

INSTITUT ET OBSERVATOIRE DE PHYSIQUE DU GLOBE  
DU PUY-DE-DOME

---

# LA Foudre

Ses Différentes Formes - La Matière Fulminante

PAR

E. MATHIAS,

CORRESPONDANT DE L'INSTITUT,  
DIRECTEUR DE L'INSTITUT ET OBSERVATOIRE DE PHYSIQUE  
DU GLOBE DU PUY-DE-DOME

---

EXTRAIT DES *Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones* :

(Novembre 1927.)

---

LIBRAIRIE  
DE L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE,  
3, RUE THÉNARD, 3,  
PARIS V<sup>e</sup>.



INSTITUT ET OBSERVATOIRE DE PHYSIQUE DU GLOBE  
DU PUY-DE-DOME

---

# LA Foudre

Ses Différentes Formes - La Matière Fulminante

PAR

E. MATHIAS,

CORRESPONDANT DE L'INSTITUT,  
DIRECTEUR DE L'INSTITUT ET OBSERVATOIRE DE PHYSIQUE  
DU GLOBE DU PUY-DE-DOME

---

EXTRAIT DES *Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones* :

(Novembre 1927.)

---

LIBRAIRIE  
DE L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE,  
3, RUE THÉNARD, 3,  
PARIS V<sup>e</sup>.



# LA FOUDRE,

## Ses différentes formes ; la matière fulminante,

par E. MATHIAS,  
correspondant de l'Institut,  
directeur de l'observatoire  
du Puy-de-Dôme.

---

### SOMMAIRE.

**Historique.** — *Le tonnerre a toujours plus frappé l'homme que la foudre elle-même. Les anciens, Sénèque et Descartes en particulier, ont cherché à l'expliquer sans y réussir. Au XIX<sup>e</sup> siècle, deux hommes ont vu chacun une face de la question : Arago et Schopenhauer.*

**Théorie actuelle.** — *Lorsqu'une décharge électrique naturelle traverse l'air, il se forme, aux dépens des éléments de celui-ci, une combinaison avec contraction, endothermique donc explosive. Cette combinaison, ou matière fulminante, en se refroidissant, devient instable et détone. Il y a donc nécessairement deux tonnerres consécutifs à l'éclair : le tonnerre centripète, prévu par Arago, provenant de ce que l'air extérieur se précipite dans le vide produit par la contraction des éléments de la matière fulminante, et le tonnerre centrifuge, prévu par Schopenhauer, provenant de l'explosion ultérieure de l'explosif formé aux dépens de l'air. Par explosion, celui-ci se résout en ses éléments, qui sont ceux de l'air, sans formation de composés intermédiaires.*

*La chute de la matière fulminante, vue à Bitschwiller par M. Jean Koechlin, montre que nécessairement la matière fulminante est un air condensé.*

**Formes terminales de l'éclair fulgurant.** — *L'agent de transformation, qui permet de passer de l'éclair linéaire initial aux formes terminales, est la tension superficielle de la matière fulminante, laquelle agit en rétractant la surface extérieure de ce corps endothermique. Selon la quantité de l'explosif formé, le refroidissement est plus ou moins lent, et la tension superficielle a, ou n'a pas, le temps de réduire suffisamment la surface extérieure du reste d'éclair pour montrer des formes plus ou moins exceptionnelles.*

*Si la quantité de matière fulminante est faible, le refroidissement est instantané et la matière fulminante disparaît aussitôt sans laisser de traces. Si la quantité est beaucoup plus grande, le refroidissement est plus lent ; la matière fulminante, en tant que même fluide s'écoulant dans l'air, présente une série de ventres et de nœuds équidistants ; le refroidissement donne l'éclair en chapelet de Gaston Planté.*

*Si la quantité d'explosif est plus grande encore, le refroidissement est encore plus lent et la tension superficielle a le temps de rendre minima la surface extérieure de la matière fulminante, qui prend alors la forme sphérique. Dans ce dernier cas, il y a dissociation des deux tonnerres, centripète et centrifuge, qui peuvent être séparés par un grand nombre de secondes.*

*Lorsque la matière fulminante fuse au lieu d'exploser, le tonnerre centrifuge disparaît.*

**Vérifications de la théorie nouvelle.** — Celle-ci exige la chute de la matière fulminante, qu'on ne voit qu'exceptionnellement. La chute de l'éclair pourpre, ondulé, de Velletri, observé par le professeur Galli, peut s'expliquer dans les derniers détails.

La transformation directe de l'éclair linéaire en foudres sphériques est prouvée par des observations directes, décrites bibliographiquement à l'appui, qu'il s'agisse de transformation directe et vue ou de transformation non vue mais nécessaire.

Les observations, plus rares, de la forme sphérique liée à une forme linéaire survivante sont parmi les plus probantes.

L'étude des formes de l'éclair fulgurant termine le mémoire. On passe rapidement en revue les résultats obtenus par le Dr Simpson, la théorie aujourd'hui abandonnée de Piltshikoff et les formes décrites par M. Léon Dumas; et le travail s'achève par une monographie des principaux éclairs en chapelet observés jusqu'ici.

La plupart de nos connaissances sur cette question sont contenues dans la célèbre *Notice sur le tonnerre* insérée par Arago dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes* de 1837 et qu'on retrouve développée dans ses *Œuvres complètes* (1); c'est celles-ci que je citerai toujours dans la suite de ce travail.

Quand une décharge électrique se produit entre un nuage et la terre ou entre deux nuages, l'éclair est le phénomène lumineux, le tonnerre le phénomène sonore, la foudre le phénomène total.

Le phénomène dangereux est l'éclair, qui ne dure qu'un temps très court, mais qui éblouit; au contraire, le tonnerre, par ses éclats et ses roulements, a terrifié les plus braves à toutes les époques. C'est à lui qu'on a donné de l'importance et c'est pour cela que, dans la pratique, le mot « tonnerre » est généralement synonyme de « foudre ». En intitulant sa célèbre étude (*Notice sur le tonnerre*), Arago justifie ce qui vient d'être dit. On ne sera donc pas étonné que les essais d'explication de la foudre soient exclusivement des essais d'explications du tonnerre.

#### HISTORIQUE.

Dès les temps les plus reculés, on a observé les phénomènes de la foudre et essayé de les décrire. Parmi les anciens, seul, Sénèque a mis de la netteté dans ses descriptions. Il est incontestablement

---

1. François ARAGO, *Œuvres complètes, Notices scientifiques*, t. I, Paris, Le grand, Pomey et Crouzet, libraires éditeurs.

le premier à avoir vu nettement que ce qu'on appelle vulgairement « éclairs de chaleur » n'est autre chose que la réverbération dans l'atmosphère d'orages très lointains, dont les éclats du tonnerre ne peuvent être entendus. Il a été moins heureux dans son essai d'explication des phénomènes, que Descartes a repris pour son compte.

« Sénèque et Descartes se servaient du prétendu rapprochement « subit de deux couches de nuages superposées pour condenser une « certaine masse d'air, dont la dilatation, également brusque, « engendrait ensuite le bruit du tonnerre » (1).

« Un seul mot, dit Arago, et cette explication s'écroulera d'elle-même : il tonne souvent sans qu'il y ait dans l'atmosphère deux « couches de nuages. » (2)

On voit que l'essai d'explication qui précède repose sur l'expérience du *briquet à air*, qui ne s'applique visiblement pas puisqu'elle suppose une compression brusque de l'ordre de plusieurs atmosphères. Les successeurs de Sénèque et Descartes « ...ont fait intervenir l'atmosphère dans l'explication du phénomène d'une « manière en quelque sorte inverse. *Ils croient que, dans son trajet, « la foudre produit le vide partout où elle passe. Le bruit serait la « conséquence de la rentrée de l'air dans le vide, ainsi que cela arrive « dans l'appareil connu dans tous les cabinets de physique sous le « nom de crève-vessie.*

« La rentrée de l'air dans le vide doit incontestablement « occasionner du bruit. *Si la foudre produit du vide en traversant « l'atmosphère, le tonnerre en sera la conséquence ; mais par quelle « cause physique la foudre engendre-t-elle un vide ? Voilà ce que per- « sonne n'a découvert. L'explication du tonnerre est donc encore « à donner ; jusqu'ici on s'est contenté de remplacer une difficulté « par une difficulté plus grande.*

« Quelle que soit, au surplus, la cause physique des détonations « de la foudre, il n'en reste pas moins à rechercher dès à présent l'origine des longs roulements que tout le monde a remarqués, l'origine

1. Arago, *loc. cit.*, p. 239.

2. Arago, *loc. cit.*, p. 239.

« des changements d'intensité subits et si souvent répétés, qui sont « connus des météorologistes sous le nom d'éclats. » (1)

Le bruit que fait la rentrée de l'air dans le vide, démontré par l'expérience du crève-vessie, pourrait tout aussi bien s'expliquer par le phénomène physique (ou mécanique) du claquement du fouet. La *mèche* du fouet est une palette qui, en se déplaçant rapidement parallèlement à elle-même, fait le vide derrière elle ; le bruit sec, le claquement que l'on entend, est le résultat de la rentrée de l'air dans le vide, le claquement étant d'autant plus intense que cette rentrée est plus rapide, c'est-à-dire que le vide a été plus parfait, la vitesse de la mèche étant plus grande.

Mieux encore que dans l'expérience du crève-vessie, le *clac!* du fouet, c'est, à s'y méprendre, le bruit même du tonnerre lorsque, l'éclair étant proche et se produisant dans une grande plaine, ne donne pas naissance à des roulements.

A l'encontre d'Arago, nous laisserons de côté la question des roulements du tonnerre, qui est aujourd'hui bien expliquée et ne nous intéresse pas.

A cause de la rentrée de l'air dans le vide, le tonnerre d'Arago est un *tonnerre centripète*.

L'insistance de l'illustre physicien à ne pas concevoir, en 1837, que « la foudre produit du vide dans l'air partout où elle passe » se comprendra si l'on se rappelle que l'*ozone* n'a été découvert par Schonbein qu'en 1845. Il est vrai que, quand une décharge électrique transforme  $O^2$  en  $O^3$  avec condensation d'un tiers, l'étincelle produit un phénomène chimique et n'agit pas seulement comme une cause physique.

Alors que, dans ce qui précède, nous nous sommes surtout intéressés au bruit sec, au claquement de l'éclair entendu de très près et privé de roulements, Schopenhauer avait été surtout frappé par le caractère explosif, par le *boum!* de certaines décharges d'éclair. Le prof. J. Estalella, de Tarragone, a rappelé récemment avec beaucoup d'à-propos (2) que, dans le traité *Philosophie et Science de la*

1. Arago, *loc. cit.*, p. 239-240.

2. J. ESTALELLA, *Anales de la Sociedad española de física y química*, t. XXIII, p. 186 (avril 1925).



*nature* de ses *Parerga et Paralipomena* (p. 68 de la traduction française de A. Diétrich), l'illustre philosophe a, avec beaucoup de modestie, exposé une théorie du *tonnerre centrifuge*.

Avec une fine intuition, Schopenhauer avait prévu la nécessité de l'explosion d'un endothermique pour expliquer les phénomènes sonores de l'éclair. Il imaginait que la tension électrique (différence de potentiel) des deux nuages entre lesquels doit jaillir l'éclair décompose l'eau, produisant ainsi du *gaz tonnant*, dont les molécules s'accumulent jusqu'à ce que le jaillissement de l'éclair enflamme celles-ci en produisant une détonation, qui est nécessairement un *tonnerre centrifuge*. Les « éclairs de chaleur » et les éclairs sans tonnerre des hautes régions de l'atmosphère seraient des éclairs sans décomposition de vapeur d'eau ; au contraire, les éclairs bruyants auraient toujours une origine chimique.

Telle est la théorie curieuse du célèbre philosophe allemand, restée jusqu'ici à peu près totalement inconnue des physiciens.

Nous verrons par la suite qu'Arago et Schopenhauer ont aperçu, chacun de son côté, une des faces de la question, et que les tonnerres centripète et centrifuge existent bien dans la réalité.

