

### I-1 Introduction

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive qui se produit lorsque de l'électricité statique s'accumule entre le nuage d'orage et la terre.

L'objectif de ce chapitre est de présenter une description générale sur la phénoménologie de la foudre notamment la décharge nuage-sol dans sa phase d'arc en retour.

Ensuite nous présentons les observations expérimentales des courants de foudre et des champs électromagnétiques.

### I-2 Mécanisme de la formation de l'orage

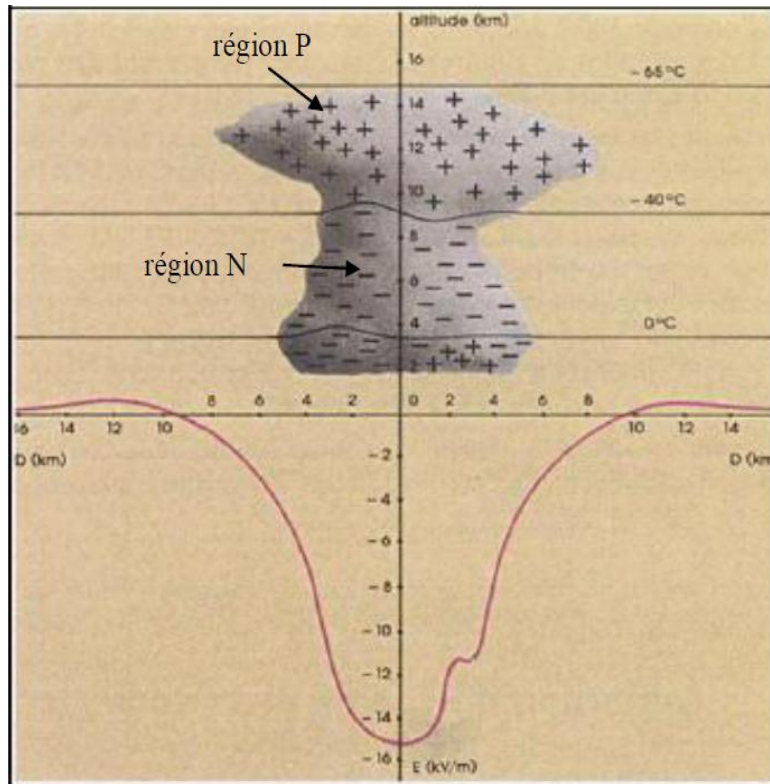
La foudre est définie comme une décharge électrique d'une longueur de plusieurs kilomètres associée à une impulsion de courant transitoire de très forte amplitude.

La source la plus commune de la foudre est la séparation des charges dans les nuages d'orage, les cumulo-nimbus. [1]

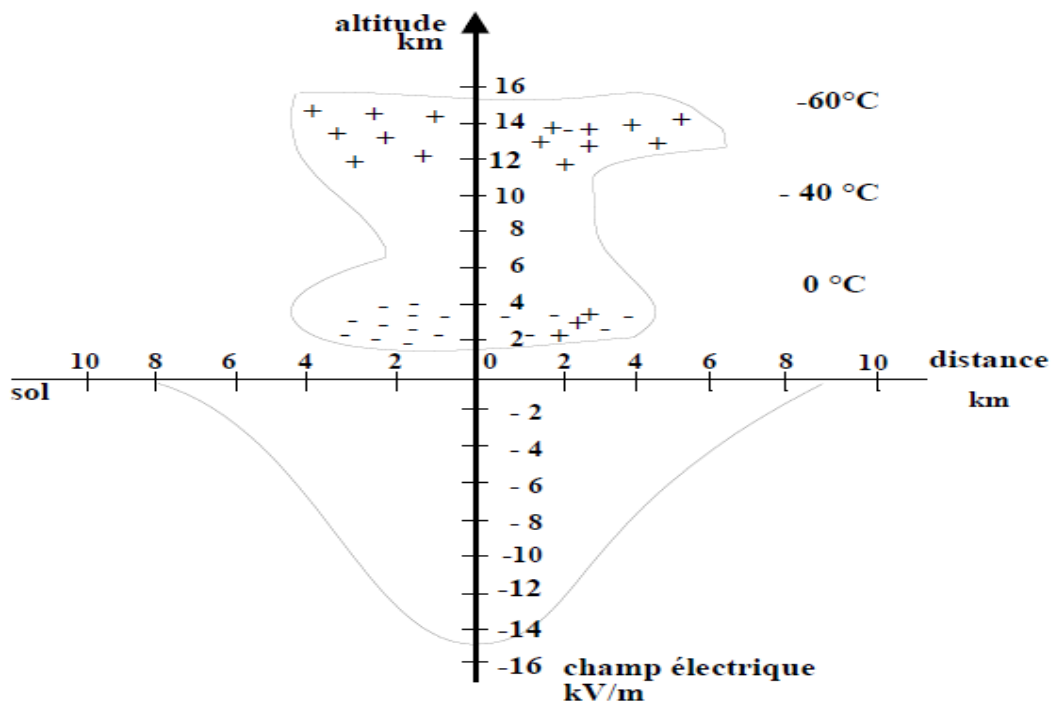
Les orages les plus fréquents font suite à des fronts froids. A l'arrivée d'un de ceux-ci, la masse d'air froid s'infiltré sous l'air chaud et le soulève; ceci engendre des turbulences dans l'air chaud rejeté en altitude: ainsi se forment les nuages d'orage ou les cumulo-nimbus [1].

L'électrisation de ces nuages résulte d'un processus complexe. La distribution des charges dans un nuage orageux est présentée dans la figure I.1. On distingue trois parties sont commencer par La partie supérieure, constituée de glace, chargée positivement (région "P"), ensuite La partie inférieure, constituée de gouttelettes d'eau, chargée négativement (région "N"),

Enfin la troisième partie Un îlot de charges positives enserré dans la masse de charges négatives est peut être à l'origine du déclenchement d'une décharge de la foudre. A l'approche d'un nuage orageux, le champ électrique atmosphérique au sol qui est de l'ordre d'une centaine de volts par mètre par beau temps commence par s'inverser, puis croît dans de fortes proportions. Lorsqu'il atteint la valeur de 10 à 20 kV/m, une décharge au sol est imminente [2].



