
PROTECTION Foudre D'UNE STATION DE RECEPTION GPS

Laboratoire de géophysique interne et technophysique

Notre référence : PhD/01/013

À l'attention de M. Glot

A E M C

86, rue de la Liberté

38180 SEYSSINS

Tél : 04 76 49 76 76

Fax : 04 76 21 23 90

Email : p.dunand@aemc.fr

1 - Objet du document.

Ce rapport a pour objet de présenter les moyens de protection à mettre en oeuvre pour la protection d'une station de réception GPS située sur le fort du St Eynard. Après avoir présenté les risques liés au phénomène foudre, nous présenterons les moyens à mettre en oeuvre afin de protéger l'installation.

2 - La menace foudre.

La foudre est un phénomène fréquent encore souvent ressenti comme mythologique et dont les conséquences seraient fatales. En fait, si la foudre reste - et restera sans doute longtemps - inévitable, nous savons désormais en limiter les conséquences de façon efficace et à un coût acceptable. Les règles de protection que nous exposerons dans ce document sont relativement simples et répondent à des règles élémentaires de physique : l'équipotentialité des équipements, le maillage des masses, la réduction des surfaces des boucles de masse et la protection des pénétrations conductrices.

2.1. Le phénomène foudre.

Le phénomène foudre, étudié depuis un peu plus d'un siècle, est désormais bien connu. Il s'agit d'une spectaculaire décharge électrostatique disruptive entre un nuage et le sol. Le tonnerre est le bruit acoustique émis par l'air que la température de l'air dilate brutalement. Le niveau kéraunique est le nombre moyen de jours annuels au cours desquels le tonnerre est entendu. Ce comptage fut longtemps le seul moyen d'évaluer l'occurrence de la foudre. Ce niveau varie en France, selon les régions, de 5 à 40.

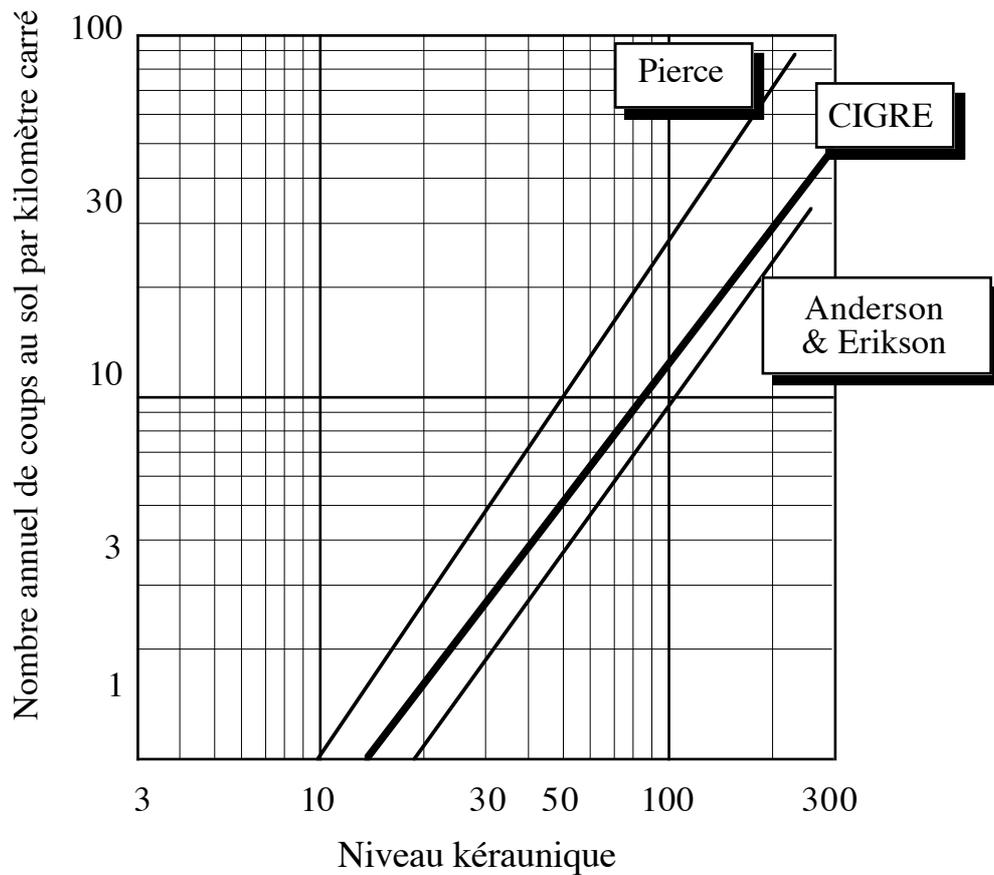
Le nombre de coups au sol n'est pas un paramètre simple à maîtriser. Diverses études ont été menées et la CIGRE (Conférence internationale des grands réseaux électriques) propose la formule suivant :

