



Protection contre les effets de la foudre dans les installations faisant appel aux énergies renouvelables

GUIDE

ADEME



Agence de
l'Environnement
et de la Maîtrise
de l'Energie

SOMMAIRE

Avant-propos

Introduction

1	Objectifs de l'étude et domaine d'application	4
1.1	Objectifs	4
1.2	Lexique spécifique	5
2	Constats sur le terrain	5
2.1	Enseignements	6
2.2	Dégâts rencontrés sur les installations	6
2.3	Exemples	7
2.4	Conclusion	9
3	Dispositifs de protection foudre	10
3.1	Principe de la protection	10
3.2	Protection contre les coups directs	10
3.3	Protection contre les coups indirects	15
3.4	Evaluation du risque foudre	24
4	Préconisations de protection contre la foudre	26
4.1	Protection contre les effets directs	26
4.2	Protection contre les effets indirects	27
4.3	Evaluation du risque foudre pour les installations	36
5	Mesures de protection pour les installations	37
5.1	Système d'électrification photovoltaïque individuel (SEI)	38
5.2	Générateur photovoltaïque pour habitat	40
5.3	Refuge de montagne	43
5.4	Système pour télécommunications (relais radio)	45
5.5	Système de télécommunications (faisceau hertzien)	48
5.6	Générateur photovoltaïque avec couplage réseau	51
5.7	Pompage photovoltaïque	54
5.8	Aérogénérateur pour alimentation autonome	57
Annexe A		60
A.1	Formation et structure d'un nuage orageux	60
A.2	Caractéristiques d'un coup de foudre	60
A.3	Effets dus à la foudre	62
Annexe B		66
B.1	Normes	66
B.2	Bibliographie	66
B.3	Quelques fournisseurs de parafoudres	67

AVANT-PROPOS

Ce guide de protection contre les effets de la foudre dans les installations de production d'électricité à partir des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien) a été rédigé par M. Gérard Moine, ingénieur systèmes photovoltaïques chez Transénergie à la demande, et pour le compte du Département des Énergies Renouvelables de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Certains aspects techniques du contenu de ce guide ont été validés par M. Alain Charoy, ingénieur expert en compatibilité électromagnétique au sein de la société AEMC.

Avec ce guide, l'ADEME a souhaité faire bénéficier les professionnels du photovoltaïque et de l'éolien des connaissances acquises par les auteurs dans ce domaine.

Cependant, l'ADEME et les auteurs rappellent que les recommandations proposées sont données à titre indicatif et ne peuvent en aucun cas engager leur responsabilité dans la mesure où les préconisations ne peuvent pas garantir une protection absolue contre des effets destructifs.

Mots clefs : Protection foudre - Énergies renouvelables – Système photovoltaïque – aérogénérateur – Photovoltaïque – Éolien

Summary: *For most of the professionals involved in renewable energy sources, lightning protection is often an issue. The aim of this document is to provide readers with state-of-the-art information on the subject and propose recommendations for renewable energy sources installations validated by lightning experts.*

ADEME / DER
André Claverie
500 route des Lucioles
06560 SOPHIA ANTIPOLIS

TRANSENERGIE
Gérard Moine
3 D Allée C. Debussy
69130 ECULLY

AEMC
Alain Charoy
86, rue de la liberté
38 180 SEYSSINS

ADEME, Sophia Antipolis, 2001

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le code de la propriété intellectuelle (Art. L122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le code pénal. Seules sont autorisées (Art. L122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L122-10 à L122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

INTRODUCTION

Spectaculaire décharge électrostatique disruptive, la foudre frappe en moyenne en France 1,6 millions de fois par an soit environ trois foudroiements au kilomètre carré.

Les installations de production d'électricité autonomes (systèmes photovoltaïques ou aérogénérateurs, particulièrement en sites isolés) sont soumises, comme tout système électrique, aux risques induits par la foudre. Régulièrement, des composants de ces installations sont détruits (régulateurs, onduleurs), entraînant une baisse de fiabilité, et une hausse des coûts d'exploitation pour palier aux dégâts.

L'expérience montre que les protections installées contre la foudre, quand elles existent, ont souvent été mises en place sans étude sérieuse sur leur efficacité. Avec l'accroissement du nombre d'installations de production d'électricité par énergie renouvelable, il semble important d'examiner le problème avec attention, afin de pouvoir proposer des solutions adaptées et efficaces.

Toutefois, les recommandations proposées sont données à titre indicatif et ne peuvent pas garantir une protection à toute épreuve contre des effets destructifs mais devraient générer une diminution sensible des dégâts occasionnés.

1 OBJECTIFS DE L'ETUDE ET DOMAINE D'APPLICATION

1.1 Objectifs

L'objectif général de ce guide est d'apporter une aide à l'usage des concepteurs et installateurs qui ont à mettre en œuvre des dispositifs de protection contre les effets de la foudre dans les installations de production d'électricité par énergies renouvelables.

Le domaine d'application se limite essentiellement aux systèmes les plus courants utilisant l'électricité d'origine photovoltaïque ou éolienne.

Sept exemples sont traités d'une manière très pratique :

Alimentation par générateur photovoltaïque :

- Habitat isolé ;
- Refuge de montagne ;
- Système de pompage ;
- Habitation raccordée au réseau ;
- Relais radio ;
- Relais de télécommunication par faisceau hertzien.

Alimentation par aérogénérateur :

- Habitat isolé.

Les préconisations proposées concernent la protection sur les liaisons électriques de chaque système et supposent que chaque composant constituant le générateur ait

sa propre protection interne définie par un niveau.

Ce guide ne traite pas spécifiquement de la protection foudre pour les fermes éoliennes connectées au réseau, ni pour les microréseaux alimentés par systèmes de production centralisée d'électricité par énergies renouvelables.

1.2 Lexique spécifique

- **Terre** : masse conductrice de la terre dont le potentiel électrique en chaque point est pris, par convention, égal à zéro.
- **Prise de terre** : ensemble de conducteurs enterrés reliés entre eux et en contact direct avec le sol.
- **Masse** : partie conductrice d'un matériel électrique susceptible d'être touchée et qui n'est pas normalement sous tension mais peut le devenir.
- **Barre de terre** : borne ou barre prévue pour la connexion aux dispositifs de mise à la terre de conducteurs de protection, y compris les conducteurs d'équipotentialité.
- **Liaison équipotentielle** : liaison électrique mettant au même potentiel, ou à des potentiels voisins, des masses et des éléments conducteurs.
- **Conducteur de protection (symbole PE)** : conducteur prescrit dans certaines mesures de protection contre les chocs électriques et destiné à relier électriquement certaines des parties suivantes :
 - Masses,
 - Éléments conducteurs,
 - Barre de terre,
 - Prises de terre.
- **Paratonnerre** : dispositif destiné à guider le courant de foudre à la terre. Vient du verbe «se parer » qui veut dire se protéger et du substantif tonnerre qui dénomme le bruit se produisant lors d'un choc de foudre. Ce terme est donc impropre puisqu'un paratonnerre ne protège pas du bruit. Un paratonnerre devrait donc s'appeler un parafoudre.
- **Parafoudre** : dispositif destiné à limiter le niveau de surtensions (par exemple d'origine atmosphérique) transmises par les câbles à un niveau compatible avec la tension de tenue aux chocs des matériels de l'installation et des matériels alimentés par cette installation. Parafoudre vient du verbe « se parer » (se protéger) et du substantif foudre. Ce terme est impropre car un parafoudre ne protège pas de la foudre mais de ces conséquences qui sont les surtensions.

2 CONSTATS SUR LE TERRAIN

Une enquête concernant la protection foudre dans les installations de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables (ENR) a été menée, durant l'année 2000, sous forme de questionnaire auprès d'ensemblers et installateurs en France et dans certains pays du monde.

Les questions portaient sur les caractéristiques des différentes installations et les phénomènes observés.

- Architecture du générateur : installation photovoltaïque ou éolienne, présence ou non d'un onduleur, puissance, etc. ;

- Existence ou non de protection foudre sur les installations ;
- Phénomènes observés : nature, fréquence, dégâts occasionnés.

D'une manière générale, tous les installateurs ont été plus ou moins confrontés au foudroiement d'installations si bien que la plupart se sentent concernés par la mise en œuvre de protection efficace contre les effets de la foudre.

2.1 Enseignements

- La plupart des dégâts occasionnés s'expliquent par une méconnaissance de la part des concepteurs et installateurs des règles de l'art en terme de protection foudre (absence de protection appropriée ou mauvaise mise en œuvre)
- Parmi les installations touchées la plupart se situent à des altitudes élevées (supérieures à 1000 m), ce qui n'est pas surprenant.
- Certains générateurs sont plus fréquemment victimes de la foudre pour un type d'applications (exemple : installations de télécommunications, refuges de montagne,...). Ceci s'explique essentiellement par les particularités du site : présence d'antennes sur des points hauts, altitude, présence de liaisons extérieures, etc.
- D'une manière générale, les installations autonomes sont moins sensibles à la foudre que des installations raccordées au réseau électrique aérien. A titre d'exemple, des relais radio ont été alimentés par des générateurs photovoltaïques autonomes pour s'affranchir, avec succès, des dégâts de la foudre induits de manière récurrente par le réseau d'alimentation.
- Les dégâts sont très variables selon les sites et le type de protection mis en œuvre

2.2 Dégâts rencontrés sur les installations

Parmi les dégâts rencontrés :

- modules photovoltaïques détruits par amorçage entre une polarité du module et le cadre (généralement 1 seul par site). Conséquences : verre brisé, destruction des bornes de connexion
- destruction des diodes by-pass ou/et anti-retour
- explosion de la boîte de jonction
- destruction de protection type disjoncteur ou parafoudre
- explosion de la batterie d'accumulateurs
- destruction des équipements électroniques (régulateur, acquisition de mesures, onduleur,...)

Les équipements électriques (onduleur, régulateur, acquisition de mesures, récepteurs, diodes,...) sont les plus souvent endommagés, plus rarement les modules ou le parc batterie.

Le montant des dégâts engendrés est très variable selon les circonstances de foudroiement. Néanmoins, le coût de remise en état est de l'ordre de quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'euros, sans compter les frais de déplacement qui sont souvent très élevés compte tenu de l'isolement des sites et les conséquences indirectes d'absence d'alimentation.

2.3 Exemples

A partir du retour d'expérience, deux exemples sont donnés ci-dessous pour montrer la nature des dégâts occasionnés dans deux contextes différents :

- un exemple en République Dominicaine pour les petits systèmes photovoltaïques d'électrification individuels ;
- un exemple en France pour un système photovoltaïque situé sur un point haut à proximité d'équipements de télécommunication.

2.3.1 Installations de type individuel

Contexte :

- République Dominicaine
- Constat : 3 ou 4 cas de foudroiement sur 800 systèmes ont été répertoriés sur 3 ans
- Site : faible altitude (quelques centaines de mètres) avec un niveau de foudroiement moyen
- Caractéristiques du générateur photovoltaïque : module 50 W, batterie 105 Ah – 12 V
- Module fixé sur toit en zinc de l'habitation
- Absence de protection foudre spécifique hormis la présence de varistances dans le régulateur

Dégâts occasionnés :

- destruction du module : verre brisé, connexions fondues (Photo 1)
- destruction du régulateur (transistor MOSFET) (Photo 2)
- explosion d'une boîte de jonction (Photo3) et de la batterie (Photo 4)



Photo 1: Destruction du module



Photo 2: Régulateur endommagé

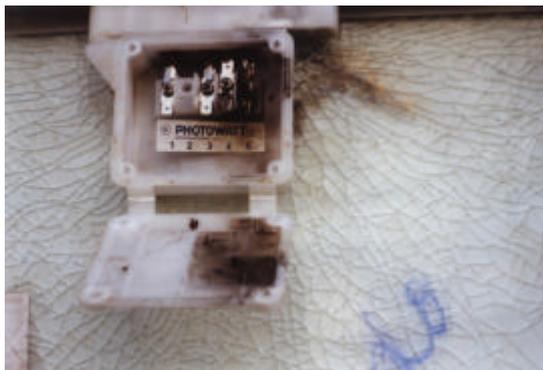


Photo 3: Boîte de connexions détruite



Photo 4: Batterie explosée

2.3.2 Installation photovoltaïque alimentant une tour de guet pour surveillance de feu de forêt

Contexte :

- Site : France, point haut (1 400 m) avec niveau de foudroiement important
- Caractéristiques du générateur photovoltaïque : 10 modules 50 W, batterie de capacité 600 Ah – 24 V, onduleur
- récepteurs 24V : lampes, fluorescentes, surpresseur,...
- Absence de protection foudre spécifique hormis la présence de varistances dans le régulateur

Dégâts occasionnés (voir photos 5 à 9):

- destruction d'un module
- destruction de la boîte de jonction
- explosion d'un disjoncteur et des varistances
- explosion du béton support du surpresseur

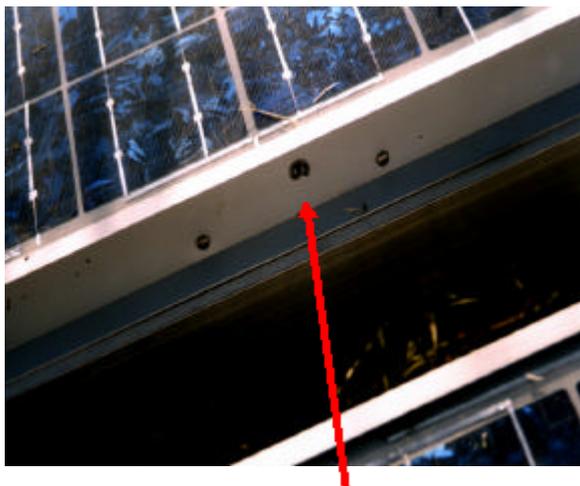


Photo 5: Amorçage entre un conducteur actif et le cadre du module



Photo 6: Explosion de la boîte de jonction

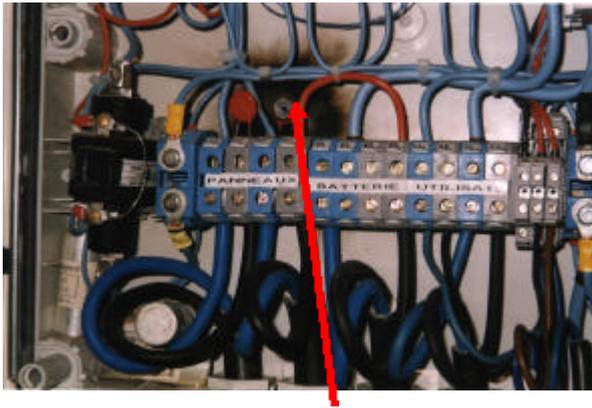


Photo 7: Explosion d'une varistance



Photo 8: Explosion de disjoncteurs

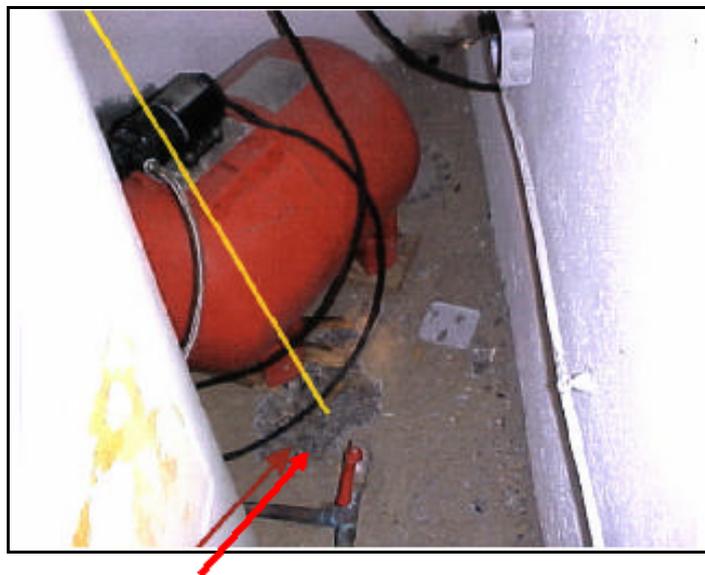


Photo 9: Explosion du béton, chape du surpresseur

Ces deux exemples mettent en évidence que les effets de la foudre sont des problèmes réels quelle que soit la taille des générateurs photovoltaïques et leur situation.

2.4 Conclusion

Chaque cas rencontré serait à étudier particulièrement, toutefois, d'une manière générale, il est constaté :

- la méconnaissance ou la difficulté, de la part des concepteurs ou installateurs, de transposer les normes existantes en matière de protection foudre aux installations ENR;
- l'absence d'évaluation au préalable du risque foudre;
- l'absence ou la mauvaise mise en œuvre de dispositifs de protection contre les effets de la foudre, selon les différentes configurations rencontrées.

3 DISPOSITIFS DE PROTECTION Foudre

On se reportera à l'annexe A pour des rappels sur le phénomène de la foudre avec ses caractéristiques et ses effets.

3.1 Principe de la protection

La foudre est un phénomène que l'on ne peut empêcher de se produire, engendrant ainsi un champ électromagnétique perturbateur. Toutefois, on peut en limiter les effets en respectant les trois principes de base suivants :

- Canaliser le courant de foudre vers la terre par le trajet le plus direct ;
- Réduire les surfaces de boucle de masse ;
- Limiter l'onde de surtension par des parafoudres.

Elle implique la mise en œuvre de deux systèmes distincts :

- La protection par les installations extérieures (dont d'éventuels paratonnerres) pour les effets directs ;
- La protection contre les effets indirects : limitation des surtensions par le biais de parafoudres.

Ces deux protections peuvent être complémentaires mais pour une réelle efficacité, ces équipements doivent être associés à une prise de terre unique. Dans ce contexte le réseau de terre est l'élément fondamental d'une bonne protection.

D'autre part, il y a lieu de compléter, si nécessaire, la protection d'équipements sensibles par des dispositifs contre les perturbations électromagnétiques (blindage ou utilisation de fibres optiques).

3.2 Protection contre les coups directs

La protection des installations contre les effets directs de la foudre consiste à installer des dispositifs constitués par un système conçu pour capter le courant de foudre et l'écouler vers la terre, sans causer de dommage à la structure ni aux équipements.

Parmi les structures nécessitant des installations extérieures de protection contre la foudre, il convient de citer notamment :

- Les bâtiments recevant du public tels que refuges de montagne, restaurants d'altitude...
- Les constructions élevées telles que, clochers, antennes,...
- Les installations ou bâtiments très exposés comportant des équipements sensibles,...
- Certaines installations classées
- Etc.

Il existe trois grands types de protection contre les effets directs :

- Le paratonnerre à tige
- Le paratonnerre à cage maillée (cage de Faraday)
- Le paratonnerre à fils tendus

3.2.1 Le paratonnerre à tige

Le principe d'un paratonnerre est fondé sur la notion de distance d'amorçage. Il s'agit d'édifier, en haut des structures à protéger, une tige généralement effilée, reliée à la terre par le chemin le plus direct. La protection offerte dépend de la situation de cette tige sur la structure (émergence, lieu d'implantation).

Lors d'un orage, la tige simple (dite de Franklin) présente une amplification de champ telle qu'une décharge ascendante puisse y prendre naissance. La capture de la décharge descendante permet l'écoulement à travers la pointe et la descente à la terre du courant de l'arc en retour.

La méthode de la sphère fictive est une loi empirique qui prédit la zone exposée à la foudre. Il définit pour un choc négatif « une distance d'amorçage ». Cette distance correspond à la longueur présumée de l'arc en retour. Elle ne dépend que du courant crête du premier choc. Cette distance pour un courant crête I , vaut sensiblement 10 fois I exprimé en kA élevé à la puissance deux tiers. Ce rayon d'amorçage définit une sphère virtuelle, la zone protégée est celle sous la sphère.

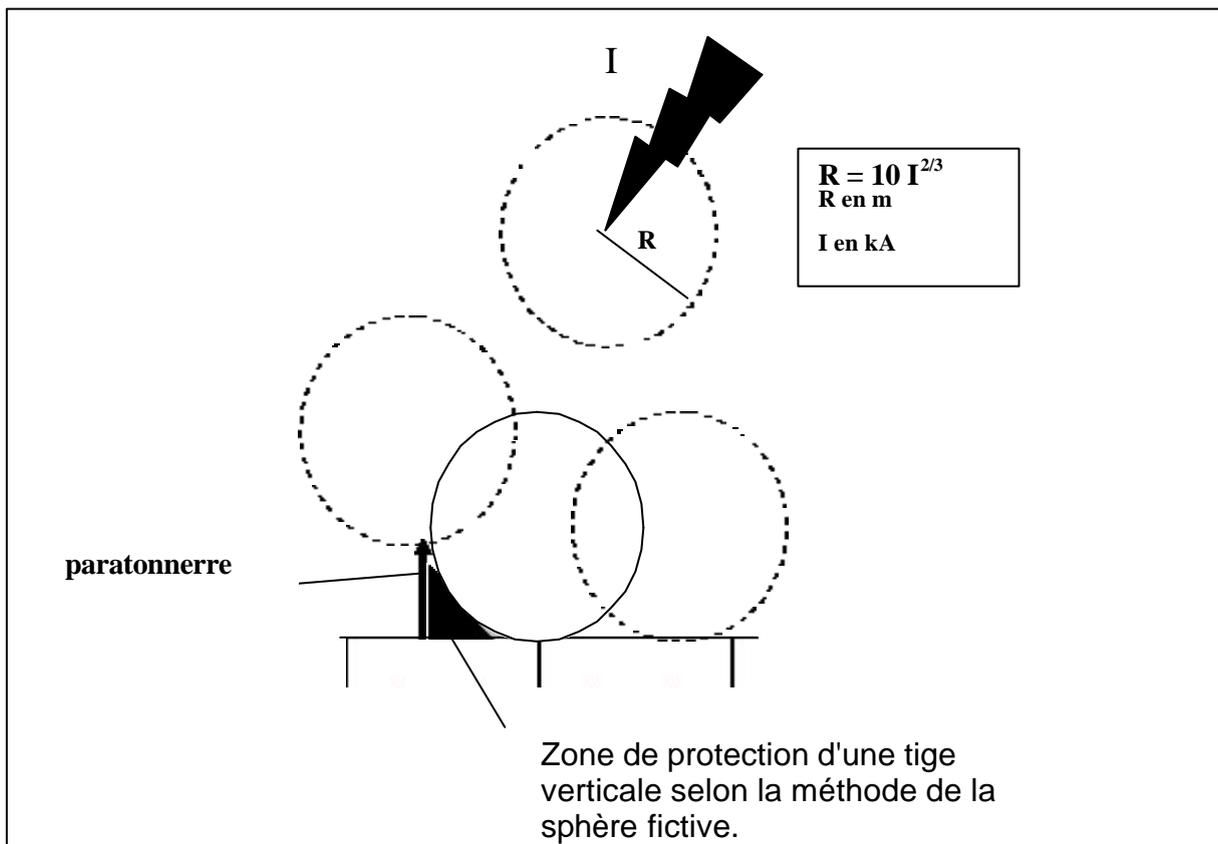


Figure 1: Zone de protection avec paratonnerre à tige

3.2.2 Le paratonnerre à cage maillée (cage de Faraday)

La protection par cage maillée consiste en la réalisation à la surface du bâtiment à protéger d'une cage de Faraday à larges mailles (10 à 20 m de côté), reliées au sol par des prises de terres. Des tiges de faible dimension (0,5 m), ou pointes de choc, sont disposées aux nœuds des mailles, à l'aplomb des descentes et éventuellement sur les parties émergentes telles que les cheminées, édicules, etc.

Les descentes sont placées à l'extérieur des bâtiments, particulièrement aux angles saillants, espacées de 20 m au plus. Elles aboutissent à des prises de terre reliées entre elles par une structure conductrice enterrée formant le réseau terre.

Constituer une cage de Faraday est la solution la mieux adaptée pour assurer la protection contre la foudre, mais la plus coûteuse.

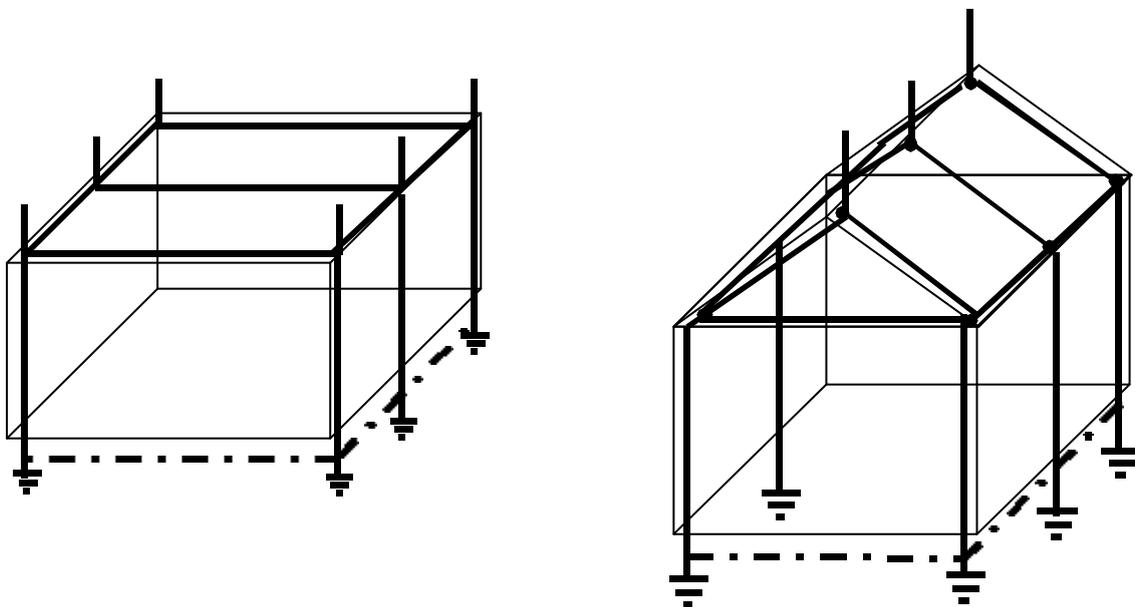


Figure 2: La cage de Faraday

3.2.3 Le paratonnerre à fils tendus

Le principe consiste à capturer la foudre avant qu'elle ne touche des personnes ou des équipements.

