

EXPERIMENTATIONS Foudre AU BRÉSIL

Études in situ de paratonnerres Franklin et à dispositif d'amorçage (PDA)

André Eybert-Bérard¹, Bernard Thirion², Carl Potvin³, Robert Lanoie³, Hubert Mercure³

¹ Conseiller Scientifique CEA, 7 rue des roses 38360 Sassenage, ² ISEN (Institut Supérieur d'Électronique du Nord) 59000 Lille
³ Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ) 1800 boul. Lionel-Boulet, Varennes, Québec, Canada, J3X 1S1

Résumé

Créé en 1998, à l'instigation de la société INDELEC, et de l'Université de Toulouse pour la France, d'Hydro-Québec (IREQ) pour le Canada et des universités de Campinas et San José Dos Campos pour le Brésil, le site d'étude de la foudre de Cachoeira Paulista, (État de Sao Paulo, Brésil) est dédié aux études de la foudre naturelle et provoquée. La principale étude en cours est une étude comparative de paratonnerres Franklin et à dispositif d'amorçage, pour laquelle Hydro-Québec est observateur neutre. Une structure instrumentée et supportant les dispositifs à tester, est soumise aux foudroiements déclenchés en altitude, laissant à la décharge le choix de l'impact final. Les techniques d'investigations et les résultats de la campagne 2000/2001 sont présentés dans ce papier.

Introduction

Il est un lieu commun de dire que la protection apportée par un paratonnerre à tige Franklin ou par un paratonnerre à dispositif d'amorçage, prête à de nombreuses discussions et polémiques. Les essais de laboratoires, s'ils sont incontournables pour la mise au point de ces dispositifs, sont toutefois insuffisants en termes d'efficacité, compte tenu des facteurs d'échelle et de la nature aléatoire du phénomène entre autres.

La volonté de réaliser des essais in situ n'est pas nouvelle et de 1993 à 1996, le CEA, centre de Grenoble, s'est investi dans ce domaine par le biais de la technique des éclairs déclenchés.

Les premières expériences ont consisté à adapter la technique de déclenchement classique avec le fil de cuivre connecté au sol, appelée LRS-G, pour aboutir à la technique spécifique appelée LRS-A qui consiste à dérouler d'abord une certaine longueur d'isolant (typiquement de 100 à 400 mètres) pour ensuite dérouler le fil de cuivre. Cette technique a l'avantage de laisser à la décharge initiée en altitude, le libre choix de son point d'impact au sol.

Des dispositifs de capture, positionnés et instrumentés de façon identique, sont mis en compétition dans la zone d'impact supposée au sol.

Les premiers résultats significatifs ont été obtenus en 1996, lors de la dernière campagne à Saint Privat d'Allier [1]. En 1997, le CEA dans le cadre d'une restructuration interne, ayant mis un terme à ses programmes de diversification, la société INDELEC a repris à son compte l'étude en cours.

Sur l'initiative de cette société, un contrat de coopération d'une durée de cinq ans, a été signé en 2000, entre le Brésil, le Canada et la France, pour la mise en œuvre et l'exploitation d'une station d'étude de la foudre naturelle et provoquée.

Les objectifs sont à caractère scientifique : étude des mécanismes du phénomène, mesures des paramètres physiques de la décharge, rayonnement électromagnétique proche, etc. et à caractère technologique : essais comparatifs des différents types de paratonnerres, évaluation de l'efficacité de maillages, inductions sur des lignes tests de transmission, expérimentation de déclenchement par laser, détection, prévision et études atmosphériques, etc.

Cette station d'étude de la foudre, similaire à celles que nous avons réalisées en France et aux États-Unis, a vu le jour en janvier 2000, grâce en particulier au concours efficace de la société MAKER Brésil que nous remercions ici.

Bien qu'initée par les fondateurs cités précédemment, la station reste ouverte aux organismes internationaux avec pour critère d'entrée la compatibilité des expériences envisagées avec celles en place, objets de l'accord. En 2001, on note l'arrivée de TELEBRAS et FRANCE TELECOM.

1. Le site de Cachoeira Paulista

La station de déclenchement est située à mi-distance entre Sao Paulo et Rio de Janeiro. Implantée sur le centre de l'INPE (*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*), près du village de Cachoeira Paulista, elle bénéficie de par sa situation géographique (S 22° 41,2 ; W 44°59,0 ; altitude 625 mètres) des conditions orageuses tropicales.

Ce site a été choisi pour sa situation géographique ainsi que pour la disponibilité des supports logistiques, techniques et de surveillance de l'INPE. Enfin le centre INPE de Cachoeira Paulista accueille le CPTEC (Centro de Previsao de Tempo e Estudos Climaticos), organisme principal d'études climatiques au Brésil.