$$N_s = 0,04 \cdot N_k^{1,25}$$

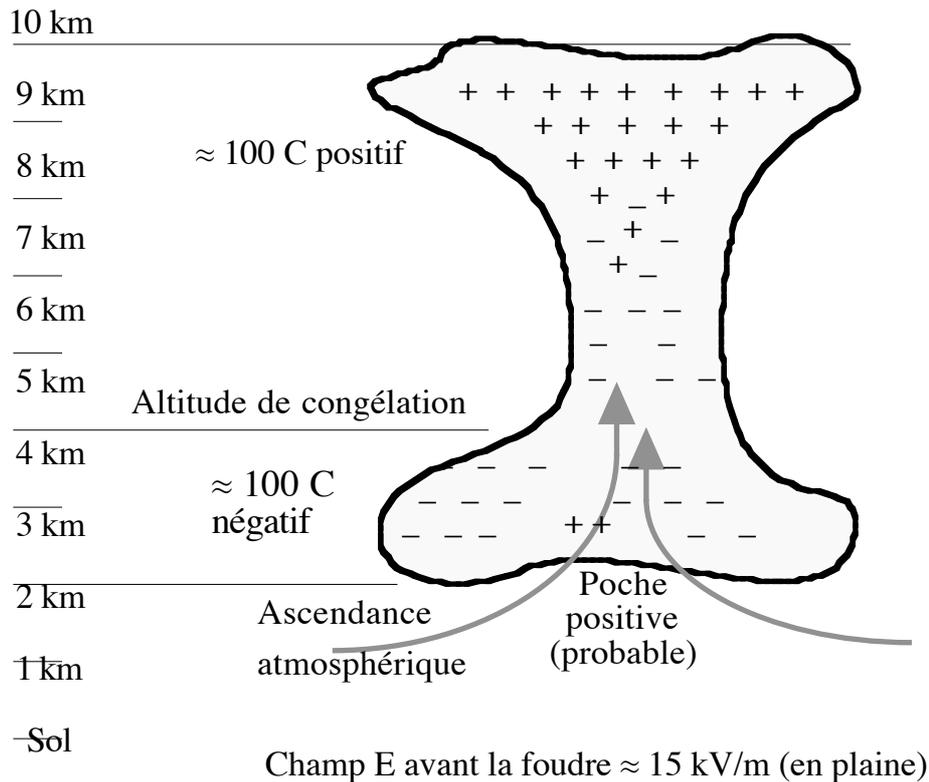
avec :

N_s : Nombre de coups au sol par km² et par an

N_k : Niveau kéraunique

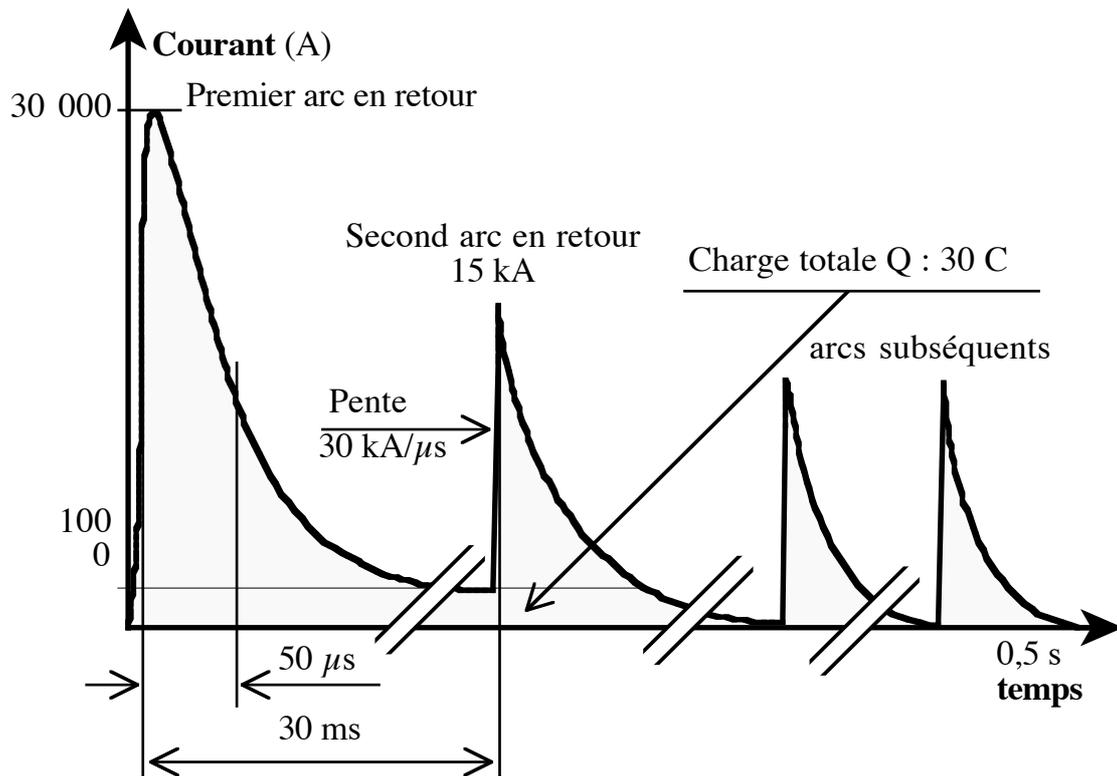


Le nuage de la foudre se comporte comme une “machine électrostatique” dont la partie basse (≈ 3 km) jusqu’à l’altitude de congélation (≈ 5 km), se charge des particules lourdes négatives alors que la partie haute accumule les particules positives plus légères. La charge électrique totale dissociée est de l’ordre d’une centaine de coulombs.



Le champ électrostatique en plaine, juste avant une décharge, varie de 10 à 20 kV/m. Il est supérieur en montagne à cause du renforcement du champ électrique par effet de pointe. Ce champ n'a aucun effet sur les systèmes électroniques. Des effluves nommés Feux de Saint-Elme au bout de pointes conductrices sont une conséquence visible et inoffensive du champ électrique intense. La hauteur moyenne d'un éclair est de 5 km. La tension entre le nuage et le sol est de l'ordre de 100 MV. La foudre est un générateur de courant pratiquement parfait.