#### THÉORIE ACTUELLE.

L'éclair fulgurant, ou de première classe d'Arago, est l'air rendu éblouissant par le passage d'une décharge électrique naturelle. Nous admettrons, conformément aux expériences directes de Harald Norinder (1) et à toutes les conclusions du prof. Galli, que les décharges électriques naturelles ne sont pas oscillantes (2)

Lorsqu'une décharge électrique naturelle traverse l'air, celui-ci prend un éclat insoutenable, capable de provoquer la cécité dans

1. H. NORINDER, *Teknisk Tidskrift*, t. 33, p. 190, Stockholm, 1923.

2. Il n'y a pas nécessairement contradiction entre les conclusions du distingué physicien suédois et le résultat des décharges atmosphériques *sur les lignes télégraphiques et téléphoniques et les paratonnerres*, qui donnent souvent des oscillations. Les décharges purement atmosphériques paraissent être continues à cause de l'énorme résistance qu'offre l'air au passage du fluide électrique.

des cas accidentels (1). Cela prouve, tout au moins, la très haute température de l'éclair fulgurant. Lorsque la décharge est passée, le *reste d'éclair* n'est pas simplement de l'air chaud, car celui-ci n'est pas sensiblement lumineux. Pour savoir ce qu'il en est, il convient de remarquer qu'à la place de l'éclair fulgurant il y avait *avant* de l'air et *après* de l'air encore. Le reste d'éclair est donc constitué par les gaz de l'air, tout en n'étant pas de l'air, à proprement parler, puisque le reste d'éclair est lumineux et que l'air simplement chaud ne l'est pas.

Ce travail consiste à chercher la nature du reste d'éclair et à montrer les liens intimes qui réunissent l'éclair fulgurant linéaire plus ou moins sinueux aux formes moins connues et plus rares de l'*éclair en chapelet* et de l'*éclair sphérique*.

La première question est résolue dans ses grandes lignes par la *chute du reste d'éclair*, observée par M. Jean Koechlin, le 21 mai 1924, à Bitschwiller (Haut-Rhin) (2).

« Le 21 mai dernier, je me trouvais dans mon jardin à Bitschwiller, « vallée de la Thur, vers 18 heures. Le temps était chaud et lourd. « J'ai vu un nuage se former dans le ciel bleu au-dessus du village. « Il a fini par couvrir la huitième partie environ de la surface du « ciel visible entre les montagnes. Ce nuage était donc relativement « petit et semblait peu menaçant. Cependant la pluie a commencé à « tomber. Je suis alors rentré dans ma maison et me suis mis à une « fenêtre, fixant le nuage. Un éclair blanc l'a sillonné se dirigeant « vers le sol. L'éclair s'est épaissi, en ralentissant sa descente, est « devenu jaune, puis rouge feu. Il a fini par former une grosse boule « de feu, laissant derrière elle une traînée d'étincelles rouges. La « descente de la boule a continué, très lente, et, à 2 mètres environ « du sol, à 50 mètres de ma fenêtre, la boule a éclaté subitement en « produisant un coup de tonnerre sec et violent, sans laisser de traces. « Dans l'espace des quelques minutes suivantes, la foudre est encore « tombée trois fois sur le village, sans causer de dégâts. »

1. H. MARIÉ-DAVY, *Les mouvements de l'atmosphère et les variations du temps*, p. 356, Paris 1877.

2. *La Nature*, n° 2623 du 12 juillet 1924, *Supplément*, 2<sup>e</sup> colonne.

Nous retiendrons pour l'instant, de ce qui précède, simplement ceci : l'éclair sphérique final rouge feu est une forme du *reste d'éclair*, qui était primitivement grossièrement linéaire et blanc.

L'éclair sphérique *rouge feu* tombe lentement ; il pèse donc plus que l'air qu'il déplace. Admettons (ce que nous verrons par la suite être exact) que l'éclair sphérique jouit des propriétés des corps *optiquement noirs* ; nous pouvons affirmer que sa température est nettement au-dessus de 500 degrés centigrades. Admettons, pour fixer les idées,  $546^{\circ} = 2 \times 273^{\circ}$  pour sa température centigrade supposée la même en tous les points du fluide. Si celui-ci est de l'air ordinaire, son coefficient de dilatation est  $\frac{1}{273}$ , la densité par rapport à l'air supposé dans les conditions normales est de  $\frac{1}{3}$  ; ce n'est pas possible, puisque l'éclair en boule tombe.

Au lieu de faire le raisonnement précédent au moment où l'éclair sphérique est voisin de la surface du sol, faisons-le au moment où le fluide électrique vient de disparaître, abandonnant à lui-même le *reste d'éclair*. Le refroidissement ne s'étant pas encore produit, c'est à ce moment que l'homogénéité de la température de tous les points de la masse incandescente est le plus près d'être vraie. Or nous sommes à la température où elle est éblouissante, étant une source intense de rayons ultraviolets. Admettons comme température  $9 \times 273 = 2457^{\circ}$  centigrades ; dans ces conditions, la densité du reste d'éclair par rapport à l'air normal est de  $\frac{1}{10}$  ; et *cependant le reste d'éclair tombe !*

Il faut donc admettre que, sous l'influence de la très haute température produite et de l'énergie de la décharge, il s'est formé un *air condensé* dont la molécule-gramme est de l'ordre du décuple de celle de l'oxygène, afin d'obtenir une densité voisine de 1 permettant au reste d'éclair de tomber dans l'air un peu raréfié qui supporte le nuage orageux.

Quelle que soit la température réelle du reste d'éclair, sa chute conduit à cette conséquence que le corps lumineux qu'il constitue est nécessairement un *air condensé*, c'est-à-dire un corps ou un

mélange de corps qui, chimiquement, sont distincts de l'air ordinaire considéré à la même température.

En quoi peut bien consister cet air condensé ? Sans vouloir résoudre aujourd'hui la question, il est permis de remarquer que l'air contient surtout de l'oxygène et de l'azote, avec de la vapeur d'eau, 3 dix-millièmes en volume de  $\text{CO}_2$ , et les gaz monoatomiques de l'air : argon, néon, krypton, xénon, hélium, dont le premier existe dans la proportion de 1 %, tandis que les autres ne se rencontrent qu'à des proportions infinitésimales.

Tant à cause de leur rareté que de leur inaptitude à se combiner aux autres corps, les gaz monoatomiques, comme aussi  $\text{CO}_2$ , ne peuvent jouer de rôle appréciable dans la formation de la foudre. Il reste donc en présence l'oxygène, l'azote et la vapeur d'eau. Comme la foudre peut se produire à des altitudes énormes, on voit qu'il faut également éliminer la vapeur d'eau en tant qu'élément essentiel de la formation de la foudre. On aboutit donc à cette conséquence que l'oxygène et l'azote seuls peuvent intervenir utilement.

La théorie actuelle consiste à dire que, dans le passage d'une quantité  $m$  d'électricité naturelle passant du potentiel  $V$  au potentiel  $V' < V$ , il se forme une *combinaison* avec *condensation* des éléments et absorption de l'énergie  $m(V - V')$  de la décharge. Appelons *matière fulminante* le corps qui s'est formé, lequel est *endothermique* et *explosif* en vertu des travaux classiques de Marcellin Berthelot. Lorsque la température baisse par refroidissement de la matière fulminante (reste d'éclair), celle-ci devient instable et détonne violemment en libérant d'un seul coup l'énergie énorme absorbée lors de sa formation. Dans cette manière de voir, le phénomène sonore du *tonnerre* est nécessairement consécutif au phénomène lumineux de l'éclair fulgurant.

Comme cela arrive lorsqu'il y a décomposition d'un endothermique par explosion, la matière fulminante se réduit en ses éléments, sans trace de composés intermédiaires. La matière fulminante, formée aux dépens de l'air, redonne donc de l'air par sa décomposition brusque et ne laisse pas de trace de sa composition, ce qui est conforme à toutes les observations.

Comme, d'après ce qui précède, l'oxygène et l'azote seuls

peuvent entrer dans la composition de la matière fulminante, on doit supposer que cette composition chimique encore inconnue, de poids moléculaire assez élevé comme nous l'avons vu p. 971, est nécessairement : un oxyde de l'azote  $Az^p O^q$ , ou un ozone supérieur de l'oxygène  $O^m$ , ou un ozone supérieur de l'azote  $Az^n$ . Les propriétés magnétiques de la matière fulminante, lorsque la température est devenue suffisamment basse, excluent un ozone supérieur de l'azote, corps essentiellement diamagnétique comme l'azote. On peut donc hésiter entre un oxyde de l'azote plus oxygéné que l'acide pernitrique et un ozone supérieur de l'oxygène ; les probabilités paraissent plus grandes pour le composé oxygéné de l'azote.

**Formes terminales plus ou moins exceptionnelles de l'éclair fulgurant.** — L'agent de transformation, qui permet de passer de l'éclair linéaire initial plus ou moins sinueux aux formes terminales, est la *tension superficielle* de la matière fulminante, laquelle agit en rétractant la surface extérieure de ce corps endothermique. Selon la quantité de l'explosif formée, le refroidissement est plus ou moins lent, et la tension superficielle a, ou n'a pas, le temps de réduire suffisamment la surface extérieure du reste d'éclair pour montrer des formes plus ou moins exceptionnelles.

Pour simplifier, concevons un éclair fulgurant sous la forme d'un cylindre circulaire de longueur  $l$  et de rayon  $r$ ,  $r$  étant infiniment petit par rapport à  $l$ . La surface latérale est  $2\pi rl$  ; le volume est  $\pi r^2 l$  : la surface latérale de l'unité de volume est donc  $2/r$  ; comme le rayon  $r$  est très petit, la surface latérale  $2/r$  est très grande ; or c'est par cette surface que se refroidit l'unité de volume de la matière fulminante. Comme, d'autre part, la température initiale de l'éclair n'est certainement pas inférieure à 2000° centigrades, le refroidissement est instantané ou quasi-instantané, l'éclair linéaire habituel disparaissant au bout d'un temps qui est de l'ordre de quelques centièmes de seconde.

Supposons une décharge d'une intensité notablement supérieure, qui aboutit à la création d'une quantité beaucoup plus grande de matière fulminante avec un éclair plus court ;  $r$  a augmenté. Par suite, le refroidissement du reste d'éclair est plus lent et sa tension

superficielle agit pour faire tendre sa surface libre vers une valeur plus faible. La matière fulminante, en tant que veine fluide s'écoulant dans l'air, présente une série de *ventres* et de *nœuds* équidistants; on prévoit que le refroidissement, beaucoup plus rapide aux nœuds où  $r$  est plus petit, laissera les régions ventrales se détacher et prendre la forme de sphéroïdes incandescents distribués à des distances égales sur la trajectoire de l'éclair, quelle que soit d'ailleurs la forme de celle-ci. C'est l'explication des *éclairs en chapelet* de Gaston Planté donnée par celui-ci, à cela près que ce physicien éminent n'a pas vu le rôle essentiel de la tension superficielle (1).

Supposons maintenant une décharge d'une excessive violence, donnant naissance à une très grande quantité de matière fulminante et se produisant très près de la surface de la terre (à 100 mètres d'altitude, par exemple, ce qui est fréquemment le cas des orages d'une très grande intensité et desquels on dit que *les nuages sont très bas*. Cela se passe au moment où il fait extrêmement chaud; la densité de l'air est alors la plus petite possible, et pour que le nuage d'orage puisse flotter il est obligé de descendre davantage, l'air ordinaire retrouvant ainsi par une augmentation de pression la densité qui lui manque du fait d'une température très élevée). Dans ce cas, on obtient un éclair fulgurant très court.(2) et de grande section.

Dès lors, la matière fulminante affecte la forme d'un cylindre

1. Gaston Planté dit en effet textuellement : « Cette formation de grains lumineux *alternant avec des traits de feu* doit être une conséquence de l'écoulement du flux électrique au travers d'un milieu pondérable, et peut être comparée soit au chapelet de globules incandescents que présente un long fil métallique, fondu par un courant voltaïque, dont les extrémités restent un instant suspendues en fusion aux pôles de la pile, soit encore aux *renflements* résultant de l'écoulement de toute veine liquide. De telles agglomérations de matière électrisée et lumineuse doivent être naturellement plus lentes à se dissiper que le *trait* même qui les relie, et ainsi s'explique la persistance de l'éclair observé » (*Phénomènes électriques de l'atmosphère*, p. 67, § 35, Paris, J.-B. Baillière et fils, 1888).

