



*INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES*

# **Etude des Paratonnerres à Dispositif d'Amorçage**

Ministère de l'Aménagement du Territoire  
et de l'Environnement

*P. GRUET*

*Laboratoire d'Evaluation des Equipements Electriques  
Direction de la Certification*

octobre 2001

## AVERTISSEMENT

A la demande de la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques (DPPR) du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, l'INERIS a étudié l'efficacité des Paratonnerres à Dispositif d'Amorçage (PDA).

Les textes réglementaires français pris dans le cadre de la législation sur les installations classées autorisent la protection des bâtiments par PDA.

L'étude de l'INERIS a consisté à recueillir des informations sur les PDA et à en faire une analyse critique. Ce rapport ne remet pas en cause la technologie PDA dans son ensemble. Il indique que la capacité des PDA à recevoir la foudre est constatée, mais il critique l'évaluation de leur supériorité en termes de rayon de protection par rapport à un paratonnerre à tige simple.

En complément à cette étude, le Service de l'Environnement Industriel de la DPPR suggère deux actions :

1. faire une enquête auprès des installations protégées contre la foudre pour évaluer la protection effective des installations (retour d'expérience),
2. conforter le modèle théorique de capture de la foudre afin de mieux quantifier le gain en termes de rayon de protection des PDA.

Le Service de l'Environnement Industriel indique que dans l'état actuel des connaissances, le PDA peut être utilisé pour protéger les installations classées. Par ailleurs le SEI note les modifications en cours de validation par l'U.T.E. de la norme NFC 17-102.

# **Etude des Paratonnerres à Dispositif d'Amorçage**

**OCTOBRE 2001**

Personnes ayant participé à l'étude : MM. CHARPENTIER, HALAMA

Ce document comporte 46 pages (hors couverture et annexes).

## TABLE DES MATIERES

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>5</b>
<b>2. OBJECTIF ET METHODE .....</b>	<b>6</b>
2.1. Contexte et motivation de l'étude sur les PDA .....	6
2.2. La démarche et les participations externes .....	6
2.3. Rappel des méthodes et moyens de protection.....	6
2.3.1. Le principe de la protection .....	7
2.3.2. Le rôle des paratonnerres.....	8
<b>3. PRESENTATION DES PDA .....</b>	<b>9</b>
3.1. Concepts.....	9
3.1.1. La formation de l'orage et le déroulement d'un coup de foudre .....	9
3.1.2. Le principe d'avance à l'amorçage .....	11
3.2. Différentes techniques.....	13
3.2.1. Les paratonnerres radioactifs.....	13
3.2.2. Les paratonnerres à déclenchement électronique .....	13
3.2.3. Les paratonnerres piézo-électriques.....	14
3.2.4. Les paratonnerres à profil spécial .....	15
3.3. Produits commercialisés .....	17
<b>4. NORME NF C 17-102 .....</b>	<b>20</b>
4.1. Réglés d'installations d'un PDA.....	20
4.1.1. Conception de l'installation de protection.....	20
4.1.2. Réalisation du dispositif de protection.....	20
4.1.3. Vérification et maintenance .....	20
4.2. Sélection de l'avance à l'amorçage du PDA et rayon de protection.....	21
4.3. Méthode de qualification des PDA en laboratoire.....	22
<b>5. METHODES D'EVALUATION DES PDA .....</b>	<b>24</b>
5.1. Essais en laboratoire .....	24
5.1.1. Etudes exploratoires .....	24
5.1.2. Mesure de l'avance à l'amorçage.....	28
5.2. Essais à l'extérieur.....	29
5.3. Retours d'expérience.....	30

<b>6.</b>	<b>PERFORMANCES DES PDA.....</b>	<b>31</b>
<b>6.1.</b>	<b>Les informations fournies aux utilisateurs.....</b>	<b>31</b>
6.1.1.	Bureaux d'étude .....	31
6.1.2.	Installateurs.....	32
6.1.3.	Bureaux de contrôle.....	32
6.1.4.	Responsables d'installations .....	33
<b>6.2.</b>	<b>Les caractéristiques démontrées.....</b>	<b>34</b>
<b>6.3.</b>	<b>Les caractéristiques non démontrées.....</b>	<b>36</b>
<b>6.4.</b>	<b>Avis sur l'efficacité des PDA .....</b>	<b>39</b>
6.4.1.	Des différences entre les modèles.....	39
6.4.2.	Une efficacité difficile à démontrer .....	39
<b>6.5.</b>	<b>Critique de la norme NF C 17-102.....</b>	<b>40</b>
6.5.1.	Partie installation .....	40
6.5.2.	Partie qualification.....	40
6.5.3.	Partie choix et positionnement du PDA.....	40
<b>6.6.</b>	<b>Critiques des techniques utilisées.....</b>	<b>41</b>
<b>6.7.</b>	<b>Recommandations et actions à mener .....</b>	<b>42</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>44</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>45</b>
<b>9.</b>	<b>LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>46</b>

## 1. INTRODUCTION

---

L'INERIS a été chargé par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement<sup>1</sup> d'étudier l'efficacité des Paratonnerres à Dispositif d'Amorçage (PDA). Ces matériels ont succédé aux paratonnerres radioactifs dans les années 80, ils sont utilisés dans différents pays mais le plus grand nombre est en France, en Espagne et en Australie.

Les constructeurs annoncent des performances nettement supérieures aux paratonnerres traditionnels constitués d'une tige simple. L'évaluation de l'efficacité de ces matériels lors de cette étude a consisté en une analyse critique des documents et dossiers qui ont été transmis. Ainsi, dans une première phase, un questionnaire a été remis aux fabricants de PDA. La majorité des fabricants a communiqué des dossiers de conception et de caractérisation de leur paratonnerre.

La seconde phase a consisté à rencontrer différents acteurs qui ont participé aux développements de ces paratonnerres. De nombreux documents ont été recueillis, en particulier des résultats d'essais réalisés dans des laboratoires Haute Tension. La norme française NF C 17-102 définit la procédure d'évaluation d'un PDA, elle fait donc l'objet d'une analyse détaillée dans ce rapport.

La troisième phase a consisté à synthétiser l'ensemble des documents afin de définir si ces dispositifs offrent une protection supérieure aux paratonnerres à tige simple.

Les termes techniques utilisés dans ce rapport sont définis dans un glossaire en annexe.

---

<sup>1</sup> Service de l'Environnement Industriel du Bureau des risques technologiques et des industries chimiques et pétrolières, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques au Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement

## 2. OBJECTIF ET METHODE

---

### 2.1. CONTEXTE ET MOTIVATION DE L'ETUDE SUR LES PDA

L'arrêté du 28 janvier 1993 du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement indique que certaines installations soumises à autorisation au titre de la législation des installations classées doivent être protégées contre la foudre. La circulaire n° 93-17 du 28 janvier 1993 précise au paragraphe 3.3.2 :

**Paratonnerres à dispositif d'amorçage, dit "actifs"** *"Dans l'attente d'indications confirmées à ce sujet par un organisme habilité, il pourra être admis dans l'étude que ces dispositifs assurent une surprotection de l'installation sur laquelle ils sont mis en place."*

Le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement [2] a confié à l'INERIS une étude pour réaliser un premier bilan sur l'utilisation des Paratonnerres à Dispositif d'Amorçage.

### 2.2. LA DEMARCHE ET LES PARTICIPATIONS EXTERNES

L'étude de l'INERIS a consisté, dans un premier temps, à récolter des informations auprès de tous les intervenants qui ont participé aux études, aux développements, à la réalisation, à la qualification, l'installation et le contrôle des PDA.

L'INERIS n'a pas participé aux études menées pour développer ce type de protection et n'a aucun lien avec un constructeur ou un distributeur de matériel.

La liste des informations demandées aux principaux fabricants français de PDA au premier semestre 2000 figure en annexe 1. Les fabricants ont été invités à fournir les informations susceptibles de montrer la qualité et l'efficacité de leur produit. La participation des différents acteurs est une démarche volontaire. L'étude des différents produits a été réalisée à partir des informations fournies par les fabricants.

Une partie importante des informations communiquées à l'INERIS concerne des essais d'investigations et des secrets de fabrication, ces informations à caractère confidentiel ne sont pas diffusées dans ce rapport. Ces informations ont permis à l'INERIS de connaître le fonctionnement particulier de certains PDA et d'apprécier le comportement général des PDA. Aucun essai en laboratoire sur les PDA n'a été réalisé lors de cette étude.

### 2.3. RAPPEL DES METHODES ET MOYENS DE PROTECTION

Avant d'aborder l'étude des Paratonnerres à Dispositif d'Amorçage, il est bon de rappeler brièvement la nécessité des protections contre la foudre, le principe de protection communément retenu et le rôle des paratonnerres.

Il faut garder à l'esprit que ce phénomène naturel n'est pas maîtrisé. Il y a plusieurs raisons à cela, en particulier :

- la complexité du phénomène,
- son caractère aléatoire,
- l'énergie mise en jeu pendant un temps très court.

### 2.3.1. Le principe de la protection

Pendant la formation d'un orage, de grandes quantités de charges électriques de polarités opposées sont produites. Ces charges créent des différences de potentiel électrique très importantes qui, à partir d'un certain niveau, provoquent un arc électrique à l'intérieur des nuages ou entre les nuages et la terre. Un coup de foudre au sol permet la neutralisation des charges électriques au niveau du sol. Il est illusoire de vouloir s'opposer à cette circulation de courant, elle est nécessaire à la neutralisation des charges au sol à l'approche du nuage orageux.

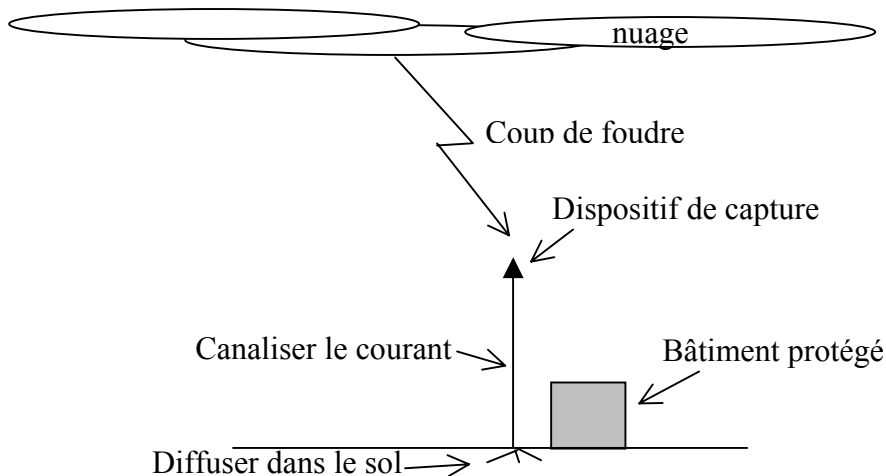
Bien que la durée d'un coup de foudre soit courte, son énergie est suffisante pour provoquer un incendie [3], déclencher une explosion ou tuer un homme ou un animal. Aussi, pour ne pas être frappé par la foudre plusieurs idées, parfois irréalistes, peuvent être avancées :

1. être capable de dévier les nuages orageux,
2. éviter la formation de charge au niveau du sol,
3. favoriser un lieu d'impact de foudre et canaliser le courant à l'extérieur de la zone à protéger.

L'observation du phénomène et le retour d'expérience ont permis de développer des dispositifs de protections qui reposent sur le principe de capter et canaliser la foudre plutôt que de vouloir s'y soustraire. Ainsi, tous les dispositifs de protection contre les coups de foudre sont conçus pour recevoir la foudre. Leur efficacité repose sur leur capacité à :

- attirer la foudre (lorsque le dispositif de protection est en un point précis),
- supporter les impacts (effets thermiques et mécaniques),
- canaliser la plus grande part possible d'énergie (limitation de la propagation du courant vers la zone protégée),
- diffuser le courant dans le sol (limitation de la propagation horizontale du courant au sol).

Différents dispositifs sont utilisés pour atteindre le but recherché (cage maillée, fils tendus, paratonnerres). Ce document ne traite que des paratonnerres.



*"Favoriser un lieu d'impact de foudre  
et canaliser le courant à l'extérieur de la zone à protéger"*

*Figure 1 : Principe d'une protection par paratonnerre*

### 2.3.2. Le rôle des paratonnerres

Il est connu depuis plusieurs siècles que la foudre frappe de préférence les endroits les plus hauts (les plus près des nuages). En particulier, des lieux d'impacts privilégiés sont les proéminences plus ou moins pointues. Cette prédisposition des objets effilés à être frappés par la foudre s'explique par l'effet de pointe appelé aussi effet Corona.

Le modèle électrogéométrique a été imaginé à partir de l'observation du cheminement des traceurs des coups de foudre descendants. Il a été inventé pour :

- tenter d'expliquer pourquoi la foudre frappe l'objet le plus haut,
- évaluer la zone autour de l'objet dans laquelle le coup de foudre ne devrait pas tomber.

Ce modèle repose sur l'utilisation d'une sphère fictive [4].

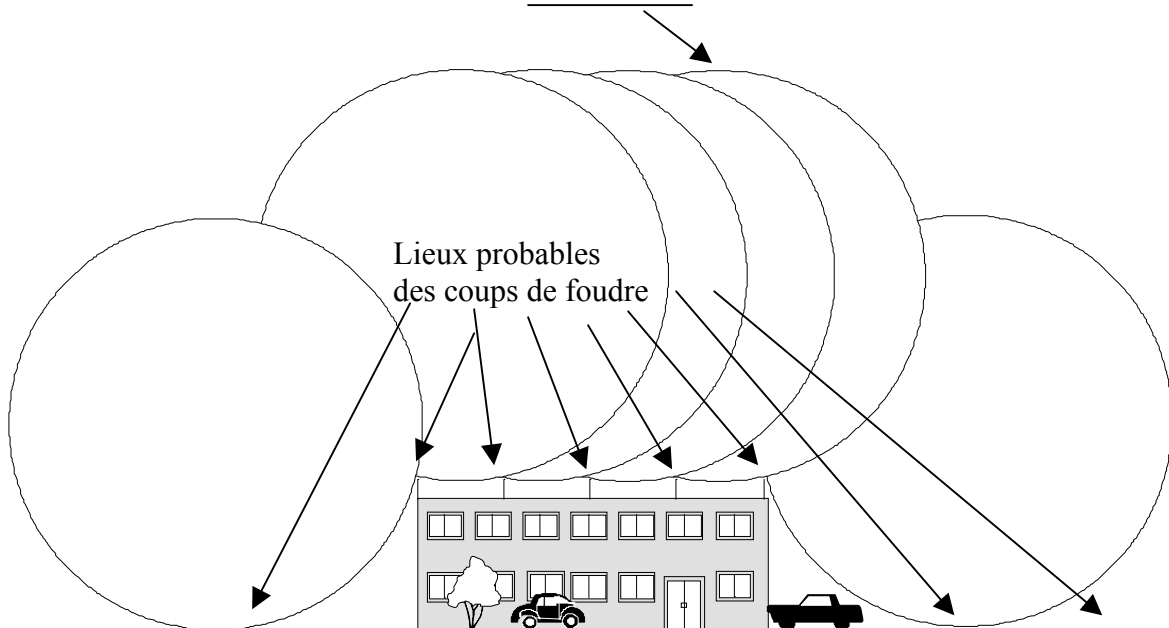


Figure 2 Utilisation de la méthode de la sphère fictive

Représentons, sur un plan du bâtiment *en élévation*, une sphère dont le rayon croît avec le courant de foudre considéré. Cette sphère est roulée sur le sol. On considère que les lieux d'attachement préférentiels de la foudre sont les points où la sphère fictive est en contact avec le sol.

La méthode de la sphère fictive permet de définir la position des dispositifs de capture de la foudre.

Le rayon de la sphère fictive est lié au courant du coup de foudre par la relation  $R=10 I^{2/3}$ , définie par le modèle électrogéométrique [5].

### 3. PRESENTATION DES PDA

Avant de présenter les Paratonnerres à Dispositif d'Amorçage (PDA), nous rappelons les concepts suivants :

- avance à l'amorçage,
- une partie du phénomène d'attachement de la foudre.

Le Paratonnerre à Tige Simple inventé par Benjamin Franklin est appelé PTS dans le document.

Différentes solutions techniques ont été retenues par les concepteurs. Les techniques utilisées pour les produits actuellement sur le marché sont présentées. Nous avons classé les PDA en quatre catégories.

#### 3.1. CONCEPTS

##### 3.1.1. La formation de l'orage et le déroulement d'un coup de foudre

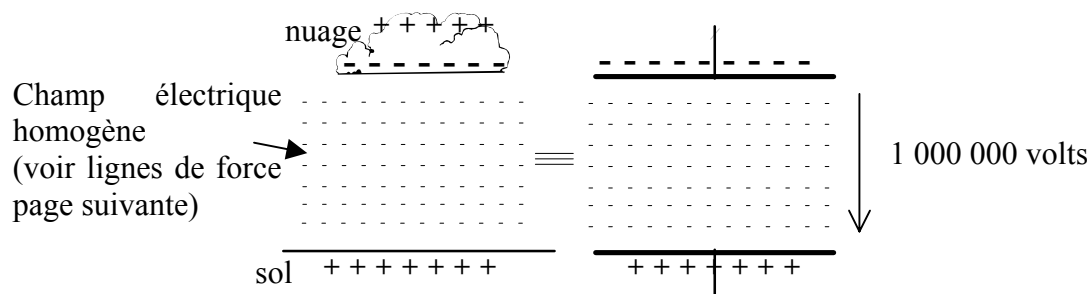
Lorsque deux masses d'air de température et d'hydrométrie différentes se rencontrent, les conditions sont favorables à la naissance d'orage. De violents courants d'air ascendants entraînent l'humidité, les fragments de glace, les grêlons et les gouttelettes d'eau vers la partie supérieure du nuage.

On ne connaît pas encore exactement les mécanismes à l'origine de la création des charges électriques qui se créent pendant la phase de formation du nuage orageux. Dans les zones à fortes turbulences, les particules lourdes (grésil ou grêlons) se heurtent aux cristaux de glace. Lorsque ces chocs se produisent, les grains de grésil se chargent négativement. Comme les grains tombent plus rapidement que les cristaux, ils transportent depuis les zones supérieures du nuage des charges négatives vers le bas.

La séparation des charges dans le nuage est favorisée par:

- la force des vents ascendants, dont la vitesse peut dépasser 25 m/s
- la présence simultanée dans le nuage de particules de glace lourdes et légères

Lorsque le nuage orageux a atteint sa maturité, les charges électriques sont réparties dans différentes zones du nuage. Les différences de potentiel électrique engendrées provoquent d'importantes décharges électriques ; l'orage éclate.



*L'ensemble nuage/sol est équivalent à un condensateur électrique chargé*

Benjamin Franklin a démontré le caractère électrique du nuage en 1752. Nous pouvons comparer le nuage et le sol à un énorme condensateur électrique chargé. Dans la majorité des cas, la charge négative est à la base du nuage et des charges positives sont induites au sol à l'approche du nuage.

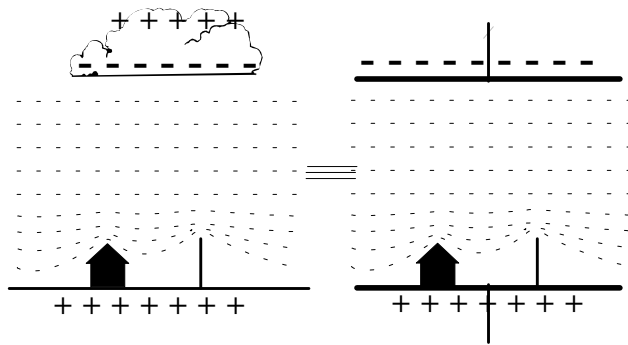


Figure 3 Influence des structures au sol sur le champ électrique local

Les lignes de forces sont des limites imaginaires. Lorsque les lignes de champ sont des droites parallèles, le champ électrique est homogène, sa valeur est constante dans la zone.

Un objet modifie la courbure des lignes de forces. Le champ électrique est alors modifié en direction et en intensité. Nous retiendrons que l'intensité au sommet d'un objet est localement plus importante.

Le champ électrique plus important au voisinage des objets pointus va favoriser la naissance de pré-décharges ascendantes juste avant le coup de foudre.

Lors d'un coup de foudre au sol, les charges négatives dans la partie basse du nuage se déplacent vers les charges positives au sol selon un parcours sinueux. Ces charges forment un canal appelé *traceur par bonds* (le traceur par bonds met 1/100s pour arriver au sol et se déplace à environ 200 km/s).

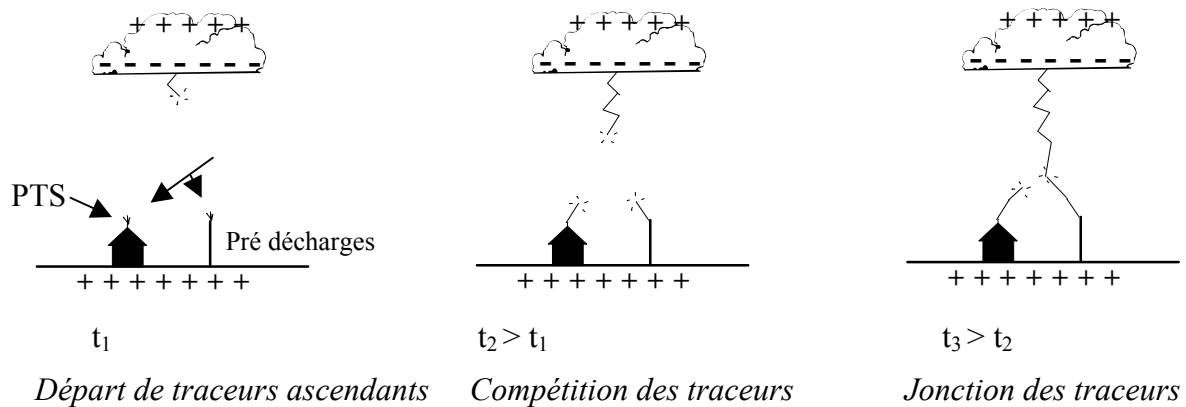
**Le champ électrique au sol croît rapidement à l'approche du traceur descendant.** Des pré-décharges ascendantes se créent sur les extrémités supérieures des objets au sol (même sur les objets non métalliques). Quand le traceur descendant atteint les dernières centaines de mètres, le champ électrique ambiant dépasse un seuil critique, un ou plusieurs traceurs ascendants se développent.

Lalande [12] a montré dans ses études que le traceur ascendant ne pouvait progresser de façon stable vers le traceur descendant que si le champ électrique au niveau de la structure était supérieur à un champ critique appelé "**champ électrique de stabilisation**" égal ou supérieur au champ donné par la formule de Peek par exemple. Le champ électrique de stabilisation dépend en particulier du rayon de courbure de la structure. Cela a pour conséquence, que **l'évolution du traceur de façon n'est pas liée à l'apparition d'un premier corona au niveau de la structure, mais qu'il y ait un corona et que le champ créé au sol par l'approche du traceur descendant soit suffisant.** C'est cette dernière condition qui est prépondérante.

Il y a souvent **une compétition entre plusieurs traceurs ascendants** en direction du traceur descendant. Un des traceurs entre en contact avec le traceur descendant, c'est la décharge de capture, un court-circuit est alors établi entre le nuage et le sol.

Lorsque la liaison s'établit entre les deux traceurs, il se produit la décharge principale ; un courant très intense circule pendant un court instant entre le sol et le nuage. C'est l'arc en retour souvent suivi de plusieurs coups subséquents.

Le premier coup de foudre est généralement suivi d'autres décharges dans le même canal, ce qui donne à l'éclair son apparence vacillante. Le processus de foudroiement continue jusqu'à la décharge du nuage.



La plupart des décharges sont intra-nuages. Mais une décharge sur quatre frappe le sol ; c'est un coup de foudre. 90% des coups de foudre sont de type négatif (les charges négatives sont à la base du nuage). Les gros orages peuvent déclencher plus de 100 éclairs à la minute.

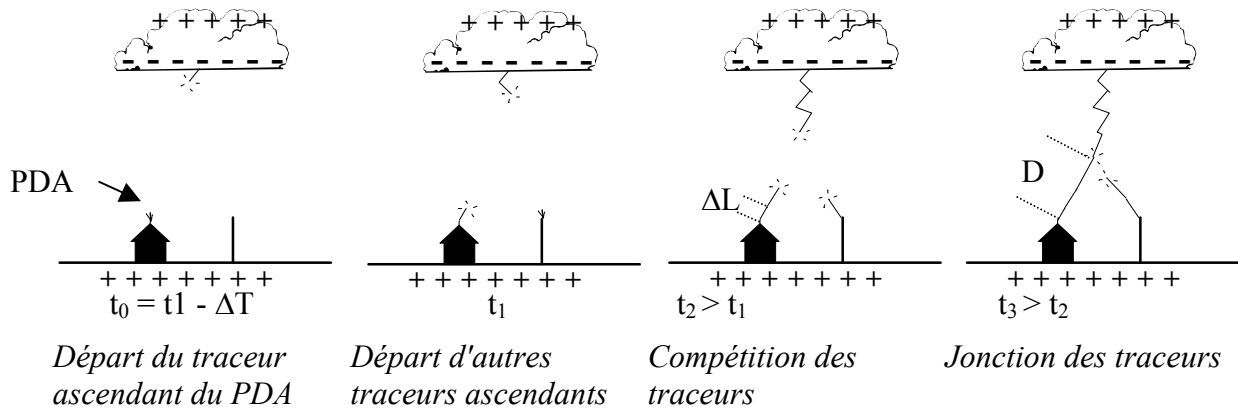
### 3.1.2. Le principe d'avance à l'amorçage

La description du phénomène de foudroiement au sol présentée ci-dessus, montre que des phénomènes précurseurs au niveau du sol annoncent un coup de foudre imminent. Ces phénomènes sont :

- l'accroissement brutal du champ électrique,
- le phénomène de pré-décharge au niveau des proéminences d'objet au sol,
- la compétition des traceurs ascendants.