La décharge habituelle se propage dans le sens du nuage vers le sol. Elle débute par un **précurseur** descendant avec un faible courant électrique. Il progresse à partir du nuage par bonds de quelques dizaines de mètres en créant un canal ionisé peu lumineux. Quand ce précurseur s'approche à quelques dizaines de mètres du sol, le champ électrique local augmente beaucoup et crée des effluves ionisés. Un premier **arc en retour ascendant** jaillit, établit le contact avec le précurseur descendant et écoule brutalement au sol les charges électriques du canal ionisé. C'est la première impulsion de foudre.



La plupart des coups au sol sont négatifs, c'est à dire que la partie du nuage qui se décharge est négative par rapport au sol. Les décharges positives en France sont rares : en moyenne, 10% des coups sont positifs. Ces derniers ont un courant crête encore plus élevé, écoulent plus de charges et sont plus énergétiques que les décharges négatives. Des chocs "anormaux" sont possibles. Ils peuvent se propager du sol vers le nuage. Ce cas n'est pas rare en montagne ou à partir d'un point haut. Il arrive aussi qu'une impulsion positive se glisse au milieu d'impulsions négatives. Enfin un choc de foudre peut apparaître (souvent en polarité positive) par ciel bleu à cause des charges d'espace d'un orage lointain ou passé.

Nous conseillons de retenir pour le calcul des menaces de la foudre les valeurs de la norme NF C 17 100. Cette norme définit les caractéristiques électriques de la foudre pour quatre niveaux de confiance : 80, 90, 95 et 98 %. Cette norme définit des durées de chocs indépendantes du niveau de protection :

- premier front : $T1 = 10 \mu s$
- durée à mi-hauteur de la première impulsion : $T2 = 350 \mu s$
- durée d'un front subséquent : $T'1 = 0,25 \mu s$
- durée à mi-hauteur d'un coup subséquent : $T'2 = 100 \mu s$
- durée totale (choc de longue durée) : $T = 0,5 s$

Paramètre	Symbole	Unité	Niveau de protection			
			I	II	III	IV
Efficacité	E	%	98	95	90	80
Crête du courant	I	kA	200	150	100	100
Charge totale	Qtot	C	300	225	150	150
Charge impulsive	Qimp	C	100	75	50	50
Énergie spécifique	SE	kJ / Ω	10 000	5 600	2 500	2 500
Raideur moyenne	di/dt	$\text{kA}/\mu\text{s}$	200	150	100	100

La menace électromagnétique d'un choc de foudre classique est de deux types. D'une part une agression en conduction : le point d'impact monte fortement en potentiel par rapport à un point éloigné. D'autre part une seconde menace, trop souvent négligée, est celle du champ magnétique rayonné.

Nous allons constater que non seulement c'est possible mais que c'est facile et relativement peu coûteux. Une condition nécessaire pour se protéger efficacement est de bien comprendre les divers effets d'un choc de foudre.

3 - Les effets de la foudre.

Les effets d'un choc de foudre sont multiples : thermiques (risques d'incendie), acoustiques, mécaniques et électrodynamiques, électrochimiques, etc... Nous ne nous intéresserons ici qu'aux effets sur les systèmes électroniques, c'est à dire électromagnétiques.

3.1. Statistiques de foudroiement.

Le risque d'un foudroiement direct sur une structure est un cas relativement rare. La norme française NFC 17100 permet de calculer le risque de foudroiement d'une structure.

$$N_d = N_{gmax} \cdot A_e \cdot C_1 \cdot 10^{-6}/\text{an}$$

Avec : N_g densité moyen de foudroiement dans la région

$$N_g = 0,04 \cdot N_k^{1,25}$$

A_e = surface équivalente de capture

C_1 : coefficient environnemental

Dans la région grenobloise, $N_k = 30$ jours d'orage / an, donc $N_{gmax} = 2,8$.

L'antenne est placée sur un poteau de 1,70 m de hauteur et de 40 cm de diamètre.

L'aire de capture équivalente peut être calculée par une formule donnée dans la NFC 17100 : $A_e = 9 \cdot \pi \cdot h^2$. Dans le cas présent, la surface équivalente vaut donc 81 m².

Le coefficient environnemental prend en compte les structures avoisinantes. D'après la NFC 17100, il est égal à 2 lorsque la structure est isolée au sommet d'une colline.

La densité de foudroiement direct de la station GPS est donc de :

