

Inscr. N°
Date le: 28/10/2009
Code: 3754

Dédicaces

Avec tous les mots qui viennent du cœur et
Avec toutes les phrases qui signifient la gratitude, je
dédie ce modeste travail à :

Mes parents :

Ma douce et très chère mère « qui a contribué tous
ces efforts pour que je sois heureux » ;

Et mon père qui pense toujours à ma réussite.

«Que Allah le tout puissant les protège»

Mon cher frère et Mes chères sœurs

Je les remercie et je les adresse mes vrais sentiments.

A mes chers amis et mes frères qui ont les plus beaux
cœurs Brahim, Boubakeur et à tout ses familles

Le plus beau exemple de courages et l'amitié qui

Est mon ami: AHMED

Mon bi nome Mourad et qui je le remercie de tout mon
cœur

Toute ma grande famille « paternelle et maternelle »

Mon oncle: BELHADJ.

Tout mes amies et mes collègues : Et en fin je dédie
ce travail a tous qui me connu.

Djamel Eddine Gourari



Remerciements

Ce travail a été effectué à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, sous la direction de Monsieur B.LIANI professeur à L'Université de Tlemcen. Qu'il veuille bien trouver ici nos vifs et sincères remerciements ainsi que notre respectueuse gratitude pour les conseils qu'il nous a prodigués tout au long de la préparation de ce mémoire.

Mr M.LEMERINI, Maître de Conférences à L'Université de Tlemcen, a bien voulu s'intéresser à nos travaux et nous a fait l'honneur de présider le jury. Nous le prions de bien vouloir accepter Nos très sincères remerciements.

Nos remerciements vont aussi à Mr Z.BENTALHA qui a bien voulu examiner ce travail.

Nos remerciements vont aussi à Mme R.BENSAID qui a bien voulu examiner ce travail.

Table de matière :

Introduction :

CHAPITRE1 : Généralité sur les plasmas

1.1 Introduction	1
1.2 Les différents types des plasmas	1
1.3 Les paramètre des plasmas	2

CHAPITRE2 : les décharges électriques dans les gaz

2.1 Décharge électrique dans las gaz	8
2.2 décharge non autonome	9
2.3 Décharge autonome	9
2.4 décharge de Townsend	10
2.5 Décharge luminescente	10
2.6 décharge d'arc	11

Chaptre3 : la foudre

3.1 Historique	12
3.2 Sévérité orageux et phénomène précurseur	14
3.2.1 Électricité atmosphérique : condensateur te terrestre	14
3.2.2 Les nuage orageux	16
3.2.4 Phénomène précurseur	17
3.2.4 Effet couronne et ionisation	19
3.3 La décharge atmosphérique	21
3.3.1 Classification er description des décharges	21

3.3.2 Coups foudre ascendants	22
3.3.3 Coups descendants négatif	22
3.3.4 Coups foudre descendants positif	26
3.3.5 Ionisation et avalanche électronique	26
3.3.6 Structure et neutralisation du traceur descendant	29
3.4 Les paramètres électriques de la décharge	30
3.5 phénomène associé en décharge de foudre	33
3.5.1 La lumière et le tonnerre	33
5.2 L'énergie de la foudre	35

Chapitre 4 : l'effet physique de la foudre et système de protection

4.1 Effet sur les bâtiments non protégés	36
4.2 Effet sur les arbres	37
4.3 Écoulements particuliers de la foudre dans le sol	38
4.4 Effet sur les conducteurs	39
4.5 effet de déflagration	42
4.6 Système de protection	42
4.6.1 Phénomène physique en jeu	42
4.6.2 Les dispositifs de protection	44

Conclusion

Introduction Générale

Chapitre I

Généralités sur Les plasmas



1.1 Introduction :

Le terme plasma a été introduit pour la première fois par les physiciens Langmuir et Tonks en 1923, pour désigner un gaz ionisé (observé dans les tubes à décharges) dont la principale propriété est d'être globalement neutre. Les plasmas se confondent avec les gaz ionisés et font suite dans l'échelle des températures aux trois états classiques : solide, liquide et gaz. Il constitue donc un quatrième état de la matière bien qu'il n'existe aucune transition de phase entre l'état gazeux et plasma. Ce quatrième état de la matière, que l'on trouve dans les étoiles et le milieu interstellaire, constitue la majorité de notre univers (autour de 99 %). Sur terre, on ne le rencontre pas à l'état naturel (il faut croire que l'on a réussi à habiter dans les 1% restant). Les plasmas peuvent être aussi créés de façon artificielle, en laboratoire en appliquant des champs électriques suffisamment puissants pour séparer le noyau de ses électrons dans les gaz.

Les plasmas sont caractérisés par leur degré d'ionisation, leur densité et leur température électroniques. Cette première approche permet de constater que la physique des plasmas couvre un domaine de densité électronique allant de 10^6 m^{-3} (espace interstellaire) à 10^{30} m^{-3} (plasmas dans les métaux, étoiles) pour des températures comprises entre 10^2 K (espace interstellaire) et 10^{80} K (intérieur des étoiles, plasmas de fusion). La complexité de cette matière de synthèse (plasma) fait pratiquement appel à tous les domaines physiques (physique statistique, thermodynamique, mécanique quantique, physique atomiques et moléculaire, physique nucléaire, mécanique des fluides...).

1.2. Les différents types de plasma :

Le terme plasma recouvre un vaste domaine que l'on peut en première approximation distinguer plusieurs types:

1/ Les plasmas froids : ont une température qui peut atteindre au maximum quelques dizaines de milliers de degrés. Ils peuvent se diviser en deux branches :

- **Les plasmas hors équilibre :** se caractérise par le fait que les particules lourdes ont une température de l'ordre de la température ambiante alors que les électrons ont une énergie suffisante pour assurer l'ionisation du milieu. Ils sont souvent créés à basse

pression ($P < 1 \text{ atm}$) et servent essentiellement au niveau du traitement de surface, dépollution,

- **Les plasmas thermiques :** les collisions sont suffisantes pour assurer l'équipartition de l'énergie entre les différentes espèces du système. Ils se caractérisent par une température unique et sont souvent générés, à pression atmosphérique, sous formes d'arcs électriques.

2/ **Les plasmas chauds :** sont les plasmas de fusion nucléaire et se retrouvent, à l'état naturel, composant les étoiles ou les magnétosphères des planètes. Leur température est de l'ordre du million de degrés

I.3 les paramètres des plasmas :

a. Degré d'ionisation :

Un plasma est au sens strict un gaz totalement ionisé. Mais par extension, on parlera aussi de plasma pour un gaz non totalement ionisé. On désigne par

$$\alpha = \frac{n}{n_0 + n}$$

La fraction d'ionisation du plasma, n_0 étant le nombre de particules neutres par unité de volume et n étant le nombre de particules chargées par unité de volume. Dans le cas où la fréquence de collision entre électrons et neutres est supérieure aux fréquences de collision électrons/électrons et électrons/ions, on considère que le plasma est faiblement ionisé. Dans le cas où cette fréquence de collision est inférieure à la fréquence de collision entre particules chargées, le plasma est dit fortement ionisé.

b. Longueur de LANDAU :

On appelle *longueur de Landau* la distance λ_l pour laquelle l'énergie potentielle d'interaction entre deux électrons est égale à leur énergie cinétique d'agitation thermique. Cette distance est donc telle que

$$\lambda_l = \frac{e^2}{4\pi\epsilon kT}$$

C. Longueur de DEBYE :

Supposons un plasma globalement neutre. On décrit ce plasma comme un gaz d'électrons à la température T_e interagissant avec des ions sous forme de particules aléatoirement distribuées. Le nuage électronique supposé en équilibre thermodynamique suit la *statistique de Boltzmann* :

$$n_e = n_0 e^{\frac{e\Phi}{kT_e}}$$

Cette statistique décrit le réarrangement des électrons en présence d'un potentiel Φ qui leur permet de "lutter" contre la force de répulsion coulombienne. Ainsi, dans le cas où le potentiel Φ augmente, l'influence de la répulsion coulombienne diminue, donc la densité augmente jusqu'à équilibrer ces deux potentiels (Φ et le potentiel d'interaction entre électrons). Si la température augmente, les électrons acquièrent une énergie thermique supérieure, donc sous l'effet de cette pression thermique, la densité diminue. Ce potentiel Φ peut ainsi être par exemple l'influence d'un ion, qui perturbe l'uniformité de la densité de charge électronique. Cet ion nouvellement introduit force les électrons dans une configuration différente, qui eux-mêmes en changeant leur disposition modifient le potentiel Φ . Il faut alors introduire une équation supplémentaire, l'équation appelée *équation de Poisson*. Elle décrit le potentiel créé par une certaine densité de charge : en effet

$$\text{div}(\vec{E}) = -\nabla^2(\vec{\Phi}) = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

Cet effet se combine alors avec la *statistique de Boltzmann*.

$$\nabla^2(\vec{\Phi}) = -\frac{\rho_e + \rho_i}{\epsilon}$$

Étant donné que l'on considère un plasma globalement neutre (hypothèse de quasi neutralité) à l'équilibre, on a $n_{e0} = Z n_{i0}$, Z étant le degré moyen d'ionisation des ions. Ceci s'écrit aussi

$$en_{e0} = \rho_{e0} = \rho_{i0} = eZn_{i0}$$

Si l'on considère que les ions sont immobiles, alors $\rho_i = \rho_{i0} = -\rho_{e0}$ avec ρ_{e0} représentant la densité de charge électronique en l'absence de potentiel (à $\Phi = 0$), d'où $\rho_i = en_0$ et $\rho_e = en_e$.

Donc on a

$$\nabla^2(\vec{\Phi}) = -\frac{en_0}{\epsilon} \left(e^{\frac{e\Phi}{kT_e}} - 1 \right)$$

Dans l'hypothèse $\frac{e\Phi}{kT_e} \ll 1$, c'est à dire dans l'hypothèse où la perturbation créée par un ion est faible, on peut linéariser cette équation différentielle (développement limité à l'ordre 1 : $e^x = 1 + x$):

$$\nabla^2(\vec{\Phi}) = -\frac{n_0 e^2}{\epsilon k T_e} \cdot \Phi$$

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\frac{x}{\lambda_d}}$$

Une solution de cette équation peut s'écrire (en 1D) sous la forme avec :

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{\epsilon k T_e}{n e^2}}$$

Cette grandeur λ_d est la *longueur de Debye*, c'est la distance au bout de laquelle la perturbation due à la présence de l'ion est écrantée par les électrons. On considérera donc que pour une distance inférieure à λ_d , le potentiel vu est celui d'une charge nue, et que au delà, le potentiel n'est plus vu (écrantage). Lorsque les dimensions considérées sont supérieures à la *longueur de Debye*, on peut modéliser le plasma par un ensemble d'ions se déplaçant lentement et baignés par un fluide d'électrons. Une limitation de cette approche tient au

nombre d'électrons présents dans la *sphère de Debye* afin que l'écrantage puisse vraiment avoir lieu ; il faut donc :

$$n \frac{4}{3} \pi \lambda_d^3 \gg 1$$

D. Fréquence du plasma :

Supposons un plasma globalement neutre, dont on va "extraire" une lame d'électrons. Le plasma est maintenant composé d'une partie chargée positivement (car elle contient un excès d'ions) et d'une partie chargée négativement (les électrons que l'on a écartés du reste du plasma). Si l'on relâche alors les électrons, ils vont être accélérés sous l'effet de la charge d'espace (création d'un champ électrique), vont atteindre leur position d'équilibre (permettant au champ électrique d'être nul) et atteindre une vitesse nulle pour une position comportant un excès d'électrons (voir figure A.1)

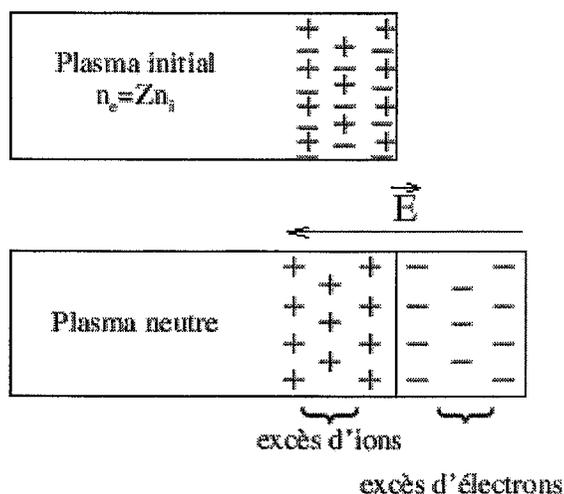


Figure1.A: oscillations plasma

Le fait d'avoir écarté les électrons de leur position d'équilibre produit donc des oscillations. Afin de calculer la fréquence de ces oscillations, on fait les hypothèses suivantes :

- ions immobiles (du fait de leur grande masse devant celle des électrons) ;
- fluide électronique (pas de comportement particulière individuel, voir section
- pas de champs électromagnétiques externes ;

$$\vec{\text{grad}}(P_e) \approx 0$$

- agitation thermique négligeable, donc ;
- collisions négligeables, donc pas de terme de viscosité.

Les équations décrivant alors le système sont les équations de conservation de la masse, l'équation de Poisson (création d'un champ électrique par une densité de charge) et le premier

principe de la dynamique pour des électrons qui ne sont plus soumis qu'à une force électrique :

$$\begin{cases} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \operatorname{div}(n_e \vec{v}_e) = 0 \\ \operatorname{div}(\vec{E}) = -\frac{n_e q_e}{\epsilon} + \frac{n_i q_i}{\epsilon} \\ n_e m_e \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_e \cdot \nabla \right) \vec{v}_e = n_e q_e \vec{E} \end{cases}$$

On fait l'hypothèse que les oscillations sont de faible amplitude, ce qui permet de linéariser (développement de limite d'ordre 1) le système d'équations avec

$$\begin{cases} n_e = n_{e0} + \tilde{n}_e \\ E = E_0 + \vec{E}_e \quad \text{avec } E_0 \approx 0 \\ v_e = v_0 + \tilde{v}_e \quad \text{avec } v_0 \approx 0 \end{cases}$$

En faisant l'hypothèse de la quasi neutralité électrique et de petits déplacements autour d'un état d'équilibre. En ne gardant que les termes d'ordre 1, le système devient :

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{n}_e}{\partial t} + n_{e0} \operatorname{div}(\vec{\tilde{v}}_e) = 0 \\ \operatorname{div}(\vec{E}_e) = -\frac{\tilde{n}_e q_e}{\epsilon} \\ m_e \frac{\partial \tilde{v}_e}{\partial t} = q_e \vec{E}_e \end{cases}$$

En admettant que :

$$\operatorname{div}\left(\frac{\partial \vec{v}_e}{\partial t}\right) = \frac{\partial \operatorname{div}(\vec{v}_e)}{\partial t}$$

alors on obtient l'équation différentielle :

$$\frac{\partial^2 \tilde{n}_e}{\partial t^2} = \frac{n_{e0} q_e^2}{\epsilon m_e} \tilde{n}_e$$

Dont les solutions sont de la forme :

$$\tilde{n}_e = \cos(\omega_p t)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_{e0} q_e^2}{\epsilon m_e}}$$

Cette pulsation dépend donc de la masse de l'électron, de sa charge et de la densité électronique moyenne. Il est possible de définir de la même façon une fréquence plasma ionique (en fait, c'est une pulsation)

$$\Omega_p = \sqrt{\frac{n_{i0} q_i^2}{\epsilon m_i}}$$

Qui est bien plus faible que celle des électrons. On définit aussi la pulsation

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_p^2 + \Omega_p^2}$$

Chapitre II

Les décharges électriques dans les gaz

II.1 Décharges électriques dans les gaz :

On sait que les gaz sont généralement des bons isolants néanmoins, sous certaines conditions, il est possible de les faire traverser par un courant de particules chargées, on dit alors que le gaz est le siège d'une décharge. On entend alors par décharge électrique l'ensemble des phénomènes qui accompagnent le passage d'un courant électrique dans un milieu gazeux. Les premières études sur les décharges, effectuées par le physicien Britannique Michael Faraday, remontent aux années 1830. Le mot « plasma » apparaît lui même dans les années 1920, sous la plume de l'Américain I. Langmuir, qui étudie la décharge dans les gaz

Le gaz que nous désirons ioniser, est injecté dans une enceinte confinée sous vide partiel ou à pression atmosphérique. Le plasma est ensuite généré par l'action d'une décharge électrique dans le gaz, qui a pour rôle de transférer de l'énergie à ce gaz pour l'exciter et l'ioniser. En effet, du fait de leur faible masse, les électrons libres récupèrent l'essentiel de cette énergie et provoquent, par collisions avec les particules lourdes du gaz, leur excitation et ionisation et donc l'entretien du plasma.