2. Lorsque l'éclair fulgurant se produit à l'altitude d'un ou de deux kilomètres, où l'air est d'autant plus ionisé que l'altitude est plus grande, le gradient de potentiel est faible, et la différence de potentiel explosive  $V-V'$  qui produit l'éclair donne des jaillissements longs et grêles. Aux altitudes plus faibles, l'air est beaucoup moins ionisé, le gradient de potentiel est beaucoup plus grand, et la même différence explosive  $V-V'$  se réalise avec des éclairs beaucoup plus courts.

de quelques décimètres de long et de plusieurs centimètres de diamètre. Sous l'influence de la tension superficielle, et tout en tombant, la matière fulminante se rétracte, augmentant son diamètre et diminuant sa longueur, jusqu'à ce que, la surface devenant minima, le fluide affecte la forme sphérique. Pendant ce temps, la matière incandescente se refroidit rapidement, mais par une surface qui, rapportée à l'unité de masse du fluide, est de plus en plus petite ; en sorte que la vitesse de refroidissement, excessive au début, diminue rapidement en tendant vers un minimum qui correspond à la forme sphérique de l'éclair, la sphère étant la surface la plus petite enfermant un volume donné et la surface qui, une fois donnée, renferme le plus grand volume possible. L'éclair fulgurant linéaire est blanc éblouissant à l'origine ; dans l'exemple de Bitschwiller, le reste d'éclair est passé ensuite, tout en changeant de forme, du blanc au jaune, et du jaune au rouge, montrant ainsi le refroidissement de sa surface.

Gaston Planté a vu nettement, quoique sans jamais s'élever à la notion de *tension superficielle* (1), la relation qui existe entre l'éclair fulgurant linéaire et l'éclair sphérique, car il a dit : « Ce genre d'éclair (l'éclair en chapelet) nous paraît montrer la transition de la forme ordinaire de la foudre en traits sinueux ou rectilignes à la forme globulaire. On conçoit, en effet, que les grains de

---

1. Dans un article étendu sur la matière fulminante, le prof. José Estalella essaye de rapporter à Planté l'idée de la tension superficielle. Il croit voir comme une intuition de cette influence dans les termes de Planté lorsqu'il compare les globules de l'éclair en chapelet aux gouttes auxquelles se réduit le métal d'un long fil tendu et aux ventres et aux nœuds d'une veine liquide : « Aunque MATHIAS dice que el papel esencial de la tension superficial no habia sido señalado por G. PLANTÉ, creo ver como una intuición de esta influencia en las palabras de PLANTÉ, al comparar los globulos del relampago de rosario a las gotas a que se reduce el metal de un alambre fundido y a los vientres y nodos de una vena liquida. » (Contribucion al estudio de la materia ceramica, *Anales de la Sociedad Española de Fisica y Quimica*, t. XXIV, p. 587, 1926).

Quelque satisfaisantes que soient les comparaisons de Planté, il y a une différence essentielle entre le fait de comparer un phénomène inconnu à un phénomène complexe comme un fil métallique incomplètement fondu par un courant, ou une veine liquide, et celui de préciser pour la première fois la *tension superficielle*, dont G. Planté ne fait mention nulle part, comme la seule et unique cause capable de rendre compte des faits observés.

En faisant cette confusion regrettable, le prof. José Estalella est sorti involontairement de la justice et du droit.

l'éclair puissent acquérir un certain volume et donner naissance à des globes de feu ». (*loc. cit.*, p. 66).

Il ajoute même, et en cela nous ne sommes plus d'accord avec lui : « Nous avons donc conclu de cette observation que les globes fulminants qui tombent en plus ou moins grand nombre, accompagnés du bruit du tonnerre, et qui disparaissent immédiatement, peuvent être considérés comme dérivant d'un éclair en chapelet ». (*loc. cit.*, p. 66 et 67). Nous reviendrons sur ce point à la fin de ce travail.

**Phénomènes sonores.** — La théorie exposée dans les pages précédentes explique simplement les phénomènes sonores de l'éclair comme elle en explique simplement les phénomènes lumineux.

Soit toujours, pour plus de simplicité, un éclair fulgurant linéaire ; à l'apparence lumineuse succède, quand on n'en est pas trop éloigné, le bruit d'un fort craquement qui est le *bruit propre de l'éclair*. Proposons-nous de l'expliquer, en laissant de côté la question des roulements du tonnerre. Dans le cas considéré, il y a deux phénomènes consécutifs à la décharge :

1° une condensation, proportionnelle à la quantité de matière fulminante formée, provenant de ce que cette combinaison se forme avec contraction des éléments qui la composent ;

2° la décomposition spontanée ultérieure de cette matière fulminante dès que sa température s'abaisse au-dessous de celle à laquelle peut exister, sous la pression atmosphérique, ce corps fortement endothermique.

La condensation produit un vide, qui est immédiatement comblé par l'air atmosphérique ; l'*onde centripète* qui en résulte produit un son, qui est le tonnerre *centripète* d'Arago, dont l'intensité est en raison de la masse de matière fulminante formée. D'autre part, la décomposition spontanée et nécessaire de la matière fulminante, qui libère l'énergie énorme absorbée par sa formation, produit une *onde centrifuge* génératrice du tonnerre *centrifuge* de Schopenhauer.

Dans le cas de l'éclair fulgurant linéaire, les deux tonnerres, séparés par un très court espace de temps, se confondent pour l'oreille en un seul.



Dans le cas d'un observateur situé à distance faible d'un éclair fulgurant relativement long éclatant entre un nuage et le sol, l'éclair fait entendre un bruit sec, un *crarraac !* plus ou moins analogue au bruit de la toile qu'on déchire, et qui s'explique par l'explosion successive des différents segments dans lesquels on peut supposer l'éclair décomposé, les plus anciens segments éclatant les premiers par refroidissement, et ainsi de suite.

On voit donc, par la théorie précédente, qu'Arago avait entrevu séparément une des deux phases de la question.

On peut y ajouter plusieurs remarques.

1° *Le tonnerre centripète est producteur d'un bruit moins intense que le tonnerre centrifuge.* En effet, dans le premier cas, le vide produit par la contraction de la matière fulminante étant immédiatement rempli par l'air extérieur, le choc produit par l'air qui rentre est déterminé par une différence de pression au plus égale à la pression atmosphérique. Dans le second cas, au contraire, l'explosion de la matière fulminante donne naissance à des différences de pression d'un grand nombre d'atmosphères. L'intensité sonore du tonner centrifuge doit donc être incomparablement plus grande que celle du tonnerre centripète.

2° *Dans le cas de l'éclair sphérique, il y a dissociation des deux bruits de l'éclair, qui peuvent être séparés par un grand nombre de secondes.*

En effet, cherchons à traduire en nombres la transformation d'un éclair linéaire en éclair sphérique. Supposons

$$l = 1 \text{ km} = 10^5 \text{ cm} ; \quad r = 1 \text{ cm.}$$

Il vient alors :

$$\text{Volume} = \pi r^2 l = \pi \times 1^2 \times 10^5 = 3,14 \times 10^5 \text{ cmc} ;$$

$$\text{Surface} = 2\pi r l = 2\pi \times 1 \times 10^5 = 6,28 \times 10^5 \text{ cmq} ;$$

$$\frac{\text{Surface}}{\text{Volume}} = \frac{2}{r} = 2.$$

La surface de 1 centimètre cube est 2 centimètres carrés.

Soit maintenant  $R$  le rayon de l'éclair sphérique dans lequel se transforme l'éclair linéaire. Négligeons le refroidissement et la

contraction de la matière fulminante lors de sa formation. On a :

$$\pi r^2 l = \frac{4}{3} \pi R^3;$$

$$R^3 = \frac{3}{4} r^2 l = 0.75 \times 10^5 = 0,07 \times 10^3.$$

On voit que  $R$  est de l'ordre de  $0,45 \times 10^2 = 45$  cm.

Ce nombre est d'ailleurs par excès ; dans ce cas, le rapport de la surface  $4\pi R^2$  de la sphère à son volume  $4/3\pi R^3$  est :

$$\frac{3}{R} = \frac{3}{45} = 0,07.$$

On voit que la surface du centimètre cube est trente fois plus petite que sous la forme linéaire ; en réalité, cette surface est beaucoup plus petite encore. Admettons le rapport 100 ; cela veut dire que le refroidissement de l'éclair sphérique est, toutes choses égales d'ailleurs, 100 fois plus lent que celui de l'éclair linéaire ; il durera donc un temps 100 fois plus long. L'éclair linéaire intense générateur d'éclair sphérique étant supposé durer plusieurs dixièmes de secondes, l'éclair sphérique durera plusieurs dizaines de secondes, ce que l'expérience vérifie. L'explosion finale, ou tonnerre centrifuge, se produira plusieurs dizaines de secondes après le tonnerre centripète initial. La dissociation peut être plus grande encore, l'observation ayant montré que la durée de certains éclairs sphériques pouvait atteindre 10 minutes, soit 600 secondes.

3° *Dans certains cas, le tonnerre centrifuge peut faire défaut.* Nous verrons en effet que, de même que certains dispositifs d'artifices peuvent *fuser* au lieu d'éclater, certains éclairs sphériques, même de rayon notable, s'éteignent sans bruit appréciable, dans un souffle !

Le plus souvent, l'éclair sphérique, qui est caractéristique des orages très violents, se produit quand les éléments sont déchainés et que le vent fait rage ; le tonnerre centripète est alors couvert par le bruit de la pluie et du vent. A cause de cela, la plupart des descriptions font seulement mention de boules de feu blanches, jaunes ou rouges, qui tombent spontanément du ciel et qu'on entrevoit

par les fenêtres. La plupart du temps, ces boules lumineuses éclatent spontanément avec un bruit formidable. C'est le tonnerre centrifuge qu'en entend alors. Mais nous venons de voir que, dans certains cas, ce tonnerre centrifuge peut manquer lui-même.

VÉRIFICATIONS DE LA THÉORIE NOUVELLE.

La théorie nouvelle explique simplement toute une série de faits qu'on ne comprenait pas auparavant ; mais cela ne suffit pas. Si elle est vraie, la théorie doit, sans hypothèse nouvelle, expliquer tous les faits connus. Nous allons, dans la mesure du possible, passer ceux-ci en revue.

**Chute de la matière fulminante.** — La matière fulminante, formée d'air condensé, doit être plus lourde que l'air malgré sa température initiale très élevée, puisque cette contraction donne lieu au tonnerre centripète, que l'on peut entendre distinctement dans le cas de l'éclair sphérique lorsque les circonstances sont favorables, c'est-à-dire lorsque ce tonnerre n'est pas couvert par les fracas de la pluie et du vent. Dès lors, *la matière fulminante provenant de la décharge entre un nuage et la terre doit tomber*. Or on ne voit pas, en général, les éclairs ordinaires tomber d'une seule pièce comme cela devrait être d'après ce qui précède. Il y a à cela une raison qui intervient dans la presque totalité des cas : on ne voit pas les éclairs tomber parce que la matière fulminante se décompose au bout d'un temps habituellement très court et que la vitesse de la chute des corps est nulle à l'origine du temps.

Appliquons la loi de la chute des corps dans le vide ; cette loi est beaucoup plus rapide que celle de la chute dans l'air de la matière fulminante, qui est plus lourde que l'air raréfié dans lequel elle a pris naissance mais un peu moins dense que l'air voisin de la surface de la terre dans laquelle elle flotte habituellement.

Admettons donc :

$$e = 1/2 gt^2, v = gt, \text{ avec } g = 500 \text{ cm/sec}^2,$$

l'accélération de la pesanteur étant moitié de ce qu'elle est dans

la chute dans le vide. On obtient alors, pour les petites valeurs du temps, le tableau suivant :

<i>Temps.</i>	<i>Espace 1/2 gt<sup>2</sup></i>	<i>Vitesse gt</i>	<i>Vitesse moyenne 1/2 gt</i>
1/20 sec.....	0,62 cm	25 cm/sec	12,5 cm/sec
1/10 sec.....	2,5 cm	50 cm/sec	25 cm/sec
2/10 sec.....	6,2 cm	100 cm/sec	50 cm/sec

Les espaces de ce tableau, supposés vus des distances de l'ordre de 1, 2, 3 kilomètres, sous-tendent des angles trop petits pour être perceptibles, car il s'agit de secondes d'arc.

La chute visible de la matière fulminante, qui est un phénomène réel, nécessaire, en ce qui concerne l'observation oculaire est cependant un phénomène exceptionnel. Il est probablement moins rare qu'on ne pense ; mais, comme on ne s'y attend pas et qu'il n'y a pas dans le ciel de points de repère (1), le déplacement de l'éclair linéaire ne se voit pas.