Parfois la protection d'une zone par un paratonnerre à pointe est inefficace. Mieux vaut mettre en œuvre la solution des réseaux suspendus qui consiste à tendre des câbles au-dessus du site à protéger. On détermine la hauteur et le réseau de câblage par la méthode du modèle électro-géométrique qui permet de simuler l'influence de la foudre par une sphère fictive de rayon fonction du courant crête du premier arc en retour.

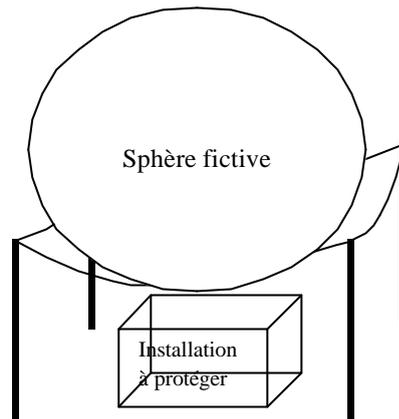


Figure 3 : Le paratonnerre à fils tendus

3.2.4 Prise de terre de paratonnerre

Toute descente doit être reliée à une prise de terre dont l'intérêt de la nécessité d'une faible valeur est à relativiser.

En effet, supposons qu'un paratonnerre soit raccordé à la terre par un conducteur de descente fixé au mur d'un bâtiment et isolé des masses. Un câble de masse se trouve situé en étage à proximité du mur supportant le conducteur de descente.

Déterminons la différence de potentiel (d.d.p.) entre ce câble de descente et le câble de masse lors d'un coup de foudre direct ($di/dt = 40 \text{ kA}/\mu\text{s}$).

La d.d.p. entre conducteur de descente et masse vaut : $U = L di/dt$

Tout câble présente une inductance linéique d'environ $1 \mu\text{H}/\text{m}$ soit $10 \mu\text{H}$ pour le conducteur de descente.

La d.d.p. induite est de 400 kV ce qui peut provoquer un amorçage à travers le mur et ceci quelque soit la résistance de terre du bâtiment.

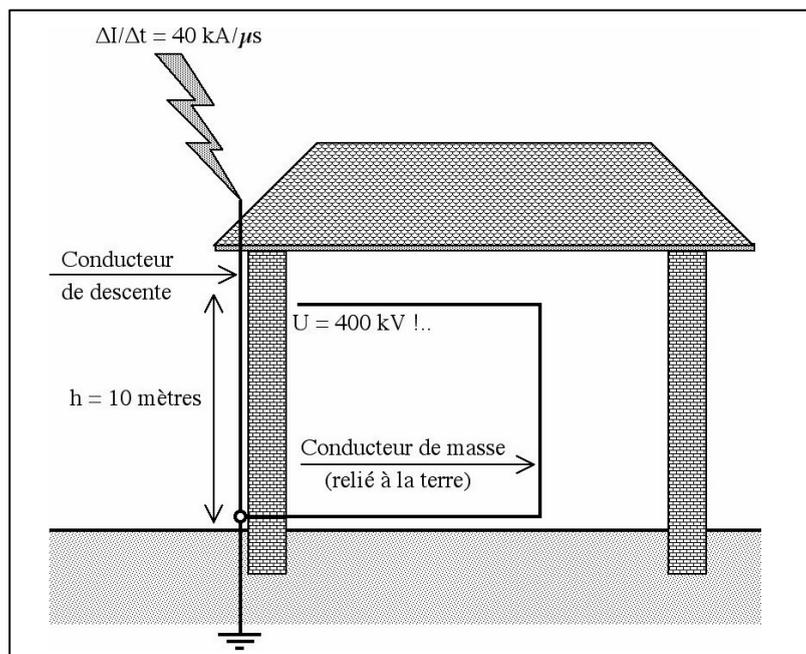


Figure 4 : D.d.p. entre conducteur de descente et masse

En conséquence, pour limiter l'élévation de potentiel, il y a intérêt de diviser le courant de foudre en multipliant les conducteurs de descente (exemple : cage maillée).

Toutefois, que ce soit pour la sécurité des personnes ou la sécurité des équipements électriques et électroniques, c'est l'équipotentialité des masses qui est déterminante et non pas la valeur de résistance de terre.

Une prise de terre de paratonnerre est constituée :

- Soit par trois conducteurs de 2 à 3 m de longueur disposés en patte d'oie et enfouis horizontalement à au moins 50 cm de profondeur (Figure 5),
- Soit par un ensemble de deux piquets verticaux d'une longueur totale de 2 m distants d'au moins 2 m et reliés entre eux par un conducteur enterré en tranchée à au moins 50 cm de profondeur.

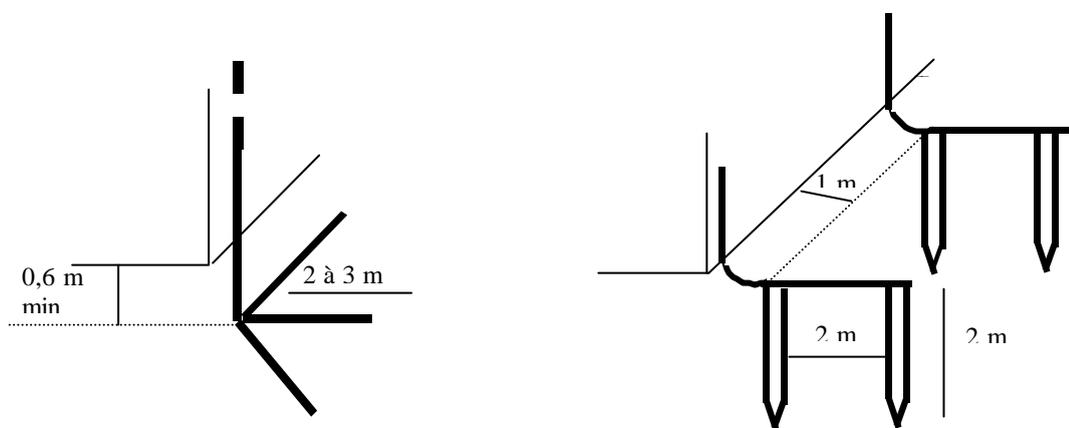


Figure 5 : Patte d'oie et piquets verticaux

Lorsque le bâtiment comporte une prise de terre à fond de fouille, il y a lieu de la relier aux prises de terre des installations de paratonnerre par un conducteur de même nature et de même section que les conducteurs de descente.

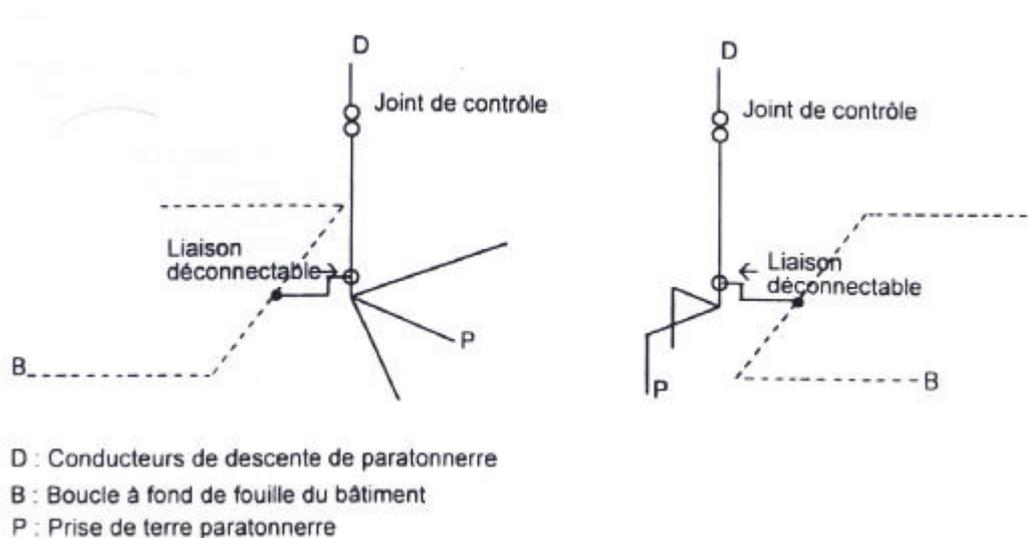


Figure 6 : Prise de terre de fond de fouille

On se reportera utilement aux indications de la norme internationale CEI 61024-1-2 (ou NFC 17-100) pour la mise en œuvre de la protection des structures contre la foudre.

3.3 Protection contre les coups indirects

Les effets indirects de la foudre sont caractérisés par les surtensions générées par des coups de foudre directs ou à proximité des circuits d'alimentation d'énergie électrique ou de télécommunication et propagées par les réseaux de distribution et les installations. Ces surtensions, dont la valeur dépend notamment de l'intensité du courant de foudre et de la distance du point d'impact à l'installation électrique, peuvent provoquer des dommages à des équipements électriques distants et des dysfonctionnements de matériels électroniques sensibles.

Pour des installations électriques et électroniques soumises aux effets induits par la foudre, il est nécessaire de mettre en œuvre simultanément plusieurs mesures de protection, pour que celle-ci soit efficace :

- Unicité de la prise de terre
- Réalisation d'un réseau équipotentiel reliant toutes les masses des matériels électriques et les éléments conducteurs du bâtiment avec liaison à la terre ;
- Mise en place de parafoudres reliés à la masse des appareils protégés ;
- Cheminement des câbles de façon à éviter les boucles susceptibles de favoriser la génération de surtensions dues au champ magnétique rapidement variable ;
- Blindage des câbles de télécommunications et de transmission d'informations.

On a tout intérêt à penser à la protection contre les surtensions dès la phase de l'étude, car c'est à ce niveau que l'on peut agir au maximum sur la réduction des coûts. Ces dispositions ont pour objectif d'assurer à la fois :

- La sécurité pour la protection des personnes et des matériels ;
- La réduction des perturbations sur les équipements « sensibles ».

3.3.1 Principes généraux servant à la conception d'un réseau de terre

Le réseau de terre est tel un drainage qui évacue à la terre les courants parasites. Il crée une zone équipotentielle afin que la conduction d'un fort courant (foudre, défaut) ne donne pas lieu à l'apparition de potentiels transitoires dangereux. Il joue aussi le rôle de référence de potentiel pour les écrans et blindages.

Unicité de la prise de terre

Des terres séparées sur un même site peuvent être présumées assez proches pour être au même potentiel. Toutefois, elles ne garantissent jamais une équipotentialité aussi bonne et aussi sûre que celle obtenue après leur raccordement direct. Le seul réseau de terre adapté à une installation est un réseau **unique, équipotentiel** et si possible maillé.

En conséquence, sur un même site, les prises de terre de différentes installations doivent être reliées par des conducteurs de préférence en cuivre nu de section minimum 25 mm². Ces liaisons peuvent être réalisées en utilisant, par exemple, les tranchées créées pour la pose d'autres canalisations ou câbles électriques. Il est à noter que ces liaisons, si elles sont enterrées peuvent éventuellement suffire pour servir de prise de terre commune.

Réalisation d'une prise de terre

Pour réaliser un réseau de terre, il est inutile de forer le sol à grands frais surtout si le sol se trouve être rocheux.

Plusieurs solutions sont possibles pour réaliser un réseau de terre satisfaisant :

- Piquet verticaux :

Enfouissement d'un ou plusieurs piquets verticaux en acier galvanisé (longueur 2 m environ, diamètre 19 mm minimum). Cette solution a l'avantage d'être simple et pratique à mettre en œuvre dans la mesure où le sol n'est pas rocheux.

Toutefois, pour améliorer l'équipotentialité du site, il est préférable de disposer les conducteurs à l'horizontale :

- Boucle à fond de fouille :

Pour un bâtiment neuf, la prise de terre idéale est la pose d'un câble cuivre nu de section minimum 25 mm² en fond de fouille et formant une boucle autour du bâtiment.

- Ceinturage d'un bâtiment :

Pour des bâtiments existants et s'il est impossible de creuser une tranchée en périphérie du bâtiment pour y déposer la ceinture de terre, il y a lieu de ceinturer à sa base un plat de cuivre 30 mm x 2 mm, avec raccordement à au moins 4 piquets de terre répartis sur la périphérie.

- Conducteurs enfouis horizontalement en tranchée :

Une solution facile à mettre en œuvre pour réaliser une prise de terre satisfaisante est l'enfouissement d'un câble cuivre nu de section minimum 25 mm² dans une tranchée en profitant par exemple de l'exécution d'autres travaux (pose de canalisations ou câbles enterrés)

Le câble doit être enfoui à une profondeur suffisante (de l'ordre de 50 à 80 cm) pour que le sol ne soit jamais gelé. La tranchée devrait être comblée par de la terre arable de faible résistivité pour assurer un contact intime avec la surface des conducteurs enterrés.

- Massif béton

Pour un mât, le massif béton peut être admis comme prise de terre, c'est à dire que la mise à la terre du mât métallique sera réalisée par une liaison raccordée au ferrailage du massif.

Les connexions serrées ne devraient jamais être enterrées car la corrosion augmente leur résistance dans le temps. Les raccordements et dérivations

effectuées entre liaisons équipotentielles seront de préférence réalisées par brasage ou soudage.

Valeur de prise de terre

Une faible résistance de terre est parfaitement inutile au bon fonctionnement des systèmes électriques et électroniques (quelle chance pour les avions !). Seules quelques cas de terres exceptionnelles (terre de poste THT, etc.) peuvent gagner à être de faible impédance.

En terme de sécurité des personnes, la valeur de la prise de terre dépend du schéma de liaison à la terre retenue.

Dans le cas d'un schéma de liaison à la terre de type TN, la valeur de la prise de terre est complètement indifférente puisqu'elle n'intervient pas pour la sécurité des personnes, le courant de défaut éventuel passant par le conducteur de protection.

Toutefois dans le cas d'un schéma de liaison à la terre de type TT, une règle de sécurité impose une résistance de terre du bâtiment où se trouve la distribution telle que le courant de déclenchement du différentiel n'élève pas le potentiel de la terre par rapport à une terre lointaine à plus d'une tension limite de sécurité (50 V).

Avec un différentiel 500 mA, la valeur maximale de la prise de terre ne devra pas dépasser 100 ohms.

Avec un différentiel 30 mA, la valeur maximale de la prise de terre ne devra pas dépasser 1 600 ohms.

3.3.2 Equipotentialité des masses

L'équipotentialité des masses importe à la fois pour la sécurité des personnes et pour le bon fonctionnement des systèmes. En effet, lors d'un écoulement de foudre dans un conducteur, il peut y avoir perte momentanée d'équipotentialité entre différentes masses se traduisant par des surtensions dangereuses.

En conséquence, toutes les masses des équipements électriques doivent être reliées entre elles par des conducteurs d'équipotentialité ramenés à une barre d'équipotentialité.

Si les liaisons sont longues, l'équipotentialité est encore améliorée en réalisant de préférence, un réseau de masse maillé surtout si les équipements à protéger sont sensibles.

La barre d'équipotentialité est elle-même reliée à la terre par une barrette de mesure éventuelle.

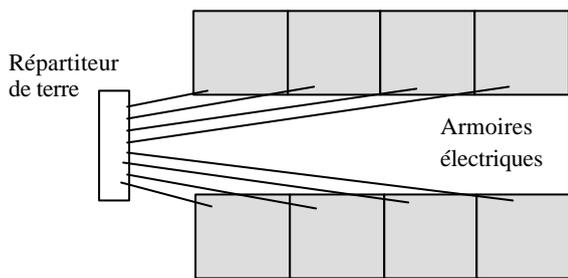


Figure 7: Mise à la terre en étoile
A éviter

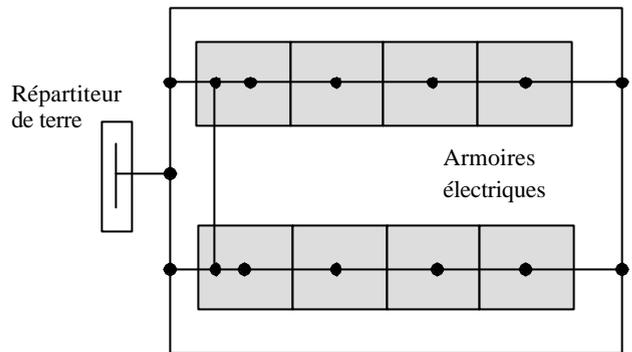


Figure 8: Mise à la terre maillée
A conseiller

D'autre part, il faut considérer les autres masses métalliques en présence telles que :

- Structures métalliques,
- Enveloppes, armatures, portes métalliques,
- Chemin de câbles,
- Réseau de canalisation, etc.

Elles gagnent à être reliées électriquement entre elles et connectées à la barre d'équipotentialité par des conducteurs les plus courts possibles.

Comme indiqué précédemment, en cas de présence de paratonnerre, ses prises de terres doivent être reliées également à la prise de terre du bâtiment.

3.3.3 Les parafoudres.

Le parafoudre est un dispositif destiné à limiter le niveau de surtensions (par exemple d'origine atmosphérique) transmises par les câbles à un niveau compatible avec la tension de tenue aux chocs des matériels de l'installation et des matériels alimentés par cette installation.

Il est généralement placé entre un conducteur actif et la masse de l'équipement à protéger, elle-même reliée à la terre et parfois entre conducteurs actifs.

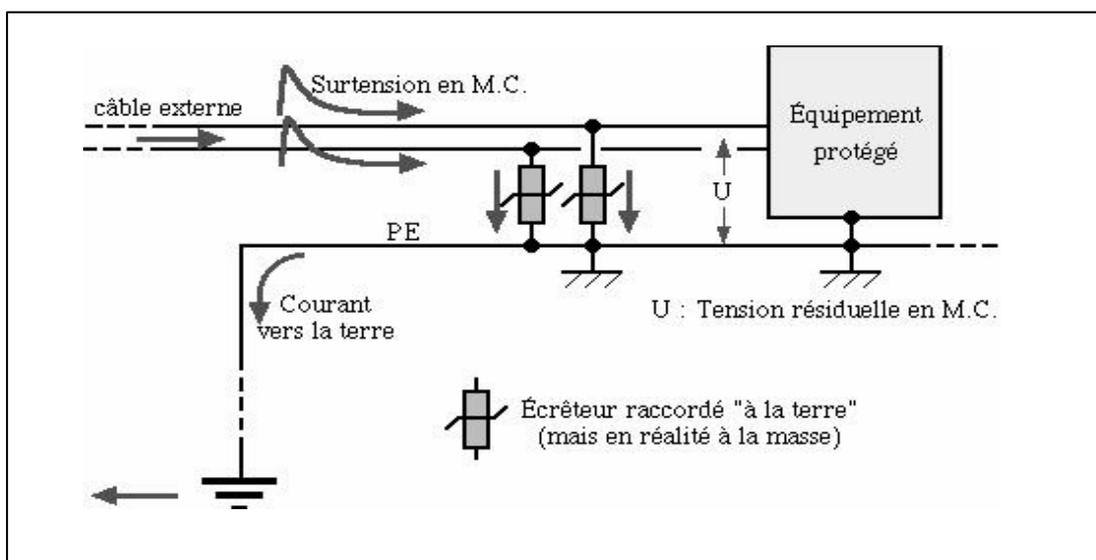


Figure 9 : Le courant de mode commun qui traverse les écrêteurs se referme par la terre (source: A. Charoy)

Sous une tension normale, le parafoudre se comporte pratiquement comme une

résistance infinie et le courant qui le traverse est nul ou négligeable.

Par contre, à l'apparition d'une surtension, dès que la tension aux bornes du parafoudre dépasse un certain seuil, le parafoudre devient conducteur, laissant s'écouler un courant, ce qui limite la tension à ses bornes et protège ainsi l'installation et les récepteurs.

Pour chaque cas d'utilisation, le parafoudre est choisi principalement en fonction des paramètres suivants :

- Tension de seuil
- Surtension admissible par les appareils à protéger
- Intensité du courant que le parafoudre devra supporter pendant la durée de surtension (la durée normalisée du courant foudre est de 20 μ s)

Constituants de parafoudres :

Les éléments généralement utilisés pour la fabrication de parafoudres sont les :

- Eclateurs à gaz ;
- Varistances ;
- Diodes Zener.

On choisira les composants en fonction du niveau de protection souhaité et du courant à écouler, ceux-ci étant utilisés seuls ou combinés.

Éclateur à gaz :

Les éclateurs à gaz (Photo 10), dans leur version courante, sont capables d'écouler à la terre des courants transitoires jusqu'à 10 kA.

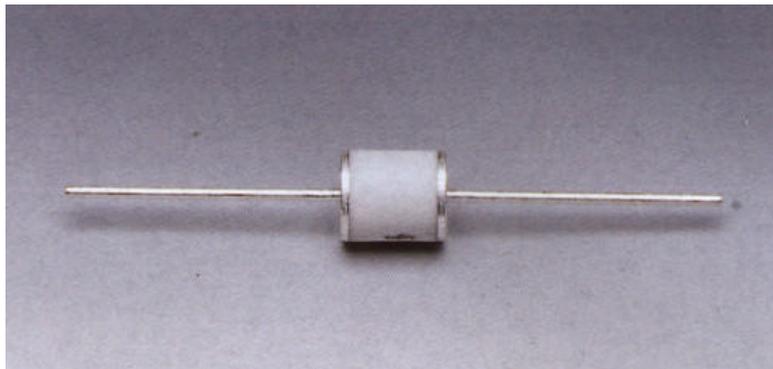


Photo 10: Éclateur à gaz

L'éclateur à gaz, dont le temps d'amorçage se situe dans la plage des centaines de nanosecondes et qui est déjà utilisé depuis plusieurs décennies dans le domaine des télécommunications, ne présente pas que des avantages.

Un inconvénient, c'est l'apparition d'un éventuel courant de suite. En cas d'amorçage de l'éclateur, un circuit électrique à basse impédance avec des tensions de plus de

24 V est en mesure de maintenir l'éclateur amorcé, ce qui entraîne sa destruction. C'est pourquoi, dans les circuits utilisant des protections contre les surtensions faisant appel à des éclateurs, on monte un fusible supplémentaire ou une varistance en série qui coupe alors rapidement le circuit dès la fin de surtension.

Varistance

A peu près de même taille que les éclateurs à gaz, certaines varistances (Photo 11) sont désormais capables d'écouler des dizaines de kA. Elles ne connaissent pas le problème du courant de suite. Pour protéger les circuits de commande et de contrôle, on utilise des varistances pour la protection moyenne avec des courants de décharge de l'ordre de 2,5 kA à 50 kA. Elles sont alors déjà plus encombrantes que les éclateurs à gaz avec une capacité de décharge de 10 kA.

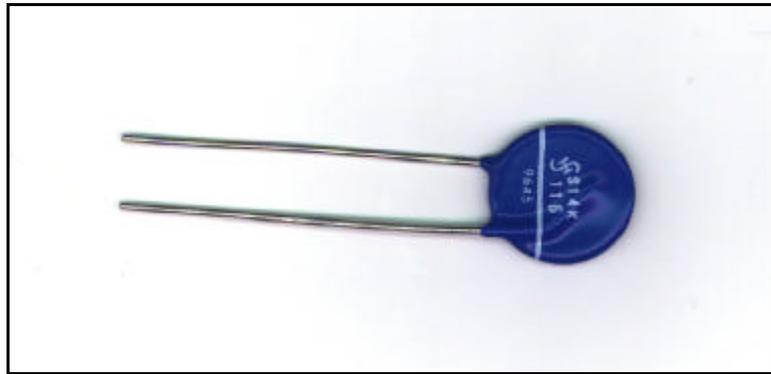


Photo 11: Varistance

Mais les varistances présentent aussi des inconvénients, qu'il importe de ne pas négliger, à savoir leur vieillissement progressif à chaque surtension. Cela provoque un courant de fuite qui crée un échauffement du composant par la tension permanente, jusqu'à la nécessité d'être remplacé.

Diode Zener (à grosse jonction)

Très souvent, malgré la présence de parafoudres type varistances, la tension résiduelle est encore trop élevée pour les délicats montages électroniques très sensibles aux surtensions. Il faut donc intégrer un nouvel étage dans le circuit de protection.

On utilise pour cela des diodes Zener bidirectionnelles (Photo 12), qui présentent l'avantage de limiter la tension à environ 1,8 fois la tension nominale avec un temps de réaction extrêmement rapide. Un de leur inconvénient majeur est leur très faible dissipation d'énergie (de l'ordre de 1J).

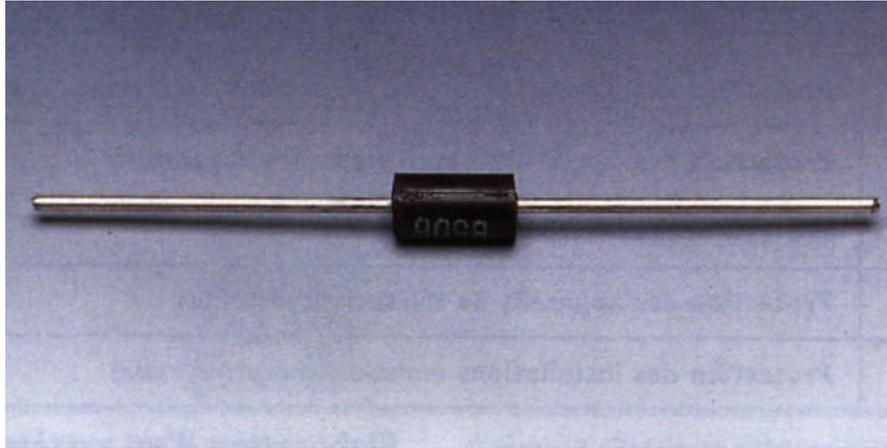


Photo 12: Diode bidirectionnelle

Parafoudres combinés

Pour assurer une bonne protection, une combinaison de plusieurs éléments est parfois réalisée afin de pouvoir exploiter les avantages des différents composants éclateur, varistance et diode. Pour cela on réalise un montage indirect en mettant en parallèle des composants avec des impédances de découplage.