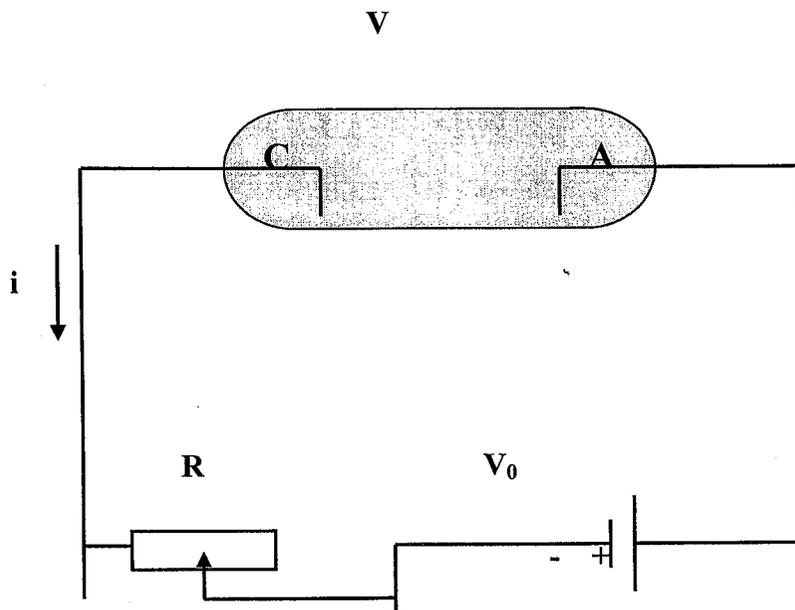


Figure 2.A: Circuit d'alimentation d'un tube à décharge en courant continu.

On distingue plusieurs types de décharges électriques :

2.2 Décharge non autonome :

Aux courants très faibles, la décharge ne se produit que s'il existe une source extérieure produisant des charges électriques dans le gaz. Si la cathode est dans l'obscurité, l'agent de ionisation extérieur est constitué par les rayons cosmiques (**Figure 2.B, Branche A₀.B**). Si la cathode est éclairée par la lumière contenant des rayons ultraviolets, les courants obtenus sont plus intenses (**Figure 2.B, Branche A.B**) et croissent avec l'éclairement de la cathode.

Ils sont dus à l'émission photoélectrique de la cathode. Dans les deux cas, si l'on en supprime l'action de l'agent extérieur (**arrêt de l'éclairement**), on constate que le courant disparaît, la décharge ne s'entretient pas par elle-même: on dit qu'elle est non autonome.

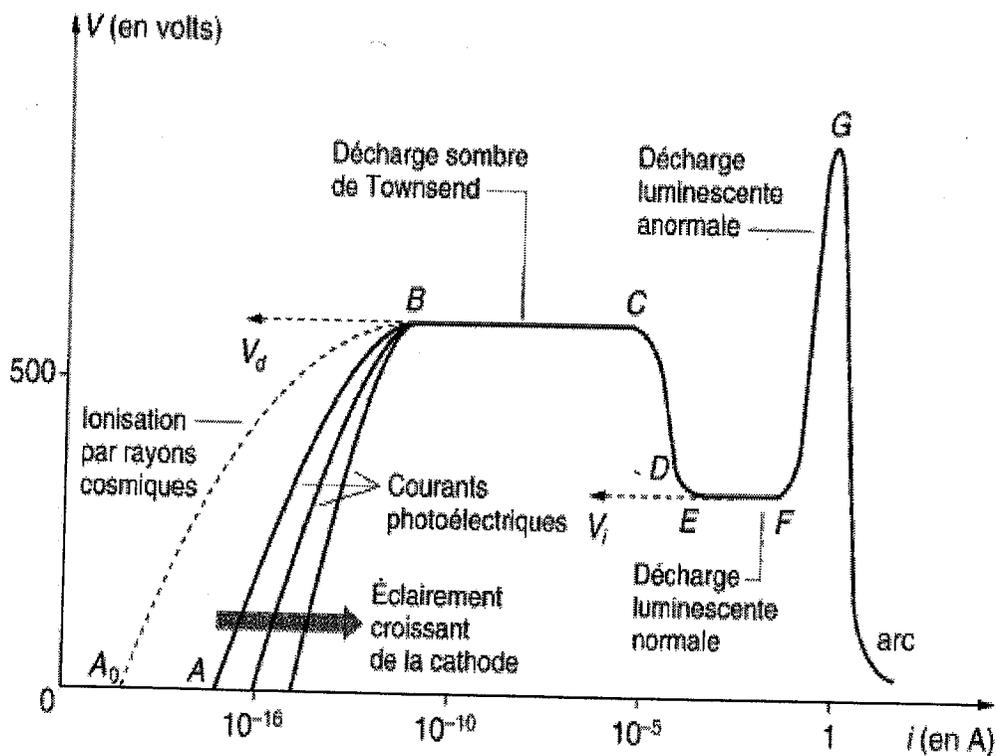


Figure 2.B: Régimes de décharge en courant continu.

2.3. Décharge Autonome :

Lorsqu'on continue à faire croître la tension, un nouveau phénomène apparaît. Les électrons accélérés dans le champ inter électrodes acquièrent une énergie suffisante pour ioniser les atomes ou les molécules du gaz. Ils créent ainsi de nouveaux électrons qui sont aussi accélérés et peuvent ioniser d'autres atomes ou molécules. C'est une avalanche qui entraîne une augmentation extrêmement rapide de courant.

Il peut atteindre la valeur de 1 A si la pression est suffisante, le courant électrique n'est plus conditionné par existence d'un agent ionisant extérieure et n'est limité que par les résistances internes de la source, on passe ainsi en régime de la décharge de Townsend (**partie BC de la figure 2.B**), qui est une décharge autonome.

2.4. Décharge de Townsend :

Comme on peut le voir sur **la figure 2.B**, cette décharge est caractérisée par une résistance interne dynamique $\frac{dV}{dI} = 0$. Quelque soit la force électromotrice de la source la différence de potentiel aux bornes de la décharge est fixée et constante. Elle est appelée tension d'amorçage statistique V_s . La courbe de **la figure 2.B** ne peut être décrite que si on fait varier le courant I .

2.5. Décharge luminescente :

Lorsque le courant de la décharge augmente la tension commence de décroître, cette partie constitue une zone de transition entre la décharge de Townsend et la décharge luminescente, dans cette zone on a $\frac{dV}{dI} < 0$.

La décharge luminescente est dite normale lorsque $\frac{dV}{dI} = 0$, et anormale lorsque $\frac{dV}{dI} > 0$.

La décharge luminescente normale se caractérise par l'apparition de plusieurs zones luminescentes diffusées et par une différence de potentiel constante entre les électrodes. En repérant la position par un axe OX dirigé de la cathode vers l'anode

, on observe successivement :

- sombre cathodique (dit de Crookes).
- La lueur négative : c'est une zone d'ionisation intense où sont produites les espèces de l'émission secondaire.
- L'espace sombre de Faraday.
- La colonne positive, repérée par sa forte luminosité : c'est la zone de loin la plus étendue. Elle est constituée d'un plasma neutre d'électrons et d'ions positives dans laquelle le champ électrique reste constant.
- Enfin l'espace sombre anodique.

2.6. Décharge d'arc :

L'augmentation du courant de la décharge s'accompagne d'une augmentation d'une part de la densité du courant j et d'autre part de la gaine cathodique, les ions perdent leurs énergies par collision et ils en fournissent d'avantage à la cathode dont la température s'élève localement. L'émission thermoionique de la cathode s'effectue à partir d'une région très localisée, appelée spot cathodique. Lorsque cette émission devienne stable la partie de la courbe $V = f(I)$ devienne négative. On est donc en régime d'arc.

La différence essentielle entre la décharge d'arc et la décharge luminescente se situe au niveau de l'émission cathodique, l'apparition de l'arc est conditionnée par celles des phénomènes thermiques. Lorsque l'émission de courant devient très intense, la température s'élève localement, et contrairement au cas de la décharge luminescente (où la totalité de la cathode est émissive), l'émission s'effectue ici à partir du spot cathodique.

Chapitre III

La foudre

3.1 Historique :

Des l'époque préhistoire, des peintures rupestres décrivent la foudre comme une pierre ou une hache lancée du ciel, détruisant tout sur son passage. Dans le Mercantour, plusieurs motifs datant de quelques 2500 ans avant notre ère peuvent être observés : sur le site de Fontanable, ce sont des motifs représentant des personnages dont les bras levés vers le ciel sont plongés par ce qui peut être interprété comme des éclairs qui ont été découverts. Ce sont les anciennes représentations de la foudre qui ne sont liées à aucune divinité mais qui correspondent à des observations de la nature faites par les peintres hommes.

Pendant l'antiquité, en Mésopotamie ; la plus ancienne représentation de la foudre se trouve sur un sceau de la première époque de Babylone datant d'environ 2000 ans avant J.C elle fut découverte lors des fouilles d'ISIN et représente une divinité féminine tenant des éclairs dans ses mains. Durant cette période, la foudre représente l'instrument des divinités mythologiques comme : Seth en Egypte, Indra en Inde, Ishkur chez les Sumériens ou bien Teshup chez les Hittites. En Chine, la divinité qui présente au mystère de la foudre était Lei-Tsu. Il avait pour adjoints, le prince du tonnerre Lei-Kung et la reine de la foudre Tien-Mu, qui est représentée tenant dans chaque main un miroir à l'aide desquels elle émet de la lumière et des éclairs. Sur le continent américain, les Aztèques croyaient au dieu Tlaloc tandis que les Indiens d'Amérique du nord pensaient que les éclairs provenaient de la lumière réfléchi par les ailes d'un oiseau mythique, le battement des ailes produisent le son du tonnerre. En Afrique noire, depuis des siècles et aujourd'hui encore, la puissance de la foudre est détenue par le sorcier du village. En Europe, chez les Grecs, le maître des dieux était Zeus et son attribut distinctif était la foudre, symbole de sa divinité. Chez les Romains, l'équivalent était Jupiter et chez les anciennes peuplades germaniques Thor.

Dans la Grèce antique, des philosophes comme Aristote ou, plus tard, Sénèque dans ses « Questions naturelles » vont essayer de donner des explications plus rationnelles du phénomène : selon eux, la foudre résulterait de la transformation de l'air réchauffé en feu. Malheureusement, les connaissances de l'époque ne peuvent donner l'interprétation valable. Néanmoins, une distinction est déjà faite entre éclairs (décharge entre deux nuages) et foudre (décharge entre nuage et sol).

Au Moyen Âge, une très ancienne coutume des paysans français consistait à porter dans sa poche par temps d'orage une pierre de foudre : une fulgurite (roche formée par la vitrification de sol siliceux sous l'effet de la forte chaleur produite par le courant de foudre lors de son impact au sol) ils récitèrent en même temps : 'pierre, pierre, gardes-moi du tonnerre ! ' Ou adressaient des prières à des saints comme sainte Barbe, saint Donat ou saint Théodore. toujours au Moyen Âge, selon l'église, une 'catastrophe naturelle' était avant tout la punition d'une faute individuelle ou collective. Aussi, pour lutter contre le péché, les ecclésiastiques proposaient des exemptions qui devaient contribuer à imposer

de croyances et des modèles de comportement. La foudre y joue un grand rôle et ils sont la source de récits spectaculaires mais peu rigoureux.

Au XVIII^e siècle on retrouve une multitude d'information provenant de traités de naturalistes physiciens ou de météorologues. Notamment, il y est décrit des phénomènes précurseurs d'un orage appelés les 'feux de saint Elm', qui apparaissaient aux sommets d'aspérités ou de pointes de toute nature. Ceux-ci avaient une application pratique pour les navigateurs et dans certains châteaux. Dès que le temps se couvrait, l'apparition de couronnes lumineuses au sommet de piques verticales avertissait de l'approche d'un orage.

Le XVIII^e siècle va essayer de proposer des interprétations rationnelles du phénomène orageux. Ainsi, pour Descartes, dont la théorie s'est inspirée de celle de Sénèque, 'le tonnerre se manifeste lorsque les nuages tombent sur d'autres situés plus bas. L'air contenu entre ces deux nuages, étant comprimé par cette chute soudaine, produit un dégagement de chaleur, d'où résulte l'apparition de l'éclair et le bruit qui caractérise le tonnerre'. Cette période ne sera pas marquée par des découvertes majeures au niveau de la foudre mais par une meilleure connaissance d'un autre : l'électricité.