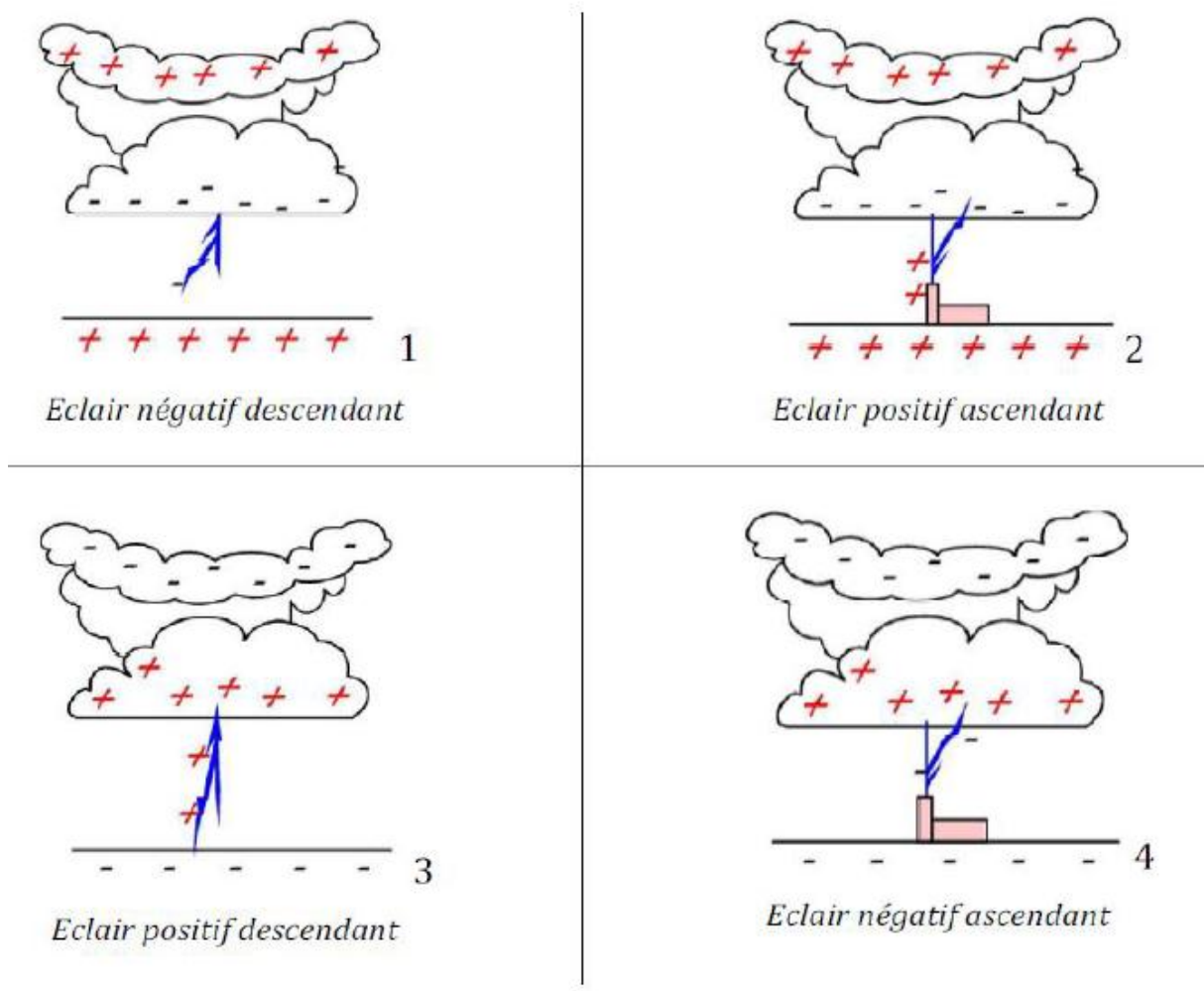
**Figure I-1** La distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage répartition du champ électriques au sol au moment au va éclater la foudre [2].



**Figure I-2** évolution du champ électrique sous un nuage orageux [3].

## I-3 Catégories de coup de foudre

Les décharges de foudre nuage-sol ont été subdivisées en quatre catégories. [[ Ces catégories sont définies selon d'une part la direction, ascendante ou descendante, Du traceur (leader en anglais) qui déclenche la décharge, et d'autre part le signe de la charge portée par le traceur, positive ou négative [4]



**Figure I.3** Classification des coups [5].

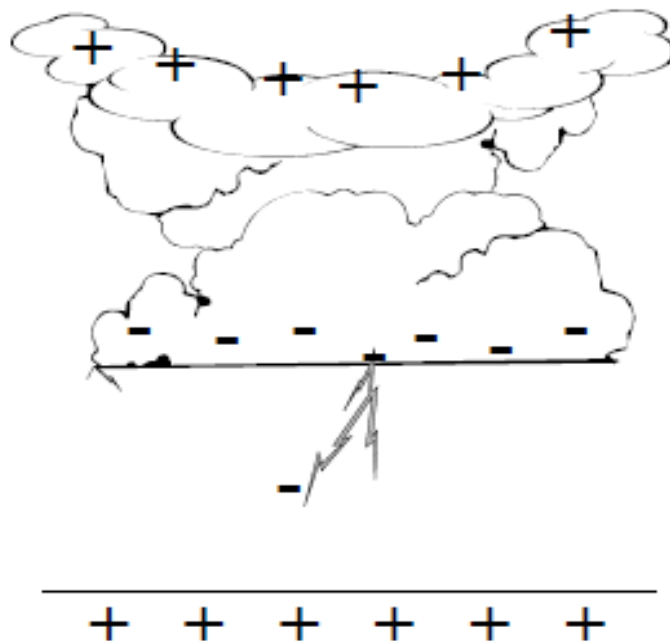
Cette figure au-dessus présentée en quatre phases, la première phase est Le bas du cumulonimbus est chargé négativement, le sol positivement. Le coup de foudre est donc de type négatif (1).deuxième phase est un traceur chargé positivement se propage par bonds successifs du nuage vers le sol, déterminant le caractère descendant du coup de foudre (3).Ensuit Lorsque ce traceur négatif approche du sol, le champ électrique est amplifié (les particules de charges opposées s'attirent) et un traceur positif apparaît, se dirigeant du sol vers le nuage (2) .finalement Lors de la

rencontre de ces deux traceurs, un canal conducteur se crée entre le sol et le nuage, entre lesquels la différence de charge électrique est importante. Ce canal permet le passage d'un courant électrique de forte intensité : c'est l'arc retour ou coup de foudre (4).

Après le premier éclair ainsi généré, d'autres coups de foudre peuvent se produire, qui utilisent le même canal conducteur jusqu'à la décharge complète du nuage. Signalons qu'une phase de courant persistant fait suite au premier arc de retour. Ce courant est souvent à l'origine des effets thermiques les plus importants [5].

#### I.4 Décharges négatives nuage-sol

Dans les régions tempérées, plus de 90% des coups de foudre nuage sol sont de cette catégorie .Ce type de décharges appelées décharges négatives, Cette forme de décharge est déclenchée par un traceur descendant chargé négativement. Le traceur ici progresse en direction du sol par bonds successif d'environ 10 mètre La figure ci-dessous illustre ce catégorie [1].



**Figure I.4** Décharge négative [5].

## I.5 Observations expérimentales des courants de foudre et des champs électromagnétiques

### I.5.1 Caractérisation du courant de l'arc en retour

A cause de mesurer directement le courant de l'arc en retour à la base du canal, la connaissance du point d'impact de la foudre est nécessaire. Les techniques utilisées de nos jours pour l'obtention des données expérimentales des courants de foudre sont Déclenchement artificiel de la foudre (Figure I.5 et I.6).et L'utilisation des tours instrumentées (Figure I.7) Dans les deux techniques, l'idée principale est d'augmenter la probabilité des impacts de la foudre aux points prédéfinis.

Cette technique du déclenchement artificiel de la foudre permet de provoquer celle-ci lors de passage de nuages orageux et de l'attirer en un lieu déterminé. A l'approche d'un nuage orageux, on lance en direction du nuage une petite fusée (Figure I.6) qui déroule derrière elle un fil mince métallique s'échappant d'une bobine. Lorsque la fusée atteint une certaine hauteur, typiquement 200 à 300 m, un traceur ascendant est déclenché du sommet de la fusée. Le courant de foudre s'écoule alors le long du fil métallique, tout en le volatilisant [6].



**Figure I.5** Exemple d'un déclenchement artificiel de la foudre en Floride [7].



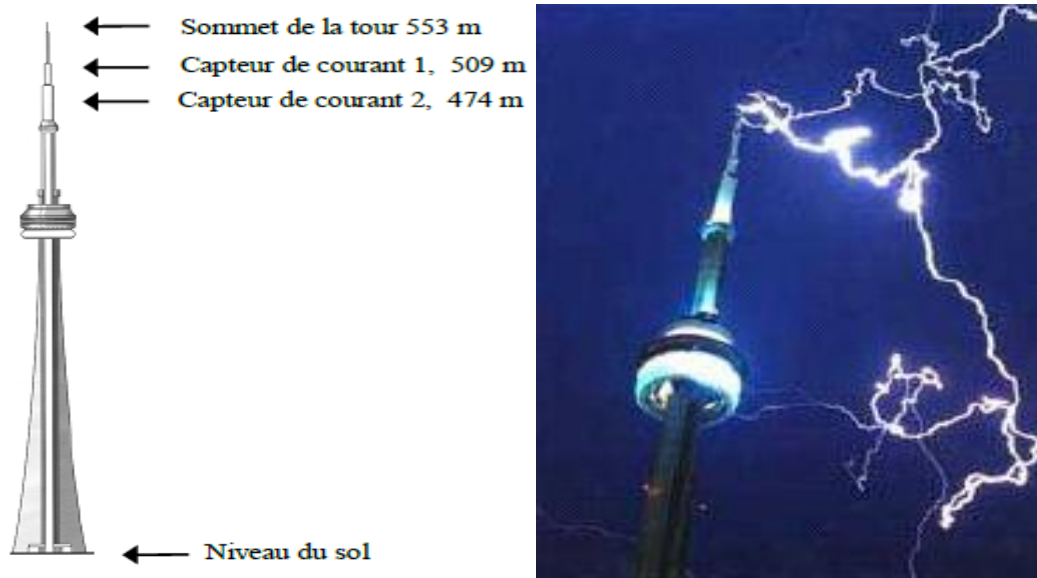
(a)

(b)



(c)

**Figure I.6** Lanceurs et fusées utilisés lors d'un déclenchement artificiel de la foudre  
(a) lanceur fixe, (b) lanceur mobile et (c) fusées [8].