1.1. Pré-étude du site

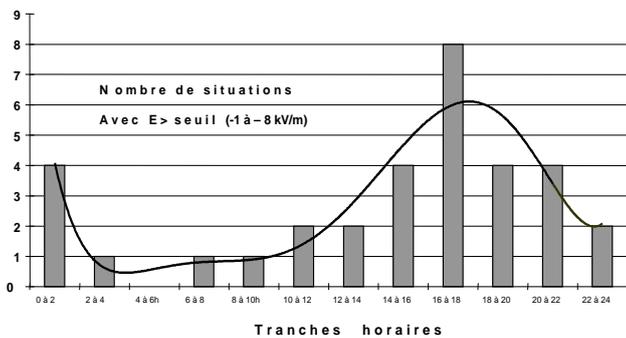
Une campagne d'enregistrements du champ électrique au sol s'est déroulée de décembre 1998 à mai 1999 [2] sur le site de l'INPE à 3 kilomètres de la station d'essais, avec pour objectif le suivi et l'analyse des perturbations orageuses affectant le site pendant la saison d'orages. L'instrumentation était essentiellement constituée par un avertisseur d'orage type E2000, piloté par logiciel spécifique.

Fig.1. Répartition journalière des orages.

Les données, stockées en temps réel sur PC, étaient transmises en France par le laboratoire INPE de San Jose Dos Campos.

L'analyse des données, (figure 1 ci-dessus), malgré la courte période de test a cependant mis en évidence les caractéristiques des orages tropicaux à savoir :

- orages courts et violents, survenant en fin de journée,
- champs électriques élevés (10 à 12 kV/m), mais activité moyenne,



- base des nuages à altitude élevée
- forte proportion d'éclairs intra-nuage et inter-nuage,
- situations à fort champ (10 à 12 kV/m), sans activité marquée.

1.2. Étude de foudroiements naturels

Simultanément, en décembre 1998, une expérimentation de foudroiements naturels sur des systèmes de capture a été mise en place. Cette étude consiste à mettre en compétition, quatre paratonnerres différents :

- une pointe simple effilée ($r < 1\text{mm}$),
- une pointe simple arrondie ($r = 15\text{mm}$),
- un Paratonnerre à Dispositif d'Amorçage (PDA), de type normal*,
- un PDA de type renforcé*.

*Remarque : Ces deux PDA sont des paratonnerres de série du catalogue de la société INDELEC.

Les quatre dispositifs sont érigés sur des mâts métalliques, aux quatre angles d'un carré de 15 m de côté. Les pointes sont au même niveau (12 m/sol) et la mise à la terre est unique (ceinturage en pieds de mâts et piquet de terre).

Malgré le niveau kéraunique élevé de la région (100 à 110), la probabilité de foudroiement est extrêmement faible, en conséquence cette étude s'inscrit sur une durée pluriannuelle.

Le foudroiement de chaque dispositif est comptabilisé par un totalisateur électromécanique de coups de foudre, en série sur chaque descente de paratonnerre. À cet effet chaque mât est interrompu par un manchon de nylon sur lequel est inséré le compteur. Les haubans sont en kevlar afin d'assurer le passage du courant par le système de comptage. Au 31 décembre 2000, aucun dispositif n'a encore été foudroyé.

2. La station de déclenchement

Implantée sur un plateau à 2 km de la zone d'activité de l'INPE, la station occupe une surface d'environ 5000m². Le sol de latérite rouge présente une résistivité importante de l'ordre de 1000 Ω.m. Les structures légères, sont de types modulables pour s'adapter à l'évolution de la station (fig.2).

On note trois parties principales :

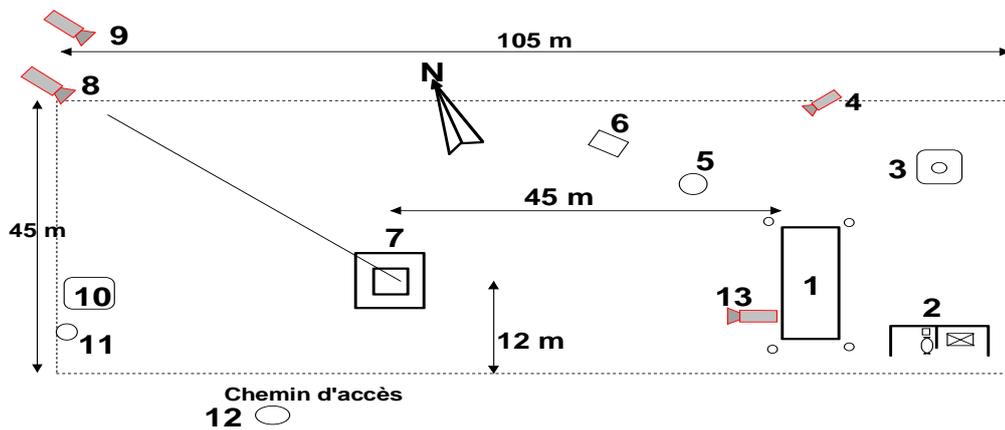
- le poste de contrôle et de commande (Pcc),
- la plate forme de tirs et de tests (Pft),
- la zone d'expériences (Ze).

2.1. Le poste de contrôle et de commande (Pcc)

Constitué par une enveloppe métallique (conteneur de fret), de 12 m x 2,5m, il joue un double rôle de protection des expérimentateurs d'une part et de terminal d'acquisitions des mesures d'autre part.

