

# LA Foudre EN BOULE

DOCUMENT DE SYNTHÈSE RÉALISÉ EN  
1978

## LA Foudre EN BOULE

De nombreux physiciens se sont intéressés à la foudre en boule et des publications paraissent régulièrement pour commenter le phénomène, mais il n'en demeure pas moins que celui-ci n'est pas bien compris, et que le processus de formation de la foudre en boule demeure obscur.

Les rapports concernant la foudre en boule ont historiquement été accueillis avec scepticisme et les études à son sujet ont rarement été considérées avec sérieux.

Actuellement on estime que la foudre en boule est la manifestation d'un phénomène atmosphérique réel qui, si l'on en croit les rapports, peut mettre en jeu des énergies considérables.

(L'équivalent de quelques kilogrammes de TNT).

Aussi certains savants estiment-ils que la maîtrise de la foudre en boule et de la libération de son énergie au voisinage d'un missile devrait permettre sa destruction. La compréhension du phénomène présente donc un intérêt militaire.

Actuellement la foudre en boule apparaît comme l'une des conséquences les plus aléatoires des déplacements de charges électriques entre les systèmes aériens et le sol. Des recherches sont entreprises en vue d'expliquer et reproduire au laboratoire les processus de formation.

.../...:

- S O M M A I R E -

---

	<u>Pages</u>
1. <u>INTRODUCTION</u> .....	4
2. <u>DESCRIPTION DU PHENOMENE</u> .....	5
2.1. Existence .....	5
2.2. Aspect et fréquence d'apparition .....	6
2.2.1. Apparition .....	8
2.2.2. Apparence .....	8
2.2.3. Durée de vie .....	8
2.2.4. Mouvement .....	8
2.2.5. Chaleur. son. odeur .....	9
2.2.6. Attraction des objets et ouvertures .....	9
2.2.7. Disparition .....	9
2.2.8. Différents types de foudre en boule .....	10
2.2.9. Fréquence des observations de la foudre en boule .....	11
2.3. Corrélation avec d'autres phénomènes atmosphériques .....	14
3. <u>MESURES EFFECTUEES ET RESULTATS EXPERIMENTAUX</u> .....	17
3.1. Mesures acoustiques .....	17
3.2. Mesures lumineuses .....	18
3.3. Etude des interactions électriques et magnétiques .....	20
3.4. Prélèvements chimiques et radioactivité .....	20
3.5. Chaleur dégagée .....	21
3.6. Tentatives de production expérimentales .....	21
3.6.1. Produits organiques carbonylés .....	22
3.6.2. Produits organiques plastiques .....	22
3.6.3. Les impulsions laser .....	23
3.6.4. Les décharges radiofréquences .....	24

.../...

	<u>Pages</u>
4. <u>THEORIES ET TENTATIVES D'EXPLICATIONS</u> .....	26
4.1. Modèles à source d'énergie interne .....	26
4.2. Modèles à source d'énergie externe .....	27
4.3. Théories possédant la meilleure crédibilité...	28
4.3.1. Radiofréquences .....	28
4.3.2. Processus chimiques .....	28
4.3.3. Energie en provenance du nuage .....	29
5. <u>EFFETS DESTRUCTIFS</u> .....	30
6. <u>CONCLUSION</u> .....	32
<u>BIBLIOGRAPHIE</u> .....	33

## 1. INTRODUCTION

---

La foudre en boule est un phénomène électrique atmosphérique, généralement observé durant les périodes orageuses. Il se présente sous la forme d'un volume globulaire mobile et extrêmement lumineux dont le comportement ne semble pas déterminé par le milieu extérieur. Il possède des caractéristiques (mouvement, lumière, apparence, disparition) qui en font un phénomène électrique à part.

La foudre en boule est généralement observée comme un objet de forme sphérique, de diamètre inférieur à 40 cm. La surface en est faiblement éclairée et présente des lacunes d'où semblent s'échapper des flammes. Le mouvement est lentement descendant à partir d'un nuage orageux, ou bien aléatoire à quelques mètres au-dessus du sol. La boule n'est pas affectée par la présence de conducteurs ; elle semble toutefois posséder une affinité occasionnelle pour les **clôtures**, et son mouvement peut aussi être dévié pour pénétrer dans une pièce dont la fenêtre est entrebaillée.

La boule lumineuse est quelquefois accompagnée d'une forte odeur, semblable à celle accompagnant **les décharges** électriques. Elle a une durée de vie de quelques secondes et disparaît silencieusement, ou plus souvent par explosion.

On considère que la boule est dangereuse pour la vie humaine, depuis que le phénomène est assimilé à une forme de foudre, ce qui n'est pas confirmé (décès du professeur **G.W. RICHMANN** en 1753 à St-Petersbourg), et, plus récemment, décès simultanés du docteur **BABAT** (spécialiste de la foudre en boule) et du maréchal **NEDELIN** (spécialiste des fusées) au cours d'une expérience en 1960). L'apparence de la boule "de feu" pendant l'observation suggère la prudence. Selon certaines théories, la densité d'énergie pourrait être de l'ordre de  $10^4 \text{ J/cm}^3$ . Des **dommages** observés sur des structures d'avions ont été attribués à un écrasement dû à la foudre en boule. .../...

## 2. DESCRIPTION DU PHENOMENE

### 2.1, EXISTENCE

La foudre en boule a fait l'objet de très nombreuses publications, tant sur le plan des observations isolées qu'au niveau des tentatives d'explications théoriques. Certains auteurs estiment qu'il s'agit d'une illusion **d'optique**, tandis que certains scientifiques proposent des explications peu vraisemblables.

Il semble bien que le nombre de témoignages recueillis établisse l'existence d'un phénomène particulier. Toutefois, la diversité des descriptions, est telle qu'il est difficile d'envisager une explication unique pour **l'ensemble** des observations.

Cette diversité a conduit les chercheurs à assimiler au phénomène de foudre en boule, tout événement défini **comme** tel par un observateur non averti. Une enquête menée auprès de 400 personnes, conclut que, **lorsqu'un** témoin observe un coup de foudre au sol proche, **il** mentionne le phénomène dans près de 45 % des cas. La foudre en boule ne serait donc pas rare. Cette estimation n'est pas invraisemblable puisque, sur l'ensemble de la **population**, 4 % des individus **déclarent** l'avoir observée une fois au moins.

Certains chercheurs considèrent que cette fréquence élevée pourrait s'expliquer par un effet d'illusion optique, en particulier, la persistance rétinienne après un éblouissement ; cette explication paraît d'ailleurs assez vraisemblable en ce qui concerne les descriptions d'une partie des témoins de "foudre en boule".

.../...

Après un siècle d'hésitations, il apparaît dans la dernière décennie que la majorité des météorologistes et des physiciens considère désormais que l'existence de la foudre en boule est bien établie.

Cependant, la dernière édition de l'encyclopoedia britannica affirme qu'il n'existe pas de photographie authentique de la foudre en boule ; cette affirmation ne concerne que l'absence de photographie et il serait abusif d'en tirer argument pour nier la validité du phénomène.

En conclusion il semble que la foudre en boule soit un phénomène relativement fréquent.

Néanmoins, les chercheurs ne sont pas actuellement en mesure de l'observer à volonté car ils ne peuvent prévoir où ni quand il se manifestera.

## 2.2. ASPECT ET FREQUENCE D'APPARITION

Certains auteurs mettent en avant la notion de "foudre en boule typique", qui serait une sphère lumineuse mobile, apparaissant au cours d'un orage, dont le diamètre serait d'environ 20 cm et qui aurait une durée de vie de quelques secondes. Mais l'énorme dispersion des indications fournies par les témoins est telle que cette notion de "foudre en boule typique" doit être accueillie avec réserve.

C'est ainsi que pour le diamètre, les valeurs annoncées vont de 1 cm à 100 mètres et que les durées de vie s'échelonnent d'une fraction de seconde jusqu'à une heure sans qu'il apparaisse une corrélation entre ces deux paramètres.

