

RAPPORT D'ÉTUDE

20/01/2017

**EVALUATION DES TECHNOLOGIES DES
PARATONNERRES A DISPOSITIF
D'AMORCAGE¹**

(EARLY STREAMER EMISSION)

Référence : DSC-16-156206-10594A

¹ Révision 2016 référence : INERIS-DSC-16-156206-10594A du rapport « Etude des paratonnerres à dispositifs d'amorçage », INERIS octobre 2001

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

EVALUATION DES TECHNOLOGIES DES PARATONNERRES A DISPOSITIF D'AMORCAGE (PDA) (EARLY STREAMER EMISSION)

Lieu : VERNEUIL EN HALATTE

Rapport réalisé pour: Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer
(MEEM)

Liste des personnes ayant participées à l'étude :

Olivier HYVERNAGE (INERIS)

Dominique CHARPENTIER (INERIS)

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

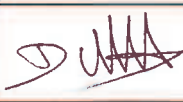

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Olivier HYVERNAGE	Dominique CHARPENTIER	Christian MICHOT
Qualité	Responsable d'affaires Qualifoudre	Responsable du pôle Certification (CERT)	Délégué Général Certification
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION : CONTEXTE ET METHODOLOGIE	5
2. LES PARATONNERRES A DISPOSITIFS D'AMORÇAGE – PDA (SUR 30 ANS) : HISTORIQUE ET PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	7
2.1 Tableau de synthese des données recueillies.....	8
2.2 Principes de base.....	13
2.2.1 Spécificité des PDA avec composants passifs uniquement.....	13
2.2.2 Spécificité des PDA avec composants actifs	13
3. RAPPEL SUR LES RECOMMANDATIONS DU RAPPORT DE 2001	15
4. AMELIORATIONS APORTEES SUR LA PERIODE 2001-2015	17
4.1 Evolution normative avec des essais plus stricts	17
4.2 L'importance de l'essai d'efficacité	19
5. ESSAIS EN LABORATOIRE POUR LES MESURES DES PERFORMANCES	21
6. ESSAIS IN SITU REALISES PAR CERTAINS FABRICANTS	23
6.1 Protocole en cours GIMELE-UTE depuis 2003	23
6.2 Tableau de synthèse des essais sur site.....	23
7. EVOLUTION DES REGLEMENTATIONS, GUIDES ET NORMES CONCERNANT LES PDA	25
8. BILAN DES AMELIORATIONS CONCERNANT LES PDA	27
9. CE QUI RESTE A METTRE EN EVIDENCE	29
10. CONCLUSION	31
11. REFERENCES ET PUBLICATIONS	33
12. GLOSSAIRE	35

1. INTRODUCTION : CONTEXTE ET METHODOLOGIE

L'INERIS, établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle du ministère chargé de l'Environnement a pour mission de contribuer à la prévention des risques que les activités économiques font peser sur la santé, la sécurité des personnes et des biens, et sur l'environnement. Il mène des programmes de recherche visant à mieux comprendre les phénomènes susceptibles de conduire aux situations de risques ou d'atteintes à l'environnement et à la santé, et à développer sa capacité d'expertise en matière de prévention. Ses compétences scientifiques et techniques sont mises à la disposition des pouvoirs publics, des entreprises et des collectivités locales afin de les aider à prendre les décisions les plus appropriées à une amélioration de la sécurité environnementale.

L'INERIS a été chargé par le Ministère de l'Environnement (MEEM) de réviser le rapport intitulé « Etude des Paratonnerres à Dispositif d'Amorçage » version de 2001 (référence DCE-2000-25265f) afin de tenir compte des évolutions normatives et technologiques concernant ces paratonnerres à dispositif d'amorçage (PDA). Le présent rapport abroge et remplace l'ancien rapport de 2001 (référence DCE-2000-25265f).

Ce rapport a totalement été réécrit, il intègre les évolutions normatives de la norme NF C 17102 (septembre 2011), il intègre aussi des informations transmises par des fabricants, par des instances de la normalisation et des publications scientifiques récentes. Il traite uniquement des performances des paratonnerres PDA sans chercher à les comparer avec d'autres technologies comme le paratonnerre à tige simple (PTS), la cage maillée, le fil tendu.

Un questionnaire a été transmis aux fabricants afin de disposer des dernières évolutions techniques et de tenir compte des efforts réalisés depuis 15 ans pour mieux caractériser ces dispositifs. La majorité des fabricants consultés y ont répondu en transmettant pour la plupart de la documentation technique, des rapports d'essais et des publications scientifiques.

L'INERIS n'a pas réalisé d'essais de performances sur ces matériels.

9 fabricants ont transmis des informations sur les 12 fabricants français et européens consultés.

Les fabricants de PDA figurant dans la liste ci-dessous ont transmis les éléments techniques à l'INERIS.

Fabricants	Pays du fabricant
ABB France	France
ADEE ELECTRONIC	France
DUVAL MESSIEN	France
ERICO (PENTAIR)	USA/France
France PARATONNERRE	France
FRANKLIN France	France
INDELEC	France
ORWELS / PIORTEH	Pologne/France
SAP	France

L'INERIS ne se prononce pas sur les produits des fabricants de PDA qui n'ont pas répondu à la consultation.

2. LES PARATONNERRES A DISPOSITIFS D'AMORÇAGE – PDA (SUR 30 ANS) : HISTORIQUE ET PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

Les paratonnerres à dispositif d'amorçage (PDA) ont fait leur apparition en 1984 en France puis en Espagne qui furent également les premiers pays à adopter des normes spécifiques (NF C 17 102 en France, UNE 12 186 en Espagne). Aujourd'hui, ce type de paratonnerres est proposé par des fabricants étrangers (européens, américains, chinois, australiens, argentins, turcs,....).

Ils sont encore appelés ESE (Early Streamer Emission). Ces dernières années ont vu l'apparition de différents dispositifs destinés à améliorer l'efficacité des paratonnerres à tige de type Franklin et en particulier à remplacer les dispositifs radioactifs interdits. La France a été fortement impliquée dans ces recherches, mais d'autres pays comme l'Espagne y ont aussi contribué. Les résultats des recherches sont aujourd'hui validés par des essais en laboratoire, voire sur site. Les produits industriels associés à ces recherches ont pour caractéristiques d'améliorer l'efficacité de capture d'une décharge ascendante par rapport à un paratonnerre à tige simple.

Toutes les discussions sur l'efficacité visent à voir comment on peut faire démarrer la décharge ascendante le plus tôt possible (au meilleur moment) avec la meilleure vitesse initiale. Le principe² est donc d'agir sur l'effet couronne et/ou de le « piloter ».