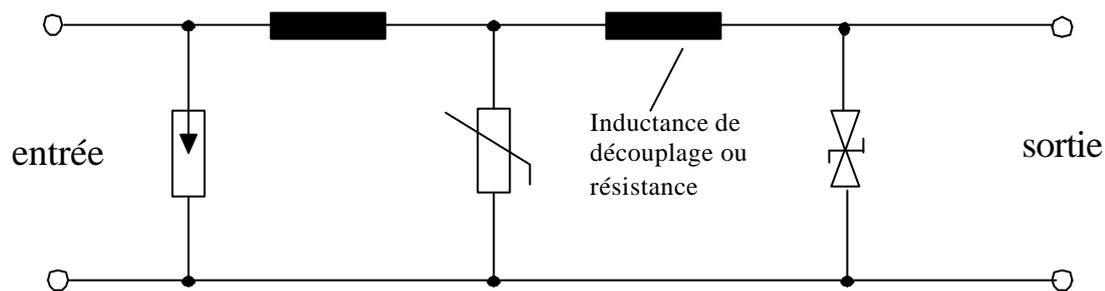


Figure 14: Montage combiné

Caractéristiques d'un parafoudre :

Les parafoudres sont essentiellement caractérisés par :

- U_c : tension maximale en régime permanent aux bornes du parafoudre sans affecter son fonctionnement
- U_p : niveau de protection (tension de crête aux bornes du parafoudre pendant le passage du courant nominal de décharge)
- I_n : courant nominal de décharge (valeur de crête du courant de forme d'onde 8/20 μ s que le parafoudre peut écouler 20 fois)
- I_{max} : courant maximal de décharge (valeur de crête du courant de forme d'onde 8/20 μ s que le parafoudre peut écouler 1 seule fois)

Choix d'un parafoudre :

Le choix des parafoudres s'effectue en fonction des critères suivants :

- U_c : Tension maximale de fonctionnement aux bornes du parafoudre
- U_p : niveau de protection dépendant des appareils à protéger. Pour être efficace, U_p doit être inférieure à la tension de tenue aux chocs des appareils et des circuits à protéger.
- I_n : La valeur de I_n est fonction du risque et de la densité de foudroiement (de 5 à 20 kA)

Installation de parafoudres :

Les parafoudres s'installent, d'une manière générale, sur toutes les lignes arrivant ou sortant du bâtiment abritant les équipements à protéger.

Un seul parafoudre peut protéger l'ensemble de l'installation, sur une même ligne, si la longueur de canalisation entre le parafoudre et le matériel le plus éloigné est inférieure à 10 m.

Dans le cas contraire, il y a lieu d'installer des parafoudres à chaque extrémité de la liaison.

Mise hors service du parafoudre en fin de vie

Les éléments entrant dans la construction de parafoudres sont susceptibles de se détériorer par vieillissement provoquant généralement un court circuit.

Pour que cela ne mette pas en danger le circuit et la sécurité d'exploitation, il y a lieu de prévoir une protection entraînant sa déconnexion :

- soit par système de déconnexion thermique interne
- soit par disjoncteur ou fusibles en amont du parafoudre,

Lorsque le dispositif de coupure mettant hors service le parafoudre a fonctionné, la protection contre les surtensions n'est plus assurée et le parafoudre doit être remplacé. L'utilisateur doit être informé de la situation par le fonctionnement d'un signal visuel ou par télétransmission. Certains parafoudres possèdent un dispositif reflétant l'état du parafoudre et permettant de le remplacer avant sa durée de vie afin d'assurer la continuité de la protection. La norme NF 61-740 exige des parafoudres secteur de mourir en circuit ouvert.

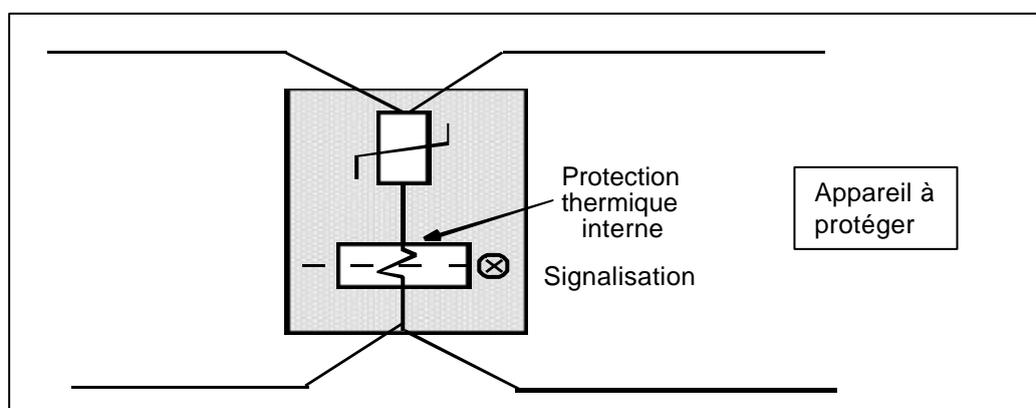


Figure 15: Mise hors service d'un parafoudre

Montage des parafoudres

Le nombre de parafoudres dépend du schéma des liaisons à la terre de l'installation car on distingue deux modes de protection :

- Mode commun : protection entre conducteurs actifs et terre;
- Mode différentiel : protection entre conducteurs actifs (entre phase et neutre ou entre polarité positive et négative)

Important

Pour qu'une protection foudre soit efficace, les liaisons entre le parafoudre et les conducteurs actifs d'une part et la liaison entre le parafoudre et la masse de l'équipement à protéger doivent être aussi courtes que possible (longueur totale < 50 cm), l'impédance de ces liaisons réduisant la protection assurée par le parafoudre.

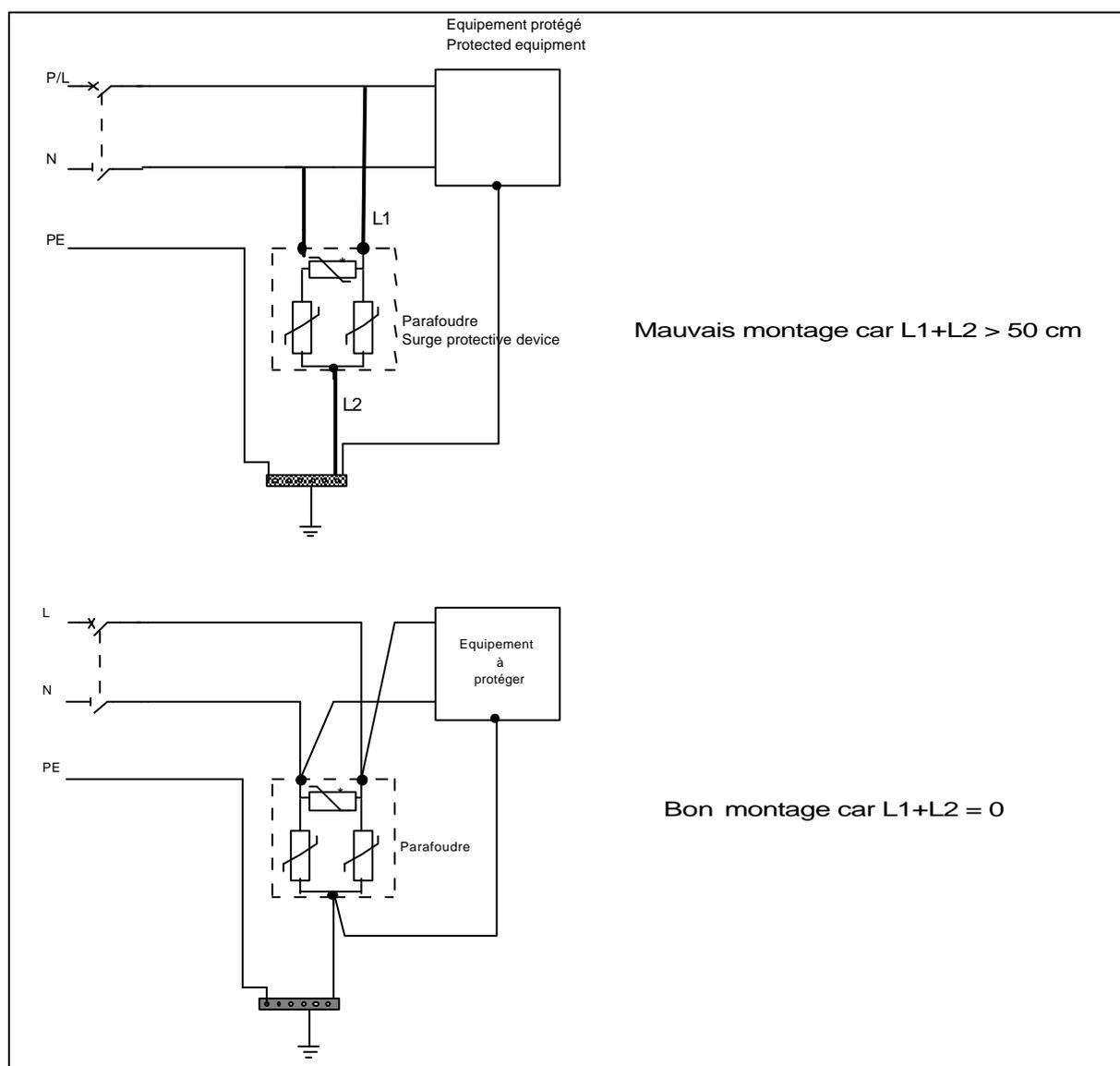


Figure 16: Montage des parafoudres (schéma type TT)

On se reportera utilement aux indications du guide UTE C 15-443 pour déterminer les parafoudres appropriés aux installations électriques basse tension.

3.3.4 Cheminement des câbles

Pour limiter les effets du champ magnétique lors d'un écoulement de foudre, le cheminement des canalisations doit être réalisé de manière à réduire le plus possible la surface de boucle :

- D'une part, entre les câbles de l'installation électrique et les liaisons courant faibles,
- D'autre part, entre les câbles et conducteurs de masse.

En pratique, ces boucles de masse seront d'autant plus faibles que le réseau de masse sera maillé.

3.3.5 Blindage

Le blindage des liaisons est un excellent moyen pour éviter, entre autres, les surtensions induites. Compte tenu du coût élevé des câbles blindés, ils sont essentiellement utilisés pour des circuits de télécommunication et de transmission d'informations. Pour être efficace, le blindage doit être relié à ses deux extrémités au réseau équipotentiel.

3.4 Évaluation du risque foudre.

La nécessité ou non d'installer un paratonnerre ou des parafoudres pour protéger des équipements ou une installation électrique des surtensions atmosphériques dépend des éléments suivants :

- Evaluation du foudroisement de la zone;
- Nature du réseau de distribution d'énergie électrique;
- Topographie du lieu;
- Niveaux de tenue aux surtensions des différents matériels;
- Emplacement des matériels dans le circuit;
- Valeur et importance des matériels à protéger;
- Conséquences de défaillances éventuelles.

Différentes méthodes ont été développées pour apprécier les risques de la foudre, notamment :

- Norme CEI 1662
- Norme NF 61024-1
- Guide UTE C 15-443 (de 1996)
- Guide Merlin Gérin (1995 - La protection des installations électriques contre la foudre)

La norme européenne EN 61024-1 propose une méthode de calcul de la probabilité de foudroisement direct. La même norme définit également les caractéristiques d'un

choc foudre en fonction de 4 niveaux d'efficacité.

Paramètres	Symbole	Unité	Niveaux de protection			
			I	II	III	IV
Efficacité	E	%	98	95	90	80
Valeur crête du courant	I	kA	200	150	100	100
Charge totale	Qtot	C	300	225	150	150
Charge impulsionnelle	Qimp	C	100	75	50	50
Energie spécifique	SE	kJ/ohm	10 000	5 600	2 500	2 500
Raideur moyenne	di/dt	kA/μs	200	150	100	100
Rayon de la sphère fictive	R	m	20	30	45	60
Distance moyenne entre les descentes	D	m	10	15	20	25

Le principe de la méthode est le calcul d'un paramètre représentant le risque résultant d'une formule prenant en compte les différents éléments précités.

Selon le résultat obtenu, on peut en déduire si l'installation de parafoudres est utile ou nécessaire, ainsi que leurs caractéristiques.

Aucune des méthodes ne garantit une protection absolue contre la foudre. L'essentiel est que l'étude du risque soit faite justifiant ou non la mise en place de protection.

4 PRÉCONISATIONS DE PROTECTION CONTRE LA Foudre

Les principes de base de protection contre la foudre, pour des installations faisant appel aux énergies renouvelables, évoqués précédemment permettent d'en déduire des mesures très pratiques applicables.

Deux types d'installations à énergie renouvelable sont traitées :

- Les installations photovoltaïques (autonomes ou couplées au réseau);
- Les aérogénérateurs (autonomes)

4.1 Protection contre les effets directs

Dans certains cas, il y a lieu de protéger les installations à énergies renouvelables contre les effets directs de la foudre.

Les dispositifs de capture sont nécessaires en fonction du positionnement des modules photovoltaïques. S'ils se situent à l'extérieur de la zone de protection (voir modèle électro-géométrique) alors il faut ajouter un paratonnerre. Les deux exemples ci-dessous explicitent bien le problème. Dans le premier cas il n'est pas nécessaire de mettre un paratonnerre, alors que dans les deuxième cas il faut une protection supplémentaire.

On se reportera aux recommandations précédemment citées pour la mise en œuvre de paratonnerres, conducteurs de descente et prise de terre.

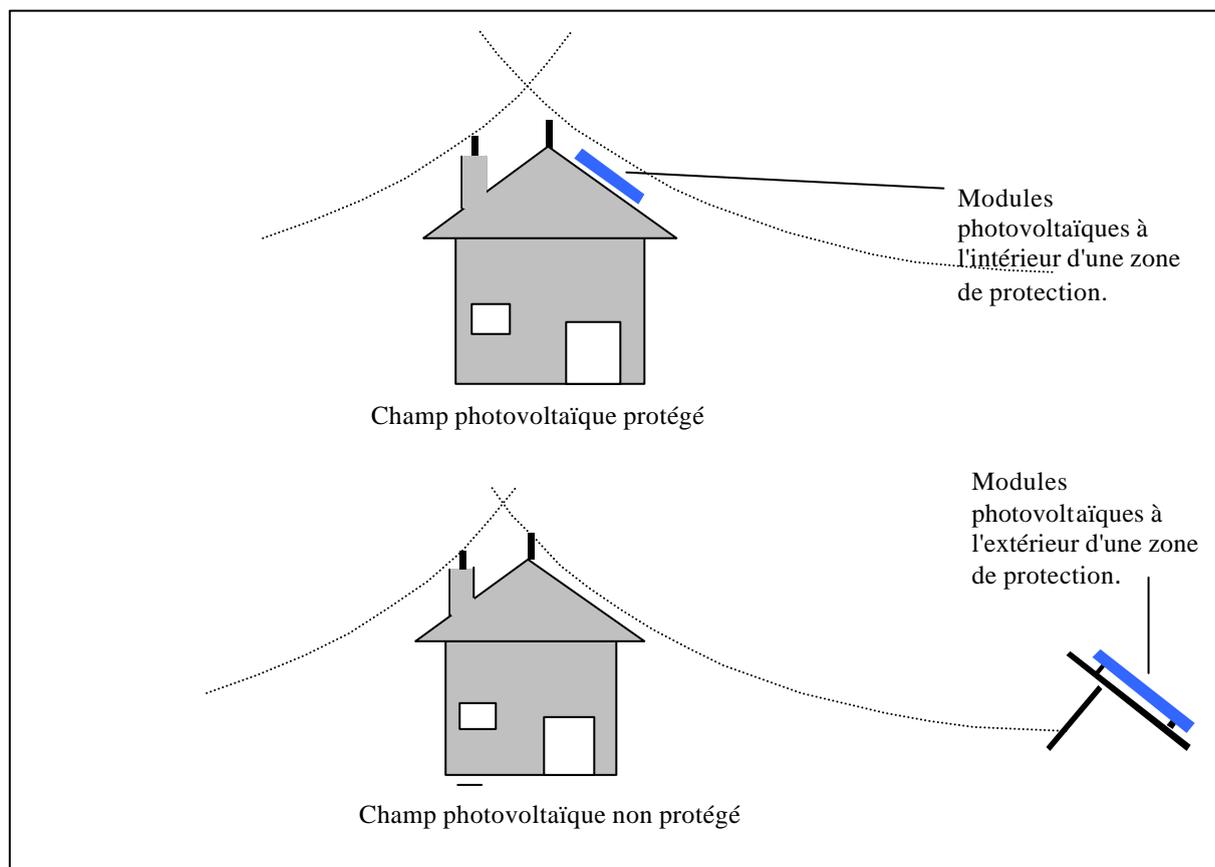


Figure 17: Exemples de bonne et mauvaise protection

4.2 Protection contre les effets indirects

Il est rappelé que la protection contre les effets indirects nécessite la mise en place simultanée de plusieurs mesures :

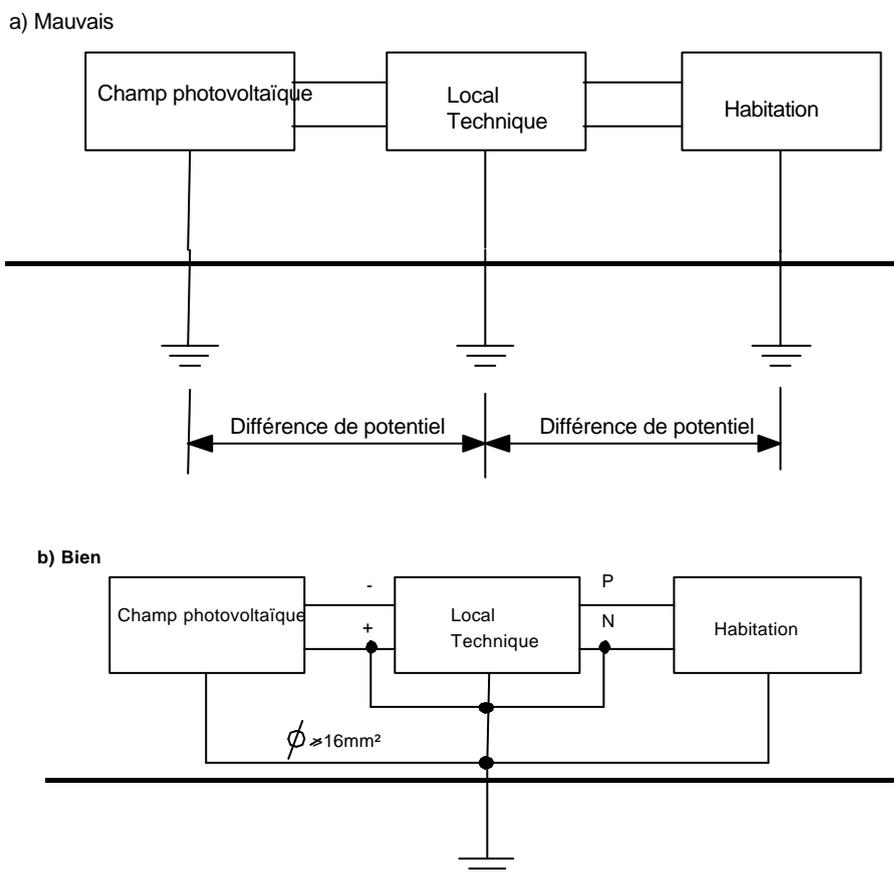
- Unicité de la prise de terre,
- Réalisation d'un réseau équipotentiel reliant toutes les masses des matériels électriques et les éléments conducteurs du bâtiment avec liaison à la terre,
- Cheminement des câbles de façon à éviter les boucles susceptibles de favoriser la génération de surtensions dues au champ magnétique rapidement variable,
- Mise en place de parafoudres reliés à la masse des appareils protégés,
- Blindage des câbles de télécommunications et de transmission d'informations.

En conséquence, pour les installations à énergies renouvelables, la mise en œuvre de ces mesures pourra se traduire pratiquement de la manière suivante :

4.2.1 Unicité de la prise de terre et équipotentialité des masses.

L'expérience montre que les problèmes d'équipotentialité sont fréquents et qu'ils sont à l'origine de la majorité des dysfonctionnements. L'interconnexion des masses est d'une importance fondamentale pour le bon fonctionnement des protections contre la foudre et les surtensions.

L'ensemble des masses métalliques des équipements constituant l'installation de production et de distribution de l'électricité, y compris entre bâtiments différents, doit être interconnecté et relié à une prise de terre unique.



c) Excellent

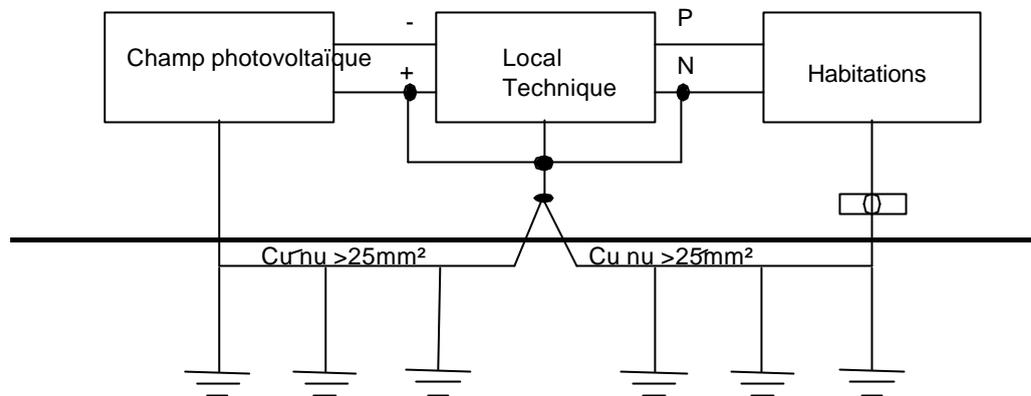


Figure 18: Équipotentialité des masses

Réalisation pratique :

Liaison équipotentielle extérieure :

L'interconnexion des masses entre le champ photovoltaïque et les équipements électriques peut être réalisée soit :

- avec le conducteur de protection vert/jaune s'il est présent dans le câble de liaison sous réserve que sa section soit au minimum de 16 mm²
- avec du câble de cuivre nu de section minimale de 25 mm². Celui-ci n'a pas besoin d'être enterré si la longueur est inférieure à 50 m. Au delà de 50 m, le conducteur de masse doit être obligatoirement enterré pour éviter tout risque d'amorçage avec la terre ce qui endommagerait les câbles. La proximité du conducteur de masse avec les conducteurs actifs est fortement conseillée pour limiter la surface de boucle.

Lorsque la liaison équipotentielle est enterrée, la section du câble en cuivre nu ne doit pas être de section inférieure à 25 mm² pour des problèmes de corrosion.

Lorsque plusieurs structures de modules photovoltaïques sont présentes, on pourra les relier entre elles avec de la tresse de masse ou du câble vert/jaune de section minimale 16 mm².

D'une manière générale, toutes les canalisations conductrices doivent être mises à la terre à proximité de leur point d'entrée dans le bâtiment (cas de goulottes métalliques et de câbles blindés). Toutes les structures métalliques conductrices du bâtiment ainsi que celles des modules (supports) devraient être mises à la terre.

N.B. Pour les installations photovoltaïques dont les modules photovoltaïques sont sur un toit de bâtiment équipé d'un paratonnerre, et pour éviter tout risque d'amorçage entre les parties métalliques des modules et les conducteurs de descente, une liaison directe entre ces conducteurs et les parties métalliques des modules devra être effectuée.

Si la toiture est en tôle, il y a lieu de connecter celle-ci avec le conducteur assurant la liaison équipotentielle.

Les masses métalliques des équipements électroniques (régulateur, onduleur chargeur, etc.) distantes les unes des autres de moins de deux mètres se feront, de la manière suivante:

- si la distance est inférieure à 2 m entre équipements et barre d'équipotentialité, chaque masse d'équipement sera directement raccordée à la barre d'équipotentialité par des conducteurs de masse de section minimale 10 mm².
- si la distance est supérieure à 2 m entre équipements et barre d'équipotentialité, chaque masse d'équipement sera directement raccordée à la câblette cuivre nu commune proche des équipements elle-même reliée à la barre d'équipotentialité,.

De préférence, ces connexions, seront réalisées même si un conducteur PE (vert jaune) relie déjà deux équipements via un câble d'alimentation.

D'une manière générale, l'interconnexion des masses se fera de préférence d'une manière maillée, plutôt qu'en étoile, surtout si les câbles d'interconnexion sont longs.