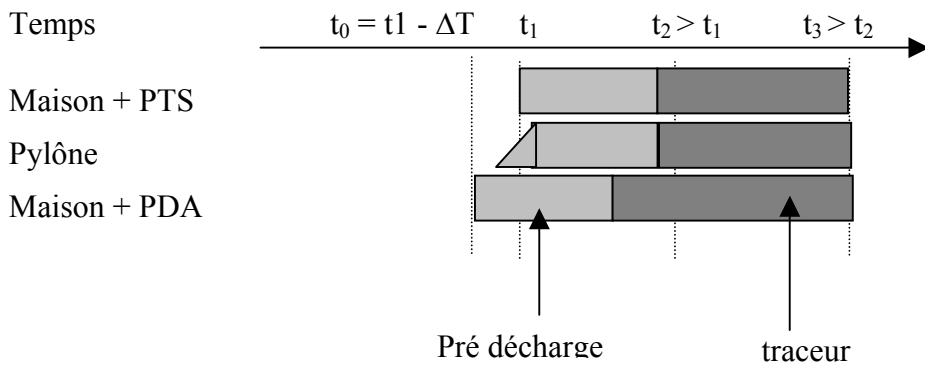
Le raisonnement simple qui a conduit à développer les PDA est le suivant :

- si un dispositif de protection génère un traceur ascendant avant un objet à proximité, il doit logiquement gagner lors de la compétition des traceurs ascendants. C'est le principe de base du PDA. Il doit montrer une avance d'instant d'amorçage  $\Delta T$  par rapport à un PTS.
- si un dispositif montre une avance à l'amorçage  $\Delta T$ , le traceur qu'il génère va parcourir une distance  $D$ , plus grande par rapport à un PTS, pour rencontrer le traceur descendant. Il va capter la foudre à une distance plus grande, son rayon d'action est par conséquent augmenté. A partir de la vitesse de propagation du traceur ascendant  $v$ , on obtient donc l'accroissement de son rayon d'action.  $\Delta L = v \cdot \Delta T$



Le principe de partir plus tôt qu'un PTS pour parcourir une plus longue distance à vitesse égale est une bonne idée. Cependant, la difficulté est de partir au bon moment. "Avant l'heure, c'est pas l'heure, après l'heure c'est trop tard."

Si le traceur ascendant part trop tôt, il n'aura peut être pas assez d'énergie pour parcourir toute la distance. Son énergie étant fournie par le traceur descendant, plus l'altitude de ce dernier est élevée moins il attirera le traceur ascendant. La propagation continue du traceur ascendant n'est pas uniquement liée à l'apparition d'un premier corona au niveau de la structure, il est indispensable que le champ créé au sol par l'approche du traceur descendant soit suffisant pour que l'illustration ci-dessous soit plausible.



L'illustration ci-dessus montre que l'avance à l'amorçage du PDA lui permet de générer des pré-décharges et le traceur ascendant avant un PTS qui serait mis en place au même endroit.

Il faut aussi avouer que nous ne connaissons pas l'instant de démarrage des pré-décharges et du traceur ascendant sur le pylône par rapport au PTS. Gardons à l'esprit que **l'avance à l'amorçage du PDA est un paramètre d'efficacité relative par rapport à un PTS.**

### **3.2. DIFFERENTES TECHNIQUES**

Les paratonnerres non conventionnels sont appelés actifs ou à avance à l'amorçage. Différents types de paratonnerres sont appelés PDA. Il est important de distinguer les catégories car les techniques utilisées sont différentes et cela se traduit par des comportements différents.

Il existe quatre types de PDA :

1. radioactif,
2. à déclenchement électronique,
3. piézo-électrique,
4. à profil spécial.

#### **3.2.1. Les paratonnerres radioactifs**

Le paratonnerre radioactif est un paratonnerre à tige simple auquel est ajouté au voisinage de la pointe une enceinte contenant un élément radioactif. La source radioactive génère une ionisation importante de l'air au voisinage de la pointe du paratonnerre, augmentant ainsi le nombre d'électrons germes capables d'initier la première phase d'attachement de la foudre. Plusieurs dizaines de milliers de paratonnerres radioactifs ont été installés en France depuis 1930.

Depuis 1986, la fabrication et la vente des paratonnerres utilisant des sources radioactives est interdite en France (arrêté publié au J.O. du 23 octobre 1983). Pour remplacer ce produit, les concepteurs de paratonnerres ont imaginé d'autres manières d'ioniser l'air au niveau du paratonnerre [6] ; c'est la raison pour laquelle les paratonnerres à dispositif électrique sont apparus.

#### **3.2.2. Les paratonnerres à déclenchement électronique**

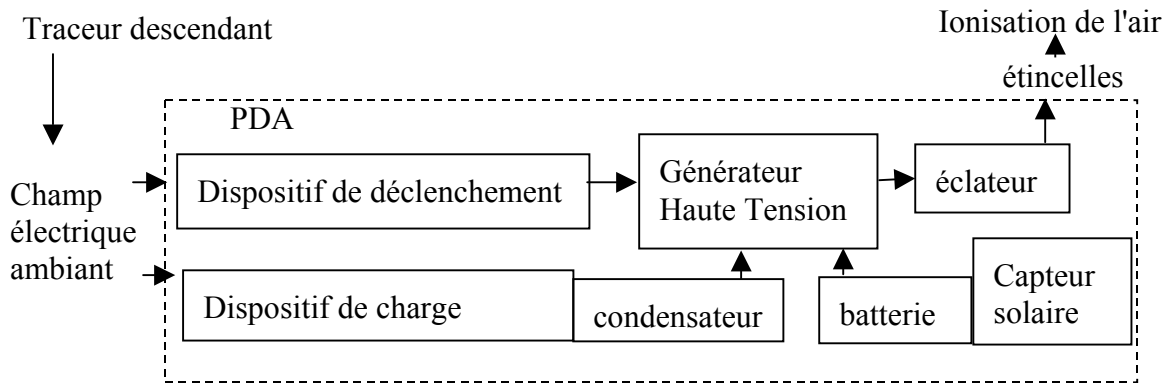
Le paratonnerre à circuit électronique est un paratonnerre à tige simple auquel a été ajouté un circuit électronique permettant de produire une ionisation de l'air pour générer un traceur ascendant. L'ionisation de l'air est obtenue en générant des étincelles au voisinage immédiat de la pointe du paratonnerre. Des produits en cours de développement utilisent d'autres techniques que la génération d'étincelles pour produire un traceur ascendant déclenché. L'ionisation de l'air au niveau de la pointe va augmenter le nombre d'électrons germes et ainsi accroître la probabilité d'initiation de l'effet Corona si le champ électrique ambiant a atteint une valeur suffisante.

Le perfectionnement apporté par ces paratonnerres, par rapport aux paratonnerres radioactifs, est que l'ionisation de l'air peut être déclenchée à un moment précis. Une grande partie de l'efficacité du système dépend de l'instant de déclenchement ; généré trop tôt le traceur ne pourra pas se propager suffisamment loin car le champ électrique généré par le traceur descendant ne serait pas suffisant ; généré trop tard le PDA n'a plus d'avantage.

Pour créer les étincelles qui vont ioniser l'air, le PDA contient un générateur de haute tension électrique. Ce générateur a besoin d'énergie. Pour l'alimenter plusieurs techniques sont retenues :

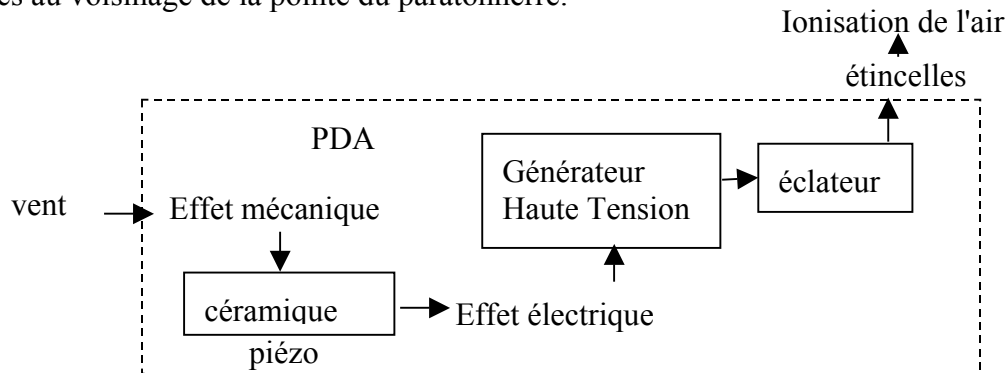
- une batterie utilisée comme réservoir d'énergie, qui sera chargée par un panneau solaire,
- des éléments de capture de l'énergie issus du champ électrique statique ambiant. (le champ électrique est très important en présence d'un nuage orageux, un courant issu d'une antenne charge un condensateur de stockage d'énergie).

Le déclenchement des pré-décharges ascendantes (streamers), suivi d'un traceur ascendant (leader) lorsque les conditions sont réunies, est piloté par un capteur de champ électrique. Le champ électrique augmente, puis varie brusquement à l'approche d'un traceur descendant. La sensibilité de ce capteur et le réglage du seuil de déclenchement sont les paramètres critiques pour l'avance à l'amorçage du PDA à déclenchement électronique.



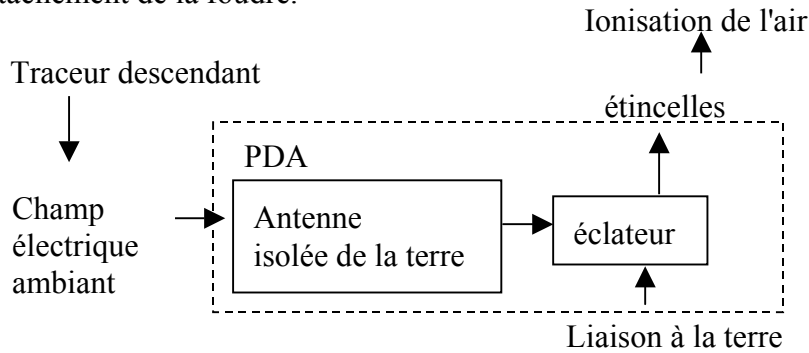
### 3.2.3. Les paratonnerres piézo-électriques

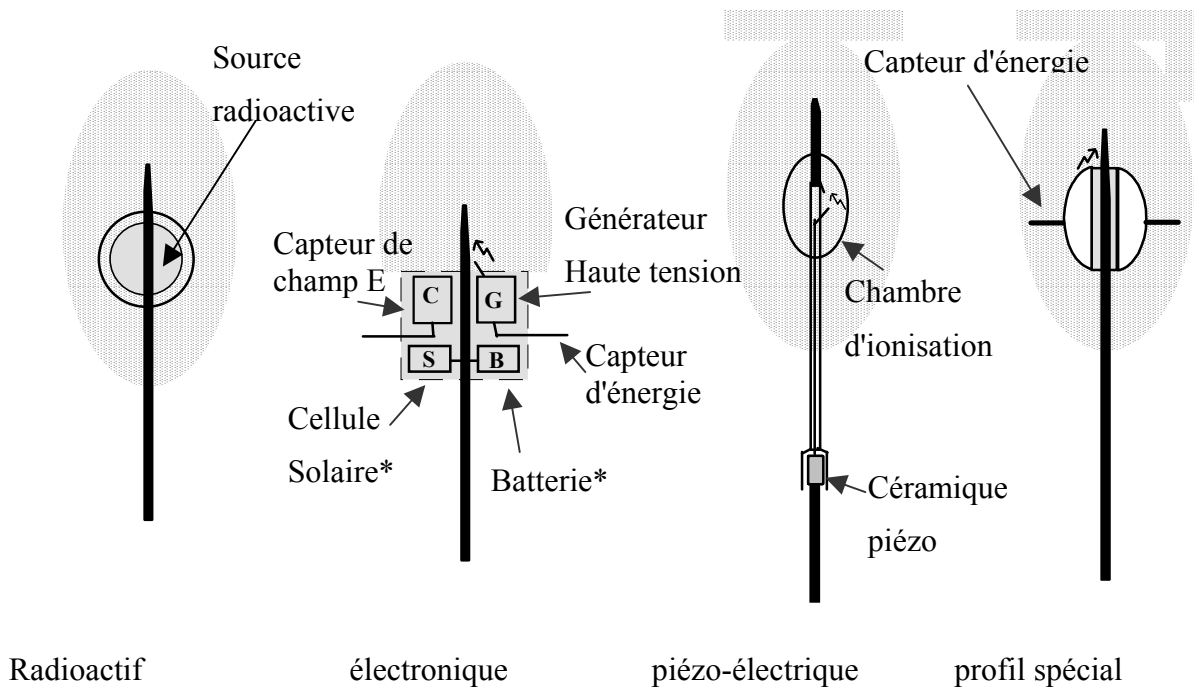
Le paratonnerre piézo-électrique tire l'énergie nécessaire à son fonctionnement d'un élément piézo-résistif mis en œuvre par les forces éoliennes. La partie supérieure du paratonnerre repose en équilibre sur une céramique. Le vent fait osciller la partie supérieure du PDA qui va comprimer le piézo. La tension mécanique est transformée en tension électrique par l'élément piézo-résistif. Cette tension est appliquée au niveau d'une pointe effilée à l'intérieur du volume creux de la pointe du paratonnerre. Cette pointe auxiliaire est portée suivant les conditions atmosphériques à une tension suffisamment élevée pour générer des ions par effet Corona. Ces ions vont être dirigés vers la pointe du paratonnerre par effet Venturi. Il n'y a pas dans ce cas de circuit de commande du déclenchement du traceur ascendant, mais une augmentation de la densité d'électrons germes au voisinage de la pointe du paratonnerre.



### 3.2.4. Les paratonnerres à profil spécial

Ces paratonnerres captent l'énergie rayonnée par le traceur descendant de la foudre par un système composé d'un paratonnerre à tige simple (relié à la terre) et des parties métalliques isolées (au potentiel électrique ambiant). Juste avant le coup de foudre, la tension entre la pointe à la terre et les autres parties métalliques augmente très rapidement pour atteindre plusieurs milliers de volts. Dès que le potentiel a atteint la tension d'ionisation de l'air, des étincelles sont produites au niveau d'un éclateur qui génère les premières phases de l'attachement de la foudre.





*Représentation schématique des différents types de PDA*

\* sur certains modèles

### 3.3. PRODUITS COMMERCIALISES

Les solutions techniques précédemment présentées sont issues des brevets et autres documents accessibles (informations non confidentielles). La présentation est incomplète, mais elle est suffisante pour présenter les principes de fonctionnement des PDA. Le tableau ci-dessous indique les modèles de PDA les plus courants installés en France. On y retrouve, pour les différents produits, la solution retenue et le moyen de déclenchement du phénomène d'attachement de la foudre.

Cette liste des fabricants et des modèles n'est pas exhaustive.

	Modèle	Type	Déclenchement*
INDELEC	PREVECTRON	Electronique	contrôlé
HELITA	PULSAR	Electronique	contrôlé
HELITA	TRIGGAR	Profil	non contrôlé
FRANKLIN FRANCE	St ELME	Piézo-électrique	non contrôlé
FRANCE PARATONNERRE	IONIFLASH	Profil	non contrôlé
POUYET	DIAMANT	non communiqué	non communiqué
POUYET	IONOSTAR	non communiqué	non communiqué
DUVAL MESSIEN	SATELIT SF	Electronique (batterie)	contrôlé
DUVAL MESSIEN	SATELIT +	Electronique	contrôlé
SHFi	SKYLANCE	Electronique	contrôlé
ERICO		non communiqué	non communiqué
La majorité des fabricants existants avant 1983		Radioactif	non contrôlé

*Tableau 1 Différentes solutions techniques retenues pour les PDA*

\*Contrôlé : signifie qu'un dispositif électronique pilote le déclenchement en fonction du champ électrique

Non contrôlé : ne signifie pas aléatoire, le déclenchement se fait sous certaines conditions.

Exemple de paratonnerres à dispositif d'amorçage



PREVECTRON 2® Série "MILLENIUM"  
(INDELEC)



SATELIT +  
(DUVAL MESSIEN)



PULSAR  
(HELITA)



IONOSTAR  
(Paratonnerres POUYET)



Saint Elme  
(FRANKLIN)



SLC25

SLC45  
(Skylance Cirrus)

SLC60



IONIFLASH  
(FRANCE PARATONNERRES)

Exemple de paratonnerre radioactif



## **4. NORME NF C 17-102**

---

Ce chapitre présente la norme NF C 17-102, en particulier les règles d'installation, le choix du paramètre d'amorçage et la détermination de l'avance à l'amorçage.

La norme NF C 17-102 traite de la protection par Paratonnerre à Dispositif d'Amorçage (PDA) contre les coups de foudre directs des structures courantes de hauteur inférieure à 60 m et des zones ouvertes (aires de stockage, aire de détente). Elle inclut la protection contre les conséquences électriques dues à l'écoulement du courant de foudre dans le système de protection.

### **4.1. REGLES D'INSTALLATIONS D'UN PDA**

La norme NF C 17-102 donne les règles relatives à la conception, la réalisation, la vérification et la maintenance d'Installations Extérieures de Protection contre la Foudre (IEPF).

#### **4.1.1. Conception de l'installation de protection**

La conception de l'installation extérieure de protection est déterminée à partir d'une étude préalable qui détermine :

- le niveau de protection à considérer (annexe B de la norme)
- l'emplacement du (ou des) paratonnerre(s),
- le tracé du (des) conducteur(s) de descente,
- l'emplacement et le type de la (des) prise(s) de terre.

Il est à noter que la norme NF C 17-102 définit 3 niveaux de protection alors que la norme NF C 17-100 en définit 4. Cela ne signifie pas que la norme NF C 17-100 prenne en compte des efficacités des protections plus importantes. En fait, le niveau II et III de la norme NF C 17-100 correspondent au niveau II de la norme NF C 17-102.

**La conception d'une installation de protection intégrant un PDA répond aux mêmes règles que celle d'une installation intégrant un paratonnerre à tige simple.**

#### **4.1.2. Réalisation du dispositif de protection**

Les règles de mises en œuvre des PDA sont semblables à celle d'un Paratonnerre à Tige Simple (PTS) indiquées dans la norme NF C 17-100. Hormis le fait que **la pointe du PDA doit être située à au moins 2 m au-dessus de la zone qu'il protège.**

#### **4.1.3. Vérification et maintenance**

La périodicité de la vérification d'une installation selon la norme NF C 17-102 dépend du niveau de protection et varie de 1 à 3 ans. Les vérifications indiquées sont identiques à celle d'un dispositif à tige simple.

**Il n'y a pas de vérification particulière prévue dans la norme pour le dispositif d'amorçage.**

#### 4.2. SELECTION DE L'AVANCE A L'AMORÇAGE DU PDA ET RAYON DE PROTECTION

Un PDA est caractérisé par son avance à l'amorçage  $\Delta L$ . Elle est mise en évidence lors d'essais d'évaluation en laboratoire (cf paragraphe 4.3).

La norme NF C 17-102 définit le rayon de protection d'un PDA selon la formule :

$$R_p = \sqrt{h(2D - h) + \Delta L(2D + \Delta L)}$$

Avec :

D: distance d'amorçage

$\Delta L$  : gain en longueur du traceur ascendant défini par  $\Delta L = v \Delta T$ ,  
(La vitesse de propagation du traceur est considérée constante et égale à  $10^6$  m/s)

h : hauteur de la pointe du PDA au-dessus de la surface à protéger,

$R_p$  : rayon de protection du PDA,

$\Delta T$  : gain en instant d'amorçage du traceur ascendant continu.

Pour choisir l'avance à l'amorçage du PDA, la norme comprend trois figures qui permettent de choisir l'avance à l'amorçage en fonction du niveau de protection (I à III). Selon le rayon de protection à obtenir, la figure indique la hauteur h et le gain  $\Delta L$  du PDA.

La norme NF C 17-102 définit de manière assez simple le rayon de protection d'un PDA en fonction de :

1. sa hauteur,
2. l'intensité du courant d'arc en retour,
3. l'avance à l'amorçage.

L'influence des deux premiers paramètres est liée à l'utilisation du modèle électrogéométrique lorsque l'on définit son rayon de protection selon la formule :

$$D = 10 I^{2/3}$$

La norme considère que  $\Delta L$  est une constante puisque la vitesse de propagation v et l'avance à l'amorçage sont considérées constantes. Il est regrettable que les variations de v et  $\Delta T$  ne soient pas prises en compte car elles influencent l'efficacité du système (voir § 6.3).

Ainsi, selon la norme, l'efficacité d'un dispositif de protection par PDA installé sur une structure, ne varie qu'en fonction du courant de l'arc en retour (comme celle d'un PTS).

### 4.3. METHODE DE QUALIFICATION DES PDA EN LABORATOIRE

L'annexe C de la norme NF C 17-102 définit la procédure d'évaluation d'un PDA en laboratoire. Les essais [7] consistent à comparer les instants d'amorçage d'un PDA et d'un PTS. Pour cela une onde de tension est générée entre un plateau suspendu et le sol pour modifier le champ ambiant au niveau du paratonnerre, simulant ainsi l'approche d'un traceur descendant lors d'un coup de foudre.

Les paramètres imposés dans les conditions d'essais sont les suivants :

Paramètre	Valeur imposée
Champ électrique au sol	Compris entre 10 kV/m et 25 kV/m
Champ impulsionnel : temps de montée pente dans la zone d'initiation	Compris entre 100 $\mu$ s et 1 000 $\mu$ s Comprise entre $2 \cdot 10^8$ et $2 \cdot 10^9$ V/m/s
Distance plateau / pointe	$\geq 1$ m
Distance plateau / sol	$\geq 2$ m

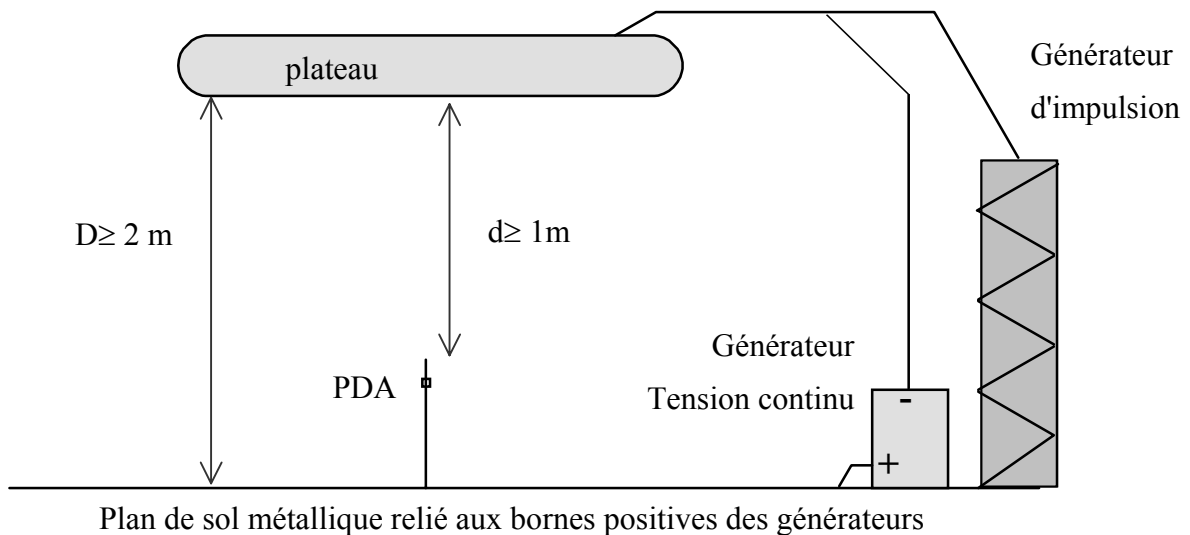


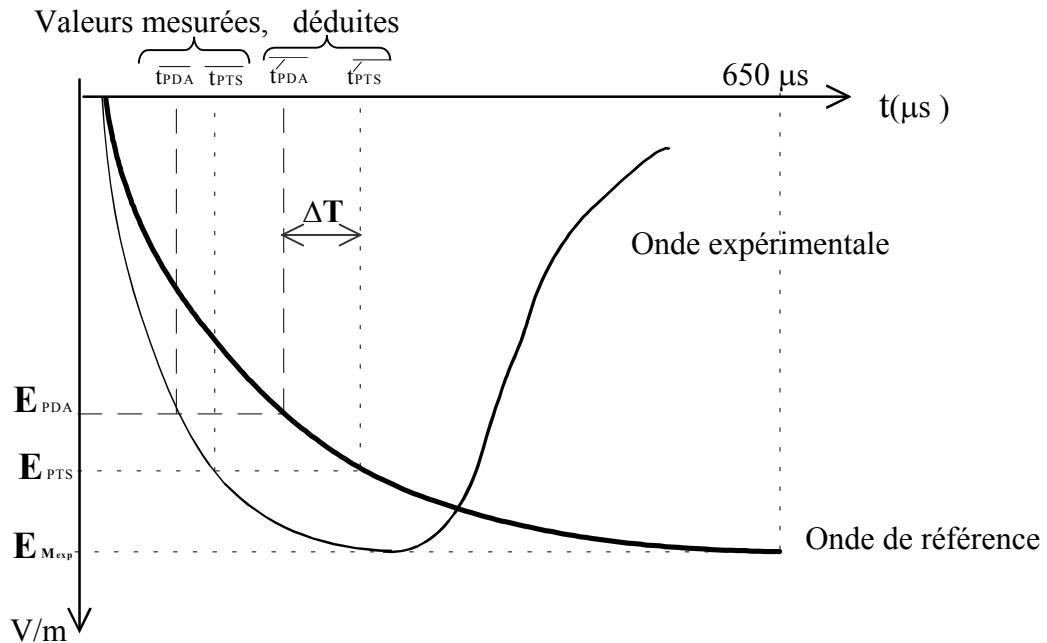
Figure 4 Configuration d'essai d'un paratonnerre en laboratoire

Les grandeurs à contrôler sont :

- la forme et l'amplitude de l'onde de tension impulsionnelle,
- la valeur de la polarisation continue,
- le réglage de l'amorçage sur le PTS de référence,
- la pression,
- la température,
- l'humidité absolue,
- le nombre de chocs.