.../...

Certaines observations ont été faites en l'absence d'orage ; l'objet est quelquefois immobile. Ni la couleur, ni le bruit, ni l'odeur ne présentent de propriétés spécifiques.

Les chercheurs ont pris le parti de prendre en compte toute observation, attitude qui laisse la liberté d'opérer un tri et de classer éventuellement en plusieurs catégories des phénomènes d'intérêt inégal et justiciables d'explications différentes.

Un phénomène très similaire, sinon identique à la foudre en boule, a été rapporté à bord d'un sous-marin au cours d'une décharge à très fort courant (environ 150 000 A) produit par une source de 260 volts. De nombreux rapports concernent des événements proches de la production de foudre en boule initiés accidentellement dans les équipements électriques à haute tension.

La foudre en boule et les feux de **St-Elme** sont quelquefois confondus. Le feu de St-Elme est une décharge coronaire autour d'un objet pointu conducteur placé dans un champ électrique intense. Comme la foudre en boule le feu St-Elme peut posséder une forme sphérique, mais à son contraire il doit rester accolé à un conducteur, même s'il se déplace le long du conducteur. Le feu de St-Elme a d'autre part une durée de vie plus grande que la foudre en boule habituelle.

D'après les nombreuses observations publiées sur la foudre en boule, il est possible de dresser une liste des caractéristiques de ce phénomène.

.../...



### 2.2.1. Apparition

La plupart des observations interviennent lors d'une **activité** orageuse, Les plus nombreuses, **mais** pas toutes, se produisent en **même** temps qu'une décharge entre sol et nuage. Ces boules apparaissent alors **à** quelques mètres du sol et quelquefois, **près** du sol, en l'absence d'un éclair. Les boules ont aussi été observées flottant **à** mi-hauteur **ou** bien descendant d'un nuage vers le sol.

### 2.2.2. Apparence

La boule est généralement sphérique bien que d'autres formes aient été rapportées. Elle a un diamètre moyen de 10 **à** 20 **cm** avec des variations de 1 à 100 **cm**. Elle se présente sous des couleurs variées, rouge, orange, et jaune, plus rarement bleu, ou violette. La foudre en boule ne possède pas **une** brillance exceptionnelle, mais elle se distingue clairement de jour. La luminosité et la taille sont pratiquement constantes au cours de la vie de la boule mais des fluctuations des deux paramètres sont possibles.

### 2.2.3. Durée de vie

La majorité des boules a une durée de vie inférieure à 5 secondes. Une petite fraction a une durée de vie supérieure à la minute.

### 2.2.4. Mouvement

La foudre en boule se déplace le plus souvent horizontalement à une vitesse de quelques mètres **pas** seconde ; elle peut aussi rester immobile à faible hauteur au-dessus du sol ou descendre vers le sol. Elle ne monte que **très** rarement **comme** cela devrait **être** le cas s'il **s'agissait** d'air chaud à pression atmosphérique ou présence des seules forces gravitationnelles.

.../...

De nombreux rapports indiquent que la boule semble tourner quand elle se déplace. Quelquefois, elle rebondit sur les objets solides, tels que le sol.

#### 2.2.5. Chaleur, son et odeur

Les observateurs ont rarement ressenti la chaleur. Toutefois **il** existe des témoignages selon lesquels la boule a **brûlé** des étables ou fait fondre des fils métalliques. Un rapport (1966) décrit **une** foudre en boule heurtant la surface d'une mare avec un bruit comparable à celui d'un fer rouge plongé dans l'eau. De nombreux observateurs rapportent l'observation d'une odeur accompagnant le phénomène. L'odeur est décrite **comme** forte et désagréable, ressemblant à l'odeur d'ozone, du soufre en combustion, ou d'oxydes d'azote.

#### 2.2.6. Attractions exercées par des objets et ouvertures

La foudre en boule **semble** souvent attachée à des objets métalliques tels que barrières ou lignes téléphoniques ; certaines de ces observations se réfèrent sans doute au feu **St-Elme**. La foudre en boule **pénètre** souvent dans les maisons par les cheminées ou en traversant les rideaux ; quelquefois, elle traverse les vitres ; d'autres rapports mentionnent son apparition à l'intérieur, par exemple à proximité d'un poste téléphonique.

#### 2.2.7. Disparition

La disparition de la foudre en boule s'effectue selon deux modes différents : silencieusement ou de façon explosive. La disparition explosive est rapide et accompagnée d'un bruit sourd. La disparition silencieuse peut être rapide ou lente. La plupart des foudres en boule disparaissent de

.../...

de façon rapide. Après l'extinction de la boule, il persiste une brume ou quelques résidus. De temps en temps, on a observé la fragmentation de la boule en 2 ou 3 boules plus petites.

## 2. Différents types de foudres en boule

Il semble raisonnable de considérer au moins trois types de foudres en boule :

- la foudre en boule dont le mouvement paraît aléatoire et qui se manifeste au voisinage du sol, dans une maison ou même dans un avion en vol ; c'est la foudre en boule généralement présentée comme typique.

A l'intérieur, l'explication de sa durée de vie constitue une énigme. Il est difficile d'envisager qu'un apport d'énergie puisse provenir de l'extérieur. Les circonstances d'apparition conduisent à penser que certaines vapeurs organiques ou même des poussières pourraient être des ingrédients nécessaires.

Les tentatives d'explication proposent le refroidissement d'un volume d'air chaud suivant les mécanismes usuels, soit un mélange produisant un dégagement d'énergie par réaction chimique lente, telle une simple combustion. Malheureusement ces explications ne rendent pas compte de la cohésion de la boule ni des effets électriques observés par certains témoins ;

- la foudre en boule qui descend vers le sol ne peut être constituée qu'à partir des éléments contenus dans l'atmosphère. Il semble que ce type particulier soit en rapport avec les précurseurs<sup>(1)</sup> qui ouvrent la voie aux décharges des éclairs ordinaires. Il serait alors naturel de considérer que l'énergie électrique peut continuer à s'écouler des nuages par un canal ionisé si peu lumineux qu'il serait invisible, ou encore, grâce à une conductibilité électrique diffuse. Compte-tenu de la modestie

.../...

---

(1) précurseurs, canaux initiateurs d'un éclair dans lesquels l'air commence à s'ioniser.

de nos connaissances sur les précurseurs il n'est pas interdit de supposer que certaine foudre en boule soit l'aboutissement d'un précurseur incapable de poursuivre sa course à la vitesse habituelle.

Ce point de vue est d'ailleurs étayé par des photographies récentes ;

- la foudre en boule qui reste au contact d'un objet métallique, diffère du feu de St-Elme par les points suivants :
  - aspect globulaire,
  - couleur souvent rouge au lieu de bleutée,
  - absence de prédilection pour l'effet de pointe.

A ces trois types de foudre en boule pourraient correspondre des explications théoriques différentes pour lesquelles les énergies mises en jeu prendraient des valeurs extrêmement variables (densités de 1 à  $10^5$  J/cm<sup>3</sup>).