Autour de ce concept, deux principes physiques sont mis en œuvre :

- Par une haute tension impulsionnelle: on applique une haute tension impulsionnelle répétitive à l'extrémité du paratonnerre, l'idée sous-jacente est de maîtriser l'effet couronne initial et de bénéficier d'un effet de « mémoire » laissé par les décharges précédentes
- Par un étincelage au voisinage de la pointe : on provoque l'étincelage au voisinage de la pointe afin d'assurer la présence d'électrons initiaux en corrélation avec la montée du champ électrique. En pratique, un PDA de taille égale à une tige de Franklin conduit à une initiation plus rapide de la décharge ascendante, ce qui peut se traduire suivant certains auteurs par un rayon de protection plus grand ou pour un rayon de protection identique par un accroissement important de la fiabilité (probabilité de capture) par rapport à un paratonnerre à tige. Cependant, l'efficacité d'un tel dispositif doit être validée par des essais spécifiques.

En 2001, l'INERIS a recensé des technologies associées au PDA : technologies à déclenchement électronique, piézo-électrique, à profil spécial.

En 2016, il ne reste que les technologies PDA à déclenchement électrique/électronique et à profil spécial sachant que de nombreux fabricants ont associé le profil et le mode déclenchement. Les paratonnerres piézo-électriques ne sont plus commercialisés à ce jour en France.

En 2001 l'INERIS a recensé 100 000 PDA fabriqués depuis 1985 (source APF), aujourd'hui le GIMELEC³ en recense 440 000 uniquement pour les adhérents français, soit sur la période de 30 ans $\frac{1}{4}$ de la production sur la première moitié et $\frac{3}{4}$ sur la seconde moitié. Ceci montre une forte croissance de la mise sur le marché de ces produits.

² Pour plus de détails cf guide OMEGA 3 téléchargeable sur le site de l'INERIS www.qualifoudre.org

³ GIMELEC : Groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés

Comment fonctionne un PDA ?

- si un dispositif de protection foudre 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 à l'amorçage temporelle ΔT par rapport à un paratonnerre à tige simple (PTS).
- si un dispositif bénéficie d'une avance à l'amorçage ΔT , le traceur ascendant ou leader qu'il génère va parcourir une distance D , plus grande que pour un paratonnerre 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 de $\Delta L = v \Delta T$.

Sur le plan normatif, la norme NF C 17102 définit le Paratonnerre à Dispositif d'Amorçage comme un paratonnerre générant un amorçage de façon plus précoce qu'un paratonnerre à tige simple dans les mêmes conditions. Elle ne donne aucune indication sur la technologie.

Un PDA se compose d'une pointe captrice, d'un dispositif d'amorçage, d'un élément de fixation et d'une connexion aux conducteurs de descente.

La zone protégée par un PDA est déterminée en fonction de son efficacité, tel que défini au § 5.2.2. de la norme. Il convient que le PDA soit de préférence installé au niveau de la partie la plus élevée de la structure. Il doit constituer le point le plus élevé de la zone à protéger. La norme définit l'efficacité par la mesure du ΔT (voir l'Annexe C de la norme NF C 17102).

La valeur maximum admissible de ΔT est de 60 μs , même lorsque les résultats des tests de performances sont supérieurs à cette valeur. La valeur de ΔT correspond à la différence exprimée en μs entre les instants d'amorçage d'un PDA et d'un PTS, mesurée en laboratoire dans les conditions définies dans la norme NF C 17102.

La valeur minimum admissible de ΔT est de 10 μs pour que le paratonnerre soit considéré comme un PDA.

Le traitement statistique des essais doit démontrer un ratio inférieur à 0,8 entre les écarts- types d'un PDA et d'un PTS.

2.1 TABLEAU DE SYNTHÈSE DES DONNÉES RECUEILLIES

Le tableau ci-après présente les caractéristiques principales de ces dispositifs sur la base des informations communiquées par les fabricants. Certaines de ces données ayant un caractère confidentiel, les informations sont donc anonymes.

Ref	Nb. brevets	Principe physique des technologies	Composants	Qualité (Contrôle après fabrication et sur site)	Essais de qualification (1)
A	2	-Utilisation du champ électrique ambiant -Création d'un espace ionisé autour de la pointe grâce à une tension impulsionnelle, générée cycliquement à fréquence variable	-composants passifs uniquement -condensateurs non polarisés -autotransformateur -éclateur à gaz -corps et pointe en acier inoxydable	-aucun composant actif n'est utilisé, la fiabilité du paratonnerre est ainsi garantie sur le très long terme. -le corps en acier du PDA contenant l'électronique est rempli d'une résine ce qui élimine toute possibilité d'oxydation de l'électronique et des contacts des pièces intérieures. -test sous haute tension de l'électronique interne de chaque produit avant montage -test de bon fonctionnement avec la valise de test -système de test visuel permanent embarqué -système communicant équipé d'une électronique de surveillance	-essais dans plusieurs laboratoires indépendants -nombreux essais sur site extérieur naturel (in situ)
B	3	-source d'énergie puisée dans le champ ambiant par électrode inférieure, -neutralisation de la charge d'espace puis le PDA active un système électronique impulsionnel (seuil en fonction de la variation de dE/dt) d'ionisation synchronisée qui porte à un potentiel élevé les électrodes supérieures, -indépendant de l'endroit où le PDA est installé (hauteur) lié au dE/dt	-composants passifs et actifs -pointe centrale continue assurant le passage direct du courant de foudre vers le réseau de descentes de terre -forme des électrodes à géométrie variable (pointues ou arrondies) -éclateur mécanique -adaptation des circuits selon la polarité du nuage d'orage	-test en usine sur chaque PDA (des composants passifs et actifs) -contrôle sur site avec un boîtier de test connecté via un câble ou bien testable à distance (selon les modèles)	-essais dans plusieurs laboratoires internes et externes -nombreux essais sur site naturel et sur installation expérimentale en grandeur réelle (in situ)
C	1	-stockage de l'énergie (issue du champ ambiant) dans une capacité. -lorsque le champ est important (à l'approche du traceur descendant) les charges stockées	-composants passifs uniquement -bobine d'inductance, condensateur, éclateur interne, résistance	-la forme seule de la tige (avec aigrettes) apporte déjà un gain du ΔT -vérification avec appareil portable des paramètres R, L, C à 100 % des	-laboratoire indépendant