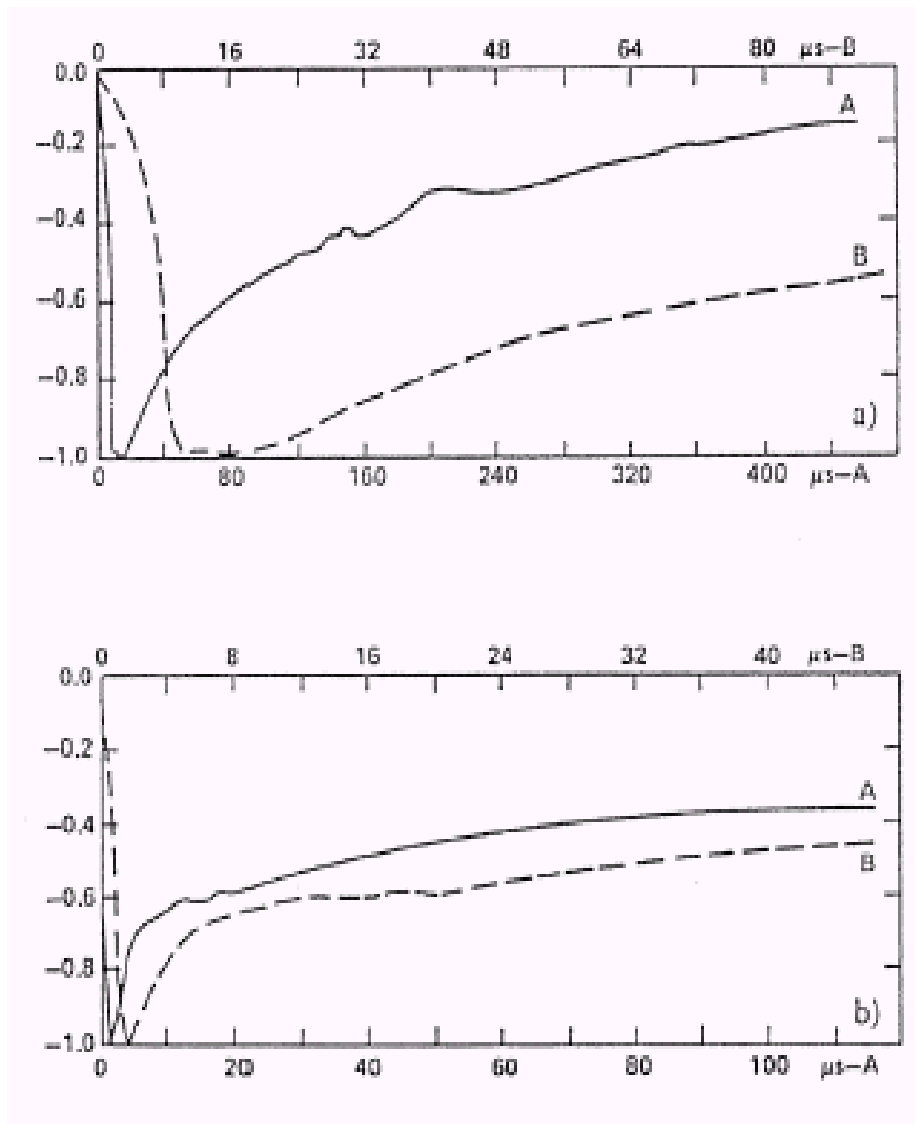


**Figure I.7** Exemple de mesure de courant de foudre en utilisant une tour instrumentée. Tour CN à Toronto au Canada [7].

#### A. Données obtenues en utilisant de petites tours (moins de 100 m)

La description la plus complète du courant de l'arc en retour à la base du canal de foudre est donnée par l'équipe du Professeur *Berger*, [4] qui durant les années 1950-1980 a exploité une station expérimentale au sommet de Monte San Salvatore, Lugano, Suisse. La mesure du courant a été effectuée au sommet de deux tours de 55 m de haut. Environ 15 % des mesures rapportées par l'équipe du Prof. *Berger* sont dues à des traceurs descendants (Figure I.3.1). La plupart des décharges sont initiées par des traceurs ascendants positifs et négatifs (Figure I.3.2 et I.3.4). La figure I.9 illustre les formes moyennes des courants typiques correspondant aux arcs en retour premier et subséquent d'une décharge négative. Dans cette figure, il est possible de voir un temps de montée rapide du courant correspondant à l'arc en retour subséquent.

La distribution statistique des principaux paramètres du courant est présentée dans le tableau I.1. [2].



**Figure I.9** Forme moyenne normalisée du courant des arcs en retour premier et subséquent (a) premier arc en retour, (b) arc en retour subséquent [4].



**Tableau. I.1** : Paramètres du courant d'un coup de foudre descendant négatif [5][6].

Paramètre	Unité	Nombre d'évènement	Pourcentage de cas dépassant la valeur indiquée		
			95%	50%	5%
<b>Courant de crête</b>					
Premier arc en retour négatif	KA	101	14	30	80
Arc en retour subséquent négatif	KA	135	4.6	12	30
<b>Charge totale</b>					
Premier arc en retour négatif	C	93	1.2	5.2	24
Arc en retour subséquent négatif	C	122	0.2	1.4	11
<b>Temps de montée (2 kA-crête)</b>					
Premier arc en retour négatif	$\mu\text{sec}$	89	1.8	5.5	18
Arc en retour subséquent négatif	$\mu\text{sec}$	118	0.22	1.1	4.5
<b>di/dt maximal</b>					
Premier arc en retour négatif	KA/ $\mu\text{sec}$	92	5.5	12	32
Arc en retour subséquent négatif	KA/ $\mu\text{sec}$	122	12	40	120
<b>Durée de l'impulsion (2 kA-mi-amplitude)</b>					
Premier arc en retour négatif	$\mu\text{sec}$	90	30	75	200
Arc en retour subséquent négatif	$\mu\text{sec}$	115	6.5	32	140
<b>Interval de temps</b>					
entre deux décharges négatives	msec	133	7	33	150

De ce tableau, on peut extraire les remarques suivantes concernant les décharges de foudre descendantes négatives:

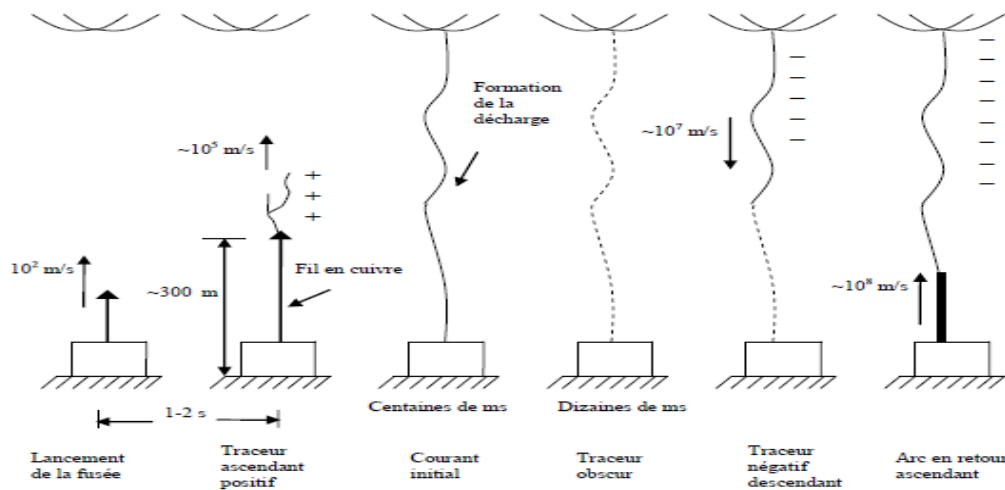
- Les amplitudes du courant du premier arc en retour sont supérieures à celles des arcs en retour subséquents.