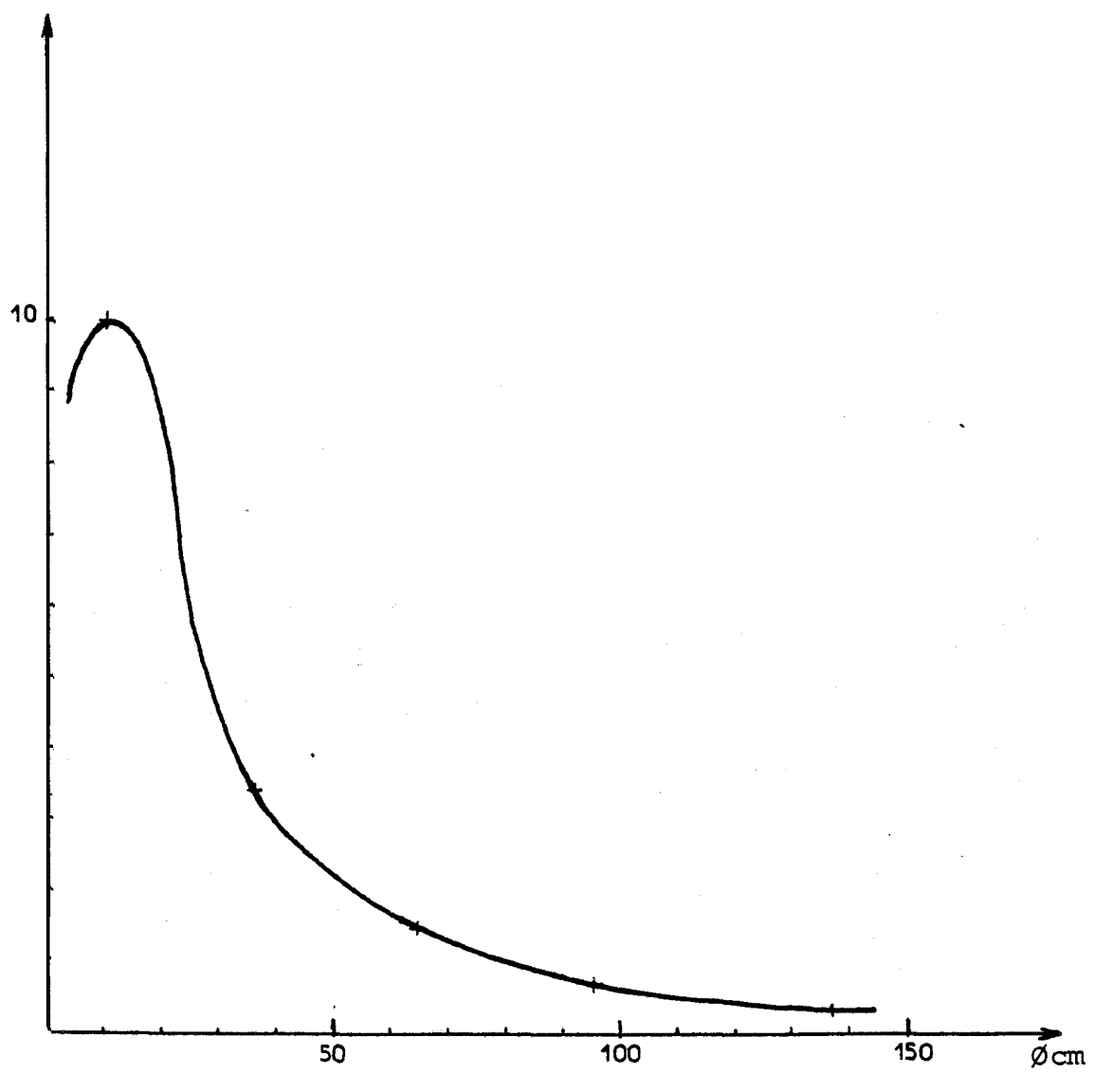
#### 2.2.9. Fréquence des observations de la foudre en boule

La foudre en boule n'est peut-être pas un phénomène aussi rare que ne le suggère la difficulté de produire un événement de ce type en laboratoire. De récents travaux à St-Privat d'Allier pour déclencher des éclairs au-dessus d'une station terrestre ont donné quelques résultats intéressants : une boule de feu, fixe et au voisinage du sol, a pu être produite à trois reprises (sur un total de 45 éclairs déclenchés de 1973 à 1975). Il est à noter toutefois que le processus de déclenchement ne semble pas favorable à la génération de foudre en boule.

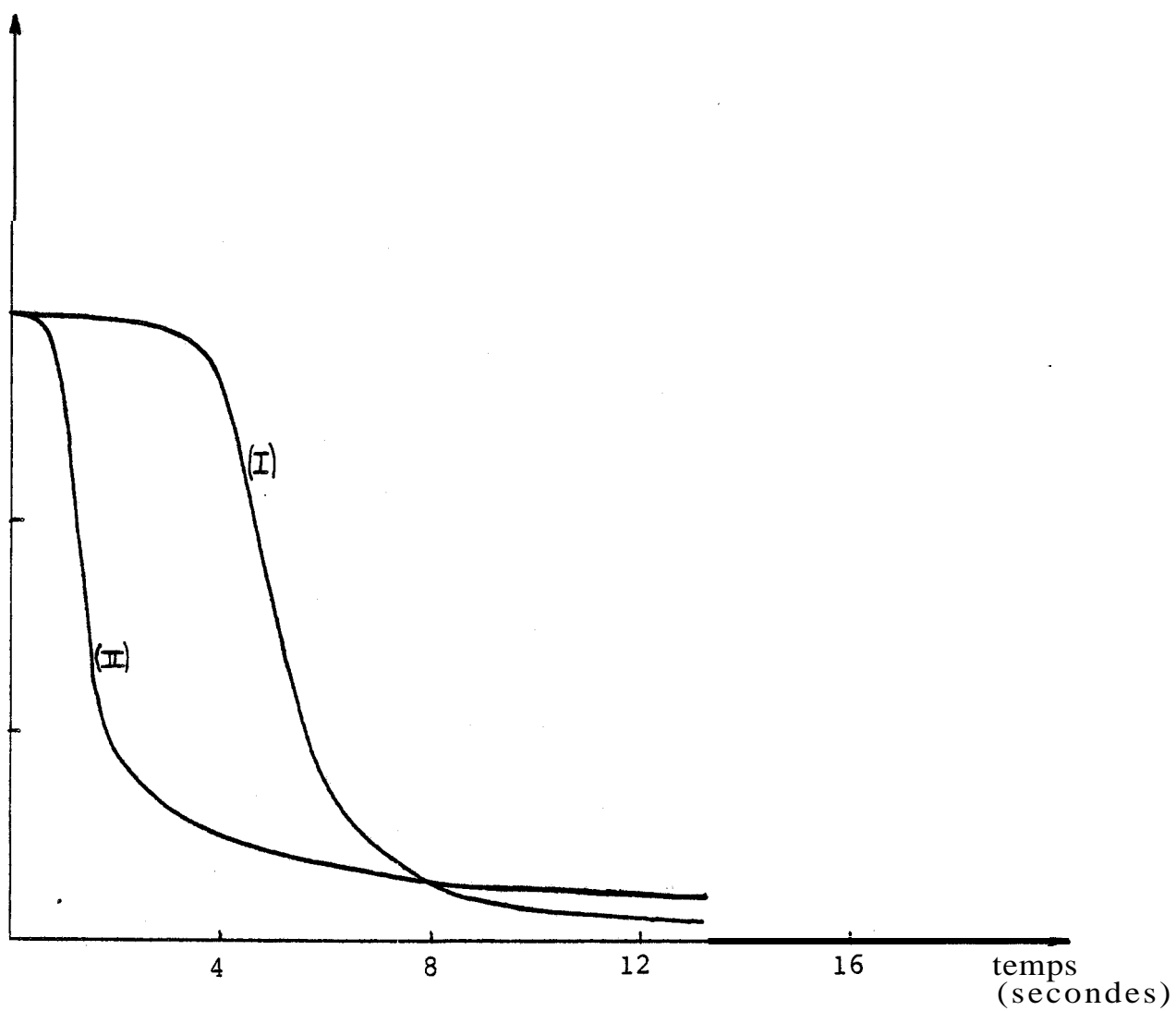
Les événements sont d'ailleurs trop peu nombreux pour permettre d'établir/pour une statistique un phénomène aussi varié. Les chercheurs américains Mac NALLY et RAYLE ont mené une enquête dans un centre de la NASA et ont obtenu suffisamment de réponses satisfaisantes. Environ 40 % des personnes se trouvant à proximité du point de chute d'un éclair ont observé la foudre

.../...

en boule. Les résultats de cette analyse sont rassemblés dans les courbes (figures 1 et 2) indiquant la fréquence en fonction du diamètre ou de la durée de vie estimée de la boule



**FIGURE 1** : Fréquence d'observation en fonction du diamètre



**FIGURE 2** : Fréquence d'observation en fonction de la durée de la boule

I - Mc NALLY

II - RAYLE

.../...