		sont libérées par un éclateur et le processus reprend de plus en plus vite en fonction de l'arrivée du leader descendant.	-tige avec éclateur externe	produits en sortie de chaîne de production, -vérification sur site avec le même appareil portable (type impédance-mètre de petite taille) directement ou avec une perche	
D	1	-stockage de l'énergie (issue du champ ambiant) dans une capacité. -lorsque le champ est important (à l'approche du traceur descendant) les charges stockées sont libérées par un éclateur et le processus reprend de plus en plus vite en fonction de l'arrivée du leader descendant.	-composants passifs uniquement, -bobine d'inductance, condensateur, éclateur interne, résistance -tige avec éclateur externe	-la forme seule de la tige (avec aigrettes) apporte déjà un gain du ΔT -vérification avec appareil portable des paramètres R, L, C à 100 % des produits en sortie de chaîne de production, -vérification sur site avec le même appareil portable (type impédance-mètre de petite taille) directement ou avec une perche	-laboratoire indépendant - essais in situ
E	3	-énergie fournie par le champ électrique ambiant du nuage et du traceur descendant, -passage du courant lorsque l'éclateur se met en court-circuit, -le courant électrique qui traverse la bobine augmente au fur et à mesure du rapprochement réciproque des traceurs ascendant et descendant	-composants passifs uniquement, -bobine d'inductance, -éclateur intérieur -résistance	-contrôle à 100 % des produits fabriqués avec un générateur d'impulsions, -vérification des caractéristiques à l'installation sur site avec un testeur portatif (perche) ou test déporté par liaison filaire (boîtier de test).	-dans plusieurs laboratoires indépendants externes -essais in situ
F	2	-énergie fournie par l'augmentation du champ électrique terrestre, -accumulation de charges électriques sur la pointe (partie sphérique avec combinaison de formes géométriques optimisées arrondies) et décharge ascendante déclenchée à l'approche du traceur descendant	-composants passifs uniquement, -bobine d'inductance, condensateur, éclateur interne, résistance - corps et pointe en acier inoxydable - pointe centrale continue assurant le passage direct du courant de foudre vers le réseau de descentes de terre - pointe arrondie favorisant la	- dispositif autonome, assurant une fiabilité dans le temps -contrôle systématique en fabrication selon des protocoles définis, -test sur site avec un banc de test incluant un générateur HT -contrôle avec un boîtier de test utilisant un système filaire -dispositif de test dans un boîtier déporté (pouvant dialoguer avec un smartphone)	-dans plusieurs laboratoires indépendants externes -nombreux essais sur site naturel (in situ)

			répétitivité de la réponse		
G	1	<p>-stockage de l'énergie électrostatique présente dans l'atmosphère, accumulation de charges électriques sur la pointe et déclenchement de la décharge ascendante</p> <p>-pilotage avec un premier capteur intégré mesurant la valeur du champ électrique E ambiant puis inversion de polarité,</p> <p>- stockage de l'énergie solaire dans des condensateurs de puissance pour soutenir la propagation du traceur,</p> <p>-pilotage du déclenchement de la décharge des condensateurs de puissance avec un 2ème capteur intégré mesurant l'intensité du courant (selon un courant I de seuil) se formant sur la pointe.</p>	<p>-composants passifs et actifs</p> <p>-La pointe de capture (tête du paratonnerre) est électriquement isolée par rapport à la terre</p>	<p>-contrôle permanent en cours de fabrication et en fin de fabrication</p> <p>-vérification sur site avec différents testeurs (connectable aux bornes du PDA, ou à distance, ou intégré au software en temps réel)</p>	<p>dans plusieurs laboratoires indépendants</p> <p>Nombreux essais sur site in situ</p>
H	2	<p>-stockage de l'énergie électrostatique présente dans l'atmosphère</p> <p>-capteur électrostatique du champ E avec détermination du signe de polarisation de la pointe</p> <p>-module de traitement des signaux avec application d'une charge sur la pointe (polarisation et augmentation du champ local)</p> <p>-différentes technologies : selon les modèles, ajouts de fonctions : détection magnétique, E-compteur, complément d'énergie d'ionisation de la pointe avec condensateur de puissance chargé par des cellules solaires</p>	<p>-technologie de base : Composants passifs</p> <p>-technologie évoluée : composants passifs et actifs</p>	<p>-contrôle permanent en cours de fabrication et en fin de fabrication</p> <p>Sur site après installation :</p> <p>-testeur à distance</p> <p>-testeur connectable aux bornes du PDA,</p> <p>-testeur intégré au software (module de traitement des signaux) alimentés par des accumulateurs rechargés par des cellules solaires</p>	<p>essais en laboratoires externes</p>
I	1	<p>-commander un courant d'effluve au niveau de la pointe</p>	<p>-composants passifs uniquement</p> <p>-inductance</p>	<p>vérification des valeurs des composants internes par mesure</p>	<p>essais en laboratoire externe</p>

	<p>-pas de pilotage d'étincelle au niveau de la pointe</p> <p>-le procédé consiste à minimiser le courant d'effluve au niveau de pointe tant qu'un impact foudre n'est pas imminent et de laisser ce courant s'établir juste avant l'impact. Le moment où le courant d'effluve est laissé libre de s'établir est déterminé par la croissance exponentielle du champ électrostatique ambiant.</p> <p>-les pointes peuvent être complétées par des collerettes</p>	<p>-condensateur, éclateur secondaire en parallèle afin de protéger la capacité contre les tensions trop élevées</p> <p>-éclateur principal constitué de la pointe et du tube séparé par une bague isolante</p>	directe	
--	--	---	---------	--

(1) les essais en laboratoire et in situ (sur site extérieur grandeur réelle) sont détaillés dans les paragraphes 5 et 6.

Tableau de synthèse avec les éléments principaux

Synthèse		Nb. fabriqués	Nb. brevets	Principe physique	Composants	Qualité	Essais de qualification (1)
Eléments communs		440 000 au total pour les fabricants français (données issues du GIMELEC)	Environ 15 brevets	Les principes physiques très différents sur la période 1985-2000 tendent à s'harmoniser sur la période 2000-2015	Composants passifs, parfois associés à des composants électroniques actifs soit pour le contrôle, soit pour pilotage des impulsions	Tous ont été évalués à 100 % après la fabrication ou sont contrôlables sur site (test de bon fonctionnement)	Tous ont été testés dans des laboratoires internes (faits par le fabricant avec une supervision externe) ou externes indépendants conformément à la norme NF 17-102 version 2011

(1) les essais en laboratoire et in situ (sur site extérieur grandeur réelle) sont détaillés dans les paragraphes 5 et 6.

2.2 PRINCIPES DE BASE

2 grandes familles de PDA se dégagent du tableau de synthèse :

- les **paratonnerres** à profil spécial incluant des composants **passifs** (L, R, C : bobine, résistance condensateur),
- les **paratonnerres avec pilotage du déclenchement électronique** incluant un ou des circuits électroniques **actifs** pour la gestion du déclenchement du traceur ascendant à un moment précis.

La plupart des systèmes PDA des fabricants fonctionnent aussi bien que le champ électrique ambiant soit négatif ou positif, ce qui est compatible avec un coup de foudre descendant négatif ou positif.

Le coup de foudre ascendant (positif ou négatif) ne nécessite aucun système d'avance à l'amorçage, il démarrera du point le plus élevé raccordé à la terre et le paratonnerre à dispositif d'amorçage s'il est installé au point le plus haut comme la norme NFC 17 102 le demande sera le lieu privilégié de démarrage de ce type de coup de foudre.

2.2.1 SPECIFICITE DES PDA AVEC COMPOSANTS PASSIFS UNIQUEMENT

Ce type de PDA fonctionne avec des composants passifs sans batterie et sans système de déclenchement électronique piloté.