Le XVIII^e siècle, siècle des lumières, marque le début de l'ère scientifique. C'est l'anglais William Walle, en 1708, qui va émettre, en premier, la relation qui existe entre l'éclair et l'étincelle électrique. En 1745, une invention capitale va rapprocher un peu plus la foudre de l'électricité : la bouteille de Leyde par P. Van Musschenbroek. La nature électrique de la foudre va se concrétiser par l'expérience de Marly-la-Ville initiée par Buffon et Dalipard, le 10 mai 1752. Benjamin Franklin (1707-1790) entreprend les premières expériences sur les décharges atmosphériques et met, lui aussi, en évidence la nature électrique de la foudre au cours de la fameuse expérience du cerf volant, le 2 septembre 1752. De 1755 à 1760, ses travaux basés sur l'observation de bâtiments frappés par la foudre permettent la mise au point du paratonnerre dont plusieurs monuments vont être équipés. Cette invention se propage et se vulgarise à tel point que la mode s'en empare et que l'on propose des parapluies ou des chapeaux paratonnerres. La prise de conscience du danger de ces paratonnerres et plus généralement des expériences effectuées sur le foudroiement se fait lors de l'accident mortel du physicien de Saint-Petersbourg, le professeur G.W. Richmann en 1753. A cette époque, la plus part des expériences liées à la foudre se faisaient dans ce que l'on appelait des « salons de physique ». Le physicien allemand tenait de mesurer l'intensité électrique d'un nuage d'orage par le biais d'une tige de FRANKLIN isolée du sol et installée dans son propre salon. La barre métallique a été frappée par la foudre, a accumulé les charges et c'est le corps de Richmann qui a servi de conducteur électrique et écoulé les charges vers le sol.

Le XIX^e siècle n'apporta que peu de nouvelles connaissances sur la physique de la foudre et des orages. La photographie naissante avait toutefois permis de préciser des paramètres tels que leur trajectoire, la longueur de leur partie visible, et leur durée. Mais, le XIX^e siècle s'attacha surtout à rassembler des

statistiques concernant le nombre, la répartition des victimes, édifices et objets. On enregistre durant ce siècle, en France uniquement, plus de dix milles tués, soit 100 par an en moyenne, avec un maximum de 187 tués en 1892.

Au XX^{ème} siècle, une percée importante dans les techniques d'observation photographique de la décharge de foudre fut rendue possible grâce à l'invention de sir Charles Vernon boys en 1926 : la caméra à objectif tournants. Elle permettait d'analyser avec beaucoup plus de finesse la trajectoire et le nombre de décharge successive au cours d'un même coup de foudre. C'est aussi à cette époque qu'apparait un dispositif qui, pour la première fois, va permettre une estimation correcte de l'amplitude des courants de foudre : le barreau magnétique. Mais c'est à partir de la deuxième guerre mondiale que la connaissance du phénomène électrique a fait le plus de progrès de par la nécessité de protéger les installations électriques et téléphoniques notamment.

3.2 Sévérité orageuse Et phénomènes précurseurs:

3.2.1Électricité atmosphérique permanente : le condensateur terrestre

De nombreuses mesures de champ électrique effectuées au voisinage du sol ont montré qu'il existe en permanence, par beau temps, un champ faible, orienté vers le bas (c'est-à-dire atmosphère positive, terre négative), dont l'amplitude est de 100 à 150 V/m. Il doit donc nécessairement exister des charges positives, situées quelque part en altitude.

Selon la description classique que l'on trouve dans la plupart des ouvrages, on représente alors la terre comme un gigantesque condensateur sphérique, dont les deux armatures seraient constituées par le globe terrestre lui-même et par l'ionosphère (appelée aussi électrosphère), qui est une zone très conductrice de l'atmosphère, et qui se trouve au-dessus de la troposphère et de la stratosphère, à une altitude supérieure à 50 km. Or s'il est vrai que l'ionosphère est très conductrice, elle contient en fait autant d'ions positifs que d'ions négatifs, puisque le rayonnement cosmique, source de cette ionisation, ne fait que créer des paires d'ions. L'ionosphère est donc globalement neutre, et ne peut par conséquent pas générer un champ macroscopique.

En réalité, selon des recherches menées il y a quelques années déjà, la charge positive qui génère le champ électrique mesuré au sol est complètement diffuse, et se trouve en outre essentiellement localisée dans les basses couches de la troposphère. L'armature supérieure du condensateur terrestre est en réalité un épais matelas contenant des charges positives de très faible densité volumique. En d'autres termes, on peut dire que le condensateur terrestre est un condensateur à diélectrique chargé. Un autre aspect essentiel de l'activité électrique de beau

temps dans l'atmosphère est le suivant. L'air n'est pas un isolant parfait : il existe toujours un certain nombre de paires d'ions positifs et négatifs, créés par les radiations cosmiques ou par la radioactivité naturelle des sols. Ces ions sont entraînés par le champ électrique, dans un sens tel que les ions négatifs migrent vers le haut, les ions positifs vers le bas. Ce double mouvement migratoire est en fait un courant électrique atmosphérique qui doit avoir pour effet de *décharger* le condensateur terrestre.

Les calculs (voir encadré suivant) permettent d'estimer ce courant permanent vertical à environ 1 500 ampères pour le globe terrestre entier.

Par ailleurs, à un champ de 130 V/m par exemple, correspond une densité de charge superficielle moyenne, à la surface du sol, de $\sigma = \epsilon_0 E$ soit $1,15 \times 10^{-9} \text{ C/m}^2$. Si on rapproche cette valeur de celle de la densité de courant atmosphérique, on peut voir que le condensateur terrestre *devrait se décharger* en moins de 500 secondes. Or le champ électrique terrestre, bien que présentant des fluctuations journalières, avec un maximum vers 18 h et un minimum vers 6 h TU (= Temps Universel), est permanent. Les orages semblent jouer un rôle primordial dans le processus d'entretien de la charge du condensateur terrestre : par quel processus physique cela peut-il se faire ?

Nous verrons un peu plus loin, lorsque nous examinerons la structure d'un nuage orageux, qu'il se produit au sein de celui-ci une séparation de charges électriques, de telle sorte que la base du nuage mûr va porter des charges négatives, et son sommet des charges positives. Or ce sont pour l'essentiel les charges négatives qui produisent les coups de foudre vers la terre, et s'écoulent de ce fait au sol. À chaque fois qu'une certaine quantité de charges négatives disparaît ainsi du nuage, il reste à son sommet une charge positive équivalente, qui ensuite diffusera lentement dans la troposphère. Pour évaluer cette quantité, on notera qu'il se produit environ 30 à 50 décharges au sol par seconde, pour l'ensemble de la surface de la terre. Si la charge négative neutralisée dans un nuage orageux par ces décharges au sol est estimée à 20 coulombs en moyenne par coup de foudre, et si à cette charge neutralisée on ajoute les charges négatives entraînées vers le sol par la pluie, il est aisé de vérifier que l'excédent positif du sommet correspond à la quantité de charges nécessaire pour générer et pour entretenir le champ permanent par beau temps.

Calcul du courant atmosphérique permanent

la loi de dérive d'un ion dans un champ électrique s'exprime par la relation $v = \mu E$ où v est la vitesse de dérive et μ la mobilité ionique. Si on désigne par n^+ et n^- les densités ioniques

positive et négative dans l'atmosphère, par la charge d'un ion, la densité de courant s'exprimera par :

$$J = E \mu e (n^+ + n^-)$$

Or $J = E\gamma$, où γ est la conductivité de l'air. En retenant $\mu = 1,5 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (en basse altitude). $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $n = 1\ 000 \text{ ions/cm}^3$ (on pose $n = n^+ + n^-$ pour simplifier), cette conductivité est de :

$$\gamma = 2,4 \times 10^{-14} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$$

Pour un champ de 130 V/m, on retrouve bien un courant permanent de 1500 A pour le globe terrestre.

3.2.2 Les nuages orageux :

Les nuages orageux sont d'énormes masses, généralement du type cumulo-nimbus, en forme d'enclume, occupant une surface de plusieurs dizaines de kilomètres carrés, ayant une épaisseur de plusieurs kilomètres, et dont le sommet atteint 15 000 mètres. Leur masse est de l'ordre de centaines de milliers de tonnes d'eau. Ils sont constitués de gouttes d'eau à leur partie inférieure, de particules de glace à leur partie supérieure. Leur formation est due à l'apparition de courants atmosphériques ascendants dont la vitesse peut dépasser 20 m/s.

Les orages de convection, ou orages isolés, naissent de l'effet combiné de l'humidité et du réchauffement local du sol : il se forme alors une « bulle » d'air chaud et humide, qui s'élève pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant. Cette bulle formera un nuage orageux aux altitudes où la condensation commencera. C'est l'orage de chaleur, souvent très localisé, dont la durée n'excède pas une heure et demie environ.

En revanche, les orages frontaux naissent de la rencontre de masses d'air importantes, de température et d'humidité différentes. Cette rencontre produit également des courants ascendants accompagnés de condensation. Les fronts orageux ainsi formés peuvent durer plusieurs jours et se propager sur des milliers de kilomètres (squall Lines ou lignes de grains).

Parallèlement à ces phénomènes thermodynamiques, il se produit une séparation des charges électriques au sein du nuage. Depuis la première théorie, imaginée par Ph. Lenard en 1892 pour expliquer ce processus, de nombreuses autres théories ont vu le jour. Il est impossible de les citer toutes, mais aucune ne suffit à elle seule à complètement expliquer les faits observés, et il est très probable que plusieurs mécanismes contribuent simultanément à la formation des charges. Ces théories ont cependant toutes un point commun : une fois les charges séparées, leur transfert ne peut avoir lieu que parce que leurs porteurs sont de nature différente. Ceux

qui portent les charges positives sont assez légers pour être entraînés par les courants ascendants, ceux qui portent les charges négatives sont assez lourds pour tomber malgré ces courants.

Quoi qu'il en soit, le résultat net de ces processus de séparation est que la partie supérieure des nuages orageux, constituée de cristaux de glace, est chargée positivement, tandis que leur base est chargée négativement. Souvent, un flot de charges positives est enserré dans la masse négative, sans qu'une explication satisfaisante de sa présence ait encore pu être donnée. Les estimations concernant la charge totale formée montrent qu'elle peut être assez variable : on peut admettre que les charges, tant négatives que positives, sont comprises entre quelques dizaines et le millier de coulombs, distribués dans un volume évalué à environ 50 km^3 .

3.2.3 Les phénomènes précurseurs

Lorsque le nuage est mûr pour éclater en orage, il constitue un vaste dipôle, créant des champs électriques entre les différentes couches intérieures, de même qu'entre sa base et la surface de la terre. Notons qu'il existe en permanence dans l'atmosphère un champ électrique faible qui, mesuré sur un terrain plat et par beau temps, est de l'ordre de 100 à 150 volts par mètre, et qui est dû à des charges positives situées à des altitudes de l'ordre de cinquante kilomètres. On pense que les orages jouent un rôle important dans la genèse de ces charges.

Au moment de la formation ou de l'approche d'un nuage orageux, sous l'influence des charges négatives qui sont disposées à sa base, et dont l'effet devient prépondérant, le champ électrique au sol commence à s'inverser, puis croît dans de fortes proportions. Lorsque son intensité atteint — 10 à — 15 kV/m, on peut dire qu'une décharge au sol est imminente. Cette inversion, puis cette forte croissance du champ électrique, est donc le premier signe annonçant la chute probable de la foudre. La mesure de ces variations est d'ailleurs utilisée dans des appareils d'alarme sur certains chantiers à risque. La figure 3. Aschématise un nuage orageux et le champ électrique qu'il génère à la surface du sol.

Le signe négatif qui affecte la valeur du champ résulte de la convention de sens choisie : le champ est négatif lorsque les charges électriques atmosphériques sont négatives.

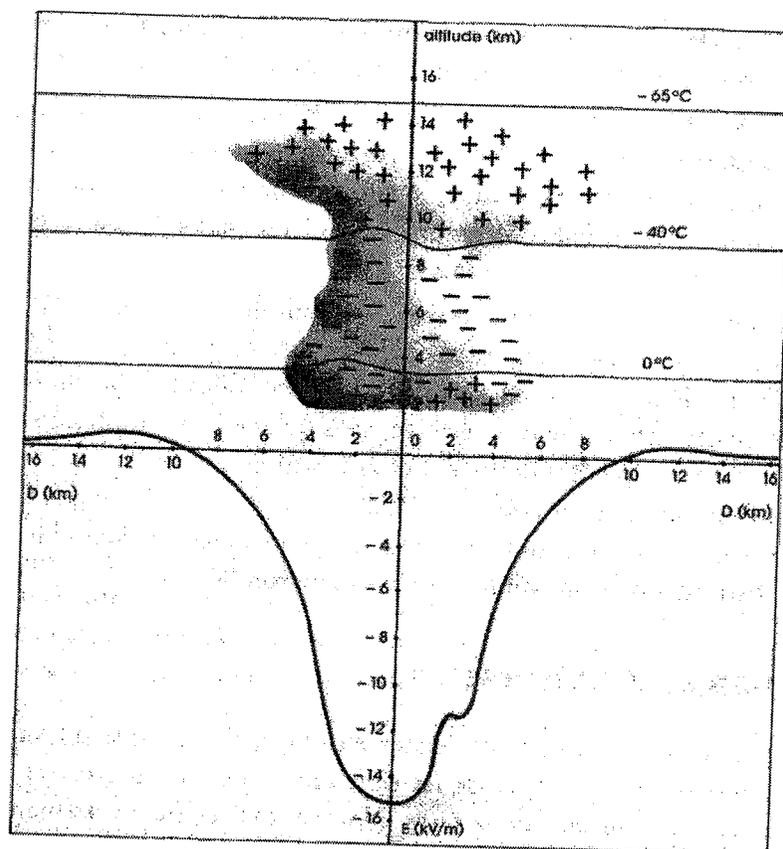


Figure 3.A Schéma montrant la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage orageux et la répartition du champ électrique au sol, au moment où va éclater la foudre.

3.2.4 Effet de couronne et ionisation :

Les valeurs de champ électrique indiquées ci-dessus supposent un sol horizontal plat. Les reliefs, les proéminences modifient fortement cette situation. En effet, les lois de l'électrostatique enseignent que toute aspérité, par un effet de concentration des lignes de force, peut considérablement renforcer le champ à sa surface, notamment à son sommet : c'est l'effet de pointe, que nous avons déjà rencontré dans la partie historique. On peut calculer qu'au sommet d'une demi-sphère posée sur un plan, le champ est le triple du champ préexistant. Mais lorsque la demi-sphère se déforme et s'allonge pour devenir un demi-ellipsoïde pointu, cet effet s'accroît encore ; ainsi, pour un rapport entre le grand axe et le petit axe de l'ellipsoïde égal à 30, le champ est multiplié par un facteur 300, et pour un rapport de 100, il est multiplié par 2 300. Cet effet amplificateur du champ par une aspérité est illustré à la figure 3.B

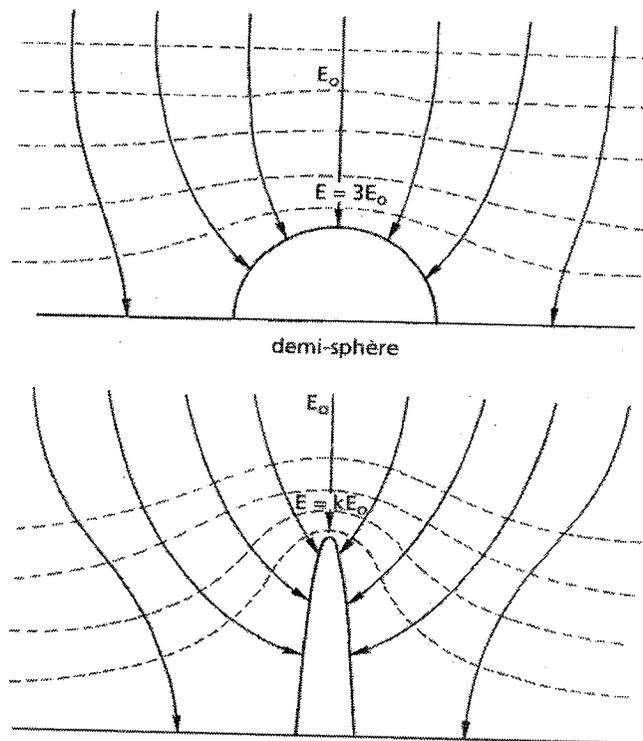


Figure 4.5 Facteur d'amplification du champ électrique au sommet d'une aspérité :
 a) demi-sphère ; b) demi-ellipsoïde.