Sur 1764 personnes interrogées, la répartition en durée d'observation est la suivante :

Durée d'observation (s)	1	2	3	4 à 8	> 8
Impact d'un éclair	179		179	34	17
Foudre en boule	111	34	6	29	
Eclair en chapelet	39	30	10	33	

### 2.3. CORRELATION AVEC D'AUTRES PHENOMENES ATMOSPHERIQUES

L'étude statistique des phénomènes de foudre en boule nécessite de connaître le degré d'attention des observateurs. Ce degré d'attention est variable selon l'environnement économique et social de chaque époque (guerre, intérêt porté à la météorologie, attrait pour les OVNI). Le chercheur PANETH a étudié dans ce but un autre type d'événements, aléatoire, surprenant et lumineux : la chute des météorites. Le graphe 3 indique les résultats obtenus et montre avec quelle circonspection on doit aborder les résultats d'observations.

.../...

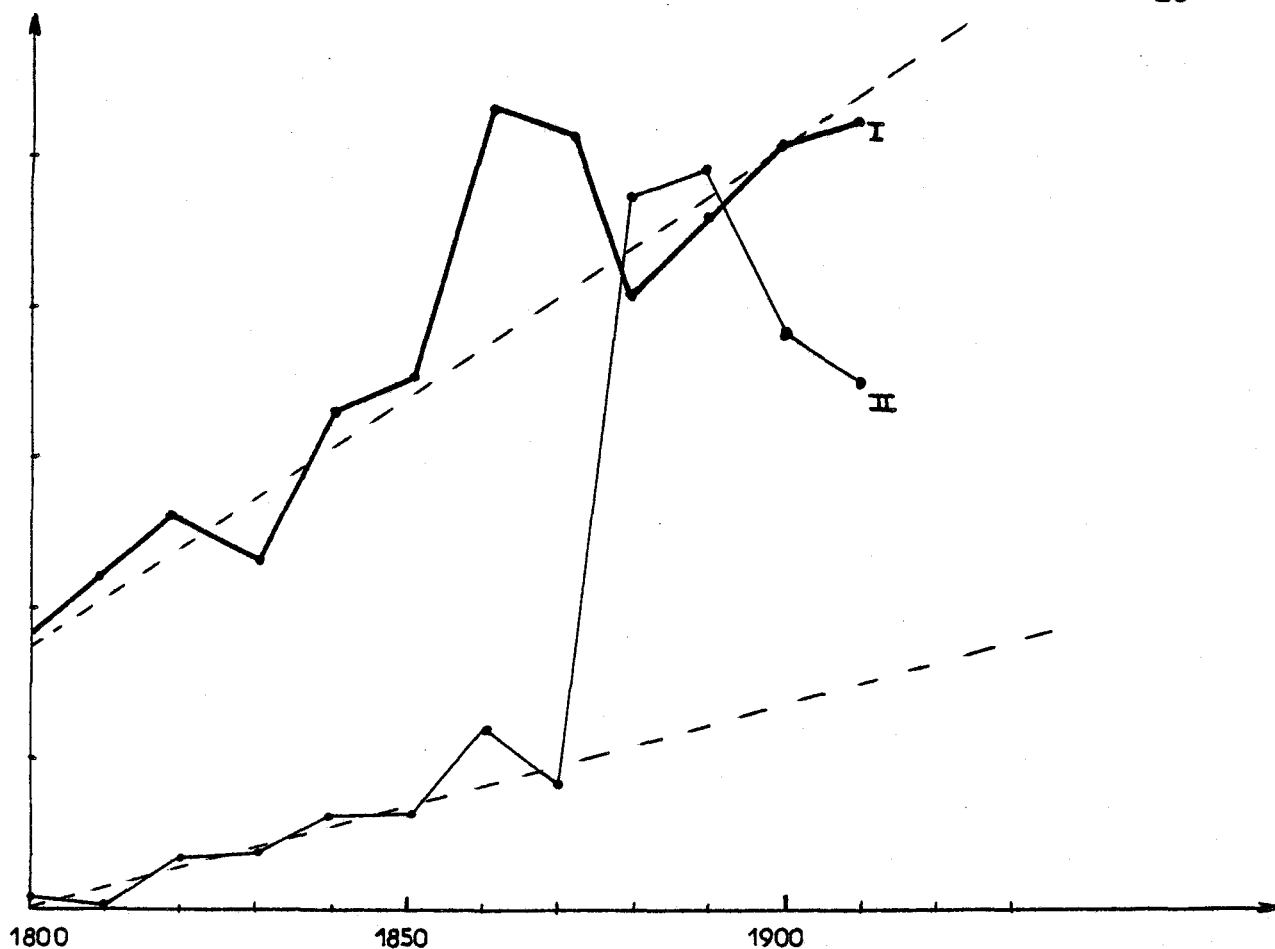


FIGURE 3 : Fréquence d'observation des météorites (I) et de la foudre en boule (II)

Les années 1800 montrent le gain de l'intérêt porté aux observations de la foudre en boule.

Les météorologistes s'intéressent depuis de nombreuses années à l'activité solaire (cycle de 11 ans) et à ces incidences possibles sur le temps.

Les chercheurs anglais ont établi une très nette corrélation entre activité solaire et indice annuel des éclairs en Grande-Bretagne. Il pourrait donc en être de même de la foudre en boule, mais la corrélation est là beaucoup plus difficile à mettre en évidence. C'est ce qu'a essayé de faire le chercheur soviétique ARABADYI sans grand succès (figure 4).

.../...