Le circuit électrique constitué de composants passifs (tels que des bobines à inductance, des condensateurs, des éclateurs agencés différemment selon les technologies brevetées des fabricants) incorporés dans la tête du PDA se comporte comme un générateur qui va utiliser l'énergie du champ électrique ambiant naturel existant pour déclencher un précurseur.

Le champ électrique ambiant charge un condensateur, qui va à un certain moment se décharger périodiquement dans le circuit, et créer une tension impulsionnelle et un courant qui va ioniser la ou les pointes de la tête du PDA suivant les formes. La forme de l'arrondi des pointes (arrondies, pointues, écrantées selon les fabricants) a un impact important sur le démarrage du traceur ascendant.

Le traceur ascendant issu du PDA (qui est plus énergétique que les autres traceurs ascendants issus des aspérités du sol) est ainsi favorisé par cette ionisation, et va se connecter au traceur descendant pour former un canal ionisé.

2.2.2 SPECIFICITE DES PDA AVEC COMPOSANTS ACTIFS

Ce type de PDA fonctionne avec des composants actifs permettant l'utilisation d'un système électronique de déclenchement piloté.

L'apport d'énergie au meilleur moment est rendu possible grâce à des systèmes électroniques de déclenchement variant selon les fabricants :

-soit le système de déclenchement est réalisé par un circuit électronique, qui s'activera à un seuil de variation de champ électrique dE/dt pour ioniser les pointes au meilleur moment et un autre circuit électronique qui réalisera une neutralisation des charges d'espace,

-soit le système de déclenchement est réalisé par un circuit électronique (premier capteur) mesurant la valeur du champ électrique E ambiant qui déclenche le dispositif d'impulsion avec une inversion de polarité et un autre circuit électronique (2^{ème} capteur mesurant l'intensité du courant) qui pilote le déclenchement de la décharge (selon $I > I_{seuil}$) des condensateurs de puissance (chargés par l'énergie solaire via une batterie) se formant sur la pointe (ionisation).

3. RAPPEL SUR LES RECOMMANDATIONS DU RAPPORT DE 2001

Nous reprenons les principaux constats et résultats de l'étude précédente et analysons par la suite les améliorations apportées à ces produits dans le but de mieux les caractériser et de fournir les données attestant de leur efficacité.

Ces constats repris du rapport de 2001 sont écrits en italique. Les extraits ci-dessous en italique du rapport de 2001 ne sont plus d'actualité, puisque le présent rapport de 2016 abroge et remplace celui de 2001 dans son intégralité (le bilan figure dans le paragraphe 8 du présent rapport 2016).

Sous l'appellation PDA, il y a des produits très différents. La norme NF C 17-102 (version 1995) 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.

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.

Suite à l'étude réalisée en 2001 par l'INERIS, il s'avère que :

- 1. certains PDA ne sont pas testables en laboratoire bien qu'ils annoncent une conformité à la norme NF C 17-102,*
- 2. certains modèles n'ont jamais été testés pour vérifier qu'ils étaient en mesure d'écouler un courant de foudre,*
- 3. 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,*
- 4. 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,*
- 5. 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 termes de volume de protection et non une inadéquation du point de vue physique.*

On peut remarquer que pour un PDA présentant une avance à l'amorçage nulle (soit une PTS), les rayons calculés avec la norme NF C 17-102 (1995) 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 17-100⁴.

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 termes de protection par une étude afin de vérifier que le paramètre mesuré lors des essais est représentatif de l'efficacité d'une installation de protection.*

L'INERIS a mis en évidence des points particuliers de la norme NF C 17-102 qui méritent d'être revus. Les propositions proposées à l'UTE par le GIMELEC en avril 2001 concernent les points suivants :

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

⁴ Norme qui a été remplacée par la norme IEC 62305-3

4. AMELIORATIONS APPORTEES SUR LA PERIODE 2001-2015

L'analyse des améliorations et des évolutions est traitée afin de répondre aux questions ci-dessous :

1. Qu'est ce qui a changé sur les aspects techniques qui sont mentionnés dans le précédent rapport ?
2. Quels travaux les professionnels de la foudre ont engagés pour crédibiliser ces dispositifs ?
3. En quoi la réglementation a évolué et a pris en compte ces dispositifs ?

4.1 EVOLUTION NORMATIVE AVEC DES ESSAIS PLUS STRICTS

Les fabricants de PDA doivent mettre en conformité les PDA suivant une norme NF C 17102 applicable depuis 2011 plus stricte que celle de 1995.

Les produits ont donc évolué pour répondre aux exigences de la norme de 2011, ce qui a permis d'apporter de la crédibilité dans le fonctionnement et la longévité du produit.

Certaines publications techniques (par exemple [11]) font le point sur les évolutions de la norme NF C 17102.

En résumé, l'évolution de la norme NF C17102 (2011) concerne les points suivants :

- la variation des paramètres des essais d'efficacité a été réduite dans la norme NF C 17102 (2011). D'autres critères ont été introduits (écart-type, valeurs min-max du ΔT), de plus une pointe de référence a été introduite,
- l'harmonisation avec le contenu des normes NF EN 62305-2 (ARF) et NF EN 62305-3,
- l'harmonisation avec le contenu de la série de norme NF EN 50164-x,
- la prise en compte des risques liés à la CEM,
- l'ajout d'une exigence sur la vérification du PDA.

Plusieurs précisions ont été apportées concernant l'efficacité du PDA (ΔT). La première réside dans la valeur de l'avance à l'amorçage qui doit être comprise entre 10 μs et 60 μs . Si le résultat de ΔT est inférieur à 10 μs , alors le paratonnerre n'est pas considéré comme un PDA.