On sait par ailleurs que lorsqu'un champ électrique de l'ordre de 30 kV/cm est appliqué à l'air atmosphérique à pression normale, il se produit une ionisation et un processus d'avalanches électroniques. Il suffit alors que l'aspérité soit assez allongée ou effilée pour que le processus puisse se développer. Supposons par exemple que le champ ambiant soit de l'ordre de 4 kV/m et que le coefficient amplificateur du champ soit 1 000 ; le champ au sommet d'une telle aspérité atteint 40 kV/cm, largement suffisant pour déclencher les avalanches électroniques, que l'on appelle aussi effet de couronne. Cet effet se manifeste visuellement sous forme d'effluves, sorte de filaments bleu-violet, et auditivement sous forme de crépitements. Leur longueur peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres, selon la taille de l'aspérité.

Un autre effet du champ électrique est de créer des forces électrostatiques à la surface des corps, orientées vers l'extérieur de ce corps : on appelle ce phénomène « pression électrostatique ». Lorsque ces forces s'exercent sur les cheveux d'une personne, ceux-ci se dressent, tout en se repoussant mutuellement, formant un véritable hérisson au-dessus de la

tête.

En plaine, ces manifestations sont évidemment beaucoup moins spectaculaires. Il n'en reste pas moins que toutes les aspérités qu'on trouve à la surface du sol, telles que pointes de paratonnerres, clôtures métalliques, mâts, mais aussi arbres, végétation de toutes sortes, y compris les brins d'herbe, présentent un coefficient amplificateur du champ électrique suffisant pour produire de l'effet de couronne. Celui-ci engendre des ions (positifs dans le cas général du nuage chargé négativement à sa base), ions qui dérivent lentement vers le nuage, sous l'influence du champ électrique ambiant. Cette dérive d'ions constitue un courant électrique ascendant, dont la tendance est effectivement, comme l'avait pressenti Franklin, de décharger le nuage. Mais des mesures de laboratoire ont montré que le courant issu d'une tige pointue est extrêmement faible : de l'ordre de 10 à 100 micro-ampères dans un champ de 10 à 15 kV/m, et encore beaucoup moins pour de l'herbe. Cent pointes demanderaient une durée de l'ordre de l'heure pour décharger un nuage. En outre, la durée d'ascension des ions, compte tenu de leur vitesse de dérive, est d'un ordre de grandeur semblable. Ces temps sont bien supérieurs au temps de reconstitution des charges dans un nuage, après un éclair. Ainsi, il est indéniable que le phénomène de décharge du nuage par effet de pointe existe, mais à une échelle insuffisante pour avoir une action pratique... l'abbé Nollet le pensait déjà !

Les ions engendrés par l'effet de couronne à la surface de la terre forment, en s'élevant, comme une sorte de matelas de charges positives, qui masque partiellement l'influence des* charges du nuage. On dit qu'ils forment un écran, et il s'ensuit que le champ augmente au fur et à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol. D'après des mesures effectuées en 1980 par S. Cliauzy, Ph. Rezonville et S. Soula du laboratoire d'aérodynamique de Toulouse, avec des sondes de champ accrochées à de petits huilons, l'épaisseur significative de ce matelas atteint environ 500 mètres. Ainsi, à un monteur où le champ électrique au niveau du sol est de l'ordre de 5 kV/m, il croît jusqu'à des valeurs de 50 kV/m lorsqu'on émerge du matelas. Ces observations sont confirmées par le fait qu'à la surface de grandes surfaces d'eau, où il n'y a pas d'effet de couronne, des champs de l'ordre de cinquante kilovolts par mètre, ont été mesurés (G. A. Dawson, 1969),

En admettant alors que cette valeur de champ se maintienne jusqu'à la base du nuage, et en admettant que cette base se trouve à une altitude de 2 000 mètres, on évalue la différence de potentiel entre base du nuage et sol (la tension du nuage) à quelque 100 millions de volts.

3.3 LA DECHARGE ATMOSPHERIQUE

3.3.1 Classification et description des décharges

Nous avons fait, dès l'introduction, la distinction entre les éclairs intra- ou inter-nuage, et la foudre proprement dite, qui frappe la terre. En fait, ces éclairs sont nettement plus nombreux que les coups de foudre : dans les régions tempérées, il y a environ trois éclairs pour un coup à la terre, et cette proportion dépasse six pour les orages tropicaux. Les éclairs sont généralement des décharges de grande longueur, qui se développent aussi bien verticalement qu'horizontalement ; on a observé des éclairs horizontaux de plus de vingt kilomètres de longueur. Les courants électriques qu'ils écoulent sont beaucoup plus faibles que ceux qui sont associés à la foudre, et ils ne produisent presque pas de tonnerre.

Notons que ces éclairs, autant que la foudre, frappent les avions, même si les incidents dus au foudroiement d'un avion sont aujourd'hui rares. Mais si les pilotes évitent de traverser les nuages orageux et cherchent autant que possible à les contourner, c'est aussi grandement parce que les violents courants d'air risquent de déstabiliser leurs appareils, ce qui entraîne des conséquences beaucoup plus graves.

Venons-en maintenant à la foudre, qui est notre sujet. La première phase d'un coup de foudre est toujours la formation d'une prédécharge peu lumineuse appelée traceur (leader dans la terminologie anglo-saxonne), qui progresse à travers l'air neutre avec une vitesse relativement faible. Cette prédécharge a son origine soit dans le nuage, et elle progresse alors en direction du sol, soit au niveau du sol, et progresse vers le nuage. Dans les deux cas, tout ce passe comme si le canal ainsi formé, quoique faiblement ionisé, formait entre le sol et le nuage un pont suffisamment conducteur pour préparer la voie à un courant intense, qui sera le coup de foudre proprement dit.

On classe d'abord les coups de foudre selon le sens de développement du traceur, en coups de foudre descendants et en coups de foudre ascendants.

En pays plat, le coup de foudre normal, de loin le plus fréquent, est descendant.

Pour qu'un coup ascendant puisse se développer, la présence d'une proéminence importante est nécessaire.

En second lieu, on classe les coups de foudre selon le sens d'écoulement du courant principal. Conventionnellement, on définit le coup négatif, lorsque la partie négative d'un nuage se décharge, et le coup positif, lorsque c'est la partie positive du nuage (îlot positif situé à sa base, et quelquefois partie supérieure) qui se décharge. Dans les climats tempérés, les coups

positifs représentent environ 10% de l'ensemble du foudroiement. Dans d'autres régions du globe, la proportion de coups positifs peut être plus élevée, dépendant de la quantité de charges positives qui se déposent à la base du nuage. Ainsi par exemple, en 1987, K. Horii et Y. Hisaoko ont observé au Japon des orages d'hiver comportant une proportion de 17 % de coups positifs.

3.3.2 Coups de foudre ascendants

Dans un champ négatif, les effluves d'effet couronne qui apparaissent au sommet des aspérités du sol sont des effluves de type positif, puisque par effet d'induction, le sol porte des charges positives. Ces effluves se développent d'autant plus loin, et avec d'autant plus d'intensité, que les dimensions de l'aspérité sont plus importantes. A partir d'une certaine taille de l'aspérité, entraînant une certaine intensité d'effluve, le phénomène se modifie brusquement et l'effluve se transforme en une décharge ascendante (ou traceur ascendant), qui se développe suffisamment loin pour atteindre le nuage : c'est le coup de foudre ascendant. Des mesures optiques ont montré que la vitesse de progression des traceurs ascendants positifs était comprise entre 0,2 et 1 m/us. Au cours de cette progression, le traceur se ramifie plusieurs fois, et on assiste à la formation d'arborescences, avec des ramifications orientées vers le haut ; l'observation montre que ces ramifications s'illuminent violemment à tour de rôle, chacune de ces illuminations étant provoquée par le passage d'une impulsion de courant intense, d'amplitude excédant parfois 20 000 ampères. Ce courant croît très rapidement jusqu'à la valeur de crête, le temps de montée étant inférieur à la microseconde, puis décroît plus lentement, avec une durée de l'ordre de la centaine de microsecondes.

Ces coups sont fréquemment observés à partir de tours élevées, comme la tour Eiffel et les tours de télévision modernes, dont la hauteur dépasse 300 mètres, et à partir de gratte-ciel. Il va sans dire que les reliefs du sol, notamment des montagnes isolées, favorisent la formation de coups ascendants, surtout quand en plus une tour ou un pylône sont placés à leur sommet. Ainsi, le laboratoire d'étude de la foudre du Mont San Salvatore, en Suisse, au-dessus du lac de Lugano, a enregistré de très nombreux coups ascendants.

3.3.3 Coups de foudre descendants négatifs

Le traceur, ici négatif, prend naissance dans le sein des masses négatives du nuage, selon un mécanisme que l'on commence à élucider depuis peu de temps ; nous exposerons ce que l'on en sait dans la troisième partie. Ce traceur progresse ensuite en direction du sol, par bonds successifs de quelques dizaines de mètres, et avec des temps d'arrêt de 40 à 100 μ s entre bonds (c'est le stepped leader, en anglais). Des vitesses de progression moyenne comprises entre 0,15 et 1 mètre par microseconde ont été mesurées, vitesses semblables à celles que

nous avons signalées pour les traceurs positifs. On fera remarquer ici une différence importante entre traceurs positifs et traceurs négatifs : les premiers progressent de façon quasi continue, alors que la caractéristique des traceurs négatifs est cette progression par bonds, que nous venons de décrire. Au fur et à mesure de la progression de ces derniers, on assiste à de nombreuses ramifications orientées vers le bas, tandis que leur luminosité s'accroît.

Dès que la pointe d'un traceur s'approche du sol, les effluves d'effet couronne se transforment brusquement en traceurs ascendants, issus généralement d'une saillie (arbre, édifice, tour...), dans la direction du traceur descendant. Car c'est sur son analyse que reposent tous les modèles récents de protection contre la foudre. Disons seulement que lorsque l'un des traceurs ascendants et le traceur par bonds se rejoignent, il s'établit un court-circuit entre le nuage et le sol, qui va permettre le passage d'un courant à forte intensité. Ce courant est en fait constitué par les charges superficielles du sol, induites par les charges du nuage, et qui, en remontant le canal ionisé formé par les traceurs, neutralisent les charges de ces derniers. On observe à ce moment un trait fortement lumineux qui progresse depuis le sol jusqu'au nuage, avec une vitesse estimée au tiers de la vitesse de la lumière : c'est l'arc en retour (return stroke, en anglais). Les différentes étapes de l'évolution d'un coup négatif sont schématisées sur la figure3.1

Plusieurs décharges peuvent ensuite se développer dans le canal fortement ionisé, donc conducteur, formé par le premier arc en retour : on les désigne par coups (ou décharges) subséquents. En général, un coup de foudre complet dure de 0,2 à 2 secondes et comporte en moyenne 4 arcs en retour. Mais on a observé des coups de foudre ayant duré presque 3 secondes, avec de multiples réilluminations, causées par autant d'arcs en retour successifs. Alors que la première décharge est précédée du traceur par bonds, les décharges subséquentes sont précédées d'un traceur continu, beaucoup plus rapide, et appelé trait pilote {dan leader}. Enfin, dans l'intervalle entre les décharges, qui sont des impulsions de courant de forte intensité, un faible courant, de l'ordre de quelques centaines d'ampères, continue à s'écouler par le canal ionisé : c'est le courant persistant, qui écoule une partie non négligeable de la charge totale d'un coup de foudre.

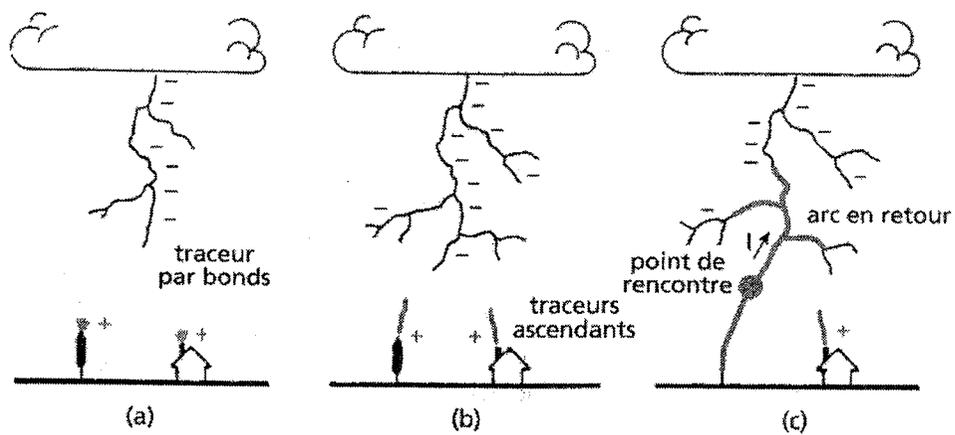


Figure 3.1 Les phases caractéristiques de l'évolution d'un coup de foudre négatif: a) descente du traceur par bonds; b) initiation des traceurs ascendants ; c) rencontre entre un traceur ascendant et le traceur descendant par bonds, puis écoulement du courant d'arc en retour.

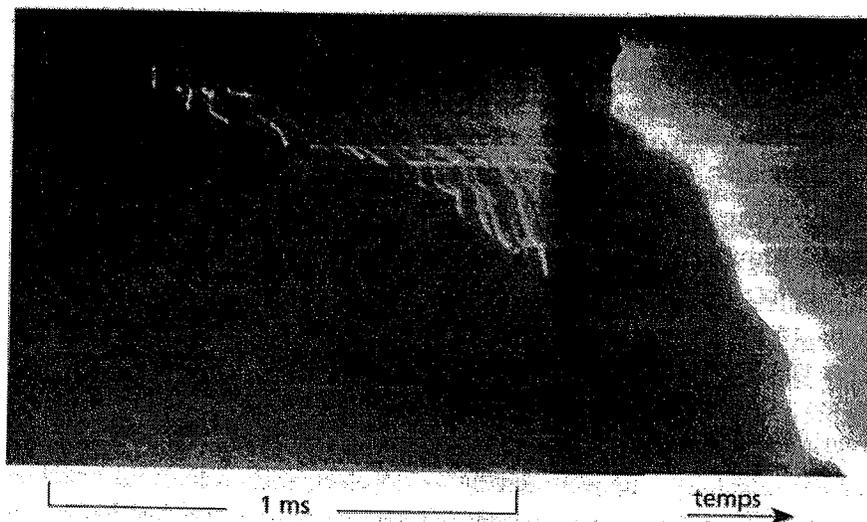


Figure 3.2 Photographie d'un coup de foudre descendant obtenue avec une caméra à tambour tournant.