La chute directe de l'éclair fulgurant se voit donc exceptionnellement ; nous avons déjà vu l'observation de M. Jean Koechlin, le 21 mai 1924, à Bitschwiller (Haut-Rhin) ; nous allons étudier maintenant une autre observation très curieuse, due au prof. Galli, et que je transcris ci-après :

« L'orage du 9 septembre 1877, qui, à Castelvandolfo, produisit  
 « le globe fumeux qui explosa, envahit Velletri une demi-heure plus  
 « tard... L'air était très agité ; dans le tube du baromètre, le mercure  
 « s'agitait comme si l'instrument était secoué volontairement. Les  
 « éclairs, presque tous en zigzag, avaient une forte couleur pourpre,  
 « et je notai avec étonnement que le sillon lumineux, un peu affaibli,  
 « restait en l'air pendant une couple de secondes. Différentes per-  
 « sonnes virent toutes le même phénomène et vinrent m'en de-  
 « mander l'explication, que je ne pouvais donner. Il a été ensuite  
 « observé et décrit aussi par Pockel, par Liais, par Prinz et par  
 « Fouchet, lequel exclut l'hypothèse de décharges successives et

---

1. Dans le jour, on ne voit pas les étoiles, et la nuit, en temps d'orage, le ciel est couvert par les nuages.

« incline à croire à un effet de phosphorescence ou d'incandescence  
 « (*La Nature*, 1904). Mais un de ces éclairs me présenta une particu-  
 « larité encore plus difficile à expliquer, et peut-être très rare, parce  
 « que je ne la vois expliquée par personne. C'était un éclair légè-  
 « ment ondulé et presque horizontal, également de couleur pourpre,  
 « lequel resta ainsi dessiné pendant deux ou trois secondes. Après, il  
 « s'abaissa tout ensemble d'environ 5°, en se maintenant parallèle à la  
 « position primitive et en conservant presque exactement les mêmes  
 « ondulations.

« Je fermai les yeux craignant une illusion ; le ruban lumineux,  
 « moins vif que le premier, resta à sa nouvelle place et après disparut



Fig. 1. — La chute de l'éclair de Velletri.

« instantanément. La figure 1 est prise d'après une esquisse que je  
 « fis, à peine l'orage passé. Ce fait, dont je ne puis nullement douter,  
 « échappe à l'hypothèse de la phosphorescence, et laisse plutôt  
 « supposer qu'une grande quantité de particules matérielles, incan-  
 « descentes ou brûlantes, sont descendues suivant des lignes ver-  
 « ticales par une raréfaction instantanée de la couche aérienne qui  
 « les soutenait ». (1)

Il faut expliquer d'abord que, pendant deux secondes, au moins, l'éclair observé par le prof. Galli demeure en place, ou plutôt se déplace assez peu pour que le déplacement ne se remarque pas. Eten-  
 dons le tableau de la page 20 à des durées de 1 à 2 secondes; il vient :

Temps.	Espace 1/2 gl <sup>2</sup> .	Vitesse gl.	Vit. moy. 1/2 gl.
1 sec.,.....	250 cm	500 cm/sec	250 cm/sec
2 sec.,.....	1000 cm	1000 cm/sec	500 cm/sec

1. IGNAZIO GALLI, — *Della protezione offerta dai parafulmini e di alcuni quesiti sulla natura del fulmine*, § 33, p. 40-41 (Estratto dalle *Memorie della Pontificia Accademia Romana dei Nuovi Lincei*, 26, 1908).

Le calcul précédent montre qu'en deux secondes la matière fulminante a fait une chute de l'ordre de 10 mètres. Bien que l'orage fût sur le territoire de Velletri, on peut admettre que l'éclair était, par rapport à l'observateur, à une distance de 1, 2, 3,... kilomètres. Admettons 2<sup>km,5</sup> L'angle sous lequel la chute est vue est donc :

$$\frac{10^m}{2^{km,5}} = \frac{10}{2500} = \frac{40}{10000} = 13'.$$

Cet angle est compris entre la moitié et le tiers du diamètre apparent du soleil ou de la lune (30') ; il est appréciable, quoique petit. Mais, comme l'observateur ne s'attendait nullement au phénomène observé et qu'il n'y a aucun point de repère dans un ciel orageux obscurci par les nuages, un tel déplacement est passé inaperçu. On peut admettre comme tout à fait vraisemblable qu'il a fallu un déplacement angulaire de l'ordre du diamètre apparent du soleil ou de la lune pour que la chute apparût.

Dire que celle-ci a été de 5°, c'est-à-dire qu'elle correspondait à dix fois le diamètre apparent du soleil ou de la lune. Comment se fait-il qu'elle ait été limitée à cette amplitude ?

Nous verrons par la suite que la matière fulminante peut, suivant les cas, se décomposer spontanément d'une manière *progressive* ou d'une manière *explosive*. Ce dernier mode de décomposition donne naissance au tonnerre centrifuge ; le premier mode de décomposition ne produit qu'un bruit très faible. Or le récit très circonstancié du prof. Galli ne fait nullement mention que la chute de l'éclair pourpre ait été accompagné de tonnerre ; l'observateur minutieux et sagace qu'il était n'aurait pas manqué de noter une particularité aussi éclatante. Comme il n'y a pas eu de tonnerre, c'est donc que la décomposition n'a pas été explosive et qu'elle a été, au contraire, progressive ; et ceci explique toutes les particularités du phénomène.

D'abord, cela explique que la chute a paru limitée à 5°. En effet, en se décomposant progressivement, la matière fulminante a augmenté progressivement de volume, et l'augmentation de volume de l'air déplacé a détruit progressivement l'accélération de la chute. Lorsque celle-ci a été progressivement enrayée, la matière fulmi-

nante n'était pas totalement décomposée ; le *ruban lumineux*, comme dit le prof. Galli, *était seulement moins vif que le premier*, car il contenait encore des parties incandescentes, donc non décomposées. Ces parties umineuses ont évidemment continué à tomber dans un air sensiblement de même densité qu'elles, mais avec lenteur. Le commencement et la fin de la chute de l'éclair pourpre ont été insensibles pour les raisons qui ont été déjà exposées, et le phénomène s'est terminé par la décomposition et l'extinction subite des dernières portions de la matière fulminante.

L'explication de toutes les particularités de la chute de l'éclair pourpre de Velletri ne laisse donc rien à désirer.

**Observations montrant la transformation directe de l'éclair linéaire en foudres sphériques.** — 1. « Le professeur Muncke rapporte qu'un éclair descendant verticalement, qui paraissait avoir une soixantaine de mètres de long, se transforma sous ses yeux en un grand nombre de petites boules » (1).

Le prof. Galli, qui cite, lui aussi, le passage d'Arago ajoute :

« Et ce phénomène ne doit pas être très rare, parce que, après qu'une foudre de forme ordinaire a frappé un édifice, il arrive souvent qu'on voit apparaître dedans quelque globe. La différence avec l'éclair en chapelet de Londres consisterait donc dans le nombre des globes, qui peut être minime et même réduit à un seul. Il ne manque pas d'exemples de la transformation, en un ou très peu de globes, observée directement dans l'air libre » (2).

2. La vaste maison des pauvres de Heckingham consiste en un corps de bâtiment de 108 pieds de longueur avec deux ailes d'environ 160 pieds chacune. Elle porte huit cheminées ; chacune d'elle est munie d'une tige pointue en fer qui la dépasse de 4 à 5 pieds. Huit tiges de fer constituaient les conducteurs ; elles se réunissaient de manière à ne plus former que quatre conducteurs se rendant dans le sol. Ceux-ci n'avaient pas une communication suffisante avec le

---

1. ARAGO, *loc. cit.*, p. 43 (en note).

2. IGNAZIO GALLI, *I principali caratteri dei fulmini globulari*, § 25, p. 61. (Estratto dalle *Memorie della Pontificia Accademia Romana dei Nuovi Lincei*, 28, 1910).

sol ; elle était presque nulle pour quelques-uns, et par conséquent l'écoulement du fluide n'était pas garanti. Le toit du bâtiment avait ses arêtes et ses bords garnis de plomb, sans qu'on eût songé à mettre ce métal en communication avec les conducteurs. L'angle de la maison de Heckingham est éloigné de 70 pieds du conducteur.

Le 17 juin 1781, cette maison fut endommagée par la foudre, malgré ses huit paratonnerres ; ce fut précisément l'angle dont nous venons de parler. Le feu put être éteint avant qu'il eût occasionné de graves dommages. Si la foudre n'a pas frappé le paratonnerre, il ne faut pas s'en étonner, car la tige du paratonnerre la plus voisine était encore à 17<sup>m</sup>,76 et celle-ci ne s'élevait pas au-dessus de lui de plus de 6<sup>m</sup>,70 (Arago).

Mais il paraît qu'un observateur *a vu la foudre se diviser* dans l'atmosphère en trois boules de feu : l'une d'elle frappa l'angle de la maison, une autre atteignit un paratonnerre, une troisième enfin atteignit le sol devant la maison. Une seule des branches s'était donc trouvée dans la sphère d'activité d'un de ses paratonnerres. (1)

3. P. Clare rapporte le fait suivant (*Association Britannique*, 2<sup>e</sup> session, 1850) : Vers 9 heures, les nuages étaient très épais ; on a observé de fréquents éclairs en nappe ; parfois ils ont pris l'aspect des racines d'un arbre, souvent terminées par des boules de feu à l'extrémité de tous ou de quelques-uns seulement des rameaux.

4. Dans ses *Recherches sur les météores*, le professeur Coulvier-Gravier cite trois cas d'éclairs en boules observés dans les tempêtes du 13 juillet 1829 (p. 184-185), du 14 juin 1853 (p. 191) et du 31 juillet 1854 (p. 197), « où, toujours, deux éclairs de première classe (c'est-à-dire linéaires, selon la classification d'Arago), partis des extrémités de l'orage, se sont réunis en un même point du ciel, duquel point aussitôt la foudre, en forme de boule, s'est dirigée vers la terre » (2).

Les trois observations sont en parfait accord avec la théorie nouvelle.

5. Le 3 mars 1756, on observe à Berne « une fusée se terminant

1. DR F. SESTIER, *De la foudre, de ses formes et de ses effets*, t. II, p. 512-513. Paris, J.-B. Baillièrre et fils, 1866.

2. F. SESTIER, *loc. cit.*, t. I, p. 168.



par un globe de la grandeur de la lune » (ABBÉ RICHARD, *Histoire naturelle de l'air*, t. II, p. 164-165) (1).

6. La soirée du 24 juillet 1790, Lapeirouse vit, sur de petits nuages, « une sorte de fusée qui s'éleva en grossissant, changea deux fois de couleur, devint scintillante et jeta de son sein, sans aucune explosion, un globe vif et argenté » (LAPEIROUSE, *Histoire et mémoires de l'académie de Toulouse*, t. IV, p. 189).

On peut remarquer que les cas 1 et 2 concernent des *éclairs descendants* simples se transformant en globes. Le cas 3 concerne des éclairs descendants très ramifiés, avec des globes à l'*extrémité* des ramifications ou en quelques-unes seulement. Le cas 4 est celui de la foudre sphérique naissant de la rencontre de deux éclairs linéaires vaguement horizontaux, dont les matières fulminantes se fusionnent et s'ajoutent. Les cas 5 et 6 se rapportent à des *éclairs ascendants* (fusées) se transformant partiellement en éclair sphérique.

**Observations indirectes de transformations de l'éclair linéaires en foudres sphériques.** — M. le professeur Decharme a donné la description d'un coup de foudre remarquable observé par lui à Amiens en 1884.

« Le 24 février 1884, après une journée relativement chaude (10°), après diverses alternatives de coup de vent (sud-ouest), de pluie, de giboulées de grésil et même de grêle, un orage éclata sur Amiens.

« A 7<sup>h</sup>45 du soir, un éclair d'une très grande vivacité illumina la ville tout entière et fut immédiatement suivi d'un formidable coup de tonnerre qui ébranla les vitres de toutes les maisons et effraya bon nombre de personnes, autant par l'imprévu que par l'intensité du météore.

« Bien que l'éclair et le coup de tonnerre aient été uniques dans cet orage, néanmoins la foudre est tombée simultanément en plusieurs endroits de la ville (assez éloignés les uns des autres) et à peu près sous la même forme insolite, toute particulière, c'est-à-dire

---

1. F. SESTIER, *loc. cit.*, t. I, p. 222.

« en *fragments globulaires*, qui semblent être des diminutifs de la  
« *foudre en boule*.

« La foudre est tombée d'abord au théâtre pendant la repré-  
« sentation, en traversant une vitre de la fenêtre donnant sur une  
« petite cour à l'est, du côté du Palais de justice ; de là, elle passa  
« dans les coulisses, où se trouvaient plusieurs acteurs et très près  
« de l'un d'eux qui ne ressentit aucune commotion (cependant son  
« pantalon a été légèrement roussi au-dessous du genou). On la vit  
« passer durant plus d'une seconde sous la forme d'une petite  
« *boule de feu* bleuâtre, de 2 à 3 centimètres de diamètre, en produi-  
« sant une très petite explosion, comme celle d'une allumette  
« qu'on enflamme, et elle disparut dans les dessous de la scène,  
« où l'on s'assura qu'elle n'avait causé heureusement aucun dégât.