$$N_d = 2,8 \cdot 81 \cdot 2 \cdot 10^{-6}/\text{an}$$

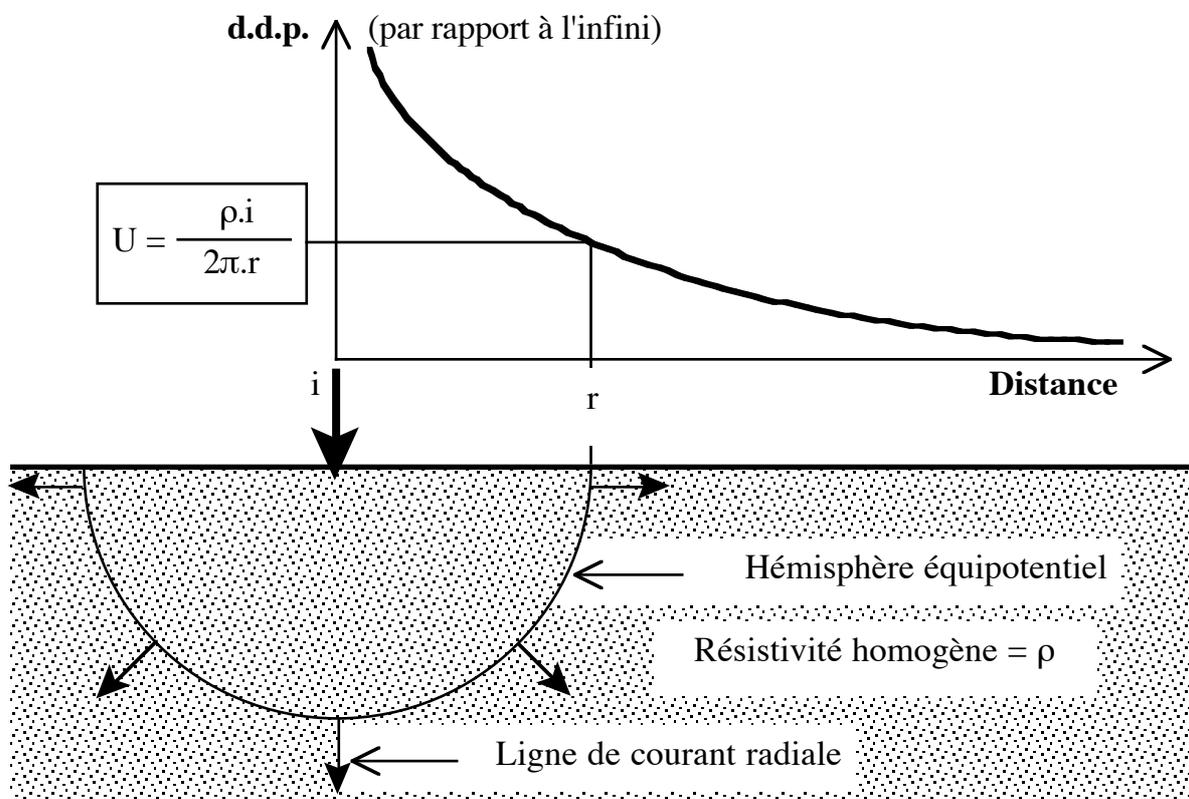
$$N_d = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ coup / an soit un coup tous les 2200 ans !}$$

Ce calcul semble toutefois un peu optimiste. Compte tenu de l'implantation

géographique du système, on peut s'attendre à une fréquence de foudroiement plus importante. Dans le même temps, dans un rayon de 1 km autour de l'installation, la densité de foudroiement sera environ de 9 coups par an. On voit à travers cet exemple que la probabilité d'un coup de foudre indirect est bien plus importante.

3.2. Les effets d'un coup direct

L'effet le plus connu de la foudre est celui du foudroiement direct, appelé "coup au but". Il s'agit de l'élévation de potentiel au voisinage du point d'impact. La terre, malgré les conventions intellectuelles, n'est pas équipotentielle. La tension entre le voisinage d'un impact de foudre et un point éloigné est considérable. Un hémisphère conducteur de rayon r dans un sol de résistivité ρ a une résistance $R = \rho / 2\pi.r$ par rapport à l'infini. Si l'on néglige l'effet pelliculaire, les lignes de courant d'un choc de foudre se diluent dans un sol de résistivité homogène selon les rayons d'un hémisphère. Avec ces hypothèses (un peu optimistes) la montée en potentiel d'un sol homogène par rapport à l'infini suit une loi hyperbolique.



La différence de potentiel par rapport à l'infini d'un point au voisinage de l'impact d'un choc de foudre vaut (relation pratique légèrement "arrondie") :

$$U \approx 0,2 \cdot I \cdot \rho / r$$

avec :

U : tension entre le point mesuré et l'infini, en volts

I : courant de foudre, en ampères

ρ : résistivité moyenne du sol, en ohms.mètres

r : Distance entre l'impact et le point mesuré, en mètres

Ce risque est relativement important pour l'installation qui nous concerne. Un choc de foudre dans la zone de l'antenne va ainsi provoquer une différence de potentiel importante entre l'antenne et l'électronique.

3.3. Les effets rayonnés (indirects)

Le champ rayonné par la foudre est perturbateur car il est à la fois de forte amplitude, assez rapidement variable et à prédominance magnétique. Les fréquences du champ de la foudre sont relativement basses, dans la gamme des ondes longues. Un tel champ est difficile à blinder.

L'antenne qui rayonne le champ de la foudre est le canal ionisé. On peut assimiler l'arc à un conducteur rectiligne sensiblement vertical et de grande longueur. Le champ H, en ampères par mètre, suit le théorème d'Ampère : $H = I / 2\pi.R$.

Ce champ est essentiellement horizontal. La tension induite dans une boucle de masse verticale par ce champ magnétique (supposé homogène et orthogonal à la boucle) suit la loi de Lenz : $U = S \cdot \mu_0 \cdot \Delta H / \Delta t$.