Il est protégé des impacts directs par une cage maillée ; le conteneur et la cage maillée ayant un seul point de mise à la terre ($R=21\Omega$). Il est alimenté électriquement par un groupe électrogène de 17 kW, intégré dans le système de protection. Les systèmes d'acquisitions sont protégés par parafoudres et onduleurs autorisant une perte d'alimentation de 10 minutes.

Les liaisons entre capteurs externes et le Pcc sont assurées par liaisons optiques et les servitudes sont gérées par lignes pneumatiques, assurant l'intégrité de la cage de faraday et son isolement galvanique.



- | | |
|---|--|
| <p>Repère 1 Poste de contrôle et de commande,</p> <p>2 Groupe électrogène, compresseur pneumatique, réservoir carburant,</p> <p>3 Capteur de champ électrique (capteur de tir),</p> <p>4 Expérience HYDRO-QUEBEC : Caméra vidéo automatique (éclairés naturels et déclenchés), à 75 m</p> <p>5 Expérience de l'université de San Jose Dos Campos (INPE) : Composante verticale du champ électrique rayonné,</p> <p>6 Expérience Université de Campinas (UNICAMP) : Induction électromagnétique dans une cage maillée,</p> | <p>Repère 7 Plate forme de tirs, de tests paratonnerres et de mesures (INDELEC),</p> <p>8 Caméra vidéo commandée depuis le Pcc (INDELEC), à 50 m</p> <p>9 Expérience HYDRO-QUEBEC, Caméra automatique (éclairés naturels et déclenchés), à 0,8 km,</p> <p>10 Abri GPS (INPE Cachoeira),</p> <p>11 Repère géodésique,</p> <p>12 Arbre isolé,</p> <p>13 HYDRO-QUEBEC : Caméra vidéo (8000 i/s).</p> |
|---|--|

Fig. 2. Station de déclenchement artificiel d'éclairs de Cachoeira Paulista. Centre INPE. (Brésil)