Ces valeurs ne sont pas bornées par la norme.

La forme d'onde de référence définie par la norme est difficile à obtenir avec le dispositif expérimental. Aussi, une méthode graphique permet de déduire des mesures obtenues avec l'onde expérimentale, l'avance à l'amorçage que l'on aurait pu obtenir avec l'onde de référence.



L'avance à l'amorçage  $\Delta T$  est obtenue graphiquement. Les mesures en laboratoire donnent  $t_{PTS} - t_{PDA}$  en reportant les valeurs mesurées sur les courbes ci-dessus, on obtient  $\Delta T = t'_{PTS} - t'_{PDA}$ .

La norme indique qu'il est nécessaire de faire, pour chaque configuration, un nombre de chocs exploitables statistiquement suffisant, par exemple une centaine. La norme n'indique pas que l'écart type de la valeur de  $\Delta T$  est à prendre en compte. Un écart type important influe sur l'efficacité d'un paratonnerre.

L'avance à l'amorçage  $\Delta L$  utilisée pour évaluer les distances de protection est obtenue par la formule suivante :  $\Delta L = v \Delta T$

La vitesse de propagation d'un traceur ascendant positif qui est généré au sommet du paratonnerre n'est pas parfaitement connue. L'étude bibliographique en annexe 2 montre que cette vitesse est parfois estimée vers à  $10^5$  m/s, soit dix fois moins que dans la norme NF C 17-102. De plus, cette vitesse doit varier selon les coups de foudre : il doit y avoir une accélération et la valeur maximale doit dépendre de plusieurs facteurs (toutes les caractéristiques mesurées ou évaluées pour les coups de foudre, rappelées dans les annexes normatives, varient dans de grande proportion. Il est raisonnable de penser que la vitesse n'est pas constante).

La valeur  $\Delta T$  ne peut pas être une constante car il n'est pas sûr que cette valeur soit celle obtenue dans des conditions réelles de foudroiement.

Il est nécessaire de réaliser des essais de résistance à la corrosion, de compatibilité électromagnétique et de résistance au courant de foudre pour obtenir un PDA de conception efficace [8]. La norme NF C 17-102 ne traite pas de ces essais.

## 5. METHODES D'EVALUATION DES PDA

L'efficacité d'un paratonnerre, que ce soit un Paratonnerre à Tige Simple (PTS) ou à Dispositif d'Amorçage (PDA) est très difficile à évaluer. En effet, une validation des dispositifs de protection dans des conditions réelles nécessite soit une durée d'observation de plusieurs dizaines d'années, soit un nombre important de paratonnerres installés dans des configurations identiques.

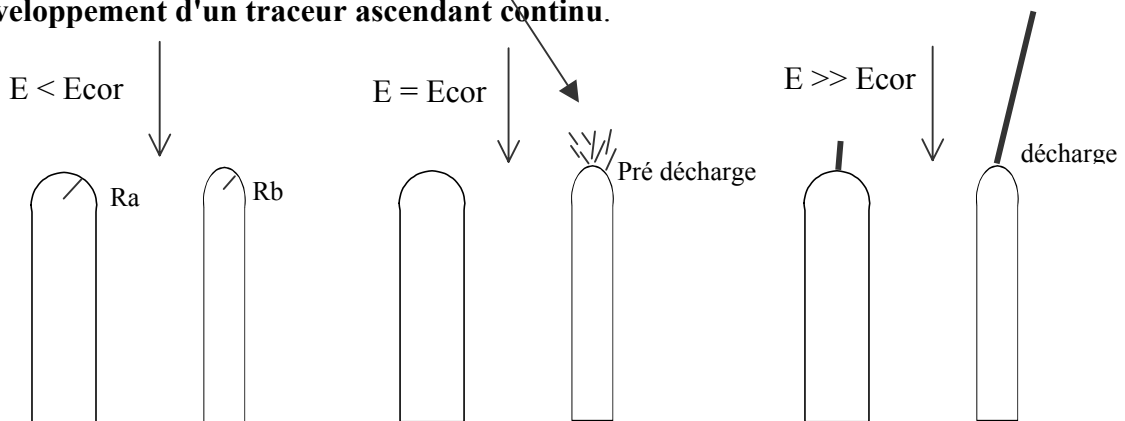
Pour qualifier les paratonnerres mis sur le marché depuis une dizaine d'années, des essais en laboratoire ont été proposés dans la norme NF C 17-102. Cependant, il n'est pas possible de simuler de manière satisfaisante un coup de foudre en laboratoire. Pour compléter les essais de laboratoire, des essais de foudre déclenchée sont réalisés sur des sites dédiés.

Ces deux types de qualifications ne peuvent que donner des indications sur le comportement des paratonnerres étudiés. Le retour d'expérience est finalement le meilleur indicateur de l'efficacité d'une protection vis-à-vis de la foudre.

### 5.1. ESSAIS EN LABORATOIRE

#### 5.1.1. Etudes exploratoires

L'une des premières étapes d'une décharge sur la pointe d'un paratonnerre est liée à l'effet Corona (cf. §1). Ces pré-décharges ascendantes (streamers en anglais) se produisent lorsque l'extrémité du dispositif de capture présente un rayon de courbure inférieur à une taille critique. Deller prend comme valeur de rayon critique 35 cm. Hutzler et GARY (1989) ont montré [9] que le rayon critique mesuré est beaucoup plus faible et dépend de la hauteur de la pointe située au sol. Menemenlis (2000) précise [10] que les premières étapes de la décharge sont progressivement supprimées lorsque le rayon de courbure du dispositif de capture augmente. Lorsque le rayon critique est dépassé, la décharge est alors directement issue d'un traceur continu. **L'effet Corona n'est pas indispensable au développement d'un traceur ascendant continu.**



*Comportement de deux objets dont le sommet est soumis à un champ électrique juste avant un coup de foudre*

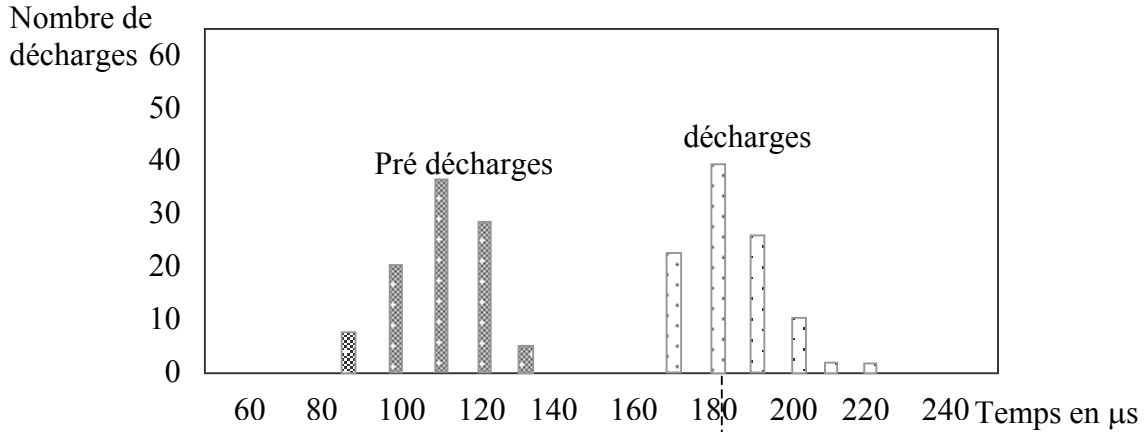
$R_b \gg R_c$  (rayon critique)

$E_{cor}$  : champ minimum pour déclencher l'effet Corona sur une pointe de rayon de courbure  $R_c$

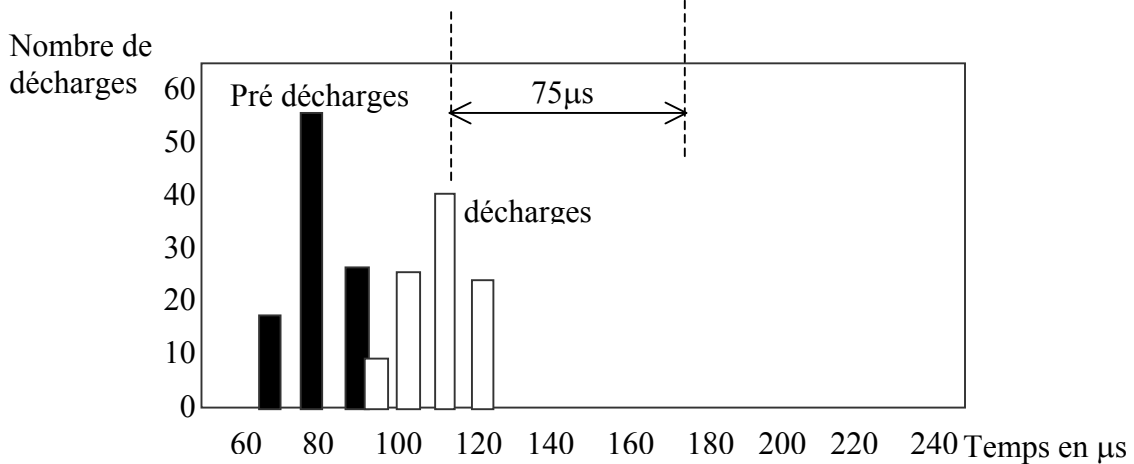
$R_b \leq R_c$ , le champ de démarrage de la décharge est indépendant du rayon de courbure de l'objet si le rayon est inférieur au rayon critique.

Des essais de BERGER en laboratoire (1994) ont montré [11] que des paratonnerres à déclenchement électrique permettent de générer des prédécharges ascendantes (streamers) et des traceurs ascendants continus en avance par rapport à une tige simple. Si les streamers sont effectivement en avance, c'est surtout le traceur ascendant qui est généré plus tôt.

BERGER montre que **les grandes étincelles dans l'air sont en avance de l'ordre de 75µs par rapport à une tige simple, lors des essais en laboratoire générées par un paratonnerre à déclenchement électrique.** Le PDA utilisé est un PULSAR fabriqué par HELITA.



*Distributions des temps d'apparition des pré-décharges et des décharges pour un PTS*



*Distributions des temps d'apparition des pré-décharges et des décharges pour un PDA*

*Figure 5 Comparaison des distributions des temps d'apparition des pré-décharges et des décharges entre un PTS et un PDA*

Les critères d'amorçage du précurseur positif (= pré-décharge positive) sur une structure au sol développés par Deller, Rick, Chowdhuri se basent sur le seuil d'apparition du traceur ascendant positif (Cela suppose qu'un traceur ascendant généré va se propager jusqu'à la rencontre du traceur descendant).

Lalande estime [12] ces critères insuffisants car on peut observer, lors du déclenchement artificiel d'éclairs, l'amorçage puis l'arrêt d'un leader positif après quelques mètres de propagation. Un traceur ascendant peut donc être stable ou instable. Aussi **la simple condition de formation d'un traceur ascendant est incomplète et les distances d'attraction déduites de ce type de critère risquent d'être surestimées**. De plus, l'étincelle positive de laboratoire présente un grand nombre de différences par rapport au traceur ascendant naturel, en particulier au niveau de sa vitesse de propagation, de son type de propagation, et du champ électrique ambiant d'initiation.

Contrairement au traceur positif naturel, l'étincelle positive du laboratoire issue d'une structure côté masse se propage vers l'électrode de façon stable, en d'autre terme son champ électrique de stabilisation est égal au champ critique de Peek. Ce qui explique les résultats trouvés par Berger.

		<b>FOUDRE</b>	<b>LABORATOIRE</b>
<b>Leader positif ascendant</b>	Vitesse (m/s)	$10^5$ à $10^6$	$1,2 \cdot 10^4$ à $2 \cdot 10^4$
	Courant (A)	50 à 200	0,5 à 1
	Longueur des bonds (m)	3 à 20	propagation continue
	Champ électrique ambiant (kV/m)	10 à 80	100 à 300
<b>Leader négatif descendant</b>	Vitesse (m/s)	$10^5$ à $5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^4$ à $10^5$
	Courant (A)		5 à 10
	Période des steps ( $\mu$ s)	20 à 30	10 à 20
	Longueur des bonds (m)	5 à 20	0,5 à 1,5
	Champ électrique ambiant (kV/m)	10 à 80	100 à 300

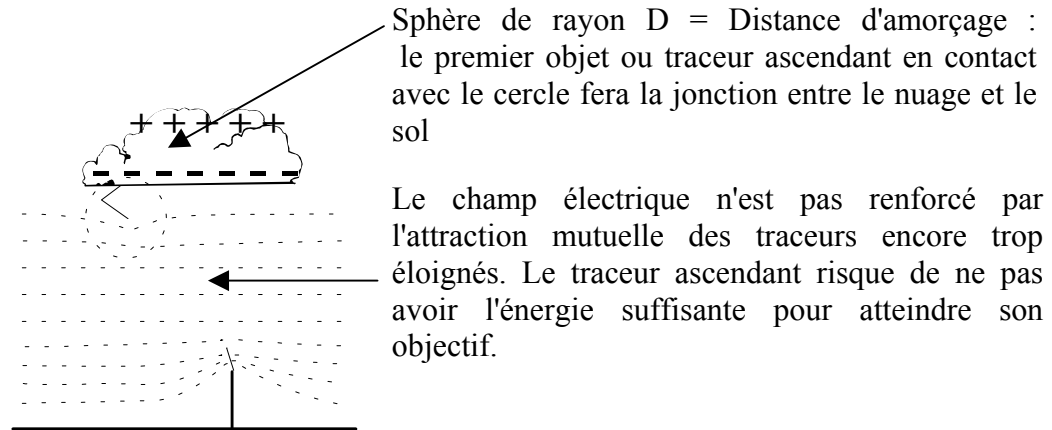
*Tableau 2 Comparaison entre les paramètres caractéristiques des décharges atmosphériques et des décharges de laboratoire*

Les paramètres caractéristiques (courant, vitesse, taille...) du phénomène naturel sont nettement supérieurs à ceux mesurés en laboratoire. On peut noter que les valeurs de champ électrique (champ créé par le nuage orageux ou par électrodes) dans lequel évoluent les décharges de laboratoire (de l'ordre de 200 kV/m) et du milieu naturel (de l'ordre de 40 kV/m) conduisent, surtout pour la décharge positive, à des modes de propagation différents.

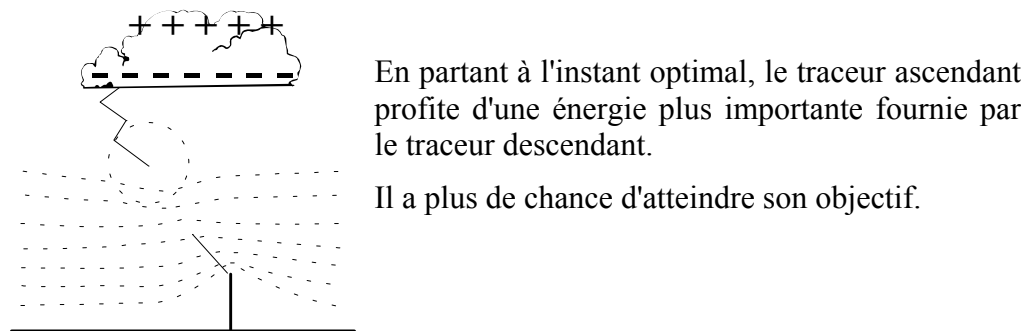
Menemenlis (ICLP2000) indique également que l'énergie nécessaire au développement d'un traceur ascendant continu est fournie par le traceur descendant. Le PDA ne peut pas fournir une telle quantité d'énergie. C'est également l'avis de Bouqueneau (président du Comité Technique Foudre TC81 à la CEI) donné à la NFPA lors de l'étude [13] des techniques des PDA (en annexe 2).

Si le PDA avait l'énergie suffisante pour générer un traceur ascendant sans l'apport d'énergie du traceur descendant, on peut imaginer qu'il serait capable de générer sur commande des coups de foudre ascendants. Ce serait très intéressant vis-à-vis de la protection, mais ce n'est pas le cas.

Cas 1 :



Cas 2 :



On peut supposer que si un traceur ascendant est déclenché dans des conditions locales favorables (un champ électrique suffisant), la propagation du traceur se fera tant que la condition de champ minimum sera présente. Le traceur s'arrêtera si le traceur descendant est trop loin (cas 1).

Si la zone d'influence du traceur ascendant permet de maintenir un champ électrique suffisant (cas 2), le traceur qui est parti tôt a la possibilité de poursuivre son cheminement jusqu'à la jonction. L'avance à l'amorçage lui a donné un avantage le cas échéant dans la compétition des traceurs.

### 5.1.2. Mesure de l'avance à l'amorçage

La procédure d'évaluation des PDA décrite dans la norme NF C 17-102 a été définie pour les fabricants de PDA. Cette procédure vise à quantifier l'avance à l'amorçage  $\Delta L$  d'un PDA.

Les paratonnerres commercialisés avec la mention *conforme à la norme NF C 17-102* ont subi des essais en laboratoire conformément à la procédure. Le plus souvent, un organisme de certification atteste de la conformité des essais par rapport à la procédure.

D'autres essais que ceux définis dans la norme NF C 17-102 ont été réalisés [14]. Par exemple, lorsqu'on teste en même temps un PTS et un PDA en laboratoire, selon la configuration du laboratoire d'essais, on obtient différents résultats. Des essais privés d'un fabricant montrent que le PDA capte la totalité des coups de foudre. Un rapport d'essais [15] réalisé par l'UMIST (University of Manchester Institute of Science and Technology) en 1997 indique que les PDA n'offrent pas d'avantage apparent par rapport au PTS.

La valeur d'avance à l'amorçage d'un PDA par rapport à un PTS obtenue en laboratoire est un paramètre validé selon la procédure de la norme NF C 17-102. Cependant, la valeur de ce paramètre ne suffit pas à elle seule à estimer l'efficacité du PDA.

Les traceurs générés en laboratoire ne peuvent pas se former pour le même champ électrique ambiant que lors des conditions de foudre. Lalande [12] montre qu'il faut appliquer un champ ambiant plus élevé pour former un leader sur une échelle réduite.

Les résultats d'essais en laboratoire sont à interpréter avec prudence, car les modes de propagation des décharges en laboratoire et en condition d'orage sont différents (cf. paragraphe précédent).

## 5.2. ESSAIS A L'EXTERIEUR

Les essais sur un site dédié sont difficiles à réaliser, forcément très liés à l'activité orageuse locale et très coûteux pour les fabricants de PDA qui n'ont pas les moyens de réaliser des essais de cette importance. Rappelons que les essais de foudre déclenchée par fusées ont été réalisés principalement avec les moyens d'EDF et de France Télécom. Seule la société INDELEC a réalisé des campagnes de mesures avec déclenchement artificiel de la foudre depuis les campagnes d'essais d'EDF à Saint Privat d'Allier.

Les essais en espace libre consistent à déclencher un coup de foudre à l'aide d'une fusée. Lorsqu'un coup de foudre est imminent, une fusée est lancée vers le nuage orageux. Cette fusée est reliée à un conducteur de cuivre de sorte à créer un canal conducteur qui va favoriser un coup de foudre à proximité immédiate du pas de tir. Le conducteur de cuivre n'est pas relié à la terre de sorte que le cheminement du traceur descendant est libre dans les dernières dizaines de mètres. Ce type d'essai permet de mesurer les courants de pré-décharge qui précèdent la progression du traceur ascendant (évolution des streamers).

Des essais ont été réalisés en France à St Privas d'Allier en 1996, mais aussi dans des pays où l'activité orageuse est plus importante qu'en France. Des campagnes ont été organisées en Floride en 1993 et 1994. **Les résultats de ces campagnes confirment l'avance à l'amorçage des PDA par rapport au PTS.**

Eybert Bérard a comparé l'efficacité d'un PDA qui protège une éolienne au Japon [16] avec l'efficacité annoncée dans la norme NF C 17-102. Les résultats obtenus sur site avec 32 coups de foudre sont cohérents avec les niveaux de protection de la norme NF C 17-102 en terme d'efficacité de capture.

Les mesures faites au Brésil (2000) par INDELEC sur les conducteurs de liaison à la terre montrent que les premières étapes de la création des traceurs ascendants sont similaires à celles obtenues en laboratoire. Les photographies réalisées témoignent également du bon comportement des PDA.

Les campagnes d'essais n'ont pas fourni, pour l'instant, un nombre suffisant de données pour apporter des éléments probants qui démontrent la supériorité du PDA sur le PTS en terme de rayon d'action. Cependant, l'avance à l'amorçage est démontrée.

### 5.3. RETOURS D'EXPERIENCE

Depuis 1985, plus de 100 000 PDA ont été installés selon l'Association Protection Foudre. Compte tenu des informations recueillies par l'INERIS, ce chiffre correspond à un minimum. Le nombre de PDA installés est élevé, si ces dispositifs étaient complètement inefficaces, le nombre d'accidents dus à l'utilisation de ces dispositifs devrait être significatif.

Le taux de retour de PDA pour vérification ou défaillance pour l'ensemble de fabricants est extrêmement faible. Les fabricants en déduisent donc que leur produit est fiable.

Cependant, le parc de PDA à dispositif électrique installé en France n'a pratiquement jamais été contrôlé ; tout du moins les vérifications sont sporadiques. La norme NF C 17-102 ne précise pas de vérifier le fonctionnement de la partie active du PDA. Même si des équipements spécifiques de tests ont été développés par certains fabricants, le taux d'équipements des organismes de contrôle est extrêmement faible.

En cas de panne des paratonnerres à dispositif électrique, le bénéficiaire de la protection n'est pas averti. Le PDA se comporte au mieux comme un PTS. En fait, la probabilité de foudroiement d'un paratonnerre est assez faible en France. Supposons qu'un paratonnerre capte l'ensemble des coups de foudre dans un rayon de 100 m (cette valeur de 100 m est arbitraire mais semble optimiste). Cela équivaut à dire que le paratonnerre capte les coups de foudre dans la surface de 31 416 m<sup>2</sup> qui l'entoure. Compte tenu de la densité moyenne de foudroiement en France de 1,2 impact par km<sup>2</sup> et par an (donnée issue de la banque de donnée de METEORAGE), ce paratonnerre capte un coup de foudre tous les 26 ans. En considérant un parc de 100 000 PDA en France, tous les ans plus de trois milles PDA sont foudroyés.

Les dernières générations de PDA et les produits en cours de développement comportent de nombreux composants électroniques. Même s'il est exact que ces éléments sont peu sollicités, il est souhaitable de connaître la disponibilité des PDA à répondre à une sollicitation.

Les arguments avancés par ceux qui cherchent à montrer l'inefficacité des PDA peuvent être utilisés pour démontrer l'inefficacité de tous les types de paratonnerres. Par exemple, Hartono (2000) a présenté une étude photographique [17] qui montre que la foudre a frappé l'angle de bâtiments protégés par PDA. Il existe de nombreux exemples qui montrent que la foudre est tombée à côté d'un simple paratonnerre. Il faut rappeler que les dispositifs de capture offrent une efficacité statistique, calculée à partir des distributions des courants d'arc en retour des coups de foudre. De plus, elle repose sur l'utilisation de modèles d'attachement de la foudre admis sous certaines conditions mais non démontrés par la communauté scientifique. Le modèle le plus utilisé, repris par les Normes Françaises, est le modèle électrogéométrique.