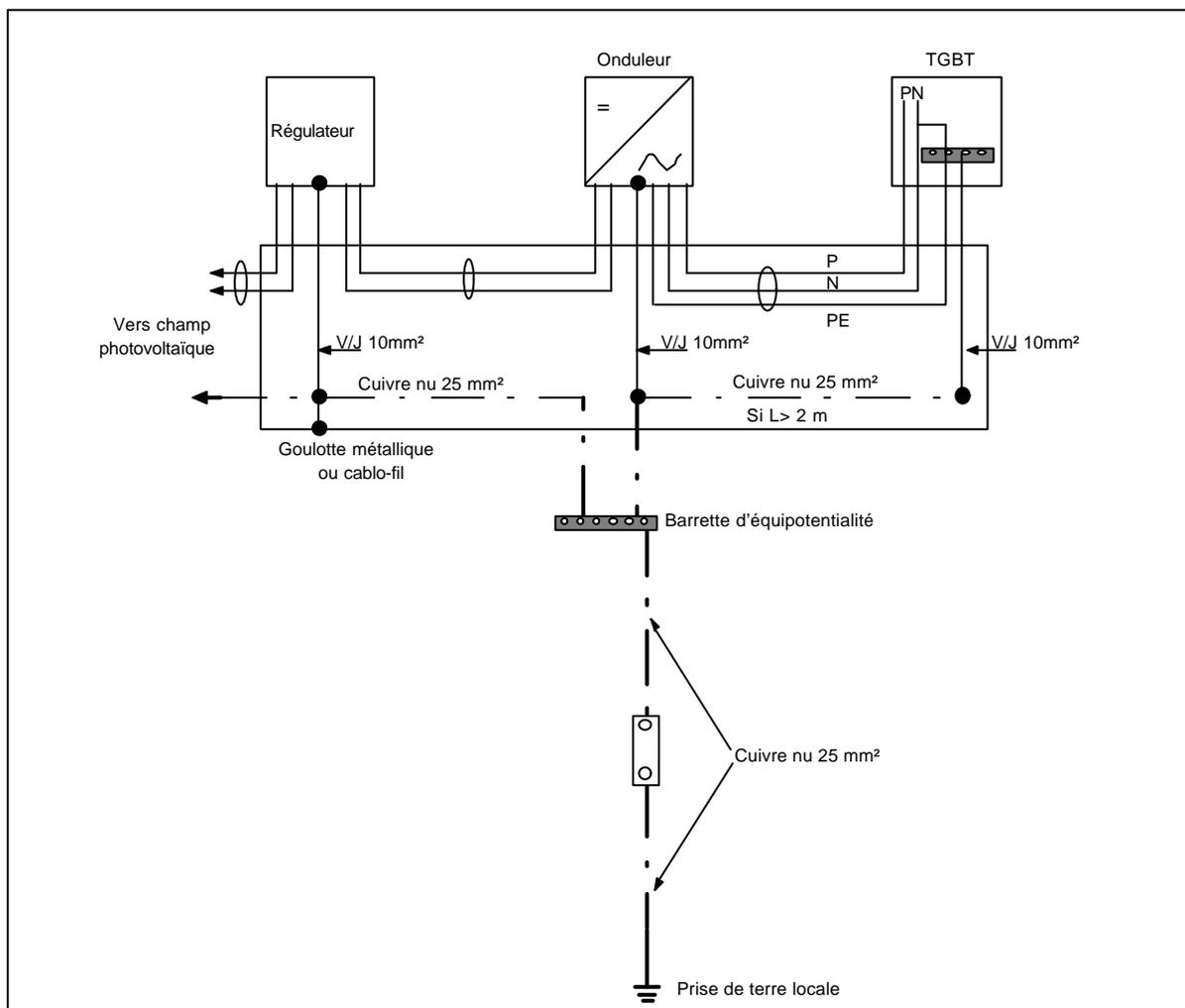


Figure 19: Liaison extérieure équipotentielle

4.2.2 Parafoudres

Schéma de liaison à la terre du circuit continu

Généralités :

Le montage des parafoudres, sur les liaisons entre champ photovoltaïque et équipements électriques, dépend directement du schéma des liaisons à la terre du circuit continu de l'installation photovoltaïque : potentiel flottant ou polarité reliée à la terre.

Sur le plan fonctionnel, le circuit courant continu peut être indifféremment en potentiel flottant ou une polarité reliée à la terre.

Toutefois, en terme de protection foudre, il est préférable de fixer une polarité à la terre.

En terme de sécurité des personnes, une polarité reliée à la terre s'impose obligatoirement dès qu'on dépasse le domaine de tension de la TBT :

- si les équipements ou canalisations ne sont pas en classe II ;
- si aucun contrôleur permanent d'isolement n'est présent.

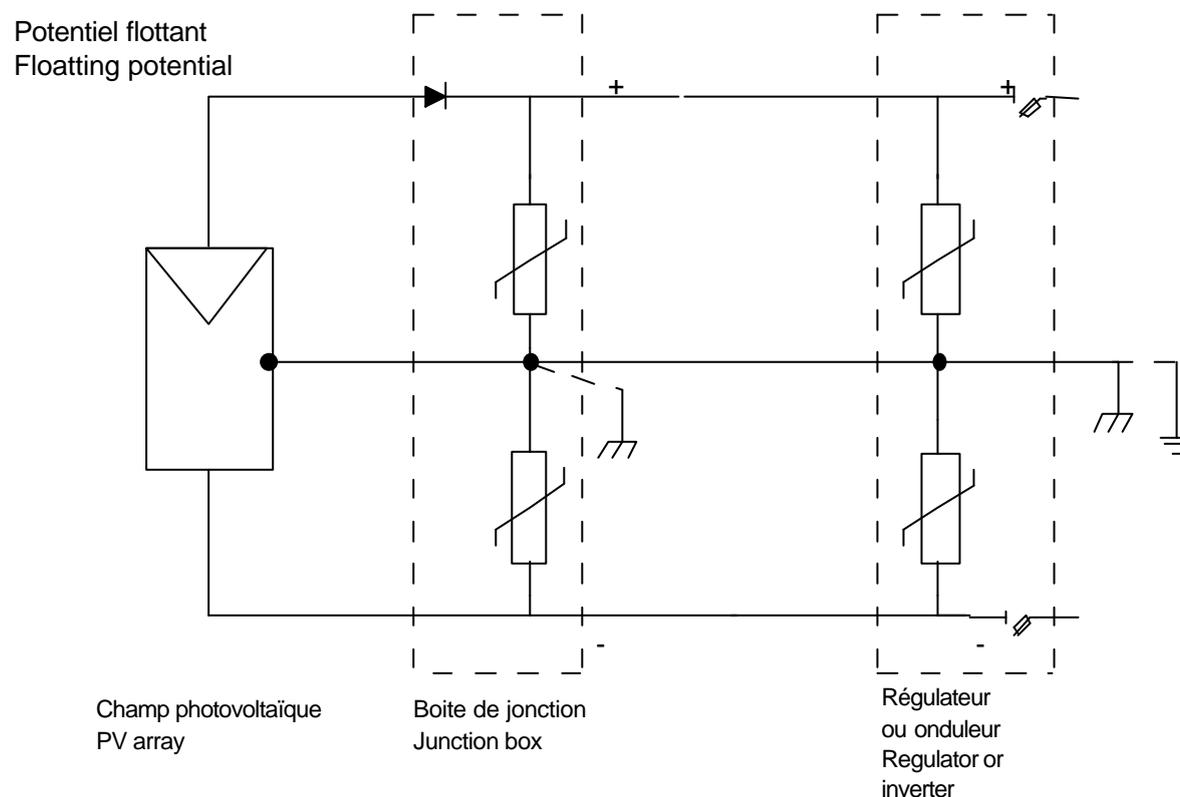


Figure 20: Schéma de potentiel flottant

Ce schéma (Figure 20) peut être applicable pour des installations de tension nominale 12 V ou 24 V, toutefois il nécessite une protection contre les surcharges sur les 2 polarités.

Polarité (+) reliée à la masse
Plus linked to the mass

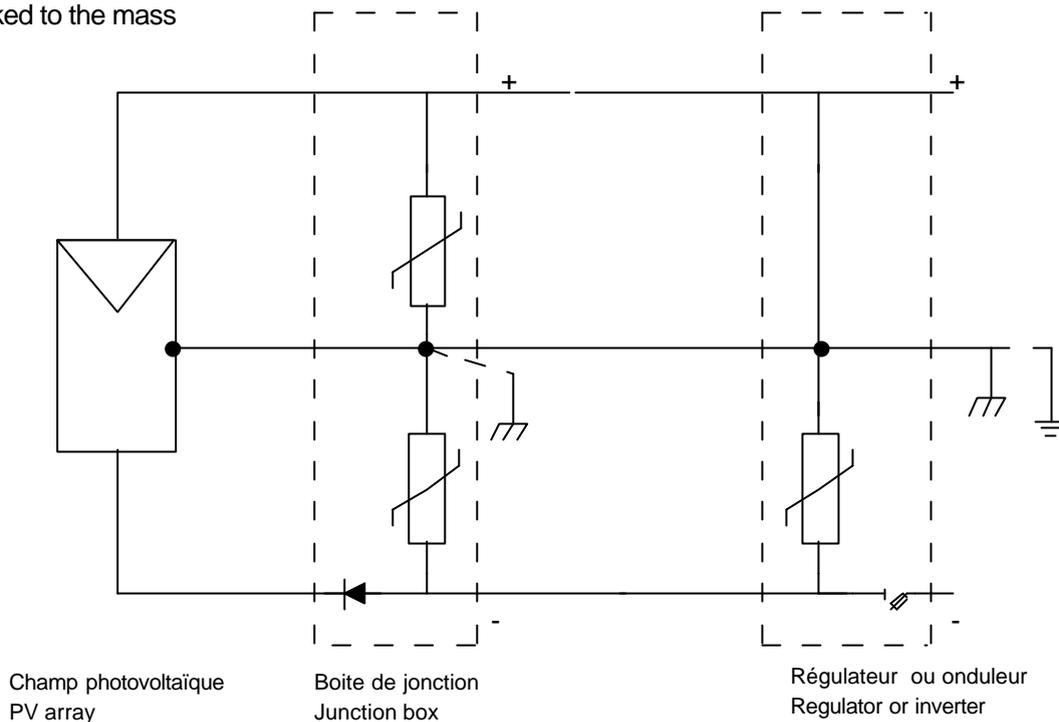


Figure 21: Schéma de potentiel relié à la terre

Le schéma de la figure 21 est recommandé d'une manière générale car il présente les avantages suivants :

- Bonne protection vis à vis des perturbations électromagnétiques, y compris les effets engendrés par la foudre
- Protection contre les surcharges sur une seule polarité
- Protection des personnes pour les installations de tension nominale 48 V et au delà
- Pas de contrôleur permanent d'isolement (CPI).

La polarité positive ou négative peut être indifféremment mise à la terre, toutefois il est préférable de relier le + à la terre pour éviter des phénomènes de corrosion électrolytique au niveau de certains équipements (modules photovoltaïques...).

Cette électrocorrosion est d'autant plus probable que la tension nominale de fonctionnement est élevée et que l'air ambiant est humide et salin.

Cette configuration est déjà appliquée dans le domaine des télécommunications en 48V.

La mise à la terre d'un conducteur actif (une polarité continue ou création du neutre en alternatif) doit se faire en un seul point pour éviter qu'un courant de défaut ne circule dans le conducteur de protection. Il sera de préférence effectué au niveau des équipements électriques (armoire de régulation ou sortie onduleur).

Important:

- Avant de fixer une polarité à la terre, et pour éviter tout risque de court-circuit, il faut impérativement vérifier la compatibilité des équipements avec la configuration retenue, car l'alimentation de certains appareils est déjà référencée en interne à la masse.
- Dans le cas où une polarité est reliée à la terre, et pour assurer leur fonction en cas de défaut d'isolement, les organes de protection (fusibles, disjoncteurs,..) ou de contrôle (relais, interrupteurs électroniques,...) doivent être placés sur l'autre polarité.

Emplacement des parafoudres

Afin de protéger les équipements (modules photovoltaïques ou aérogénérateur et électronique) contre les coups de foudre indirects, des parafoudres (type varistances de zinc) doivent être installés de part et d'autres des différentes liaisons.

Si le câble de liaison n'excède pas 10 m, l'installation de parafoudres au niveau du champ photovoltaïque ou de l'aérogénérateur n'est pas indispensable.

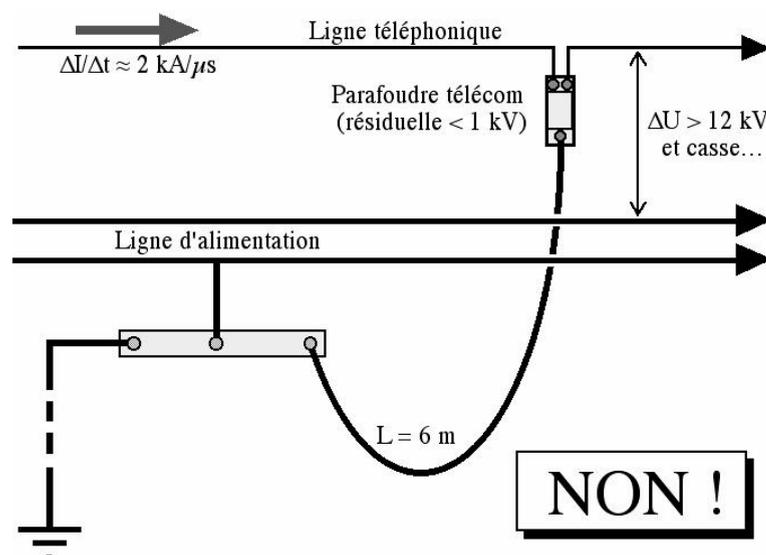
Note : Pour les générateurs photovoltaïques, les diodes anti-retour et by-pass doivent pouvoir supporter une tension inverse compatible avec le seuil de tension de protection du parafoudre afin qu'elles ne soient pas détruites lors d'une surtension (attention aux faibles valeurs de tension inverse des diodes Schottky).

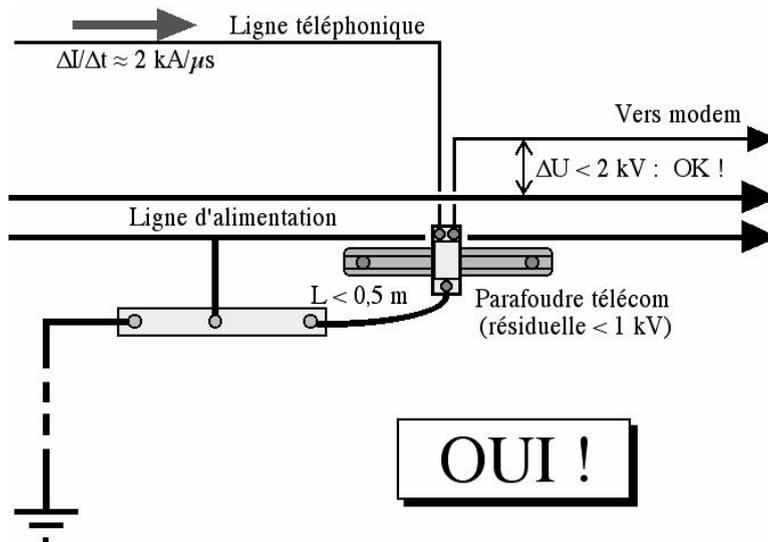
D'une manière générale, tous les câbles entrant et sortant du bâtiment (puissance, données, téléphone) doivent bénéficier d'une protection contre les surtensions référencée à la masse locale.

Note : Bien qu'une liaison souterraine soit moins exposée aux surtensions induites qu'une liaison aérienne, une protection par parafoudre reste nécessaire.

Important :

Il y a lieu de prendre des précautions pour la mise en œuvre de la protection foudre des modems sur la ligne téléphonique. En effet, une liaison supérieure à 50 cm entre le parafoudre téléphone et la masse rend la protection inefficace.





Choix du parafoudre sur circuit courant continu (liaison champ photovoltaïque)

Les caractéristiques du parafoudre sont déterminés par les critères suivants :

- U_n : la tension doit être choisie de telle sorte que la varistance ne conduise pas en tension de circuit ouvert des modules ($U_n > 1,4 \times U_{co}$)
- U_p : Niveau de protection : inférieur à 1,5 kV selon la tenue aux chocs des équipements à protéger.
- I_n : \geq à 2 kA à 15 kA en onde 8/20 μs ou $I_{max} \geq$ de 6 kA à 40 kA selon le niveau de protection souhaité.

Plutôt que de prendre des varistances à oxyde de zinc seules, on choisira de préférence des parafoudres avec signalisation et déconnexion thermique intégrée pour éviter tout risque de court circuit en cas de vieillissement.

Note: L'éclateur à gaz seul est à proscrire en courant continu car sa tension d'arc étant faible, il peut ne pas s'éteindre.

Choix du parafoudre sur circuit courant alternatif

(exemple : liaison groupe électrogène / habitation ou liaison réseau / onduleur ou liaison aérogénérateur / chargeur)

Le type de parafoudre (unipolaire ou multipolaire) est fonction du schéma de liaison à la terre .

Pour un site isolé, le schéma de neutre est généralement de type TNS.

Pour un site photovoltaïque raccordé au réseau, le schéma de neutre est généralement de type TT.

Pour faire le bon choix des parafoudres correspondants, on se reportera utilement aux indications du guide UTE C 15-443 et à la norme NFC 61-740 pour déterminer les parafoudres appropriés aux installations électriques basse tension.

4.2.3 Cheminement des câbles

Le champ magnétique dû à la foudre génère dans les boucles des surtensions proportionnelles à l'intensité du coup de foudre, à la surface et à la position de la boucle et à l'inverse de la distance au point d'impact.

Pour limiter ces surtensions dans les installations photovoltaïques, des dispositions de mise en œuvre du câblage doivent être prises car deux types de boucle d'induction peuvent apparaître :

Boucle induite par les conducteurs actifs :

Les générateurs PV sont généralement constitués d'une connexion série de plusieurs modules photovoltaïques. Dans le cas d'un coup de foudre, une tension est créée entre la ligne positive et la ligne négative du système. Dans les cas les plus défavorables une tension induite se crée sur chaque module qui vient s'ajouter à la tension dans la boucle constituée par l'ensemble des modules. Cette tension induite est transmise directement à l'entrée courant continu des équipements électriques et peut occasionner leur destruction.

En conséquence, lorsque l'on câble des modules, il faut faire attention de ne pas faire de grande boucle, en plaçant par exemple les conducteurs de polarité positive et négative ensemble et parallèles, ainsi la surface de boucle reste la plus petite possible.

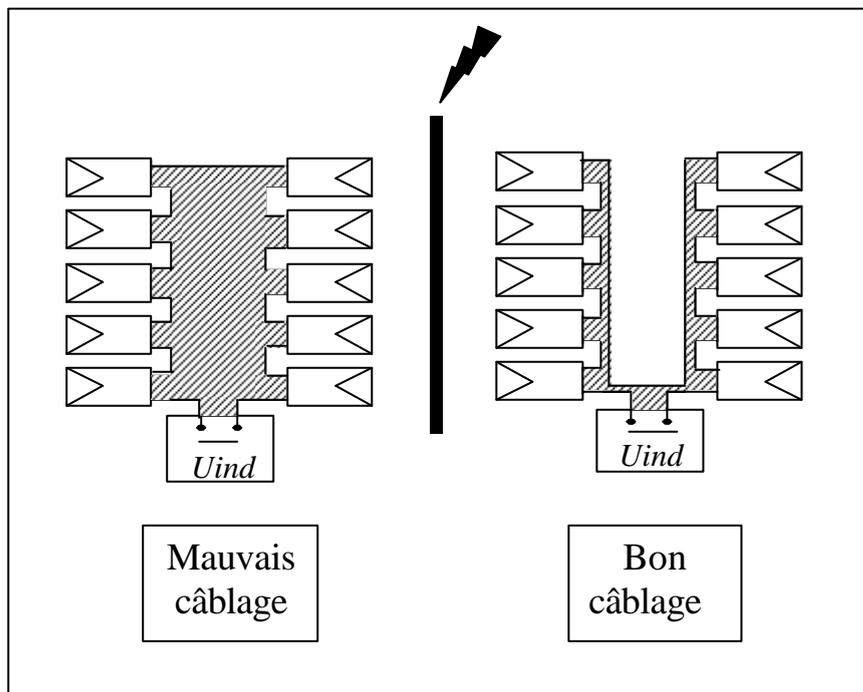


Figure 21: Câblage des modules photovoltaïques

Boucle induite par les conducteurs actifs et le conducteur de masse

Une autre boucle peut se former entre les conducteurs actifs du circuit continu et le conducteur d'interconnexion des masses si ceux-ci ne sont pas joints lors du cheminement des câbles vers les équipements électriques (voir Figure 22). Cette surtension peut provoquer un claquage destructif des équipements électriques ou des modules photovoltaïques.

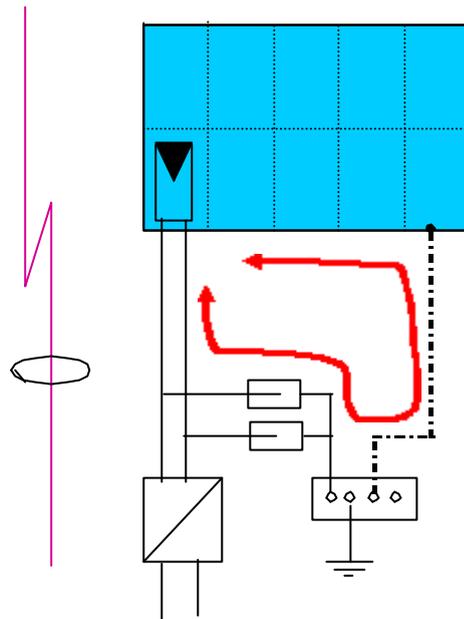
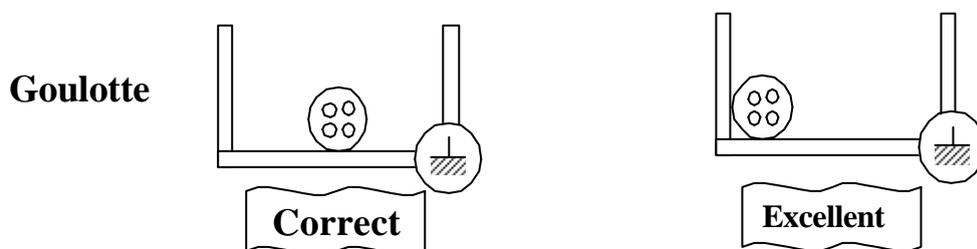


Figure 22: Boucle induite: attention à cette boucle de masse

En conséquence, on veillera à ce que les câbles de liaison entre le champ photovoltaïque et les équipements électriques soient plaqués sur toute leur longueur contre le câble de masse. Une protection complémentaire, type blindage permet d'augmenter le degré de protection. Ce blindage peut être réalisé en utilisant des goulottes métalliques raccordées à la masse côté capteurs et côté bâtiment.



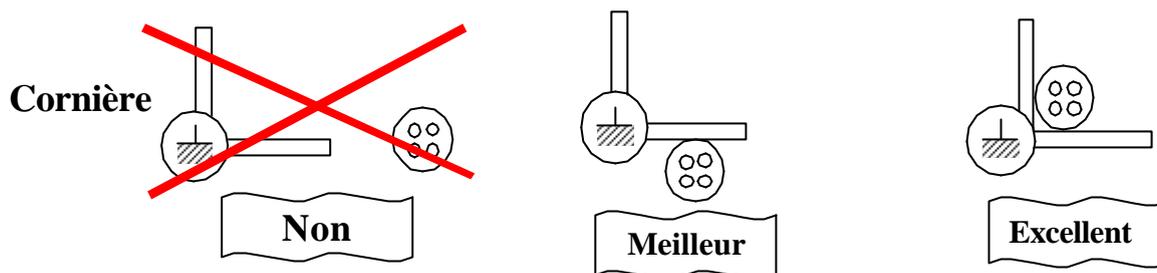


Figure 23: Position du câble

4.2.4 Blindage des canalisations

Pour des installations très exposées à la foudre comportant des équipements sensibles, par exemple en télécommunication, plutôt que d'utiliser des câbles blindés entre champ photovoltaïque et électronique, il est préférable et moins coûteux de faire cheminer les conducteurs dans des chemins de câbles métalliques reliés au moins à la masse de part et d'autre (voir ci-dessus).

4.3 Évaluation du risque foudre pour les installations

La nécessité ou non d'installer un dispositif de capture de la foudre ou des parafoudres pour protéger des équipements alimentés par des systèmes avec l'utilisation des énergies renouvelables dépend des éléments suivants :

- Évaluation du foudroiement de la zone ;
- Topographie du lieu ;
- Niveaux de tenue aux surtensions des différents matériels ;
- Valeur et importance des matériels à protéger ;
- Conséquences de défaillances éventuelles.

Une méthode d'évaluation du risque foudre inspirée de la norme NF 61024-1, est présentée dans le document édité par la Commission Européenne « *Lightning and overvoltage protection in photovoltaic and solar thermal systems* ».

5 MESURES DE PROTECTION POUR LES INSTALLATIONS

Comme indiqué précédemment, il existe également des méthodes empiriques basées sur les statistiques et expériences qui permettent d'approcher la nécessité de mettre en place des protections contre les surtensions.

Toutefois, pour être pratique, il est proposé des mesures de protection foudre selon deux niveaux pour les installations intégrant des énergies renouvelables :

Niveau A (risque moyen de foudre)

- Interconnexion des masses et mise à la terre
- Protection par varistances type $I_n \geq 2$ à 5 kA (ou $I_{max} \geq 6$ kA à 15kA) sur liaisons extérieures (circuit continu et alternatif)
- Protection spécifique sur autres lignes extérieures (téléphone,...)