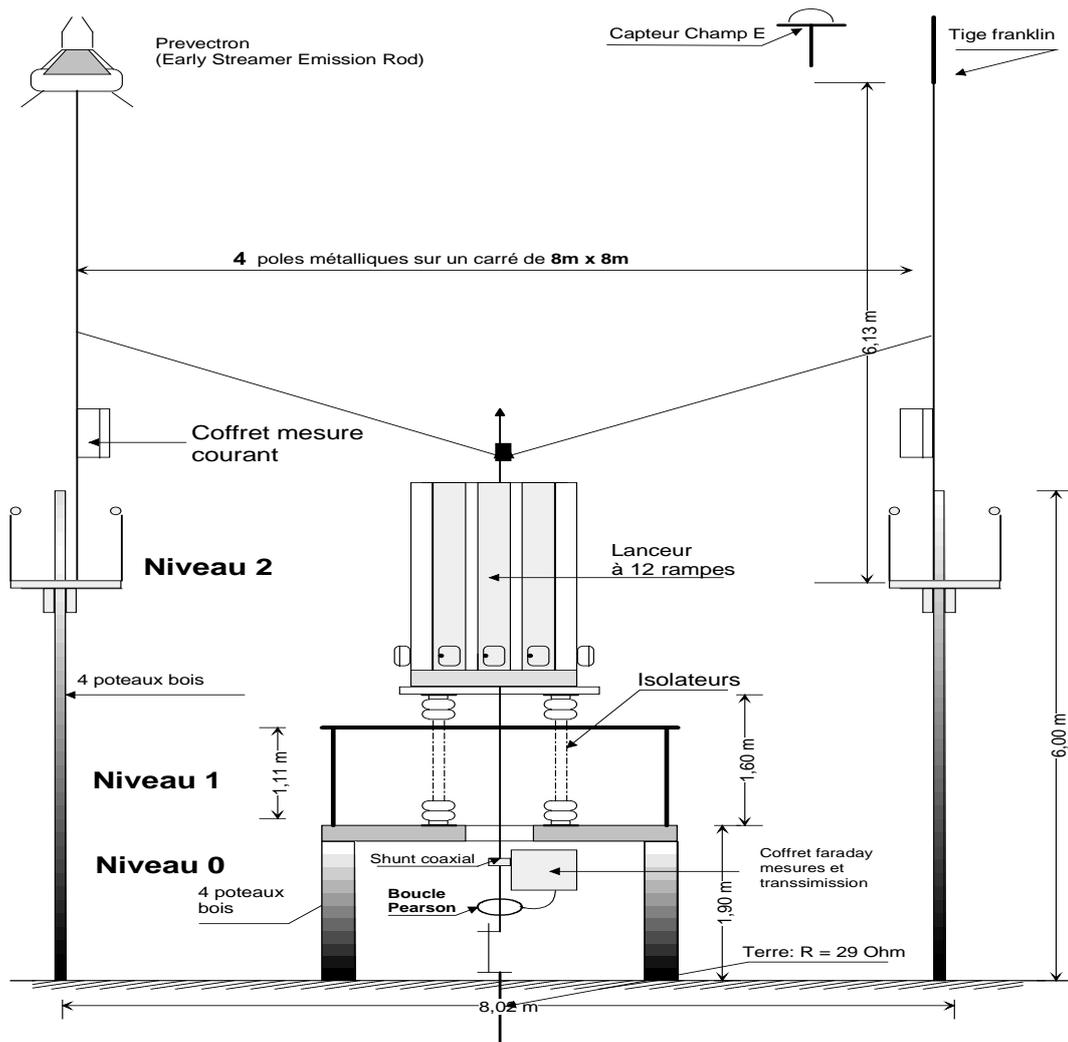


Fig. 3. La plate forme de tirs et de tests (Pft).

2.2. La plate forme de tirs et de tests (Pft)

On distingue sur la plate forme de tirs 3 niveaux aux fonctions spécifiques et distinctes (fig. 3).

Le niveau '0' au sol, où se trouve :

- la mesure de courant par shunt coaxial de $1\text{m}\Omega$ et convertisseur électro-optique de transmission de signal,
- un compteur de coup de foudre,
- la mise à la terre de l'ensemble par 'pattes d'oie' et piquets verticaux. La résistance de terre est de $29\ \Omega$.

Le niveau '1' ($h=2\text{m}$) qui est la zone des fusées. Le lanceur, permet de tirer, au cours d'un même orage, jusqu'à 12 fusées, chacune pouvant être équipée du système LRS-G ou LRS-A. La configuration des fusées LRS A pouvant elle-même être modulable de 50 à 400 mètres de kevlar, prolongés par 600 mètres de cuivre.

La configuration optimale étant 100/600 m. En effet il est important que le 'stepped leader' initié à la base du fil de cuivre, puisse se développer naturellement en plusieurs 'steps' avant d'atteindre le niveau des dispositifs de capture. Rappelons que la longueur moyenne d'un 'step' est de l'ordre d'une vingtaine de mètres.

Les moteurs utilisés dans ces fusées sont à base de propergol, ils ont une durée de combustion de 1,2 secondes, une poussée de 80daN et la vitesse maximale est de l'ordre de 220 m/s, ce qui assure des conditions de déclenchement satisfaisantes.

Le niveau '2' ($h=5\text{m}$) est la plate forme de tests des paratonnerres.

L'extrémité (pointe Franklin, PDA) des 3 paratonnerres sont à la même altitude soit 11,50 m par rapport au sol. Le quatrième coin de la plate forme est équipé d'un mât télescopique permettant de hisser, à la même altitude de 11,5 m, un capteur de champ électrique. Ce capteur (plage dynamique 300 kV/m et bande passante 5kHz-150MHz), permet de voir l'évolution du champ électrique et en particulier le champ électrique créé par le 'stepped leader'.

Les 3 paratonnerres sont électriquement reliés, à leur pied, au mât central du lanceur.

2.3. La zone d'expériences (Ze)

Comme le montre la figure 2, la partie défrichée entourant la plate forme de tir et le poste de contrôle et de commande est réservée aux expériences en cours et futures.

Actuellement deux expériences physiques sont en place ou en cours de préparation :

- Mesure de la composante verticale du champ électrique rayonné par antenne capacitive : INPE, San Jose Dos Campos. (Rep.5, fig. 2).
- Mesure de l'induction électromagnétique rayonnée à l'intérieur d'une structure maillée : UNICAMP, université de Campinas. (Rep. 6, fig. 2).

Afin de suivre les événements, des surveillances vidéo automatiques ou déclenchées sont réalisées sur la Ze et à distance par INDELEC et Hydro-Québec.

2.3.1. Surveillance vidéo INDELEC

Une caméra vidéo (Rep.8, fig. 2), placée à 50 m du lanceur et pilotée depuis le Pcc par fibre optique, permet lors d'un tir de visualiser le point d'impact sur une pointe ou au sol.

La détermination du point d'impact est complétée par une caméra vidéo depuis le Pcc. Cette dernière caméra, présente en incrustation les valeurs du champ électrique au sol, pendant le déroulement d'un déclenchement.

2.3.2. Surveillance vidéo Hydro-Québec

HYDRO-QUEBEC, met en œuvre deux types de surveillance vidéo :

- Une surveillance automatique à l'aide de 2 caméras, l'une à 75 m du lanceur (Rep.4, fig. 2), l'autre à 0,8 km (Rep. 9, fig. 2). Ces caméras sont déclenchées sur événement optique (éclair) et/ou sur événement électromagnétique (boucle d'induction).
- Une surveillance déclenchée lors des tirs. La caméra utilisée est une caméra 8000 images par seconde, elle est située dans le Pcc.

3. Expérience comparative de paratonnerres

3.1. Organisation des tests

Les dispositifs à tester (3) sont disposés de telle façon qu'ils se trouvent dans la zone d'évolution d'un même 'stepped leader' ; la distance entre chaque dispositif (8m) est supposée ne pas être perturbatrice vis à vis des deux autres. Ce compromis a été choisi après des essais de simulation (ECL Lyon).