Une partie des PDA sont installés avec des compteurs de coups de foudre, il serait intéressant de comparer la valeur affichée par le compteur aux données locales de foudroiement ou encore de faire le rapport entre les coups de foudre captés et ceux qui ont frappé dans la zone protégée. Compte tenu du parc de PDA et PTS installés, une enquête sur le comportement des protections serait représentative de leur efficacité.

## 6. PERFORMANCES DES PDA

---

Les Paratonnerres à Dispositif d'Amorçage qualifiés selon la norme NF C 17-102 présentent une **avance à l'amorçage** par rapport aux Paratonnerres à Tige Simple dans les conditions d'essais de laboratoire. Ce paramètre qui joue un rôle important dans le comportement du paratonnerre a été traduit en rayon de protection. Compte tenu de la complexité du phénomène d'attachement de la foudre, de la grande variation possible de tous les paramètres (y compris la vitesse de propagation des traceurs) rien ne prouve que les rayons de protection annoncés soient réalistes.

Ce chapitre fait le point sur les informations fournies aux utilisateurs de PDA, l'efficacité de ce dispositif et donne des recommandations quant à l'utilisation des PDA.

### 6.1. LES INFORMATIONS FOURNIES AUX UTILISATEURS

Les utilisateurs de PDA, au sens large, sont :

- les bureaux d'étude,
- les installateurs,
- les bureaux de contrôle,
- les responsables d'installation (installations industrielles ou résidentielles, établissements recevant du public...).

#### 6.1.1. Bureaux d'étude

Les ingénieurs des bureaux d'étude connaissent la norme NF C 17-102 et les textes réglementaires. Les documentations concernant les PDA distribuées par les fabricants indiquent :

- la conformité à la norme NF C 17-102,
- les certificats de qualification selon la norme NF C 17-102 par un organisme indépendant,
- les laboratoires de recherches qui ont participé au développement ou à la pré qualification du produit,
- trois tableaux indiquant les performances des produits selon le niveau de protection choisi.

Chaque tableau indique le rayon de protection du modèle de PDA en fonction de sa hauteur. Le rayon est calculé selon la formule :

$$R_p = \sqrt{h(2D - h) + \Delta L(2D + \Delta L)}$$

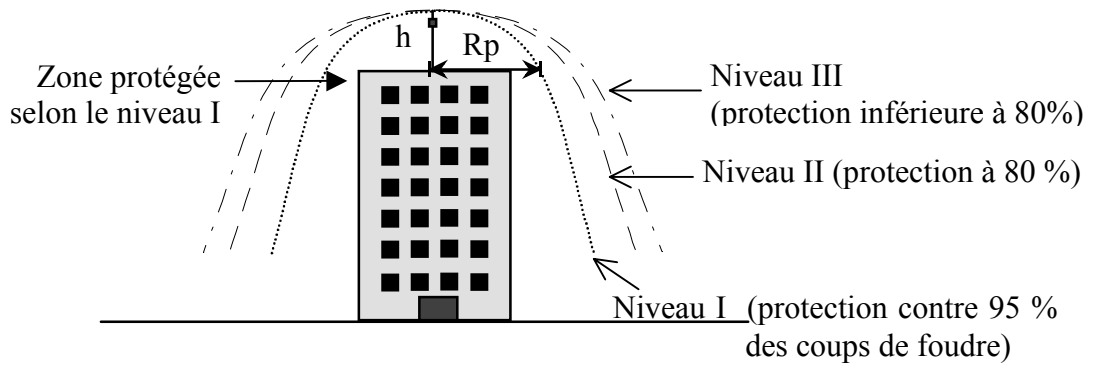
Avec : D: distance d'amorçage

$\Delta L$  : gain en longueur du traceur ascendant défini par  $\Delta L = v \Delta T$ ,  
(La vitesse de propagation du traceur est à  $10^6$  m/s)

h : hauteur de la pointe du PDA au-dessus du plan à protéger,

$R_p$  : rayon de protection du PDA,

$\Delta T$  : gain en instant d'amorçage du traceur ascendant continu.



L'avance à l'amorçage est indiquée en micro seconde ( $\Delta T$  en  $\mu s$ ) ou en mètres ( $\Delta L$  en m).

Le tableau ci-dessous indique les rayons de protection 5 m sous la pointe d'un PDA. L'avance à l'amorçage est une constante qui dépend du modèle de PDA.

Niveau de protection Avance à l'amorçage $\Delta T$	I	II	III
Modèle 25 $\mu s$	42 m	57 m	65 m
Modèle 40 $\mu s$	58 m	75 m	84 m
Modèle 60 $\mu s$	79 m	97 m	107 m

Tableau 3 : Rayon de protection d'un PDA ( $h=5m$ )

Il existe des règles particulières définies par certains fabricants concernant la température maximale et minimale de fonctionnement, des distances minimales entre deux PDA. Par exemple, il n'est pas conseillé d'installer un PDA au sommet d'une cheminée en service si la température des dégagements est supérieure à 100°C. La distance minimale préconisée entre deux PDA varie selon les constructeurs de 2 m à 25 m ou encore la somme des deux hauteurs des PDA. Ces informations ne sont pas indiquées dans les documentations distribuées par les fabricants.

### 6.1.2. Installateurs

Les installateurs mettent en place les dispositifs de protection contre la foudre selon les recommandations du bureau d'étude. La norme NF C 17-102 précise qu'un PDA doit être au minimum à deux mètres au-dessus de l'objet à protéger. Les autres règles d'installations des dispositifs de protection avec PDA sont identiques à celle d'un PTS.

### 6.1.3. Bureaux de contrôle

Les bureaux de contrôle se réfèrent à la norme NF C 17-102 pour la vérification du système de protection. Les vérifications demandées pour une installation avec PDA sont identiques à celle d'un PTS. Deux fabricants (INDELEC et HELITA) ont développé récemment un système de tests de la partie active (système électronique) qui permet de vérifier l'état des circuits électriques du PDA. Ces testeurs sont des instruments conçus pour une utilisation sur site sans démontage du PDA.

Très peu de bureaux de contrôle disposent d'un système de tests car la vérification de la partie active n'est pas exigée dans la norme. Il n'y a pas de demande de la part des utilisateurs pour cette vérification.

#### **6.1.4. Responsables d'installations**

Les responsables d'installations ont à leur disposition la documentation commerciale des produits et éventuellement un document de leur bureau d'étude qui préconise une solution de protection. L'utilisateur final est rarement informé que la protection qu'il met en place repose sur des modèles d'attachement de coups de foudre négatifs. Rien n'est complètement défini pour les coups de foudre positifs qui représentent 10% des impacts et qui sont en majorité beaucoup plus énergétiques. Cette remarque est vraie pour tous les types de paratonnerres (PDA et PTS).

Le PDA est présenté comme un dispositif dont l'efficacité est reconnue, de technologie avancée puisque qu'une norme française a été rédigée et que des brevets d'invention ont été déposés.

Les responsables d'installation n'ont pas la possibilité d'apprécier la pertinence ou l'efficacité de leur installation avant les premiers foudroiements. Les installations de protections installées répondent souvent à une obligation réglementaire et sont conformes aux normes. Il est important de pouvoir vérifier que des protections parfois imposées présentent l'efficacité attendue.

## 6.2. LES CARACTERISTIQUES DEMONTREES

Lorsqu'un PDA subit avec succès les essais de qualification selon la norme NF C 17-102, son avance à l'amorçage pour les grandes étincelles de laboratoire est démontrée. Les rapports d'essais de laboratoires indépendants et les données de mesures fournies à l'INERIS par deux fabricants (INDELEC et HELITA) indiquent que l'avance à l'amorçage est réelle. La figure ci-dessous indique les instants d'amorçage obtenus dans les mêmes conditions pour un PTS et un PDA. La différence d'instant d'amorçage montre clairement l'avance du PDA sur le PTS.

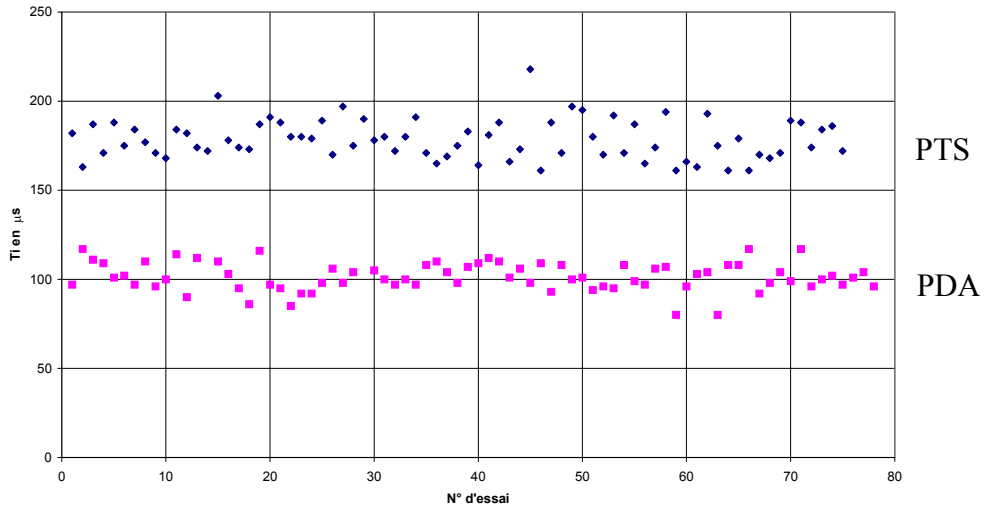


Figure 6 Instants d'amorçage d'un PDA et d'un PTS en laboratoire

La Figure 7 montre que ce PDA génère un traceur au plus tard 120  $\mu s$  après le début de l'impulsion du générateur d'essai. Le PTS démarre au plus tôt après 160  $\mu s$ .

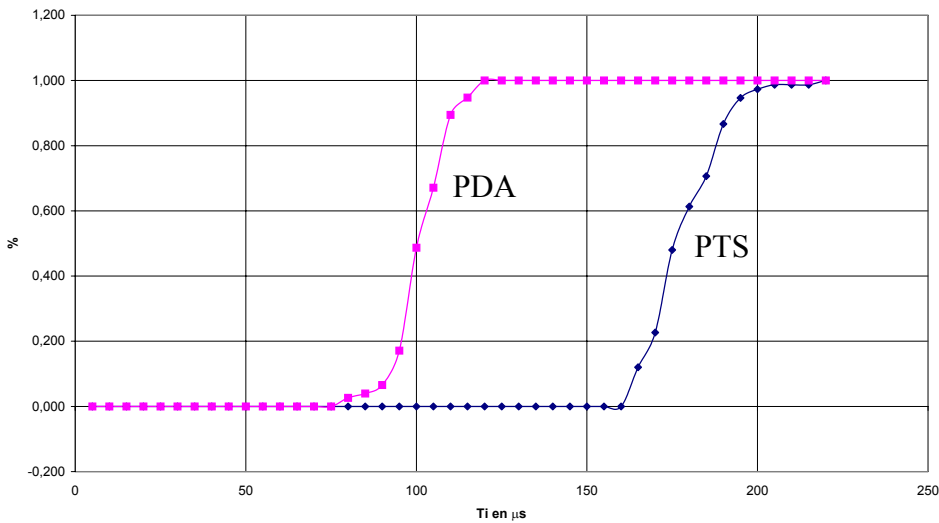


Figure 7 Distribution des retards (exemple)

La Figure 8 indique la distribution des instants d'amorçage. On remarque que l'écart type des instants d'amorçage du PDA est plus faible que celle du PTS. Cela signifie que l'instant d'amorçage du PDA est plus proche de sa valeur moyenne d'amorçage que dans le cas d'un PTS. Ce type de PDA (PULSAR d'HELITA) est du type "déclenchement électronique" ; n'ayant pas eu accès aux données brutes d'autre type de PDA, nous ne pouvons pas apprécier si la réduction de l'écart type est liée au système de déclenchement électronique.

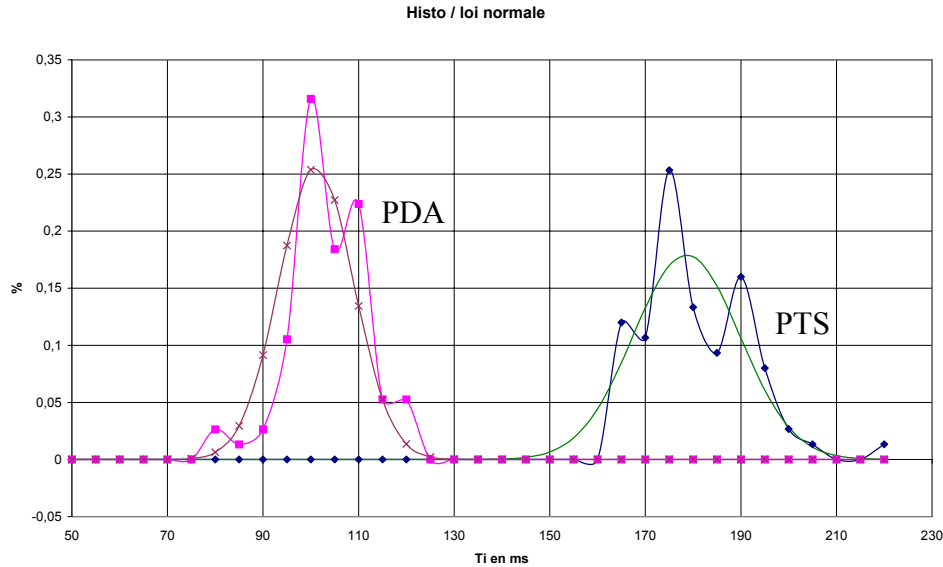


Figure 8 Distribution des temps d'amorçage mesurés et représentation des distributions normales associées

- Valeur mesurée
- Distribution normale
- x—x—x

La valeur moyenne de  $\Delta T$  du PULSAR indiquée sur la figure 8 est de 100  $\mu s$ . La documentation commerciale du PULSAR ne mentionne pas de modèle avec un  $\Delta T$  de 100  $\mu s$  ; il en est de même pour d'autres fabricants. La valeur maximale couramment annoncée est de 60  $\mu s$ . La norme NF C 17-102 mentionne des valeurs jusqu'à 50  $\mu s$ . En fait, les produits ont été améliorés depuis la date de parution de la norme en 1995, aujourd'hui il est possible de réaliser des PDA avec un  $\Delta T$  supérieur à 120  $\mu s$ . Compte tenu de la vitesse retenue pour le traceur ascendant (10<sup>6</sup>m/s), le  $\Delta L$  obtenu sera de 120 m. Avec une telle valeur, les rayons de protection deviennent très grand (139 m à 170m pour h=5m) et de moins en moins crédibles. Un accord entre les fabricants regroupés au GIMELEC limite le  $\Delta T$  annoncé à 60  $\mu s$  max. Cet accord a l'avantage d'éviter la course à l'avance à l'amorçage chez les fabricants qui perturberait le choix d'un modèle. Elle permet en outre d'introduire une marge de sécurité qui prend en compte le fait que la vitesse de propagation retenue pour le traceur ascendant est probablement surévaluée (annexe 4).

La solution qui consiste à augmenter la densité d'ions au niveau de la pointe du paratonnerre influence la première phase d'attachement de la foudre. Elle favorise le départ d'un traceur ascendant. L'essai de qualification selon la norme NF C 17-102 montre que cette solution conduit à une avance à l'amorçage du paratonnerre. La société INDELEC a mesuré le courant dans la liaison à la terre du paratonnerre dans des conditions de foudre déclenchée, le phénomène d'avance à l'amorçage pour le PDA est également mesurable dans ces conditions.

### 6.3. LES CARACTERISTIQUES NON DEMONTREES

La caractéristique non-démontrée et peut-être non-démontrable est le rayon de protection d'un paratonnerre.

La NFPA<sup>2</sup> a confié à un comité indépendant une mission d'évaluation des PDA. Le rapport du comité figure en annexe 5. Le comité a répondu aux questions suivantes :

- 1 la technologie de protection contre la foudre par PDA est-elle fiable sur les plans scientifiques et techniques ?
  1. Il semble que les organes capteurs PDA sont fiables du point de vue technique dans la mesure où ils sont en général équivalents à l'organe capteur traditionnel type de Franklin dans les expériences de laboratoire.
  2. Cela dit, ni les organes capteurs PDA, ni la tige de Franklin traditionnelle ne semblent fiables sur le plan scientifique ou technique lorsqu'ils sont soumis à des essais d'évaluation sur le terrain dans des conditions de foudroiement naturelles.
  3. La technique de protection paratonnerre par PDA telle qu'elle est actuellement mise en œuvre dans le cadre de systèmes complets ne semble pas fiable sur les plans scientifiques et techniques du point de vue des zones de protection revendiquées ou des principes essentiels du système de mise à la terre.
- 2 La technologie de protection contre la foudre par PDA repose-t-elle sur une base théorique scientifique et des essais de laboratoire adéquats ?
  1. Il semble que le principe et la conception des Paratonnerres à Dispositifs d'Amorçage (à précurseurs) reposent sur une base théorique adéquate du point de vue physique.
  2. Il ne semble pas que l'extension revendiquée des zones de protection lorsqu'on utilise des conducteurs de descente et un système de mise à la terre limité repose sur une base théorique adéquate.
  3. Les essais Haute Tension réalisés en laboratoire sur les organes capteurs PDA semblent être appropriés quant à leur portée et à leur nombre, mais ils sont limités dans la mesure où ils ne correspondent pas à une évaluation du système global de protection paratonnerre par dispositifs PDA dans des conditions naturelles d'orage.

Une des recommandations du rapport de la NFPA est de revoir la forme du document NFPA 780 pour en faire un guide ou une pratique recommandée. La commission est d'avis que le document NFPA 780 ne satisfait pas aux critères que doit remplir une norme NFPA étant donné que le système de protection contre la foudre recommandé n'a jamais été validé sur le plan technique ou scientifique et que les organes capteurs à tige de Franklin n'ont pas été validés dans le cadre d'essais sur le terrain dans des conditions d'orage.

---

<sup>2</sup> National Fire Protection Association

Les rayons de protection annoncés par les PDA sont contestés car :

**A) la relation  $\Delta L = v \Delta T$  est très optimiste.**

On rappelle que :

- $\Delta L$  est le gain en longueur du traceur ascendant,
- $v$  est la vitesse de propagation du traceur est considérée constante et égale à  $10^6$  m/s,
- $\Delta T$  est le gain en instant d'amorçage du traceur ascendant continu,
- la valeur de  $\Delta T$  est une moyenne d'avance à l'amorçage obtenue en laboratoire.

Il est très probable que :

- la vitesse du traceur ascendant est différente de  $10^6$  m/s,
- la vitesse du traceur descendant est différente de celle du traceur ascendant (rapport des vitesses différent de 1),
- la vitesse n'est pas constante (accélération).

**B) les conditions de propagation d'un traceur ne sont peut être pas réunies à l'instant de la génération du traceur ascendant** (génération d'une pré-décharge sans énergie suffisante à son développement en traceur ascendant)

La relation qui permet de calculer l'avance à l'amorçage d'un PDA combine la notion de distance d'attraction calculée pour le modèle électrogéométrique et la notion d'avance à l'amorçage. Or la relation donnée pour le calcul de la distance d'attraction, dépend du champ électrique développé au niveau de la structure et donc en particulier de sa longueur et de sa hauteur au-dessus du sol. Il n'y a aucune raison pour que cette relation soit vraie pour le champ électrique correspondant à l'activation du PDA.

On rappelle que parfois des traceurs ascendants s'éteignent avant la connexion au traceur descendant (cette remarque ne concerne pas que les PDA). Une avance à l'amorçage est un départ prématuré ou un avantage lors d'une compétition de traceurs ascendants ?

Le tableau ci-dessous reprend le tableau page 32 et montre les valeurs des rayons de protection lorsque l'on prend en compte la variation de  $\Delta T$ .

Avance à l'amorçage $\Delta T$	Niveau de protection								
	$V= 10^6$ $\Delta T -10\%$	<b>I</b> $V= 10^6$ $\Delta T$	$V= 10^6$ $\Delta T +10\%$	$V= 10^6$ $\Delta T -10\%$	<b>II</b> $V= 10^6$ $\Delta T$	$V= 10^6$ $\Delta T +10\%$	$V= 10^6$ $\Delta T -10\%$	<b>III</b> $V= 10^6$ $\Delta T$	$V= 10^6$ $\Delta T +10\%$
Modèle 25 $\mu$ s	39	<b>42</b>	45	54	<b>57</b>	60	61	<b>65</b>	68
Modèle 40 $\mu$ s	54	<b>58</b>	62	70	<b>75</b>	80	83	<b>84</b>	88
Modèle 60 $\mu$ s	72	<b>79</b>	85	91	<b>97</b>	103	100	<b>107</b>	113

Tableau 4 Rayon de protection d'un PDA (m)

Le fait de ne pas prendre en compte l'écart type de  $\Delta T$  pour la valeur du rayon de protection n'est pas très gênant en pratique pour concevoir une protection car les rayons de protection retenus dans les études ne requièrent pas une grande précision.

L'écart type de l'instant de déclenchement d'une pré-décharge est apparemment plus grand pour un PTS. Il n'est pas pris en compte pour les PTS car la sphère fictive est uniquement liée au traceur descendant. La forme ou la composition de l'objet au sol n'est absolument pas pris en compte dans le modèle électrogéométrique. L'instant d'amorçage des PDA est soumis à polémique, mais il est occulté pour les PTS alors qu'il intervient également dans l'efficacité de la protection.

Le tableau ci-dessous montre les valeurs des rayons de protection selon différentes vitesses du traceur ascendant.

Avance à l'amorçage $\Delta T$	Niveau de protection								
	$V=10^5$ $\Delta T$	<b>I</b> $V=5 \cdot 10^5$ $\Delta T$	$V=10^6$ $\Delta T$	$V=10^5$ $\Delta T$	<b>II</b> $V=5 \cdot 10^6$ $\Delta T$	$V=10^6$ $\Delta T$	$V=10^5$ $\Delta T$	<b>III</b> $V=5 \cdot 10^5$ $\Delta T$	$V=10^6$ $\Delta T$
Modèle 25 $\mu s$	17	28	42	26	41	57	30	47	65
Modèle 40 $\mu s$	19	37	58	28	51	75	33	58	84
Modèle 60 $\mu s$	21	48	79	32	63	97	36	71	107

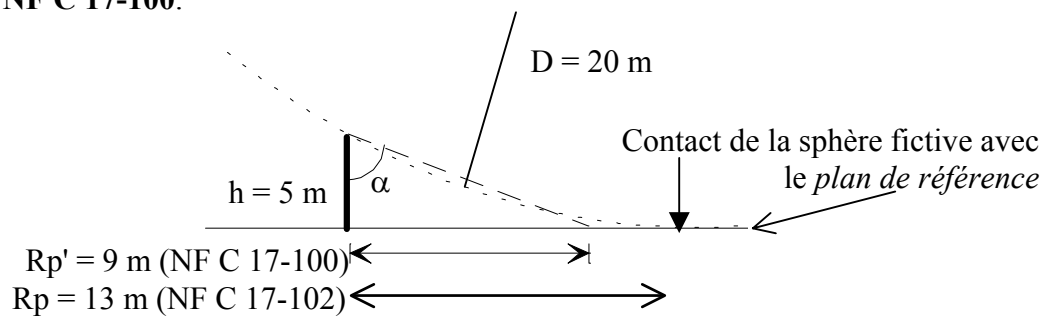
Tableau 5 Rayon de protection d'un PDA en fonction de la vitesse de propagation (m)

Le Tableau 5 montre qu'en prenant des vitesses inférieures à  $10^6$  m/s, on réduit considérablement la valeur des rayons de protection. En prenant une vitesse de  $10^5$  m/s (10 fois moins que dans la norme NF C 17-102), le rayon de protection est divisé d'un facteur 2 à 3. En prenant  $5 \cdot 10^5$  m/s, le rayon de protection est diminué d'environ 30%.

PTS (h=5 m)	Niveau de protection			
	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>
NF C 17-100 : Rp' (tableau 3 P.12)	9	11	14	17
NF C 17-102 : Rp $\Delta T = 0 \mu s$ h=5 m	13	16	21	24

Tableau 6 Rayon de protection d'un PTS (m)

On peut remarquer que **pour un PDA présentant une avance à l'amorçage nulle (c'est-à-dire un PTS), les rayons calculés avec la norme NF C 17-102 sont supérieurs d'environ 40% à ceux obtenus à l'aide de l'angle de protection selon le tableau 3 de la norme NF C 17-100.**



Cet écart de rayon de protection est lié à l'utilisation du modèle électrogéométrique. Le dessin ci-dessus illustre le rayon Rp' obtenu avec un angle de protection  $\alpha$  selon la norme NF C 17-100 et le rayon Rp obtenu avec la norme NF C 17-102 pour  $\Delta T = 0 \mu s$  h=5 m.