« Au même moment, la foudre est tombée dans une maison  
« particulière, située à 200 mètres environ au sud du théâtre. Entrée  
« par une fenêtre ouverte de la cuisine, tournée vers l'ouest, elle  
« apparut à deux personnes sous la forme d'une *petite boule de feu*  
« grosse comme une noisette, qui, arrivée au-dessus de la table où  
« un jeune homme écrivait, éclata près de sa tête, avec un bruit  
« de pétard, et disparut. Cette apparition n'avait pas duré deux  
« secondes, *lorsqu'on entendit le formidable coup de tonnerre*, et l'on  
« reconnut avec effroi qu'on venait d'avoir la visite de la foudre  
« sous une forme singulière. Si la frayeur fut grande, il n'y eut du  
« moins ni accident, ni dégât.

« Au même instant, à 400 mètres environ du théâtre, la foudre  
« est tombée sur une cheminée de l'Hôtel-de-Ville (non loin du para-  
« tonnerre de cet édifice), au poste du Bureau central de police, où  
« deux agents ont vu la faible lueur électrique et entendu une petite  
« explosion comme celle d'une capsule qui éclate. C'est encore une  
« *forme minuscule de la foudre globulaire*.

« Les sonneries électriques, partant de ce Bureau central et  
« aboutissant aux quatre extrémités opposées de la ville, furent  
« mises en mouvement.

« Dans une autre maison (sise à 150 mètres du théâtre, derrière  
« le Palais de justice, muni de paratonnerres), une domestique qui  
« se trouvait au moment de l'éclair, devant la porte ouverte de la

« cuisine donnant sur une cour, a vu une flamme de couleur blanc  
 « bleuâtre, à *contours peu nettement déterminés*, qui, venant du sud-  
 « ouest, s'est précipitée sur un tuyau de gouttière contigu à la porte.  
 « C'est donc à ses pieds que cette femme a vu tomber la *boule de feu*  
 « dont la grosseur ne lui parut pas supérieure à celle d'un œuf. En  
 « atteignant le tuyau, la flamme a fait entendre un bruit aussi fort  
 « que celui d'un coup de fusil, ou mieux, d'un coup sec de gros pétard.  
 « Cette personne, saisie de frayeur, rentra brusquement dans sa  
 « cuisine, et eut encore le temps de s'asseoir avant d'entendre le  
 « violent coup de tonnerre. Il est à remarquer que du tuyau s'écou-  
 « lait en ce moment une très grande quantité d'eau qui se rendait  
 « dans la rue par une longue conduite en fonte. La foudre n'a encore  
 « causé ici que de la frayeur, sans dégâts, sans laisser trace ni de  
 « fumée ni d'odeur.

« Dans une troisième maison, à 270 mètres du théâtre, la  
 « foudre est entrée par la cheminée d'une cuisine, a soulevé comme  
 « une soupape le couvercle du fourneau allumé, d'où est sortie une  
 « *boule de feu*. Cette flamme était d'abord très volumineuse ; mais,  
 « arrivée à 2 mètres environ du fourneau, c'est-à-dire au milieu  
 « de la cuisine, elle diminua et parut avoir la grosseur d'une orange  
 « ou même d'un œuf, puis elle éclata avec un bruit aussi fort que  
 « celui d'un coup de fusil et disparut, sans laisser ni trace, ni fumée,  
 « ni odeur, mais en causant une terrible frayeur. Tout cela s'était  
 « passé en moins de deux secondes, *entre l'apparition de l'éclair et*  
 « *le bruit du tonnerre*.

« Un employé prenait son repas avec plusieurs personnes,  
 « dans un restaurant situé à 500 mètres du théâtre, près du chemin  
 « de fer et non loin de la gare, au moment où l'orage éclata. Il vit,  
 « un peu avant le coup de tonnerre, une *petite flamme* bleue courir  
 « au-dessus de la table avec une très grande vitesse. Ses commen-  
 « saux n'eurent pas le temps de la voir. Elle se dissipa sans bruit,  
 « ne laissant aucune trace de son passage. On ne sait par où elle est  
 « entrée dans la maison ; probablement par la cheminée.

« Enfin, la foudre est encore tombée à une distance de 800  
 « mètres du théâtre, dans une maison située sur le boulevard du Jardin-  
 « des-Plantes, et toujours à peu près sous la même *forme globulaire*.

« Elle est arrivée, on a tout lieu de le croire, par un fil de téléphone ;  
 « car celui-ci a été distendu et allongé de quelques centimètres ; de  
 « plus, la sonnerie à laquelle il est rattaché a été dérangée. C'est  
 « en quittant ce fil, qui aboutit à la cuisine, que la foudre a produit  
 « une explosion aussi forte, au moins, que celle d'un coup de fusil ;  
 « ce n'est qu'après avoir entendu ce bruit que l'on vit une flamme  
 « bleue (couleur de punch), grosse comme une noix, passer de la cui-  
 « sine dans la pièce voisine et faire presque le tour de la table sur  
 « laquelle plusieurs personnes prenaient leur repas ; elle effleura  
 « le maître de la maison, qui en eut la main engourdie durant quelques  
 « instants ; puis elle disparut, sans laisser ni trace ni odeur. Tout ce  
 « qui précède s'était passé en moins de deux secondes et c'est alors  
 « qu'on entendit le violent coup de tonnerre qui donna l'explication  
 « du phénomène. On fut très effrayé ; une domestique en éprouva un  
 « grand saisissement.

« Ainsi, bien que l'éclair ait été unique dans cet orage, la  
 « foudre est tombée, sous *forme globulaire, en sept endroits différents*,  
 « dont les deux plus éloignés sont à 1300 mètres environ l'un de  
 « l'autre en ligne droite.

« Il est probable que, par suite de cette dissémination de la  
 « matière fulgurante, les paratonnerres des édifices voisins, tels que  
 « ceux du Palais de justice, de la gendarmerie et même de la cathé-  
 « drale, ont été frappés par quelques rayons de foudre ; mais ils  
 « n'ont pu protéger le théâtre, qui est dépourvu de toute tige pro-  
 « tectrice.

« On peut donc conclure des faits précédents que la foudre  
 « a présenté ici un caractère particulièrement insolite, en se divisant  
 « en *fragments globulaires* qui, par leur petitesse, sont devenus  
 « inoffensifs.

« Un témoin oculaire, habitué aux observations, nous a dit  
 « avoir vu, de sa fenêtre ouverte au moment de l'éclair, une grande  
 « masse lumineuse, d'un *éclat extrêmement vif* (dont il resta ébloui  
 « pendant quelques instants), qui lui parut se diviser en une nébu-  
 « losité diffuse, se portant sur divers points de la ville, précisément  
 « dans les directions des endroits mentionnés plus haut.

« Il semblerait donc que, dans cette circonstance, la masse

« électrique a rencontré, à une certaine hauteur dans l'atmosphère, « une résistance matérielle (nuage ou milieu moins conducteur), « qui a déterminé la dissémination, l'éparpillement du fluide élec- « trique, comme un liquide tombant sur un corps solide, se divise « en gouttelettes qui sont lancées de tous côtés.

« En résumé, nous n'avons eu heureusement que la menue mon- « naie de la foudre en *globules inoffensifs*. Mais les globes fulminants « sont d'ordinaire beaucoup plus volumineux ; aussi causent-ils par- « fois de grands accidents et des dégâts épouvantables (1) ».

Nous avons à dessein donné *in extenso* le récit du professeur Decharme comme un modèle d'enquête, et aussi parce que, à nos yeux, le coup de foudre d'Amiens représente un cas beaucoup plus général que ne paraît le penser l'auteur du récit précédent. Une particularité que le narrateur n'a pas soulignée est la suivante : dans six des sept endroits où elle est tombée, la foudre globulaire a explosé. Au contraire, la *petite flamme* bleue qui, dans un restaurant situé à 500 mètres du théâtre, paraît être entré par la cheminée et a couru avec une très grande vitesse au-dessus de la table où un employé prenait son repas, s'est dissipée sans bruit. On vérifie donc, dans ce cas particulier, ce qui a été dit plus haut (p. 22), à savoir que la matière fulminante peut, suivant les cas, se décomposer spontanément d'une manière *progressive* ou *explosive*.

On peut faire une autre remarque intéressante.

Dans la troisième maison, pour soulever comme une soupape le couvercle du fourneau allumé et sortir sous la forme d'une *boule de feu*, la matière fulminante a dû exercer une pression, donc se comprimer elle-même. En sortant à l'air libre, la matière fulminante comprimée s'est détendue subitement sous la forme de la *boule de feu* et s'est refroidie ; l'augmentation de la tension superficielle provenant du refroidissement, et aussi la pression atmosphérique, ont aussitôt agi pour diminuer à la fois la surface extérieure et le volume de l'apparition jusqu'à ce qu'elle parût avoir la grosseur d'une orange ou même d'un œuf. On s'explique donc aisément ce qui s'est passé.

---

1. *La Lumière électrique*, t. XI, p. 551, 6<sup>e</sup> année, 29 mars 1884.

Des faits analogues aux précédents se sont produits le dimanche 7 juin 1925 à Pontgibaud, chef-lieu de canton du Puy-de-Dôme, situé à l'altitude de 860 mètres. Un orage éclata à Pontgibaud et sur la vallée de la Haute-Sioule. Au début, vers 16<sup>h</sup>-16<sup>h</sup>15, un immense éclair embrasait la ville, en même temps qu'un coup de tonnerre formidable ébranlait les maisons. D'une enquête faite par l'*Avenir du Puy-de-Dôme et du centre* et contrôlée par moi-même, il résulte que la foudre est tombée simultanément en sept endroits différents, dont les points extrêmes sont distants de plusieurs centaines de mètres.

Chez M. Chamaly, pharmacien, la foudre a pénétré par une fenêtre ouverte à laquelle étaient accoudées M<sup>me</sup> Chamaly et son fils ; elle affectait la forme d'une *boule rouge* assez grosse, qui a traversé une partie de la pièce et a éclaté d'un coup sec sous la suspension près de laquelle était assise M<sup>me</sup> Vasson-Chamaly. M<sup>me</sup> Chamaly a senti passer une lueur par la fenêtre ; la fille et le gendre ont vu distinctement la boule de feu et le fils a vu l'éclatement. Le coup de tonnerre extérieur n'a été entendu qu'une seconde après l'éclatement dans la maison.

Chez M<sup>e</sup> Monier, notaire, sitôt après l'immense éclair, M<sup>me</sup> Martin et sa fille M<sup>me</sup> Monier, étant dans leur salle à manger, ont senti passer, à travers les *interstices de la porte vitrée*, quelque chose, une lueur, qui, arrivée entre leurs deux chaises, un peu avant la cheminée, a pris la forme d'une *boule sphérique rouge foncé* de la grosseur d'un *œuf de pigeon*. Elle a alors éclaté vers le rideau en fer de la cheminée avec un bruit très sec, comme un pétard de feu d'artifice.

A l'Union-Approvisionnement, deux dames, la mère et la fille, étant dans leur magasin fermé, ont vu une boule éclater chez elles. M<sup>me</sup> Dumas a vu la grande lueur de l'éclair venir d'en haut ; elle était assise dans le magasin ; elle a entendu un choc et vu une lueur dans les vitres d'une vitrine de son magasin ; elle a vu une *boule de feu rouge clair*, de la *grosseur du poing*, qui éclatait d'un bruit très sec ; le météore est venu par une cheminée qui s'ouvre par une ouverture circulaire de 12 centimètres de diamètre environ.

Chez M. Giraud, à l'hôtel de la Poste, le fluide est entré par la croisée de la cuisine ; plusieurs personnes qui s'y trouvaient ont été

fortement contusionnées. La cuisinière a eu une jambe complètement noircie, mais superficiellement, comme par un dépôt de fumée.

Chez M<sup>me</sup> Béraud-Tixeront, de longues étincelles ont jailli dans le salon, laissant après elles une odeur persistante de soufre.

Même phénomène chez M. Rodier-Paquet, négociant.

Au château, chez M. le comte de Pontgibaud, le compteur d'électricité a été brisé et une *boule de feu* a été vue dans la cuisine.

Enfin la foudre est tombée sur le paratonnerre de l'église.

Par la multiplicité des points de chute, par la grosseur et la couleur différente des foudres globulaires, par le passage de l'une d'elles à travers les fenêtres d'une porte et *par l'éclatement de ces foudres partielles avant que fût entendu le coup de tonnerre formidable extérieur*, le coup de foudre de Pontgibaud présente de l'intérêt.