La figure 3.2 est une caméra gramme obtenu avec une caméra à tambour tournant. Cette caméra, où le film sensible est fixé autour d'un tambour et défile à grande vitesse devant un objectif, est la version moderne de la caméra de Boys.

Ces perfectionnements **sont dus** principalement à K. Berger en Suisse, et à B. F. Schonland et D. J. Malan en Afrique du Sud. La figure3.3 schématise ce que la caméra a enregistré, et

nomme les différentes phases du coup de foudre, qui est ici un coup multiple.

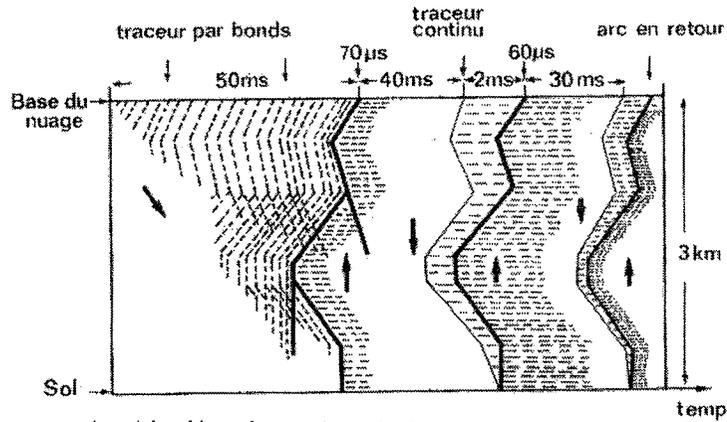


Figure 3.3 Schéma montrant le déroulement spatiotemporel d'un coup descendant.

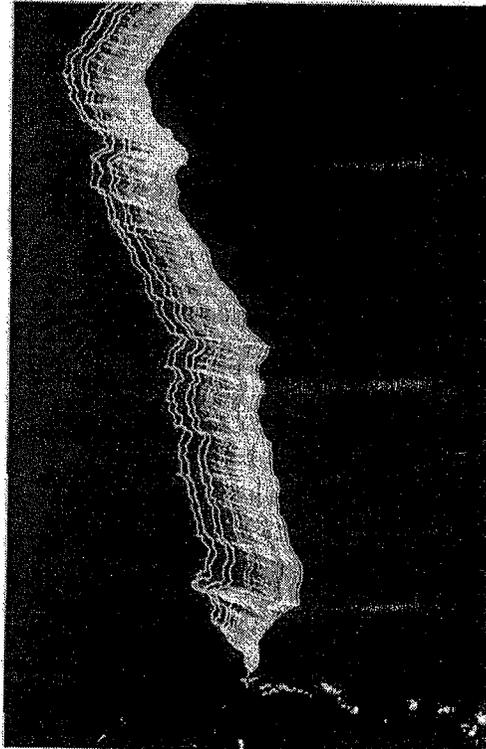


Figure 3.4 Coup de foudre en rideau : cette apparence est due au déplacement du canal ionisé sous l'effet du vent.

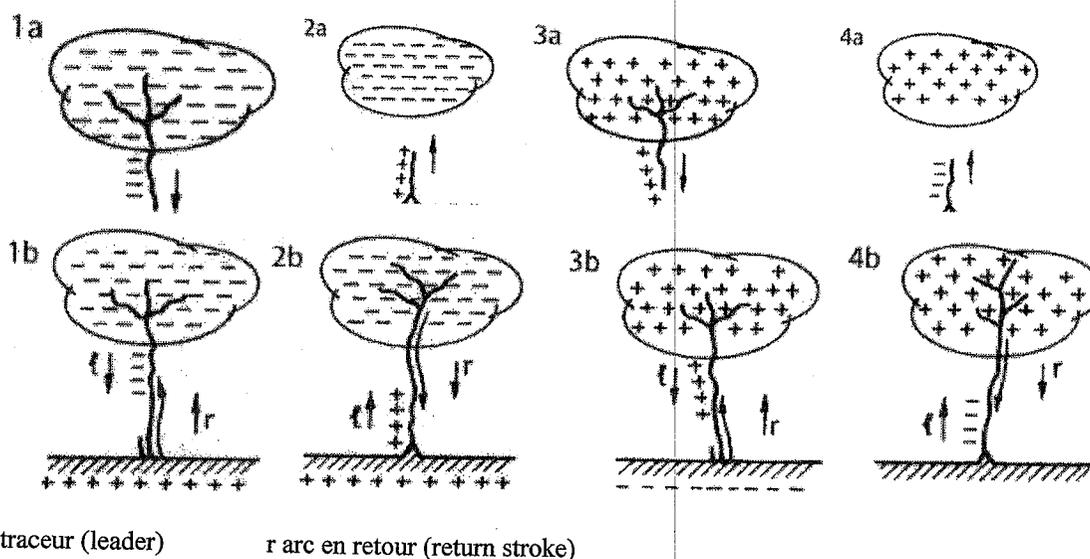
Enfin, à propos de coups multiples, la figure 3.4 montre une décharge atmosphérique sous une apparence tout à fait particulière, que l'on désigne par « coup de foudre en rideau ». L'explication de cette apparence est simple. Par vent, la masse d'air qui contient le canal ionisé de la décharge se déplace dans la même direction que le vent, entraînant le canal avec elle ; si le vent est suffisamment régulier et uniforme, le canal subit une translation horizontale, donc restant parallèle à lui-même, et chaque arc en retour va produire une

illumination décalée dans l'espace : ainsi, si la durée totale de la décharge est de une seconde, et si le vent a une vitesse de 20 mètres par seconde (72 km/h) par exemple, le « rideau » s'étendra sur une largeur de 20 mètres. La photographie permet de compter les arcs en retour, ici au nombre de neuf.

3.3.4 Coups de foudre descendants positifs

Tout comme les coups négatifs, ces coups commencent toujours par un traceur descendant. Dans le cas du traceur positif, le processus de bonds n'existe pas systématiquement, et la progression se fait le plus généralement de façon continue, comme nous l'avons déjà dit, quoiqu'avec une vitesse moyenne sensiblement du même ordre de grandeur (0,2 à 1 mètre par microseconde, comme pour les traceurs ascendants). Une fois le traceur arrivé près du sol, l'arc en retour porteur d'un courant intense existe aussi.

La figure 3.5 résume, selon le professeur K. Berger, les différents types de traceurs aujourd'hui admis par tous les spécialistes.



⚡ traceur (leader) r arc en retour (return stroke)

Figure 3.5 Les différents types de traceurs, selon le professeur K. Berger.

1 a) Traceur négatif descendant normal ; 2a) Traceur positif ascendant issu d'une structure de grande hauteur ; 3a) Traceur positif descendant ; 4a) Traceur négatif ascendant issu d'une structure de grande hauteur (rare).

1b à 4b : arcs en retour correspondant à 1a-4a.

3.3.5 Ionisation et avalanches électroniques

Nous avons à de nombreuses reprises rencontrés les termes d'ionisation, d'effet de couronne, de traceur, d'arc (en retour). Ces différents phénomènes ont tous pour trait commun de rendre l'air conducteur, et sont une combinaison plus ou moins complexe de trois processus physiques fondamentaux : l'avalanche électronique, le détachement, l'attachement.

Pour pouvoir comprendre ces processus, rappelons d'abord quelques propriétés de la matière. Tous les atomes de la matière sont constitués d'un noyau, autour duquel gravitent des

électrons. Le noyau atomique est composé de neutrons et de protons, ces derniers étant porteurs d'une charge électrique positive, alors que les électrons orbitaux sont les porteurs d'une charge négative. Comme la charge d'un électron est égale et de signe opposé à celle du proton, et comme il y a toujours autant d'électrons que de protons dans un atome, celui-ci apparaît globalement neutre. D'autre part, alors que les protons sont fermement liés aux noyaux (du moins aux niveaux d'énergie qui nous intéressent ici), une énergie relativement faible est suffisante pour extraire un électron d'un atome : celui-ci devient donc positif, par déficit d'une charge négative. Un tel atome est un « ion positif ». Inversement, si un électron vient à s'attacher à un atome neutre, cet atome devient négatif, et on est alors en présence d'un « ion négatif ».

L'énergie nécessaire qu'il faut communiquer à un atome neutre de l'air pour l'ioniser s'exprime habituellement en électrons-volts (eV), et est de l'ordre de 10 à 16 eV selon l'atome considéré : oxygène, hydrogène, azote, etc. Il s'ensuit qu'un grand nombre de radiations, dont les photons sont suffisamment énergétiques, sont en permanence en train d'ioniser l'air, quoique très faiblement : ces radiations sont principalement le rayonnement cosmique et la radioactivité naturelle, voire les rayons ultraviolets. Les électrons libérés par ce bombardement photonique « n'aiment pas » rester libres, et s'attachent rapidement à des atomes neutres pour former des ions négatifs. L'air atmosphérique contient ainsi en permanence des ions négatifs et positifs, en quantité variant entre 100 et 1000 ions par centimètre cube, selon l'heure et l'altitude. Les flammes, les fumées, en produisent bien plus, et dans leur voisinage, la concentration ionique se chiffre en termes de dizaines de milliers d'ions par centimètre cube.

Mais il est une autre manière de produire des électrons libres et des ions, en quantité infiniment supérieure : c'est l'avalanche électronique. Considérons un électron qui vient d'être libéré par un photon cosmique, et supposons que cela se passe dans une région de l'espace où règne un champ électrique. Cet électron va être soumis à une force : il va donc subir une accélération et acquérir de l'énergie cinétique. Mais très vite, il va entrer en collision avec un atome neutre. Si à cet instant l'énergie acquise est égale ou supérieure à l'énergie d'ionisation de l'atome considéré, la collision va créer un nouvel électron libre, et on désigne ce processus par « ionisation par choc » ou « ionisation collisionnelle ». Ce nouvel électron se comporte comme le précédent, crée à son tour un électron... Et rapidement, le phénomène prend une allure d'avalanche. Le premier électron qui déclenche cette avalanche est appelé « électron-germe ».

L'intensité de champ électrique nécessaire pour qu'un électron puisse ioniser un atome est de

l'ordre de 30 kV/cm dans l'air à pression normale. Lorsque le champ est inférieur à cette valeur, l'énergie à l'instant de la collision ne peut plus extraire un nouvel électron ; au contraire, l'électron « fatigué » s'attache à l'atome pour former un ion négatif, et est perdu pour l'avalanche. Compte tenu de l'aspect statistique des distributions d'énergie, on constate qu'une avalanche ne peut plus se développer dans un champ inférieur à 26 kV/cm. Enfin, les divers processus fondamentaux que nous venons de décrire produisent aussi de la lumière : c'est le bleu-mauve des effluves.

Voyons alors ce qui se passe devant une pointe. Soit qu'elle génère un champ électrique parce qu'elle est elle-même portée à un potentiel élevé, soit qu'elle soit plongée dans un champ extérieur, dans les deux cas il y a une amplification du champ qui décroît très vite dès que l'on s'éloigne de la pointe. Lorsque le champ macroscopique est inférieur à 26 kV/cm (par exemple sous un nuage orageux), l'avalanche ne pourra se développer qu'entre l'extrémité de la pointe et la zone où il tombe à cette valeur limite. Au-delà, il ne reste que des ions qui s'éloignent lentement, ce qui se manifeste par un courant électrique d'espace. L'analyse détaillée des avalanches montre que lorsque la pointe est de polarité positive, ces ions sont positifs (il manque un électron à l'atome), et lorsqu'elle est négative, les ions sont négatifs (par attachement d'un électron). La taille de la pointe, et en pratique d'une aspérité quelconque, définit pour chaque valeur du champ macroscopique ambiant le volume d'air où le champ est supérieur à 26 kV/cm, et par conséquent l'intensité et la longueur de l'effluve.

Pourquoi alors un traceur, que nous avons aussi appelé canal ionisé, peut-il se développer et progresser dans un champ beaucoup plus faible, par exemple dans un champ de 50 kV/m (0,5 kV/cm) ? C'est que les charges d'espace, constituées par les ions, génèrent leur propre champ, qui se superpose au champ initial ; et comme nous avons vu que les ions formés par les avalanches sont de même polarité que la pointe, leur champ propre s'ajoute, en aval, au champ de la pointe. Lorsque la quantité d'ions atteint une valeur dite critique, le champ en aval devient suffisant pour déclencher de nouvelles avalanches : ainsi, de proche en proche, les avalanches bâtissent un canal ionisé qui s'allonge de plus en plus. On appelle ce processus « l'auto-propagation du traceur ». Pour qu'un traceur puisse auto-progresser, tout se passe donc comme s'il devait d'abord prendre de la vigueur dans une zone suffisamment étendue de champ intense, située juste au-dessus de l'aspérité, puis juste en aval du dernier nuage d'ions formé.

Le canal ionisé, qui relie la pointe et l'avalanche en cours, est rempli d'électrons et d'ions : ceux-ci se déplacent vers l'amont ou vers l'aval, selon leur polarité, sous l'effet du champ qui existe à l'intérieur du canal. Ce processus fait penser à un chemin de fourmis, mais constitue

en fait un courant électrique. Ce faisant, toutes ces particules se heurtent, se bousculent, parfois assez fortement pour créer de nouveaux ions et de nouveaux électrons, et le résultat de cette bousculade est un échauffement. Quand la densité de particules et donc l'échauffement sont relativement faibles, on dit qu'on est en présence d'un plasma froid : c'est le cas d'un traceur, et d'une façon générale des étincelles grêles. Au fur et à mesure que cette densité croît, le plasma tend vers un plasma chaud, et on est en présence d'un arc, dont l'arc en retour de la foudre est un exemple.

3.3.6. Structure et neutralisation du traceur descendant

Comme nous venons de le voir, le traceur se bâtit à partir des avalanches électroniques qui se développent à sa tête. Dans les grandes décharges telles que la foudre, ces avalanches prennent l'aspect de filaments qui se projettent sur plusieurs mètres de longueur, à la manière d'une gerbe de feu d'artifice. Au fur et à mesure de la progression du traceur, les avalanches « mortes » qui restent en arrière contiennent des ions négatifs ou positifs, selon le type du traceur considéré. Il s'ensuit qu'au total, un traceur est constitué :

- d'un noyau central relativement lumineux et conducteur, de deux ou trois centimètres de diamètre, électriquement presque neutre ;
- d'une gaine d'ions entourant ce noyau, qui est au contraire peu conductrice, mais qui porte la quasi-totalité de la charge électrique du traceur ; le diamètre de cette gaine atteint un ordre de grandeur de la dizaine de mètres.