## **6.4. AVIS SUR L'EFFICACITE DES PDA**

### **6.4.1. Des différences entre les modèles**

Deux fabricants ont réalisé des travaux de recherche en laboratoire et lors de coups de foudre à l'extérieur. Ces travaux ont permis d'optimiser leurs produits. D'autres fabricants ont suivi le marché et ont investi dans le développement de produit en se limitant à l'essai de qualification selon la norme NF C 17-102. Certains produits annoncent des rayons de protection sans que ces rayons puissent être liés à un essai de mesure d'avance à l'amorçage selon la norme ; leur principe de fonctionnement ne permet pas de faire ces essais.

Il est clair que sous l'appellation PDA, il y a des produits très différents. Les paratonnerres radioactifs font partie de la famille des PDA. La norme NF C 17-102 ne permet pas de mettre en évidence le comportement de certains produits.

L'appellation PDA regroupe des produits dont le principe de fonctionnement et les solutions techniques sont très différentes. Les utilisateurs de PDA n'ont pas les informations suffisantes pour apprécier l'efficacité des différents modèles.

### **6.4.2. Une efficacité difficile à démontrer**

Les différents types de PDA sont réalisés sur la base d'un PTS auquel est ajouté un dispositif supplémentaire. Le moins performant des PDA devrait donc avoir une efficacité équivalente à celle d'un PTS.

Le principe d'ionisation de l'air favorise la présence d'électron germe au niveau de la pointe du paratonnerre. Cela se traduit par une avance à l'amorçage du PDA par rapport au PTS. Cette avance à l'amorçage peut donner un avantage lors de la compétition des traceurs ascendants. Cependant, les essais en laboratoire ou en extérieur n'ont pas apporté la preuve que l'avance à l'amorçage augmentait l'efficacité de la protection.

En pratique, les efforts des fabricants se sont concentrés sur la mesure du paramètre d'avance à l'amorçage plutôt que sur l'évaluation de l'efficacité du dispositif. L'efficacité des PTS est admise et non démontrée, aussi il est difficile de démontrer l'efficacité d'un PDA car ce dernier repose sur les mêmes modèles d'attachement de la foudre.

Le bénéfice de l'avance à l'amorçage traduit en rayon de protection comme l'indique la norme NF C 17-102 n'est pas démontré.

## **6.5. CRITIQUE DE LA NORME NF C 17-102**

Dans les chapitres III et IV, nous avons décrit la norme NF C 17-102. Nous suggérons que cette norme soit complètement revue comme *norme produit* pour les raisons suivantes :

### **6.5.1. Partie installation**

La norme NF C 17-100 (1997) "Protection des structures contre la foudre - installation de paratonnerres" a repris les règles d'installation indiquée dans la norme NF C 17-102 (1995). Il n'est pas utile d'indiquer les règles d'installation des PDA si ces derniers doivent être installés comme un PTS. Il est suffisant d'indiquer les règles particulières comme la hauteur minimale par rapport au volume à protéger, les environnements ou zones où le PDA ne doit pas être installer...

### **6.5.2. Partie qualification**

Dans la version actuelle de la norme, la qualification du PDA est traitée en annexe C (4 pages). Il n'existe pas d'essais pour les paratonnerres classiques, il faut reconnaître que l'essai d'évaluation des PDA a le mérite d'exister et permet de mesurer un paramètre important du système de protection. Compte tenu de l'expérience acquise lors de ces essais d'évaluation et des lacunes en terme d'exigence des conditions d'essais, il est souhaitable de compléter la procédure d'évaluation pour qu'elle devienne une procédure de qualification. Des propositions en ce sens sont faites par certains fabricants [18].

### **6.5.3. Partie choix et positionnement du PDA**

La partie 2.2 de la norme traite du rayon de protection du dispositif de capture. C'est la partie la plus difficile à traiter pour une norme paratonnerre. L'angle de protection d'un PTS annoncé au paragraphe 2.1.2 de la norme NF C 17-100 est fonction du niveau de protection à obtenir ; c'est à dire qu'il est lié au courant de l'arc en retour du coups de foudre. Plus le courant est élevé, plus le PTS peut capter un précurseur éloigné.

C'est l'énergie du traceur descendant de la foudre qui est le paramètre prépondérant et qui va déterminer le rayon de capture d'un paratonnerre. Les améliorations des PTS en PDA peuvent créer de conditions favorables à un attachement et améliorer l'efficacité statistique du paratonnerre.

Les rayons de protections des systèmes de protection ne peuvent pas être démontrer dans l'état actuel de nos connaissances. Il est souhaitable que l'efficacité d'un PDA soit traduite en gain d'efficacité ou en marge de sécurité par rapport à un PTS tant qu'un nouveau modèle ne sera pas admis pour la détermination des rayons de protection.

Pour la modification de la norme NF C 17-102, il est souhaitable de continuer les investigations sur l'instant optimal du départ du traceur [19] car l'efficacité du PDA n'est peut-être pas proportionnelle à l'avance à l'amorçage.

## **6.6. CRITIQUES DES TECHNIQUES UTILISEES**

Le principe d'ionisation de l'air au niveau de la pointe du paratonnerre est pertinent. Les différentes solutions techniques offrent des avantages et des inconvénients.

### **1. Paratonnerre radioactif**

Le paratonnerre radioactif est interdit à la vente, peu importe ses avantages car l'inconvénient majeur est qu'il contient un radioélément.

### **2. Paratonnerre à déclenchement électronique**

Les paratonnerres à déclenchement électronique ont l'avantage de pouvoir être testés par un dispositif extérieur lorsque cela est prévu lors de la conception. Cependant, plus un équipement électronique est sophistiqué, plus sa disponibilité et sa fiabilité sont difficiles à garantir. En particulier, les PDA qui disposent de capteurs solaires et d'une batterie nécessitent une conception et une sélection des composants très rigoureuse.

Il est probable que le réglage de l'instant de déclenchement du traceur ascendant a une grande importance sur les chances de succès lors de la compétition des traceurs ascendants. L'instant optimal n'ayant pas été démontré, l'avance à l'amorçage qui paraît être un avantage doit être un inconvénient lorsque l'énergie minimale nécessaire à la propagation n'est pas encore atteinte.

### **3. Paratonnerre piézo-électrique**

Le système piézo-électrique génère des ions lorsque le vent fait osciller le PDA. Par principe, l'efficacité de ce PDA ne peut pas être mise en évidence selon l'essai de qualification NF C 17-102. Le dispositif paraît mécaniquement complexe, la fiabilité de l'effet de l'avance à l'amorçage dans des conditions réelles d'utilisation n'a jamais été démontrée. Ce type de PDA est très répandu et le nombre de PDA désignés défectueux est très faible. Il est impossible de dire si c'est la forme du PDA qui apporte une efficacité ou si l'efficacité de ce type de PDA est proche de celle d'une tige simple.

### **4. Paratonnerre à profil spécial**

Les paratonnerres à profil spécial ne contiennent pas d'éléments actifs. Il est surprenant que la forme du PDA puisse avoir une telle influence, cependant, les résultats d'essais selon la norme NF C 17-102 indiquent une avance à l'amorçage très importante ( $\Delta t > 120 \mu s$ ). Ce type de paratonnerre a l'avantage, lorsqu'il est conçu avec les matériaux appropriés, d'offrir une aussi bonne fiabilité qu'un PTS.

## 6.7. RECOMMANDATIONS ET ACTIONS A MENER

Une vive polémique sur l'efficacité des Paratonnerres à Dispositif d'Amorçage est alimentée par bon nombre de scientifiques et de professionnels de la protection contre la foudre, tant au niveau national qu'au niveau international.

La relation qui donne la distance d'attraction d'un coup de foudre par un objet au sol a été vérifiée et les conditions d'utilisation précisées par de nombreux auteurs internationaux, et ce depuis de très nombreuses années. Lalande [12] retrouve ce modèle à partir des considérations théoriques et en précise les conditions d'utilisation. Il va sans dire que les résultats donnés par le modèle électrogéométrique devraient être assortis d'un intervalle de confiance, mais nous ne disposons encore pas des outils nécessaires.

En ce qui concerne les PDA la distance de captation n'a jamais été démontrée par des travaux scientifiques ou expérimentaux validés.

La NFPA a réalisé une étude sur les PDA. Cette étude conclut que l'efficacité de l'ensemble des paratonnerres n'est pas démontrée. Les normes paratonnerres américaines devraient par conséquent, être transformées en guide.

Pour mener à bien cette étude, les fabricants ont communiqué à l'INERIS toutes les informations demandées concernant leurs produits. L'examen des documents fait apparaître des différences importantes entre les produits et des défaillances de la norme NF C 17-102, en particulier sur les rayons de protection annoncés.

Il est regrettable que l'on ne puisse pas démontrer l'efficacité d'un PDA en terme de rayon de protection ; mais il n'est pas non plus possible, dans l'état actuel de nos connaissances, de démontrer l'efficacité d'un PTS ou de tout autre dispositif de protection. En appliquant la méthode de la sphère fictive à une protection de type cage maillée, on peut s'apercevoir qu'un coup de foudre peut frapper à l'intérieur d'une maille. Ce type de protection est pourtant jugé parmi les plus performants. Il faut également rappeler que le rayon de protection d'un PTS est admis mais non démontré.

Il n'est pas souhaitable de rejeter une solution de protection sous prétexte qu'elle n'est pas parfaite tant que l'on n'a pas trouvé de solution dont on peut montrer qu'elle est plus performante. Cependant, cela ne justifie pas de mettre sur le marché n'importe quel produit.

L'étude de l'INERIS a mis en évidence des points particuliers de la norme NF C 17-102 qui méritent d'être revus. Les fabricants de PDA ont proposé récemment, suite à l'étude présentée par l'INERIS, une modification profonde de la norme NF C 17-102. L'INERIS est attentive à ce que les modifications proposées répondent à des exigences minimales.

Les propositions proposées à l'UTE par le GIMELEC en avril 2001 concernent les points suivants :

1. retirer de la norme tout ce qui concerne l'installation et qui est déjà dans la norme NF C 17-100,
2. améliorer les règles d'installation des PDA,
3. homogénéiser les niveaux de protection (4 pour NF C 17-100 et 3 pour NF C 17-102),
4. ajouter des essais électriques pour connaître la tenue du produit en cas de choc de foudre,
5. essais de corrosion : sur la base de l'EN 50164-1,
6. évolution du modèle de protection pour déterminer la révision des essais d'efficacité du PDA.

Le GIMELEC propose une période transitoire jusqu'à la parution de la nouvelle version de la norme pendant laquelle le rayon de protection d'un PDA pourrait être réduit.

L'efficacité des PDA en terme de rayon de protection n'est pas démontrée par les concepteurs, ni admise par la majorité de la communauté scientifique internationale. Aussi, l'amélioration des conditions d'initiation d'un traceur ascendant qui se traduit par une avance à l'amorçage devrait plutôt être traduite en terme de marge de sécurité par rapport à un dispositif PTS. **Le reproche qui est fait au PDA est un excès de confiance en terme de volume de protection et non une inadéquation du point de vue physique.**

L'INERIS fait les remarques suivantes :

- une modification de la norme NF C 17-102 s'impose,
- pour admettre la supériorité relative d'un PDA par rapport à un PTS et admettre dans les textes réglementaires la nouvelle version de la norme NF C 17-102, il est impératif que les modifications proposées pour la norme NF C 17-102 soient validées par un comité scientifique international.

## 7. CONCLUSION

---

Les paratonnerres à dispositif d'amorçage sont conçus de manière à générer un traceur ascendant en avance par rapport à un paratonnerre traditionnel à tige simple. Cette avance à l'amorçage est le paramètre caractéristique de l'efficacité de ces matériels selon la norme française NF C 17-102 ; il peut être assez facilement mesuré dans un laboratoire Haute Tension.

L'efficacité d'attraction d'un PDA est traduite en rayon de protection ; pour cela il est nécessaire de connaître la vitesse de propagation du traceur ascendant. Les vitesses mesurées dans des conditions d'orage présentent une grande dispersion (entre  $10^5$  et  $10^6$  m/s). De plus, le modèle théorique associé au phénomène d'attachement de la foudre sur un PDA n'est pas démontré.

Suite à l'étude réalisée par l'INERIS, il s'avère que :

- certains PDA ne sont pas testables en laboratoire bien qu'ils annoncent une conformité à la norme NF C 17-102,
- certains modèles n'ont jamais été testés pour vérifier qu'ils étaient en mesure d'écouler un courant de foudre,
- les rayons de protection annoncés par certains fabricants, qui se réfèrent à la norme NF C-17-102, n'ont jamais été vérifiés sur des installations protégées,
- la capacité des PDA à recevoir la foudre est constatée mais leur supériorité en terme rayon de protection par rapport à un paratonnerre à tige simple n'est pas démontrée,
- le paramètre d'avance à l'amorçage, même s'il est mesuré sous certaines conditions, ne suffit pas à justifier les rayons de protection annoncés dans la norme car les conditions de validation de la formule utilisée reposent sur des hypothèses non vérifiées, notamment en ce qui concerne la vitesse de propagation du traceur ascendant et l'énergie minimale apportée par le traceur descendant. Le reproche qui est fait au PDA est un excès de confiance en terme de volume de protection et non une inadéquation du point de vue physique

A la présentation de ces résultats au GIMELEC, les fabricants ont engagé rapidement une révision de la norme NF C 17-102. Nous considérons qu'il est nécessaire de valider au préalable les hypothèses qui conduisent à déterminer les rayons de protection à partir de la mesure d'un paramètre en laboratoire.

Par conséquent, nous recommandons de ne plus utiliser les rayons de protection indiqués dans la norme NF C 17-102 de 1995 pour protéger les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement.

Afin de montrer l'efficacité des PDA, nous suggérons deux axes de recherche :

- profiter du nombre significatif de paratonnerres installés et du retour d'expérience des utilisateurs pour estimer la protection effective des PDA,
- faire valider les essais de qualification des performances des PDA en terme de protection par une étude théorique scientifique afin de vérifier que le paramètre mesuré lors des essais est représentatif de l'efficacité d'une installation de protection.

## 8. BIBLIOGRAPHIE

---

1. "Guide de la protection contre les effets de la foudre" juin 2000 UTE SEE France
2. Service de l'Environnement Industriel du Bureau des risques technologiques et des industries chimiques et pétrolières, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques au Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
3. N. FLORET : Mai 1995 "Parafoudres et paratonnerres" Journal des électriciens n°733 PP. 30-37
4. T. HORVATH: The probability theory of lightning protection" Elektrotechnika, Vol. 55, pp. 49-61, Budapest, 1962.
5. GARY C. "La foudre et les phénomènes orageux" DER/EDF RGE N°3 Mars 1989
6. GARY C., BERGER G., GOLDMAN M., "Paratonnerres à tiges et paratonnerres à dispositif d'amorçage" document GIMELEC, Juin 1990
7. HASSANZADEH M. "Essais d'évaluation de paratonnerres à dispositif d'amorçage : Méthode et corrélation entre résultats" Document HELITA 09/00
8. A. ROUSSEAU, "Essais sur les paratonnerres à dispositif d'amorçage", Proceeding de la conférence Foudre et montagne, 1-5 juin 1997, Chamonix (France), pp292-296
9. HUTZLER B. et GARY C. 1989 "Simulation en laboratoire de l'impact au sol" RGE N°3
10. MENEMENLIS C. 25<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection ICLP2000, "Interception of a lightning stroke" PP306-310
11. BERGER G. "Formation du leader positif des grandes étincelles dans l'air pour différents types de paratonnerres à tige", Foudre et Montagne, 6-9 juin 1994, pp43-46
12. LALANDE P. Thèse de l'Université d'ORSAY N° d'ordre 4458 "Etude des conditions de foudroiement d'une structure au sol" P65
13. BRYAN, J. L., BIERMANN, R.G., and ERICKSON, G.A., "Report of the third party independant evaluation panel on the Early Streamer Emission Protector", New Mexico Institute of mining and technology, Langmuir Laboratory for Athmospheric Research, Socorro, New Mexico, 1998
14. ALLEN N.L., CORMICK K.J., FAIRCLOTH D.C., KOUZIS C.M. "Tests of the 'early streamer emission' principle against lightning IEEE Proc. Sci. Means. Technol., Vol. 145. No5. September 1998
15. GREAVES, CORMICK, "Comparative results from ESE and conventional terminals when tested in high voltage laboratory", Test report No 43427 UMIST july 1997
16. EYBERT BERARD A., "Lightning protection field experiment in japon on a wind turbine plant using an E.S.E. lightning conductor", 25<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection ICLP2000, PP.871-873
17. <sup>1</sup>HARTONO Z.A. "A study of non-conventional air terminals and stricken points in high thunderstorm region", 25<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection ICLP2000, PP.357-361
18. ROUSSEAU A., ZANCHETTA A. "Essais sur des paratonnerres à dispositif d'amorçage"
19. D'ALESSANDRO F, BERGER G "Laboratory studies of corona current emissions from blunt, sharp and multipointed air terminals" 24<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection ICLP98, PP.418-424

## **9. LISTE DES ANNEXES**

---

- 1. Définitions des termes utilisés**
- 2. Dossier de demande de renseignements**
- 3. Synthèse des réponses des fabricants**
- 4. Vitesse de propagation des traceurs**
- 5. Rapport de la commission d'évaluation indépendante composée de tiers sur la technique des paratonnerres à dispositif d'amorçage**

# ANNEXE 1

## Définitions des termes utilisés

L'ensemble des définitions des termes utilisés pour la foudre est défini dans un glossaire édité par l'Association Protection Foudre, rédigé par M. Claude GARY, assisté du Dr E. GOURBIERE pour les termes spécifiques à la kéraunopathologie. Ce glossaire est intégré dans un guide de la protection contre les effets de la foudre[1]. La majorité des définitions ci-dessous est extraite du glossaire.

### ANGLE DE PROTECTION

Par le passé, on a longtemps admis que le volume protégé par un paratonnerre à tige était défini par un cône de base circulaire, dont le sommet coïncide avec la pointe de la tige ; mais il existait une grande divergence quant à la valeur du demi angle de ce cône, qui variait entre 30° et 60°, selon les auteurs. Afin de conserver les anciennes habitudes, les normes modernes ont maintenu cette notion de cône, mais en donnant une équivalence de volume protégé entre l'angle du cône et le rayon de la sphère fictive. L'angle de protection choisi est maintenant étayé par une certaine logique.

### ARC EN RETOUR

La rencontre entre le traceur descendant et la décharge de capture établit un pont conducteur entre le nuage et le sol, par lequel va pouvoir s'écouler un intense courant électrique, se propageant de la terre vers le nuage, et neutralisant celui-ci. Ce courant, de nature impulsionnelle, est appelé "arc en retour". Il est la cause de la violente illumination du canal de foudre ; il est responsable du tonnerre, mais surtout des dégâts produits par un foudroiement. Un éclair négatif descendant peut comporter plusieurs arcs en retour successifs.

### AVANCE A L'AMORÇAGE (T)

Gain moyen en temps d'amorçage de la pré-décharge ascendante, par rapport à celui d'un paratonnerre à tige simple, issu de l'essai d'évaluation. Cette avance s'exprime en microsecondes (NF C 17-102).

### CHAMP ELECTRIQUE AU SOL

La dissociation des charges dans le nuage orageux entraîne la génération d'un champ électrique intense dans l'espace nuage-sol. Lorsque qu'il atteint, au niveau d'un sol plan, une intensité de 4 à 10 kilovolts par mètre, selon les conditions locales, une décharge au sol est imminente. Commentaire : les charges électriques induites à la surface du sol par le nuage sont généralement positives. Le vecteur représentatif du champ est alors vertical, orienté du sol vers le nuage.

### CORONA / COURONNE

L'effet Corona est une avalanche électronique. Ce phénomène se produit lorsqu'un électron libre est accéléré par un champ électrique et acquiert une quantité de mouvement suffisante pour libérer, lors d'une collision avec un atome, un électron sans se laisser capter par l'ion ainsi créé. Il y a alors deux électrons libres, le phénomène se reproduit telle une avalanche. Le premier électron est appelé électron germe. Lorsque le champ électrique n'est plus suffisant la vitesse des électrons faiblit, le phénomène s'estompe. Dans l'air, le phénomène s'accompagne d'un effet lumineux de couleur bleu-violacé et d'un crépitement audible.

## **COUP DE Foudre**

L'un des arcs en retour lors d'un éclair à la terre, qui peut être respectivement le "premier coup" ou l'un des "coups subséquents".

## **DECHARGE DE CAPTURE**

Celle des pré-décharges ascendantes qui entrent en contact avec le traceur descendant.

## **DENSITE DE Foudroiement**

Cette densité s'exprime en nombre d'impacts par kilomètre carré et par an. Pour le territoire français, elle est comprise entre moins de 1 impact / km<sup>2</sup>/an et 4 impacts / km<sup>2</sup>/an. Cette densité est déterminée scientifiquement à partir de capteurs répartis sur le territoire.

On définit aussi une densité d'arcs en retour. La densité moyenne d'arcs en retour vaut à peu près 2,2 fois la densité d'impacts (NF C 17-102).

## **DISPOSITIF DE CAPTURE**

Il a pour fonction de capter un coup de foudre, et constitue, pour un bâtiment ou une structure protégée, le point d'impact préférentiel, en principe obligatoire, lors d'un foudroiement. La norme CEI 1024-1 le définit comme "la partie de l'installation extérieure destinée à intercepter les éclairs". On distingue plusieurs types de dispositifs de capture.

## **DISTANCE D'AMORCAGE**

Distance entre le point d'origine de la décharge de capture et le point de rencontre avec le traceur descendant. Cette distance joue un rôle essentiel dans la définition de la zone de protection d'un paratonnerre (voir ces termes).

## **ELECTRON GERME**

L'électron germe est le premier électron qui, accéléré par un champ électrique, peut déclencher une avalanche électronique (voir effet Corona)

## **FOUDRE NEGATIVE DESCENDANTE ECLAIR NEGATIF DESCENDANT**

C'est la foudre normale, la plus fréquente en plaine et en terrain vallonné (en France, 90% des éclairs sont, en moyenne sur une année, négatifs ; en fait, cette proportion varie de 60% en hiver à 95% en été, le reste est constitué d'éclairs positifs). Elle se compose de plusieurs phases successives.

## **FOUDRE ASCENDANTE / ECLAIR ASCENDANT**

Lorsqu'une décharge ascendante est issue d'une aspérité de grande hauteur (pic montagneux, tour de télévision, immeuble de grande hauteur), elle peut se développer jusqu'au sein du nuage, même en l'absence de tout traceur descendant. Ce type de décharge atmosphérique peut comporter plusieurs arcs en retour, mais dissipe généralement une énergie modérée.

## **FOUDRE POSITIVE**

Décharge électrique issue d'une zone de nuages portant des charges positives. Ce type de décharge atmosphérique débute également par un traceur, portant ici des charges positives, et ne comporte qu'un seul arc en retour, toutefois de beaucoup plus longue durée que les arcs en retour négatifs. Seuls 10 % des coups de foudre sont positifs, mais ils causent des dégâts plus importants, en raison de la forte énergie qu'ils dissipent.

## **DUREE CONVENTIONNELLE DE FRONT**

L'instant de début de l'impulsion étant souvent difficile à déterminer, on définit une origine et une durée de front conventionnelles comme suit :

- pour une tension :

soit T90 le temps où l'impulsion atteint 90 % de sa valeur de crête, et T30 le temps correspondant à 30 % de cette valeur. L'origine conventionnelle est le point d'intersection de la droite passant par ces deux points avec l'axe du temps ; la durée conventionnelle de front est donnée par  $T_f = 1,67 (T_{90} - T_{30})$

- pour un courant :

soit T90 le temps où l'impulsion atteint 90 % de sa valeur de crête, et T10 le temps correspondant à 10 % de cette valeur. L'origine conventionnelle est le point d'intersection de la droite passant par ces deux points avec l'axe du temps; la durée conventionnelle de front est donnée par  $T_f = 1,25 (T_{90} - T_{10})$ .

## **ECLATEUR**

Dispositif constitué de deux électrodes placées face à face, avec un écartement convenable, et entre lesquelles se produit un amorçage (éventuellement suivi d'un courant de suite), dès qu'une surtension atteint une certaine valeur. La tension d'amorçage dépend de l'écartement entre les électrodes, et est généralement supérieure au millier de volts. Sur les réseaux d'énergie à Moyenne et Haute Tension, l'éclateur est une technologie de protection en voie de disparition et est remplacé par un parafoudre.

## **ION, IONISATION**

Un ion est un atome ou une molécule portant une charge électrique soit par déficit (ion positif), soit par apport (ion négatif) d'un ou de plusieurs électrons. L'ionisation est l'ensemble des processus physiques par lesquels les ions sont créés.

## **LEADER**

Voir traceur descendant ou ascendant

## **METHODE DE LA SPHERE FICTIVE**

Méthode pratique, à l'aide d'une sphère fictive, de positionnement optimal des paratonnerres à tige et de détermination de la largeur des mailles d'une cage d'une installation extérieure de protection. Le rayon de la sphère fictive utilisée pour la construction géométrique de la protection dépend du niveau de protection retenu ; il coïncide avec une certaine distance d'amorçage. Autrement dit, comme à une distance d'amorçage donnée est associée une amplitude du courant de foudre, le niveau de protection détermine l'amplitude du courant au-dessus de laquelle la protection est théoriquement assurée. Dans la méthode de la sphère fictive, le volume protégé par un paratonnerre à tige est limité par un arc de cercle passant par la pointe et tournant autour de la tige.

## **MODELE ELECTROGEOMETRIQUE**

Modèle physico-mathématique permettant de déterminer le volume protégé par une installation extérieure de protection, de positionner les paratonnerres à tige et de fixer la largeur des mailles d'une cage par une méthode rationnelle. Ce modèle se base sur les propriétés de la distance d'amorçage (voir ce terme).

En particulier la distance d'amorçage est une fonction de la valeur de crête du "premier coup" d'un coup de foudre.

### **PARAFOUDRE**

Dispositif destiné à limiter les surtensions transitoires et à dériver les ondes de courant. Il contient au moins un composant non linéaire (NF C 61-740).

*Commentaire : le terme "parafoudre" est maintenant employé comme terme générique et s'applique à tout dispositif ayant pour fonction de limiter l'amplitude d'une surtension transitoire à une valeur non dangereuse pour l'installation et l'appareillage électrique. Les parafoudres sont connectés entre chaque conducteur actif d'une alimentation électrique ou d'une ligne de télécommunication et la masse (protection de mode commun) et éventuellement entre conducteurs actifs (protection de mode différentiel). Il existe plusieurs types de parafoudres basés sur des principes différents.*

### **PARATONNERRE A TIGE SIMPLE (PTS)**

Les Paratonnerres à Tige Simple (appelé parfois tige de Franklin) ont une hauteur pratique de 2 à 6 mètres et présentent une pointe effilée. Elles peuvent être constituées d'un ou plusieurs éléments de même nature, à condition que leur continuité électrique soit assurée (NF C 17-100).

### **PARATONNERRE A DISPOSITIF D'AMORCAGE (PDA)**

Paratonnerre à Tige Simple, où celle-ci est équipée d'un système électrique ou électronique générant une avance à l'amorçage (avance au démarrage de la pré-décharge ascendante), mise en évidence lorsqu'il est comparé dans les mêmes conditions à un Paratonnerre à Tige Simple. La méthode de calcul des rayons de protection d'un PDA est décrite dans la norme NFC 17-102.

### **POINTE CAPTRICE**

Les pointes captrices, quelquefois improprement appelées pointes de choc, sont des petites tiges simples de 30 à 50 cm de hauteur. Elles sont souvent utilisées avec les cages maillées, et sont destinées à servir de points de captage préférentiels.

### **PREDECHARGE ASCENDANTE / TRACEUR ASCENDANT**

Deuxième phase : lorsque le traceur descendant s'est suffisamment approché du sol, des "prédécharges ascendantes" naissent en différents points du sol, préférentiellement à partir d'aspérités ou d'objets pointus, et se développent en direction du traceur. L'une de ces prédécharges rencontre le traceur descendant, c'est pourquoi cette prédécharge est appelée "décharge de capture" ; c'est elle qui détermine le(s) point(s) d'impact(s) de la foudre au sol.

### **RAIDEUR DE L'IMPULSION**

Elle s'exprime en kilo ampères par microseconde. La raideur maximale a toujours lieu au cours du front de montée. On utilise souvent la raideur moyenne du front de montée : c'est le quotient de la différence des valeurs de courant au début et à la fin d'un intervalle de temps spécifié, par cet intervalle de temps, soit :  $(i(t_2) - i(t_1)) / (t_2 - t_1)$ . La médiane de cette raideur étant de 30 à 40 KA/ $\mu$ s, celle-ci peut atteindre 150 KA/ $\mu$ s. Ce paramètre sert au calcul des tensions induites dans les circuits électriques proches du canal de foudre.

### **RAYON DE PROTECTION**

Distance horizontale entre l'axe d'un paratonnerre à tige et le point de contact de la sphère fictive avec le plan à protéger ou rayon du cercle du cône de protection à l'intersection avec le plan à protéger.

### **STREAMER**

Voir pré-décharge ascendante

### **TEMPS DE DECROISSANCE**

Durée entre l'origine conventionnelle et l'instant où la valeur de l'onde est retombée à 50 % de la valeur de crête. Pour les courants de foudre, cette durée est de l'ordre de 100 microsecondes pour les coups négatifs, et de l'ordre de 1000 microsecondes pour les coups positifs.

### **TEMPS DE MONTEE**

Durée entre l'instant du début de l'impulsion de courant et l'instant où ce courant atteint sa valeur maximale. Cette durée est de 2 à 20 microsecondes pour le "premier coup", de 0,1 à 1 microseconde pour les "coups subséquents" des coups de foudre négatifs. Elle est de l'ordre de 100 à 200 microsecondes pour les coups positifs.

### **TRACEUR DESCENDANT / TRACEUR PAR BONDS / PRECURSEUR PAR BONDS**

Première phase : formation d'un canal ionisé faiblement lumineux, issu du nuage, portant des charges négatives, et qui progresse par bonds vers la terre. C'est donc un traceur négatif.

## ANNEXE 2

### Etude des paratonnerres à dispositif d'amorçage

---

Projet DCE07

Chef de projet : P. GRUET

tel : 03.44.55.64.77 (ligne directe)

fax : 03.44.55.66.88

Email : pierre.gruet@ineris.fr

---

#### Mission

Le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement a confié à l'INERIS une étude d'une durée de deux ans pour réaliser un premier bilan sur l'utilisation des paratonnerres à dispositif d'amorçage.

---

#### Contexte

L'arrêté du 28 janvier 1993 indique que certaines installations soumises à autorisation au titre de la législation des installations classées doivent être protégées contre la foudre. La circulaire n° 93-17 du 28 janvier 1993 précise au paragraphe 3.3.2 Paratonnerres à dispositif d'amorçage, dit "actifs" "*Dans l'attente d'indications confirmées à ce sujet par un organisme habilité, il pourra être admis dans l'étude que ces dispositifs assurent une surprotection de l'installation sur laquelle ils sont mis en place.*"

La norme NF C 17-102 est utilisée depuis près de 5 ans. Elle décrit les règles d'installations des PDA et la méthode de qualification en laboratoire. Il n'y a pas de norme produit pour les PDA. Dans les autres pays européens, ce type de protection n'est pas aussi répandu qu'en France.

---

#### Méthode

L'INERIS n'a pas participé aux études menées pour développer ce type de protection et n'a aucun lien avec un constructeur ou un distributeur de matériel. L'étude de l'INERIS consiste dans un premier temps à récolter des informations auprès de tous les intervenants qui ont participé aux études, aux développements, à la réalisation, la qualification, l'installation et le contrôle des PDA. Pour ce faire, une fiche de demande de renseignements est envoyée à tous les fabricants français de PDA. Tous les fabricants sont invités à fournir les informations susceptibles de montrer la qualité de leur produit. La participation des différents acteurs est volontaire. L'étude ne portera que sur les équipements dont les fabricants auront fourni les informations nécessaires. Cependant, le rapport d'étude indiquera la liste des PDA concernés par l'étude, y compris ceux pour lesquels le manque d'informations ne permet pas d'apprécier leur utilisation.

---

**Dossier de demande de renseignements**

<b>Projet DCE07</b>		<b>Etude des paratonnerres à dispositif d'amorçage (PDA)</b>	
Nom de la société			
Adresse :			
Coordonnées des correspondants :			
Date d'envoi de la demande de l'INERIS		Date de retour	
N°	Elément demandé		transmis
1.	Renseignements généraux		
2.	Documentation technique du PDA		
3.	Documentation commerciale		
4.	Procédure d'évaluation utilisée pour qualifier le PDA en laboratoire		
5.	valeurs brutes de mesures réalisées en laboratoire		
6.	Méthode de calcul qui permet de déterminer les performances		
7.	Essais environnementaux		
8.	Méthode de qualification sur site		
9.	Résultats de la qualification sur site		
10.	Liste de sites équipés de PDA et de compteur d'impacts		
11.	La garantie de l'équipement		
12.	Le marquage du produit		
13.	Le plan d'entretien ou de maintenance préventive		
14.	Méthode de contrôle sur site		
15.	Les règles particulières d'utilisation du PDA		
16.	Documents, articles qui traitent de l'efficacité des PDA		

N° 1	Renseignements généraux
<p>Quelles sont les différentes générations de PDA qui ont été commercialisées ?</p> <p>Durant quelle période ces produits ont ils été commercialisés ?</p> <p>Pour chaque génération combien d'exemplaires ont été vendus ? (en France, à l'étranger)</p> <p>Une nouvelle génération est-elle en préparation ? (a quelle échéance sera t-elle commercialisée ?)</p>	

N° 2	Documentation technique du PDA modèle .....
<p>Le produit exploite-t-il en brevet ? (si oui, lequel ?)</p> <p>Une documentation technique est elle disponible?</p> <p>Sur quel principe fonctionne le PDA ?</p> <p>D'où tire t il l'énergie pour son fonctionnement ?</p> <p>Comment est déclenché le traceur ascendant ?</p> <p>Comment le bon fonctionnement du PDA est-il vérifié à la sortie de la fabrication et après installation ?</p>	

N° 3	Documentation commerciale du PDA modèle .....
<p>Quelles informations sont données aux clients ?</p> <p>(en particulier, les performances annoncées, les restrictions à l'utilisation...)</p>	

N° 4	Procédure d'évaluation en laboratoire du PDA modèle .....
<p>Quelles procédures sont utilisées pour qualifier le PDA en laboratoire ?</p> <p>Dans quels laboratoires les essais ont-ils été réalisés ?</p> <p>A quelle période ?</p> <p>Quel modèle de tige simple (PTS) est utilisé comme référence ?</p> <p>Comment est déterminée l'avance à l'amorçage ?</p> <p>Comment est déterminé précisément l'instant de départ du leader ascendant par rapport à l'onde de référence définie dans la norme NF C 17-102 ?</p> <p>Quelle vitesse de propagation est retenue pour le traceur ascendant ?</p> <p>Comment cette vitesse est déterminée ?</p>	

N° 5	Valeurs brutes de mesures réalisées en laboratoire pour le PDA modèle .....
<p>Comment sont enregistrées les grandeurs à contrôler ? (page 43 de la norme NF C 10-102)</p> <p>Paramètres électriques</p> <p>Conditions géométriques</p> <p>Paramètres climatiques</p> <p>Nombres de chocs par configuration :</p> <p>Fournir des résultats de mesures car les valeurs brutes permettent d'estimer les lois de dispersions.</p>	

N° 6	Méthode de calcul pour déduire les performances des PDA
<p>Comment à partir des valeurs mesurées en laboratoire peut on retrouver les rayons de protection annoncés dans la documentation commerciale ?</p>	

N° 7	Essais environnementaux pour le PDA modèle .....
<p>Quels essais environnementaux ont été réalisés sur le PDA ?</p> <p>Climatiques</p> <p>Choc</p> <p>Vibration</p> <p>Vent</p> <p>Brouillard salin</p> <p>Vieillessement</p> <p>Environnement agressif</p>	

N° 8	Méthode de qualification sur site du PDA modèle .....
<p>Quelles procédures sont utilisées pour qualifier le PDA sur site ?</p> <p>Sur quels sites les essais ont-ils été réalisés ?</p> <p>A quelle période ?</p>	

N° 9	Résultats de qualification sur site du PDA modèle .....

N° 10	Liste de sites équipés de PDA et de compteurs d'impacts

N° 11	Garantie du fabricant du PDA modèle .....
<p>Si le PDA contient des composants électriques et/ou électroniques :          Quel est le MTBF du système ? (temps moyen entre deux pannes)</p> <p>Y a-t-il une garantie du constructeur (sur les performances, la fiabilité de la partie électrique) ?</p>	

N° 12	Marquage du PDA
<p>Quel est le marquage du PDA ?</p> <p>Fabricant</p> <p>Modèle</p> <p>Type</p> <p>N° de série</p> <p>Autre :</p> <p>Y a t-il un marquage CE ?</p>	
N° 13	Plan d'entretien ou maintenance préventive
<p>Y a t-il un entretien particulier ou une maintenance préventive à réaliser ?</p>	

N° 14	Méthode de contrôle sur site
<p>Comment est contrôlé le PDA sur site ?</p> <p>Quels sont les informations fournies aux organismes de contrôle pour vérifier que le PDA fonctionne toujours ?</p> <p>Quels sont les équipements nécessaires pour le contrôle ?</p> <p>Y a t-il une périodicité recommandée par le fabricant ?</p>	

N° 15	Règles particulières d'utilisation
<p>Y a t-il des restrictions à l'utilisation ?</p> <p>Environnement (zone explosible gaz, poussière) ?</p> <p>Situation de la pointe par rapport aux structures environnantes ?</p> <p>Distance minimale entre deux PDA ?</p> <p>Indication sur le cheminement des conducteurs de descente</p> <p>Indication sur la qualité de la terre</p> <p>Influence du système de protection sur les lignes électriques à proximité (conseil de mise en place de parafoudres)</p>	

N° 16	Documentations et articles qui traitent de l'efficacité des PDA
Toutes les publications qui démontrent l'efficacité des PDA	

### ANNEXE 3 Synthèse des réponses des fabricants de PDA

Constructeurs	DUVAL MESSIEN	ERICO	FRANCE PARATONNERRE	FRANKLIN FRANCE	HELITA	INDELEC	POUYET	SHFi
Renseignements généraux	❖		◆	◆	◆◆◆	◆		❖
Documentation technique du PDA	◆◆		◆	◆◆◆	◆◆◆	◆◆◆		◆◆
Documentation commerciale	◆◆◆		◆◆◆	◆◆◆	◆◆◆	◆◆◆	◆◆◆	◆◆◆
Procédure d'évaluation utilisée pour qualifier le PDA en laboratoire	◆		◆◆◆	◆◆◆	◆◆◆	◆◆◆		◆◆◆
valeurs brutes de mesures réalisées en laboratoire			◆◆◆	◆◆◆	◆◆◆	◆◆◆		◆◆◆
Méthode de calcul qui permet de déterminer les performances	◆		◆	◆	◆◆◆	◆◆◆		◆
Essais environnementaux	◆		◆	◆	◆◆◆	◆		◆
Méthode de qualification sur site			◆◆◆	◆	◆◆◆	◆◆◆		◆
Résultats de la qualification sur site			◆◆◆		◆◆	◆◆◆		
Liste de sites équipés de PDA et de compteur d'impacts	❖				❖	❖		❖
La garantie de l'équipement	◆		◆	◆	◆◆	◆		◆
Le marquage du produit	◆		◆◆◆	◆	◆◆◆	◆◆◆		◆
Le plan d'entretien ou de maintenance préventive	◆		◆	◆	◆	◆		◆
Méthode de contrôle sur site	◆		◆	◆	◆◆◆	◆◆◆		◆
Les règles particulières d'utilisation du PDA	◆		◆	◆	◆◆◆	◆		◆
Documents, articles qui traitent de l'efficacité des PDA			◆◆◆		◆◆◆	◆◆◆		

*Synthèse de la participation des constructeurs*

- ◆ La rubrique est renseignée
  - ◆◆ La rubrique est renseignée. Elle est accompagnée d'informations complémentaires
  - ◆◆◆ La rubrique est renseignée. Elle est accompagnée de documents explicatifs.
- Le marquage ❖ indique que les informations sont confidentielles

## ANNEXE 4

André BONAMY

EDF/DER/LGE

**Objet** : quelques données caractéristiques des vitesses des leaders en foudre naturelle, foudre déclenchée et décharges longues.

Origine	Nature du phénomène	Vitesse	Autres références
Thèse de Philippe Lalande [1] p : 31	Leader ascendant positif (1)	$10^5$ m/s	
Thèse de Philippe Lalande [1] p : 74	Leader étincelle négative (2)	$3.10^4$ à $10^5$ m/s	
Thèse de Philippe Lalande [1] p : 72	Leader étincelle positive (2)	$10^4$ m/s	
Thèse de Philippe Lalande [1] p : 94	Leader ascendant positif fusée (3)	$10^5$ m/s	
	Leader descendant négatif nuage (3)	$10^7$ m/s	
Rakov [2]	Leader ascendant positif fusée (3)	$10^5$ m/s	
	Leader descendant négatif nuage (3)	$10^7$ m/s	
Thèse de Philippe Lalande [1] p : 100	Leader ascendant positif fusée (4)	$10^5$ m/s	
	Leader descendant négatif fusée	$10^5$ m/s	
Thèse de Philippe Lalande [1] p : 106 Valeurs moyennes présentes dans la littérature	Leader positif ascendant (1)	$10^5$ à $10^6$ m/s	
	Leader positif ascendant (2)	1 à $2.10^4$ m/s	
	Leader négatif descendant (1)	1 à $5.10^5$ m/s	
	Leader négatif descendant (2)	2 à $10.10^4$ m/s	
Laroche et al. [3]	Leader ascendant positif fusée (4)	$10^5$ m/s	
	Leader descendant négatif fusée (3)	$10^5$ m/s	
	Leader ascendant positif sol (3)		
Bonamy et al. [4] Chamonix	Leader ascendant positif sol (3)	1 à $3.10^5$ m/s	
	Leader descendant négatif nuage (3)	$4,7.10^5$ m/s	
	Leader négatif (2)	2 à $20.10^4$ m/s	
	Leader descendant négatif (1)	1 à $10.10^5$ m/s	
	Leader négatif fusée (3)	$4,7.10^5$ m/s	
Bonamy et al. [5]	Leader négatif spatial (2)	1 à $3.10^4$ m/s	

Origine	Nature du phénomène	Vitesse	Autres références
	Leader négatif sur objet flottant (2)	$1,6 \cdot 10^4$ m/s	
	Leader positif spatial (2)	$3,1 \cdot 10^4$ m/s	
	Leader positif sur objet flottant (2)	$2,7 \cdot 10^4$ m/s	
St Privat d'allier [6]	Leader ascendant positif (3)	$2 \cdot 10^4$ m/s à qqes $10^5$ m/s	
Berger [7]	Leader ascendant (Mont Saint Salvador) (1)	0,4 à $12 \cdot 10^5$ m/s	
Asakawa [8]	Leader ascendant (pylône de 200 m) (1)	0,6 à $14 \cdot 10^5$ m/s	Valeur moyenne : $3,6 \cdot 10^5$ m/s pour 37 événements
Uman [9]	Stepped leaders : 80 événements (1)	0,8 à $26 \cdot 10^5$ m/s	Valeur moyenne proche de $10^5$ m/s Schinland
	Stepped leaders : 14 événements (1)	0,8 à $26 \cdot 10^5$ m/s	Valeur moyenne proche de $10^5$ m/s Schinland
	Stepped leaders : 2 événements (1)	6 à $15 \cdot 10^5$ m/s	Orville et Idone
	Stepped leaders négatifs : 10 événements (1)	1,3 à $10 \cdot 10^5$ m/s	Thomson et al. Valeur moyenne de $5,7 \cdot 10^5$ m/s
	Leaders positifs (1)	0,47 à $6,4 \cdot 10^5$ m/s	Berger valeur moyenne de $2,6 \cdot 10^5$ m/s
	Leader ascendant positif (3)	$0,1 \cdot 10^5$ m/s	Horii, Sakurano, Akiyama, Nakano
	Leader descendant négatif (3)	0,5 à $1 \cdot 10^5$ m/s	
Dellera et Garbagnati	Coups de foudre négatifs – Leader ascendant positif (1)	0,4 à $5 \cdot 10^5$ m/s	Proviennent de données de K. Berger
	Coups de foudre négatifs – Leader descendant négatif (1)	2 à $10 \cdot 10^5$ m/s	
	Coups de foudre positifs – Leader ascendant négatif (1)	1 à $3 \cdot 10^5$ m/s	
	Coups de foudre positifs – Leader descendant positif (1)	4 à $25 \cdot 10^5$ m/s	

- (1) Foudre naturelle
- (2) Décharge en laboratoire
- (3) Déclenchement par fusée (classique)
- (4) Déclenchement par fusée en altitude

On retrouve le tableau produit dans les notes d'EDF/DER où figurent les chiffres suivants :

- Leader positif : 0.1 à  $1.10^6$  m/s
- Leader négatif : 1 à  $5.10^5$  m/s

Dans ce document les exemples numériques sont réalisés pour  $v_a=v_d=2.10^5$  m/s et  $v_a=v_d=5.10^5$  m/s

- [1] Lalande : Etude des conditions de foudroiement au sol - Thèse - 1996
- [2] Rakov et al. : Insights from triggered-lightning experiments, Journal of geophysical research - vol.103, n° D12 - June 1998
- [3] Laroche et al. : Observations of bi-directional leader development in triggered lightning flash ICOLSE - 1991
- [4] Bonamy et al. : Risques foudre et essais - Sur quels moyens d'essais peut-on compter ? - Foudre et Montagne - 1994
- [5] Bonamy et al. : Lightning simulation tests in Laboratory : a tool to validate modellings - 8<sup>th</sup> ISH - 1993
- [6] Huit ans d'expérience sur la foudre à Saint Privat d'Allier par le "Groupe de Recherches de Saint Privat d'Allier" - 1978
- [7] Golde - Lightning - Chap 5 the earth flash by Berger
- [8] Asakawa et al. - Two types of lightning discharges to a high stack on the coast of the sea of Japan in winter - 1996 - IEEE
- [9] Uman - The lightning discharge
- [10] Deller et Garbanati Lightning stroke simulation by means of the leader progression model IEEE - 1989

Notes sur le document "paratonnerres à tiges et paratonnerres à dispositif d'amorçage" Gimelec Fév. 1990

## **A N N E X E 5**

**RAPPORT DE LA COMMISSION D'EVALUATION INDEPENDANTE  
COMPOSEE DE TIERS  
SUR LA TECHNIQUE DES PARATONNERRES A DISPOSITIF D'AMORÇAGE  
(A DECHARGE AVANCEE / A PRECURSEUR)**

PAR

John L. Bryan

Richard G. Biermann

Glenn A. Erickson

Présenté au Conseil de Normalisation de l'Association Nationale de Protection contre les Incendies (National Fire Protection Association Standards Council), le 1<sup>er</sup> septembre 1999.

**PREFACE**

Le présent rapport est le résultat des efforts déployés dans un esprit de coopération et de collaboration par les trois membres indépendants de la commission d'évaluation pour parvenir à un consensus complet sur le contenu du rapport et sur les recommandations présentés au Conseil de Normalisation de l'Association Nationale de Protection contre les incendies (National Fire Protection Association Standards Council). Chaque membre certifie qu'il est totalement et entièrement d'accord avec le rapport tel qu'il a été rédigé et présenté audit Conseil de normalisation de l'association nationale de protection contre les incendies, le 1<sup>er</sup> septembre 1999.

Nom            (signature) John L. Bryan

Date            14 août 99

Nom            (signature) Richard G. Biermann

Date            19 août 1999

Nom            (signature) Glenn A. Erickson

Date            23 août 99

## S o m m a i r e

	Page	
I	INTRODUCTION	
	A. Objet de la Commission	4
	B. Constitution de la commission	5
	C. Demande de renseignements et d'informations	6
	D. Nombre et types de documents examinés	7
II	EVALUATION DE LA COMMISSION	
	A. Base scientifique et technique des PDA	8
	1. Examen des essais de laboratoire	9
	2.Examen des essais sur le terrain	12
	B. Pertinence de la base théorique et des essais de laboratoire	15
	1. Examen de la base scientifique théorique	15
	2.Examen des performances des systèmes	18
III	RECOMMANDATIONS A L'ADRESSE DU CONSEIL DE NORMALISATION	
	A. Base scientifique et technique des PDA	20
	B. Pertinence de la base théorique et des essais de laboratoire	20
	C. Documents de la NFPA sur la protection par paratonnerre	21
	D. Initiatives de la NFPA	22

## **I. INTRODUCTION**

### **A. Objet de la Commission**

La commission d'évaluation indépendante composée de tiers a été créée aux termes de l'Accord juridique de règlement à l'amiable entraînant renonciation à agir qui a été conclu entre la National Fire Protection Association (Association nationale de protection contre les incendies et la National Lightning Protection Corp. (Société nationale de protection contre la foudre), Heary Bros. Lightning Protection Co., Inc. et Lightning Preventor of America, Inc. (297). Cet accord a été entériné par le Conseil de normalisation de l'Association nationale de protection contre les incendies, le 8 octobre 1998 (296) dans les termes suivants :

Lors de sa réunion du 8 octobre 1998, le Conseil de normalisation a examiné la requête de Linda Joseph, représentant Heary Bros. Lightning Protection Co., Inc., Lightning Preventor of America Inc. et National Lightning Protection Corp. Par cette requête, le Conseil était invité à rouvrir les débats en vue de publier une norme applicable aux systèmes de paratonnerres à dispositif d'amorçage (à précurseur) - PDA - (Early Streamer Emission - ESE) et de procéder à un nouvel examen, en réévaluant et en reconsidérant toutes les preuves, y compris celles qui n'étaient pas disponibles antérieurement. (Concernant l'historique des précédents débats, se référer notamment aux décisions du Conseil de normalisation du 18 juillet 1995, point de l'ordre du jour 94-5, D N° 95-25 et du 12 janvier 1994, point de l'ordre du jour 94-5, D N° 94-11). Plus précisément, le but de cette requête était que le conseil de normalisation rouvre la discussion et re-examine la possibilité de publier une norme concernant les systèmes de protection contre la foudre par PDA conformément aux grandes lignes énoncées dans une proposition de règlement amiable, qui permettrait de résoudre le conflit entre les parties requérantes et la NFPA ("Accord de règlement amiable"). Une copie dudit règlement amiable a été jointe au dossier.

Après s'être réuni en audience et avoir examiné l'intégralité du dossier, le Conseil de normalisation a conclu que rien ne s'opposait à la réouverture des débats conformément à la requête et en conformité avec le règlement amiable ; qu'elle permettra au Conseil d'examiner à fond toutes les informations existantes ou nouvelles qui sont disponibles, et qu'elle est absolument compatible avec les règles et procédures de la NFPA et du Conseil de normalisation. Le Conseil a donc décidé d'accepter la requête. Spécifiquement, le Conseil, par cette décision, s'engage à rouvrir les débats en vue de la publication d'une norme applicable aux systèmes de protection contre la foudre par PDA en parfaite conformité avec les termes de l'Accord de règlement amiable<sup>1)</sup>.

---

<sup>1)</sup> NFPA, Décision du Conseil de normalisation "NFPA 781", West Point, NY, 10-8-98, p. 1.

Les instructions à l'adresse de la Commission d'évaluation qui figuraient dans l'Accord de règlement amiable étaient précises et sont reproduites ci-dessous :

f) Conformément à la proposition des plaignants, la tierce partie indépendante prendra la forme d'une commission présidée par le Dr. John Bryan, assisté d'un ou deux scientifiques, ou techniciens présentant une qualification similaire, choisis par le Dr. Bryan. Aucune personne appartenant aux National Institutes of Standards and Technology - "NIST" (Instituts nationaux de normalisation et de technologie) ayant préparé ou participé d'une façon ou d'une autre au rapport sur la technique des PDA - paratonnerres à dispositif d'amorçage - précédemment publié par le NIST ni aucune personne ayant présenté des commentaires au sujet de ce rapport du NIST ne pourra faire partie de cette commission. Si, pour une raison quelconque, l'un des membres de la commission n'est pas en mesure de participer aux travaux d'évaluation par une tierce partie, cette évaluation sera achevée par le(s) membre(s) restant de la commission, ou le Dr. Bryan pourra choisir un membre pour le remplacer au sein de la commission. Dans son rapport, la commission devra répondre aux questions de savoir (1) si la technologie de protection contre la foudre par PDA est fiable sur les plans scientifique et technique et (2) si la technologie de protection contre la foudre par PDA repose sur une base théorique scientifique et sur des essais de laboratoire adéquats, ainsi qu'à toute autre question qu'elle jugera utile. La tierce partie indépendante devra indiquer de manière spécifique dans son rapport comment elle a abordé toutes les questions et chaque question en particulier<sup>2)</sup>.

## **B. Constitution de la commission**

La sélection des membres de la commission indépendante composée de tiers s'est achevée le 23 octobre 1998. Les deux autres membres de la commission étaient MM. Richard G. Biermann, Des Moines, Iowa, et Glenn A. Erickson, Hastings, Minnesota. Aucun d'eux n'était un scientifique spécialiste de l'atmosphère ni un "expert *es* foudre" et ils ne revendiquaient pas de connaissances spéciales dans le domaine de l'étude des systèmes de protection contre la foudre.

Ils furent choisis en raison de leur longue expérience variée dans le domaine du bâtiment, de l'élaboration de codes sur les installations électriques et sur la lutte contre les incendies, et du processus de normalisation consensuelle de la National Fire Protection Association et d'autres organisations travaillant à l'élaboration de codes. Ils furent choisis par le Président pour leur expérience au sein de comités de normalisation consensuelle sur la base de leur réputation, sur les plans professionnel et personnel, en matière d'examen, juste, équitable et valable des processus de normes et codes consensuels.

La National Fire Protection Association accepta d'apporter un soutien administratif à la commission indépendante par le biais de la "Codes and Standards Administration Division" (Division de la gestion des codes et des normes), dirigée par Leona A. Nisbet.

---

<sup>2)</sup> NFPA, Agreement of Settlement and Release (Accord de règlement amiable avec renonciation à l'action), "ESE Lightning Protection Systems (Systèmes de protection contre la foudre par PDA), West Point, NY, 10-8-98, p. 4.

**C. Demande de renseignements et d'informations**

Dans le cadre de l'Accord de règlement amiable, il était stipulé que toute partie intéressée pouvait fournir des documents et des renseignements en vue de leur examen par la commission indépendante. C'est ainsi qu'une déclaration fut préparée en octobre 1998 par le Président de la commission indépendante en association avec Leona A. Nisbet, Directeur du service Codes et Normes de la NFPA.

Cet avis parut dans des publications de la NFPA et d'autres revues professionnelles en novembre 1998, sous la forme suivante :

Technique de protection contre la foudre par paratonnerres à dispositif d'amorçage  
(paratonnerres à précurseur) (PDA)  
(Early Streamer Emission - ESE) à étudier

Lors de sa réunion d'octobre 1998, le Conseil de normalisation est convenu de rouvrir les débats sur la publication d'une norme applicable aux systèmes de protection contre la foudre par paratonnerres à dispositif d'amorçage/à précurseur - PDA (Early Streamer Emission - ESE). En liaison avec cette décision, le conseil a autorisé la création d'une commission indépendante chargée de lui présenter un rapport sur cette technique de protection par PDA.

Cette commission sera présidée par le Dr. John L. Bryan, Frederick, Maryland, qui a nommé M. Richard G. Biermann, Des Moines, Iowa, et M. Glenn A. Erickson, Hastings, Minnesota, pour travailler avec lui au sein de la commission.

La commission devra répondre aux questions de savoir (1) si la technologie de protection contre la foudre par PDA est fiable sur les plans scientifique et technique et (2) si la technologie de protection contre la foudre par PDA repose sur une base théorique scientifique et des essais de laboratoires adéquats, ainsi qu'à toute autre question qu'elle jugera utile. La commission invite toute personne possédant des informations susceptibles d'être prises en compte dans son enquête à les lui soumettre pour examen.

Toute personne souhaitant soumettre des informations à la commission est invitée à le faire avant le 1er mars 1999 au plus tard à l'attention de : NFPA Codes and Standards Administration, NFPA, 1 Batterymarch Park, Quincy, MA USA 02269-9101 (fax : 617-770-3500)<sup>3)</sup>.

---

<sup>3)</sup> National Fire Protection Association, NFPA News, vol. 2, Numéro 1, décembre 1998, p. 1.

**D. Nombre et types de documents examinés**

A la date limite du 1<sup>er</sup> mars 1999 indiquée pour la réception des renseignements, la commission indépendante a reçu et examiné un total de 377 documents, tels qu'ils sont comptabilisés et énumérés dans la bibliographie objet de la section IV du présent rapport.

Un tableau récapitulatif de ces documents est reproduit ci-dessous

**Résumé de la commission d'évaluation indépendante PDA**

**Documents examinés**

Communications - Lettres personnelles (adressées à)

Commission indépendante	75
Personnel de la NFPA	48
Divers	<u>55</u>
total =	178

Rapports, documents, articles (reçus de)

Public	163
Systèmes de normalisation NFPA	<u>36</u>
total =	199

Total tous documents = 377

**II. EVALUATION DE LA COMMISSION**

Les décisions de la commission d'évaluation ont été prises dans le cadre d'une discussion consensuelle impliquant les trois membres de la commission à partir de l'examen par chacun des membres des documents et communications personnelles reçus. Tous les documents soumis à la commission ont naturellement influencé ses délibérations et ses décisions. Cela dit, le numéro de référence des documents figurant dans la section IV, Bibliographie choisie, est indiqué lorsqu'il apparaît que le document en question a joué un rôle important dans la décision de la commission, tout comme les citations référencées.

**A. Base scientifique et technique des paratonnerres à dispositif d'amorçage (à précurseur) - PDA (ESE - Early Streamer Emission)**

Avant de considérer les questions spécifiques posées à la commission d'évaluation, il semble qu'il serait capital de comprendre le concept et la philosophie de la technique de protection contre la foudre par paratonnerres à dispositif d'amorçage. Allen *et coll.*, (10) ont expliqué ce concept dans les termes suivants :

Une simple tige type de Franklin passive installée sur le toit d'un bâtiment de grande dimension risque de ne pas le protéger complètement dans le cas où il subirait un foudroiement, étant donné que l'effet couronne ascendant peut être déclenché au niveau de parties de la structure qui sont dans une position plus favorable par rapport à la décharge principale descendante. Cela dit, si l'on peut activer cet effet couronne plus tôt dans le processus de descente, on pourra avancer suffisamment l'apparition de la décharge principale ascendante, grâce à cette tige activée, pour compenser l'inconvénient de la distance et réaliser une liaison avant que l'effet couronne ne se développe suffisamment à d'autres endroits pour la concurrencer. En extrapolant cette idée, il apparaît que l'effet couronne engendré par cette tige active, placée au centre par exemple, pourrait remplacer les effets couronne résultant des différentes tiges passives qui, dans un système traditionnel, sont disposées autour du toit du bâtiment.

Ce principe constitue le fondement des dispositifs paratonnerre dits "à émission d'un précurseur ou à décharge avancée" (paratonnerres à dispositif d'amorçage) qui ont été mis au point ces dernières années<sup>4)</sup>.

La question précise posée à la commission d'évaluation dans l'accord de règlement amiable était de savoir : " si la technique de protection contre la foudre par paratonnerres à dispositif d'amorçage est fiable sur les plans scientifique et technique ". La commission a établi que l'on ne pouvait apporter une réponse valable à cette question qu'après avoir examiné les données relatives aux essais de laboratoire (à petite échelle) et aux essais sur le terrain (à grande échelle), qui lui avaient été communiquées dans les documents remis.

---

<sup>4)</sup> Allen, N.L., K.J. Cornick, D.C. Faircloth and C.M. Kouzis, "Tests of the Early Streamer Emission Principle for Protection against Lightning" (Essais du principe de l'émission d'une décharge avancée ou précurseur (dispositif d'amorçage) pour la protection contre la foudre", IEEE Proceedings Science Measurement Technology, Vol. 145, N° 5, septembre 98, p. 200.

## 1. Examen des essais de laboratoire

Un certain nombre de "chercheurs dans le domaine de la protection par paratonnerre" ont indiqué qu'ils étaient parvenus à la conclusion que les essais de laboratoires ne permettaient pas de simuler de façon adéquate les phénomènes de foudroiement à l'état naturel, en raison de la différence d'échelle entre les arcs obtenus en laboratoire et la longueur des phénomènes observés dans la nature avec la différence entre les coups de foudre positif et négatif (249) (353). Pederson (312) a formulé dans les termes suivants la réserve générale qu'il convient d'appliquer aux essais de laboratoires :

On a eu recours de façon extensive aux essais de laboratoires à haute tension pour simuler les phénomènes de coups de foudre. Mais il convient de faire preuve d'une grande prudence dans l'exécution et l'interprétation de ces simulations<sup>5)</sup>.

Cela dit, des essais sur une petite échelle se sont avérés efficaces pour étudier des aspects spécifiques de divers types d'organes capteurs dans les systèmes paratonnerre, notamment en mesurant le nombre d'arcs de laboratoire attirés avec chronométrage de l'attraction des arcs. De façon générale, les essais de laboratoire ont démontré que les organes capteurs PDA présentaient un avantage au niveau de l'attraction de l'arc de laboratoire ou étaient équivalents à une tige de captage classique sous l'angle de l'attraction de l'arc (reconnu NFPA 780). Allen *et coll.*, (10) ont indiqué les résultats de la comparaison à laquelle ils ont procédé en laboratoire entre un capteur PDA et une tige de Franklin traditionnelle dans les termes suivants :

Il ressort que les dispositifs PDA présentent un léger avantage, au niveau du temps pour atteindre la décharge disruptive, par rapport à la tige de Franklin<sup>6)</sup>.

Dans leurs essais de laboratoire portant sur des dispositifs PDA et des tiges de Franklin, Chalmers *et coll.*, (62) ont indiqué qu'un des dispositifs PDA a atteint le stade de la décharge disruptive sensiblement avant la tige de Franklin et que deux autres dispositifs PDA provoquaient des décharges en même temps qu'une tige de Franklin ou après. Ces chercheurs ont par ailleurs indiqué que des tiges de Franklin de formes différentes présentaient des temps différents pour atteindre la décharge disruptive.

---

<sup>5)</sup> Pederson, Aage, A. Bondiv-Claggerie, V. Cooray et L. Dellera" Lightning Threat and Protection in Perspective" (Aspects des risques de foudroiement et de la protection paratonnerre), Conférence internationale sur la protection contre la foudre (International Conference on Lightning Protection), ICLP, Birmingham, 9-98, p.1.

<sup>6)</sup> Allen, N.L, K.J. Cornick, D.C Faircloth and C.M. Kousis ; "Tests of the Early Streamer Emission Principle for Protection against lightning" (Essais du principe du précurseur (ou dispositif d'amorçage) comme protection contre la foudre (IEEE Proceedings, Science Measurement Technology, Vol. 145, N° 5, Septembre 98, p. 200.

Berger (20) a tiré la conclusion suivante de ses études de laboratoire comparatives entre une tige de Franklin classique et un organe capteur PDA à impulsion :

On a testé la tige de Franklin classique puis on l'a comparée à un organe capteur équipé d'un dispositif d'amorçage (PDA) conçu pour étendre la zone de protection de la tige de Franklin. Des essais étendus ont démontré qu'un organe capteur PDA à impulsion haute tension est plus efficace que la tige de Franklin classique utilisée dans les normes<sup>7)</sup>.

En 1995, l'organisme d'essais ETL a procédé à une série d'évaluations en laboratoire portant sur trois organes capteurs PDA différents à chambre d'ionisation, en comparant la durée de l'amorçage du dispositif par rapport à une tige de Franklin classique (89) (91) (93). L'essai a été réalisé dans les conditions de laboratoire, le temps d'amorçage des dispositifs étant mesuré en nanosecondes, les dispositifs étant soumis à 100 coups de foudre. D'après les enregistrements, la durée d'amorçage des trois dispositifs PDA était, dans tous les cas, inférieure à celle de la tige de Franklin, avec des différences variant de 13,74 à 47,58 nanosecondes et une différence moyenne de 25,18 nanosecondes. En outre, l'ETL a réalisé une étude comparative similaire entre une tige de Franklin standard à pointe et une tige de Franklin à boule, avec pour résultat une différence de 0,44 nanoseconde du temps d'amorçage (95).

Le département de Génie électrique et d'électronique de l'Institut des Sciences et Technologies de l'Université de Manchester (76) a procédé à des études d'évaluation en laboratoire entre trois dispositifs PDA et une tige de Franklin standard. Avec l'un des dispositifs PDA, la tige classique a subi 27 impacts et le dispositif DPA 22. Avec le deuxième dispositif DPA, la tige de Franklin et le dispositif DPA ont subi, respectivement, 72 et 42 impacts. Pour l'évaluation entre le troisième dispositif DPA et la tige de Franklin, il y a eu 101 coups de foudre, et huit décharges n'ont atteint aucun des deux dispositifs. Dans le cadre de ce programme d'évaluation en laboratoire, 420 décharges électriques ont été générées au total, dont 200 ont frappé la tige de Franklin classique, soit 47,6 %, 165 le dispositif DPA soit 39,3 % et 55, soit 13,1 % des décharges, n'ont atteint aucun des deux dispositifs. La conclusion de cette étude a été formulée dans les termes suivants :

Les résultats obtenus à partir de cet essai montrent que les décharges au niveau des tiges de Franklin et des organes capteurs PDA présentent une nature absolument aléatoire dans des conditions électriques et géométriques identiques. Ils ne corroborent pas l'hypothèse de la supériorité des dispositifs de captage PDA<sup>8)</sup>.

---

7) Berger, Gerard "Testing to show a time advantage in production of a lightning up leader" (Essais pour démontrer un gain de temps dans la production d'une décharge de foudre principale ascendante "Laboratoire de physique des décharges du CNRS, p. 1.

8) Département de génie électrique et d'électronique "Report on the results of tests of ESE & Franklin Terminals" (Rapport sur les résultats d'essais de capteurs PDA et de type Franklin) Université de Manchester, Institut des Sciences et Technologies, Rapport d'essai N° 43427, p. 6.

Il se peut que la disparité des résultats des essais réalisés en laboratoire sur les organes capteurs utilisés pour se protéger de la foudre soit due à un certain nombre de variables entrant en ligne de compte, notamment l'emplacement des dispositifs, l'interaction réciproque de chaque dispositif sur le fonctionnement de l'autre, l'intensité de la décharge en laboratoire et l'entrefer disponible en laboratoire pour la décharge électrique. Montandon (236) nous a rappelé dans les termes suivants un fait qui touche n'importe quel organe capteur :

Il est notoire qu'une tige de Franklin n'est pas en mesure de protéger son environnement à 100 % contre les décharges dues à la foudre. C'est donc une gageure que de vouloir d'une part étudier l'efficacité de la protection apportée par une telle tige et, d'autre part, d'essayer d'améliorer cette efficacité par toute sorte de dispositifs supplémentaires<sup>9)</sup>.

Dans le rapport du NIST, Van Brunt *et coll.*, (369) ont développé comme suit le point de vue formulé par Montandon concernant l'efficacité des organes capteurs paratonnerres :

Aucune raison ne permet de croire qu'un organe capteur est efficace à 100 % pour attirer la foudre, quel que soit le type de dispositif PDA qu'il utilise, le cas échéant. Si l'on tient compte de la vaste gamme de conditions atmosphériques susceptibles de se présenter et des types de comportement de la foudre que l'on a enregistrés, il n'est pas surprenant que les organes capteurs, quel que soit leur type, présentent quelquefois des défaillances. On a vu que la foudre pouvait occasionnellement frapper des structures de grande hauteur en des points situés très en-dessous de leur sommet, c'est-à-dire en dehors de la "zone de protection". Il convient de considérer avec circonspection tout paratonnerre dit efficace à 100 %<sup>10)</sup>.

Grumley et Berger (140) ont indiqué qu'ils estimaient que l'efficacité d'un organe capteur dépendait à la fois de sa conception et de la pénétration en hauteur de l'intensification du champ électrique dans les termes suivants :

L'intensification du champ électrique d'un organe capteur dépend, dans une grande mesure, de sa pénétration en hauteur dans le champ électrique et de son rayon de courbure. Cela laisse à penser qu'il n'existe pas d'organe capteur universel<sup>11)</sup>.

---

<sup>9)</sup> 236. Eric Montandon, Consultant - Suisse (Communication et écrits personnels), 16/02/99, p. 1.

<sup>10)</sup> Van Brunt, Richard J., Thomas L. Nelson, Samar L. Firebaugh "Early Streamer Emission Air Terminals Lightning Protection Systems : Literature review and technical analysis" (Systèmes de protection contre la foudre par organes capteurs à dispositif d'amorçage : Etude des ouvrages sur le sujet et analyse technique), Quincy, MA, National Fire Protection Research Foundation (Fondation nationale de recherche sur la protection contre les incendies, 31/01/95, p. 25.

<sup>11)</sup> Gumley, J.R., G. Berger, A review of the Lightning Attachment Process and Requirements to achieve Improved Modeling (Etude du processus d'absorption de la foudre et conditions requises pour améliorer la qualité des modèles), Erico Lightning Technologies, Hobart, Australie, p. 3.

Heary, *et coll.*, (154) (162), ont présenté des rapports sur des essais de laboratoire réalisés dans différentes conditions atmosphériques en faisant appel à des dispositifs d'essai tant en extérieur qu'en interne. Il ressort de leurs conclusions que les essais d'organes capteurs doivent être réalisés dans des conditions d'orage avec foudroiement atmosphérique et que les dispositifs à chambre d'ionisation présentent une supériorité par rapport aux organes capteurs standard.

## 2. Examen des essais sur le terrain

Il semble ressortir de la documentation que les essais sur le terrain portant sur l'efficacité des organes capteurs des systèmes de protection contre la foudre sont tout aussi sujets à controverse que leurs essais en laboratoire. Les essais sur le terrain sont tributaires de l'apparition de conditions atmosphériques naturelles susceptibles de provoquer le déclenchement des coups de foudre. Ainsi, dans certaines expériences sur le terrain, on a utilisé des fusées remorquant des fils conducteurs pour induire des décharges.

Moore (249) a étudié la différence, sous l'angle de la situation environnementale, entre l'arc électrique créé par un générateur en laboratoire et le foudroiement naturel, et par conséquent la nécessité de procéder à des essais en extérieur sur le terrain pour évaluer les organes capteurs de la façon suivante :

Un tel essai de laboratoire ne permet pas de simuler comment une tige donnée réagirait à un coup de foudre naturel car les essais de laboratoire ne durent pas suffisamment longtemps pour que les ions générés par les puissants champs puissent atteindre le sommet de la tige comme cela serait le cas au cours d'un impact naturel. Les décharges irrégulières (précurseurs cathodiques) peuvent être provoquées en laboratoire par différents types d'organes capteurs proposés, sans que l'on sache comment ils pourraient servir de protections paratonnerres ; il semble que leurs différences de comportement soient dues à leur forme plutôt qu'à leur capacité de protection<sup>12)</sup>.

Eybert Berard *et coll.*, (97) ont présenté un rapport sur les essais de terrain réalisés à St Privat d'Allier en France en 1996 et à Camp Blanding en Floride de 1993 à 1995 en utilisant le système de déclenchement à l'aide d'une fusée à une altitude de 500 à 800 mètres. Ces expériences semblent plutôt d'une portée limitée compte tenu des conditions atmosphériques. Cela dit, elles ont néanmoins indiqué la tension que le dispositif PDA a supporté sans perte de capacité opérationnelle, et la supériorité du dispositif PDA par rapport à une tige simple classique.

---

<sup>12)</sup> Moore, Charles B, New Mexico Tech., "Personal Communication, Papers, & Photos" (Communication personnelle, écrits et photos, 16 /2/ 99, p.4.

Gumley *et coll.*, (142) ont publié un rapport sur un site d'essais expérimental qui a fonctionné pendant la saison des orages 1997-98 en Australie septentrionale. On a enregistré un total de 500 phénomènes de déclenchement, le plus important avec un champ électrique au sol de 100 kV/m. En analysant le phénomène le plus important, ils sont parvenus à la conclusion que leur aménagement des organes capteurs provoquait une intensification du champ qui risquait d'être trop élevée pour qu'une décharge principale optimale puisse se développer.

Rison, et Moore *et coll.*, (244) (245) (337) ont réalisé des études avec des organes capteurs exposés à des orages naturels au laboratoire de recherche atmosphérique de Langmuir de l'Institut de Technologie et des Mines du Nouveau Mexique. Ces évaluations se sont concentrées sur la comparaison entre les tiges de Franklin à boule et à pointe, ainsi que sur la comparaison entre la capacité des organes capteurs PDA et les tiges de Franklin (248) (336) dans l'environnement naturel d'un site à proximité du sommet du pic South Baldy culminant à 3 287 m. Les études comparatives des tiges de Franklin à boule et à pointe ont mis en évidence que les tiges à boule étaient plus efficaces. Sur une période de quatre ans, neuf tiges à boule ont été foudroyées par des décharges nuage - terre alors qu'aucune des tiges à pointe adjacentes ne semble avoir subi d'impact.

En 1991, Rison (336) a rédigé un rapport sur des études réalisées par le laboratoire de Langmuir du 15 juillet au 23 août 1991 pour évaluer si un organe capteur PDA radioactif assurait une protection dans un rayon de 100 m, comme l'affirmait le fabricant. Le dispositif PDA fut installé sur un mât de 20 pieds (env. 6 mètres), 4 mètres au-dessous du sommet du South Baldy Peak. On a utilisé des caméras vidéo pour enregistrer les coups de foudre. Deux impacts de foudre furent enregistrés dans ce rayon de 100 m pendant la durée de l'étude, soit environ cinq semaines, l'un à 85 du dispositif PDA, l'autre à environ 78 mètres. Il convient toutefois de prendre note de la déclaration suivante extraite du rapport :

Vers la fin de la période d'essai, on a constaté que le paratonnerre radioactif avait été endommagé - rupture de la soudure entre la bille sphérique sur le paratonnerre et l'écrou auquel elle est attachée. Il n'y avait aucune preuve de manipulation ou de vandalisme. L'examen de la pointe du paratonnerre au microscope révéla qu'elle avait fondu, exactement comme si elle avait été frappée par la foudre. Selon toute vraisemblance, le paratonnerre a été foudroyé alors que les caméras d'enregistrement n'étaient pas branchées (le sommet se trouvant dans les nuages ou en cas d'orage aux toutes premières heures du jour) et la foudre a cassé la soudure<sup>13</sup>.