Bien que le tonnerre centrifuge soit postérieur, dans le temps, au tonnerre centripète, il a cependant été entendu avant lui, à Amiens comme à Pontgibaud. Ce paradoxe tient à ce que, à partir du lieu où la matière fulminante a été créée et où est né le tonnerre centripète, celui-ci a été apporté aux observateurs avec la vitesse du son, tandis que la branche de l'éclair, qui a apporté avec elle la partie sphérique qui a éclaté, s'est mue avec une vitesse comparable à celle de la lumière, ou tout au moins très grande par rapport à la vitesse du son.

**Forme sphérique liée à un éclair linéaire.** — Dans les exemples qui précèdent, il est hors de doute que l'éclair linéaire s'est ramifié en un grand nombre de branches (au moins sept), dont chacune a donné naissance à une accumulation de matière fulminante qui avait pris la forme globulaire sous l'influence de sa tension superficielle. Mais cette transformation, nul ne l'a vue s'opérer ; les observateurs n'en ont vu que le résultat final. Dans les observations décrites ci-dessous, la transformation, arrêtée en chemin, a été vue sans que le doute fût possible.

1. M. Lucien Rudaux relate en ces termes une observation très précise faite par son frère, M. H. Rudaux, qui a vu tomber la foudre près de lui, le 10 juin 1905, sur le paratonnerre de l'usine électrique du Palais Royal, son regard étant précisément dirigé sur ce point

à l'instant même du phénomène. Comme le montre le dessin ci-joint (fig. 2), fait d'après un croquis qu'il a pris tout de suite, la pointe du paratonnerre s'est trouvée surmontée, pendant un temps suffisant pour la visibilité parfaite, de trois grosses boules un peu nébu-



Fig. 2. — L'éclair du Palais Royal.

leuses d'aspect, et dont les centres étaient très brillants. Ces boules étaient précédées d'un long éclair en forme de ruban (1).

2. Le prof. Galli dit expressément, de son côté : « D'Abbadie, Clare, Schubler, Kaemtz observèrent des *globes lumineux suivis d'éclairs linéaires*. » (2)

3. A 20<sup>h</sup>55, le 24 août 1900, le docteur Less observa à travers les nuées de l'orage, au sud de Berlin et à 45° de l'horizon, un espace circulaire tirant sur le rouge, duquel partaient des éclairs continuels violacés, horizontaux et anguleux. *A l'un d'eux était attaché*

1. *La Nature*, 33<sup>e</sup> année, 2<sup>e</sup> semestre, p. 127-128, 22 juillet 1905.

2. IGNAZIO GALLI, *Della protezione offerta dai parafulmini e di alcuni quesiti sulla natura del fulmine*, § 37, p. 45 (Estratto dalle *Memorie della Pontificia Accademia Romana dei Nuovi Lincei*, 26, 1908).



un globe rougeâtre, d'un diamètre apparent d'environ deux fois celui de la lune, et d'une si grande vivacité qu'il se laissait voir nettement au travers des nuées. Il alla vers le sud-est, et s'évanouit sans tonnerre après avoir parcouru, au plus en deux petites secondes, un trajet triple ou à peine quadruple de son diamètre (1).

**Formes de l'éclair fulgurant.** — En dépit de sa définition, l'éclair fulgurant n'est pas le simple trait linéaire, plus ou moins sinueux que l'œil croit voir quand il regarde le jaillissement d'un éclair dont l'éclat n'est pas par trop violent. Les *dessins* d'éclairs, réalisés après le jaillissement, sont toujours de tels traits. Mais la réalité est plus complexe. La photographie, en particulier, montre que l'éclair donne lieu le plus souvent à des branches, qui se subdivisent elles-mêmes, en sorte que l'extrémité d'un éclair donne habituellement ces ramifications très nombreuses rappelant invinciblement l'idée du *chevelu* ou de la racine d'une plante.

Le travail récent le plus important fait sur ce point est dû au D<sup>r</sup> G.C. Simpson, directeur du Meteorological Office d'Angleterre (2) ; ce travail, à la fois théorique et expérimental, aboutit à la conclusion que les décharges *ramifiées* dans l'air sont possibles à partir de nuages chargés positivement, mais non à partir de nuages chargés négativement. Des décharges peuvent passer entre la terre et des nuages chargés positivement et négativement ; mais, dans chaque cas, la ramification s'éloignera du siège de la charge positive en devenant de plus en plus fine. Une décharge à partir d'un nuage chargé positivement aura les ramifications s'éloignant du nuage positif, tandis qu'une décharge provenant d'un nuage chargé négativement (laquelle doit toujours partir de la terre ou d'un nuage chargé positivement) aura les ramifications tournées du côté du nuage (3).

L'étude de nombreuses photographies d'éclairs montre une

1. *Meteorologische Zeitschrift*, 18<sup>e</sup> année, 1901, p. 39. Cité par GALLI, *Mémoire VI*.

2. D<sup>r</sup> G.C. SIMPSON, F.R.S., *On Lightning* (*Proc. Roy. Soc., A*, t. 111, 1926).

3. On peut résumer ce qui précède en disant que les éclairs fulgurants transportent toujours et exclusivement de l'électricité positive, et que les ramifications vont en s'amincissant dans la direction des potentiels décroissants.

énorme prépondérance des nuages positifs, donnant les éclairs descendants habituels, dont les ramifications sont tournées vers la terre.

La décharge entre la terre et un nuage négatif affecte la forme d'un *éclair ascendant* chargé positivement et ayant ses fines ramifications tournées vers le nuage négatif ou même s'enfonçant dans les profondeurs du nuage négatif, qu'elles déchargent ainsi.

Les vues théoriques du D<sup>r</sup> Simpson le portent à penser que les décharges venant de nuages chargés positivement sont fréquentes (intermittentes) mais faibles, tandis que des décharges provenant de nuages chargés négativement ne seraient pas fréquentes mais très fortes.

Sous le titre de *Etude de la forme et de la structure de l'éclair par la photographie*, M. W. Prinz, assistant à l'Observatoire royal de Belgique, professeur à l'université de Bruxelles, a publié une étude très soignée (1) de cette question importante, qui nous ferait dépasser aujourd'hui les limites qui nous ont été assignées. Nous ne ferons également que signaler aujourd'hui les travaux magistraux poursuivis depuis de longues années sur les éclairs par le prof. B. Walter du Physikalisches Staatsinstitut de Hambourg. Nous y reviendrons par la suite avec tout le développement nécessaire.

Nous nous contenterons de rappeler que le physicien russe Piltschikoff (2) avait proposé une classification des éclairs (*éclair-bande*, *éclair-tube*, *éclair trombe*) reposant sur les particularités qu'il avait obtenues le 26 mai 1895 en photographiant, dans des conditions favorables, plusieurs éclairs pendant l'orage qui traversa Odessa du sud-ouest au nord-est.

L'*éclair-bande* se présente, sur la photographie, sous la forme d'un ruban qui fait des plis multiples sans se tordre. La bande sort d'un nuage, s'affaiblit, et finit dans l'espace sans qu'on puisse distinguer la dernière partie de sa route.

Dans l'*éclair-tube*, la surface latérale du tube paraît être très

1. W. PRINZ, *Annales de l'Observatoire royal de Belgique*, Bruxelles, 1902.

2. N. PILTSCHIKOFF, *Nouvelles photographies de l'éclair* (C. R., t. 121, p. 250, 1895).

semblable à la surface latérale des fulguristes, avec les mêmes rétrécissements, les mêmes changements de direction.

Le troisième type d'éclairs se présente sous une forme qui ressemble beaucoup à une trombe. L'auteur a rencontré les deux premiers types d'éclairs (bande et tube) dans tous les orages, tandis qu'il n'a obtenu l'*éclair-trombe* qu'une seule fois, le 26 mai 1895 ; son idée paraît avoir été abandonnée.

Si nous ne nous trompons pas, ce qu'il appelle *bande* ou *tube* ne serait autre chose que le résultat de l'explosion du cylindre de matière fulminante qui constitue ordinairement l'éclair fulgurant linéaire. Ce qu'il appelle *éclair-trombe* serait l'explosion plus irrégulière et plus abondante d'un amas irrégulier de matière fulminante donné par un éclair exceptionnellement violent ; le refroidissement de la matière fulminante étant beaucoup plus lent, les parties épaisses de l'explosif donnent une explosion avec nuages caractéristiques, les parties minces qui ont explosé auparavant donnant des apparences plus simples.

La théorie, aujourd'hui abandonnée, de N. Piltschikoff repose sur l'interprétation erronée d'une particularité expérimentale certaine. Voici deux faits :

1. Il s'agit d'une photographie reproduite par le périodique milanais (*La Schienza per tutti*, année XIX, n° 87, 1912, fig. 9, p. 271) dans l'article *Nuove opinioni sui fulmini*. D'une masse globulaire s'échappe un rayonnement de six jets, longs et sinueux : quatre très minces, deux très gros. Un de ces derniers descend verticalement *entouré de lumière diffus*, mais très étroite ; l'autre est horizontal, *avec une vive clarté seulement au dessous*. Aucune des quatre autres branches ne donne le plus petit indice de lumière diffuse (1).

La décomposition de la matière fulminante, insensible dans les quatre jets très minces, est abondante dans les deux jets très gros. La pesanteur agit sur la branche horizontale, qui montre la matière

---

1. IGNAZIO GALLI, *Osservazioni inedite e rare di lampi e fulminazioni*, § 14, p. 37 (Estratto dalle *Memorie della Pontificia Accademia Romana dei Nuovi Lincei*, Série II, t. 3, 1918).

fulminante plus ou moins décomposée *uniquement au dessous*, comme cela doit être ; pour ce qui est du gros jet vertical, comme la matière fulminante augmente de volume en se décomposant, le cylindre de matière décomposée entoure le jet primitif, qui en occupe l'axe.

2. A de très brillants éclairs succède parfois une lueur « qui a été comparée par M. Pockel à l'aspect du filament d'une lampe à incandescence dont on vient de rompre le courant, par M. Liais à la traînée d'un bolide, par M. Prinz à celle d'une fusée, et par moi-même à une phosphorescence de l'air. Ce phénomène n'est pas souvent visible. Il se produit surtout après des éclairs linéaires particulièrement intenses. On voit alors, sur le fond noir du ciel, une couleur jaune verdâtre ou rougeâtre, qui décroît très vite d'intensité... Il ne s'agit pas d'une impression sur la rétine, car j'ai pu constater l'immobilité de cette lueur en changeant la direction du regard... L'hypothèse d'une phosphorescence (ou d'une incandescence) nous a paru la plus probable ». (1)

L'incandescence de l'air n'est pas soutenable, car, aux températures les plus élevées, l'air est peu ou pas lumineux, avec un pouvoir actinique à peu près nul. Dans tous les cas, l'air chaud est plus léger que l'air froid, donc le phénomène devrait se produire au dessus de la trajectoire de l'éclair ; or c'est le contraire qui se passe. Camille Flammarion montre (p. 72 de son ouvrage *Les phénomènes de la foudre*) la reproduction d'une photographie prise par M. Em. Touchet au cours de l'orage du 12 avril 1904 vers 9<sup>h</sup>40 du soir, avec la mention « Incandescence de l'air au passage d'un éclair » ; or ladite incandescence forme *au dessous de l'éclair* une zone de largeur constante qui rappelle invinciblement l'éclair-bande de Piltschikoff.

Nous venons de voir pourquoi le phénomène ne provenait pas d'une incandescence de l'air. S'il provenait d'une phosphorescence, la bande phosphorescente devrait au moins être à cheval sur la trajectoire de l'éclair, ce qui n'est pas.

La décomposition et la chute lente de la matière fulminante créée par l'éclair fournissent l'explication cherchée.

---

1. EM. TOUCHET, La forme et la structure de l'éclair, *La Nature*, 32<sup>e</sup> année, 1904, 1<sup>er</sup> semestre, p. 138-139

On expliquerait de la même façon les formes d'éclairs tout à fait rares décrits dans les termes suivants par un de nos compatriotes qui a longtemps séjourné au Brésil, M. Léon Dumas :

« Il nous a été donné d'observer, en août 1877, lors d'un orage « assez violent qui avait pour théâtre la petite ville de Vassouras, « dans la province de Rio-de-Janeiro, deux formes singulières « d'éclairs. Les décharges électriques se succédaient sans interrup- « tion, et affectaient pour la plupart le trait sillonné, d'observation « commune.