Au moment où le courant d'arc en retour s'engouffre dans le traceur, il profite de la conductivité du noyau central pour remonter vers le nuage ; en même temps, il apporte les charges de signe contraire qui vont envahir la gaine et neutraliser les charges qui la constituent.

Ce double processus de progression et de neutralisation est schématisé par la figure 3.6.

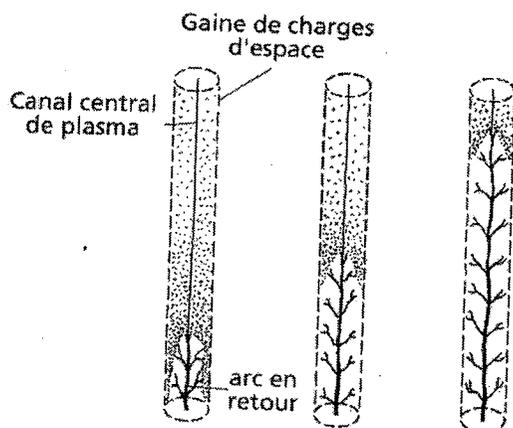


Figure 5.6 Structure du traceur descendant et neutralisation de ses charges par l'arc en retour.

encadré

Note sur les avalanches électroniques

Considérons une ligne de force xx' d'un champ électrique, le long de laquelle l'intensité du champ E est supérieure à 26 kV/cm, et supposons qu'au point x existent N électrons libres. On exprime l'effet multiplicateur par l'accroissement dN du nombre d'électrons le long d'un trajet élémentaire dx en écrivant :

$dN = N\alpha(E) dx$ où $\alpha(E)$ est appelé coefficient multiplicateur de Townsend.

Par intégration, on en déduit immédiatement l'expression générale de l'avalanche électronique:

$$N_1 \exp \left\{ \int_x^x \alpha(E) dx \right\}$$

On remarquera qu'une avalanche se développe toujours en remontant le champ, compte tenu de l'orientation conventionnelle que nous avons affectée à celui-ci. D'autre part, le coefficient $\alpha(E)$ croît rapidement en fonction de l'intensité du champ, et inversement tend vers zéro, lorsque le champ à pression atmosphérique normale tend vers 26 kV/cm. Enfin, l'influence de la pression atmosphérique, et par conséquent de l'altitude, est telle qu'une avalanche peut se développer dans des champs de plus en plus faibles pour une altitude croissante : le seuil d'ionisation décroît proportionnellement à la densité de l'air.

3.4 Les paramètres électriques de la décharge

Nous nous intéressons dans cette partie aux différentes grandeurs électriques qui caractérisent la foudre. Les plus importantes, et que nous allons examiner en premier lieu, sont l'amplitude (la valeur de crête) et l'évolution temporelle (nous dirons plus simplement la « forme ») des courants de foudre.

Coups de foudre négatifs

Les courants de ces coups négatifs sont de forte amplitude et de nature impulsionnelle. Nous avons vu qu'un coup de foudre négatif complet pouvait présenter plusieurs impulsions successives, que l'on désigne par premier coup et coups subséquents. i -

Le premier coup se caractérise par des temps de montée jusqu'à la crête de quelques microsecondes, entre 2 et 20 microsecondes, et par des temps de décroissance de 100 à 200 microsecondes. Les amplitudes s'étendent sur une très grande plage d'intensités, depuis 3 000 ampères pour les plus faibles jusqu'à 200 000 ampères pour les plus fortes. Tout récemment,

on aurait même détecté des intensités de 500 000 ampères.

Les coups subséquents ont quant à eux des temps de montée généralement inférieurs à la microseconde, quelquefois aussi courts que 0,1 microseconde, et des temps de décroissance analogues à ceux du premier coup ; mais leur forme est dans l'ensemble plus régulière et leurs amplitudes plus faibles, dépassant rarement 20 000 ampères. Notons que les impulsions des coups ascendants sont du même type que les coups subséquents.

Coups de foudre positifs :

Les coups positifs se caractérisent par une seule impulsion, mais qui dure beaucoup plus longtemps que les impulsions négatives individuelles. De plus, leurs amplitudes sont globalement supérieures à celles des coups négatifs, et dépassent fréquemment 100 000 ampères, de sorte que ce sont généralement les décharges positives qui causent le plus de dégâts. Outre l'amplitude et la forme, on définit d'autres paramètres des coups de foudre, dont la connaissance est également très utile pour la mise en œuvre des techniques de protection. C'est ainsi qu'on définit les grandeurs suivantes :

di/dt_{max} , vitesse de variation (ou raideur) maximale du courant. La raideur maximale a pratiquement toujours lieu sur le front de montée du coup de foudre. Ce paramètre sert au calcul des tensions induites dans les circuits électriques voisins.

$\int i^2 dt$, intégrale d'action. Ce paramètre exprime l'énergie spécifique, ou énergie dissipée dans une résistance de 1 ohm. C'est la caractéristique qui doit être prise en compte pour l'estimation des effets thermiques, par exemple pour le calcul de la section d'une descente de paratonnerre, en fonction de réchauffement acceptable.

Q, charge totale neutralisée au cours d'une décharge de foudre. Ce paramètre sert à l'évaluation de l'effet de fusion : la quantité de métal fondu au point d'impact, sur une tige de paratonnerre ou sur une toiture métallique, est proportionnelle à la charge écoulee.

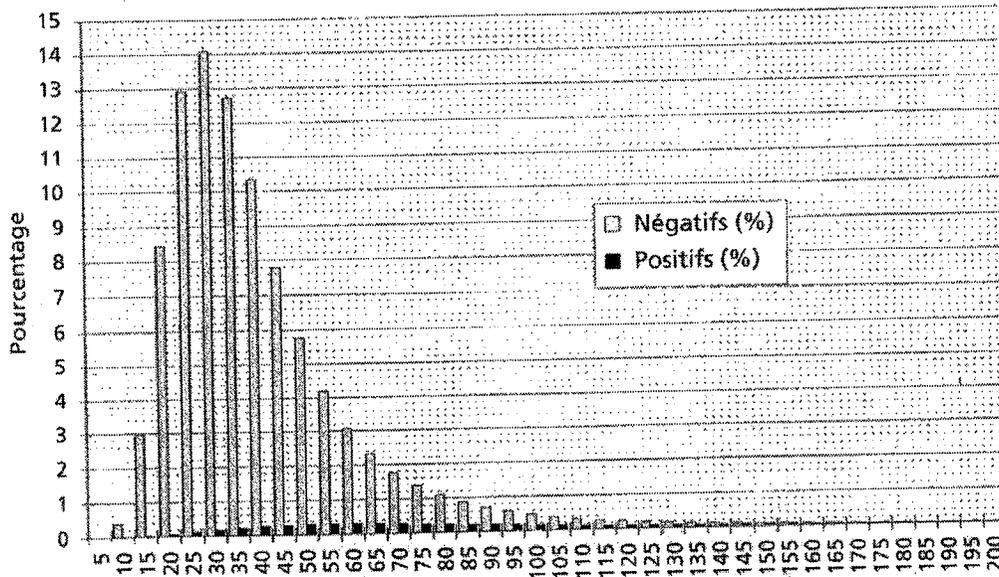
T, durée totale d'une décharge.

n, nombre de réilluminations au cours d'une décharge.

Tous ces paramètres se caractérisent par une très grande dispersion des valeurs d'un coup à l'autre. De plus, leurs distributions statistiques obéissent à une loi de probabilité de type log-normale : cela signifie que si l'on porte sur un graphique le logarithme du paramètre considéré en abscisse, et la probabilité pour que la valeur de ce paramètre soit dépassée en ordonnée, on obtient sensiblement des droites à condition que l'ordonnée porte une graduation spéciale appelée « échelle gaussienne ».

À titre d'exemple, la figure 4.2 donne la distribution statistique des amplitudes des différents

types de coups de foudre. Pointons par exemple sur l'histogramme la valeur « 20 kA » : nous voyons que cette valeur a une probabilité de 8,4 % d'exister.



Intensité de chacun des coups de foudre en kilo Ampères

Figure 4.2 Distribution statistique des amplitudes des courants de foudre.

L'intensité de plus grande fréquence est ici de 30 kA, et une intensité de 100 kA a encore une probabilité de 0,5 % de se produire. Les coups de foudre positifs sont plus rares, mais l'intensité de probabilité maximale est de 55 à 60 kA.

Le tableau suivant donne, comme c'est l'usage, les probabilités (retenues par le Comité pour la protection contre la foudre, Comité technique 81 de la Commission électrotechnique internationale) pour chaque valeur des paramètres énoncés d'être dépassés.

PARAMETRES CARACTERISTIQUES DES DECHARGES DE Foudre.

PARAMÈTRE	UNITÉ	PROBABILITÉ		
		95%	50%	5%
Amplitude				
Premier coup (minimum 2)	kA	7	33	85
Coup subséq.		4,6	12	30
Coup positif		4,6	35	250
Raideur max.				
Premier coup		9,1	24	65
Coup subséq.	kA/μs	10	40	162
Coup positif		0,2	2,4	32
Énergie spécifique				
Premier coup	A2S	$6,0 \times 10^3$	$5,5 \times 10^4$	$5,5 \times 10^5$
Coup subséq.		$5,5 \times 10^2$	$6,0 \times 10^3$	$5,2 \times 10^4$
Coup positif		$2,5 \times 10^4$	$6,5 \times 10^5$	$1,5 \times 10^7$
Charge totale				
Déch. négative	c	1,3	7,5	40
Déch. positive		20	80	350
Durée totale				
Déch. négative (max. 3 000)	ms	0,15	13	1 100
Déch. positive		14	85	500
Nombre de réillum (max.)	n	1	2	6

3.5 Phénomènes associés aux décharges de foudre**5.1. La lumière et le tonnerre**

Au moment où l'intense courant d'arc en retour s'écoule le long du canal ionisé que constitue le traceur, ce canal est brusquement très fortement chauffé et se transforme instantanément en un véritable arc électrique. Une violente lumière est alors émise : des analyses spectroscopiques, effectuées notamment par R. E. Orville aux Etats-Unis, ont mis en évidence des températures d'arc comprises entre 20 000 et 30 000 °K, et un diamètre d'arc de l'ordre de deux centimètres a pu être mesuré.

Si les chercheurs s'intéressent à l'arc de foudre, c'est que celui-ci a de nombreux points communs avec les arcs industriels, mais c'est surtout l'aspect « plasma » qui intéresse les fondamentalistes. En effet, la connaissance des caractéristiques du plasma permet la modélisation du canal de foudre, qui permet à son tour d'expliquer la forme des courants de foudre, d'où également les paramètres de son rayonnement électromagnétique. Pendant que le courant d'arc en retour s'écoule, des forces électrodynamiques produisent une striction du canal, jusqu'à le rendre très étroit. L'élévation de température qui s'en suit provoque ensuite

une violente dilatation du canal, si bien que l'on peut dire que le cœur du canal explose, produisant une violente onde de choc supersonique (voir aussi Effets de déflagration). L'intensité de l'onde de choc, qui évolue après quelques dizaines de mètres en onde acoustique, puis de cette onde acoustique elle-même, dépendent de l'intensité du courant de foudre, mais est aussi conditionnée par la brièveté de l'impulsion de ce courant. Le phénomène n'est pas sans rappeler le « bang » des avions supersoniques. Dans le cas de l'éclair intra-nuage, les courants s'écoulant dans le canal ionisé sont moins intenses, et leurs formes beaucoup plus allongées : c'est pourquoi la pression acoustique de l'onde sonore produite est aussi beaucoup plus faible.

L'impression faite par le tonnerre sur l'observateur est très différente selon son éloignement du point d'éclatement. Pour expliquer la durée d'un roulement de tonnerre, on invoque souvent les échos, sur les montagnes, voire sur les nuages eux-mêmes. S'il y a une part de vérité dans cette explication, la durée d'un coup de tonnerre est principalement due au fait que le canal présente une grande longueur, y compris la partie interne au nuage, souvent non visible : le bruit émis par chaque segment élémentaire parvient à l'observateur avec un décalage temporel différent. Par ailleurs, les composantes de fréquences élevées engendrées par l'onde acoustique se propagent suivant une direction privilégiée, perpendiculaire au segment de canal considéré, alors que les fréquences basses rayonnent de façon omnidirectionnelle.

Il en résulte que, selon l'orientation relative d'un segment élémentaire par rapport à l'observateur, le bruit sera perçu comme un claquement sec ou comme un bruit sourd. C'est donc en définitive la combinaison de la distance à l'observateur et de l'orientation respective des segments successifs du canal de foudre qui détermineront le bruit global perçu. La succession de grondements et de claquements constitue une véritable « signature sonore » d'un coup de foudre. La figure 6.4 schématise le rayonnement acoustique d'un coup de foudre.

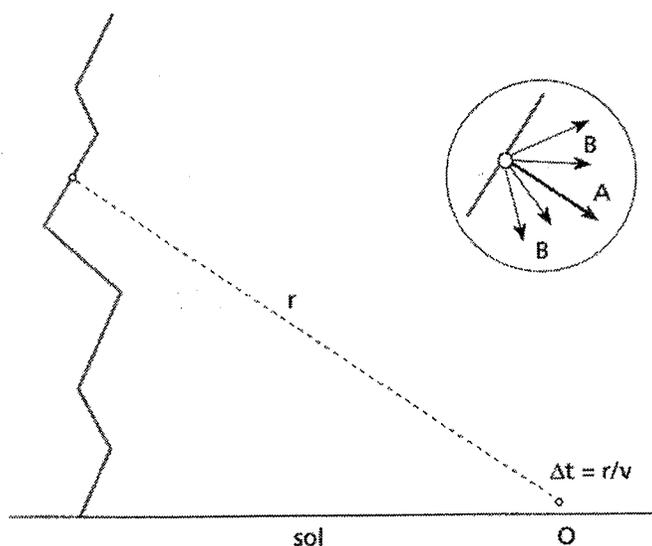


Figure 6.4 Rayonnement acoustique d'un arc en retour : formation du tonnerre. A, rayonnement radial des fréquences élevées. B, rayonnement omnidirectionnel des fréquences basses.

Cependant, la perception à distance est relativement restreinte : elle dépasse à peine dix kilomètres (soit environ trente secondes de délai entre l'illumination et le tonnerre). La portée sonore dépend aussi de la direction du vent et elle est d'autant plus faible que la température décroît plus vite avec l'altitude.

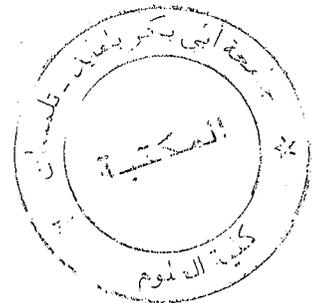
5.2. L'énergie de la foudre

Est-il intéressant de capter l'énergie de la foudre ? C'est là une question souvent posée. On pourrait croire en effet que l'énergie électrique dissipée par les orages est importante. En réalité, s'il est exact que la puissance instantanée de la foudre est énorme (100 à 107 mégawatts), la puissance moyenne reste relativement modeste.