Chacun des 3 mâts est instrumenté de façon à mesurer les courants des précurseurs (streamer, leader) dans une gamme de 0 à 10 A. (figure 4).

Au-dessous de la tête de capture on trouve :

- un shunt coaxial de $5\text{m}\Omega$. Ce shunt supporte cependant un courant de 60 kA, 500 Joules en cas de connexion des arcs en retour.
- Un coffret faraday comportant une alimentation autonome 12V, un émetteur électro-optique (Bande passante 1 MHz).

L'ensemble, blindé et isolé galvaniquement est piloté depuis le Pcc par commande pneumatique.

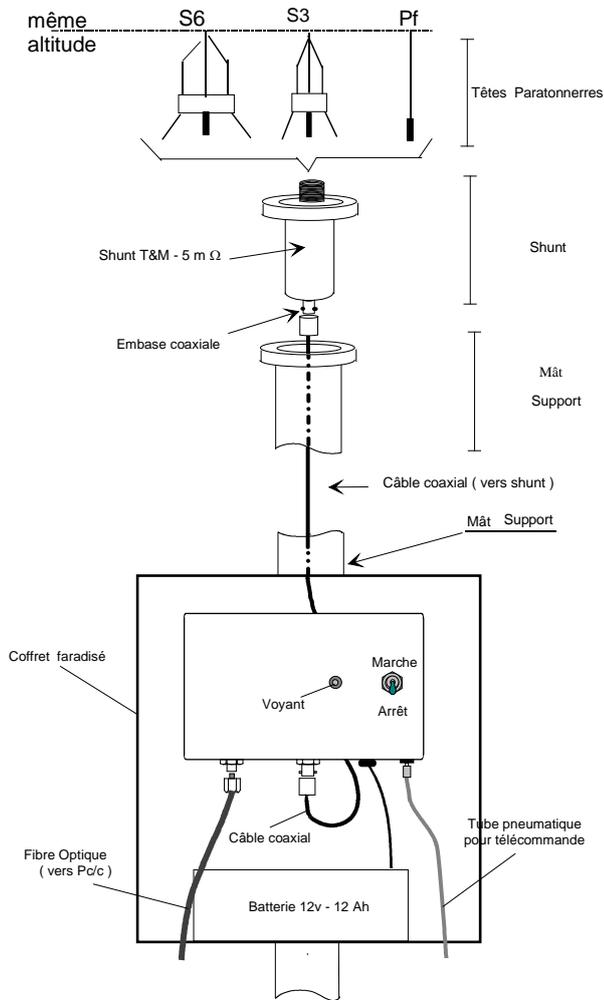


Fig. 4. Instrumentation des dispositifs de test.

3.2. Acquisitions, instrumentations.

Les 3 mesures de courant de précurseurs sur les paratonnerres, la mesure du champ électrique de leader descendant et la mesure de courant total d'arcs sont acheminées vers le Pcc via un réseau d'acquisitions et de transmissions optiques. Au poste de commande et de contrôle (Pcc), les voies de mesures sont dirigées vers deux systèmes d'acquisitions lent (Pc 4 s) et rapide (numériseur LeCroy).

3.2.1. Enregistrements lents (Pc 4s).

Compte tenu de l'incertitude temporelle de l'apparition des streamers, après le départ de la fusée, il a été nécessaire de concevoir un système d'acquisitions alliant une profondeur mémoire importante avec une fréquence d'échantillonnage en accord avec la vitesse des streamers. Ce système spécifique, appelé Pc 4 secondes, a les caractéristiques suivantes :

- 4 voies indépendantes (0 à 10 V), fréquence d'échantillonnage de 2 MHz,
- temps d'acquisition variable jusqu'à 6 secondes.

Le système est déclenché au temps "0" par le pupitre de commande de tir, pour une période de 4 secondes. On a donc de cette façon une surveillance continue des dispositifs de tests pendant toute la durée de la phase ascensionnelle de la fusée, période où l'occurrence de streamers est optimale.

3.2.2. Acquisitions rapides.

On utilise pour ce faire un oscilloscope numérique de type LeCroy, fonctionnant en mode 'fenêtres'. Le nombre de fenêtres d'acquisitions a été fixé à 10. Les 4 voies sont affectées aux 3 dispositifs de tests et au champ de 'stepped leader'.

Les temps d'acquisitions sont de 2 ms, avec un 'pre-trigger' de 1 ms.

Le déclenchement des acquisitions est assuré par un tiroir 'trigger' qui offre un choix du moyen de déclenchement :

- sur le courant d'arc en retour (niveau 3 kA),
- sur le flash optique (capteur optique de 8° d'ouverture),
- sur le champ de 'stepped leader' (30 kV/m).

Ces trois modes de déclenchement peuvent être sélectifs ou combinés (fonctions OU, ET).