« Mais dans les zones intertropicales, la tension électrique des « nuées est plus forte que chez nous, par suite de l'intensité des phé- « nomènes d'évaporation... Une forme d'éclair fort curieuse est « figurée dans le premier de nos croquis. C'est *une sorte d'explosion* « *offrant dans ses contours quelque analogie avec la flamme d'une* « *bougie*. La décharge affectait, au lieu du zigzag habituel, un ensem- « ble pyriforme, allongé, rectiligne, encadré d'une auréole également « fort allongée.

« Une seconde forme d'éclair, plus commune sous la zone « torride, présente un tronc principal, jaillissant d'un épais nimbus, « se subdivisant en deux branches, dont l'inférieure de tarde pas « également à se subdiviser. Cette forme se rapproche assez bien des « éclairs arborisés déjà signalés par M. Em. Liass. » (1)

« Ce que M. Dumas appelle « éclairs arborisés », ce sont les éclairs ascendants présentant des ramifications qui leur donnent les apparences d'arbres lumineux. Quant aux ramifications de la seconde forme d'éclair, elles confirment le travail cité du Dr G. C. Simpson.

**Éclairs en chapelet.** — Gaston Planté ayant introduit en météorologie le type des éclairs en chapelet, il n'est que juste de reproduire ici le récit qu'il fit du célèbre orage du 18 août 1876, lequel survint à la suite d'une longue période de fortes chaleurs et de sécheresse, et fut accompagnée d'une pluie torrentielle ; c'est cet orage qui lui fournit l'occasion de sa découverte :

« L'orage se déclare vers 6<sup>h</sup> du matin aux environs de Paris. Une

---

1. G. TISSANDIER, *L'Océan aérien*, p. 155, G. Masson, Paris.

« vaste nuée obscurcit le ciel et donna naissance à une série d'éclairs  
 « de grande longueur et de formes très variées : quelques-uns  
 « étaient bifurqués, d'autres présentaient des courbes à points  
 « multiples ou des contours fermés. L'un d'eux, replié sur lui-même,  
 « présenta une forme exactement semblable à celle de la courbe  
 « connue sous le nom de *folium* de Descartes.

Ces éclairs paraissaient, en général, composés de *points brillants*,

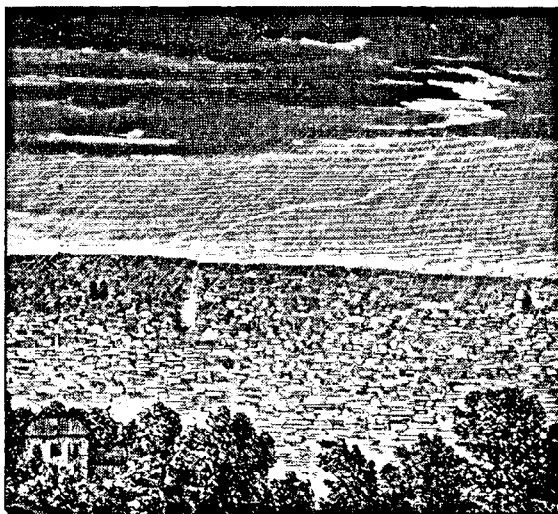


Fig. 3. — L'éclair de Planté.

« semblables aux sillons de feu produits sur une surface humide par  
 « un courant électrique de haute tension.

« Vers 7<sup>h</sup> du matin, au moment où l'orage commençait  
 « à s'étendre sur Paris, un éclair remarquable entre tous s'élança  
 « de la nue vers le sol en décrivant une courbe semblable à un S  
 « allongé, et resta visible pendant un instant appréciable, en formant  
 « *un chapelet de grains brillants*, disséminés le long d'un filet lumi-  
 « neux très étroit (fig. 3).

« Cet éclair nous sembla frapper Paris dans la direction de  
 « Vaugirard... La foudre tomba encore, pendant cet orage, sous la  
 « forme globulaire, sur une maison portant le numéro 35 de la rue de  
 « Lyon. Ce fait fut mentionné par tous les journaux et nous nous

« assurâmes, par une enquête, qu'il était exact. Entre autres  
 « témoins, un élève de la pharmacie placée au rez-de-chaussée de  
 « cette maison nous déclara avoir vu tomber, à quelques mètres de  
 « distance, et au même moment, deux *globes de feu* d'un éclat tel  
 « qu'il en fut ébloui, et qui disparurent en atteignant le sol.

« Bien que nous n'ayons pas vu, de Meudon, l'éclair qui a frappé  
 « ce point de Paris, à cause du rideau de pluie qui nous le cachait,  
 « l'observation de l'éclair *en chapelet* qui était tombé à Vaugirard  
 « permet de penser que celui de la rue de Lyon devait être de la  
 « même nature. Du reste, ceux qui se produisaient au sein des nues  
 « présentaient, ainsi que nous l'avons mentionné, l'apparence de  
 « séries de points brillants plutôt que celle de traits lumineux uni-  
 « formes ». (1)

Après cette observation de Gaston Planté, les éclairs en chapelet sont entrés aussitôt dans la littérature scientifique. L'éclair apparaît comme un chapelet de grains brillants, parfois de traits, disséminés le long d'un filet lumineux très étroit. Ces éclairs sont assez rares. Avant Planté, du Moncel avait noté que, pendant un orage à Londres dans la nuit du 19 au 20 juin 1857, on remarqua plusieurs éclairs « qui persistaient pendant plusieurs instants et ne disparaissaient qu'après s'être comme fondus en *lumière granulaire*. » (2)

Le physicien Muncke a également décrit un éclair linéaire qui,

1. GASTON PLANTÉ, *loc. cit.*, p. 61 à 65. Nous sommes obligé de faire une réserve sur l'identité absolue des points (ou des globes) lumineux des éclairs en chapelet avec les éclairs sphériques, identité que Gaston Planté paraît considérer comme évidente, un éclair sphérique étant un éclair en chapelet réduit à un *grain*. Cette conception, un peu trop mathématique, aurait besoin d'être appuyée sur des observations précises. En voici au moins une, faite par M. R. Coulon pendant un très fort orage qui éclata à Rouen le 28 juin 1879 : « ... Un autre éclair se manifesta sous une forme remarquable. D'un nuage situé au-dessus de la vallée de Darnétal, sortit un trait de feu horizontal, aussi droit qu'une aiguille, *très renflé au centre*, et finissant en lueur ; sa durée fut instantanée et suivie d'un violent coup de tonnerre ». (*L'Electricité*, 5 décembre 1879.)

Les éclairs en chapelet sont fugaces et d'une durée de l'ordre de la seconde et n'ont jamais été vus de près, du moins à ma connaissance, alors que les éclairs sphériques sont beaucoup mieux connus à cause de leur durée beaucoup plus grande.

2. DU MONCEL. *Notice sur le tonnerre et les éclairs*, p. 54.

jaillissant verticalement de haut en bas, se résolut en petites sphères distinctes. (1)

D'après le prof. Galli (2), la première notice d'observation sur les éclairs en chapelet fut donnée par le P. Regnault, lequel écrivait :

« Ces éclairs répétés sont toutes les fois comme autant de traits de feu interrompus. » Et j'explique le phénomène par la pression trop violente que le *feu de la foudre* produit dans l'air : c'est pourquoi alors l'élasticité de l'air réagit par des détentes continuelles, et en interrompt momentanément la course (*Trattenimenti fisici* d'Aristo et d'Eudosso, ou *Fisica nuova* en dialogues, orné de nombreuses figures par le Père Regnault, de la Compagnie de Jésus, t. IV, à Venise, 1736, p. 163).

Arago et Sestier ne font pas mention des éclairs en chapelet parce qu'ils ignoraient cette forme curieuse. Voici d'autres observations :

1. « Pendant un violent orage qui se déclara dans la soirée du « 20 juillet 1850, aux ponts de Braye, commune de Sougé, à la limite « des départements de la Sarthe et du Loir-et-Cher, la foudre « me parut tomber sur des peupliers d'Italie, situés au bord « de la Braye, à 200 ou 250 mètres du lieu où je me trouvais ; la « foudre traça un sillon vertical, mais un peu sinueux, formé de « boules presque tangentes, absolument comme un chapelet, et d'un « éclat excessif. Cette apparition a été instantanée ; mais, d'après « l'impression qu'elle m'a laissée, j'ai évalué le diamètre des boules « à la dixième partie du diamètre du soleil ; un angle de 3' à 200 ou « 250 mètres donnerait à ces sphères un diamètre de 0<sup>m</sup>,20 ; c'est « le diamètre qu'on a attribué à ces globes de feu qu'on a vus plu- « sieurs fois traverser lentement des intérieurs d'appartement, sans « atteindre les personnes présentes. » (3)

2. « Dans la soirée du 16 août 1877, un violent orage eut lieu « à Southport.. Parmi les plus brillants éclairs que j'observai, l'un

1. MUNCKE, *Meteor. Zeitschr.*, p. 227, 1893.

2. IGNAZIO GALLI, *Osservazioni inedite e rare di lampi e fulminazioni*, § 14, p. 34 (en note) (Estratto dalle *Memorie della Pontificia Accademia Romana dei Nuovi Lincei*, Série II, t. III, 1918).

3. E. RENOU, *C.R.*, t. 83, p. 1002, 20 novembre 1876.



« d'eux présenta une apparence dont je n'avais jamais été témoin  
 « auparavant. Depuis son point de départ des nuages jusqu'à sa  
 « chute dans la mer, il semblait formé de petits fragments détachés  
 « qui lui donnaient l'aspect de la figure ci-après (fig. 4). » (1)

3. « Je puis confirmer ce fait que les éclairs peuvent présenter  
 « quelquefois la forme *ponctuée*... Il y a environ quarante ans,  
 « pendant un orage accompagné d'une pluie abondante, dont je  
 « fus témoin à Ampton (Suffolk), les éclairs  
 « se succédaient d'une manière incessante,  
 « pendant plus d'une demi-heure, et le quart  
 « environ (autant que je puis m'en souvenir)  
 « *présenta cette apparence exceptionnelle*. De-  
 « puis cette époque, j'ai souvent cherché à  
 « la retrouver, mais je ne l'observai de nou-  
 « veau qu'une seule fois, et encore n'y eut-il  
 « qu'un éclair de cette espèce parmi un  
 « grand nombre. Dans l'une et l'autre occa-  
 « sion, ces éclairs *ponctués* étaient d'un éclat  
 « éblouissant et présentaient la forme de  
 « courbes sinueuses sans angles vifs ; l'une  
 « entre autres présenta celle d'un 8 presque  
 « parfait. » (2)

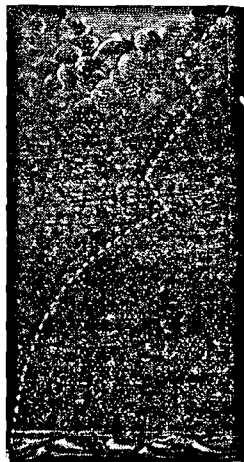


Fig. 4. — L'éclair de Southport.

4. Riches de renseignements sont les observations suivantes faites à Udine, le soir du 3 septembre 1873, par l'ingénieur Carlo Bassani et tirées d'une lettre du 28 mai 1908 adressée au prof. Galli. La tempête s'approchait d'Udine par le SSW vers les 7<sup>h</sup> de l'après-midi avec des éclairs continuels et très vifs, mais sans vrai tonnerre : on entendait seulement quelques faibles grondements. L'ingénieur Bassani se mit en observation sous une galerie couverte. Parmi les éclairs, il en vit un vraiment scintillant parce que formé de nombreuses petites lumières jaunes pâle,

1. B. JOULE, *Sur un éclair remarquable* (*Nature*, Londres, t. 18, p. 260, 4 juillet 1878).

2. E. J. LAWRENCE, *Nature*, Londres, t. 18, p. 278, 11 juillet 1878 ; cité par G. PLANTÉ, *loc. cit.*, p. 73, de même que l'exemple précédent.

très vives, comme des étoiles de première grandeur, bien distinctes et équidistantes, impression qui dura plus d'une seconde. Un phénomène aussi beau, et pour lui tout nouveau, accrut sa curiosité, et il continua à observer, enregistrant les faits principaux qui suivent : 1° éclair : fond vert, ligne blanche éblouissante, avec scintillements jaune clair, très détachés, équidistants, sans tonnerre ; 2° éclair : fond rouge, ligne verdâtre, scintillements jaunes confondus avec la ligne, c'est-à-dire pas bien distincts, avec fort tonnerre ; 3° éclair : fond verdâtre, ligne rouge, scintillement blanc, confus, avec tonnerre très léger ; 4° éclair : fond verdâtre, ligne blanche, sans scintillation, sans tonnerre ; 5° fond jaune clair, ligne rouge, scintillement rouge, distinct, avec léger tonnerre ; 6° éclair : fond verdâtre, ligne blanche sans scintillement, obscurcie, sans tonnerre ; 7° éclair : fond rouge, ligne jaune, rougeâtre, scintillement rouge, distinct, sans tonnerre ; 8° éclair : le dernier observé et le plus beau, avec une pluie bruyante et un tonnerre très fort : fond jaune rougeâtre, ligne rouge, scintillement rouge, bien distinct, séparé en apparence par 15 ou 20 centimètres (en réalité par environ un mètre, en tenant compte de la distance), quelques-uns éblouissants. « J'ai même noté que toute cette ligne n'était pas en zigzag, mais seulement ondulée, c'est-à-dire complètement sinueuse. » (1)

Sur quinze cas d'éclairs en chapelet catalogués par le prof. Galli, onze arrivèrent en été (du 19 juin au 3 septembre), avec la pluie presque toujours abondante, et dans ces quinze cas les éclairs en chapelet furent toujours descendants.