Niveau B (risque important de foudre):

- Interconnexion des masses et mise à la terre
- Protection par varistances type $I_n \geq 10$ kA à 15 kA (ou $I_{max} \geq 40$ kA) sur liaisons courant continu
- Protection étagée sur réseau aérien alternatif (si existant)
- Protection spécifique sur autres lignes extérieures (téléphone,...)
- Protection externe par dispositifs de capture
- Blindage des câbles sensibles

A titre d'exemple, il est donné un niveau de protection envisagé selon différentes applications couramment rencontrées dans le domaine de la production d'électricité par énergies renouvelables et dont l'exposition au risque foudre est étroitement liée aux conditions rencontrées (point haut, conséquence en cas de défaillance,...). Il est entendu que ce niveau de protection est donné à titre indicatif. Dans le cas de sites très exposés, il y a lieu d'augmenter le niveau de protection.

Niveau de protection	A	B
Système photovoltaïque individuel (SHS)		
Refuge de montagne avec PV		X
Générateur PV pour l'habitat isolé	X	
Relais télécommunications alimenté en PV		X
Station pompage PV	X	
Système PV avec couplage réseau urbain	X	
Système avec aérogénérateur autonome		X

Sept cas pratiques sont traités à titre d'exemple pour le choix du type de protection et sa mise en œuvre.

Aspects économiques :

Il est à noter que les mesures proposées sont d'un coût faible par rapport au coût global de l'installation de production d'électricité (de l'ordre de 1 % à 3 % selon les systèmes). Au regard de ce faible investissement relatif, ces dispositions sont à mettre systématiquement en œuvre dès que la probabilité de surtensions n'est pas négligeable.

5.1 Système d'électrification photovoltaïque individuel (SEI)

Caractéristique de l'installation étudiée :

Générateur photovoltaïque autonome faible puissance (SEI ou SHS comme "Solar Home System") :

- un à deux modules de 50 W, fixés sur le toit ou sur un mât à proximité de l'habitation
- tension nominale de la batterie : 12 V

application : alimentation d'une habitation isolée

site d'implantation : plaine

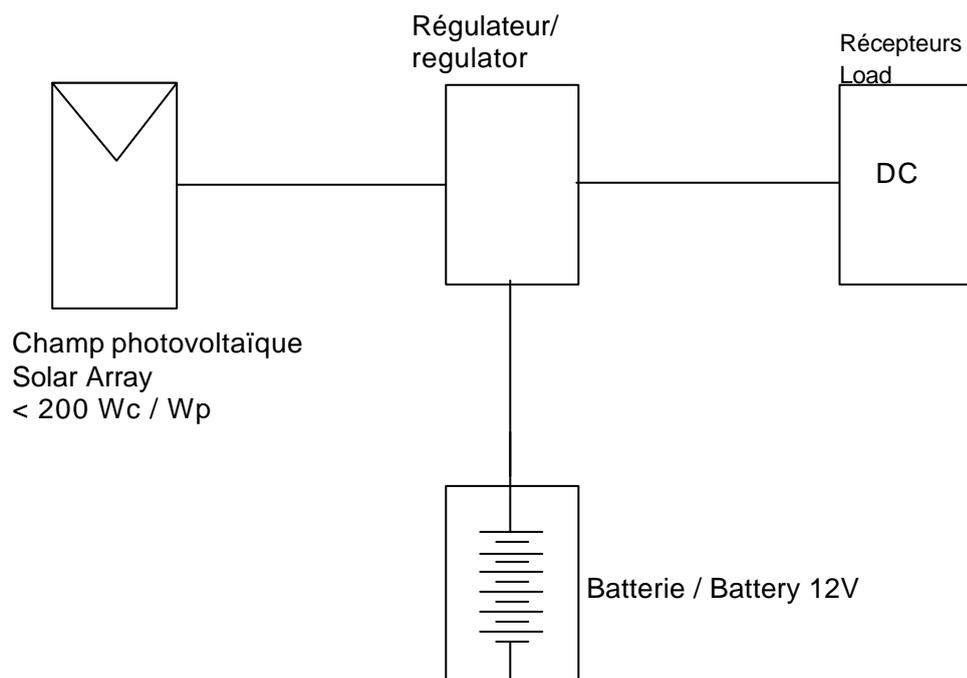
matériel à protéger : régulateur , récepteurs 12 V (valeur faible)

préjudices en cas de défaillance : faible

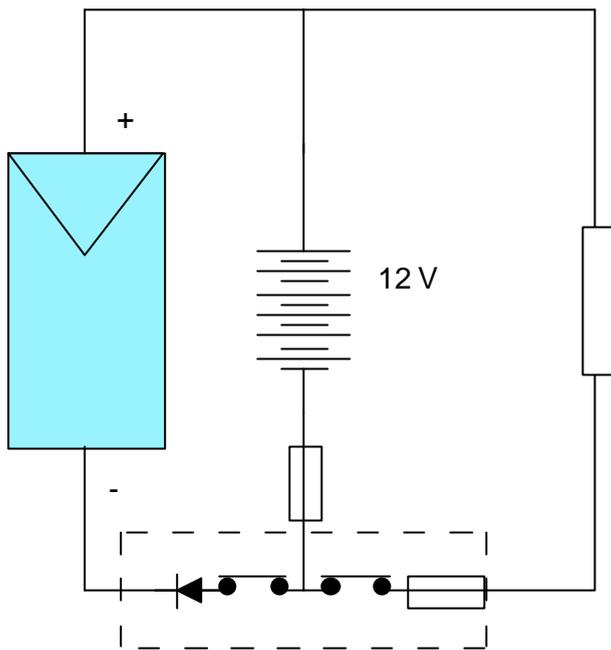
Principe de protection foudre retenu :

- Aucun

Conclusion : D'une manière générale, les petites installations SEI sont des systèmes de faible puissance constitués d'un ou deux modules, à faible distance de l'habitation, donc avec un faible risque de surtension. D'autre part le coût des dommages dû à une surtension reste faible ce qui explique que beaucoup de générateurs SEI ne disposent d'aucune protection spécifique. Néanmoins, si le site est particulièrement exposé, le principe de protection retenu sera identique à celui du générateur photovoltaïque alimentant un relais radio (voir exemple suivant), mais sans mise en place de paratonnerre.

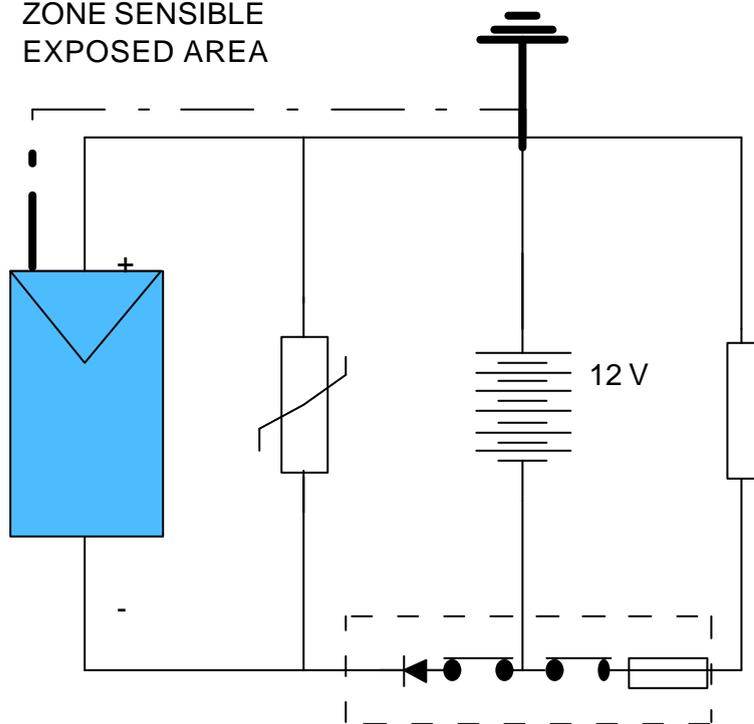


ZONE PEU SENSIBLE
NO EXPOSED AREA



REGULATEUR CHARGE/DECHARGE /
CHARGE DISCHARGE REGULATIOR

ZONE SENSIBLE
EXPOSED AREA



REGULATEUR CHARGE/DECHARGE
CHARGE DISCHARGE REGULATOR

Figure 10 EXEMPLE SHS / SEI EXAMPLE

5.2 Générateur photovoltaïque pour habitat.

Caractéristique de l'installation étudiée :

Générateur photovoltaïque autonome moyenne puissance (1 000 à 2 000 W):

- modules fixés au sol à 30 m du bâtiment
- tension nominale de la batterie : 24 V

application : alimentation d'une résidence principale

site d'implantation : plaine

matériel à protéger : régulateur , onduleur, récepteurs 24 V et 230 V (valeur importante)

préjudices en cas de défaillance : moyen

Principe de protection foudre retenu :

- interconnexion des masses par câble cuivre nu de 25 mm² enterré en tranchée entre champ photovoltaïque et armoire de régulation. Liaison entre onduleur, chargeur, groupe électrogène
- Mise à la terre des masses
- Polarité + à la masse et à la terre
- Parafoudres sur circuit courant continu:
 - bipolaire dans la boîte de jonction
 - unipolaire dans l'armoire de régulation
 - varistance à oxyde de zinc de type modulaire avec signalisation de défaut et déconnexion thermique intégrée
 - Caractéristiques : U_c : 100 V, U_p = 300V, I_n = 2 kA
- Parafoudres sur circuit courant alternatif:
 - Type modulaire pour régime TNS de part et d'autre de la liaison groupe électrogène/bâtiment (si groupe dans local technique distant)
- Parafoudre sur arrivée ligne téléphonique avec mise à la masse et à la terre
- Valeur de prise de terre non critique

Conclusion : Compte tenu du risque moyen de foudroiement, on retiendra la protection de niveau A.

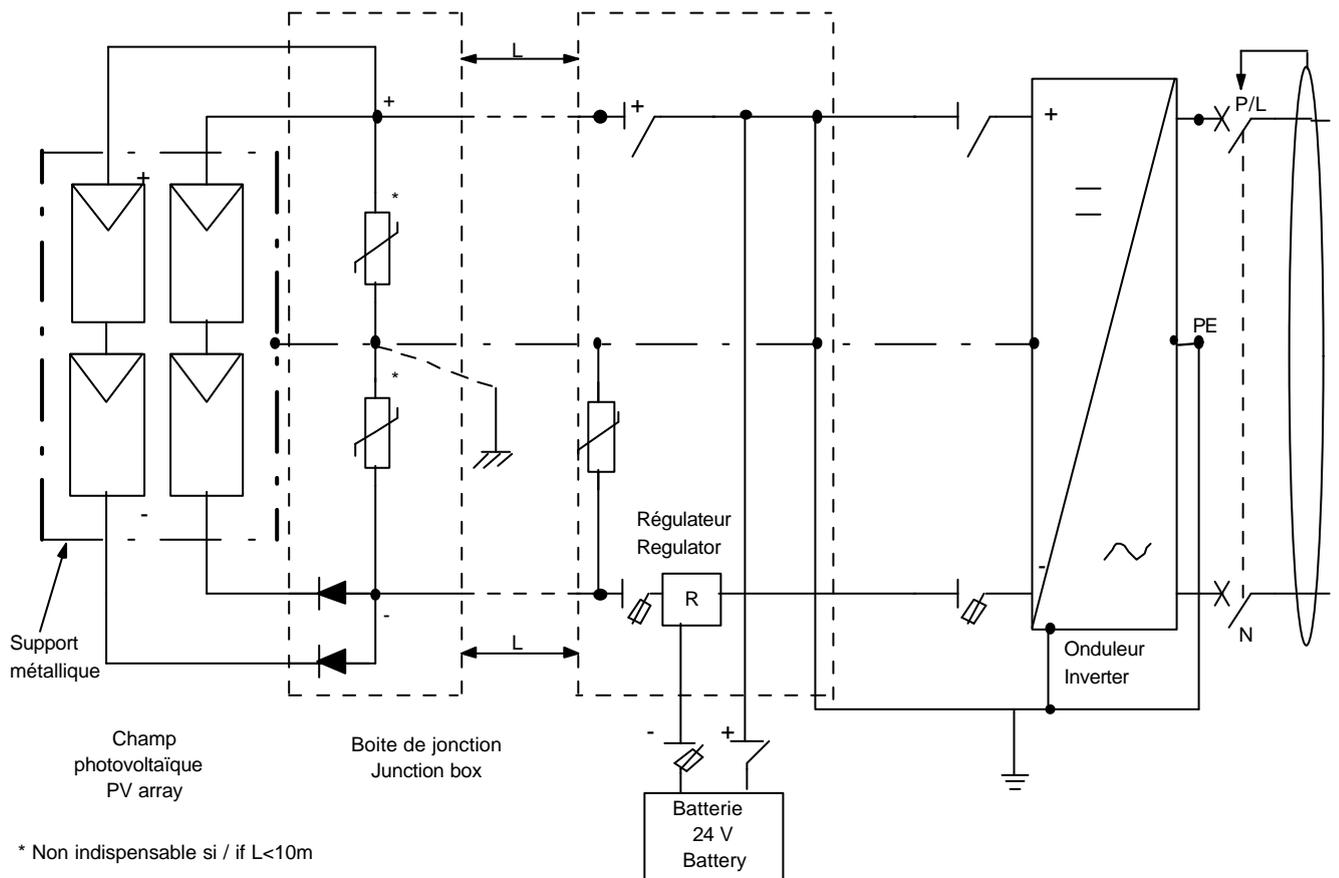
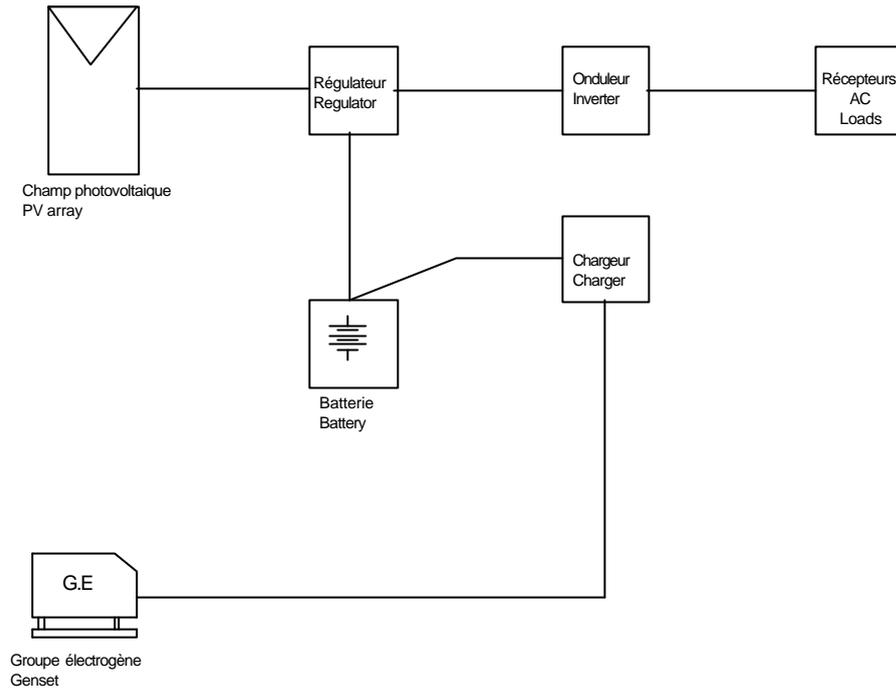
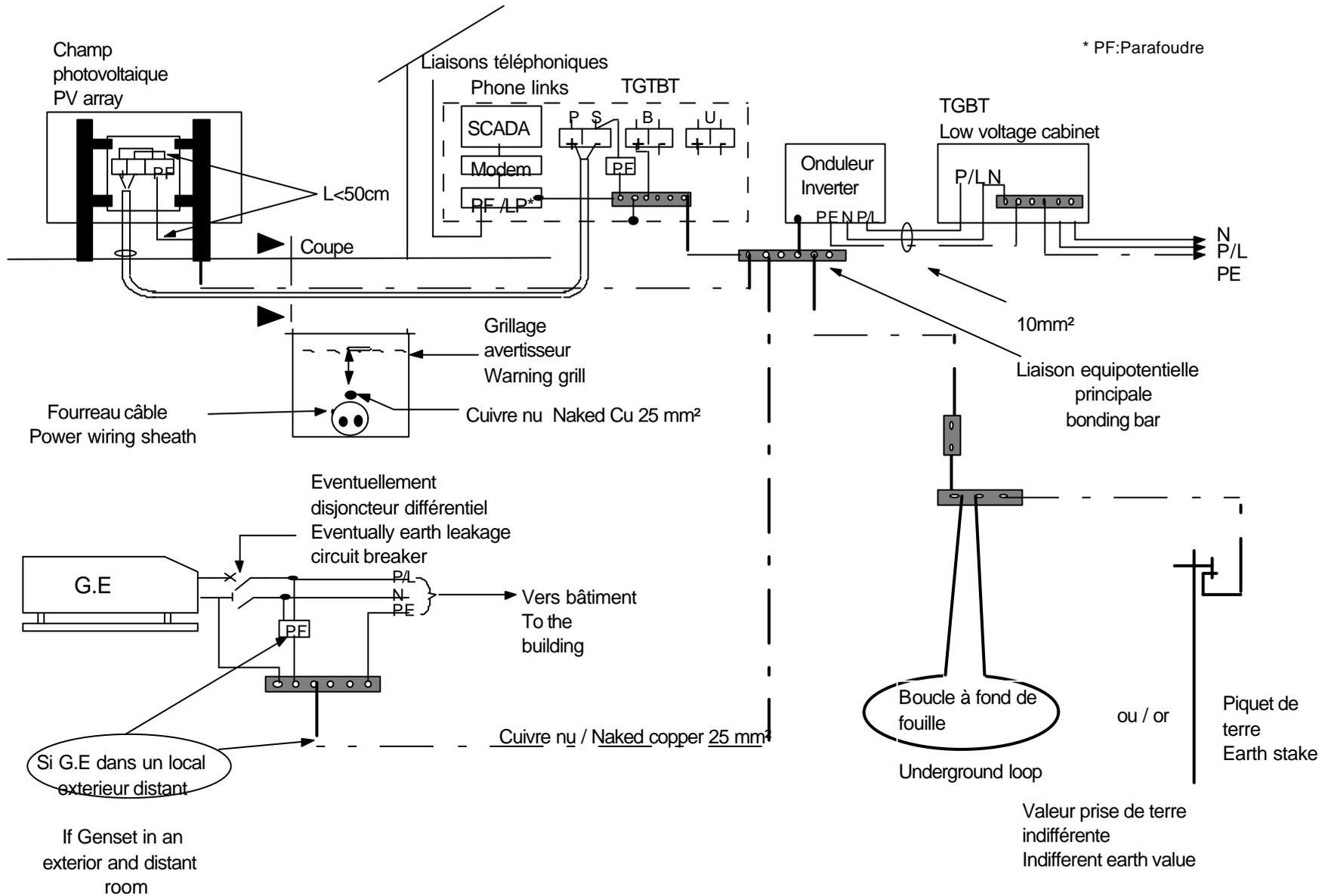


Figure 11 GENERATEUR PV HABITAT
HOUSEHOLD PV GENERATOR

Figure 12 GENERATEUR PV
HABITAT
HOUSEHOLD PV GENERATOR



5.3 Refuge de montagne

Caractéristique de l'installation étudiée :

Générateur photovoltaïque autonome moyenne puissance (1 000 W à 2 000 W):

- modules fixés sur le toit du refuge
- tension nominale de la batterie : 24 V

application : alimentation d'un refuge de montagne

site d'implantation : haute montagne (2 000 m)

matériel à protéger : régulateur , onduleur, récepteurs 24 V et 230 V (valeur importante)

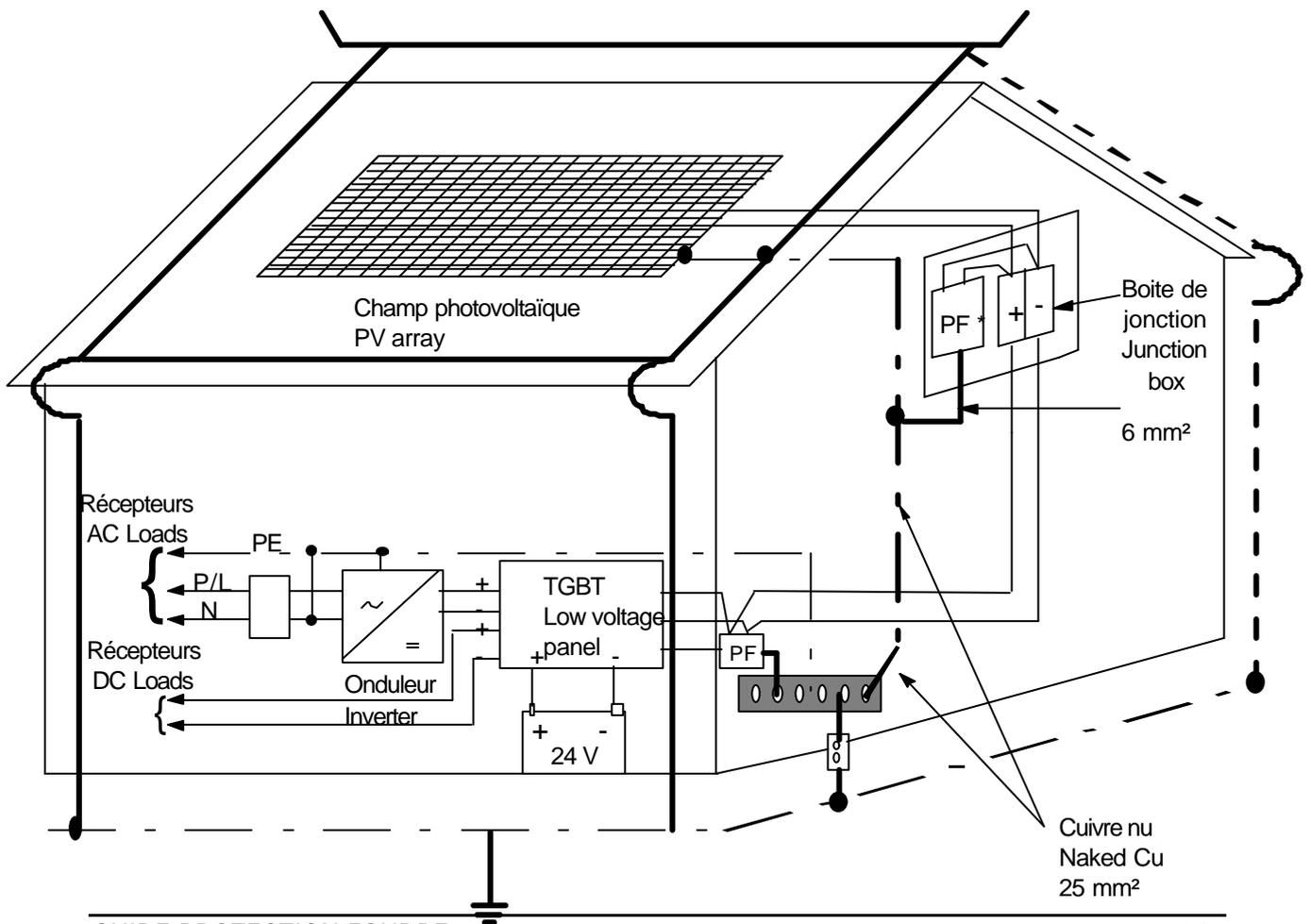
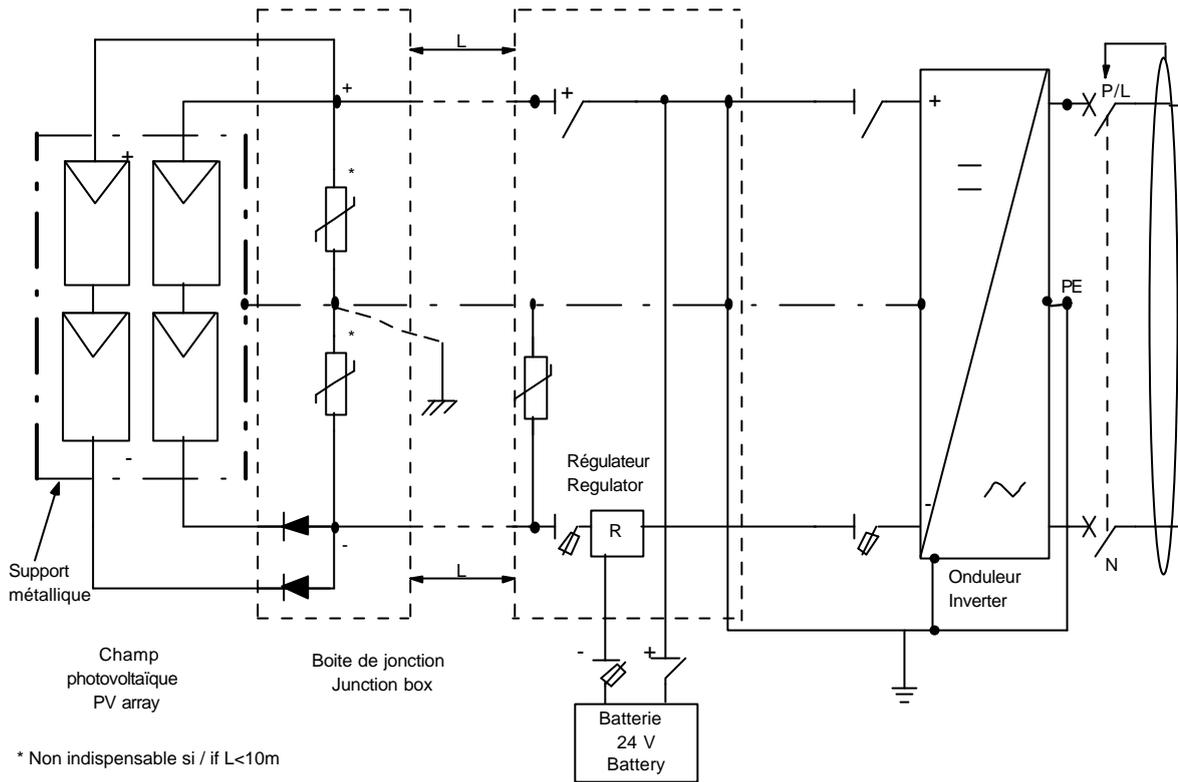
préjudices en cas de défaillance : important

frais de déplacement élevé (hélicoptage)

Principe de protection foudre retenu :

- Mise en place d'une installation extérieure de protection contre la foudre (IEPF) par cage maillée sur le bâtiment de manière à ce que tous les modules se trouvent dans la zone de protection.
- interconnexion des masses par câble cuivre nu de 25 mm² entre champ photovoltaïque, armoire de régulation, onduleur, chargeur, groupe électrogène
- Mise à la terre des masses
- Interconnexion de la prise de terre bâtiment et de la prise de terre paratonnerre
- Polarité + à la masse et à la terre
- Parafoudres sur circuit courant continu:
 - bipolaire dans les boîtes de jonction modules
 - unipolaire dans l'armoire de régulation
 - varistance à oxyde de zinc de type modulaire avec signalisation de défaut et déconnexion thermique intégrée
 - Caractéristiques : $U_c = 100 \text{ V}$, $U_p = 450 \text{ V}$, $I_n = 10 \text{ kA}$
- Parafoudres sur circuit courant alternatif:
 - Type modulaire pour régime TNS de part et d'autre de la liaison groupe électrogène/bâtiment (si groupe dans local technique distant)
- Parafoudre sur arrivée ligne téléphonique avec mise à la masse et à la terre
- Valeur de prise de terre non critique

Conclusion : Compte tenu du risque important de foudroiement, on retiendra la protection maximale de niveau B.