- La valeur maximale de la variation du courant dans le cas d'un arc subséquent est supérieure à celle du premier arc en retour.

- Le temps de montée du courant de l'arc en retour subséquent est plus rapide que celui d'un courant du premier arc en retour.
- La durée de l'impulsion du courant de l'arc en retour subséquent est inférieure à celle du premier arc en retour.

**B. Données obtenues en utilisant le déclenchement artificiel de la foudre**

Cette technique donne en plus des informations sur le courant à la base du canal de foudre, le champ électromagnétique associé. La figure I.10 illustre une séquence d'évènements lors d'un déclenchement artificiel « classique » de la foudre.



**Figure I.10** Séquence d'évènements d'un déclenchement artificiel classique de la foudre [9].

Rakov [9] a résumé les caractéristiques du courant de l'arc en retour, à savoir le pic du courant et le pic de sa dérivée à partir de deux campagnes expérimentales l'une en France et l'autre en Floride comme il est indiqué au tableau I.2.

**Tableau I.2** Caractérisation du courant de l'arc en retour [9]

L'endroit	L'année	Nombre d'évènement	Valeur moyenne du pic du courant (kA)	Valeur moyenne du pic de la dérivée du courant (kA/μs)
Floride	1985-1991	305/134	12.1	91.4
France	1986, 1990-1991	54/47	9.8	36.8

Dans ce tableau, on note une similitude entre la valeur moyenne du pic du courant mesurée en Floride et celle rapportée par le Professeur *Berger* (Tableau I.1).

La technique du déclenchement artificiel de la foudre constitue un outil très fiable pour bien comprendre la phénoménologie d'une foudre naturelle [7]. En effet, les résultats obtenus par cette technique seront virtuellement impossibles à obtenir à partir des recherches faites sur une foudre naturelle à cause de l'aspect aléatoire de la foudre tant sur le plan spatial que sur le plan temporel.

### C. Données obtenues en utilisant des tours élevées (plus de 100 m)

Dans cette section, on présente trois exemples de mesure du courant de l'arc en retour en utilisant une tour élevée instrumentée :

#### ❖ tour d'Ostankino à Moscow

Cette tour est de 540 m de hauteur, le courant est mesuré dans trois endroits de la tour : 47 m, 272 m et 533 m (Figure I.11). On remarque que la forme du courant mesuré change d'un endroit à l'autre, la valeur du pic de ce courant augmente en allant du sommet de la tour vers le sol, Bermudez [7] rapporte que ceci est dû aux réflexions multiples de l'onde de courant au sommet avec un coefficient négatif et les réflexions multiples à la base de la tour avec un coefficient positif.

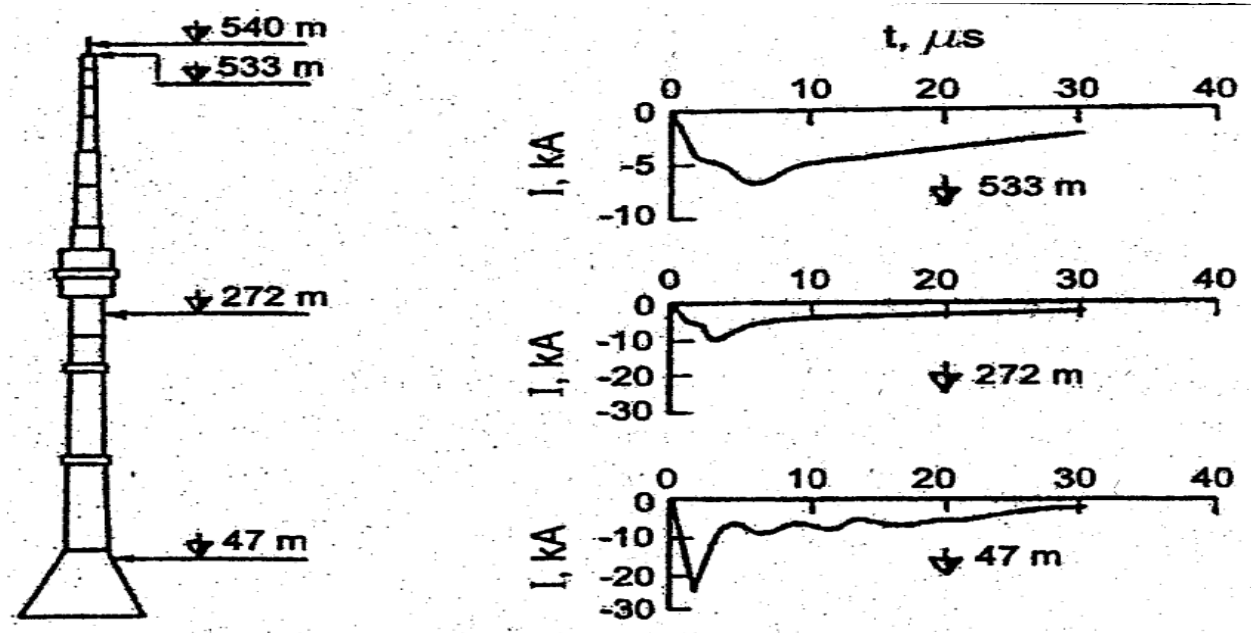
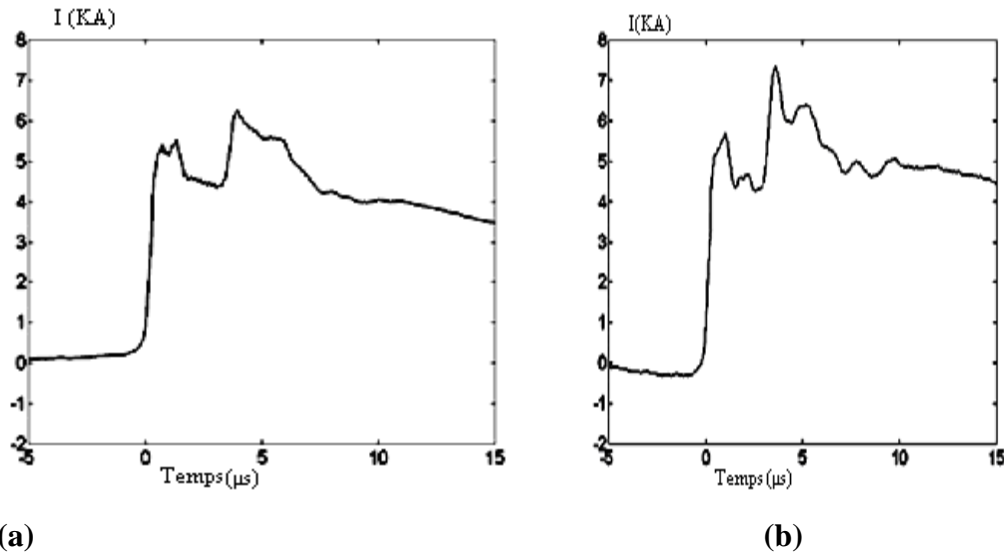


Figure I. 11 Formes du courant mesuré à 533m, 272m et 47m sur la tour d'Ostankino, Moscow [10].

**❖ tour CN à Toronto au Canada**

La tour CN est la tour la plus élevée dans le monde, en tout les cas jusqu'à présent, elle est de 553 m de hauteur, le courant de l'arc en retour est mesuré à 474 m et à 509 m. Les mesures effectuées en 1999 sont présentées sur la figure I.12.