Ainsi, il semblerait que le dispositif PDA a fonctionné sous l'effet d'un coup de foudre que les caméras utilisées pendant cette étude n'ont pas enregistré car, au cours de l'étude, celles-ci n'étaient pas branchées en permanence.

---

<sup>13</sup>) Rison, William "A Study of Lightning Strikes in the vicinity of a radioactive Preventor (Etude des foudroiements à proximité d'un paratonnerre radioactif), Laboratoire de Langmuir, New Mexico Tech., Socorro, Nouveau Mexique, 8/11/91, p. 4.

Moore *et coll.* (248) présentèrent en 1998 un résumé de tous les essais du paratonnerre radioactif PDA réalisés sur le terrain pendant les étés 1990, 1991, 1993, 1994, 1995, 1996 et 1997. Moore les analyse dans les termes suivants :

Pendant les six étés au cours desquels le paratonnerre fut exposé aux orages atmosphériques, la foudre est tombée sur six sites différents dans un rayon de 100 m autour du dispositif, mais le paratonnerre lui-même n'a jamais subi d'impact.

Des mesures numérisées, avec une résolution d'une durée d'un quart de micro-seconde, des courants qui se sont écoulés du paratonnerre à l'occasion de deux impacts proches en septembre 1997 n'apportent aucune indication quant à l'émission d'éventuelles "décharges avancées ou précurseurs" efficaces par le paratonnerre. En fait, au cours de ces décharges, la foudre a frappé une tige à boule située à une distance de 20 m sans que le paratonnerre n'émette de décharges avancées susceptibles d'être associées à cet impact rapproché<sup>14)</sup>.

Il convient de noter que ces essais portant sur sept années impliquent un seul dispositif PDA de type radioactif. Il faut encore noter que les études sur le terrain de Moore (243) dans des conditions de foudroiement naturel ont remis en question la validité de l'efficacité de l'organe capteur type tige de Franklin à pointe de la manière suivante :

Le fait que les organes capteurs à ionisation radioactive et à tige pointue n'ont pas participé à des décharges de foudre en servant de connecteurs prééminents de la foudre vers la terre n'a pas surpris les savants qui étudient les orages et la foudre. Pendant les 40 dernières années, j'ai mesuré les courants électriques qui s'écoulent dans l'air à partir aussi bien d'électrodes radioactives que d'électrodes à pointe sous l'influence des champs électriques puissants au-dessous des orages mais aucune de mes électrodes bien exposées n'a jamais subi d'impact de foudre<sup>15)</sup>.

L'étude du NIST par Van Brunt *et coll.* (369) résume comme suit comment les essais de laboratoire et sur le terrain contribuent à alimenter le débat permanent sur l'efficacité des organes capteurs PDA :

---

<sup>14)</sup> Moore, C.B., William Rison, e G.D. Aulich "An assessment of the radioactive "Preventor" as an Early Streamer Emitting Lightning Protector" (Evaluation du "paratonnerre" radioactif en tant que paratonnerre à dispositif d'amorçage (à précurseur), New Mexico Tech., Langmuir Laboratory for Atmospheric Research, Socorro, NM, 29/12/98, pages 24/25.

<sup>15)</sup> 243 Moore, Charles B, New Mexico Tech., "Personal Communication to Subcommittee of NFPA Board of Directors" (Communication personnelle au sous-comité du Conseil d'Administration de la NFPA), 4/09/95, p. 1.

Bien que les essais de laboratoire aient permis de mieux connaître le fonctionnement des dispositifs PDA par rapport aux modèles classiques, en suggérant que les dispositifs PDA contribuent effectivement à accroître l'émission de précurseurs, les résultats obtenus n'ont pas été utilisés, et ils ne peuvent sans doute pas l'être, pour calculer quantitativement l'efficacité respective de ces paratonnerres pour les conditions atmosphériques en cas d'orage. Aujourd'hui, les résultats d'un petit nombre d'essais sur le terrain avec des coups de foudre naturels ne permettent pas tirer de conclusions quant à l'estimation des performances respectives de ces dispositifs. On ne peut pas dire si l'on disposera un jour de données suffisantes résultant de ces essais pour tirer des conclusions quantitatives sur l'efficacité de l'attraction. Il semble que les essais réalisés dans un environnement naturel soient des plus utiles pour identifier et corroborer, documents à l'appui, les conditions dans lesquelles les organes capteurs sont sujets à des défaillances<sup>16)</sup>.

## **B. Pertinence de la base théorique et des essais de laboratoire**

La commission d'évaluation indépendante a été chargée, aux termes de l'accord de règlement amiable, d'apporter une réponse à la question de savoir "si la technique de protection contre la foudre par PDA repose sur une base théorique et des essais de laboratoires adéquats". Pour répondre à cette question, la commission a dû étudier les documents qui lui avaient été soumis. Le rôle des essais de laboratoire a été examiné dans le cadre de la réponse à la question précédente concernant la base de la technologie des PDA.

### **1. Examen de la base scientifique théorique**

La base scientifique et théorique de la technique de protection par PDA semble reposer sur des essais en laboratoire qui montrent que les performances des organes capteurs à ionisation sont supérieures, ou au moins équivalentes, à celles de la tige de Franklin.

Berger (31) a indiqué, dans les termes suivants, qu'il est possible de prévoir le champ électrique limite  $E_i$  requis pour activer un organe capteur PDA à partir d'expériences de laboratoire :

Ce concept permet de prévoir le champ limite  $E_i$  (champ de déclenchement ou d'amorçage) généré par la décharge principale descendante négative de la foudre pour lequel la décharge principale ascendante positive commence à se propager de façon continue depuis la pointe d'une tige conductrice de la foudre dont on connaît la hauteur  $h$ <sup>17)</sup>.

---

<sup>16)</sup> Van Brunt, Richard J., Thomas L. Nelson, Samar L. Firebaugh "Early Streamer Emission Air Terminals Lightning Protection Systems : Literature review and technical analysis" (Systèmes de protection contre la foudre par organes capteurs à dispositif d'amorçage : Etude des ouvrages sur le sujet et analyse technique), Quincy, MA, National Fire Protection Research Foundation (Fondation nationale de recherche sur la protection contre les incendies), 31/01/95, p. 26.

<sup>17)</sup> Berger, Gerard, témoignage d'expert, tribunal de 1<sup>ère</sup> instance, District fédéral d'Arizona, 16/11/1998, p. 1.

Comme on l'a déjà dit dans la précédente section du présent rapport, il semblerait qu'il n'y ait pas de corrélation entre les performances des organes capteurs PDA ou de Franklin dans les conditions de laboratoire à haute tension et les résultats des essais sur le terrain dans des conditions naturelles d'orage avec foudroiement. Presque tous les essais comparatifs en laboratoire ont porté sur les organes capteurs PDA radioactifs et l'organe capteur classique type de Franklin. Les documents remis à la commission d'évaluation indépendante ne contiennent que peu de données sur les essais relatifs aux dispositifs PDA du type à étincelle. Comme l'a indiqué Moore (242) (243) (249), les essais réalisés pendant sept ans sur le terrain n'ont pas abouti à l'activation d'un dispositif PDA radioactif ni en 40 ans à l'activation d'une tige de Franklin.

Dans le rapport du NIST, Van Brunt *et coll.*, (369) ont indiqué que, d'après les essais de laboratoire, on pourrait penser qu'il existe un certain fondement physique en faveur des organes capteurs PDA, mais l'efficacité de ce fondement n'a pas encore été déterminée dans les conditions de foudroiement naturelles. Cette information a été présentée comme suit :

Il semblerait qu'il existe une base physique suffisante en faveur de l'utilisation d'un dispositif PDA dans la mesure où les expériences de laboratoire apportent de bonnes preuves qu'une irradiation ou un déclenchement électrique permet d'augmenter considérablement la probabilité d'amorçage d'une décharge avancée (ou précurseur) de courant à partir d'une électrode. Cela dit, il reste encore à déterminer avec précision dans quelle mesure cette augmentation des chances de déclenchement d'un précurseur améliore la puissance d'un organe capteur à attirer la foudre. On peut penser à juste titre qu'elle n'étend pas de façon significative la plage maximale de protection<sup>18)</sup>.

En revanche, Moore (249) fait état de l'expérience suivante touchant à la technologie de la protection par PDA :

---

<sup>18)</sup> Van Brunt, Richard J., Thomas L. Nelson, Samar L. Firebaugh "Early Streamer Emission Air Terminals Lightning Protection Systems : Literature review and technical analysis" (Systèmes de protection contre la foudre par organes capteurs à dispositif d'amorçage : Etude des ouvrages sur le sujet et analyse technique), Quincy, MA, National Fire Protection Research Foundation (Fondation nationale de recherche sur la protection contre les incendies), 31/01/95, p. 25.

En revanche, en septembre 1998, le mesurage numérisé à grande vitesse d'un courant s'écoulant de la pointe d'une tige de Franklin standard pointue homologuée UL au cours d'un foudroiement vers la terre d'une distance de 155 m a démontré l'apparition de trois décharges avancées (précurseurs) précédant l'impact d'environ 260 microsecondes. Cette succession est illustrée dans les figures 2 et 3. Ces décharges présentaient les intensités de courant les plus élevées que nous ayons mesurées jusqu'à aujourd'hui et elles étaient suffisamment en avance pour satisfaire aux critères applicables aux décharges avancées/précurseurs. Mais aucune de ces décharges avancées n'était associée au coup de foudre qui allait suivre. Après l'émission et la première propagation, elles se sont toutes éteintes sans contact avec la décharge principale échelonnée en sens négatif, sans doute parce que les champs électriques à leur pointe n'étaient pas suffisamment intenses pour assurer une propagation continue.

Voilà évidemment la raison pour laquelle l'hypothèse de la "décharge avancée" (ou précurseur) ne tient pas. Le facteur qui détermine la propagation continue d'un précurseur ascendant est l'intensité du champ électrique avant la pointe du conducteur, et non une ionisation accrue en arrière au niveau de l'organe capteur, caractéristique mise en avant pour les dispositifs PDA<sup>19)</sup>.

Mackerras *et coll.*, (219) ont étudié les performances d'organes capteurs PDA dans le cadre d'expériences de laboratoire et d'études sur le terrain, ainsi que les études sur les performances des systèmes de protection contre la foudre à dispositifs PDA. Ils sont en principe d'accord avec Moore (249) et sont arrivés à la conclusion, formulée dans les termes suivants, que la propagation d'une décharge principale à partir de la pointe d'un organe capteur n'est pas influencée par les caractéristiques de ce dernier :

Une fois qu'un précurseur ou une décharge principale s'est propagé dans l'espace éloigné d'un organe capteur, la suite de sa propagation dépend de l'apport d'énergie en provenance du champ électrique dans l'espace à proximité de la pointe de la décharge et des propriétés diélectriques de l'air subissant la décharge disruptive. Étant donné qu'aucun de ces deux facteurs ne peut être influencé par l'organe capteur, on en conclut qu'il n'est pas possible d'améliorer sensiblement les performances en matière d'interception de la foudre en provoquant l'émission avancée d'un précurseur à partir d'un organe capteur<sup>20)</sup>.

---

<sup>19)</sup> Moore, Charles B, New Mexico Tech., "Personal Communication, Papers, & Photos" (Communication personnelle, écrits et photos), 16/02/ 99, p. 4.

<sup>20)</sup> Mackerras, D, M. Darveniza et A.C. Liew, " Review of claimed enhanced lightning protection of buildings by early stream emission air terminals" (Etude sur une protection paratonnerre des bâtiments prétendument accrue grâce à des organes capteurs à dispositif d'amorçage - à précurseur -) IEEE Proceedings -Science Measurement Technology, vol. 144, N° 1, 1/97, p. 1.

Mackerras *et coll.*, (219) ont également indiqué qu'ils pensaient qu'il n'existe aucun fondement physique aux revendications selon lesquelles les organes capteurs PDA offrirait une protection accrue contre la foudre sur la base de l'émission anticipée d'une décharge principale ascendante. Ils remarquent que l'organe capteur PDA est soumis aux mêmes lois physiques que tous les autres organes capteurs en ce qui concerne la transition du précurseur à la décharge principale.

## 2. Examen des performances des systèmes

Il semblerait que la dernière évaluation d'un système de protection par paratonnerre complet devrait porter sur la performance des systèmes tels qu'ils sont installés sur les bâtiments. Les documents soumis comprenaient une référence sur la défaillance d'un système classique avec tiges de Franklin (328) et il y avait un compte-rendu de journal sur la défaillance d'un système à tiges de Franklin ayant entraîné des blessures parmi les membres du personnel (252). Il y avait également plusieurs études sur des défaillances de systèmes de protection PDA.

La défaillance du système à tiges de Franklin ayant provoqué onze blessés parmi le personnel est survenue au stade Robert F. Kennedy à Washington le 13 juin 1998 (252). Richardson a relaté la défaillance d'un organe capteur à tige de Franklin situé à environ quatre pieds (1,2 m) d'une caméra montée à l'extérieur du bâtiment et qui a été endommagée par un coup de foudre (328).

Makerras *et coll.*, (220) ont rendu compte de quatre cas d'impacts de foudre sur des bâtiments à Singapour entre la fin des années 60 et les années 80. Hartono et Robiah (146) ont signalé dix cas de défaillances sur des bâtiments protégés par des systèmes de protection PDA. Cette étude a utilisé des photographies pour illustrer l'état des bâtiments avant et après le foudroiement des zones endommagées. Il ressort de cette étude photographique que le dommage semble dépendre du nombre d'impacts reçus, de l'intensité du coup de foudre et de la forme de la structure au point d'impact. Bien que cela ne soit pas précisé dans l'étude, Hartono et Robiah ont signalé que le dommage dû à la foudre a été constaté sur des bâtiments protégés par des organes capteurs de Franklin, comme il est indiqué dans la déclaration suivante :

Des études réalisées sur les bâtiments équipés d'organes capteurs standard (type tige de Franklin) ont également mis en évidence des emplacements de dommages par foudroiement similaires sur le toit ou à proximité de celui-ci. Sur la base de cette comparaison, nous concluons que l'emploi du dispositif PDA ne présente pas d'avantage pour protéger les bâtiments contre les coups de foudre directs<sup>21)</sup>.

---

<sup>21)</sup> Hartono, Zainal Abidin et Ibrahim Robiah, "A long term study on the performance of early streamer emission air terminals in a highly isokeraunic region (Etude à long terme sur les performances d'organes capteurs à dispositif d'amorçage dans une région hautement isokéraunique) 19/02/199, p. 2.

Il convient de noter que tous les incidents dus à la défaillance du système présentés à la commission n'étaient pas documentés de façon suffisamment détaillée pour qu'il soit possible de procéder à une analyse utile de l'efficacité du système en question. Même la photo la plus détaillée ne comportait pas les renseignements nécessaires, à savoir la marque et le modèle de l'organe capteur, la date d'achèvement de l'installation, pour pouvoir établir l'âge du système à la date du foudroiement, la maintenance et l'état du système au moment de l'impact, y compris l'état des conducteurs de descente et du système de mise à la terre. Il semblerait qu'une documentation détaillée sur les modalités de fonctionnement et les dysfonctionnements des systèmes de protection contre la foudre soit un élément indispensable pour pouvoir évaluer l'efficacité de n'importe quel type de système paratonnerre installé sur différents bâtiments de hauteur et de structure variables.

Van Brunt *et coll.*, (369) ont exposé ce problème du manque de données appropriées sur la performance des systèmes de protection dans les termes suivants :

Il existe des rapports relatant des incidents dus au fait que des dispositifs PDA n'ont pas apporté la protection spécifiée par le fabricant [156, 158, 165, 215]. Il existe également des ouvrages statistiques sur la défaillance des systèmes traditionnels [109]. Lorsqu'on examine les rapports sur les "défaillances", on peut toujours se poser des questions sur leur cause, c'est-à-dire si elles sont avant tout la conséquence de prétentions exagérées de la part du fabricant ou la conséquence d'une mauvaise utilisation (montage défectueux) du dispositif. Les rapports concernant des défaillances isolées soulèvent des inquiétudes légitimes mais ils sont rarement accompagnés de données corrélatives suffisantes concernant le phénomène pour pouvoir établir la cause de la défaillance en question. Il est généralement difficile de tirer des conclusions pertinentes à partir d'événements isolés, susceptibles de pouvoir être utilisées pour améliorer la conception des systèmes ou pour évaluer la performance de systèmes<sup>22</sup>).

Ainsi, si l'on considère que, en l'état actuel, la performance des systèmes de protection paratonnerre ne revêt pas un caractère prioritaire pour les fournisseurs des systèmes, les fabricants, les compagnies d'assurance ou les services publics, il apparaît que l'on n'obtiendra que peu de renseignements ou de données utiles concernant la validation du fondement théorique des systèmes.

---

<sup>22</sup>) Van Brunt, Richard J., Thomas L. Nelson, Samar L. Firebaugh "Early Streamer Emission Air Terminals Lightning Protection Systems ; Literature review and technical analysis" (Systèmes de protection contre la foudre par organes capteurs à dispositif d'amorçage : Etude des ouvrages sur le sujet et analyse technique), Quincy, MA, National Fire Protection Research Foundation (Fondation nationale de recherche sur la protection contre les incendies), 31/01/95, p. 25.

### **III. RECOMMANDATIONS A L'ADRESSE DU CONSEIL DE NORMALISATION**

Sur la base d'une évaluation approfondie et exhaustive des 377 articles soumis à la commission indépendante, les membres de cette dernière sont convenus, avec une totale unité de vues, d'adresser les recommandations suivantes au Conseil de normalisation de l'Association nationale de protection contre les incendies (National Fire Protection Association Standards Council). Il convient de se souvenir que le conseil de normalisation est l'organisme officiellement habilité à prendre toute mesure touchant aux documents de la NFPA relatifs à la protection contre la foudre.

#### **A. Base scientifique et technique des PDA**

La question initiale posée à la commission d'évaluation indépendante était de savoir "si la technologie de la protection paratonnerre par PDA est fiable sous l'angle scientifique et technique". Après examen des documents qui lui ont été soumis, la commission est parvenue aux conclusions suivantes :

1. Il semble que les organes capteurs PDA sont fiables du point de vue technique dans la mesure où ils sont en général équivalents à l'organe capteur traditionnel type de Franklin dans les expériences de laboratoire.
2. Cela dit, ni les organes capteurs PDA ni la tige type de Franklin traditionnelle ne semblent fiables sur le plan scientifique ou technique lorsqu'ils sont soumis à des essais d'évaluation sur le terrain dans des conditions de foudroiement naturelles.
3. La technique de protection paratonnerre par PDA telle qu'elle est actuellement mise en œuvre dans le cadre de systèmes complets ne semble pas fiable sur les plans scientifique et technique du point de vue des zones de protection revendiquées ou des principes essentiels du système de mise à la terre.

#### **B. Pertinence du fondement théorique et des essais de laboratoire**

La seconde question spécifique posée à la commission d'étude indépendante était de savoir si "la technique de protection paratonnerre par dispositifs PDA repose une base scientifique théorique et des essais de laboratoire adéquats". Après examen des documents qui lui ont été soumis, la commission est parvenue aux conclusions suivantes :

1. Il semble que le principe et la conception des paratonnerres à dispositifs d'amorçage (à précurseurs) reposent sur une base théorique adéquate du point de vue physique.
2. Il ne semble pas que l'extension revendiquée des zones de protection lorsqu'on utilise des conducteurs de descente et un système de mise à la terre limités repose sur une base théorique adéquate.
3. Les essais haute tension réalisés en laboratoire sur les organes capteurs PDA semblent être appropriés quant à leur portée et à leur nombre, mais ils sont limités dans la mesure où ils ne correspondent pas à une évaluation du système global de protection paratonnerre par dispositifs PDA dans des conditions naturelles d'orage.

### C. Documents de la NFPA relatifs à la protection paratonnerre

Aux termes de l'accord de règlement amiable, la commission indépendante était aussi chargée d'un mandat libellé de la façon suivante : "La présente commission, en publiant son rapport, abordera les questions suivantes ainsi que toute autre question qu'elle jugera utile". La commission s'est penchée sur les problèmes du document NFPA 780 existant, intitulé "Standard for the installation of lightning protection systems 1997 edition" (Norme applicable à l'installation de systèmes de protection contre la foudre, éd. 1997) (294) et du document proposé NFPA 781, intitulé "Standard for lightning protection systems using early streamer emission air terminals" (Norme applicable aux systèmes de protection paratonnerre faisant appel à des organes capteurs à dispositif d'amorçage (à précurseurs)) (277). La commission a étudié l'utilité de chacun de ces documents ainsi que la composition et l'équilibre de chaque comité en conformité avec les procédures de la NFPA. Après examen des documents qui lui avaient été soumis, la commission est parvenue aux conclusions suivantes :

1. Le comité NFPA 780 actuel devrait être déchargé de sa mission et entièrement restructuré. Il a besoin de nouveaux membres supplémentaires dans les catégories suivantes : responsables de l'application, consommateurs, utilisateurs, assurance, main d'œuvre, experts spéciaux et recherche/essais.
2. Le conseil devrait demander à des utilisateurs particulièrement influents de faire partie de ses membres, et notamment : FAA, DOE, DOD, NASA, IBM, Reedy Creek Improvement District, organismes de téléphonie, radio et télévision et compagnies d'électricité.
3. Il conviendrait de revoir la forme du document NFPA 780 pour en faire un Guide ou une Pratique recommandée. La commission est d'avis que le document NFPA 780 ne satisfait pas aux critères que doit remplir une norme NFPA étant donné que le système de protection contre la foudre recommandé n'a jamais été validé sur le plan technique ou scientifique et que les organes capteurs à tige de Franklin n'ont pas été validés dans le cadre d'essais sur le terrain dans des conditions d'orage. Une norme doit satisfaire aux critères suivants de la NFPA, comme il est indiqué dans le NFPA 99 Directory (Répertoire de la NFPA 99) (298) :

Norme - Document dont le texte principal ne contient que des dispositions obligatoires, en employant le mot "doit" pour indiquer les conditions requises, et qui se présente sous une forme généralement acceptable pour être mentionné comme référence obligatoire par une autre norme ou un autre code ou pour pouvoir être adopté comme loi. Les dispositions non obligatoires doivent figurer dans une annexe, ou sous forme de notes de bas de page ou de notes en petits caractères et ne sont pas considérées comme faisant partie intégrante des exigences d'une norme<sup>23</sup>).

Il semblerait que, dans sa forme actuelle, le document NFPA 780 ne puisse pas être mentionné comme référence obligatoire par une autre norme ou un autre code ou bien repris dans la législation. Le document NFPA 780 actuel semble avoir été reconnu plus au vu d'un précédent historique qu'au vu d'une validation expérimentale et scientifique.

---

<sup>23</sup>) NFPA National Fire Protection Association 1999 Directory (Répertoire 1999 de l'Association nationale de protection contre les incendies, Quincy, MA, 11/98, p. 52.

4. La disposition en vigueur dans le domaine d'application du document NFPA 780 est la suivante : "A l'exception des concepts faisant appel à des dispositifs paratonnerre à dispositif d'amorçage". Elle devrait être supprimée. Le comité 780 remanié devrait inclure des représentants de l'ensemble de la communauté travaillant dans le domaine de la protection contre la foudre.

#### **D. Initiatives de la NFPA**

Après examen des documents du système de normalisation de la NFPA qui lui avaient été soumis, la commission est parvenue aux conclusions suivantes :

1. Le groupe de recherches sur les incendies de la NFPA devrait mettre en place une force d'intervention avec un ingénieur en électricité de la NFPA pour procéder à des recherches détaillées sur les incidents dus à des coups de foudre de manière à fournir l'expérience de terrain requise sur les performances des systèmes paratonnerre. Ces recherches devraient inclure notamment les données nécessaires telles que : fabricant et responsable de la pose du système, date de montage du système, dommage causé au système par la foudre, maintenance et état du système, y compris les conducteurs de descente, les méthodes de mise à la terre et les performances du système.

2. Le Groupe de recherches et d'analyse sur les incendies de la NFPA (NFPA Fire Analysis and Research Group) devrait mettre en place un système pour recueillir les déclarations et les données statistiques requises sur les incidents dus à la foudre ayant provoqué des dommages corporels ou des dommages matériels importants à l'intention de la force d'intervention de recherche. Ce système devrait comprendre les ressources de l'Association internationale des chefs de services d'incendie de la NFPA (NFPA International Fire Marshals Association), les membres de la NFPA représentants des compagnies d'assurance et les Underwriters Laboratories.

3. Le Conseil de normalisation devrait contrôler les activités du comité 780 restructuré de la NFPA en vue de l'élaboration d'un document sous forme de Guide ou de Pratique recommandée, avec des rapports écrits bisannuels du groupe de liaison du personnel du comité.