En combinant ces deux équations, on en obtient une troisième :

$$U = 200.S.\Delta i / R.\Delta t$$

avec :

U : Tension crête induite dans la boucle, en V

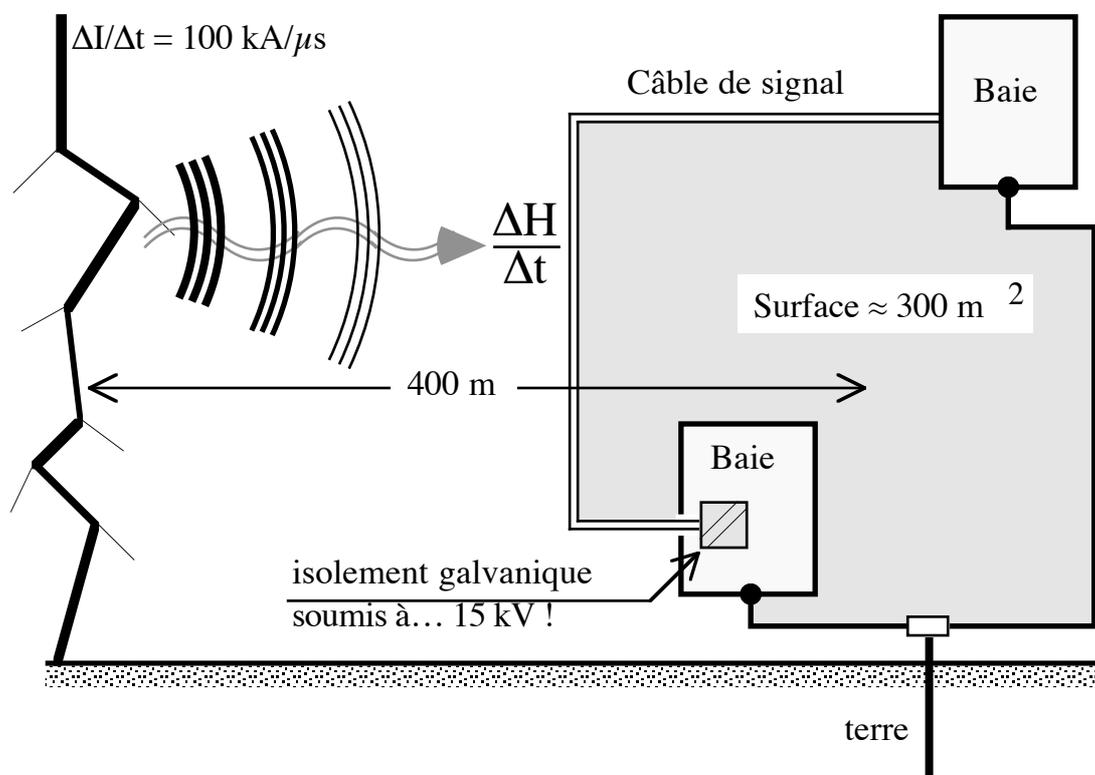
S : Surface de la boucle, en m²

$\Delta i/\Delta t$: Pente maximale du courant de foudre, en kA/ μ s

R : Distance entre l'éclair et la boucle victime, en m

La foudre n'a qu'une probabilité de 10 % de dépasser 120 kA/ μ s. Si elle tombe à 100 mètres d'un système électronique, la tension induite dans une boucle de 1 m² de surface atteint 240 volts crête.

Même si le champ n'est pas exactement orthogonal à la boucle ou si le bâtiment atténue un peu le champ, retenons que le champ magnétique foudre induit une tension d'une centaine de volts par mètre carré. Une boucle horizontale est habituellement moins agressée qu'une boucle verticale.



L'induction magnétique est la plus sérieuse menace que fait peser la foudre sur les

équipements interconnectés, même s'ils sont hors tension lors du choc. L'expérience montre que le rayonnement foudre a des effets beaucoup plus fréquents sur les électroniques que les coups directs. Seuls les équipements dont tous les câbles sont, soit déconnectés soit bien blindés, ne risquent rien.

Un utilisateur peu averti, constatant l'effet, risque de conclure qu'il y a eu une "remontée de terre" donc qu'il est urgent de réaliser une "meilleure terre". Or la solution ne réside pas dans le sol de notre vieille planète. Les spécialistes savent que les perturbations et les destructions de matériels les jours d'orages sont bien plus souvent imputables au rayonnement de la foudre qu'à son courant direct.

3.4. La foudre en conclusion

La foudre est un phénomène fréquent que l'on ne sait pas (encore !...) éviter. On sait toutefois protéger très efficacement les systèmes électroniques contre un foudroiement.

Pour se protéger d'un foudroiement, les moyens à mettre en œuvre sont ceux d'une installation maîtrisée en CEM. Durcir un site existant contre la foudre est possible, simple et peu coûteux par rapport aux risques. Il suffit pratiquement de mailler soigneusement les masses internes (quand c'est possible!...) et de veiller au bon montage des écrêteurs installés sur chacun des câbles externes.

Des raccordements équipotentiels entre masses peuvent être ajoutés en service, sans modifier les matériels, leurs logiciels, leurs câblages ou leurs connectiques. La correction d'une quinzaine de centres téléphoniques par France Télécom en 1990 prouva de façon éclatante que le simple maillage des masses et le bon montage des parafoudres (sans paratonnerres) suffit à assurer une protection remarquable.