5.4 Système pour télécommunications (relais radio)

Caractéristique de l'installation étudiée :

Générateur photovoltaïque autonome de faible puissance (200 W):

- modules fixés sur pylône
- tension nominale de la batterie : 12 V (-) à la terre

application : alimentation d'un relais radio avec antennes sur pylône métallique

site d'implantation : point haut

matériel à protéger : régulateur , équipements télécom (valeur importante)

préjudices en cas de défaillance : important

Principe de protection foudre retenu :

- Le pylône métallique fait office de paratonnerre
- Prise de terre du paratonnerre réalisée en patte d'oie
- Installation des modules photovoltaïques sur pylône dans la zone de protection du paratonnerre
- interconnexion des masses par câble cuivre nu de 25 mm² entre champ photovoltaïque et régulation,
- Pose des câbles dans goulottes métalliques reliées à la masse de part et d'autre de la liaison
- interconnexion des masses entre équipements
- Prise de terre du bâtiment réalisé en fond de fouille
- Mise à la terre des masses au niveau du local technique
- Polarité - à la masse et à la terre
- Parafoudres sur circuit courant continu:
 - bipolaire dans les boîtes de jonction modules (si la liaison champ photovoltaïque/régulation est > 10 m)
 - unipolaire dans la régulation
 - varistance à oxyde de zinc de type modulaire avec signalisation de défaut et déconnexion thermique intégrée
 - Caractéristiques : $U_c = 100 \text{ V}$, $U_p = 450 \text{ V}$ $I_n = 10 \text{ kA}$
- Valeur de prise de terre la plus faible possible mais non critique
- Interconnexion de la prise de terre du paratonnerre et des équipements

Conclusion : Compte tenu du risque important de foudroiement, on retiendra la protection maximale de niveau B.

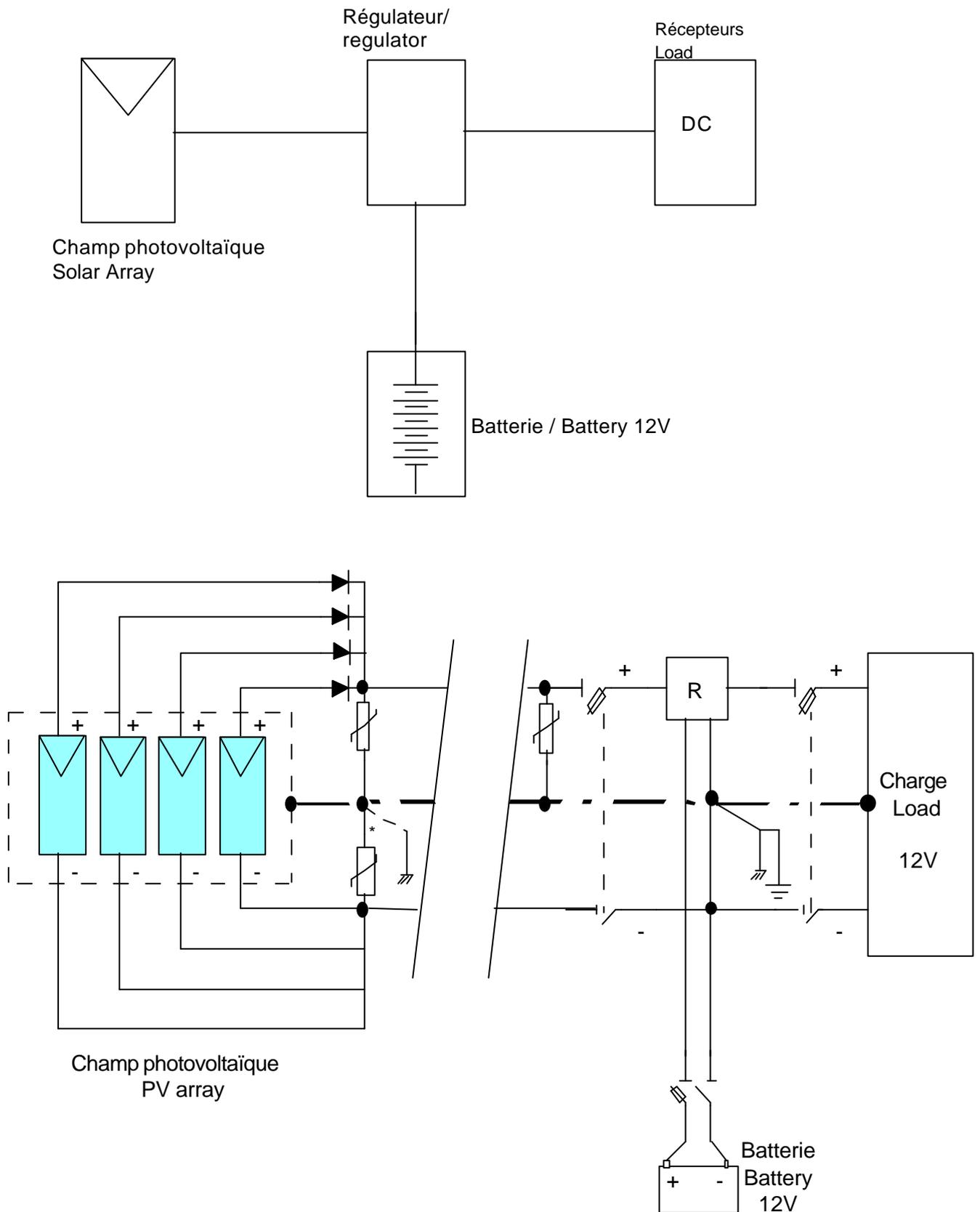


Figure 14 GENERATEUR PV POUR RELAIS RADIO 12 V
PV GENERATOR FOR RADIO RELAY 12 V

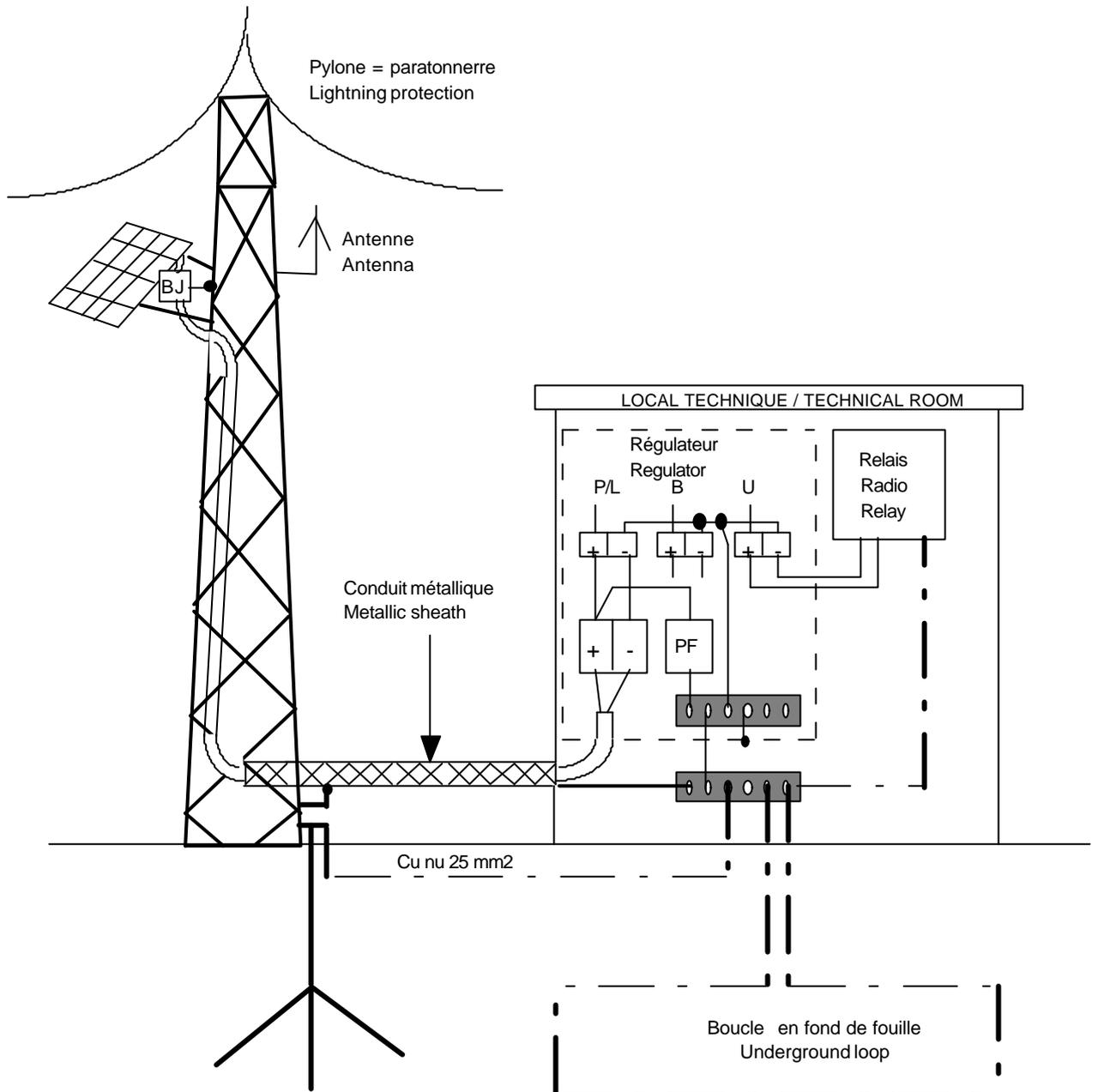


FIGURE 15 : RELAIS RADIO ALIMENTE EN PHOTOVOLTAIQUE

5.5 Système de télécommunications (faisceau hertzien)

Caractéristique de l'installation étudiée :

Générateur photovoltaïque autonome de moyenne puissance (1 000 W à 2 000 W):

- modules fixés au sol à 30 m du bâtiment
- tension nominale de la batterie : 48 V (+) à la terre

application : alimentation d'un faisceau hertzien avec antennes sur pylône métallique

site d'implantation : point haut

matériel à protéger : régulateur , équipements télécom (valeur très importante)

préjudices en cas de défaillance : considérable

Principe de protection foudre retenu :

- Le pylône fait office de paratonnerre
- Prise de terre du paratonnerre réalisée en patte d'oie
- Installation des modules photovoltaïques dans la zone de protection du paratonnerre
- interconnexion des masses par câble cuivre nu de 25 mm² (ou mieux par plat de cuivre 30 x 2 mm²) entre champ photovoltaïque et régulation,
- Pose des câbles dans goulottes métalliques reliées à la masse de part et d'autre de la liaison
- interconnexion des masses entre équipements
- Prise de terre du bâtiment réalisé en fond de fouille
- Mise à la terre des masses au niveau du local technique
- Polarité + à la masse et à la terre
- Parafoudres sur circuit courant continu:
 - bipolaire dans les boîtes de jonction modules
 - unipolaire dans la régulation
 - varistance à oxyde de zinc de type modulaire avec signalisation de défaut et déconnexion thermique intégrée
 - Caractéristiques : $U_c : >125 \text{ V}$, $U_p = 450 \text{ V}$, $I_n = 10 \text{ kA}$
- Valeur de prise de terre la plus faible possible mais non critique
- Interconnexion de la prise de terre du paratonnerre et des équipements

Conclusion : Compte tenu du risque important de foudroiement, on retiendra la protection maximale de niveau B.

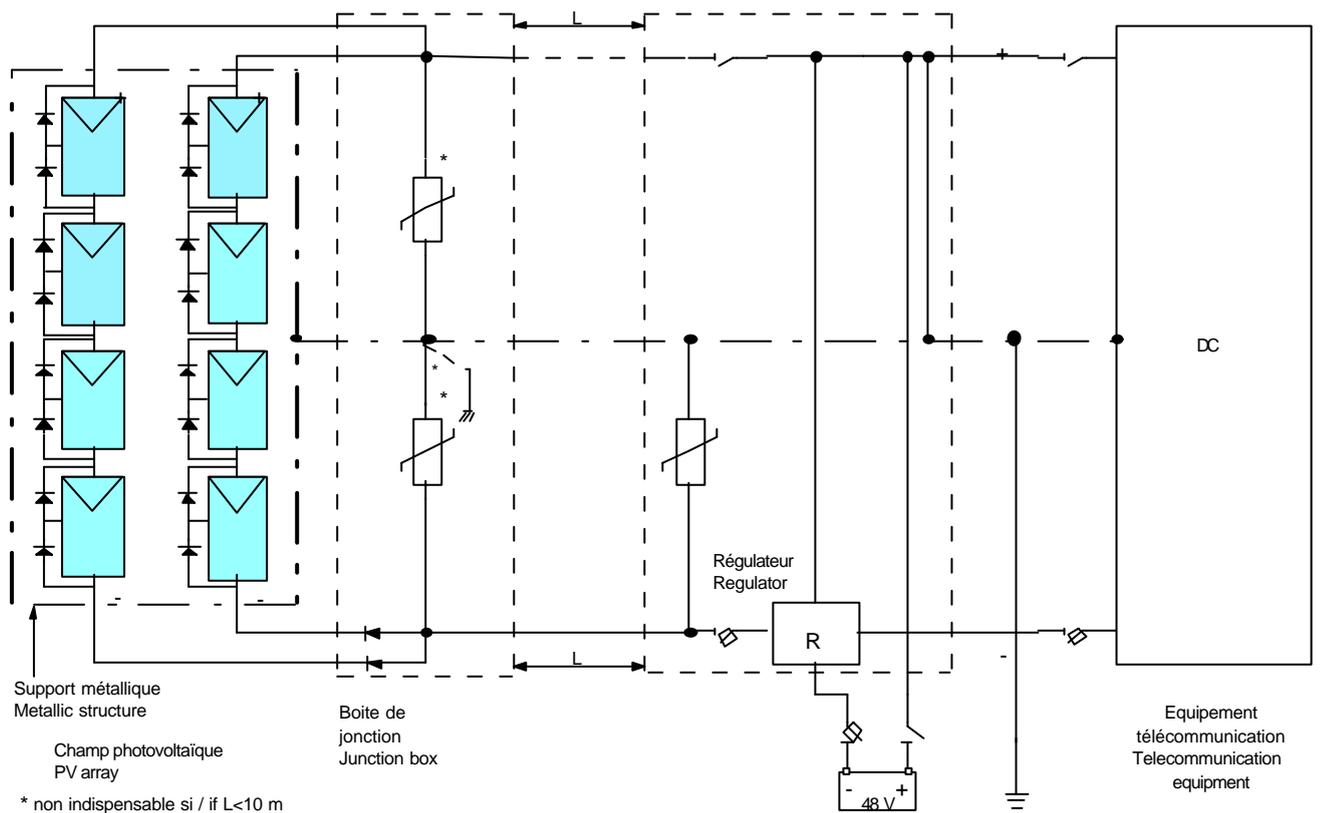
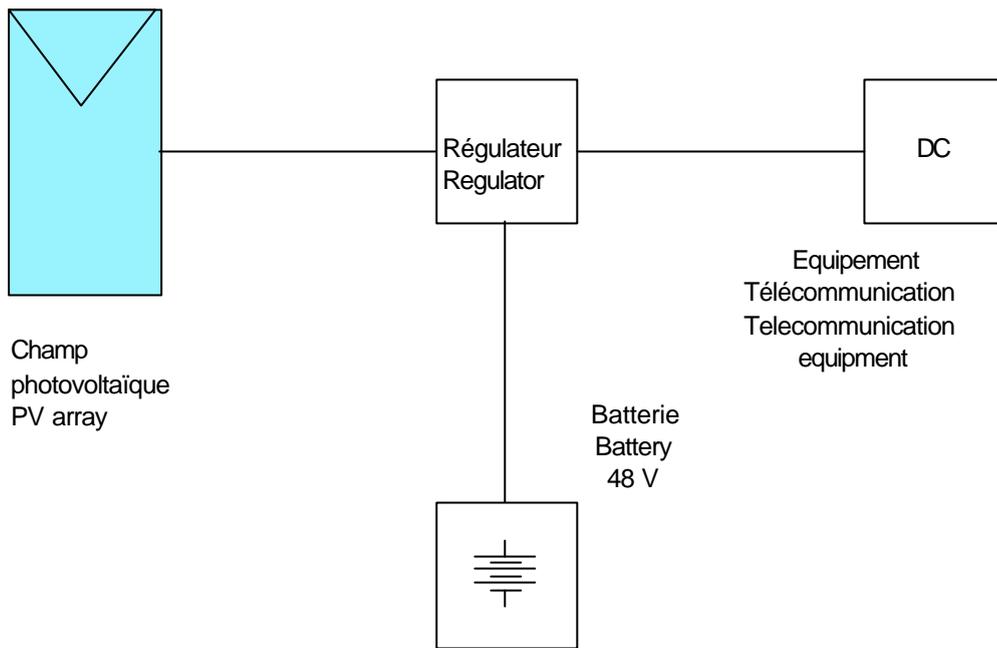


Figure 16 ALIMENTATION FAISCEAU HERTZIEN
PAR GENERATEUR PV
HERTZIAN BEAM PV POWER SUPPLY

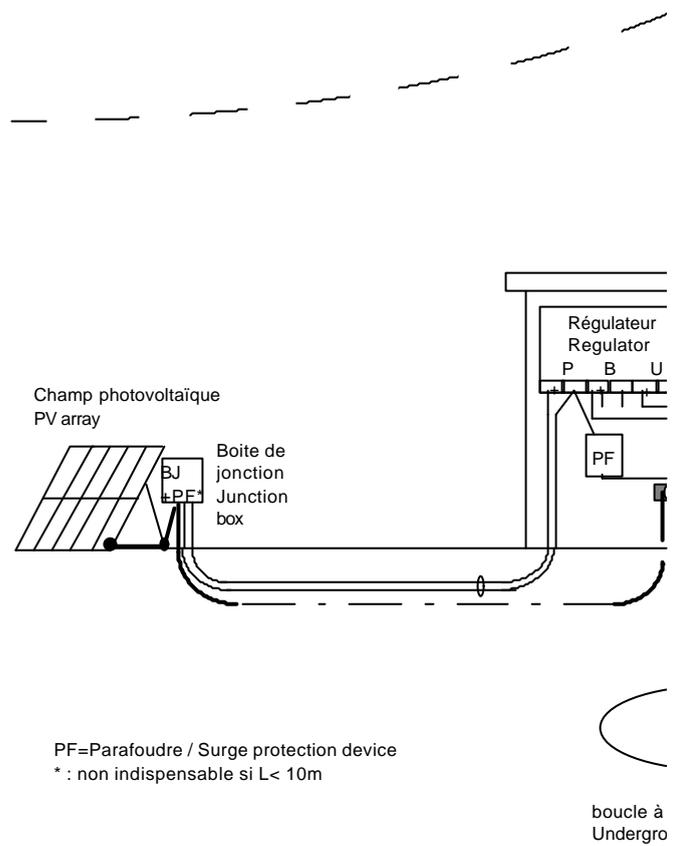


FIGURE 17 : FAISCEAU HERTZIEN ALIMENTE EN PHOTOVOLTAIQUE

5.6 Générateur photovoltaïque avec couplage réseau

Caractéristique de l'installation étudiée :

Générateur photovoltaïque débitant dans un réseau électrique de moyenne puissance (1 000 W à 2 000 W):

- modules fixés sur le toit d'une habitation,
- 12 modules 12 V en série.

application : photovoltaïque couplé au réseau

site d'implantation : milieu urbain

matériel à protéger : onduleur synchrone, récepteurs 230 V (valeur moyenne)

préjudices en cas de défaillance : faible

Principe de protection foudre retenu :

- interconnexion des masses par câble cuivre nu de 25 mm² entre champ photovoltaïque et onduleur.
- Mise à la terre des masses
- générateur photovoltaïque flottant
- liaison champ photovoltaïque/ onduleur avec protection renforcée
- Contrôleur permanent d'isolement généralement intégré dans l'onduleur
- Parafoudres sur circuit courant continu:
 - bipolaire dans la boîte de jonction si la liaison champ photovoltaïque est > 10 m (varistance à oxyde de zinc de caractéristiques : $U_c = 440 \text{ V}$, $U_p = 1,8 \text{ kV}$, $I_n = 5 \text{ kA}$) avec déconnexion thermique intégrée,
 - bipolaire en entrée onduleur.
- Parafoudres sur circuit alternatif :
 - Type modulaire pour régime TT à fort pouvoir d'écoulement sur réseau distributeur.

Conclusion : Compte tenu du risque moyen de foudroiement, on retiendra le niveau de protection moyen A.