M. Luizet, astronome à l'observatoire de Lyon, fit, le 15 août 1907, au mont Sappey (altitude 1000<sup>m</sup>) près Grenoble, l'observation suivante : « Vers 20 heures, alors qu'un violent orage, qui sévissait « depuis une heure, commençait à s'éloigner dans la direction « E-N-E, j'ai vu un éclair vertical, peu sinueux, mais très brillant, « suivi à environ une seconde d'intervalle d'un deuxième éclair en « *chapelet*, exactement à la même place que lui et présentant les

---

1. IGNAZIO GALLI, *I principali caratteri dei fulmini globulari*, § 24, p. 46 (Estratto dalle *Memorie della Pontificia Romana Accademia dei Nuovi Lincei*, t. 28, 1910).

« mêmes sinuosités. D'autres personnes ont vu comme moi ces deux « éclairs successifs : le premier brillant et continu, le second bien « moins intense, rouge et formé d'une série de *traits* lumineux.

« Sept secondes après le premier éclair, un seul bruit sec de « tonnerre s'est fait entendre : l'éclair s'est donc produit à un peu « plus de 2 kilomètres du point où je me trouvais, et, par compa- « raison avec les objets tels que maisons, arbres, etc... vus à cette « distance, j'estime à 30 mètres au moins la longueur des *traits* « lumineux composant le second éclair et à 20 mètres celle des inter- « valles les séparant. Sur la longueur totale de « l'éclair, il ne devait pas y en avoir beaucoup plus « d'une vingtaine.

« Les observations d'éclair en chapelet sont peu « nombreuses et les recherches bibliographiques que « j'ai faites, pour trouver la description de quelque « éclair analogue à celui que j'ai vu, ont été vaines. »<sup>(1)</sup>

Dans la nuit du 7 au 8 juillet 1927, un orage très violent a sévi près de Leyde. Le prof. W.-J. de Haas observa, entre 1<sup>h</sup> et 2<sup>h</sup> du matin, au moment du maximum, un magnifique éclair à perles (*perlblitz*) qui descendait dans le sens vertical comme le montre la figure 5. Trois secondes se sont écoulées entre l'éclair et le bruit du tonnerre, qui a affecté

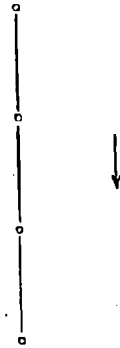


Fig. 5.  
L'éclair  
de Leyde.

la forme d'une série de *détonations* bien nettes, *séparées*, se succédant rapidement. Le prof. de Haas estime le diamètre des perles à 1/10 ou 1/12 du diamètre du soleil; mais la distance des perles était beaucoup plus grande : de l'ordre de 1,5 à 2 fois le diamètre du soleil. La couleur des perles était *rosée*; le filet était un peu plus blanc.

L'orage était ici environ à un kilomètre de l'observateur; le diamètre  $D$  des perles, compris entre 90 et 75 centimètres, peut être fixé en moyenne à 80 centimètres, et la longueur  $L$  des intervalles, comprise entre 13<sup>m</sup>,50 et 18 mètres, évaluée en nombres ronds à 15 mètres.

Si l'on envisage l'éclair fulgurant générateur de l'éclair en cha-

1. LUIZET, C.R., t. 145, p. 780, 1907.

pelet comme un cylindre de révolution de rayon  $r$ , en exprimant que la matière fulminante, de volume initial  $\pi r^2 (D + L)$ , s'est condensée sans perte dans une sphère de volume  $4/3 \pi R^3$ , on obtient la relation :

$$\frac{r}{R} = \sqrt{\frac{2D}{3(D+L)}}$$

Si l'on pose

$$L = nD,$$

il vient

$$\frac{r}{R} = \sqrt{\frac{2}{3(n+1)}}$$

Or  $R$  a une valeur par défaut puisque la matière fulminante s'est, à la fois, évaporée et refroidie pendant son changement de forme sous l'influence de la tension superficielle ; on tirerait donc de ce qui précède une évaluation par défaut de  $r$  si une autre cause d'erreur n'agissait vivement en sens contraire. La vision de petites surfaces incandescentes entourées d'un espace obscur produit un effet d'*irradiation*, en vertu duquel on voit toujours par excès le diamètre apparent éclairé. L'évaluation de ce diamètre apparent est d'autant plus exagérée que le phénomène est plus brillant et le diamètre éclairé plus petit.

Malgré ces deux erreurs, et peut-être à cause d'elles, on peut avoir une idée de la grosseur du sillon lumineux tracé dans l'air par la décharge électrique. Dans l'exemple de Leyde,  $n = 19$  environ ; on en déduit :

$$r = \frac{R}{5,5} = \frac{40}{5,5} = 7 \text{ centimètres environ.}$$

L'existence objective des éclairs en chapelet, que les météorologistes de langue allemande appellent encore *éclairs en collier de perles* (Perlschnur Blitz), a été prouvée par une photographie prise par un habile opérateur de Philadelphie. M. W. N. Jennings. Cette photographie, reproduite par *La Nature* (1894, p. 324), fut prise le 10 juin 1890 à 2 heures du matin. Contrairement à la statistique et à la conclusion du prof. Galli, il s'agit cette fois d'un *éclair en chapelet ascendant*, qui commença à terre et y retourna après s'être

replié deux fois sur lui-même en forme de huit ou de nœud (fig. 6).

Peu après, un amateur, M. van der Valk, obtint, l'une le 9 décembre 1895, l'autre le 15 juillet 1896, de nouvelles photographies d'éclair en chapelet ; depuis, elles se sont multipliées. La vue des photographies donne l'impression que les points lumineux séparés sont disposés dans l'espace à des distances égales sur la trajectoire

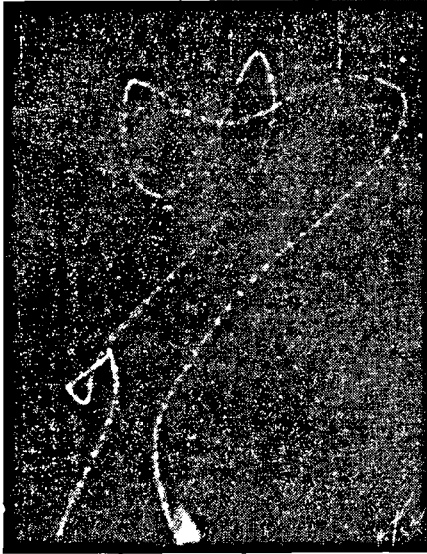


Fig. 6. — L'éclair de Philadelphie.  
(photographie directe.)

courbe de l'éclair et paraissent, uniquement à cause de la perspective, plus serrés en certains endroits.

Pour terminer cette monographie des *éclairs en chapelet* et montrer qu'au point de vue du sens, de la forme, de la couleur, de la présence ou de l'absence de tonnerre ils ne diffèrent pas essentiellement des autres éclairs fulgurants, j'ajouterai cette dernière référence : le 16 août 1887, à Londres, un *éclair bifurqué* se divisa instantanément en milliers de globes lumineux, comme certaines fusées de feux d'artifice (*The Electrician*, 1887, p. 306, cité par Galli).

Quoique la forme de beaucoup d'éclairs en chapelet soit simple,

un certain nombre présentent des trajectoires très compliquées avec, en certains points, un enchevêtrement qu'on ne retrouve pas, au même degré, chez l'éclair fulgurant ordinaire.

Habituellement, les grains (ou perles) sont très serrés, presque tangents ; l'exemple de Leyde prouve qu'ils peuvent aussi s'écarter beaucoup. D'ordinaire, le bruit de l'éclatement des grains, tangents ou presque tangents, est un bruit *continu*, tandis qu'à Leyde le prof. W. de Haas a entendu nettement et d'une façon séparée le bruit de l'explosion des différents grains, les plus anciens explosant nécessairement les premiers.

La théorie exposée ici montre que l'éclair en chapelet est une

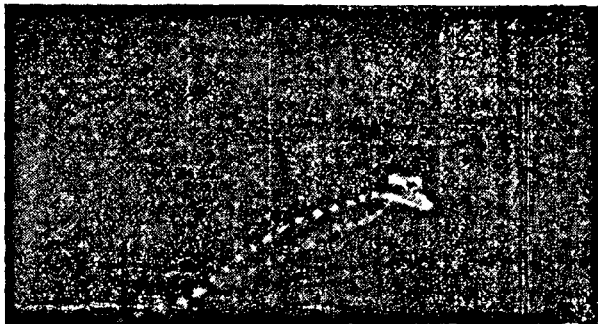


Fig. 7. — Éclair en chapelet de Southport.

forme terminale de l'éclair fulgurant linéaire lorsque la quantité de matière fulminante formée permet un refroidissement qui n'est plus instantané, la durée de l'éclair devenant de l'ordre de grandeur de la seconde tout en demeurant habituellement plus petite. Comme on l'a vu, ce temps suffit à la tension superficielle pour isoler des sphères de matière fulminante, tantôt de 20 centimètres, tantôt de 80 centimètres de diamètre.

C'est ici qu'intervient, si nous ne nous trompons pas, une différence essentielle entre l'éclair en chapelet et l'éclair sphérique. Alors que des éclairs sphériques de petit rayon durent plusieurs secondes, les grains les plus gros des éclairs en chapelet ont la durée éphémère de ceux-ci et ne durent pas une seconde.

Il semble donc y avoir une différence *spécifique* entre l'éclair

en chapelet et l'éclair sphérique et n'être pas exact de dire que l'éclair sphérique est un éclair en chapelet réduit à un grain. Si cela est vrai, lorsqu'un éclair en chapelet vu de loin semble toucher terre dans un endroit habité comme Paris, il est illusoire d'ouvrir une enquête pour savoir où sont tombés les grains du chapelet, alors qu'une pareille enquête a un sens lorsqu'il s'agit d'un éclair sphérique, qui dure 5, 10, 15, 30, 100 secondes et plus.

La raison profonde de la différence *spécifique* en question pro-

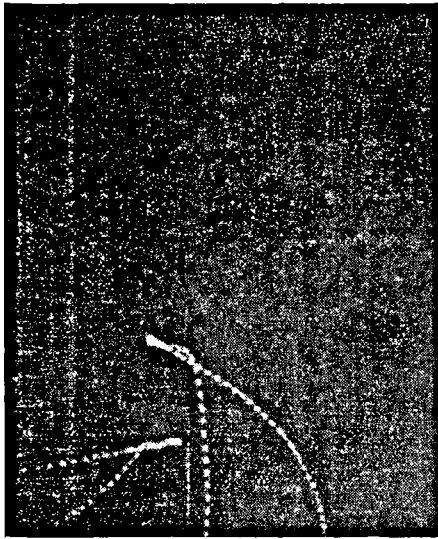


Fig. 8. — Photographie de deux éclairs en chapelet de M. van der Valk.

viendrait, selon nous, de ce que l'énorme quantité de matière fulminante des éclairs linéaires descendants générateurs d'éclairs sphériques détermine, dès l'origine, un refroidissement assez lent pour que la matière fulminante, *passant de l'extérieur dans l'intérieur* par l'effet de la diminution de la surface extérieure, ait le temps de se stratifier en couches isothermes dont la température décroît d'une façon continue depuis les couches profondes jusqu'à la périphérie.

Dans l'éclair en chapelet, au contraire, les magmas de matière

fulminante, rassemblés sous la forme de sphères volumineuses en quelques dixièmes de seconde, doivent présenter de nombreuses *hétérogénéités thermiques* sous forme d'inclusions de matières relativement très froides, voisines de leur température de décomposition, à l'intérieur de matières très chaudes qui, entourant les premières et les comprimant, obligent la décomposition à se faire par explosion.