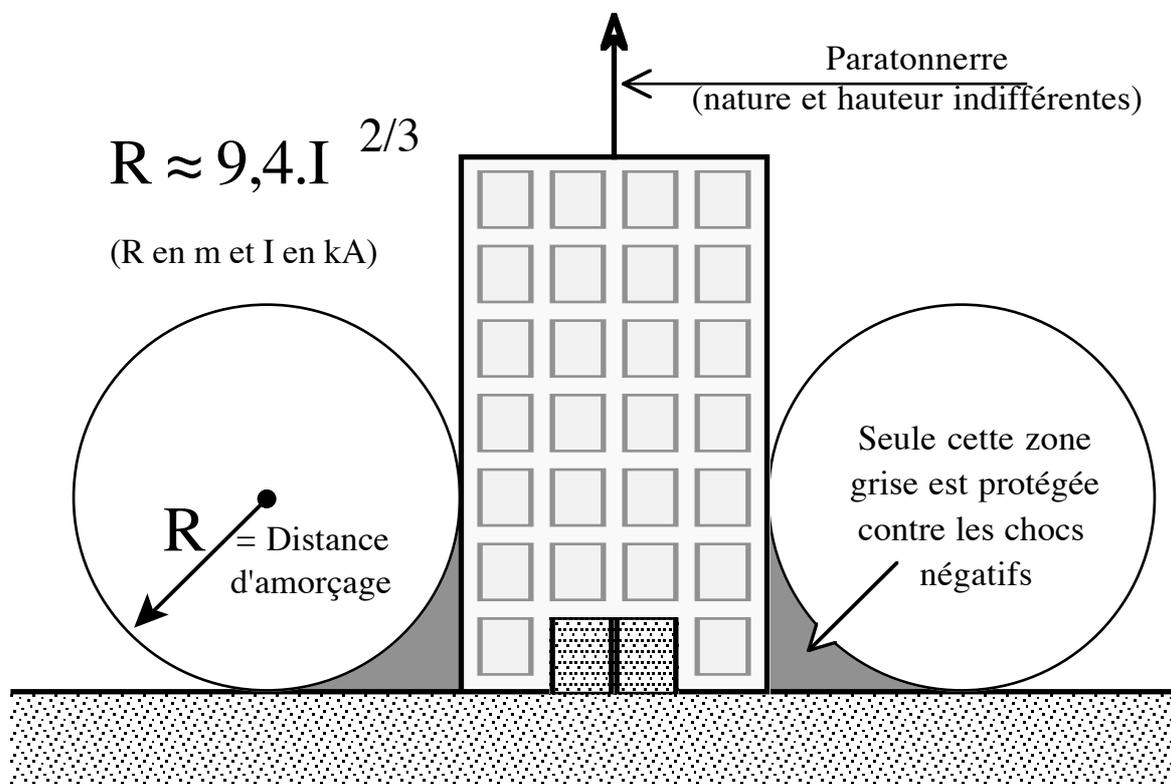
4 - SOLUTIONS

Compte tenu des risques exposés ci-dessus et du matériel mis en oeuvre, la protection foudre peut se décomposer en plusieurs points.

4.1. Structure de collecte ou dispositifs de capture.

Le modèle électrogéométrique est une loi empirique statistique qui prédit la zone directement exposée à la foudre. Ce modèle a le mérite de montrer que la foudre peut tomber à peu près partout. Il définit pour un choc négatif une distance d'amorçage. Cette distance est indépendante de la nature des roches du sous-sol, de la qualité de la prise de terre, de la hauteur du bâtiment, de la nature et de la hauteur des pointes et de tous les autres paramètres des paratonnerres.

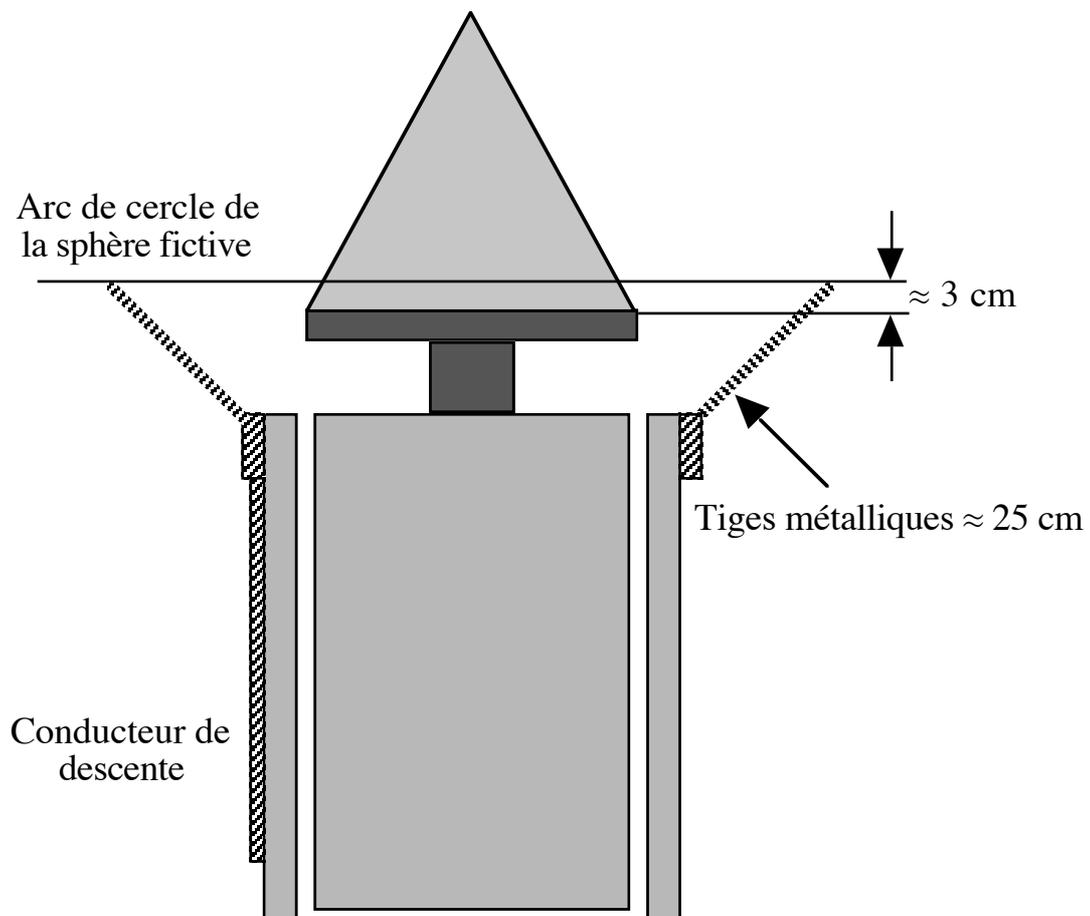
La distance d'amorçage correspond à la longueur présumée de l'arc en retour. Elle ne dépend que de la charge électrique stockée dans le canal ionisé, donc du courant crête du premier choc. Cette distance, pour un courant crête I , vaut sensiblement 9,4 fois I exprimé en kA élevé à la puissance deux tiers. Des relations légèrement différentes ont aussi été proposées.