3.2.3. Caractéristiques des capteurs utilisés.

- **Capteur champ électrique E.**
Capteur Thomson E 10
Gamme : 0 à 316 kV/m (position 0/100 kV/m)
Bande passante 150 MHz,
Ce capteur est piloté par une chaîne Mélopée P100.

- **Shunt coaxial de mesure de courant des arcs en retours.**
 $R = 1\text{m}\Omega$, bande 30 MHz, $I_{\text{max}} : 60\text{ kA}$.

La mesure du courant d'arcs en retour est doublée par une mesure autonome (boucle Pearson 5mV/A, sur électronique associée). Cette mesure permet en cas de défaillance de la mesure principale d'obtenir à défaut des amplitudes de chaque arc en retour, la valeur maximale de la décharge.

- **Shunts des dispositifs de tests.**
Shunts de type coaxial,
 $R = 5\text{ m}\Omega$, 500 joules.

La mesure du champ électrostatique au sol (moulin de tir) est réalisée par des capteurs type CEA, à liaison optique et alimentation autonome.

La surveillance permanente du site est assurée par un avertisseur d'orage E2000.

La figure 5, présente le synoptique général des mesures et observations réalisées actuellement.

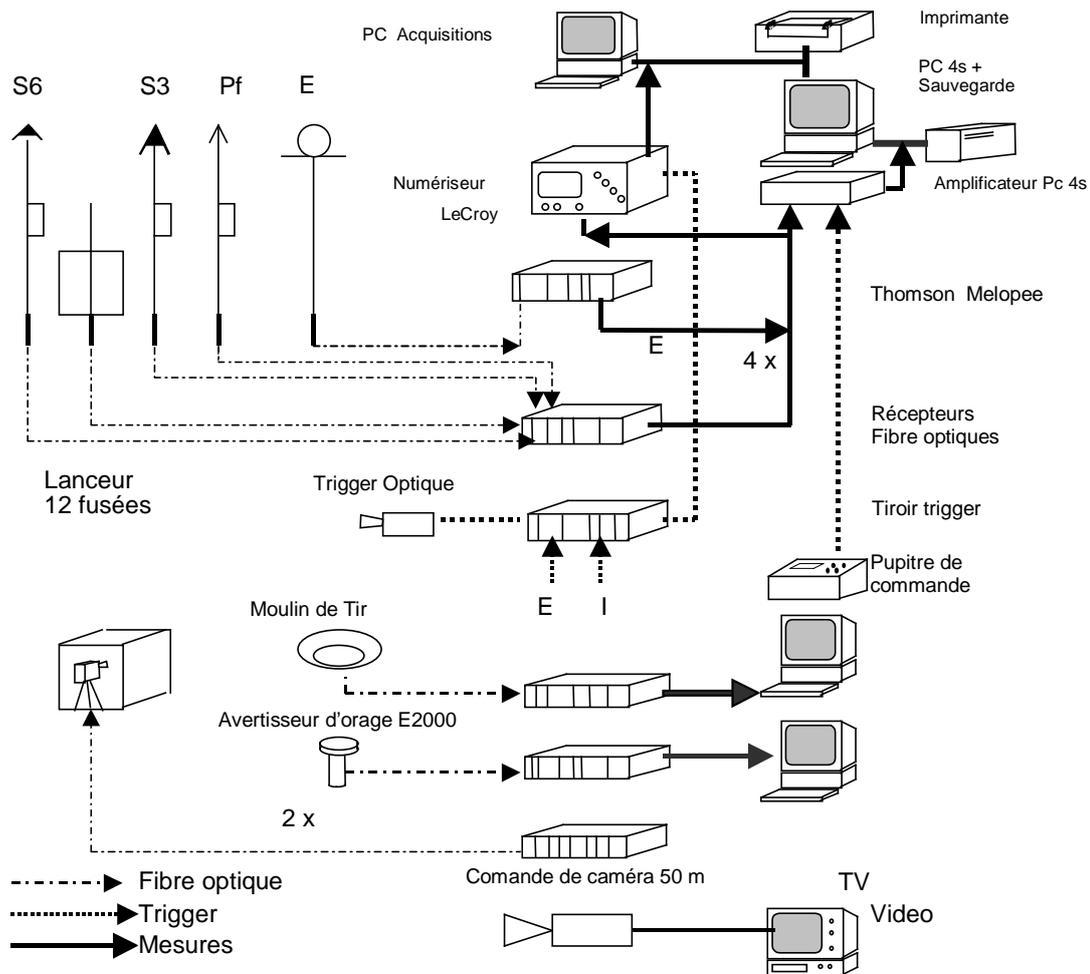


Fig. 5. Synoptique des mesures et acquisitions de la campagne 2000/2001 sur le site du Brésil.

4. Premiers résultats.

4.1. Éclairs déclenchés

Les premiers tirs expérimentaux ont eu lieu en janvier 2000. Les niveaux de champ électrique de déclenchement se sont révélés nettement supérieurs à ceux observés en France : -10 à -12 kV/m au lieu de -4 à -8 kV/m . Des situations atypiques sont courantes ; un exemple est donné (fig. 6) ou 2 tirs LRS-A, techniquement corrects (amplification du champ sous l'effet du fil Cu, puis amorce d'une décharge), n'aboutissent pas au sol.

