse* dans l'espace de quelques minutes) : en effet, l'intensité des ondes hertziennes émises lors d'une perturbation solaire doit être très variable comme celle des décharges électriques produites par cette perturbation ; selon que ces ondes sont plus ou moins intenses, elles pénètrent plus ou moins profondément, avant d'être absorbées, dans l'atmosphère inférieure, et rencontrant des couches successives où la direction des mouvements de convection diffère, il s'ensuit que la direction et le sens des courants électriques, dont l'intensité subitement accrue agit sur l'aiguille aimantée, peuvent eux-mêmes varier rapidement.

Dans un prochain article, j'étudierai l'application aux « Aurores Boréales » des notions établies au cours de celui-ci.

(¹) C'est aussi à cette conclusion qu'étaient déjà arrivés B. Stewart (*Philos. Trans.*, 1861) et le P. Secchi, qui a constaté (Voir *C. R.*, LXXV, p. 1638) « que, lorsque les mouvements et appareils magnétiques se prolongent aux époques des perturbations et lorsque ces mouvements arrivent *sans secousses*, le galvanomètre n'accuse pas la présence de courants telluriques ».

(²) *Proc. Royal Society*, LII, p. 191-212.