Le modèle électrogéométrique est à ce jour le seul modèle sérieux reconnu par la communauté scientifique. Que peut-on lui reprocher sur le plan scientifique ? Tout d'abord il n'est valide que pour les chocs négatifs. Ensuite, lorsqu'un premier choc en retour jaillit, les réamorçages subséquents empruntent le même canal. Or nous savons qu'un premier arc en retour de faible amplitude, donc à faible distance d'amorçage, peut être suivi par un arc subséquent d'intensité supérieure.

En pratique on constate que le précurseur descendant n'est ni attiré ni repoussé par les paratonnerres. Il suit le parcours aléatoire des charges d'espace. Les chocs positifs quant à eux ont la fâcheuse tendance à tomber n'importe où, y compris dans les zones théoriquement protégées par le modèle électrogéométrique !

La norme NFC17100 prend en compte un diamètre de 20 m pour une protection au niveau 1, c'est à dire pour une efficacité de 98 %. Compte tenu des dimensions de l'antenne, l'arc de cercle de la sphère au niveau de l'antenne peut être assimilé à une droite. La protection de l'antenne par des pointes est donc possible.



Un cerclage métallique au sommet du tube extérieur comportera 3 (ou 4) tiges métalliques de 25 cm de longueur. Ces dernières seront inclinées de 45°. La longueur pourra être diminuée légèrement si le risque d'effet d'ombre vis à vis de l'antenne est trop important.

Ce système sera ensuite raccordé à la terre par une descente terminée au niveau du sol par une patte d'oie. Afin d'éviter le gel, les conducteurs seront enterrés à environ 80 cm.

Ces différentes liaisons seront assurées par un conducteur de cuivre de forte section. Un plat de 30 mm x 2 mm convient tout à fait.

4.4. Equipotentialité des masses.

Le bon fonctionnement des systèmes électriques va de pair avec la sécurité des personnes : seule l'équipotentialité importe. Afin de garantir une équipotentialité correcte au niveau des systèmes d'acquisition, nous vous conseillons d'installer le matériel dans un coffret métallique ou sur une étagère métallique qui servira de référence de potentiel. Le conducteur vert/jaune de l'alimentation électrique sera raccordée à cette masse. Les composants de protection devront également être référencé à ce potentiel (voir paragraphe suivant). L'impédance des conducteurs étant selfique, c'est à dire que leur impédance augmente avec la fréquence, toutes les liaisons de masse doivent être le plus court possible. L'idéal est le contact vissé. Ainsi, nous vous conseillons de raccorder le récepteur à la masse par 2 équerres métalliques vissées à la table métallique et au boîtier du récepteur. Attention à gratter la peinture afin d'assurer un contact correct.

Afin de limiter les différences de potentiel entre l'antenne et les systèmes d'acquisition, nous vous conseillons d'installer un câble de masse en parallèle du câble d'antenne. Ce câble de forte section ($\approx 35 \text{ mm}^2$) sera raccordé sur la platine de fixation de l'antenne et à la masse de référence au niveau des systèmes d'acquisition.

5. Protection contre les surtensions.

Dans tous les cas d'une protection foudre, il convient de limiter les surtensions sur les câbles externes, c'est à dire sortant du bâtiment. Un éventuel écrêteur primaire peut être installé en entrée du bâtiment pour dériver les courants externes à la terre en réduisant leur circulation dans les masses. Un écrêteur secondaire (éventuellement le seul) doit être impérativement référencé à la masse de l'appareil protégé.

5.1. Choix des parafoudres.

Il existe différents types de parafoudres : éclateurs, varistances, transil,....

Les éclateurs présentent l'avantage d'avoir un très fort pouvoir d'écoulement. On trouve dorénavant des composants de ce type capables de supporter des impulsions type foudre de 100 kA (chez Dhen, Soulé ou Phoenix contact par exemple). Ils présentent également une très faible capacité parasite ce qui permet de protéger les liaisons HF type antenne sans dégrader le signal utile. Malheureusement, ces composants sont lents et leur résiduelle est de l'ordre de quelques kilovolts.

Les varistances sont des composants à base d'oxyde de zinc dont la résistance varie avec la tension. Des progrès importants ont été faits dans ce domaine et certaines varistances peuvent supporter des énergies importantes. Leur principal défaut est leur vieillissement. Après avoir encaissé quelques impulsions, les varistances fuient. Ce courant permanent provoque un échauffement qui peut entraîner leur destruction. Il est conseillé de placer en série avec la varistance un fusible qui la déconnectera. Les fabricants intègrent maintenant cette protection directement dans le module de protection.