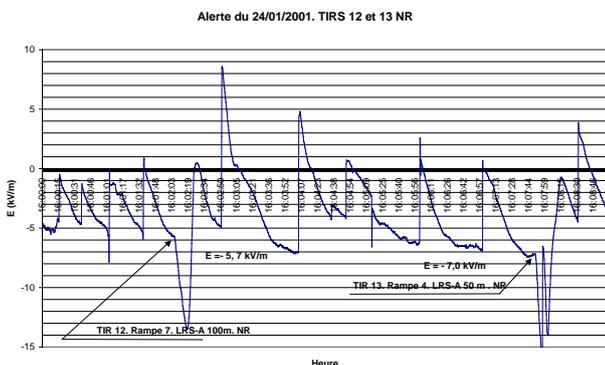


Fig.6. Tirs LRS-A. Amorces de déclenchement.

À ce jour aucune hypothèse satisfaisante n'explique ces conditions particulières et difficiles de déclenchement.

Les longueurs de fil de cuivre de 600m sont supérieures à celles utilisées en Floride et en France (500m), pour répondre aux caractéristiques tropicales des décharges :

- base des cumulonimbus élevée par rapport au sol,
- taux de décharges intra-nuages et inter nuages important,
- résistivité très grande du sol etc.

Le nombre d'événements déclenchés et mesurés à ce jour (mi-campagne 2000/2001) est relativement faible, comparativement à une campagne Floride. À ce moment, il est cependant prématuré de tirer des conclusions quant au choix du site.

Afin de vérifier les systèmes d'acquisition, quelques tirs connectés (LRS-G) ont été réalisés, ils ont donné lieu à des décharges de faible intensité ($13,9\text{ kA}$; $0,4\text{ C}$) avec 2 arcs en retour.

Sur 4 tirs LRS-A, les 3 avec 100 mètres de fil isolant ont connecté au sol, hors de la zone de protection des paratonnerres, respectivement à 42m, 50m et environ 100m. Le quatrième (50m de fil isolant) a

frappé le sol à 14m d'un paratonnerre, donc dans la zone de protection de ce dernier. À ce jour aucune hypothèse plausible n'est avancée pour expliquer ces résultats. La figure 7, illustre ce type de déclenchement.



- La partie inférieure sinueuse correspond au 'gap' de 100 m de kevlar.
- La partie rectiligne de 260 m correspond à la longueur de fil déroulé avant l'amorçage.
- Le lanceur se trouve dans l'alignement de la portion rectiligne du canal.

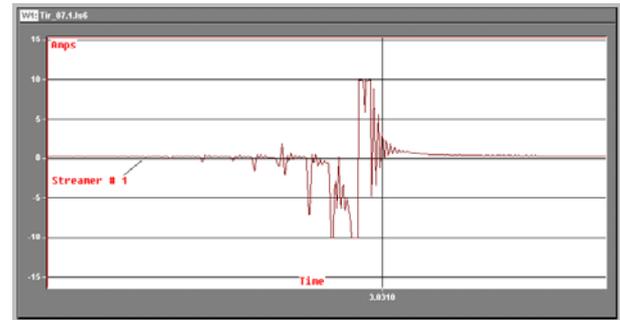
Fig. 7. Éclair 03 du 23/11/2000.(Photo. O.Pinto/INPE)

Ces tirs n'ayant pas connecté les dispositifs à tester et les systèmes de mesure rapide de champ rayonné n'étant pas encore en place à ce moment, la mesure de courant global n'a pu être assurée ; cependant les systèmes d'acquisitions des paratonnerres montrent des impulsions qui en première approche peuvent être attribuées à des précurseurs, les PDA 'démarrant' avant la tige Franklin.

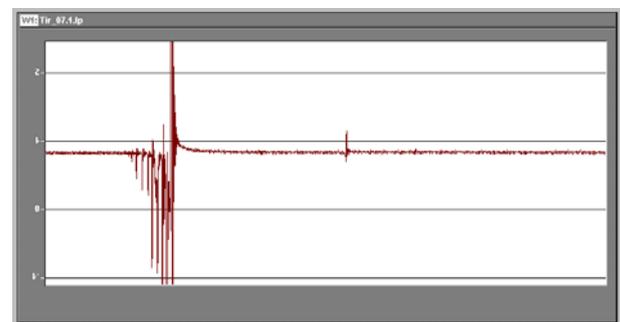
Une analyse approfondie permettra, soit de confirmer cette hypothèse, soit d'attribuer ces courants, principalement à l'induction créée par les arcs en retour.

La figure 8, illustre pour un PDA de type S6 et pour la pointe Franklin, la forme et l'amplitude de ces impulsions. Les premières impulsions sur le dispositif S6, apparaissent 20µs avant les premiers signes de courant sur la pointe Franklin.

On remarquera le courant de saturation de 10 A, sur le S6 et un courant beaucoup plus faible (2A) sur la pointe.