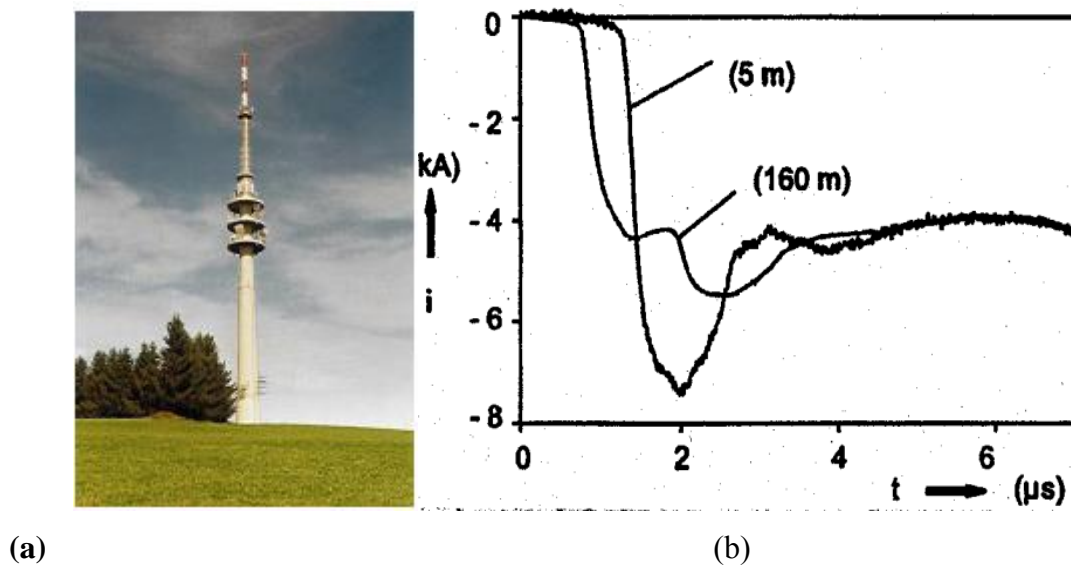


**Figure I.12** Courant de l'arc en retour : (a) 509 m et (b) 474 m [7].

On a les mêmes remarques que pour le cas précédent, sauf que dans ce cas, la forme du courant est plus complexe, Shostak [11] rapporte que ceci est dû à la structure complexe de la tour CN.

**❖ tour Peissenberg en Allemagne**

Cette tour est de 168 m de hauteur, les mesures du courant de l'arc en retour sont. Effectuées à 167 m et 13 m. La figure I.13.a montré une photographie de la tour Peissenberg et la figure I.13.b décrit les variations temporelles du courant d'arc en retour mesuré simultanément, au sommet et à la base de la tour. La contamination du courant par les réflexions multiples est bien mise en évidence.



**Figure I.13** (a) La tour Peissenberg, (b) Courant mesuré au sommet et à la base de la tour [7].

### I.5.2 Estimation indirecte des courants à partir des systèmes de détection de la foudre

Les systèmes de détection de la foudre (Lightning Location systèmes : LLS) constituent une référence pour le développement des normes liées à la protection des réseaux électriques et des systèmes de télécommunication contre la foudre [12]. La méthode la plus utilisée dans les LLS, consiste en la diduction du courant d'arc en retour à partir du champ électrique ou magnétique mesuré à grande distance du point d'impact de la foudre. Les estimations des paramètres de ce courant à partir des mesures du champ électromagnétique lointain, sont obtenues de manière empirique ou théorique [13].

En général, l'obtention de la forme précise du courant d'arc en retour, à partir du champ électromagnétique rayonné, est difficile. En revanche le pic du courant peut être estimé avec une erreur d'environ 20% en fonction du pic du champ, en supposant que la vitesse de l'arc en retour est connue [14].

Les études empiriques [14] développées dans le cas d'un déclenchement artificiel de la foudre, montrent une relation linéaire entre le pic du courant et le pic du champ électrique pour une vitesse constante.

Cependant, la vitesse change d'un arc à un autre, ce qui donne une dispersion statistique significative [13].

Rachidi et al. [15] Ont suggéré qu'une estimation statistique (en terme de valeurs moyennes) est nécessaire, vu qu'avec la grande variation des principaux paramètres tels que la

vitesse de l'arc en retour, il est impossible de déduire un courant exact à partir des mesures du champ électromagnétique rayonné effectuées sur un seul événement.

Ces auteurs ont proposé une équation qui relie la valeur moyenne du pic du courant de l'arc en retour avec celle du champ électrique, tout en considérant une valeur moyenne de la vitesse de l'arc en retour.

### **I.5.3 Vitesse de l'arc en retour**

La vitesse moyenne de l'arc en retour est de l'ordre du tiers de la vitesse de la lumière. La vitesse des arcs en retour subséquents est en général plus grande que celle des arcs en retour premiers. D'autre part, il a été mis en évidence que la vitesse de l'arc en retour, tant pour les premiers que pour les subséquents, décroît en fonction de la hauteur; cette décroissance est plus marquée pour les premiers arcs en retour [6].

### **I.5.4 Caractérisation du champ électromagnétique rayonné par la foudre à différentes distances du point d'impact**

#### **a. Distances supérieures à 1km**

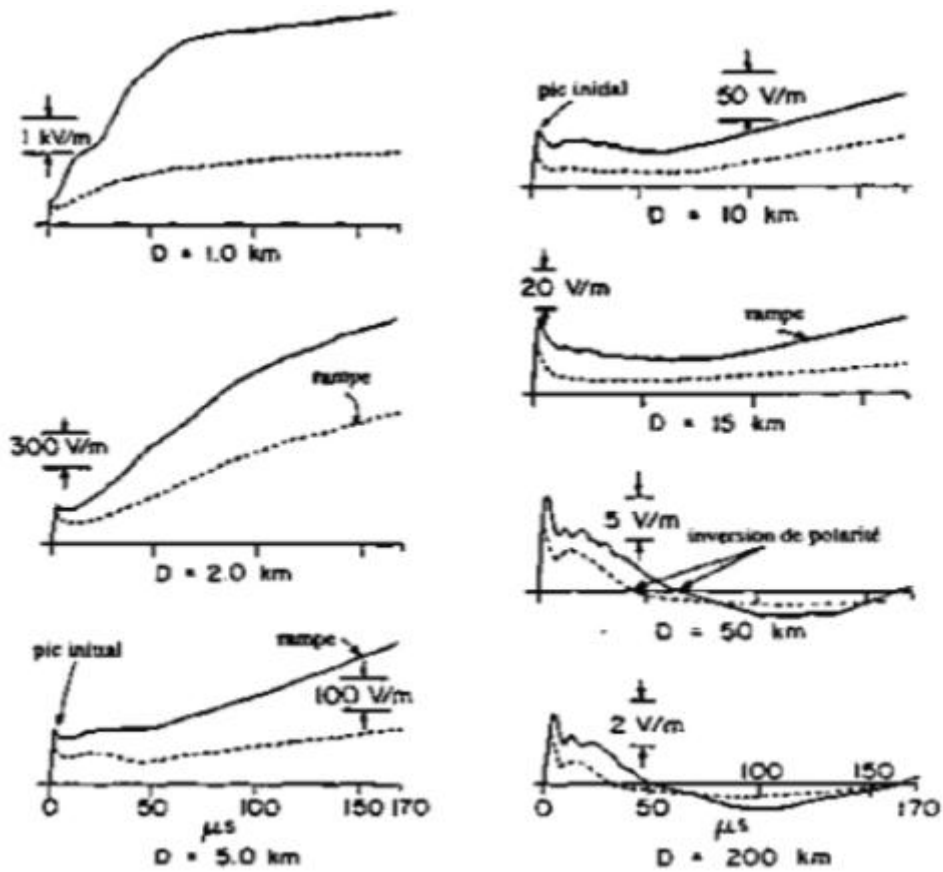
Les figures I.13 et I.14 présentent les caractéristiques des champs électriques et magnétiques en fonction de la distance du point d'impact selon Lin et al [17].