Pour s'en convaincre, il suffit d'intégrer l'énergie dissipée annuellement par l'ensemble des coups de foudre frappant le pays. En se basant sur une différence de potentiel nuage-sol de 100 millions de volts et sur une charge moyenne par éclair de 20 coulombs, on arrive à une puissance permanente de moins de 100 mégawatts, soit moins du dixième d'une tranche nucléaire moderne. De plus, on imagine les difficultés techniques qu'il faudrait résoudre pour capter une énergie aussi diffuse et aléatoire que celle de la foudre.

ChapitreIV :

LES EFFET DE LA Foudre ET LES SYSTEMES DE PROTECION



4. Les effets physiques de la foudre

4.1. Effets sur les bâtiments non protégés

Les toitures, les clochers, d'une façon générale les bâtiments non métalliques, mais aussi les arbres, sont de mauvais conducteurs de l'électricité. Lorsqu'ils sont frappés par la foudre, le courant de foudre cherche toujours le chemin de moindre résistance pour s'écouler à la terre. Si le bâtiment est en pierre par exemple, le courant cherche à se frayer un chemin par les interstices entre les moellons, surtout s'ils contiennent de l'humidité. Par effet Joule, cette humidité est instantanément échauffée et vaporisée. Du fait de la brièveté du courant de foudre, et comme conséquence de la surpression considérable qui résulte de la vaporisation, le phénomène prend une allure d'explosion, et est capable de projeter des moellons de bonne taille, jusqu'à des distances de la centaine de mètres. La figure 11.1 montre un exemple caractéristique de ce type de dégâts, provoqués ici par le foudroiement d'un clocher en pierres.

Par le même processus, lorsque la foudre frappe un toit de tuiles, le courant se faufile entre celles-ci, en les soulevant, souvent en les projetant au loin. Toujours dans sa recherche du chemin de moindre résistance, il arrive très fréquemment que le courant rejoigne la filerie électrique, causant des dégâts à l'installation, ou à des canalisations, ou aux gouttières et à leurs descentes. La photographie de la figure 11.2 illustre les dégâts occasionnés par la chute de la foudre sur un clocher de tuiles : on y distingue très nettement le chemin emprunté par le courant, le long duquel celui-ci a fait sauter une ligne entière de tuiles.

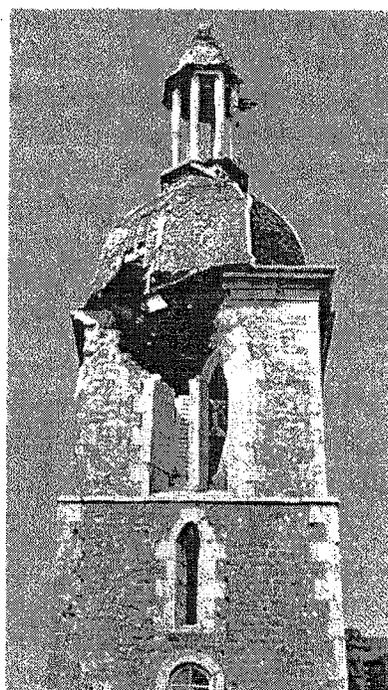


Figure 11.1 Clocher de pierre éventrée par la foudre.

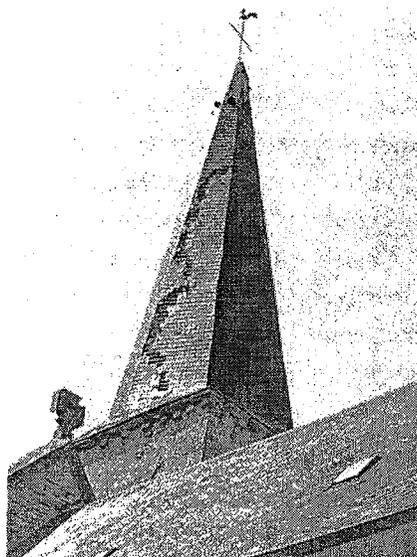


Figure 11.2 Ligne de tuiles arrachées de la flèche d'un clocher par la foudre.

Enfin, lorsque la foudre frappe un élément de construction en béton armé, le champ électrique intense qui apparaît dans le béton y provoque un claquage diélectrique, par lequel le courant rejoint les ferrures intérieures. Toujours en vertu du même processus de dilatation, des parcelles plus ou moins grosses de béton volent en éclat, mettant les ferrures à nu. Celles-ci sont alors soumises à l'oxydation ou à la corrosion, et à plus ou moins longue échéance, leur dégradation peut entraîner de graves dommages à la construction. Si le canal de la foudre rencontre sur son chemin une pièce métallique ou un trajet de moindre résistance qui le conduit vers l'intérieur d'une habitation ou d'un local, la foudre provoquera les mêmes phénomènes explosifs, voire des incendies, dans les pièces d'habitation, dans les cuisines ou salles d'eau, causant ainsi des dégâts considérables. Un trajet préférentiel guidant la foudre peut être une fente, une conduite d'eau ou une canalisation électrique verticales alimentant des étages, ou encore une cheminée enduite de suie. Les dégâts se produisent principalement aux points où le courant de foudre pénètre dans et sort des guides métalliques, ainsi qu'à l'intérieur des fentes et cheminées.

4.2. Effets sur les arbres

C'est toujours le même phénomène d'échauffement et de vaporisation de l'humidité qui fait éclater les arbres ou les poutres en bois. Le courant chemine de préférence par les trajets où s'accumule l'humidité, c'est-à-dire par les vaisseaux pleins de sève, et très souvent entre

l'écorce et le bois des arbres : le tronc est fendu, déchiqueté, et des débris d'écorce et de bois en sont arrachés. La figure 11.3 (à gauche) présente un arbre frappé par la foudre en mai 1993, au manoir de Tout-La-Ville, dans le Calvados, et la figure 11.3 (adroite) est une illustration de l'état dans lequel on peut trouver un arbre après foudroiement.

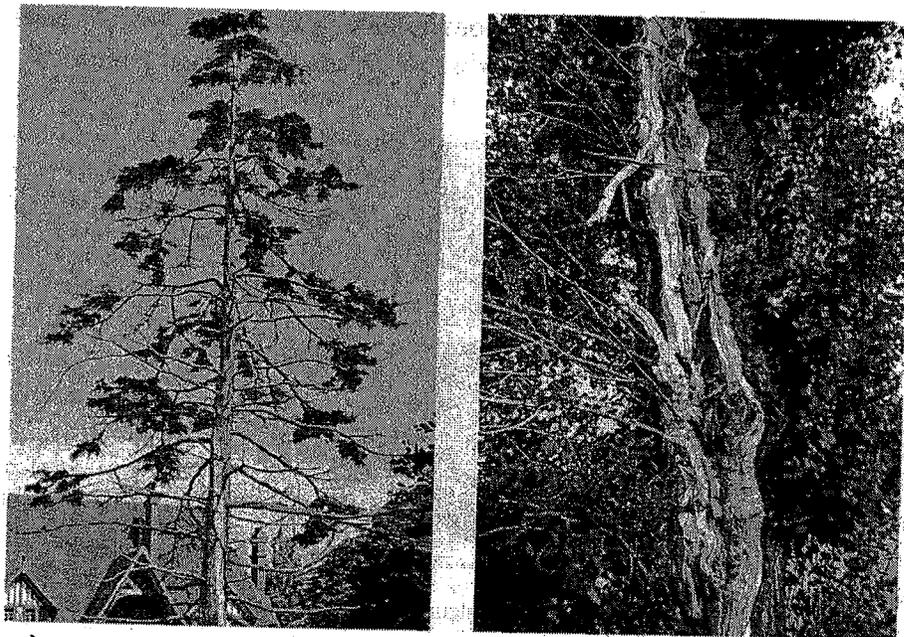


Figure 11.3 À gauche : arbre foudroyé en mai 1993 près du manoir de Tout-La-Ville, Calvados. À droite : aspect d'un arbre foudroyé.

4.3. Écoulements particuliers de la foudre dans le sol

Nous avons déjà fait une allusion au phénomène curieux de la formation des fulgurites, appelées aussi « pierres de foudre » dans le langage populaire. Ce sont des blocs solides qui se forment par la vitrification de sols siliceux, notamment sablonneux, sous l'effet de l'intense chaleur produite par les courants de foudre au voisinage immédiat du point d'impact. La vitrification se développe généralement sous forme de ramifications cylindriques irrégulières, de 10 à 50 mm de diamètre. Si le sable est du quartz presque pur, le tube sera transparent, sinon il prendra une couleur grise à noire. On trouve de ces fulgurites dans toutes les régions foudroyées du globe, pourvu que la nature du sol s'y prête. Tout récemment, en février 1993, une expédition dirigée par le professeur Théodore Monod, et à laquelle prenait part le géophysicien E. Diemer, a découvert des fulgurites dans la partie du Sahara appelée désert lybique. La figure 11.4 en présente quelques exemplaires, d'après

un cliché dû à M. Diemer. Certaines fulgurites ont des ramifications qui s'étendent sur plusieurs mètres de longueur ; malheureusement, leur extraction est délicate, et il arrive souvent qu'elles se cassent au cours de cette opération. Les fulgurites trouvées au Sahara sont actuellement soumises à des examens de datation ; notons que cette découverte risque d'apporter des informations importantes sur les variations climatiques du Sahara à travers les âges.

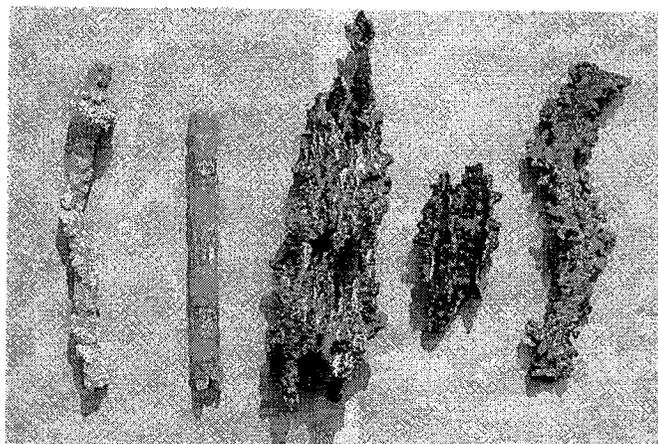


Figure 11.4 Quelques exemples de fulgurites trouvées dans le Sahara libyque.

Lorsque le sol est électriquement très mauvais conducteur, au lieu de pénétrer en profondeur, les courants de foudre peuvent s'écouler en surface, sous forme d'étincelles s'étirant sur des dizaines de mètres de longueur : on les appelle alors « étincelles glissantes », ou « arcs glissants ». Cette manifestation de la foudre est fréquente en montagne, et se produit même parfois sur le pavement devant une église, si celle-ci ne possède pas de paratonnerre et de prise de terre. Quelquefois aussi, les courants de foudre creusent de véritables saignées en surface, ce qui se produit notamment dans les terrains où le sous-sol mauvais conducteur est recouvert d'une couche d'humus bonne conductrice.

4.4. Effets sur les conducteurs

Quand un courant de foudre s'écoule à travers un conducteur, il l'échauffe par effet Joule, comme le ferait tout autre courant électrique. Mais la conductivité d'un conducteur métallique étant bien supérieure à celle de la faille évoquée plus haut, réchauffement est évidemment bien moindre, même avec des sections de conducteurs relativement faibles.

Pour bien montrer que les courants de foudre sont pratiquement inoffensifs quand ils parcourent des conducteurs, considérons le cas d'un courant très violent, d'une énergie spécifique de $107\text{J}/\text{cm}^2$, et plaçons-nous dans des conditions d'un échauffement du conducteur de 150°C au-dessus de la température ambiante : le calcul nous indique que ces conditions sont satisfaites avec une section de seulement 20 mm^2 pour un conducteur de cuivre, de 25 mm^2 pour l'aluminium, et de 75 mm^2 pour le fer. Ce n'est que pour des conducteurs très minces, de l'ordre de quelques millimètres carrés, que la fusion du métal se produit : c'est pourquoi il arrive assez fréquemment que des câbles d'antennes de télévision soient retrouvés fondus à la suite d'un foudroiement.

Il y a lieu de faire ici une remarque sur le calcul d'échauffement. Lorsqu'on effectue un tel calcul, on admet généralement que réchauffement est adiabatique : cela signifie que la durée du courant de foudre est suffisamment brève pour que, pendant ce processus, le conducteur ne cède aucune énergie à l'environnement, ni par rayonnement calorifique, ni par convection. Cette hypothèse conduit à légèrement surévaluer la température atteinte par le conducteur. Mais par ailleurs, on risque de commettre une erreur par défaut si on considère simplement la résistance du conducteur en courant continu : du fait de leur nature impulsionnelle, les courants de foudre doivent être assimilés à des courants à haute fréquence, et en conséquence, il convient de prendre l'effet pelliculaire en compte. L'effet pelliculaire traduit la propriété qu'ont les courants à haute fréquence de se confiner à la périphérie des conducteurs, ce qui a pour effet d'augmenter la résistance apparente de ceux-ci. Cela montre l'intérêt des conducteurs de grande surface : méplats ou multibrins.

Un autre effet, également thermique, des courants de foudre sur les conducteurs, est la fusion de métal aux points de pénétration et de sortie. Ce phénomène ne doit pas être rattaché à l'effet Joule, tel qu'on l'entend habituellement, mais au phénomène dit « de tache anodique » ou de « tache cathodique », selon le sens du courant à l'interface arc-métal. Au niveau de cette interface, il se produit un intense dégagement de chaleur, dont l'énergie est donnée par le produit : charge écoulee multipliée par la chute de tension dans la tache. Cette chute de tension est évaluée à 15 à 20 volts, de sorte qu'une charge écoulee de 100 coulombs par exemple dégage une énergie de 1 500 à 2 000 joules, soit un peu plus de 400 calories. Cette chaleur entraîne la fusion d'environ 200 millimètres cube de métal, volume par ailleurs assez indépendant de la nature du métal.

Lorsque l'impact a lieu sur une pièce de métal massive, les traces de fusion n'ont aucune conséquence grave ; on observe souvent ces traces sur les pointes de paratonnerres, ce qui n'empêche pas celles-ci de continuer à assurer leur fonction de protection. Mais lorsque l'impact se produit sur des feuilles de métal minces, de 0,1 à 0,5 mm d'épaisseur selon le métal, la fusion peut percer des trous dont le diamètre atteint jusqu'à deux centimètres. Les dégâts peuvent alors dans certains cas être graves, comme par exemple lorsque la foudre frappe un toit métallique de hangar abritant des matières inflammables (granges), ou un réservoir de pétrole, d'essence, de méthane, etc. En effet, la formation du trou s'accompagne presque toujours de projections de métal en fusion, et ce sont évidemment ces projections qui sont dangereuses. Pour cette raison, la normalisation internationale impose maintenant des épaisseurs minimales de tôles, lorsque ce risque existe.