(a)



(b)

- (a) : PDA type S6
- (b) : Pointe Franklin

Fig.8. Enregistrements sur Pc 4s, des impulsions sur les dispositifs en tests.

Les données enregistrées jusqu'à ce jour, en trop petit nombre et dans des configurations pas suffisamment établies, ne permettent évidemment pas de porter un jugement sur la validité de l'expérimentation et sur les conclusions à tirer. Nous pensons indispensable, après cette période de rodage, de disposer au minimum d'une quinzaine d'événements significatifs, en termes de déclenchement (connexion 'stepped leader' avec précurseurs des paratonnerres).

4.2. Éclairs naturels.

La surveillance vidéo, assurée par les 2 caméras automatiques Hydro-Québec, permet d'une part de contrôler l'activité du site hors période opérationnelle et d'autre part de surveiller les dispositifs à tester.

Un cliché intéressant a été obtenu (figure 9) dans la nuit du 25 janvier 2000. Sur ce cliché, issu de la caméra à 72 m, on voit très nettement une illumination (leader de plusieurs mètres de

longueur), au sommet du PDA S6, alors que les autres dispositifs restent éteints. Cette illumination dure 4 images, soit plus de 130ms (30 images/s).



Fig. 9. 'Leader' sur le PDA S6. (Cliché HQ/C.Potvin)

La caméra rapide 'Redlake', mise en œuvre par Hydro-Québec, permet lors d'un tir, de surveiller à grande résolution (8000 images/s max.), la partie sommitale des dispositifs à tester. Elle permet également lors d'un orage proche d'obtenir des clichés (figure 10) où l'on peut visualiser la progression des 'stepped leaders' puis la connexion au sol d'une décharge naturelle.



Première image : $t = d$. Noter les 2 branchements sans doute issus d'une même poche de charges ; sur la branche de droite, on voit nettement la partie terminale illuminée du stepped leader.

Deuxième image : $t = d + 1 \text{ ms}$. Les 2 branchements sont toujours en compétition.

Troisième image : $t = d + 2 \text{ ms}$. La branche de gauche commence à s'illuminer et devient prépondérante. On distingue toujours l'illumination de l'extrémité des 'stepped leaders'.

Quatrième image : $t = d + 4 \text{ ms}$. Le canal de gauche a abouti le premier à faire la jonction avec le sol. On devine en partie basse, la jonction entre le 'stepped leader' et le streamer issu du sol, (première tortuosité).

Fig. 10. Visualisation à la caméra 'Redlake', à 1000 i/s, d'une décharge naturelle. (Clichés HQ. C.Potvin).

5. Conclusion

L'exploitation expérimentale de la station d'étude de la foudre de Cachoeira Paulista sur le site de l'INPE au Brésil, se révèle plus difficile que prévue. L'activité orageuse, sur le site, a été très déficitaire aussi bien en février, mars, novembre et décembre 2000 qu'en début d'année 2001. Des périodes très sèches et durables n'ont pas favorisé la formation d'orages convectifs. La situation géographique de la station (plateau à 700 mètres d'altitude, entre l'océan et les premiers contreforts montagneux), ne paraît pas a priori défavorable et il faut se garder de porter un jugement précoce sur le choix du site après une aussi courte période.

Les conditions de déclenchements se sont, jusqu'à ce jour, montrées extrêmement différentes de celles rencontrées en France ou aux États-Unis : champs de tir de l'ordre de -10 à -11 kV/m, (Floride, France : -4 à 8 kV/m), nombreuses décharges intra et inter nuages..., ont contribué à rendre difficiles les déclenchements et à abaisser le taux de réussite moyen de 60% à 38%.

La première question que l'on peut se poser, compte tenu de l'altitude élevée de la base des cumulonimbus, concerne la longueur de fil de cuivre des systèmes de déclenchement. Cette longueur est passée de 500m (Floride, France) à 600 m et paraît encore limite. Pour répondre à cette

interrogation, des essais vont être réalisés avec des longueurs de 1200 m.

Les tirs LRS-A ont donné lieu à des décharges au sol, à quelques distances des dispositifs de captures. À l'heure actuelle aucune explication n'a été avancée pour tenter d'expliquer cet état de faits et le nombre d'événements (4) est trop faible pour tirer des conclusions.

D'une manière générale l'ensemble des systèmes mis en œuvre sur la station (énergie, sécurité, instrumentations et acquisitions) se comporte bien et les conditions de fonctionnement de la station sont excellentes.

En ce qui concerne l'étude comparative des différents paratonnerres, les résultats partiels obtenus ne permettent pas de porter un jugement de fond et il faudra sans doute attendre les résultats des quatre années d'expérimentations prévues, pour tirer des enseignements que nous espérons probants.

Références.

- [1]. Campagne St-Privat 1996. A. Eybert-Bérard et al. CEA DTP/STI/LASP97-07/AEB
- [2]. Pré-étude du site de Cachoeira Paulista. Mesures de champ électrique. Rapport INDELEC. A. Eybert- Bérard 1999.