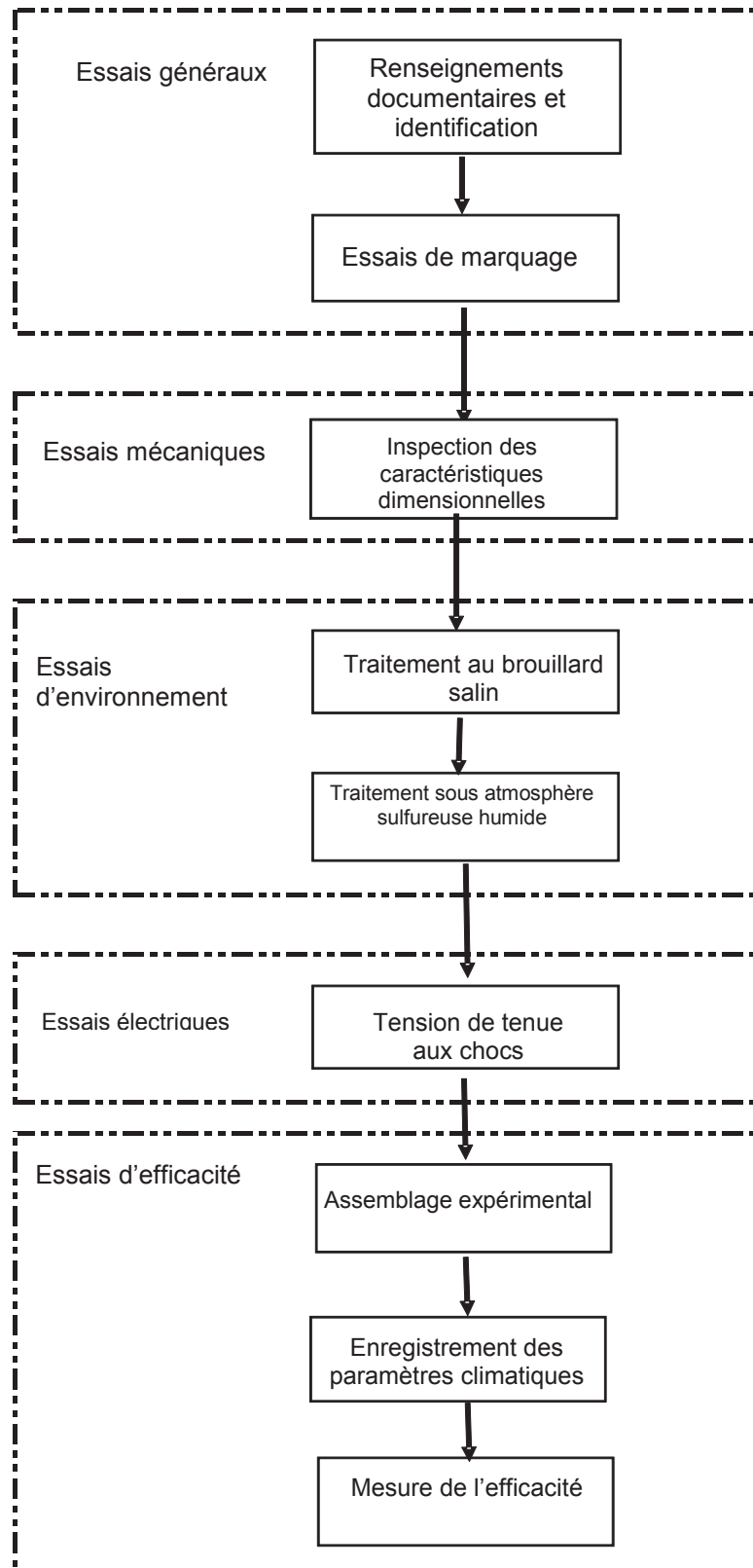
Le critère retenu pour l'évaluation de l'efficacité d'un PDA est la capacité à amorcer un traceur ascendant avant un PTS placé dans les mêmes conditions et ceci de façon répétitive. On mesure pour chaque choc exploitable sur le PTS, puis sur le PDA, la valeur T^5 de l'instant d'amorçage du traceur ascendant.

Les efforts des fabricants de PDA ont porté également sur l'ajout d'essais de performance calqués sur la série de normes NF EN 50164-x (tenue en courant, corrosion,...) et sur l'évolution notable de la norme NF C 17-102 (version 2011) qui détaille la procédure d'essais et introduit des exigences (annexe C) en spécifiant par exemple des essais à un choc de foudre de 100 kA.

Le synoptique ci-après liste les différents essais à réaliser.

Ces essais sont conformes aux exigences de la norme européenne NF EN 62305-3 en application des normes de la série NF EN 50164-x (et depuis peu de temps la série NF EN 62561-x), également citées dans la norme NF C17102 (septembre 2011).

⁵ A partir des mesures des instants d'amorçage des traceurs ascendants issus d'un PTS et d'un PDA, on calcule les instants moyens d'amorçage T_{moyPTS} et T_{moyPDA} à partir des chocs exploitables, en respectant les paramètres. De même les écarts-types des deux distributions sont calculés (σ_{PTS} et σ_{PDA})



En complément, une attention toute particulière a été portée sur les risques liés à la CEM. Cette nouvelle version impose que les PDA incorporant des circuits électroniques doivent être conformes à la norme d'émission NF EN 61000-6-3 et NF EN 61000-6-2 concernant les exigences d'immunité pour les environnements industriels.

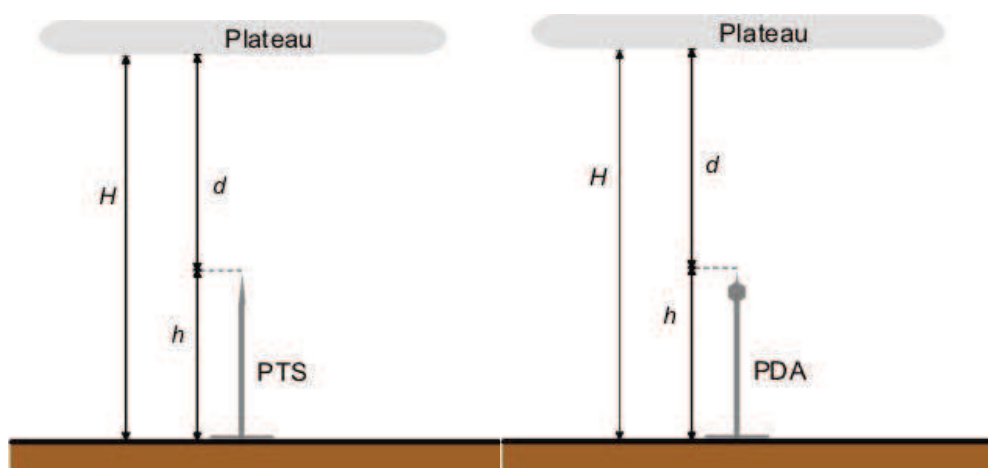
Pour les PDA qui répondent à ces conditions, mais qui comportent des modules radio, l'ensemble des exigences décrites dans la directive RDE 2014/53/UE, doivent être satisfaites.

La vérification périodique du PDA est dépendante de sa technologie, Il convient de se rapporter aux données fournies par le fabricant. Un chapitre a été ajouté à l'annexe C (C5) de la norme, concernant la vérification des PDA. En effet, afin de vérifier le bon fonctionnement des PDA, le fabricant doit décrire dans une notice de vérification et de maintenance, les dispositifs à prévoir pour l'entretien et la maintenance du produit.

4.2 L'IMPORTANCE DE L'ESSAI D'EFFICACITE

L'efficacité d'un PDA est évaluée en comparant, en laboratoire haute tension, l'instant d'amorçage du traceur ascendant qu'il émet avec celui qu'émet un PTS.

Pour cela, le PTS et le PDA sont évalués l'un après l'autre dans les mêmes conditions électriques, géométriques et climatiques lors des essais en laboratoire simulant les conditions « naturelles » de démarrage de la décharge de capture (traceur positif ascendant).