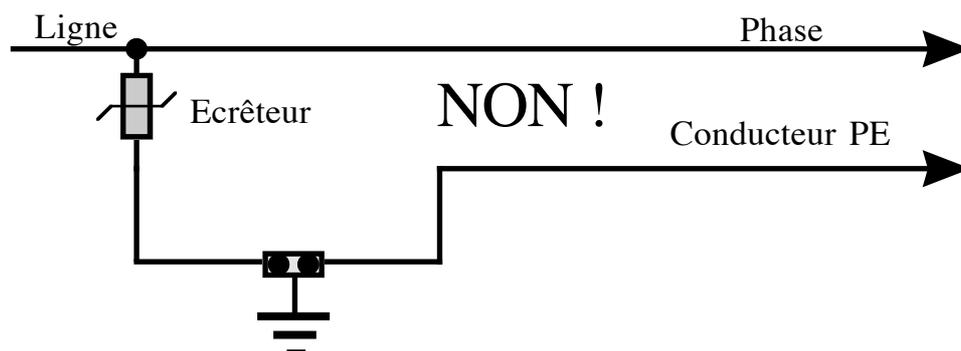
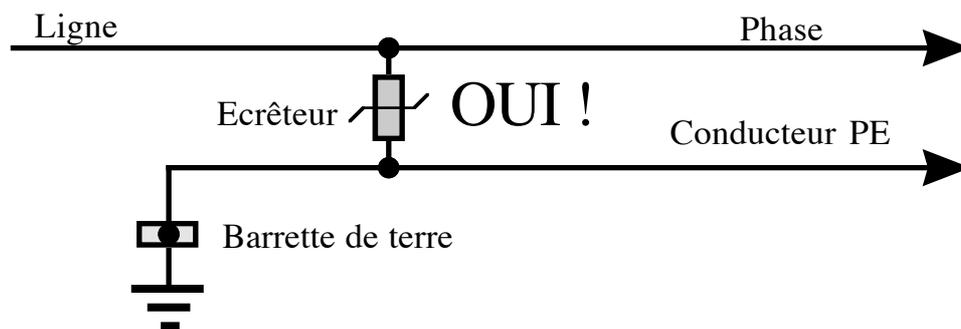
Les transils sont des composants de protection type diode très rapides mais avec faible pouvoir d'écoulement. Ces composants sont réservés à la protection des cartes électroniques.

Malheureusement, il est en pratique impossible d'installer un limiteur de surtension possédant à la fois un pouvoir d'écoulement important et permettant d'obtenir une

résiduelle faible compatible avec la tenue des équipements aux impulsions type foudre. Ainsi, il est conseillé de mettre en oeuvre une protection étagée. Les parafoudres primaires ont un fort pouvoir d'écoulement. Ils peuvent supporter quelques dizaines de kA. Leur résiduelle, de l'ordre de 2 ou 3,5 kV, peut être trop importante pour des équipements électroniques classiques. Des parafoudres secondaires de plus petite puissance peuvent alors être intégrés dans les tableaux de distribution. Lorsque la distance entre les parafoudres primaire et secondaire est inférieure à 30 m, une self série doit être rajoutée entre les deux protections. Cette self est de l'ordre de 30 μ H. Lorsque la distance entre les 2 éléments est supérieure à 30 m, la mise en place de cette self n'est pas nécessaire. De nouveaux composants de protection, notamment chez Phoenix Contact permettent de cumuler un fort pouvoir d'écoulement et une faible résiduelle sans rajouter de découplage entre deux éléments. Nous vous conseillons d'utiliser ce type de composants pour protéger votre récepteur.

5.2. Raccordement des parafoudres.

Plus que la qualité intrinsèque du parafoudre, c'est le soin apporté à son installation qui conditionne son efficacité. Limiter la longueur du câblage entre écrêteur et masse de l'équipement est une nécessité. Supposons que la tension résiduelle aux bornes d'un parafoudre soit inférieure à 2 kV. Ce composant écoule une impulsion foudre de 10 kA en 1 μ s. S'il est en série avec un câble de masse de 1 mètre, la tension résiduelle totale dépasse 10 kV ! Un écrêteur secondaire au voisinage de l'équipement à protéger est alors nécessaire. Bien que la foudre ne soit pas un phénomène à très hautes fréquences, le câblage doit rester très court.



Le composant de protection sera donc installé dans un coffret raccordé très court à la table métallique sur laquelle est posé le récepteur. Un schéma récapitulatif sera donné en annexe.

Le module de protection regroupant à la fois un fort pouvoir d'écoulement et une faible résiduel est référencé chez Phoenix Contact sous l'appellation Flashtrab FLT-PLUS CTRL.

6. Résumé.

En conclusion, la protection de la station de réception GPS du Saint Eynard peut être assurée en mettant en oeuvre les protections suivantes :

- Le récepteur sera installé sur une étagère métallique. Son coffret sera raccordé très court à cette tôle par des équerres métalliques
- Un module de protection type parafoudre sera installé dans le local. Sa mise en oeuvre sera effectuée avec un raccordement le plus court possible par rapport à la masse de l'étagère.
- Un cerclage métallique sera installé sur le pilier de béton. 3 électrodes de 25 cm environ seront installées sur ce conducteur. L'ensemble sera raccordé à la terre au niveau du pilier de béton.
- Un câble de masse sera placé en parallèle du câble d'antenne. Ce câble sera raccordé à la platine de fixation de l'antenne et à l'étagère métallique sur laquelle est référencée le récepteur.

Annexe 1 : Schéma général de protection