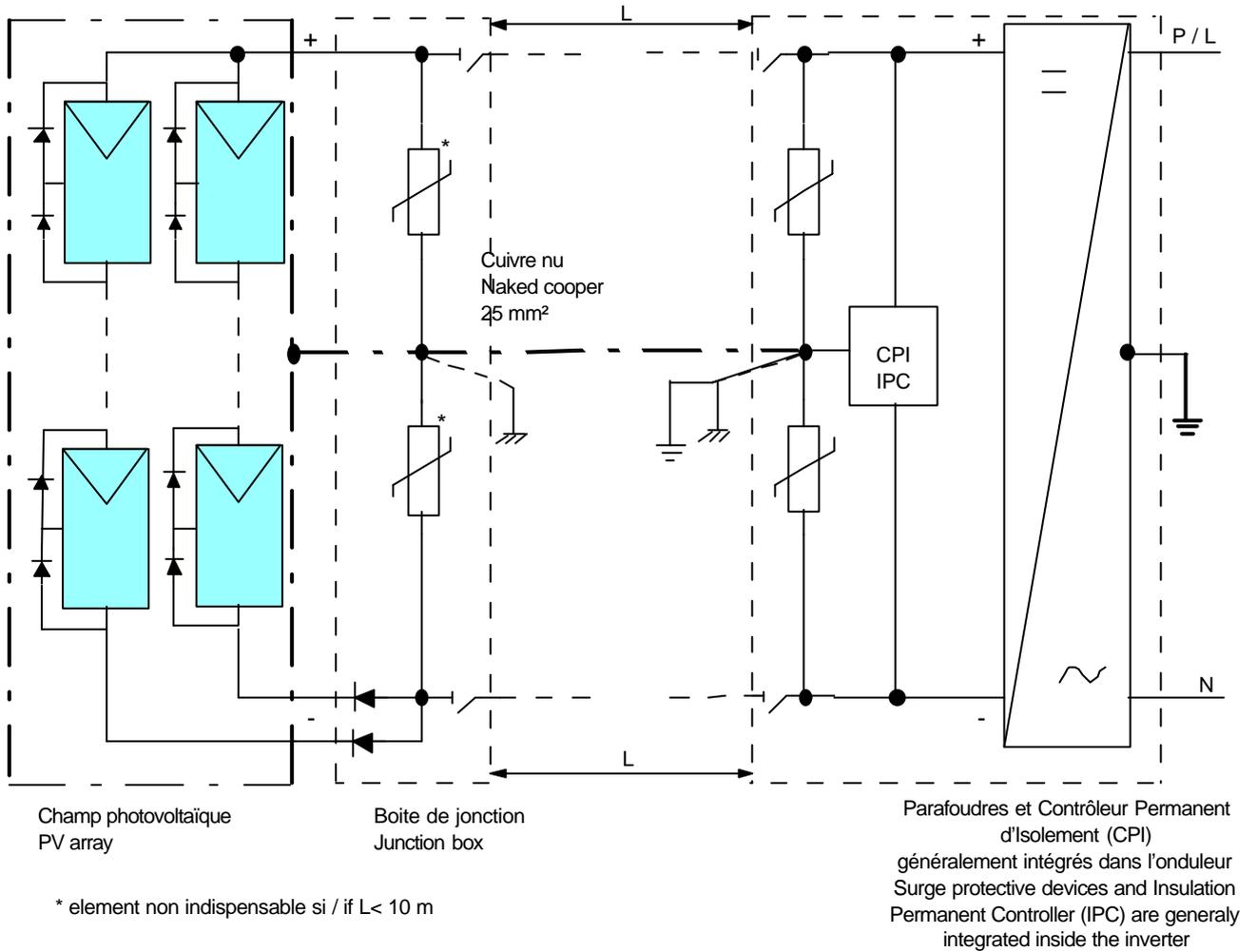
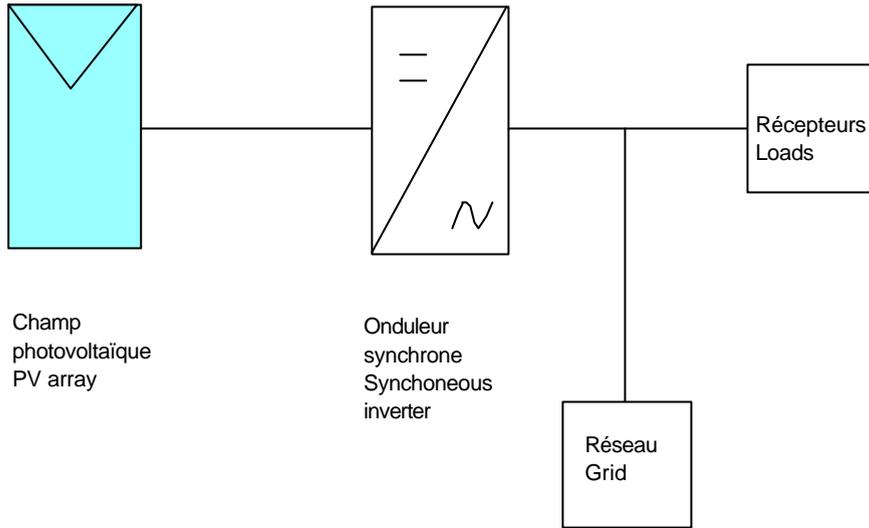
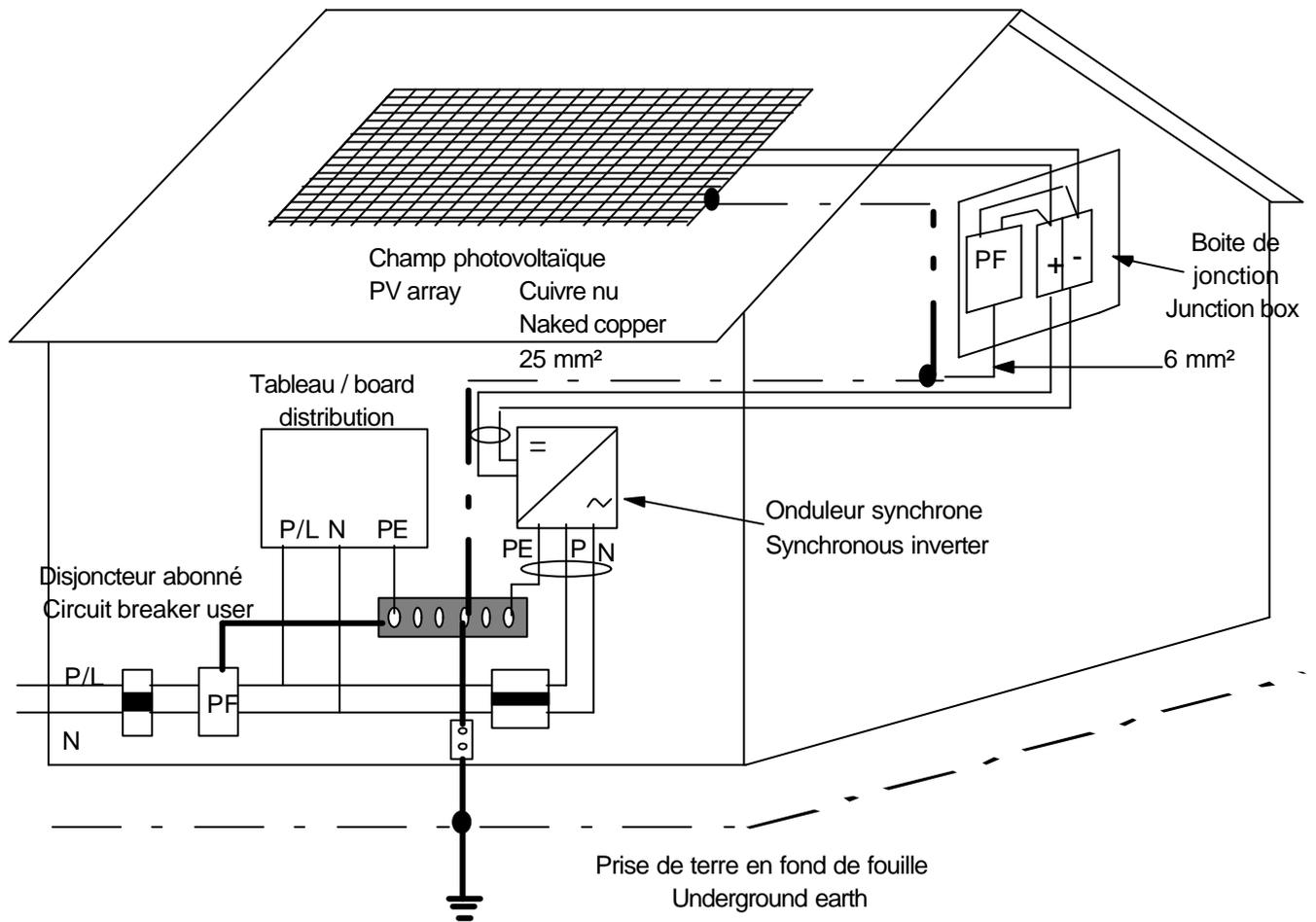


Figure 18 GENERATEUR PV COUPLAGE RESEAU
GRID CONNECTED PV GENERATOR



PF : parafoudre / surge protection device

5.7 Pompage photovoltaïque

Caractéristique de l'installation étudiée

Pompage au fil du soleil avec générateur photovoltaïque de moyenne puissance (par exemple 1 600 W):

- modules fixés au sol à 20 m du forage
- généralement 8 modules en série
- Onduleur à tension et fréquence variable (0 V à 80 V) fixé à l'arrière des panneaux photovoltaïques
- Réservoir avec sonde de niveau

application : alimentation en eau d'un village africain

site d'implantation : plaine

matériel à protéger : modules PV, onduleur (valeur financière moyenne)

préjudices en cas de défaillance : important

Principe de protection foudre retenu :

- interconnexion des masses par câble cuivre nu de 25 mm² fixé sur la structure entre champ photovoltaïque et onduleur.
- Interconnexion des masses du moteur par le biais du conducteur de protection du câble d'alimentation (4 conducteurs dont 1 vert/jaune)
- Mise à la terre des masses par un piquet de terre (si câble non enterré)
- Valeur de prise de terre non critique
- Polarité + à la masse et à la terre en entrée onduleur (sinon flottant)
- Parafoudres sur circuit courant continu:
 - bipolaire dans les boîtes de jonction modules (si longueur câble champ photovoltaïque/ onduleur > 10m)
 - unipolaire au niveau de l'onduleur (bipolaire si flottant)
 - varistance à oxyde de zinc (caractéristiques : $U_c > 250 \text{ V}$, $U_p = 1,5 \text{ kV}$, $I_n = 5 \text{ kA}$)
- Parafoudres sur circuit courant alternatif:
 - tripolaire à la sortie de l'onduleur si la distance entre onduleur et motopompe est >10 m (varistance à oxyde de zinc avec caractéristiques : $U_c > 240 \text{ V}$, $U_p = 1,5 \text{ kV}$, $I_n = 5 \text{ kA}$) avec déconnexion thermique intégrée
 - Parafoudre bipolaire sur arrivée de câble sonde de niveau (varistances à oxyde de zinc avec caractéristiques : $U_c > 250 \text{ V}$, $U_p = 1,5 \text{ kV}$, $I_n = 5 \text{ kA}$)

Conclusion : Compte tenu du risque moyen de foudroiement, on retiendra le niveau de protection de type A.

Note: Pour des sites très exposés à la foudre, il y aurait lieu de prendre des dispositions complémentaires :

- Installation de parafoudres sur circuit alternatif en tête de forage surtout si la liaison est longue (>30 m) et interconnexion des masses par cuivre nu 25 mm²
- mise en place de fils tendus autour du champ de modules pour le protéger, avec interconnexion des prises de terre
- Parafoudres avec $I_n \geq 10 \text{ kA}$

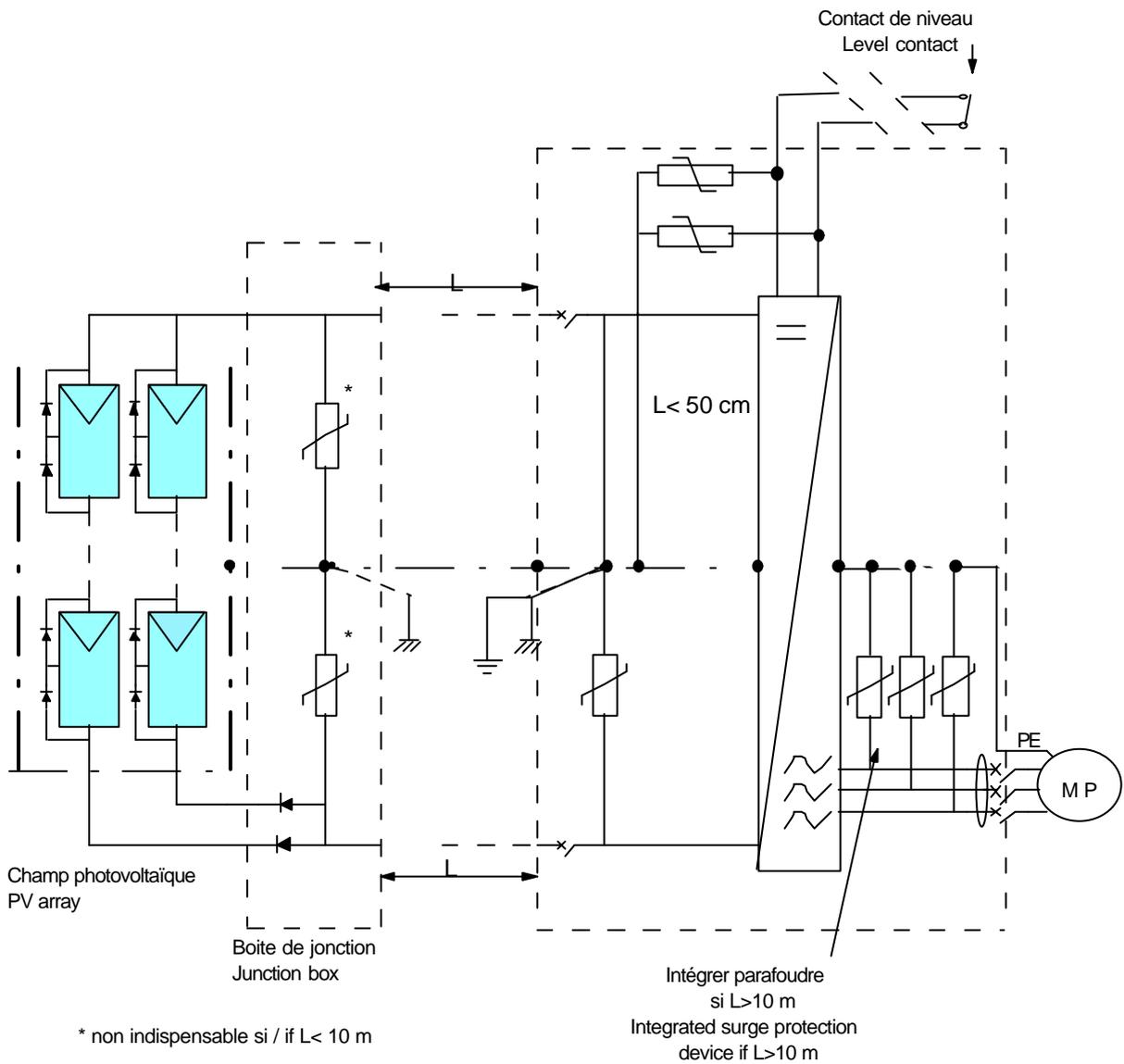
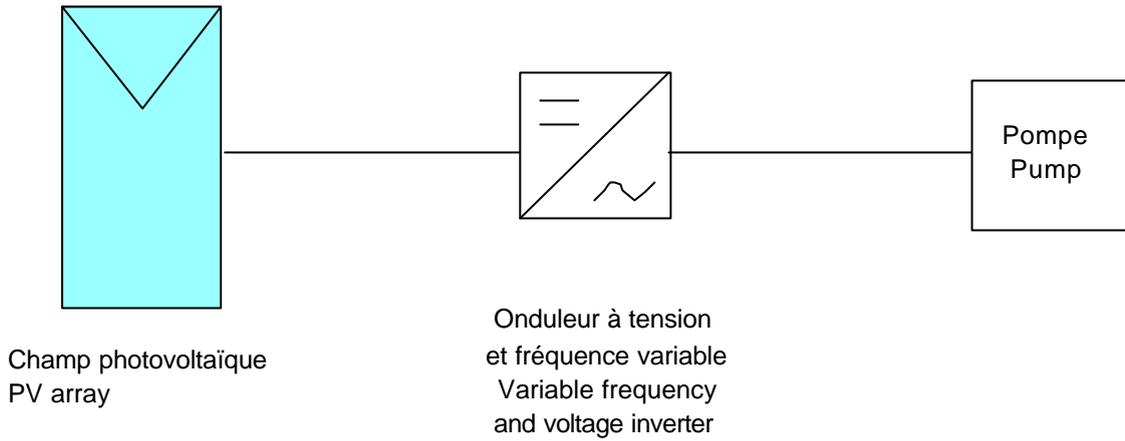
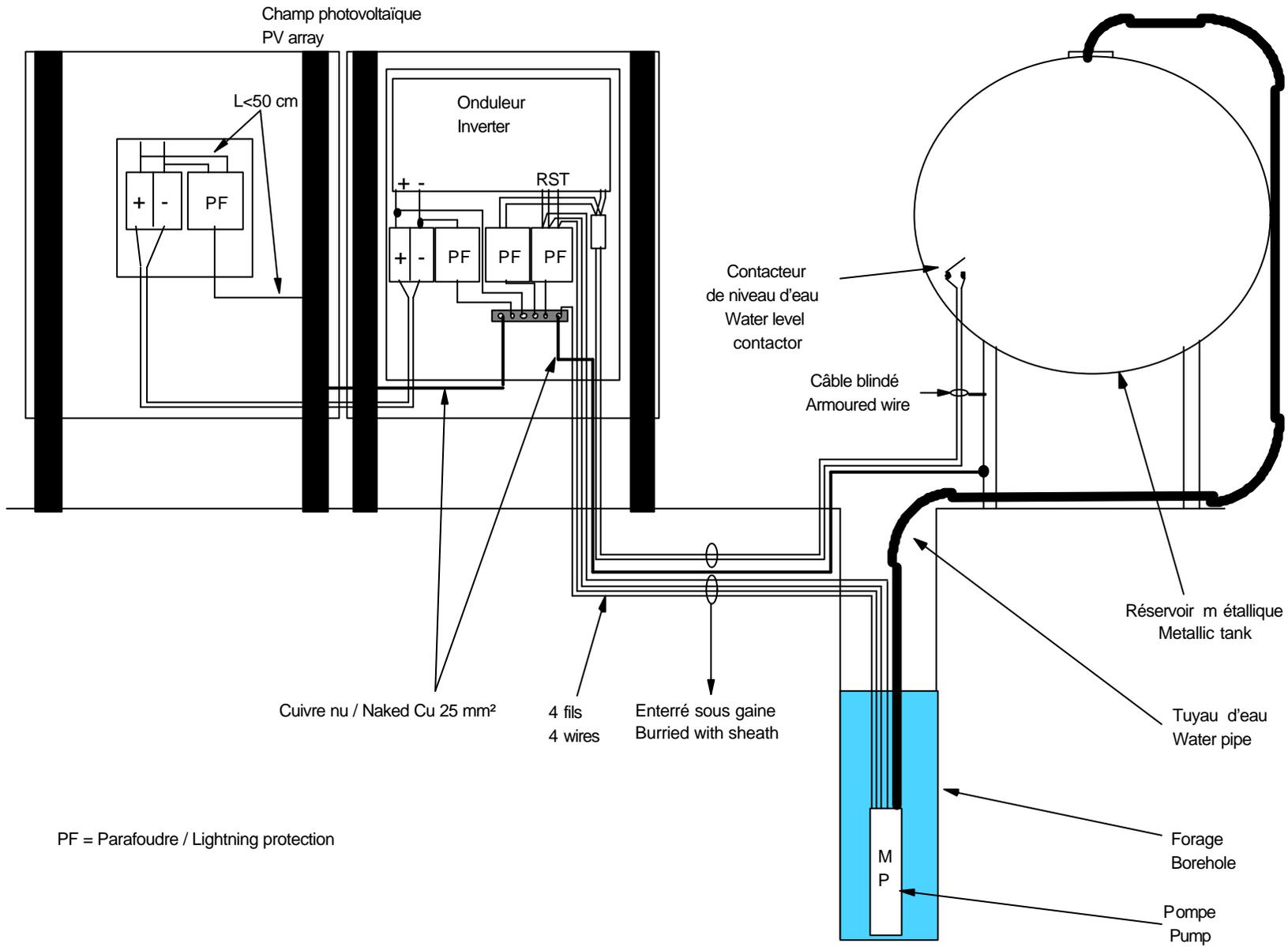


Figure 19 POMPAGE PV
PV PUMPING



5.8 Aérogénérateur pour alimentation autonome

Caractéristique de l'installation étudiée :

Aérogénérateur

- Génératrice triphasée
- Chargeur éolien
- Batterie 48 V
- Onduleur 48 V / 230 V

application : alimentation d'une habitation en site isolé

site d'implantation : plaine

matériel à protéger : génératrice, chargeur, onduleur

préjudices en cas de défaillance : important

Principe de protection foudre retenu :

- Mise à la terre de la masse de la génératrice par le biais du conducteur de protection du câble d'alimentation (4 conducteurs dont 1 vert/jaune)
- Mise à la terre du neutre de la génératrice en pied de mât
- Mise à la terre du mât par une patte d'oie
- Interconnexion des masses par câble cuivre nu de 25 mm² entre mât de l'aérogénérateur et les équipements électriques (chargeur, onduleur,...)
- Polarité + de la batterie à la masse et à la terre
- Parafoudres sur circuit CA:
 - tripolaire à la sortie de l'aérogénérateur si la distance entre l'éolienne et le chargeur est >10m (varistance à oxyde de zinc avec caractéristiques : $U_c : >440 \text{ V}$, $U_p = 1,5 \text{ kV}$, $I_n \geq 15 \text{ kA}$)
 - Parafoudre tripolaire sur arrivée de câble entrée chargeur (varistances à oxyde de zinc avec caractéristiques : $U_c : >440 \text{ V}$, $U_p = 1,5 \text{ kV}$, $I_n \geq 15 \text{ kA}$)

Conclusion : Compte tenu du risque moyen de foudroiement, on retiendra le niveau de protection de type B.

N.B. Pour des sites très exposés à la foudre, il y aurait lieu de prendre des dispositions complémentaires :

- Installation d'un paratonnerre de plus grande hauteur que l'éolienne avec interconnexion des prises de terre.

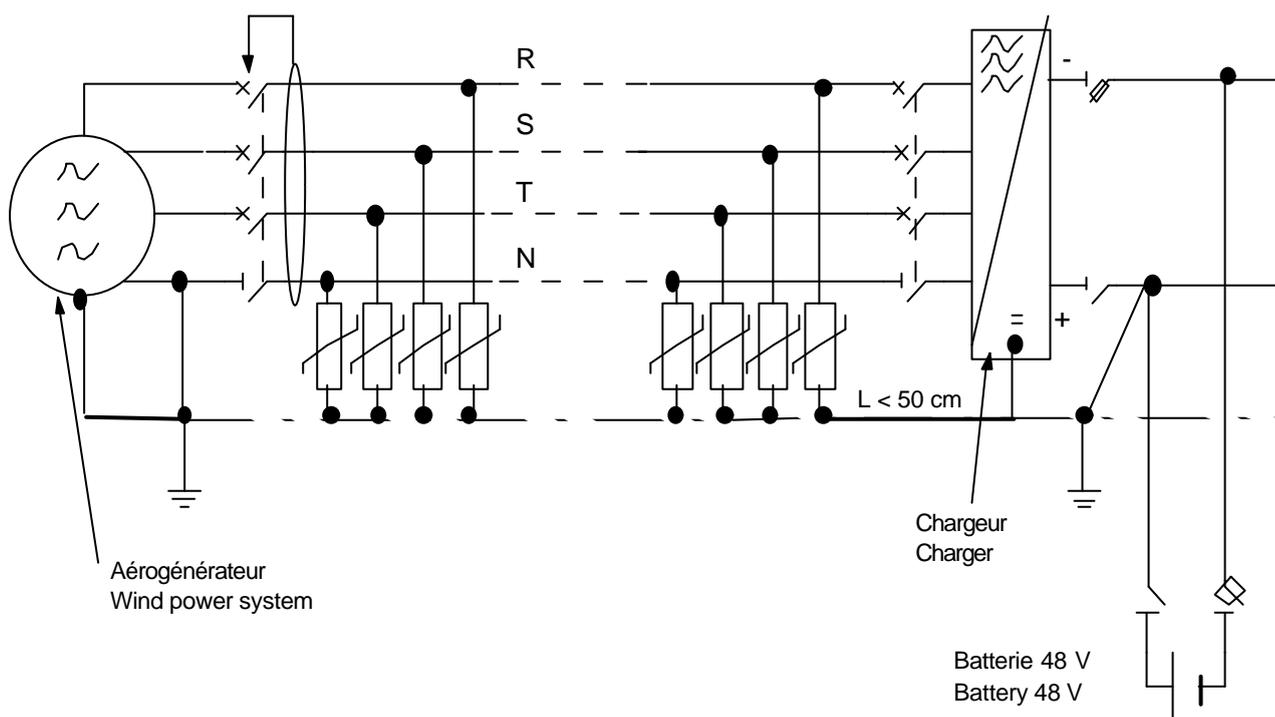
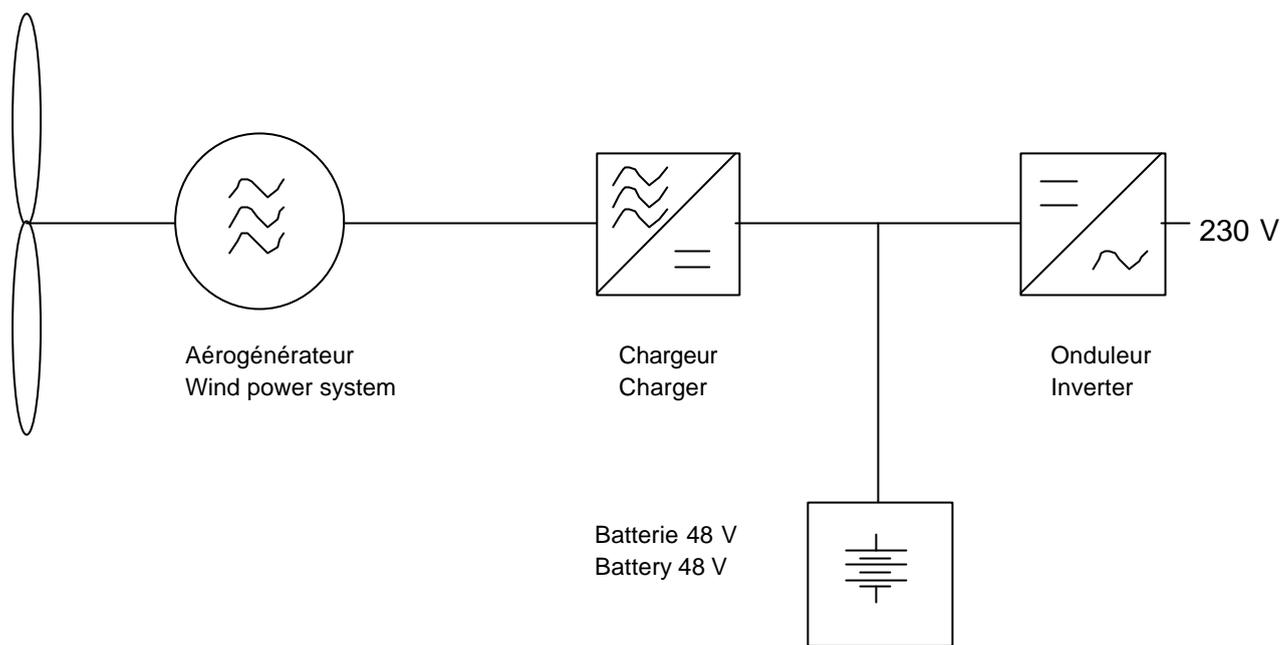
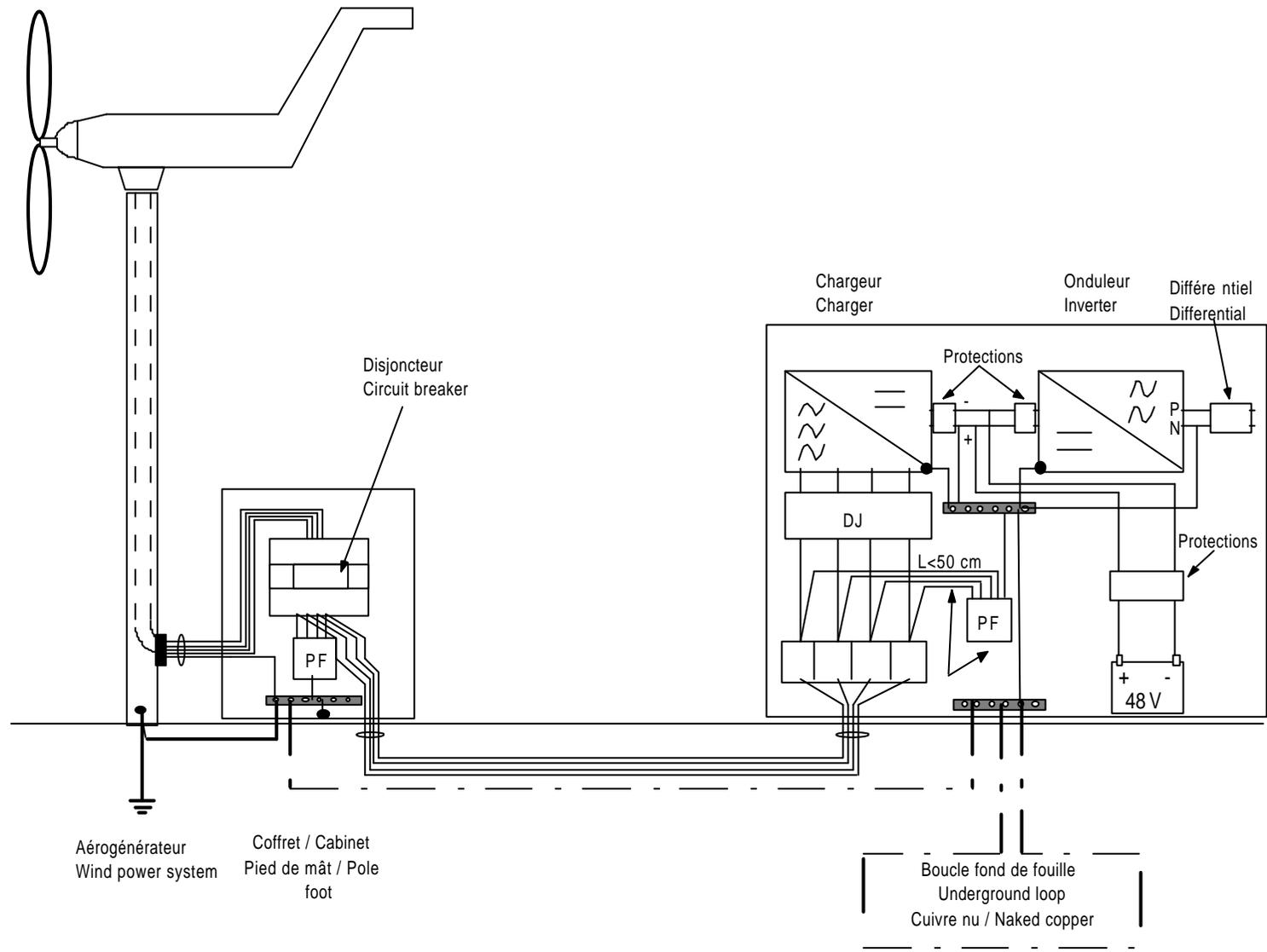


Figure 20 AEROGENERATEUR
WIND POWER SYSTEM



ANNEXE A

A.1 Formation et structure d'un nuage orageux

Les nuages orageux, généralement de type cumulo-nimbus, sont d'énormes masses représentant quelques centaines de milliers de tonnes d'eau, ayant une épaisseur de plusieurs kilomètres et dont l'altitude est comprise entre deux et trois mille mètres. Leur partie supérieure est constituée de cristaux de glace, les gouttes d'eau sont localisées dans la partie inférieure.