(cf. Annexe C de la NFC 17-102 : 2011)

Une publication technique récente [3] met en avant par l'intermédiaire d'une qualification expérimentale en laboratoire l'efficacité d'un PDA par rapport à un PTS. Cet article décrit une nouvelle technique expérimentale pour montrer l'efficacité d'un PDA comparé à un PTS. Sur la base théorique d'un modèle de PDA (modélisé en circuit équivalent) il est montré que l'intensité du champ électrique dynamique d'un PDA actif est plus élevée (théoriquement même 2 fois plus) que l'intensité d'un champ statique d'une pointe de Franklin conventionnelle. Ensuite, un essai expérimental démontre l'efficacité d'un PDA comparé à une pointe Franklin conventionnelle dans le laboratoire SIAME de l'université de Pau en France. Cette méthode consiste à mettre en place à la fois un PDA et un PTS (le PTS correspond à un PDA dont la tête est rendue inactive en court-circuit) ensemble dans la même configuration. Pendant les essais, toutes les décharges ont été enregistrées sur le PDA avec la tête active.

En complément de la norme NF C 17102, certains fabricants de PDA ont fait réaliser des essais d'efficacité en laboratoire ayant une grande hauteur plateau-sol (de 7 à 10 m) et en plein air (notamment au laboratoire WHVRI).

5. ESSAIS EN LABORATOIRE POUR LES MESURES DES PERFORMANCES

Fabricant PDA	Laboratoire externe ou interne	Type d'essais	Tierce-partie indépendante
A	SIAME (Pau)	Mesure de l'efficacité	attestation globale APAVE
	Université Ilmenau (Allemagne)	Courant (100 kA)	attestation APAVE
B	Interne	Mesure de l'efficacité	supervision BV et UL
	CITEL (Reims)	Courant (100 kA)	supervision BV et UL
	LCIE (Fontenay aux Roses)	Environnementaux (corrosions,..)	supervision BV et UL
	Interne	Généraux, mécaniques	supervision BV et UL
	SOCOTEC	CEM	supervision SOCOTEC
	UNICAMP (Brésil)	Courant (230kA)	
C	EDP Labelec (Portugal)	Mesure de l'efficacité	supervision ISQ
	ELEMKO (Grèce)	Courant (100 kA) - Environnementaux (corrosions,..)	
D	EDP Labelec (Portugal)	Mesure de l'efficacité	supervision ISQ
	ELEMKO (Grèce)	Courant (100 kA) - Environnementaux (corrosions,..)	
E	SIAME (Pau)	Mesure de l'efficacité	
	Instytut Fizyki Plazmy I Laserowej Mikrosyntezy (Varsovie -Pologne)	Courant (100 kA)	
	Building Research Institute (Pologne)	Environnementaux (corrosions,..)	
F	Laboratoire CNRS AMPERE LAB de LYON	Mesure de l'efficacité	Supervision BV
	Laboratoire LCIE	Environnementaux (corrosions,..)	Supervision BV
	Laboratoire GERAC de Limoges	Courant (100 kA)	Supervision BV
	Laboratoire Shanghai Grand Top Lightning Technology	Courant (100 kA) Courant (200 kA)	

	Laboratoire Shanghai Lightning Protection Center	Mesure de l'efficacité	
	Interne	Généraux, mécaniques	Supervision BV
G	LABORATOIRE HT DE BAZET	Mesure de l'efficacité (Essais haute tension)	Conformité globale attestée par BV
	CITEL 2CP	Courant (100 kA)	Conformité globale attestée par BV
	LABEP	Environnementaux (corrosions,..)	Conformité globale attestée par BV
H	LABORATOIRE HT DE BAZET Laboratoire d'essais Haute Tension de PEKIN WHVRI (Chine)	Mesure de l'efficacité (Essais haute tension) Essais haute tension, grande hauteur	Conformité globale attestée par BV
	CITEL 2CP	Courant (100 kA)	
	LABEP	Environnementaux (corrosions,..)	
I	SIAME (Pau)	Mesure de l'efficacité	

Tableau de synthèse de laboratoires d'essais internes et externes

6. ESSAIS IN SITU REALISES PAR CERTAINS FABRICANTS

6.1 PROTOCOLE EN COURS GIMELE-UTE DEPUIS 2003

Deux types d'essais in-situ sont définis ci-dessous :

- les essais en foudre naturelle pour lesquels on attend que la foudre frappe l'objet en essais (essais sur une longue durée),
- les essais en foudre déclenchée pour lesquels la foudre est déclenchée par des fusées (essais sur une ou deux saisons orageuses).

Un protocole a été mis au point entre le GIMELEC et l'UTE [1] fin 2003 dans l'objectif d'avoir sur une dizaine de sites une expérience préliminaire d'au moins 3 ans. La méthodologie d'essais était facilement installable sur un site existant et sert actuellement de base au projet de norme « pure performance standard » prEN 50622. L'objectif était d'installer des PDA sur des sites potentiellement exposés afin de conforter le modèle de protection inclus dans la NFC 17-102 dans des conditions normales d'utilisation avec notamment présence d'éléments entrant en compétition avec le PDA (antennes, cheminée ...).

6.2 TABLEAU DE SYNTHESE DES ESSAIS SUR SITE

Fabricant PDA	Lieu	Type d'essais
A	Pic du Midi	In Situ (protocole GIMELEC)
B	Saint-Privat-d'Allier, Douai, Japon, USA, Brésil, Indonésie	In Situ (protocole GIMELEC)
C	New Mexico	In Situ (pour définir la meilleure forme de pointe)
D	Université de Johannesburg (Afrique du sud) New Mexico	In Situ (protocole GIMELEC) In Situ (pour définir la meilleure forme de pointe)
E	Pologne	In situ (protocole avec IEN Varsovie)
F	3 sites in situ : -Super Besse -Eglise à 2 clochers à Satu Maru (Roumanie) -Aéroport d'Arequipa (Pérou)	In Situ (protocole GIMELEC)
G	Université de Manille aux Philippines	In Situ (protocole GIMELEC)
H	Université de Manille aux Philippines	In Situ (protocole GIMELEC)
I	Non communiqué	

Certains fabricants ont rédigé des publications techniques pour définir plus en détail les essais réalisés in situ ([12]-[15]-[16]-[17]).

7. EVOLUTION DES REGLEMENTATIONS, GUIDES ET NORMES CONCERNANT LES PDA

L'arrêté du 4/10/2010 modifié [5] précise l'application des normes en vigueur française et européenne.

L'article 19 de cet arrêté précise que les systèmes de protection contre la foudre prévus dans l'étude technique sont conformes aux normes françaises ou à toute norme équivalente en vigueur dans un Etat membre de l'Union européenne.

De plus, la circulaire du 24 avril 2008 [6] rattachée à cet arrêté mentionne la norme NF C 17102.

Une note complémentaire [7] du ministère du 22 février 2016 précise les différentes possibilités d'installation des PDA (ICPE, ERP, IGH). A ce jour, aucun texte n'écarte la possibilité de protection par PDA.