Dans un même ordre d'idée, les mauvais contacts sont des points particulièrement dangereux sur le parcours d'un courant de foudre. Des résistances de contact de quelques millièmes d'ohm provoquent déjà des dégagements de chaleur assez grands pour que des quantités de métal appréciables puissent être liquéfiées et gicler en étincelles. Ce phénomène peut se produire si des jonctions de descentes de paratonnerre sont desserrées ou oxydées, ou encore aux raccords de descentes d'eaux pluviales. Ce genre d'étincelles giclantes est très dangereux dès que des établissements ou des fabriques sont sujets à des risques d'explosions, aussi une vérification fréquente de l'installation de protection est-elle indispensable dans ces cas.

Enfin, des effets d'une tout autre nature sont les forces électrodynamiques. Ces effets produisent des efforts mécaniques, chaque fois que des parties de conducteurs par où s'écoulent des courants de foudre se trouvent dans le champ magnétique créé par d'autres parties. Ainsi, lorsqu'un conducteur prend la forme d'une boucle, même ouverte, il apparaît des forces de répulsion qui ont tendance à déformer la boucle en l'agrandissant.

Lorsque des courants de foudre s'écoulent dans deux conducteurs parallèles, la force électrodynamique est une force d'attraction qui s'exerce entre les deux conducteurs, d'autant plus intense que les conducteurs sont rapprochés et que le courant est fort. Pour donner un exemple numérique, si deux conducteurs sont écartés de 2 cm, et si chacun d'eux écoule un courant de 50 000 ampères, la force qui s'exerce entre eux atteindra une valeur

aussi énorme que 2 500 kilogrammes par mètre de conducteur. C'est ainsi que des tubes minces ou des gaines de câbles s'écrasent et peuvent se retrouver complètement aplatis.

4.5. Effets de déflagration

Au voisinage immédiat du canal de foudre, la dilatation quasi instantanée de l'air entraîne l'émission d'une intense onde de choc, qui va provoquer une surpression considérable, semblable à celle du « bang » des avions supersoniques. R. D. Hill a étudié en 1971 les surpressions générées au voisinage d'un canal de foudre. Pour un courant de foudre de 30 000 ampères, il a mesuré à 2 mètres du canal une surpression de l'ordre de 20 bars, et à 4 mètres, cette surpression était encore de 7 à 8 bars. Ce n'est qu'au-delà de la dizaine de mètres que cette onde de choc se transforme progressivement en onde sonore. Lorsqu'un objet forme obstacle au passage de l'onde de choc, il est soumis à une violente poussée : c'est ainsi qu'on a vu des panneaux ou des murs véritablement renversés par la déflagration ; c'est ainsi que l'on peut aussi s'expliquer que des personnes s'étant trouvées près d'un coup de foudre aient été projetées ou déplacées de plusieurs mètres, apparemment sans aucune lésion d'origine électrique. Par contre, cet effet, qu'on désigne par « effet de souffle », ou « effet de blast » (de l'anglais *blast effect*), peut provoquer chez une victime projetée à distance des hémorragies internes graves ou une rupture tympanique par barotraumatisme.

4. 6. Systèmes de protection intérieure

4. 6.1. Les phénomènes physiques en jeu

Les protections intérieures ont précisément pour fonction d'éviter ce genre d'incidents. Mais avant de les décrire, nous allons examiner les différentes causes de « surtensions » qui provoquent ces dégâts. Le lecteur a peut-être déjà eu l'occasion d'entendre dans son habitation, à l'instant où un coup de foudre tombe dans son voisinage immédiat, des crépitements suspects provenant des prises de courant, ou même d'être le témoin d'étincelles sautant d'une prise de courant à une canalisation d'eau, à un corps de chauffage central, ou même entre pièces métalliques différentes, si celles-ci sont mises à la terre. Ces phénomènes se produisent surtout à la campagne, où les habitations sont espacées les unes des autres, et où les lignes électriques et de téléphone sont aériennes. D'une façon générale, on est déconcerté par l'abondance de traces d'étincelles que l'on relève après un violent

coup de foudre, même dans des bâtiments pourvus d'une installation de paratonnerre.

La première cause de surtension est la chute de la foudre sur, ou près d'une ligne aérienne ; le courant de foudre génère localement une impulsion de tension dans les conducteurs de cette ligne, impulsion qui va ensuite se propager jusqu'à l'habitation. Plus l'impact a été proche, plus élevée sera l'amplitude de cette impulsion au point d'entrée de la ligne dans l'habitation. On appelle cette impulsion une « surtension de foudre ». Les amplitudes de ces surtensions sont généralement de l'ordre de plusieurs milliers de volts pour les lignes à basse tension (220/380 volts) et pour les lignes téléphoniques ; elles sont largement suffisantes pour provoquer des étincelles et des claquages dans l'isolement des appareils électriques, et des dommages aux appareils électroniques.

La deuxième cause de surtensions est le phénomène d'induction électromagnétique. Les courants de foudre d'impacts proches, et plus encore les courants s'écoulant par les descentes de paratonnerre lors d'un coup direct, génèrent à l'intérieur des bâtiments un champ magnétique rapidement variable. Toute boucle fermée, et en particulier tout circuit électrique soumis à ce champ seront l'objet d'une surtension induite, proportionnelle à la vitesse de variation du courant et à la valeur du coefficient de couplage électromagnétique : ce phénomène s'exprime par la loi d'induction de Faraday, bien connue. Une telle surtension est capable non seulement de détruire les composants électroniques, mais aussi de provoquer des claquages dans des circuits électriques à basse tension et dans l'appareillage électroménager.

La troisième cause enfin conduit à des surtensions d'amplitudes beaucoup plus élevées que les précédentes, et qui sont par conséquent les plus dangereuses : elle se produit lorsque le courant de foudre d'un impact direct sur un paratonnerre s'écoule par la prise de terre de l'installation. Le mécanisme en est le suivant : une prise de terre se caractérise nécessairement par une certaine résistance électrique, que l'on peut mesurer entre les conducteurs de mise à la terre d'une part, et la « terre lointaine » d'autre part. Au moment de l'écoulement du courant, il se produit donc une « montée en potentiel » des conducteurs de terre par rapport à cette terre lointaine, qui, elle, conserve par définition un potentiel nul. Cette montée en potentiel peut atteindre des valeurs considérables, comme va le montrer

un exemple numérique. Soit une prise de terre dont la résistance est de 20 ohms, et supposons que le courant de foudre de l'impact direct ait une amplitude de 50 000 ampères (donc bien au-dessous des amplitudes les plus élevées). En vertu de la loi d'Ohm, la montée en potentiel des conducteurs de terre prendra la valeur :

$$50\,000\text{ A} \times 20\ \Omega = 1\,000\,000\text{ V, c'est-à-dire un million de volts !}$$

Si seule la prise de terre montait à ce potentiel, ce serait sans conséquences, et on pourrait en rester là. Mais ne perdons pas de vue que les conducteurs de descente et de toiture y sont raccordés, et qu'ils vont donc aussi être portés à ce potentiel. On imagine les claquages d'isolants des murs et toitures qui pourront se produire, et les étincelles qui pourront jaillir vers les éléments métalliques, tels que canalisations électriques ou d'eau, situés à proximité de ces conducteurs, de l'autre côté des cloisons. Il est évidemment possible, lors de la conception du système de protection, de ménager des distances suffisantes pour éviter ces claquages, et c'est bien ce que recommandent les normes, en l'absence d'autres mesures exposées plus loin.

Mais en réalité, loin de se limiter aux conducteurs du système de protection extérieure proprement dits, la montée en potentiel se répartit dans le sol, en décroissant progressivement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la prise de terre. Ainsi, à 10 mètres d'une prise de terre en « patte-d'oie », le potentiel local est encore de l'ordre de 20 % de la montée en potentiel totale, soit avec l'exemple précédent, de 200 kV. Il en résulte que tous les éléments mis à la terre, tels que canalisations ou câbles enterrés, de même que la terre de sécurité des appareils électriques (obligatoire aujourd'hui), vont être portés à un certain potentiel dépendant de leur localisation par rapport à la prise de terre « foudre ». Il en résulte également que des différences de potentiel importantes vont apparaître entre ces divers éléments, différences qui seront de nouvelles causes d'étincelles et de claquages. Ce phénomène est appelé « couplage résistif » entre terres.

4.6. 2 Les dispositifs de protection

Prise de terre

Les premières mesures à prendre concernent le système des terres. On s'efforcera tout d'abord de réaliser une prise de terre « foudre » la meilleure possible ; compte tenu de son coût et de la nature des sols, on recommande une valeur inférieure à dix ohms. Mais dans des sols mauvais conducteurs, comme des sols sableux ou rocheux, cette valeur est difficile à

respecter, et la norme française accepte alors trente ohms.

Équipotentialisation

Même avec une bonne prise de terre, il est clair que les problèmes posés par le couplage résistif demeurent. Pour s'en affranchir, la méthode recommandée actuellement par la normalisation internationale consiste à relier électriquement entre elles toutes les masses métalliques du bâtiment, à savoir les diverses conduites et canalisations, les rails de guidage d'ascenseurs, les installations sanitaires, les réservoirs, ainsi que les « terres » de tous les appareils électroménagers, et de connecter tout cet ensemble à la prise de terre « foudre ». On appelle cela l'équipotentialisation de l'installation, parce que grâce à cette interconnexion, il ne peut plus apparaître de différences de potentiel entre éléments. En pratique, outre l'interconnexion des masses, les terres de tous les appareils électriques sont ramenées par les conducteurs de terre prévus par les constructeurs (conducteur à isolation vert-et-jaune incorporé dans le cordon d'alimentation) à une barrette de cuivre placée près du tableau électrique d'entrée ; cette barrette est elle-même raccordée à la prise de terre générale, constituée par la prise de terre « foudre » et par les conduites enterrées. On notera que ces conduites, pourvu qu'elles soient métalliques, participent à l'écoulement des courants de foudre en cas de coup direct sur le bâtiment, et qu'elles font partie intégrante de la mise à la terre. Cette technique d'interconnexion, rendue obligatoire par les normes modernes, va exactement à l'encontre des recommandations anciennes, qui préconisaient des prises de terre séparées : prise de terre « foudre », prise de terre « sécurité », prise de terre « électronique ». Et cela simplement parce que, comme nous l'avons vu, le couplage entre prises de terre rend leur séparation illusoire.

Dispositifs de limitation des surtensions

Une fonction essentielle de la protection intérieure est comme nous l'avons vu, la protection des appareils électriques, électroniques et de télécommunication contre les surtensions apparaissant entre l'arrivée des lignes extérieures d'alimentation ou de transmissions des signaux d'une part, et le système équipotentiel des terres d'autre part. Ces surtensions pénètrent vers l'intérieur par propagation le long des lignes, par rayonnement électromagnétique, mais peuvent aussi être générées par les montées en potentiel locales.

Dans ce dernier cas, on dira qu'il se produit une « surtension en retour ». Comme il est impossible de connecter les lignes directement au réseau équipotentiel, sous peine de court-circuit, on les connecte par l'intermédiaire de dispositifs de limitation de surtensions, dont le nom générique est « parafoudres ». Notons que ceux qui protègent le téléphone assurent en même temps la sécurité des personnes lorsqu'elles téléphonent par temps d'orage, à condition que l'équipotentialisation intérieure soit bien réalisée.

Il existe aujourd'hui sur le marché plusieurs types de dispositifs de protection.

Les éclateurs à gaz,

les plus anciens, mais toujours utilisés : ce sont des ampoules en verre, dans lesquelles sont disposées deux électrodes face-à-face dans un mélange gazeux convenable, et entre lesquelles jaillit un arc électrique dès que la surtension dépasse une certaine valeur. La tension d'amorçage de l'arc est comprise entre quelques centaines de volts et le kilovolt. Ils sont principalement utilisés pour la protection des équipements de télécommunication. Toutefois, ils ont deux inconvénients : d'abord, ils réagissent aux surtensions avec un retard de quelques microsecondes, le temps nécessaire pour que l'arc s'amorce ; ensuite, tout en assurant l'écrêtement de la surtension, ils provoquent un court-circuit que doit éliminer le disjoncteur d'entrée. Afin de parer à ce deuxième inconvénient, il est possible d'installer un dispositif interne complémentaire qui permet le «soufflage » de l'arc.

Les parafoudres à oxyde de zinc (ZnO),

les plus utilisés aujourd'hui. Le composant principal de ces parafoudres est la varistance : c'est une pastille de forme cylindrique à base d'oxyde de zinc, composé dont la résistance électrique a la propriété d'être non linéaire ; cela signifie qu'elle présente une très grande valeur vis-à-vis de la tension de service de l'alimentation, mais cette valeur s'effondre lorsqu'une surtension se présente à ses bornes, ce qui entraîne un efficace effet d'écrêtement ; la résistance reste néanmoins suffisamment élevée pour ne pas conduire à un court-circuit. Selon le diamètre et l'épaisseur de la pastille élémentaire, et en empilant si nécessaire plusieurs pastilles, ces parafoudres sont capables de protéger les équipements et composants de toutes tensions ; une petite pastille pour protéger les équipements fonctionnant à faible tension (électroniques et informatiques), une pastille plus grosse pour les alimentations en énergie, par exemple en 230/380 volts. Les critères principaux de choix

des parafoudres sont leur niveau de protection (ou tension résiduelle), qui caractérise leur aptitude à écrêter les surtensions, et leur pouvoir d'écoulement des courants associés aux surtensions.

Les diodes Zener

se caractérisent par des niveaux de protection très bas, de l'ordre de la dizaine de volts, et sont donc bien appropriées à la protection des circuits informatiques. Par contre, leur pouvoir d'écoulement des courants de surtension est faible. Il faut les connecter au plus près des équipements sensibles, et elles doivent toujours être associées à des parafoudres plus robustes, par exemple un éclateur à gaz ou une varistance, généralement installés en amont, à l'entrée des lignes. Cependant, des dispositifs récemment développés, qui garantissent la protection même en fin de vie des Zener, permettent de les utiliser seules.

IV. 6.3. Coordination des protections - mise en cascade de parafoudres.

Comme nous venons de le voir, il peut arriver, lorsqu'un niveau de protection bas est nécessaire, que l'on ne puisse pas trouver de solution avec l'installation d'un seul parafoudre. On est alors obligé de mettre en place deux, voire plusieurs dispositifs de protection en cascade. La coordination de ces dispositifs requiert une étude soignée, car le dispositif à niveau de protection bas peut être détruit avant que le parafoudre amont ne puisse agir. L'insertion d'un élément de découplage, par exemple une longueur de ligne ou une bobine d'inductance, peut alors être nécessaire. Signalons toutefois que des dispositifs de protection très élaborés ont été mis au point, qui permettent de s'affranchir de la nécessité d'une cascade (cf. § diodes Zener).