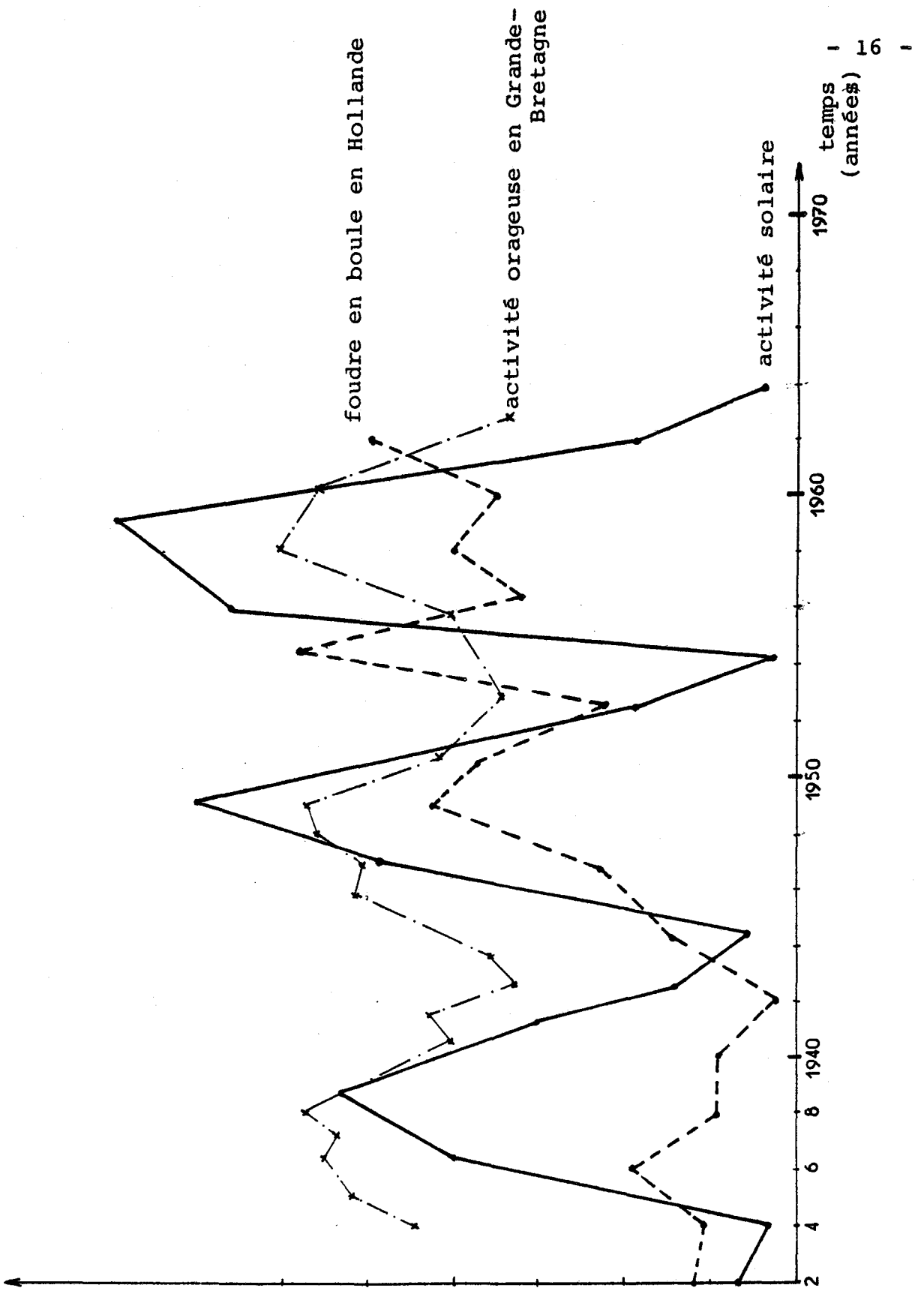


FIGURE 4

### 3. MESURES EFFECTUEES ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

---

Les mesures effectuées par les chercheurs sont orientées vers la connaissance des phénomènes' de décharge électrique dans l'atmosphère. Ces mesures ont pour but de déterminer le processus de **formation** de la foudre en boule. Les différents procédés utilisent principalement les mesures acoustiques, lumineuses, électriques, chimiques et radioactives.

#### 3.1. MESURES ACOUSTIQUES

Pour l'étude des éclairs les mesures acoustiques effectuées simultanément en plusieurs endroits permettent, d'après les temps de propagation et avec l'aide de photographies d'un événement, de restituer avec précision la géométrie de l'éclair au cours des différentes étapes de la décharge. Cette méthode présente toutefois quelques inconvénients :

- les fluctuations de **température** dans la zone d'étude **perturbent** la chronologie d'un enregistrement ;
- le signal acoustique doit être suffisant pour dominer le bruit de fond général ;
- les réflexions ne permettent pas l'étude de la décharge au voisinage du sol ;
- les très basses fréquences associées aux petites ramifications sont extrêmement atténuées dans l'air ;
- le signal, qui résulte des sons issus de toutes les Sources locales du champ d'étude ne permet d'étudier et de localiser que les sources de très haut niveau, les autres ne pouvant **être** discriminées en raison de leur complexité. La résolution dépend d'ailleurs du nombre de capteurs.

Les mesures acoustiques n'ont encore pu être **employées** à l'étude de la foudre en boule.

.../...

3.2. MESURES LUMINEUSES (Réf. 31)

Elles procèdent de deux techniques principales :

- cinématographie ultra-rapide,
- photographie et mesures d'intensité.

La cinématographie ultra-rapide permet l'étude du développement de précurseurs.

Quelques photographies de foudre en boule ont été réalisées. Les mesures de densité optique ont permis de déterminer la variation de la luminosité de la boule, la fonction du rayon et son évolution dans le temps.

L'énergie indiquée résulte d'une étude du chercheur russe DIMITRIEV (Figures n° 5 et n°6).

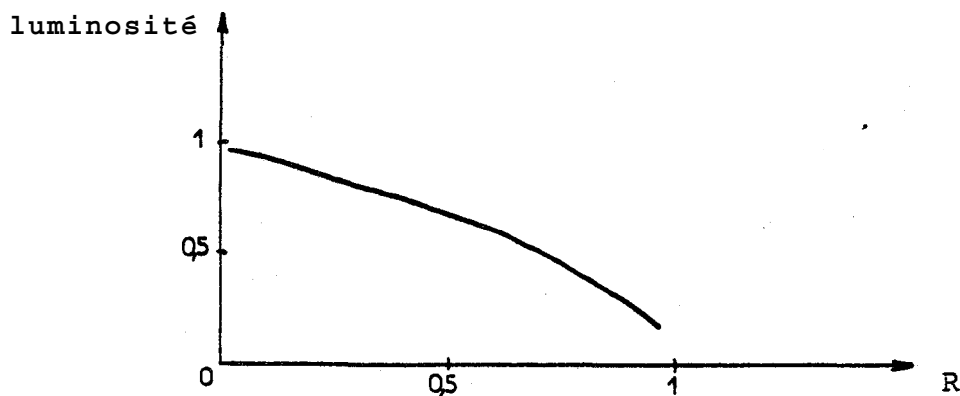


FIGURE 5

.../...

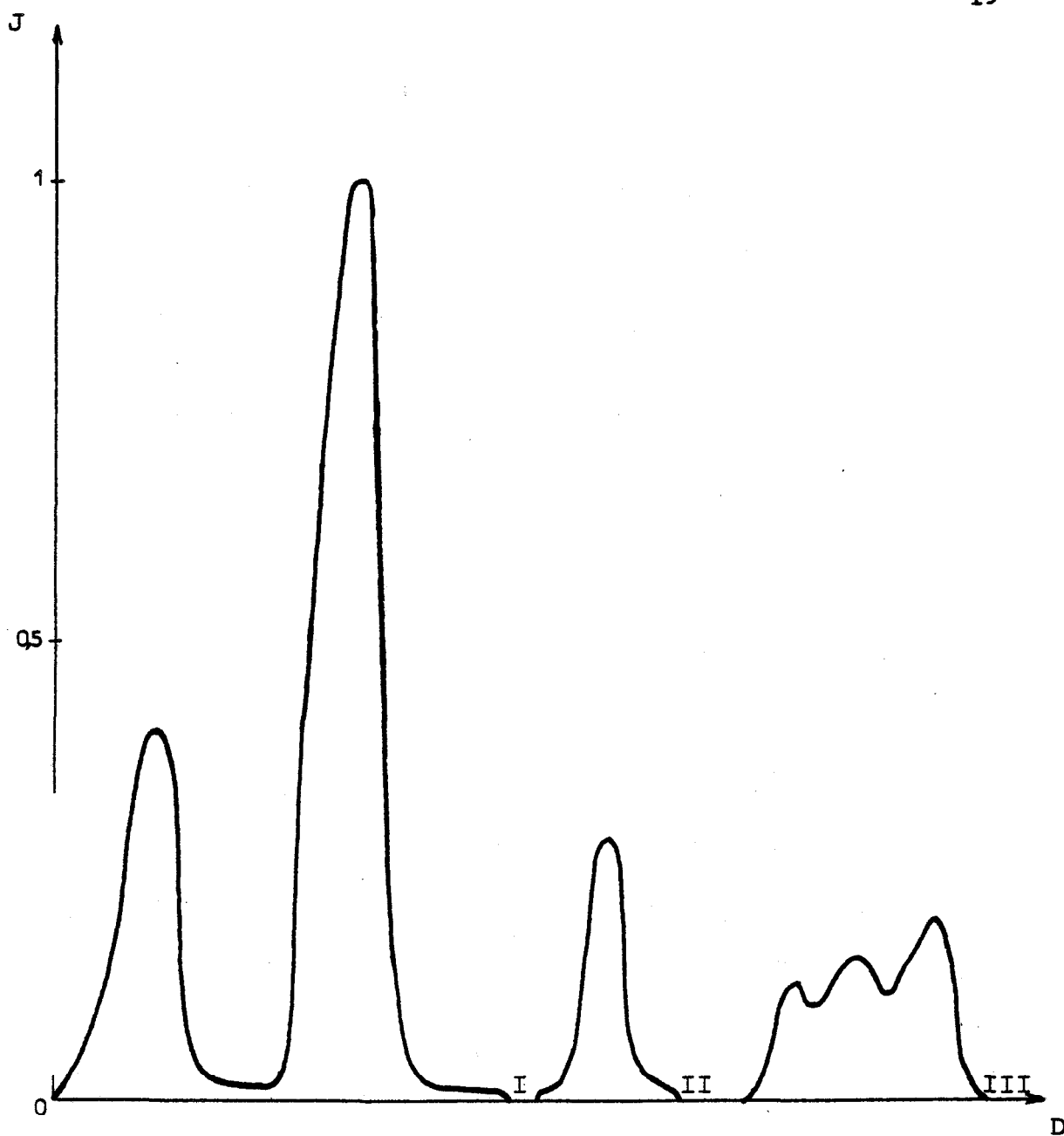


FIGURE 6

Intensité lumineuse en fonction de la distance parcourue (voisine du temps écoulé).

- I - première extinction apparente
- II - deuxième " "
- III - extinction finale

.../...

### 3.3. ETUDE DES INTERACTIONS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES (Réf. 42)

Les études de charge électrique de la boule sont difficiles à réaliser et le chercheur est amené à spéculer à partir des observations des mouvements ou effets produits par la boule. Les observations semblent indiquer une interaction électrostatique avec le sol ou les conducteurs. La boule peut suivre une ligne directrice (observation du chercheur russe DIMITRIEV le long de la rivière Onega où la boule suit un barrage flottant).

Certaines observations permettent de préciser qu'il puisse exister un champ hyperfréquence (chauffage hyperfréquence d'un anneau de bague) et certaines expériences ont été développées dans ce sens (cf. 3.7). Il semble bien que les propriétés électromagnétiques de la foudre en boule ne pourront être étudiées correctement qu'après avoir résolu les problèmes de sa production en laboratoire.

### 3.4. PRELEVEMENTS CHIMIQUES ET RADIOACTIVITE

DIMITRIEV a effectué quelques prélèvements de l'air atmosphérique après le passage d'une foudre en boule. Il constate une augmentation de la teneur en ozone et dioxyde d'azote.

Les chercheurs de l'université d'OXFORD ont effectué des mesures de thermoluminescence dans des briques sans doute produites artificiellement, soumises au passage de la foudre en boule. Les résultats obtenus semblent montrer qu'il n'y a pas irradiation des matériaux, certains témoins soumis à la foudre en boule ne présentant aucun caractère découlant de l'exposition aux rayonnements ionisants. Ces résultats infirment les hypothèses selon lesquelles la boule pourrait résulter de réactions nucléaires.

.../...

### 3.5 . CHALEUR DEGAGEE

Les estimations sont excessivement variables et la chaleur dégagée pourrait caractériser le type de foudre en boule observé. Des phénomènes de **brûlures** généralement modestes ont été constatés. Un témoin raconte qu'une boule tombée dans un baquet plein d'eau l'a chauffée ; l'apport d'énergie serait alors considérable.

### 3.6 . TENTATIVES DE PRODUCTION EXPERIMENTALE

Les tentatives de productions expérimentales ont déjà provoqué le décès de plusieurs chercheurs tels RICHMAN (1753) et BABAT (1960). Les conditions de sécurité électrique ont été relativement difficiles à réaliser mais actuellement l'emploi de transmissions pneumatiques et l'avènement sur le marché des fibres optiques permet à l'expérimentateur de travailler dans de bonnes conditions de sécurité.

Comme il a été vu, la foudre en boule a pu être produite accidentellement par la mise en court-circuit d'une grosse batterie de sous-marin.

Le phénomène de décharge électrique ou la production de grandes étincelles (sous des tensions atteignant 30 MV avec des électrodes écartées d'une dizaine de mètres) ne sont pas favorables à la génération de la foudre en boule.

Les méthodes les plus couramment utilisées sont fondées sur :

- l'emploi de produits organiques tels que radicaux carbonyles et matières plastiques,
- les impulsions-lasers,
- les décharges en radiofréquences.

.../...

### 3.6.1. Produits organiques carbonyles

Le chercheur français P. HUBERT a réussi à produire par injection de matière organique au niveau du sol, à proximité du point d'impact d'éclairs déclenchés, un objet lumineux sphérique ressemblant à la foudre en boule. L'objet apparaît avec un retard de 0,2 s environ par rapport au début de l'éclair et à quelques mètres du point d'impact. Il est ensuite pulsé en synchronisme avec les réamorçages du courant de décharge et s'éteint avec le dernier après avoir duré jusqu'à 0,8 s. Cet objet a une forme ronde de 25 cm de diamètre, il reste au contact du sol où il n'a laissé aucune trace, La présence de radicaux carbonyles semble être un facteur déterminant, sans que le nombre d'événements favorables (3) permette de tirer une conclusion définitive. D'autre part, il ne fait aucun doute que cette observation soit en rapport avec l'écoulement des courants dans le sol avec une prise de terre rudimentaire (synchronisme parfait entre pulsations de l'éclair et de la boule). Les objets lumineux produits s'apparentent à une forme de foudre en boule, parmi les moins surprenantes en raison de leur immobilité. Ce type correspond à 9 % des cas.

Les autres tentatives de production de foudre en boule décrites ci-après s'effectuent au laboratoire.

### 3.6.2. Produits organiques plastiques

Le chercheur russe BABYBERDIN produit de petites boules lumineuses en provoquant de brusques décharges entre deux électrodes de cuivre isolées par un matériau diélectrique (vinyl ou celluloïde). La décharge est amorcée par une petite électrode de graphite de 1 mm d'épaisseur. Le-générateur d'impulsion peut fournir 150 kV, un courant maximal de 7 kA, la durée totale de la décharge étant de 70  $\mu$ s environ, l'énergie libérée de 2,2 kJ.

.../...

Dans un grand nombre de cas, un petit objet **lumineux** d'un diamètre **compris** entre 2,5 et 4 **cm** est **observé**. Sa vitesse de déplacement peut atteindre 240 **m/s** et sa durée de vie 3 **ms**.

L'**apparence** de la boule est **corrélée** avec le **développement** de courants turbulents du plasma à basse **température** formé des produits **d'érosion** du diélectrique et des électrodes. Le mouvement de la boule de plasma est **dû** à l'impulsion électromagnétique de décharge puis à l'onde de choc se propageant dans l'**atmosphère**.

Le diamètre et la durée de vie croissent avec l'énergie de la décharge. L'utilisation d'une sonde à effet Hall n'a pas permis de trouver des déséquilibres de charges à l'intérieur de la boule ; des mesures spectrales ont donné les résultats habituels obtenus pour la recombinaison d'un plasma d'air contenant des impuretés de carbone et cuivre.

Les caractéristiques du phénomène obtenu **sont** un peu différentes des foudres en boule classiques, toutefois cette expérience devrait permettre de parvenir à une meilleure connaissance du phénomène.

### 3.6.3. Les impulsions-laser

Les impulsions-laser de courte durée ont été employées pour produire le claquage optique d'un gaz par focalisation du faisceau. Une énergie de 1 joule est libérée en 30 **µs** et un **sphéroïde** de plasma de 0,6 mm de diamètre est formé au point de focalisation, sa durée de vie est de 10 **µs**.

L'onde de choc provoque le mouvement de la "boule en feu" pendant la période où l'action ionisante est importante.

Les chercheurs russes ont développé des formules empiriques déterminant les caractéristiques du plasma :

$$\begin{aligned} \text{Rayon} &\propto A E^{2/5} & E &\text{ énergie mise en jeu} \\ T_{\text{durée de vie}} &\propto B E^{1/2} & A, B, C &\text{ constantes} \end{aligned}$$



Le moment magnétique du plasma a été déterminé par une méthode de perturbation et la valeur obtenue est :

$$M \approx C \frac{E}{\rho_0} \quad \rho_0 \text{ masse volumique du milieu}$$

Le modèle développé à l'Institut LEBEDEV permet d'expliquer un grand nombre de phénomènes, Notons toutefois qu'il s'applique à de très petites boules de plasma ; la production d'un sphéroïde de 20 cm de diamètre nécessiterait l'utilisation d'une énergie de 2 MJ, sa durée de vie serait de 15 ms. Les résultats obtenus ne peuvent donc s'extrapoler aux phénomènes de foudre en boule atmosphérique ; des études visant à l'utilisation de lasers de plus hautes énergies sont en cours dans différents laboratoires. Le problème de l'interaction du laser avec le milieu, est au centre de certaines études concernant l'arme laser et donne lieu à de nombreux travaux très classifiés.

#### 3.6.4. Les décharges radiofréquences

Une approche intéressante a été développée par les chercheurs américains du BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY POWELL et FINKELSTEIN, utilisant le phénomène d'activation de l'azote.

RALERGH a montré que de l'azote excité pouvait encore produire une faible luminosité une demi-heure après que la décharge ait été arrêtée, Cette lumière est produite par la recombinaison de l'azote atomique, Ici, les chercheurs se sont intéressés aux excitations moléculaires de persistance moins importante (0,5 à 1 s).

POWELL utilise une source d'une puissance de 30 KW et de fréquence 75 MHz,

.../...

L'appareil utilise un cylindre de verre de 15 centimètres de diamètre connecté à l'oscillateur radiofréquence.

Un arc **électrique** se forme au point de séparation des deux électrodes. Quand l'électrode mobile est **complètement** rétractée à l'intérieur du cylindre, une longue colonne de plasma se forme à l'**extrémité** de l'électrode fine et devient en fait une antenne connectée à l'oscillateur. L'émission est supprimée à cet instant. Le plasma se détache **formant** une boule lumineuse. La durée de vie est de 0,5 à 1 seconde en atmosphère confinée et de 0,2 à 0,4 seconde en atmosphère libre,

Trois **paramètres** semblent **déterminants** à la pression du gaz, sa composition, et la composition des électrodes.

- La pression doit être de l'ordre de 0,5 à 3 atmosphères,
- La composition du gaz a été étudiée dans différentes conditions :
  - $N_2$ ,  $O_2$ , et  $N_2O$  a des concentrations variables permettant d'obtenir de bons résultats.
  - Argon et  $CO_2$  produisent des plasmas de quelques millisecondes.
  - La lumière produite par  $N_2$  est pâle tandis que celle produite par  $O_2$  est très vive.  $N_2O$  engendre des boules de 50 cm de diamètre, de couleur orange, et durant 2 s. Il semble d'ailleurs qu'il soit responsable de la majorité des émissions lumineuses.
- La composition des électrodes a une influence sur le spectre de lumière émise.

Les couleurs observées de foudre en boule typique correspondent à des teintes intermédiaires entre jaune clair et orange et semblent donc indiquer la présence simultanée d'azote d'oxygène et de  $N_2O$ , ce qui semble naturel pour des décharges se produisant dans l'air. Les résultats **obtenus** par le groupe de BROOKHAVEN sont extrêmement intéressants ; ils ont **permis** d'étoffer les explications les plus plausibles du phénomène de foudre en boule.

.../...

#### 4. THEORIES ET TENTATIVES D'EXPLICATIONS

---

Les théories **les plus** diverses ont été proposées dans le but d'expliquer la foudre en boule, mais en définitive le **mécanisme** de formation n'est pas encore établi. Ces théories se classent en **deux** catégories principales, celles pour lesquelles la source d'énergie se trouve à l'intérieur de la boule et celles où la source **d'énergie** se trouve à l'extérieur,

##### 4.1. MODELE A SOURCE D'ENERGIE INTERNE

Dans ce **groupe**, existent sept grandes classes :

- 1/. La boule est constituée de gaz ou d'air se trouvant dans un état énergétique inhabituel. Les gaz ont une évolution lente, l'émission lumineuse est due à la recombinaison des ions. L'énergie est fournie par des réactions chimiques entre **gaz**, poussières, ...
- 2/. La boule est constituée d'air chaud à pression atmosphérique. UMAN et LOWKE ont montré qu'une sphère d'air chaud de 20 cm de diamètre se refroidissait de 1 000 K/s tout en conservant un rayon constant, la température initiale étant de l'ordre de 3 000 K.  
Le défaut du modèle est de ne pouvoir expliquer une luminosité presque constante pendant le refroidissement et de ne pas être compatible avec l'absence de mouvement **général** ascendant.
- 3/. La boule est constituée d'un plasma de très haute densité électronique ( $10^{25}$  e/m<sup>3</sup>) qui **possède** les propriétés quantiques de l'état solide (théorie proposée par NEUGEBAUER en 1937).

.../...

- 4/. De nombreuses configurations de courants en boucles **fermées** ont été proposées. La stabilité de la boucle doit **être** assurée par le champ magnétique qu'elle crée. Cependant à l'encontre de ces théories, **FINKELSTEIN** et **RUBEINSTEIN** ont montré en 1964 qu'un plasma autoconfiné par un champ magnétique ne pouvait être stable sous les **conditions** atmosphériques habituelles.
- 5/. La boule est due à une sorte de tourbillon (produisant le confinement de gaz excité, comparable **aux** ronds de fumée).
- 6/. La boule est constituée d'un champ à très haute fréquence confiné dans une enveloppe sphérique de plasma (DAWSON et JONES 1968).
- 7/. Quelques modèles font appel à des réactions nucléaires comme source d'énergie, ces théories sont suggérées par les très grandes énergies quelquefois mises en jeu.

#### 4.2. MODELES A SOURCE D'ENERGIE EXTERNE

Il a été suggéré trois types de source d'énergie ,  
externes distinctes :

- a) Un **champ** électromagnétique à très haute fréquence ; proposé par **CERRILLO** (1943) et **KAPITZA** (1955) ; cette idée utilise l'énergie radiofréquence focalisée depuis le nuage. Il est à noter que le champ élevé nécessaire au confinement n'a été que **très** difficilement observé en période orageuse.
- b) Un courant d'entretien allant du nuage au sol. Ce processus est à rapprocher de celui de formation des **éclairs** en chapelet, mais **il** ne peut expliquer l'existence de boules à l'intérieur d'habitations ou à proximité de structures métalliques.

.../...

c) ARABADZHI (1957) a émis l'hypothèse d'une focalisation des rayons cosmiques dans le champ électrique au cours d'un orage de telle sorte qu'ils puissent créer une décharge localisée.

#### 4.3. THEORIES POSSEDANT LA MEILLEURE CREDIBILITE

##### 4.3.1. Radiofréquences

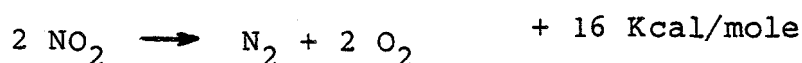
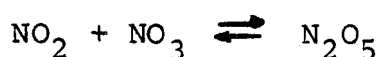
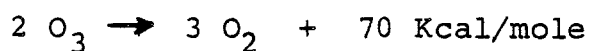
La théorie de KAPITZA sur la génération d'énergie par radiofréquence en 1955 a été étayée depuis par des résultats très intéressants :

- les résultats expérimentaux de POWELL et FINKELSTEIN (chapitre 3.6.4.) en 1969 ;
- les recherches de KOSAREV et SEREZHKIN (1974) pour mettre en évidence Les champs radiofréquences lors des orages. A lors que les résultats indiquent habituellement un bruit continu à haute fréquence, les chercheurs russes ont pu mettre en évidence des émissions de 100 MHz à 200 MHz d'une durée maximale de 0,17 s.