Texte réglementaire	Installation concernée	commentaires
Arrêté du 4/10/2010 modifié par l'arrêté du 19/07/2011 Circulaire de 2008 associée à l'arrêté de 2010	Installations classées ICPE soumises à autorisation	Pour certaines rubriques citées dans l'arrêté
Note de synthèse sur les PDA du 22 février 2016 (note commune au ministère de l'environnement MEEM et au ministère de l'Intérieur)	Installations classées ICPE , ERP, IGH	

Normes et guides	Titre	Pays d'émission du document
NF C17102 (2011)	Systèmes de protection contre la foudre à dispositif d'amorçage	FRANCE
Guide GESIP n°2013/01 (2013)	Protection des installations industrielles contre la foudre	FRANCE
Guide INERIS Omega 3 (2011)	Protection contre la foudre des installations classées pour la protection de l'environnement	FRANCE
UNE 21186		ESPAGNE
NP 4426		PORTUGAL
I-20		ROUMANIE
MKS N.B4 810		MACEDOINE
STN 34 1391		SLOVAQUIE
JUS N.B4.810		RF YOUGOSLAVIE
IRAM 2426		ARGENTINE
NA 332014		ANGOLA
TS 13709		TURQUIE
UL	Certification UL (Underwriters Laboratories) de conformité de produits et d'installations à la norme NF C 17102	USA

8. BILAN DES AMELIORATIONS CONCERNANT LES PDA

Rappel des Recommandations INERIS 2001	Constat sur la prise en compte en 2016	Commentaires
Certains PDA ne sont pas testables en laboratoire bien qu'ils annoncent une conformité à la norme NF C 17-102	Tous les fabricants proposent des PDA conformes aux essais de la norme NF C 17102 (2011)	Les paratonnerres piezo-électriques ne sont plus commercialisés en France à ce jour
Certains modèles n'ont jamais été testés pour vérifier qu'ils étaient en mesure d'écouler un courant de foudre	Les essais en courant (100 kA) sont maintenant obligatoires dans la norme NF C 17102 (2011)	
<p>-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</p> <p>-La capacité des PDA à recevoir la foudre est constatée mais leur supériorité en termes de rayon de protection par rapport à un paratonnerre à tige simple n'est pas démontrée</p>	Des essais In Situ sont en cours (selon protocole GIMELEC)	Le retour d'expérience des essais in situ en cours devrait inclure la validation du modèle théorique du rayon de protection par des résultats expérimentaux
<p>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 termes de volume de protection et non une inadéquation du point de vue physique</p> <p>-On peut remarquer que pour un PDA présentant une avance à l'amorçage nulle (soit une PTS), les rayons calculés avec la norme NF C 17-102 (1995) 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</p>	La circulaire de 2008 et une note Qualifoudre du 13/12/2011 imposent l'application d'un facteur de réduction de 40 % sur la valeur obtenue du calcul du Rp avec la norme NF C 17102 (application pour les installations classées soumises à autorisation selon l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié)	De prochaines publications basées sur des mesures in situ avec des vidéos ultrarapides en 2D ou 3D permettront probablement de donner des valeurs plus précises de la vitesse des traceurs ascendants
<p>Retirer de la norme tout ce qui concerne l'installation et qui est déjà dans la norme NF C 17-100,</p> <ul style="list-style-type: none"> - améliorer les règles d'installation des PDA, - homogénéiser les niveaux de protection (4 pour NF C 17-100 et 3 pour NF C 17-102), - ajouter des essais électriques pour connaître la tenue du produit en cas de choc de foudre, - essais de corrosion : sur la base de l'EN 50164-1, - évolution du modèle de protection pour déterminer la révision des essais d'efficacité du PDA. 	<p>La norme NF C17102 (2011) a été mise à jour afin de tenir compte de l'ensemble de ces constats</p> <p>Les essais sont plus stricts (essais en courant à 100 kA, essais de corrosion,...)</p>	En complément de ces essais en laboratoires (reconnus) plus contraignants, de nombreux fabricants réalisent des essais in situ (selon protocole GIMELEC) avec des niveaux de courant pouvant dépasser les 100 kA en conditions climatiques réelles
<p>Afin de montrer l'efficacité des PDA, nous suggérons deux axes de recherche :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 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 par une étude afin de vérifier que le paramètre mesuré lors des essais est représentatif de l'efficacité d'une installation de protection. 	<p>Des publications scientifiques récentes montrent l'efficacité (ΔT) des PDA (en laboratoire)</p> <p>Le rapport préliminaire du GIMELEC montre un REX satisfaisant</p>	

9. CE QUI RESTE A METTRE EN EVIDENCE

La norme NF C 17102 de 2011 a évolué en ce qui concerne le mode de calcul du rayon de protection R_p avec :

- L'ajout dans la formule du niveau de protection IV,
- La valeur du ΔL dans la formule sans utiliser la vitesse v du traceur ascendant mesurée.

Le rayon de protection R_p de la norme NF C 17-102 (version 2011) est déterminé selon la formule :

$$R_p(h) = \sqrt{2rh - h^2 + \Delta(2r + \Delta)} \quad \text{pour } h \geq 5 \text{ m}$$

et

$$R_p = h \times R_p(5) / 5 \quad \text{pour } 2 \text{ m} \leq h \leq 5 \text{ m}$$

Avec

$R_p(h)$ (m)	correspond au rayon de protection à une hauteur h donnée ;
h (m)	correspond à la hauteur de l'extrémité du PDA sur le plan horizontal jusqu'au point le plus éloigné de l'objet à protéger ;
r (m)	20 m pour le niveau de protection I ; 30 m pour le niveau de protection II ; 45 m pour le niveau de protection III ; 60 m pour le niveau de protection IV ;
Δ (m)	$\Delta = \Delta T \times 10^6$ L'expérience sur le terrain montre que Δ est égal à l'efficacité obtenue pendant les essais d'évaluation du PDA.

La valeur de 10^6 utilisée dans la formule n'est plus reliée à une vitesse du traceur ascendant mais est basée sur l'expérimentation acquise sur le terrain (avec camera rapide).

Dans la version de la norme NC 17102 de 2011, la formule de calcul des rayons de protection R_p reste la même, néanmoins le paramètre D (de 1995) devient le paramètre r et le niveau de protection IV est ajouté afin d'être en cohérence avec les 4 niveaux de la norme NF EN 62305-3.

La formule du calcul du rayon de protection R_p est basée sur le modèle de la sphère fictive ⁶ (appelé aussi modèle électro-géométrique) en y ajoutant la valeur d'avance à l'amorçage ΔL .

Afin de vérifier la cohérence de la formule, faisons une comparaison par le calcul du rayon de protection d'un Paratonnerre à tige simple PTS (avec la méthode de la sphère fictive) et d'un PDA (avec $\Delta L=0$).

Calculons par exemple le rayon de protection pour un niveau de protection I d'un bâtiment simple (parallélépipède) ayant un dispositif de capture de la foudre à une hauteur de 5 m sur le toit du bâtiment.

Pour le PTS, le rayon de protection est déterminé à partir de la méthode de la sphère fictive défini dans la norme NF EN 62305-3. On obtient dans ce cas, un rayon de protection R_p de 14 m.

Si le dispositif est un PDA pour lequel on considère de manière arbitraire que l'avance à l'amorçage est nulle (soit $\Delta T=0$), le rayon de capture R_p avec la formule ci-dessus est de 14 m.