Dans ces figures les courbes en trait continu correspondent aux premiers arcs en retour et celles en traits discontinus aux arcs en retour subséquents.

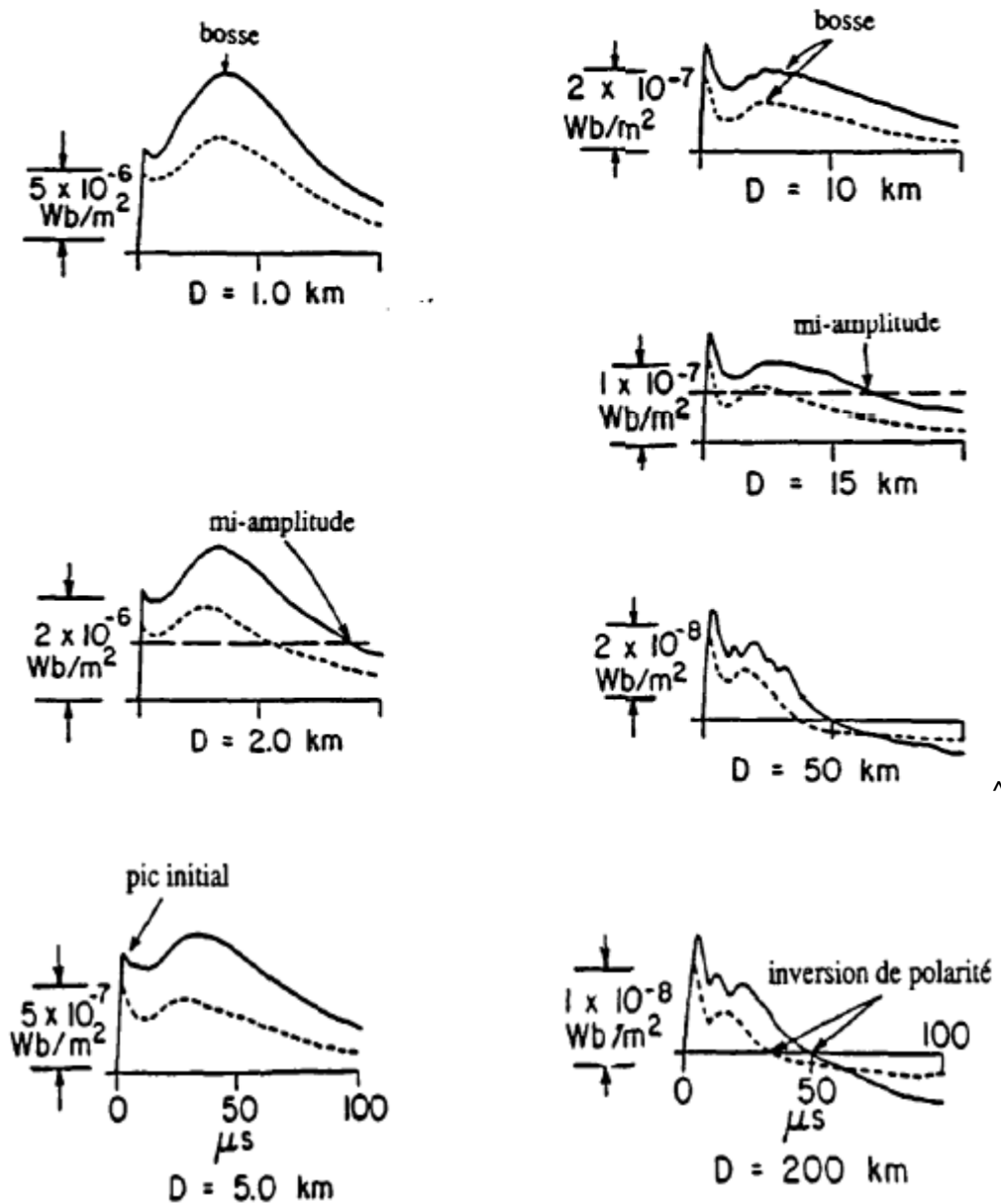
On remarque que, pour des distances de quelques kilomètres :

Le champ électrique vertical, après quelques dizaines de microsecondes, est dominé par la composante électrostatique du champ électrique total, c'est la seule composante du champ électrique qui n'est pas nulle après que le courant de l'arc en retour cesse de se propager le long du canal de foudre.

La composante azimutale du champ magnétique, pour des temps similaires, est dominée par la composante magnétostatique du champ magnétique total, la composante qui présente des bosses (hump) du champ magnétique (Figure I.14).



**Figure I.13** Champ électrique vertical correspondant à un premier arc en retour (trait continu) et à un arc en retour subséquent (pointillés) à des distances variant de 1 Km à 200 Km [17].



**Figure I.14** Densité du flux magnétique correspondant à un premier arc en retour (trait continu) et à un arc en retour subséquent (pointillés) à des distances variant de 1 Km à 200 Km [18].

Les champs électriques et magnétiques lointains ont essentiellement la même forme d'onde, et présentent une inversion de polarité. Les deux champs sont essentiellement composés de la composante rayonnée des champs totaux, caractérisés par un pic initial suivi par une inversion de polarité à quelques dizaines de microsecondes. En pratique, le temps de montée rapide, observé à toutes les distances, est un paramètre extrêmement important dans l'évaluation du couplage du



champ électromagnétique avec une ligne aérienne de transport d'énergie électrique ou avec un câble souterrain.

La valeur moyenne du pic initial du champ électrique, normalisée à 100 Km, est généralement comprise entre 6 et 8 V/m dans le cas du premier arc en retour et entre 4 et 6 V/m pour l'arc en retour subséquent. Ces valeurs peuvent être utilisées comme un indicateur pour la calibration ou pour la sélection des valeurs de seuil dans les mesures du champ électromagnétique [7]. Néanmoins, des facteurs externes, par exemple la conductivité électrique du sol, la présence des tours élevées, peuvent modifier les caractéristiques de ce champ électromagnétique.

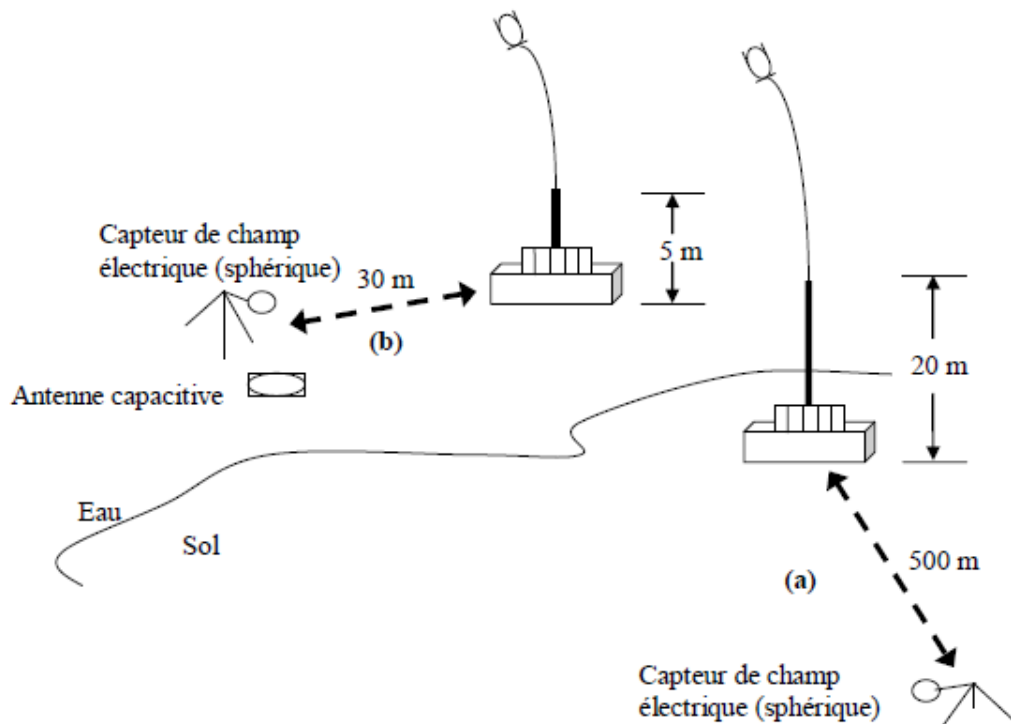
D'autres caractéristiques de champs électriques et magnétiques ont été l'objet de beaucoup d'études et de mesures dans plusieurs campagnes expérimentales dans le monde.

Par exemple, il a été trouvé que l'instant de changement de polarité du champ électrique et magnétique (Figures I.13 et I.14) change significativement en fonction des conditions météorologiques, environ 50  $\mu$ s pour le premier arc en retour observé dans les mesures faites en Floride et en Suède alors que ce temps vaut 90  $\mu$ s dans les mesures faites en Sri Lanka. Néanmoins, l'arc en retour subséquent présente une valeur moyenne de 40  $\mu$ s dans ces trois régions (Floride, Suède et Sri Lanka) [1].

### **b. Distances inférieures à 1 Km**

Les mesures du champ électromagnétique rayonné par la foudre à des distances proches (inférieures à 1 Km) sont faites en utilisant la technique du déclenchement artificiel de la foudre. Les mesures des champs électriques à 30 m et 500 m du canal de foudre sont présentées dans la référence [7].

Dans la figure I.15, on montre une représentation schématique de la campagne expérimentale qui s'est déroulée durant l'été de l'année 1991 à la NASA au Centre Spatial Kennedy (Kennedy Space Center).

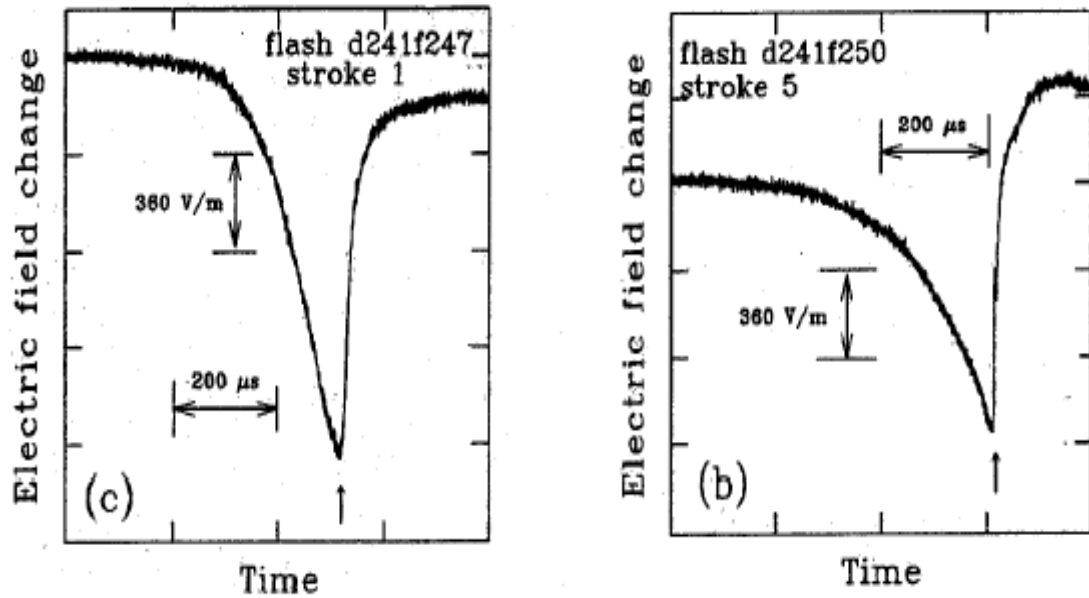


**Figure I.15** Campagne expérimentale de mesure du champ électrique vertical à 500 m et 30 m [19].

Rubinstein et al.[19] ont analysé 40 formes d'ondes du champ électrique à 500 m et 8 formes à 30 m. La figure I.16 donne l'allure du champ électrique vertical mesuré à 500 m, correspondant à la phase traceur-arc en retour.

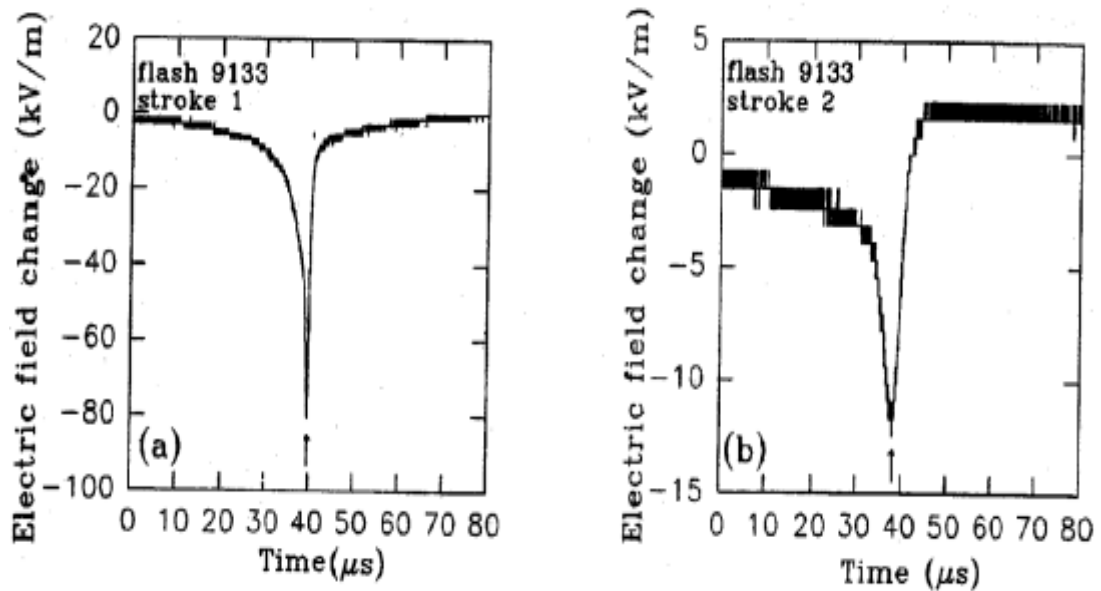
La durée de l'onde est de 800  $\mu\text{s}$ . Cette durée s'explique par le fait que l'ionisation du canal de foudre par le traceur modifie sensiblement le champ électrique vertical, avec une augmentation lente de la pente négative de la courbe du champ électrique [7]. Cette caractéristique n'est pas perceptible pour les longues distances, dans lesquelles la progression du traceur reste pratiquement invisible.

Le commencement de la neutralisation des charges dans le canal par l'arc en retour est probablement associé avec le commencement de la progression positive et rapide du champ électrique vertical [19] (Figures I.16 et I.17).



**Figure I.16** Champ électrique vertical mesuré à 500 m du point d’impact de la foudre.

Les flèches indiquent le commencement de la phase de l’arc en retour [18].



**Figure I.17** Champ électrique vertical mesuré à 30 m du point d’impact de la foudre.

Les flèches indiquent le commencement de la phase de l’arc en retour [18].

## I. 6 Effets de la foudre

Pour généraliser les effets indésirables de la foudre que ce soit sur les objets (bâtiments ou systèmes électriques/électroniques) ou sur les êtres vivants nous pouvons citer les effets suivants :

### I.6.1 Effets électriques

Dans le chemin variés et complexe empruntés par la foudre pour s'écouler dans le sol apparaissent des différences de potentiel importantes sur de faibles distances provoquant des claquages locaux qui endommagent les conducteurs présents dans le sol.

Ces tensions présentent un grave danger pour les êtres vivants en surface (tension de pas) [9].

### I.6.2 Effets thermique

Les effets thermiques associés au phénomène de foudre peuvent être de plusieurs sortes :

- ❖ De manière générale, un courant électrique s'écoulant dans un corps conducteur entraîne son échauffement. Ce phénomène, qualifié d'effet Joule, peut être à l'origine, dans le cas de la foudre, de la fusion des conducteurs dont le volume n'est pas suffisant pour évacuer la quantité de chaleur générée par les courants de foudre
- ❖ Aux points de jonction entre un conducteur (surface métallique) et un arc de retour, une grande quantité de charges électriques doit être écoulee dans un temps très bref. Ce phénomène entraîne un échauffement local important du métal, qui, s'il s'avère généralement sans conséquences graves.
- ❖ Enfin, lorsque l'arc de retour traverse des substances inflammables, il est capable de déclencher un incendie directement par conduction de la chaleur ou par simple rayonnement thermique.

### I.6.3 Effets électromagnétiques

Les effets électromagnétiques se manifestent par différents processus de couplage sur une structure :

le couplage résistif (conduction, résistance de blindage des câbles, ...), le couplage par champ magnétique (boucles d'induction dans l'installation, inductances de liaison,...), le couplage capacitif par champ électrique (antenne tiges isolées du sol,...).

les couplages sont influencés par les mises a la terre, les liaisons d'equipotentialité, les blindages, le cheminement et la disposition des conducteurs métalliques [9].

Le canal de foudre ainsi que les éléments écoulant le courant de foudre à la terre génèrent un champ électromagnétique. Des courants et tensions induits vont alors apparaître dans les conducteurs proches.

Les différences de potentiels en résultant peuvent à leur tour entraîner des claquages dans les éléments électriques ou électroniques reliés à ces conducteurs. Ces claquages peuvent être également de forte intensité et créer un risque d'inflammation ou de destruction du même type que celui créé par le coup direct.

Lorsqu'un coup de foudre tombe à proximité d'une ligne, le champ électromagnétique intense généré par l'arc en retour induit des surtensions, qui peuvent dans certains cas provoquer un amorçage.

Par ailleurs, certains équipements sensibles aux perturbations électromagnétiques peuvent être perturbés ou détruits par le champ créé par un éclair proche.

Les surtensions induites par un champ électromagnétique sont généralement de courte durée et leur amplitude dépend notamment de la vitesse de variation du courant induit dans le composant considéré.

Par ailleurs, les temps de montée, de valeur de crête et le temps de descente ont chacun des effets destructeurs ou perturbateurs :

- ❖ le temps de montée : certains composants discrets (triacs, thyristors par exemple) sont déclenchés ou détruits par des impulsions de bas niveau.
- ❖ la valeur de crête : les surtensions de crête supérieures à la valeur admissible de certains éléments entraînent leur destruction par claquage ; c'est le cas pour les condensateurs, les diodes et en général les couches d'arrêt des semi-conducteurs.
- ❖ le temps de descente : les impulsions de longue durée endommagent la plupart des composants du fait de l'énergie qu'elles véhiculent.

- ❖ les perturbations du réseau peuvent aussi entraîner des erreurs de fonctionnement d'équipements électroniques par suite de l'action d'une impulsion, même faible, sur un microprocesseur, une mémoire ou une logique câblée (bascule,...) Les effets seront par exemple :
  - l'arrêt ou le démarrage incontrôlé d'une machine automatique,
  - le fonctionnement erratique d'équipements,
  - la perturbation de programmes informatiques,
  - des erreurs d'affichage ou de calcul (mesures,...).
  - la foudre peut avoir des conséquences destructrices ou perturbatrices sur des installations électriques ou électroniques situées dans un rayon de plusieurs kilomètres à partir du point d'impact,
  - une alimentation électrique d'un bâtiment réalisée par câbles souterrains n'en est pas pour autant protégée des effets de la foudre et les équipements électriques ou électroniques branchés dans ce bâtiment ne sont pas à l'abri des conséquences de ce phénomène électrique.

#### **I.6.4 Effets acoustiques**

Le tonnerre est une onde de choc violente qui génère des pressions importantes à courte distance (des centaines d'atmosphère dans le plasma du canal de foudre) qui peuvent provoquer des bris de vitres à quelque mètres du point d'impact.

Les forces électrodynamiques liées au courant s'écoulant dans l'éclair créent une dilatation de l'air du canal de foudre, accompagnée d'une élévation de pression dans le canal. Cette surpression et sa disparition brutale, créent une onde de choc se propageant ensuite dans l'atmosphère. Cette onde de choc peut générer de fortes surpressions sur des structures avoisinantes et conduire au renversement de panneaux, murs,...

#### **I.6.5 Effets sur l'homme et l'être vivants**

On peut classer les effets sur l'homme et l'être vivant selon deux classes :

- ceux qui sont directement liés au foudroiement et qui sont de nature thermique, électrique, auditif, oculaire etc. et qui sont très spécifiques à la foudre.
- ceux qui font suite aux conséquences des effets indirects d'un foudroiement ; brûlures liées à un incendie, courants électriques à fréquence industrielles de défauts, etc [3].

### **I.6.6 Effets lumineux**

Les effets sur les installations sont limités aux équipements optiques (cellules, caméra,...). En ce qui concerne l'homme, des lésions oculaires peuvent toutefois apparaître.

### **I.6.7 Effets sur les structures**

Les coups de foudre peuvent engendrer tous les dégâts suivants :

- Incendies, des chutes d'arbre provoquant des accidents.
- Explosions de liquides ou de gaz inflammables.
- Dommages sur les réseaux électriques et téléphoniques.
- Dommage sur les sites industriels : installation portuaires, raffineries de pétrole.
- Dommage sur les sites agricoles : élevages, piscicultures.

### **I.6.8 Effets électrochimiques**

Ces effets sont généralement négligeables sur les installations au sol, les quantités de matière pouvant se décomposer par électrolyse restant faibles, même pour des quantités de charge transférées importantes. Une surveillance des prises de terre reste cependant nécessaire (risque de corrosion,...).

## **I.7 Protection contre les dangers de la foudre**

La protection en général, et des personnes en particulier, est d'autant meilleure qu'un écoulement maximal des perturbations vers la terre est assuré, le plus près possible des sources de perturbation.

Pour se protéger de la foudre, il convient de respecter les principes suivants :

- ne pas constituer une cible pour la foudre,
- ne pas se placer dans des situations qui risquent d'engendrer une différence de potentiel entre deux parties du corps.

Les personnes voulant se protéger peuvent notamment prendre les précautions suivantes :

- chercher un abri bas dans un endroit ayant un toit relié électriquement à la terre ou un abri métallique (voiture,...),
- lorsqu'il n'y a pas d'abri à proximité, il faut à la fois réduire sa hauteur (s'accroupir) et réduire sa surface au sol (joindre les deux pieds),
- éviter de courir, de s'allonger et de faire de grands pas,
- éviter les abris naturels (grottes, bas de falaise, cascade,...),

- éviter de faire de la bicyclette, de monter à cheval, de rester dans un véhicule à toit ouvert,
- éviter de marcher dans l'eau ou de nager,
- se tenir à l'écart des endroits élevés, des arbres de grande taille ou isolés. Si la proximité d'un arbre ne peut être évitée, prendre position au-delà de la limite du feuillage,
- éviter le contact ou la proximité des structures métalliques et descentes de paratonnerres,
- ne pas porter sur soi des objets métalliques,
- éviter ou limiter l'utilisation du téléphone (traditionnel).
- Eviter le contact avec tout objet métallique, appareils électriques, encadrement de fenêtre, radio, télévision.

### **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre on a présenté en premier lieu une généralité sur la phénoménologie de la foudre, nous avons parlé du mécanisme de sa formation et des catégories des coups de foudre existants, on a présenté les observations expérimentales du courant de foudre et du champ électromagnétique associé, en dernier nous avons cité les effets de la foudre et la protection contre ses dangers.

Dans le chapitre suivant on va mettre en évidence une étude théorique sur la modélisation du champ électromagnétique généré par l'interaction d'un coup de foudre avec un objet élevé où on s'intéressera particulièrement à la vitesse de l'arc en retour.