##### 4.3.2. Processus chimiques

La source d'énergie est alors une réaction chimique se produisant à l'intérieur de la sphère. Cette théorie a particulièrement été développée par SMIRNOV utilisant les résultats obtenus par DXITRIEV (chapitre ).

Les processus typiques envisagés sont :



.../...

De **nombreuses** autres **réactions** entre oxygène et azote ont été étudiées. La température de l'air excité est alors d'environ 400 K, la concentration en ozone est de 3 %. La persistance de la boule est d'autant plus grande que sa **température** est plus faible.

SMIRNOV conclut en indiquant **l'extrême** rareté d'une telle concentration d'ozone **dans l'air** ; le phénomène envisagé doit être initialisé par une réaction produisant la concentration nécessaire en ozone et **il** semble bien que **l'élément** initiateur soit très différent pour des foudres en boules différentes.

### 3 Energie en provenance du nuage

Suggérée par FINKELSTEIN et RUBINSTEIN en 1964 puis reprise par UMAN et HELSTROM en 1966, cette idée **permet** d'expliquer certains phénomènes de foudre en boule, en particulier celles pour lesquelles l'énergie mise en jeu est importante. Cette idée suppose que la boule est une région de grande conductibilité électrique. De nombreux précurseurs d'éclairs aboutissent à la boule ; la construction du coudant **à** son passage dans l'étranglement **apporte** l'énergie nécessaire à la cohésion de la boule. Cet aspect de la foudre en boule est à rapprocher du **phénomène** d'éclair en chapelet, très souvent observé à l'aide de caméra rapide (150 images/s), au cours des éclairs naturels et qui est le fonctionnement du chenal d'écoulement du courant en une multitude de grappes et grains lumineux distincts.

.../...

## 5. EFFETS DESTRUCTIFS

---

La foudre en boule est un phénomène extrêmement diversifié ; si la majorité des observations s'effectuent sans danger, et sans qu'il y ait d'effets destructifs, il en est où des quantités d'énergie **extrêmement** importantes sont mises en jeu. La compréhension des phénomènes impliqués dans ces derniers cas présente un intérêt militaire évident.

Il est rapporté un événement où la boule lumineuse a traversé toute la cabine d'un avion à réaction sans **dommage...** ce cas est exceptionnel et tous les spécialistes d'aéronautique connaissent bien les dégâts causés aux avions par les décharges électriques. Les endroits les plus sensibles se trouvent être les pointes du fuselage (nez, ailes, **antennes**). La production d'une **foudre** en boule au voisinage du nez d'un avion ou d'une fusée pourrait provoquer sa destruction. Le plasma de moyenne température qui entoure **une** ogive **à** sa pénétration dans l'atmosphère pourrait permettre de générer plus facilement la boule **lumineuse**. Une énergie de l'ordre de 10 à 100 kJ détruit facilement un radome.

Le problème de la destruction réside dans la production de la boule ; **c'est** un peu dans ce sens que les militaires de l'Est et de l'Ouest travaillent à la mise au point de l'arme laser, tout en étudiant les processus de formations de plasma, et les interactions entre le laser et ce plasma.

Les études menées de part et d'autre sur la foudre en boule devraient permettre de déterminer les meilleures conditions de fonctionnement, de production, et de génération des meilleurs effets destructifs.

.../...

Ces études impliqueront aussi le développement des moyens de protection contre les décharges électriques et les armes futures. L'accroissement de complexité des dispositifs embarqués est tel qu'un "durcissement électronique" est indispensable.

.../...



## 6. CONCLUSION

Les travaux soviétiques et américains sont importants dans ce domaine. Il est à noter que les publications soviétiques concernent essentiellement des travaux théoriques ; les applications pratiques font partie de projets 'classifiés. Au contraire, les chercheurs **américains** indiquent **des** résultats expérimentaux. Ainsi les travaux de **POWELL** et **FINKELSTEIN** (BROOKHAVEN LABORATORY), **BARRY** (AIR FORCE AVIONICS LABORATORY), **JL TUCK** (LOS ALAMOS LABORATORY), **RD HILL** (OFFICE OF NAVAL RESEARCH) sont-ils particulièrement intéressants ?

La difficulté d'interprétation du phénomène a conduit au développement d'hypothèses extrêmement variées. Nombre d'entre elles **relèvent** sans doute de l'utopie, mais **il** est probable qu'une seule explication ne peut justifier toutes les observations. Les utilisateurs militaires pourraient s'intéresser tout à la fois aux phénomènes mettant en jeu une grande quantité d'énergie (destruction d'avions, de fusées) et aux phénomènes où **seul** un effet d'écran est recherché (brouillage des émissions radio, aveuglement, leurre).

.../...

**- BIBLIOGRAPHIE -**

---

- P. HUBERT  
Tentative pour observer la foudre en boule dans  
le voisinage d'éclairs déclenchés artificiellement  
CEN/DPLEP - Rapport DPLEP 76/349 - 5 mai 76.
  
- J.R. POWELL - D. FINKELSTEIN  
Structure of ball lightning  
Advances in geophysics - 1 - 1969 - p. 141
  
- M.A. UMAN  
Lithtning - Mac Graw Hill 1969 - p. 243
  
- R.D. HILL  
Lightning Research - Naval research revue - 10 -73  
p. 1
  
- W.I. ARABADJI  
On the problem of ball lightning  
Journal of geophysical research - 20-12-76 p. 6455
  
- J.W. KING  
Solar radiation changes and the weather  
Nature Vol.245 - 26.10.73 p. 443
  
- G.A. ASKAR'YAN et Al  
Optical breakdown "fire ball" in the focus of a laser  
beam  
JETP Letters 5 (1/3/67)
  
- M.T. DMITRIEV et Al  
Optical emission from ball lightning  
Soviet physics - Technical physics - Vol. 17 n° 10  
4-73

- V.U. **BALYBERDIN**  
Verification of the case of the origine of **gall**  
lightning  
Journal of applied **mechanics** and technical **physics**  
Vol. 16 n° 6, p. 946
  
- M.T. **DMITRIEV**  
Nature de la foudre globulaire  
PRIRODA - URSS - n° 6 - 6-67  
Traduction T/R 2176-867
  
- B.M. **SMIRNOV**  
Ball lightning model  
Soviet physics technical physics - Vol. 22 - n° 4  
4-77, p. 488
  
- A.V. **ZAITSEV**  
New **theory** of ball lightning  
Soviet physics - Technical physics - Vol. 17 - n° 1  
7-72
  
- P. **BROVETTO et Al.**  
On the nature of ball lightning  
Journal of atmospheric and terrestrial physics  
Vol. 38 - p. 921 - 1976

.../...

Nature

- Vol. 260 - 15.4.1976 - p. 573  
Ball lightning P.C.N DAVIES
  - Vol. 249 - 4.5.74 - p. 332  
Lightning incidence in britain **and** the **solar** cycle  
M.F. STRINGFELLOW
  - Vol. 263 - 28.10.76 - p. 753  
Ball lightning as **electromagnetic** energy  
V.G. ENDEAN
  - Vol. 260 - 15.4.76 - p. 596  
Ball lightning - M. STENHOFF
  - Vol. 262 - 29.7.76 - p. 379  
Ball lightning in Smethwick - E.R. WOODING
  - Vol. 268 - 7.7.77 - p. 35  
Video tape recording of a possible **ball** lightning  
event A.J. ERIKSSON
  - Vol. 252 - 15.11.74 - p. 220  
Radiation dosage associatei with **ball** lightning
-