Les nuages orageux se forment avec l'apparition de courants atmosphériques ascendants. On distingue deux causes à leur formation :

- les effets combinés de l'humidité et d'un échauffement local du sol (orages de chaleur);
- la rencontre de masses d'air à température et humidité différente (orages cycloniques, ils se produisent plus particulièrement dans les régions tempérées).

Une fois les charges électriques séparées, les porteurs de charges positives sont entraînés par les courants ascendants, tandis que les charges négatives, dont les porteurs sont plus lourds, tendent à tomber sous l'action de leur poids. Cette hypothèse est corroborée par la formation simultanée des premiers éclairs et des grosses gouttes d'eau. Il faut cependant noter que des poches de charges positives sont très souvent détectées à la base du nuage, parmi les charges négatives, donnant également naissance à une pluie intense.

Considéré globalement, le nuage constitue un gigantesque dipôle électrique dont la structure verticale est d'une hauteur variant de deux à quatorze kilomètres.

A.2 Caractéristiques d'un coup de foudre

Un coup de foudre est toujours précédé par le développement d'une pré-décharge (appelée traceur) dont l'origine peut se situer dans le nuage ou au niveau du sol.

Le canal qui est ainsi formé, quoique faiblement conducteur, établit un chemin pour la conduction d'un courant intense (arc en retour). On distingue donc des coups de foudre ascendants (du sol vers le nuage) et descendants (du nuage vers le sol). Les coups de foudre ascendants sont déclenchés à partir d'un accident de relief du sol (structure élevée, montagne, etc.).

Par ailleurs, on qualifie le coup de foudre de négatif lorsque c'est la partie négative du nuage qui se décharge, et de positif dans le cas contraire. En Europe, continent à climat tempéré, 80 à 90 % des coups de foudre sont négatifs. Dans certains pays, tels que le Japon, on observe en hiver une majorité de coups de foudre positifs, dûs à la présence de courants atmosphériques.

A.2.1 Coup de foudre ascendant

Au sommet d'aspérités de grandes dimensions (tour de télécommunications hertziennes, gratte-ciel, structures élevées, situées au faite d'une montagne), le champ électrique peut être suffisamment amplifié pour donner naissance à un coup de foudre ascendant. L'éclair comprend un tronc commun, issu de l'aspérité, qui se ramifie vers le nuage. Cette arborescence, dont les filaments viennent lécher la base

du nuage, voit ses branches se rallumer les unes après les autres. La durée de la décharge subséquente peut atteindre une seconde, écoulant des intensités de courant de quelques dizaines de kiloampères, en des temps de montée inférieurs à la microseconde. Issu d'une région à champ moyen faible, le traceur ascendant se développe alors dans un espace dont le champ électrique croît avec l'altitude.

A.2.2 Coup de foudre descendant.

Cette configuration est de loin la plus probable en particulier en terrain plat. Le traceur est généralement de courant négatif et progresse vers le sol par bonds (entre deux bonds, le temps d'arrêt peut atteindre 100 μ s). Dès que la pointe du traceur approche le sol, un autre traceur, ascendant celui-là, issu d'un obstacle conducteur (arbres, paratonnerre, etc.), monte à sa rencontre.

La jonction des deux traceurs établit un court-circuit entre le nuage et le sol. Les charges superficielles du sol remontent alors vers le nuage (arc en retour). Cet arc en retour est souvent suivi de ré-allumages successifs, un courant permanent persiste qui décharge la plus grande partie de la charge du nuage. Il y a quelquefois plus d'une dizaine ré-allumages.

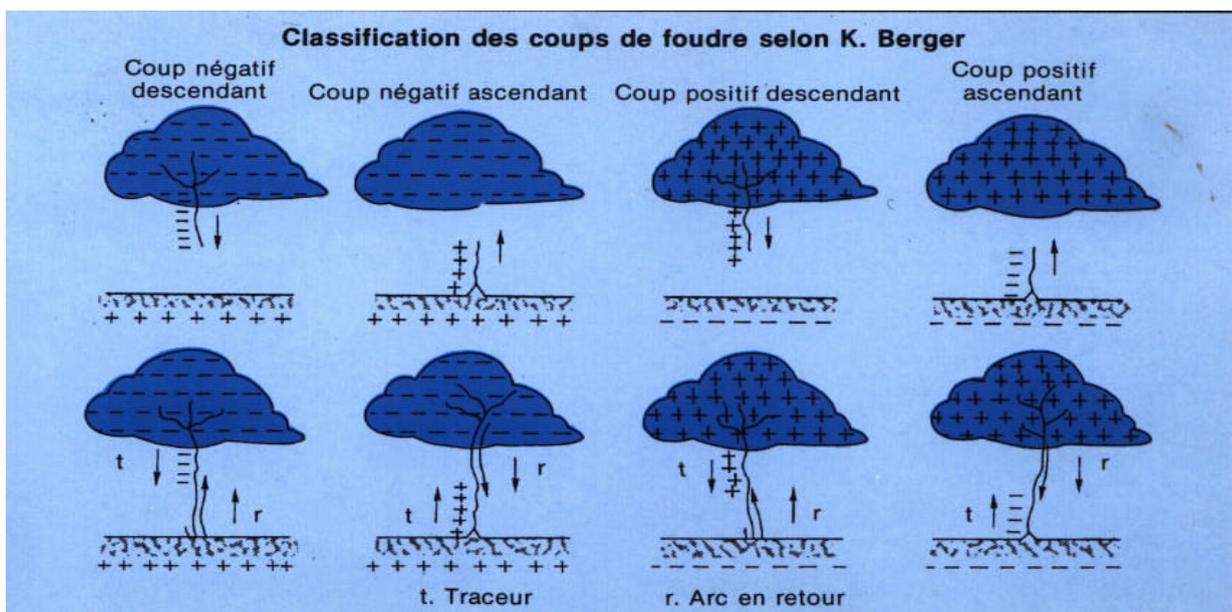


Figure 1: Forme et amplitude des coups de foudre descendants (source: A. Charoy)

Les coups de foudre négatifs présentent une succession d'impulsions de courant très varié. La première impulsion (dont le front de montée est compris entre 5 et 20 μ s et le temps de descente de l'ordre de 100 μ s) est suivie d'impulsions régulières et plus rapides, d'amplitude de crête inférieure à celle de la première décharge (voir ci-après.).

Les coups de foudre positifs sont constitués d'une décharge unique. Le front de montée de l'impulsion est compris entre 20 et 50 μ s, mais l'amplitude peut dépasser 100 kA.

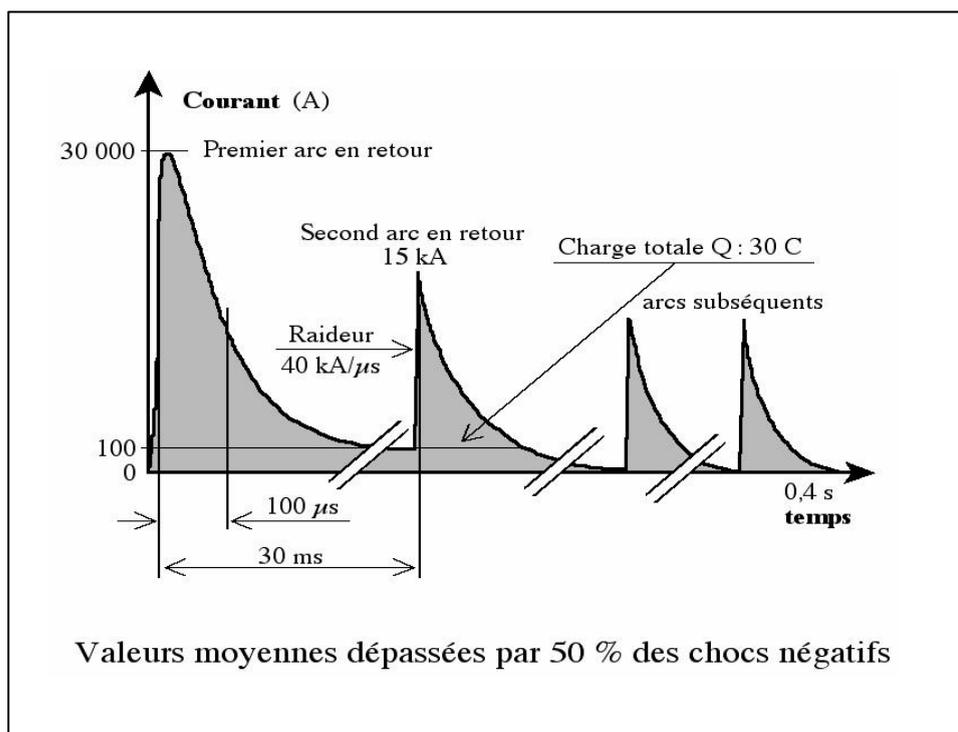


Figure 2: Les impulsions d'un choc foudre (source : A. Charoy)

A.3 Effets dus à la foudre.

Sans évoquer les effets particuliers sur les êtres vivants, l'impact de la foudre engendre plusieurs effets susceptibles d'affecter le fonctionnement des installations électriques, notamment :

- Les effets thermiques et électrodynamiques,
- Les effets de différence de potentiel entre terres,
- Les effets électromagnétiques.

A.3.1 Les effets thermiques et électrodynamiques :

Le passage brutal, sur une structure, d'un courant électrique très intense peut provoquer un incendie ou une fusion par effet Joule, en particulier aux points d'impact de la foudre et aux points de jonction et connexions le long du chemin emprunté par le courant de foudre.

D'autre part, lorsque le courant de foudre emprunte des conducteurs parallèles, il s'exerce entre ces conducteurs des forces électrodynamiques importantes pouvant entraîner des ruptures ou déformations importantes.

A.3.2 Les effets de différence de potentiel entre terres

- Montée de potentiel de sol

Lorsqu'un point de la terre reçoit le courant de foudre, le potentiel de ce point s'élève très fortement par rapport aux autres points du sol distants du point d'impact. Il apparaît un gradient de potentiel dans le sol, pouvant créer des situations dangereuses notamment pour les êtres vivants (tension de pas).

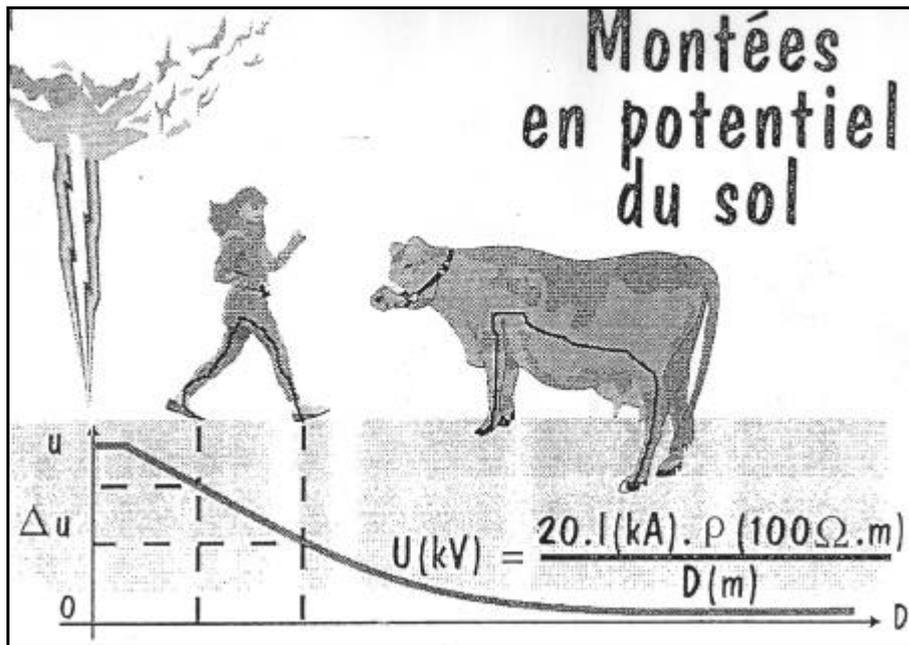


Figure 3: Montées en potentiel du sol (source: APAVE)

La résistivité d'un sol moyen est de l'ordre de 1000 ohm.m, et qui peut atteindre 10 000 en montagne donc $p = 100$ dans la formule ci-dessus.
Si un courant de foudre de 25 kA se produit à 100 m d'un être vivant, la tension de pas est de 500 V sur 1 m.

- Tension entre deux terres distinctes

Supposons une ligne électrique ou téléphonique reliant deux équipements distants ayant chacun une terre distincte (schéma TT).

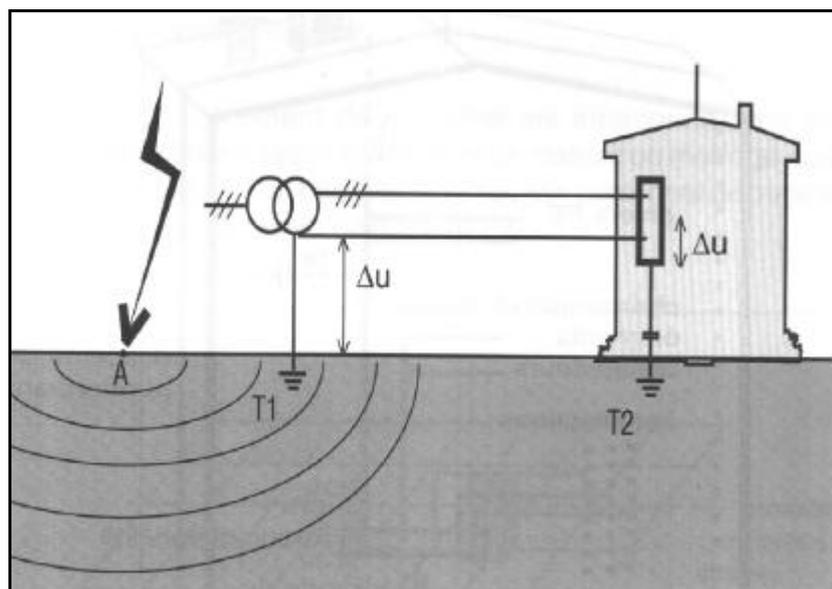


Figure 4: Surtension par la terre en schéma TT (source: Schneider)

Lorsque la foudre tombe à proximité d'un équipement, l'élévation de potentiel de la terre entraîne une différence de potentiel importante entre les terres. Il en résulte une surtension pouvant entraîner un claquage (rupture d'isolement entre conducteur actif et la masse) au niveau de l'équipement le plus éloigné du point d'impact.

A.3.3 Les effets électromagnétiques

Un coup de foudre tombant sur le sol équivaut à un courant électrique important traversant un long conducteur vertical. Celui-ci va provoquer des effets électromagnétiques qui vont se caractériser création d'un champ magnétique et électrique.

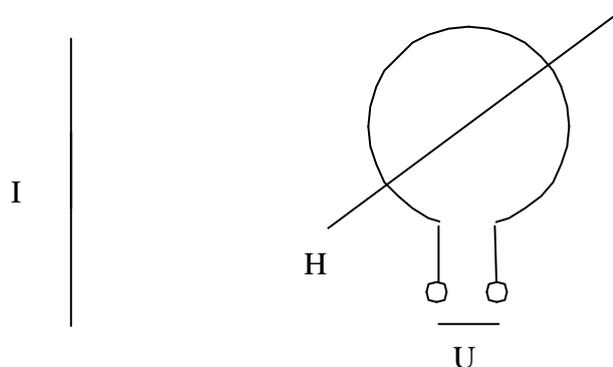
Champ magnétique :

L'amplitude du courant de foudre rapidement variable engendre un champ magnétique dont la variation donne lieu à une induction dans une boucle traversée par ce champ (Loi de Lenz).

La tension induite dans la boucle de surface S de la figure ci-jointe est donnée par la formule suivante:

$$U = 2 \times 10^{-7} \cdot S / r \cdot di/dt$$

avec r , distance entre le point d'impact et le centre de la boucle



La surtension induite aux bornes d'une boucle devient d'autant plus importante que la surface de boucle est importante.

Par exemple, pour une surface de 10 m^2 et un coup de foudre de pente $50 \text{ kA}/\mu\text{s}$, tombant à 20 mètres, la surtension induite en mode commun sur la liaison signal sera de 5 kV environ.

En pratique, les boucles les plus fréquentes sont constituées par les liaisons courant faible reliant les appareils communicants et les câbles d'alimentation.

D'autre part, des boucles importantes peuvent se former entre conducteurs et masse, notamment par une mise à la terre en étoile des masses de différents équipements communicants.

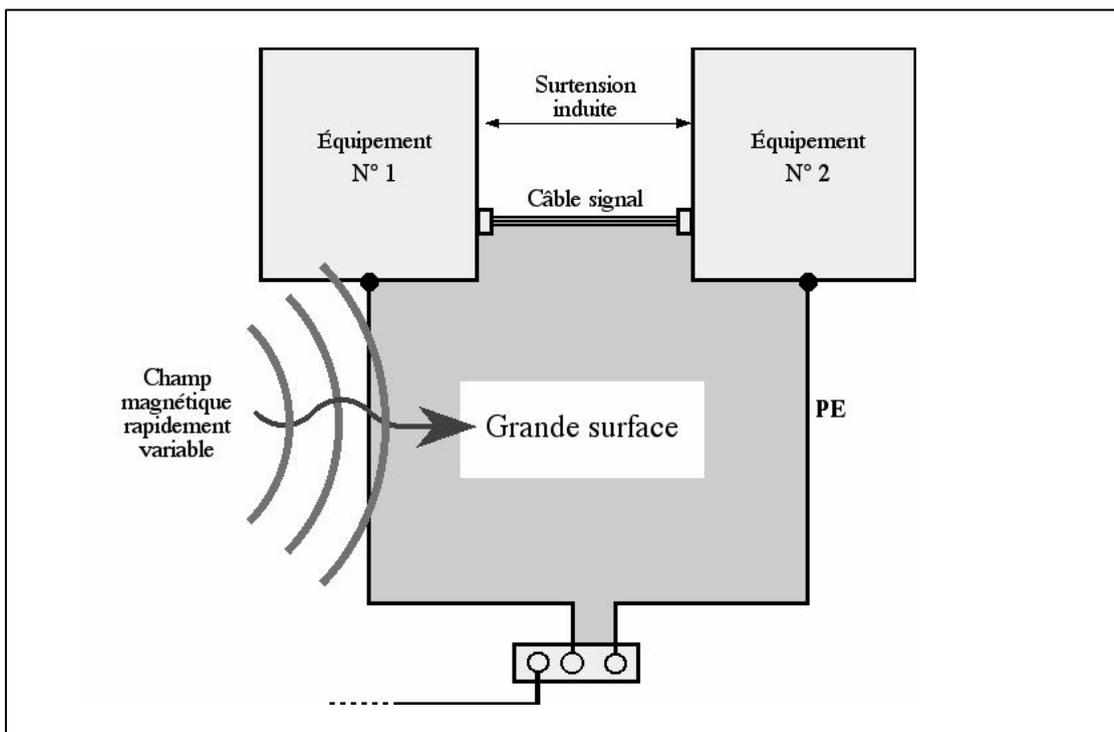


Figure 5: Masse en étoile = boucle de grande surface (source: A. Charoy)

Champ électrique :

Lorsque la foudre frappe le sol, ou un objet ou une structure, à proximité des conducteurs, une surtension de mode commun est induite sur la ligne par effet capacitif. La surtension est fonction de l'intensité du courant de foudre et de sa proximité.

Cette surtension induite peut évidemment devenir elle-même une surtension conduite. C'est par exemple le cas d'une surtension due à la chute de la foudre près d'une ligne aérienne (électrique ou téléphonique), devenant une surtension conduite par la ligne.

ANNEXE B

B.1 Normes

Liste non exhaustive de normes se rapportant aux surtensions et à la foudre applicables aux installations basse tension :

Pour la France :

- NFC 15 100 : Installations électriques à basse tension(1991, mise à jour : déc1994)
 - Chapitre 44 : protection contre les surtensions
 - Chapitre 53 : Surintensités et surtensions
 - Chapitre 54 : Mise à la terre
 - Chapitre 60 : Vérification et entretien des installations
- NFC 17-100 Protection des structures contre la foudre (décembre 1997)
- NFC 61 740 : parafoudres pour installation basse tension (juillet 1995)

Et le guide,

- UTE C15-443 : Protection des installations électriques basse tension contre les surtensions d'origine atmosphérique (juillet 1996)

Au niveau international :

- CEI 61173 : *Overvoltage protection for photovoltaic power generating systems*
- CEI 61000-4-5 : Compatibilité électromagnétique : essai d'immunité aux ondes de choc (2001)
- CEI 61024-1 : Protection des structures contre la foudre- principes généraux (1990°)
- CEI 61024-1-1 : Protection des structures contre la foudre- choix des niveaux (août 1993)°
- CEI 61312-1 : Protection contre l'impulsion électromagnétique générée par la foudre (février 1995)
- CEI 61662 : Evaluation des risques de dommages liés à la foudre

B.2 Bibliographie

- Compatibilité électromagnétique, A.Charoy (Edition Dunod 2000)
- Guide de la protection contre la foudre (UTE juin 2000)
- La foudre et la protection des installations, A. Kouyoumdjian (Groupe Schneider mars 1997)
- La foudre (Soulé/Techno-Nathan 1989)
- Compatibilité électromagnétique – Manuel didactique 1995 (Télémechanique)
- *Lightning and overvoltage protection in photovoltaic and solar thermal systems* (Commission Européenne 2000)
- Compatibilité électromagnétique (Groupe Schneider 1995)
- Protection foudre en milieu rural (Promotelec Août 1997)
- *Surge and Lightning Protection for the Stand-alone PV system* (John Wiles 1992)
- *Lightning protection in photovoltaic systems* (Fraunhofer Institute)

- *A simple method for lightning protection of PV systems* (H. Haberlin und R. Minkner) April 1994
- Protection contre les effets de la foudre (Directives pour l'utilisation des ENR dans l'électrification rurale décentralisée – EDF / ADEME - Juin 1997)
- La foudre: un risque à traiter (journées techniques APAVE- mai 2000)

B.3 Quelques fournisseurs de parafoudres

- SOULE : www.domofoudre.com
- CITEL : www.citel.fr
- PHOENIX CONTACT : www.phoenixcontact.com
- DEHN : www.dehn.de