⁶ Le modèle de la sphère fictive est décrit dans la norme NF EN 62305-3 et dans le guide OMEGA 3

Un PDA avec $\Delta T=0$ se comporte donc comme un PTS avec un rayon de protection équivalent (en se basant sur le modèle de la sphère fictive) ; la formule est donc cohérente.

En complément, l'INERIS avait recommandé dans son rapport précédent de 2001 d'appliquer un coefficient réducteur de 40% sur le rayon de capture afin d'avoir une marge de sécurité liée aux incertitudes sur les modèles.

Ainsi depuis 2011, le coefficient réducteur de 40% doit être appliqué de manière systématique aux installations classées en application de l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié et en application de la note Qualifoudre du 13 décembre 2011.

Ce coefficient de réduction est également mentionné dans le guide GESIP n°2013-01 ; il est également appliqué pour le cas du niveau de protection I++ mentionné dans la norme NF C 17102 (2011).

Pour tenir compte des progrès scientifiques actuels, le modèle théorique d'attachement de la foudre est en révision au plan international. On peut noter en particulier les articles scientifiques cités ci-dessous.

Un article scientifique [9] fait le point au sujet de l'influence des charges d'espace de l'effet corona sur l'interception d'un coup de foudre descendant sur des tiges simples de grandes hauteurs. Il a été mis en évidence à l'aide d'un modèle de simulation nommé SLIM (Self consistant Leader Inception and propagation Model) que la réduction de la distance d'interception verticale (I_D) de captage du coup de foudre dû aux charges d'espace de l'effet corona est de l'ordre de 20 %, et que la réduction de la distance d'interception latérale (I_D) est de l'ordre de 10 %. Il a été mis en évidence également dans la conclusion de cet article que le modèle théorique d'attachement doit évoluer afin de tenir compte de la propagation des traceurs ascendants sous l'influence des traceurs descendants.

Différents modèles d'attachement de la foudre ont été décrits ces dernières années [8] (effet des charges d'espace et des formes des pointes), [13] et [14] (modèle de connexion entre traceurs ascendant positif et descendant négatif).

De plus une publication récente [10] (concernant le process d'attachement) montre que les modèles existants de protection contre la foudre (Electro Geometric Mode: EGM, Rolling Sphere Model: RSM, Leader Progression Model: LPM) doivent évoluer vers un nouveau modèle, dans lequel les traceurs ascendants UCL (Upward Connecting Leader) seraient remplacés par des FLF (Fainty Luminous Formation), qui permettrait de décrire plus précisément la mise en place des traceurs ascendants issus des PDA.

Une fois un nouveau modèle validé au niveau international pour la norme NF EN 62305-3, il sera nécessaire de l'appliquer pour les PDA.

10. CONCLUSION

Depuis 2001, la fabrication des PDA a évolué afin de tenir compte des améliorations des composants électroniques constituant les PDA et surtout afin de répondre aux nouvelles exigences normatives et des essais de performances plus complets de la norme NF C 17102 (de septembre 2011).

Plusieurs points positifs ressortent de cette étude par les actions mises en place par les fabricants notamment avec la mise en place des essais sur site (qui vont au-delà des exigences normatives) et par l'harmonisation des principes de fonctionnement.

Les exigences de la norme NF C 17102 (2011) permettent :

- de mettre en évidence l'avance à l'amorçage des PDA (mesure de l'efficacité ΔT) par des essais dans les laboratoires,
- de garantir le fonctionnement des produits sur le long terme grâce à des essais en courant (100 kA) et des essais en environnement (corrosion,...), qui se rapprochent des conditions réelles.

Les fabricants de PDA ayant participé à cette étude proposent tous des PDA conformes aux exigences de la norme en vigueur NF C 17102 (de septembre 2011), qui a été harmonisée avec les normes européennes.

11. REFERENCES ET PUBLICATIONS

ref	Titres des références et des publications	Nombre de pages
1	Rapport préliminaire GIMELEC de la technologie française « PDA » (Paratonnerres à dispositif d'amorçage)- version septembre 2015 Par GIMELEC : Groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés	53
2	Article des techniques de l'ingénieur « Foudre et protection des bâtiments » Ref C3307 – mai 2000 Par Alain Rousseau ; Claude Gary ; Gérard Berger	21
3	Experimental Demonstration of the Effectiveness of an Early Streamer Emission Air Terminal Versus a Franklin Rod – avril 2015 By L. Pecastaing, T. Reess, A. De Ferron, S. Souakri ; E. Smycz ; A. Skopec and C. Stec	10
4	New high-speed video observations of natural lightning at the Lightning Observatory in Gainesville, Florida – octobre 2015 By V. A. Rakov, M. D. Tran, Y. Zhu, and S. Mallick	6
5	Arrêté du 4 octobre 2010 modifié relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation (section III)	17
6	Circulaire du 24 avril 2008 relatif à la protection contre la foudre de certaines installations classées	4
7	Note du 22/02/2016 concernant la réglementation applicable aux PDA dans le cadre de la protection contre la foudre	2
8	Investigations and studies on lightning air terminal shapes in relationship with the efficiency of a simple rod - 2014 Par Sylvain Fauveaux ; Olivier Alconchel	7
9	Corona discharges and their effect on lightning attachment revisited : upward leader initiation and downward leader interception - 2014 By Marley Becerra	8
10	New progress in the process of lightning attachment to grounded structures -2016 Par Gérard Berger	4
11	Focus on the new range of tests for the Early Streamer Emission air-terminal technology - 2014 Par Michael Troubat	3
12	The Reliability and the Efficiency of the Early Streamer Emission Concept - 2014 Par Elysabeth Benali, Michael Troubat, Fabien Barriere	3
13	A 3-D numerical model of negative lightning leader inception - 2004 Par Sonia Ait-Amar, G. Berger	22
14	Occurrence of new upward positive leaders triggered by negative downward CG lightning - 2010 Par Gérard Berger, Louis-Jonardan Gallin, Sonia Ait-Amar	4
15	New lightning experiments at the pic du midi - 2010 Par Gérard Berger, Guy Lafon, Gérard Serrie, Stéphane Pedeboy	4
16	Installation And Implementation Of A Rocket Triggered Lightning Test Facility - 2016 Par Sylvain Fauveaux, Thomas Nowicki, Bernard Thirion, Reynaldo Zoro, Tulus Leo	8
17	An experimental study of leaders initiated by single and advanced (ESE) lightning rods - 2004 Par A.Eybert-Bérard, B. Thirion, P. Boilloz, M. Saba, N. Solorzano	7

12. GLOSSAIRE

Termes	Définitions
PDA	Paratonnerre à dispositif d'amorçage
ESE	Early Streamer Emission
PTS	Paratonnerre à Tige Simple
GIMELEC	Groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés
APF	Association de Protection contre la Foudre
ICPE	Installations Classées
Rp	Rayon de protection
MEEM	Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer