



300 rue des Arts & Métiers
21410 - PONT DE PANY
Tél. : 03.80.49.76.75
Fax. : 03.80.49.76.31
www.adee.fr

GÉNÉRALITÉS SUR LA Foudre ET LES SURTENSIONS

Table des matières

1	Origines des surtensions	4
1.1	Phénomène transitoire	4
1.2	Surtension	4
1.3	Réseau de distribution d'énergie	4
1.3.1	Perturbation électromagnétique de manœuvre	4
1.3.2	Défauts du réseau	5
1.3.3	Importance des surtensions générées par le réseau	5
1.4	Réseau de communication	5
1.5	Foudre	5
1.5.1	Chute directe sur une ligne	5
1.5.2	Chute directe sur des masses métalliques	5
1.5.3	Induction électromagnétique	5
1.5.4	Couplage capacitif	8
1.5.5	Remontée de potentiel par la terre	9
2	Effets des surtensions	11
2.1	Claquages	11
2.2	Destruction des composants électroniques	11
2.2.1	Sensibilité aux fronts raides	11
2.2.2	Fragilisation	12
2.3	Danger pour les personnes	12
3	Propagation des surtensions	13
3.1	Onde de surtension	13
3.2	Onde de manœuvre	13
3.3	Onde de foudre	13
3.4	Atténuations	14
3.5	Amplification	14
3.6	Transmission à travers les transformateurs et les photocoupleurs	14
3.7	Transmission par les chemins de câbles	15
3.8	Vitesse de propagation	15
3.9	Surtensions secondaires	15

4	Qualités d'une protection	16
4.1	Introduction	16
4.2	Temps de réponse	16
4.2.1	Définition	16
4.2.2	Courbes tensions – courants – fronts	17
4.3	Forte résistance à l'état de veille	17
4.4	Éviter que le dispositif provoque une surtension	17
4.5	Posséder une faible capacité	17
4.5.1	Capacité propre du parafoudre	17
4.5.2	Ordres de grandeur	17
4.6	Posséder une faible inductivité	17
4.6.1	Compréhension du processus	17
4.6.2	Effet bénéfique des masses	18
4.7	Être fiable	18
4.7.1	Coup de foudre direct	18
4.7.2	Cas des varistances	18
4.8	Avoir un grand pouvoir d'écoulement	20
4.9	Impossibilité de placer les protections au niveau des cartes électroniques	21
4.10	Place d'une protection	21
4.10.1	Effet d'accumulation d'une inductance	21
4.10.2	Processus de mise en conduction du parafoudre	22
4.11	Compatibilité des protections surtension énergie avec les diverses protections du réseau d'énergie	23
4.11.1	Disjonctions intempestives des disjoncteurs différentiels	23
4.11.2	Destruction de la protection en court-circuit	23
4.12	Conclusion	23
5	Mode commun, Mode différentiel	24
5.1	Définition	24
5.2	Production des surtensions	24
5.3	Sensibilité des appareils	24
5.4	Processus d'élimination d'une surtension	25
6	Méthodologie	26
7	Valeurs de terre	27

Origines des surtensions

1.1 Phénomène transitoire

On définit par phénomène transitoire, l'évolution des surtensions entre deux états de fonctionnement permanent.

✓ condensateurs (MT ou BT)

Pour ces deux derniers appareils, il est important de savoir que la charge du réseau est variable au cours d'une journée ou d'une année.

Cette variation de charge entraîne des variations de chutes de tensions dans les lignes de transport ainsi que des variations de l'énergie réactive.

1.2 Surtension

On qualifie de surtension toute tension fonction du temps qui dépasse la tension crête de régime permanent à sa tolérance maximale.

Pour que la tension à l'utilisation (basse tension ou moyenne tension) soit contenue dans une tolérance acceptable par les appareils, le distributeur d'énergie est contraint d'adapter en permanence la tension en tête des lignes de transport. Cette opération s'effectue au niveau des transformateurs en commutant certains enroulements et en commutant des batteries de condensateurs. L'importance des surtensions qui en découlent est aléatoire et dépend particulièrement de l'angle de phase de déclenchement.

1.3 Réseau de distribution d'énergie

1.3.1 Perturbation électromagnétique de manœuvre

On peut établir une liste d'appareils qui, lors de commutations, peuvent générer des surtension de manœuvre. Nous ne citerons que quelques-uns de ceux créant des surtensions significatives :

- ✓ moteurs puissants
- ✓ générateurs à ultrasons
- ✓ soudure à arc
- ✓ four micro-ondes
- ✓ régulateurs à thyristors ou triacs
- ✓ variateurs de vitesse
- ✓ disjoncteurs
- ✓ transformateurs

Ces surtensions de « manœuvre » sont aussi appelées surtensions harmoniques ¹ car leur fréquence d'oscillation amortie est très souvent un multiple de la fréquence du réseau.

Citons, à titre d'exemple, des mesures faites dans les sous-sols de la Tour Elf à Paris la Défense, en 1991, crête à 12 kV en 15 ns dues à des harmoniques véhiculées par les lignes équipotentielles.

¹ ne pas confondre les harmoniques de tension avec les harmoniques de courant qui ne font pas du tout l'objet de cette étude.



1.3.2 Défauts du réseau

Citons quelques types de défauts :

- ✓ arbre touchant une ligne
- ✓ isolateur encrassé
- ✓ défaut de connexion
- ✓ défaut de terre

Ces défauts provoquent des courants élevés à la terre.

En général, ceux-ci s'accompagnent d'une disjonction et d'un réenclenchement en charge du disjoncteur. Les surtensions sont alors dues principalement à des phénomènes de réflexion d'onde amplifiés par les charges résiduelles.

1.3.3 Importance des surtensions générées par le réseau

En pratique, on constate que les surtensions de manœuvre d'enclenchement peuvent atteindre jusqu'à 5 fois la valeur de crête de la tension assignée du réseau considéré (6.5.5. M. Aguet et J.J. Morf, Traité d'électricité, Éditions Georgi, Suisse). Leur probabilité est très élevée puisqu'un grand nombre de manœuvres s'effectuent journalièrement et particulièrement entre 6h et 9h, à la remontée en charge du réseau.

Les surtensions sur défaut peuvent être plus importantes, mais leur probabilité est plus faible (1 par an environ pour un site donné). Les parafoudres moyenne tension permettent une diminution importante des surtensions sur défaut, car ils évitent le déclenchement des disjoncteurs.

Ces surtensions sur défaut sont aussi appelées surtensions temporaires et leur durée s'établit entre 300 ms et 5 s.

1.4 Réseau de communication

Les surtensions venant du réseau de télécommunications peuvent être provoquées par la chute d'une ligne d'énergie ou plus fréquemment par couplage inductif ou capacitif entre la ligne d'énergie et la ligne téléphonique.

1.5 Foudre

1.5.1 Chute directe sur une ligne

C'est un processus extrêmement rare (1 fois tous les 100 ans en un lieu déterminé); Les énergies développées sont telles que les conducteurs peuvent disparaître. Les dégâts sur les appareils de tête d'installation sont importants (compteurs, disjoncteurs)

1.5.2 Chute directe sur des masses métalliques

Ce cas est relativement fréquent, c'est le processus du paratonnerre sur une masse métallique avec des écoulements élevés à la terre. La surtension est créée, soit par le rayonnement électromagnétique du pylône de la structure métallique ou éventuellement du paratonnerre, soit par la montée en potentiel de la masse métallique (voir 1.5.4), soit par le champ magnétique rayonné par l'éclair.

Il a été mesuré lors des essais de foudre provoquée à ST PRIVAT D'ALLIER, des tensions de 200 000 V sur un pylône de 20 mètres de hauteur pendant quelques dizaines de microsecondes (μs). C'est la variation extrêmement rapide qui est responsable de surtensions par couplage (voir 1.5.3)

Il faut relativiser le risque de ce type de surtension. On sait, sur la France entière, qu'à chaque saison d'orage beaucoup de coups de foudre atteignent des masses métalliques. Mais en fait, la véritable probabilité pour un mât de 25 mètres de hauteur en un lieu donné quelconque, est de $\frac{Nk}{1000}$ fois par an (Nk = niveau kéraunique du lieu). En moyenne en France, un coup tous les 100 ans. Toutefois cette probabilité ne tient pas compte des concentrations de lignes de champs (voir 1.5.3.4.1).

1.5.3 Induction électromagnétique

Cette fois, il s'agit de la production de surtensions, la plus fréquente, la plus pernicieuse (effets à distance), la plus destructrice (fronts très

raides).

Note liminaire : Il est important de souligner que la connaissance dans ce domaine est extrêmement récente (1982) et que la compréhension des phénomènes est loin d'être complète.

1.5.3.1 Quelques chiffres

Les mesures de ST PRIVAT D'ALLIER sur une ligne d'énergie de 260m de long située à 50 m de l'impact de foudre en son point le plus près, ont révélé des surtensions de 74000 volts, et un courant de 86 ampères avec un temps de montée de $1,2 \mu s$ (front $60 \text{ kV}/\mu s$). Les mesures sur une ligne téléphonique de 2 fois 100m de long située à 1400m de l'impact de foudre en son point le plus près, ont révélé des surtensions de 680V à 820V, et un courant de 1 Ampère environ avec des temps de montée de $0,4 \mu s$ à $10 \mu s$ (front de $68 \text{ V}/\mu s$ à $2 \text{ kV}/\mu s$).

Des mesures faites par l'équipe du C.N.R.S. de Grenoble rapportées lors d'une conférence à l'université de Paris VII le 24 avril 1985, ont fait état de variations de champ électrique au niveau du sol de $-10 \text{ kV}/\text{m}$ à $+100 \text{ kV}/\text{m}$ le temps de la variation pouvant aller jusqu'à la nanoseconde (ns). Ces variations n'apparaissent pas toujours synchronisées avec le coup de foudre, et le plus souvent le précèdent. Elles accompagnent particulièrement les éclairs intra-nuages extrêmement fréquents.

1.5.3.2 Processus

L'induction électromagnétique engendrée par des champs magnétiques, par des variations de champ électrique, par des variations de courant, est complexe mais bien connue. On a les moyens de calculer les effets à partir de données précises en utilisant les équations de Maxwell (Gardiol, Ianovici, Zücher, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne). D'une manière simple, ce qu'il faut retenir, c'est la notion de temps. Plus celui-ci est court, plus le processus est dangereux. C'est la variation rapide qui engendre l'effet à distance et cela surprend. En d'autres termes, c'est de l'électrodynamique. La loi d'ohm ($U = RI$) ne s'applique plus, il ne s'agit que d'équations

différentielles introduisant les variations de grandeur.

Nous sommes obligés d'insister sur la nouveauté de cette analyse. Nous lisons encore trop souvent que des ondes de choc à front raide ($10 \text{ kV}/\mu s$ à $100 \text{ kV}/\mu s$) n'existent pas sur les réseaux, qu'ils soient d'énergie ou de télécommunications, considérant que la résistance des conducteurs, l'inductance linéique, les capacités parasites atténuent ces fronts et leur font perdre leur raideur avant qu'ils n'arrivent aux appareils électroniques.

Nous devons souligner le caractère totalement erroné de ces affirmations. Elles reposent sur l'hypothèse que les ondes à front raide viennent de très loin.

Il n'en est absolument rien, car les variations de champ magnétique et de champ électrique se produisent sur une très grande surface autour et dans la zone orageuse. Ces variations se produisent donc tout près des habitations, entre deux bâtiments agricoles, en ville, etc...

L'exemple des feux de signalisation avec leurs boucles de détection de véhicule est très significatif de ces phénomènes : c'est très souvent le premier composant en contact avec la boucle qui meurt lors des orages, et il s'agit de site urbain en principe moins exposé. On a observé le même phénomène en ville pour des boucles de transmission d'information, dans une station-service, entre les volucompteurs.

1.5.3.3 Exemples

Pour illustrer la formule $U = L \frac{di}{dt}$ avec une inductance L très faible, nous citerons un fait bien connu des installateurs de paratonnerre : pose de la descente de cuivre qui relie le paratonnerre à la terre L'installateur est obligé de contourner des corniches (1.1). S'il s'agissait d'un câble électrique classique, celui-ci épouserait tout naturellement la forme des corniches. Dans le cas de la descente de paratonnerre, l'installateur prend soin de passer les corniches en posant des supports éloignant le câble de l'édifice. Essayons de comprendre : l'inductance de contournement est de l'ordre de $1 \mu H$.

Ainsi, lors de l'écoulement d'un courant de 100kA pendant $10 \mu s$, la tension au point A entre

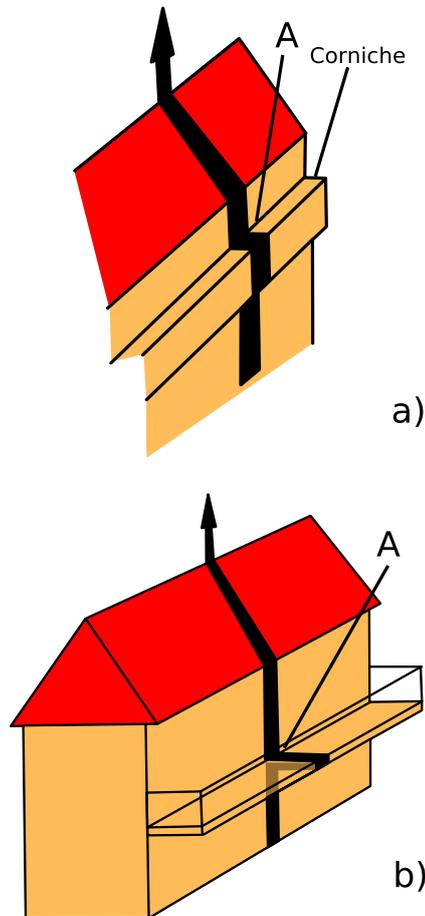


FIG. 1.1 – descente paratonnerre avec contournement d'acrotère

le conducteur et l'édifice peut atteindre :

$$\begin{aligned}
 U &= L \frac{di}{dt} & L &= 1.10^{-6} \\
 di &= 100.10^3 \\
 dt &= 10.10^{-6} \\
 U &= 10\,000 \text{ Volts}
 \end{aligned}$$

Cette tension très élevée oblige l'installateur à éloigner son câble de la corniche pour éviter le claquage.

De même dans le cas de la figure 1b, il percera le balcon.

1.5.3.4 Site exposé ou non exposé

1.5.3.4.1 Facteurs d'accentuation

Les aspérités au niveau du sol (végétation, construction, relief sous-sol ...) concentrent les lignes de champ, et les électrons libres évoluant sous l'influence des champs très intenses atteignent une énergie cinétique suffisante *pour ioniser l'air*. Sans aller jusqu'à ioniser l'air (processus du coup de foudre) il est certain que les concentrations des champs apportées par les aspérités du sol, concentrent également les variations des champs qui sont les acteurs des surtensions (voir 1.5.3.2). Exemple : une personne avait des détériorations très fréquentes d'appareils électroniques (télévision, téléphone). Elle a constaté que ses ennuis avaient disparu le jour où s'est érigée une maison d'habitation un peu au-dessus de la sienne à flanc de colline. Tous ces phénomènes sont assez mal connus. On utilise la méthode statistique ou empirique (figure 1.2) et la simulation sur ordinateur.

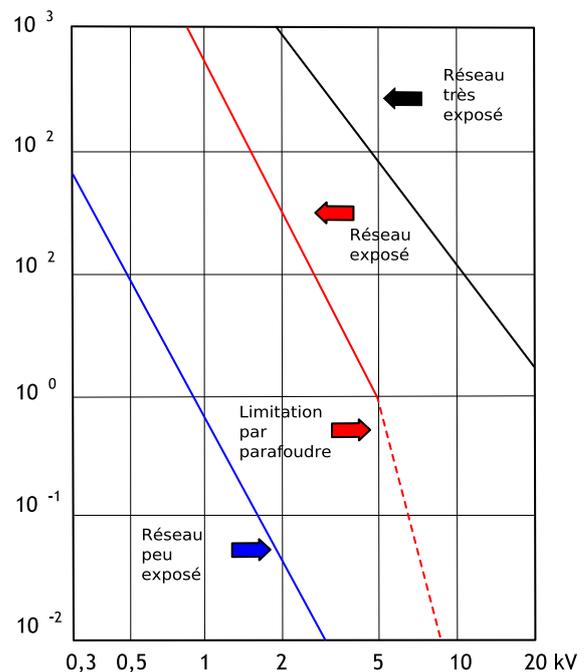


FIG. 1.2 – Statistiques de surtensions de foudre

Statistiques de surtension de foudre. La surtension de foudre étant liée au courant de foudre par l'impédance caractéristique de la ligne, on a

établi des statistiques de surtension de foudre.

NATURE DU TERRAIN	RÉSISTIVITÉ (en Ω/m)
Terrains marécageux	qq unités à 30
Limon	20 à 100
Humus	10 à 150
Tourbe humide	5 à 100
Argile plastique	50
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Marnes du jurassique	30 à 40
Sable argileux	50 à 500
Sable siliceux	200 à 3 000
Sol pierreux nu	1 500 à 3 000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Calcaires tendres	100 à 300
Calcaires compacts	1 000 à 5 000
Calcaires fissurés	500 à 1 000
Schistes	50 à 300
Micaschistes	800
Granits et grès	1 500 à 10 000
suyant altération	
Granits et grès très altérés	100 à 600

TAB. 1.1 – Tableau de résistivités types

1.5.3.4.2 Site exposé et niveau kéraunique

Le niveau kéraunique N_k est défini comme le nombre de jours orageux par année (Météorage donne la densité de foudroiement N_g). Un jour est qualifié orageux si l'on peut entendre au moins un coup de tonnerre au lieu d'observation fixé. Exemple en Auvergne, le N_k est de 25 et en Bretagne de 10.

L'expérience ne montre pas la corrélation absolue entre le niveau kéraunique et les sites exposés. On trouve beaucoup de sites exposés en Bretagne, contre toute attente.

Les véritables raisons ne sont pas bien élucidées, mais on peut avancer la notion de reliefs qui concentrent les lignes de champ (1.5.3.4.1) sans que ce soit en rapport avec l'altitude.

La constitution du sol, par ses irrégularités,

concentre les lignes de champ. Le sol et le sous-sol sont plus ou moins bons conducteurs (granit). Tous ces facteurs amplifient ou non les effets de la foudre (1.1).

Un autre aspect est lui, par contre mieux connu depuis les travaux auxquels nous avons déjà fait allusion (1.5.3.1), c'est la possibilité d'avoir d'importantes variations de champ électrique au niveau du sol avec « un temps orageux » sans entendre le tonnerre. En d'autres termes, on recueille les effets pervers de la foudre sans que le coup de foudre se produise. Or, nous l'avons vu, le niveau kéraunique ne compte que les jours orageux avec tonnerre et Météorage ne compte que les impacts au sol.

1.5.3.4.3 Un site exposé est-il identifiable a priori ?

La réponse est non.

Seules, les destructions fréquentes peuvent donner la mesure de l'exposition aux surtensions.

Toutefois, le degré d'exposition est moindre lorsque le réseau est fortement maillé comme en zone urbaine. Mais attention, il s'agit d'une observation statistique et il existe malgré tout des sites exposés en zone urbaine.

L'analyse du risque proposée dans le guide pratique UTE C 15-443² est une bonne approche, il lui manque toutefois un coefficient de réseau maillé et un coefficient de résistivité du sol.

1.5.4 Couplage capacitif

Très souvent, la terre est considérée comme équipotentielle. Cette affirmation, si elle est exacte lorsqu'on observe avec des moyens limités au 1/10^e de seconde, ne l'est pas du tout en électrocinétique, lorsqu'on observe avec des moyens allant de la milliseconde (ms) à la nanoseconde (ns).

Dès qu'un écoulement de courant se produit dans le sol, les différences de potentiel longitudinales entre deux points A et D (figure 1.3) sont régies

²version juillet 96

par des lois où interviennent des facteurs comme l'intensité et la variation de l'intensité dans le temps ($\frac{di}{dt}$).

Ces chutes de tension longitudinales peuvent alors prendre des valeurs extrêmement importantes si I ou $\frac{di}{dt}$ sont élevés.

L'origine de l'écoulement de terre peut être un défaut de la ligne d'énergie, un coup de foudre sur le pylône de la ligne d'énergie, le fonctionnement d'un paratonnerre ou un coup de foudre proche.

Expliquons le phénomène pour une ligne de transmission formée d'un câble multibrins équipé d'un écran métallique (figure 1.3), câble téléphonique blindé par exemple.

Les couplages à la terre A et B d'une part, et C et D d'autre part, sont proches (quelques dizaines de mètres), tandis que la distance entre B et C est de plusieurs kilomètres.

Au moment de l'écoulement, la différence de potentielle longitudinale entre A et D va être voisine de celle de B à C. Le câble possède une capacité entre conducteurs et enveloppe uniformément répartie que l'on représente pour moitié à chaque extrémité, de même qu'une infinité de conductances représentées également à chaque extrémité (celles-ci sont de très grande valeur et interviennent peu). Il apparaît donc aux bornes de chaque capacité représentée, une tension $\frac{V_{BC}}{2}$. Celle-ci charge la capacité avec un courant qui a une variation $\frac{di}{dt}$. Ce courant de charge se retrouve sur les conducteurs actifs. Les phénomènes sont en réalité fort complexes car chaque $\frac{di}{dt}$ que ce soit dans la terre, dans la gaine, dans les capacités, a une influence sous forme inductive.

Il en résulte le passage d'une surtension sur les conducteurs actifs, celle-ci est souvent appelée improprement «remontée de terre».

il se produit des différences de potentiel entre les différents points de la terre. Si une prise de terre se trouve dans le gradient d'élévation, les masses des appareils reliés à cette prise de terre se trouvent portées à un potentiel élevé par rapport à leur environnement et particulièrement par rapport aux réseaux (énergie, télécommunications) qui ont un potentiel fixe à l'infini (1.3).

1.5.5 Remontée de potentiel par la terre

Lors d'un écoulement important à la terre dû :

- ✓ à la foudre (sur un arbre ou autre)
- ✓ au fonctionnement d'un paratonnerre
- ✓ au fonctionnement d'un parafoudre
- ✓ à la foudre sur une masse métallique (pylône)

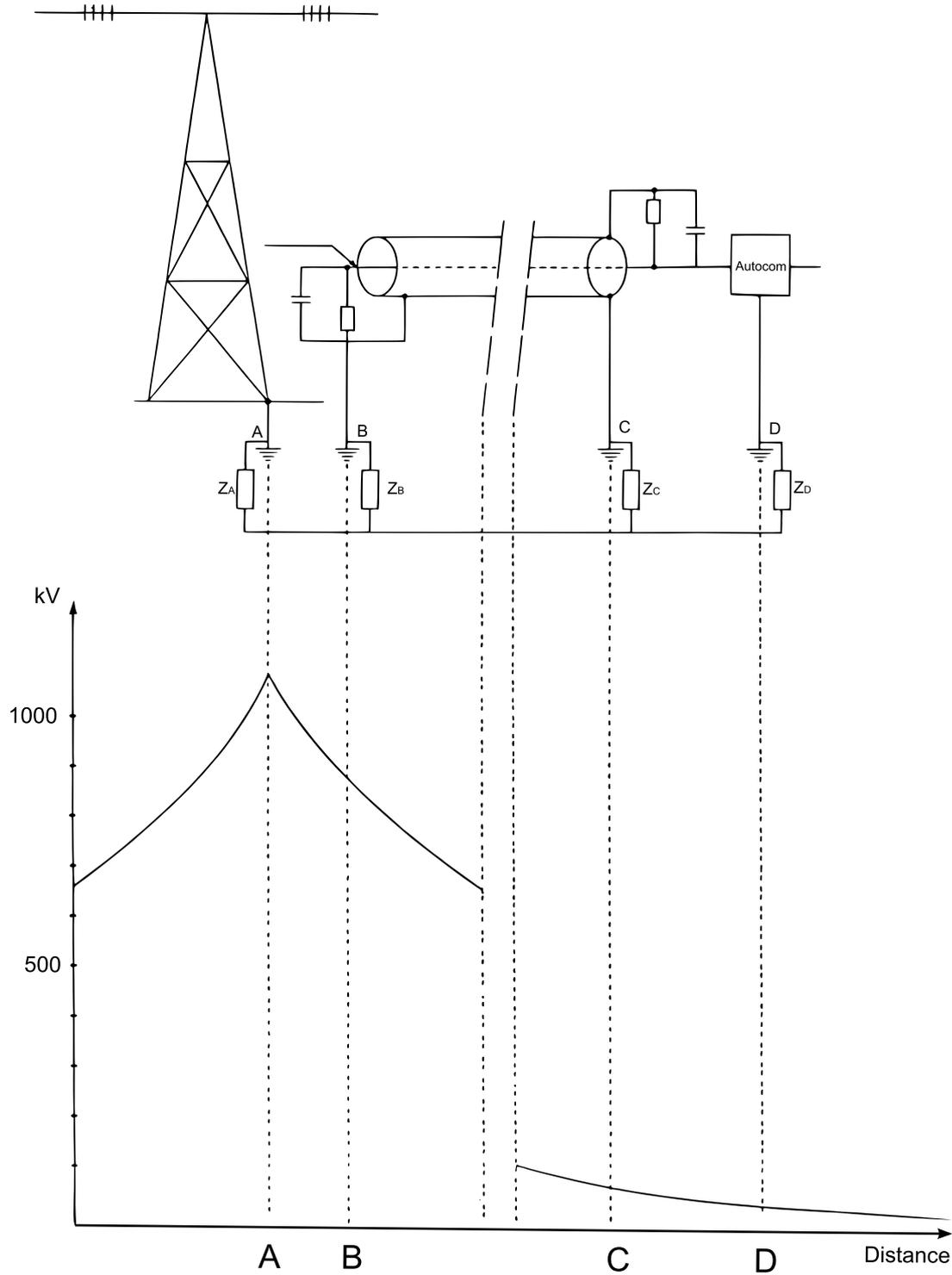


FIG. 1.3 – Mode d'apparition des « remontées de terre »

Effets des surtensions

2.1 Claquages

Le phénomène de claquage se produit chaque fois qu'une tension dépasse la tension d'isolement.

Très souvent, le claquage se produit entre un conducteur actif et des masses métalliques reliées à la terre.

Le claquage dans l'air qui se manifeste par l'amorçage d'un arc est, conformément à ce qui précède, le dépassement de la tension de l'isolant air. C'est le cas pour deux pistes voisines de circuit imprimé.

Les tensions d'isolement et de claquage sont nécessairement supérieures à 1500V (voir Normes).

Les phénomènes sont très facilement identifiables. Les protections classiques sont efficaces.

2.2 Destruction des composants électroniques

Il s'agit de phénomènes nouveaux dus aux nouvelles techniques de fabrication des composants électroniques. Ces composants sont de plus en plus performants, de plus en plus rapides, de plus en plus microscopiques et de plus en plus sensibles aux surtensions.

2.2.1 Sensibilité aux fronts raides

Dans notre esprit, les fronts raides se situent entre $5000V/\mu s$ et $100000V/\mu s$.

Pour simplifier, l'évolution de la sensibilité des circuits actifs aux fronts raides est liée à l'augmentation de l'impédance des entrées. Ainsi, les transistors à effet de champ sont plus sensibles que les transistors bipolaires. Ceci s'explique par l'obligation pour la surtension d'écouler son énergie en créant un courant. Lorsqu'elle rencontre une impédance élevée, elle ne peut créer le courant, même infime, nécessaire à son amortissement et elle s'applique donc en totalité à la première jonction qu'elle rencontre. Ces jonctions ont des dimensions de plus en plus petites (micromètre) et leurs tensions de claquage ont considérablement diminué ces dernières années.

Ces explications sont simplistes et la réalité est beaucoup plus complexe, mais elles permettent aux concepteurs de prévoir certains phénomènes.

En particulier, nous pouvons expliquer le fait qu'une surtension par rapport à la terre est dangereuse pour tout appareil connecté au seul et unique fil qui véhicule la surtension, même si l'appareil en question n'est pas connecté à la terre : la surtension va écouler son énergie en traversant les jonctions qu'elle va détruire et en créant un courant de charge de la masse de l'appareil comme dans un condensateur.

En d'autres termes, c'est la masse de l'appareil qui assure le retour du courant et non plus la terre. Plus la masse est importante (cuivre et fer)

et complexe (aspérités), plus le courant peut être grand.

Nous retrouverons en 5.4 l'obligation pour une surtension de créer un courant pour disparaître. Note : sur une carte électronique, tous les condensateurs reliés à la masse servent également à écouler les courants baladeurs.

2.2.2 Fragilisation

Une constatation bien simple nous donne une bonne idée de la fragilisation. Notre calculatrice de poche ne sera jamais en panne, ou plus exactement, le circuit intégré de celle-ci ne sera jamais en panne, car la calculatrice est alimentée par une pile et aucun fil reliant le circuit intégré n'est assez long pour être le siège d'une surtension induite par variation de champ électrique ou rayonnement électromagnétique. En conséquence, elle n'est jamais soumise à une surtension.

La fragilisation, c'est le processus de destruction d'une jonction après avoir été soumise à une succession de surtensions répétitives. Pour bien comprendre ce phénomène, on peut prendre le cas de la destruction d'une pastille d'un composant de puissance. Les premiers pics de surtension vont réaliser un ou plusieurs microclaquages de la pastille, c'est-à-dire qu'en certains endroits microscopiques, la pastille n'a plus ses caractéristiques d'homogénéité, de pureté du cristal.

En cet endroit précis, le courant ne circule plus et de ce fait, le courant est plus fort aux alentours de ce microclaquage, un échauffement local va en résulter, ainsi qu'une plus grande fragilité pour les prochaines surtensions, si bien que chaque microclaquage a tendance à s'agrandir.

C'est le même phénomène qui se produit pour les imperfections de fabrication qui font que tout composant actif électronique a un taux de défaut décroissant durant les 500 premières heures.

Pour les composants haute impédance, la fragilisation ne s'effectue pas tout à fait de la même manière. La description précédente concernant les composants de puissance donne tout de même une idée du processus.

2.3 Danger pour les personnes

Les pics de surtensions de durées très courtes sont totalement inoffensifs, tout au plus, ils sont assimilables à une décharge d'électricité statique désagréable mais inoffensive (portes des voitures).

Les écoulements à la terre élevés, suite à des décharges de foudre, peuvent introduire un certain danger pour les personnes (tension de pas, élévations de potentiel de certaines masses métalliques). Nous ne pouvons dans ces lignes, décrire ces phénomènes, mais on retiendra que ceux-ci sont plus dangereux dans les zones à sol et sous-sol de forte résistivité (figure 3).

Propagation des surtensions

3.1 Onde de surtension

Pour étudier le cheminement d'une surtension, nous sommes obligés de l'assimiler à une onde qui se propage sur des conducteurs et qu'il est possible de décomposer en séries de Fourier. Compte tenu du type de génération des ondes de surtension dangereuses, nous considérerons que l'onde est véhiculée par un seul conducteur. Elle est en effet toujours produite par rapport à la terre ou par rapport à une masse (voir 5).

de charge est égale à la fréquence des ondes rectangulaires se propageant sur la ligne (5 fois la tension initiale).

L'étude de ces phénomènes dépend de la configuration du réseau. Sa complexité nécessite le recours au calcul, à la mesure in situ et à la statistique.

3.2 Onde de manœuvre

La forme des ondes de manœuvre d'enclenchement ou de déclenchement dépend essentiellement des caractéristiques du réseau considéré. Le nombre des schémas équivalents est pratiquement infini, l'étude de la propagation se fait donc dans des cas simples que l'on tente de retrouver dans la pratique. Par exemple, lorsqu'une ligne est mise sous tension par une source de faible impédance interne (cas du réseau d'énergie), les réflexions du saut de tension initial créent à l'extrémité ouverte une onde de tension rectangulaire. Si la ligne est fermée sur une inductance (transfo MT) et une capacité en série (capacité de la ligne), ceux-ci sont soumis à une excitation par chocs répétés. Par suite des oscillations, la tension aux bornes du récepteur est susceptible de dépasser la tension d'excitation. Les surtensions atteignent des valeurs maximales lorsque la fréquence propre du circuit oscillant

3.3 Onde de foudre

Le spectre de l'onde de foudre est beaucoup plus large (fréquences très élevées), que celui de l'onde de manœuvre. Un coup de foudre comporte plusieurs décharges (4 en moyenne) et chaque décharge est précédée par des milliers de précurseurs ou traceurs, créant des milliers de surtensions, chacune pouvant être décomposée en série de Fourier pour former le spectre. La configuration du réseau produit des effets encore plus aléatoires sur ces milliers d'ondes générées par la foudre.

En laboratoire, on se borne à simuler la foudre par des ondes biexpansionnelles, mais cela ne correspond pas à la réalité du spectre observé sur un site donné et résultant d'une multitude de couplages (3.1).

Exemple d'une onde de laboratoire dite 8/20

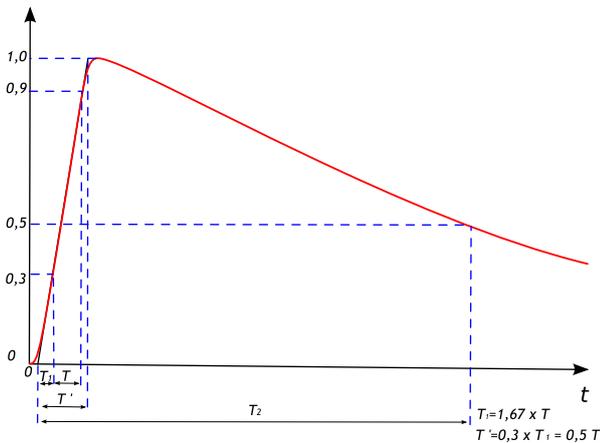


FIG. 3.1 – Onde normalisée de foudre type 8/20μs

3.4 Attenuations

La résistivité des conducteurs, les inductances des transformateurs, la saturation des circuits magnétiques, le grand nombre de branches du réseau sont autant de facteurs d'atténuation des surtensions. Ces facteurs sont statistiquement prépondérants et seulement moins de 1 % des surtensions produites échappent à l'addition de ces atténuations.

Il est heureux que ces facteurs d'atténuation soient présents, car la multitude de surtensions qui apparaissent à longueur de journée et d'année, rendrait impossible l'usage d'appareils électroniques. Celles qui échappent à l'effet d'atténuation (bien moins que 1 %) sont responsables des destructions, et malheureusement, au lieu d'être atténuées, elles peuvent être amplifiées.

3.5 Amplification

Les circuits oscillants accordés sur une fréquence, amplifient la surtension (3.2). On imagine donc facilement que la combinaison inductance capacité des différentes configurations du réseau soit amplificatrice pour certaines fréquences des spectres de surtensions abordant ces configurations. Cela peut être le cas dans les filtres ou les transformateurs d'alimentation des

appareils électroniques.(3.2)

3.6 Transmission à travers les transformateurs et les photocoupleurs

Le schéma équivalent d'un transformateur est celui de la figure 6. 99 % du spectre incident est absorbé ou écoulé.

Approximativement 1 % du spectre incident est transmis ou amplifié jusqu'à 5 fois la tension nominale de la fréquence de résonance.

Certains transformateurs sont construits spécialement pour ne pas transmettre les surtensions, mais leur rendement est nettement moins bon.

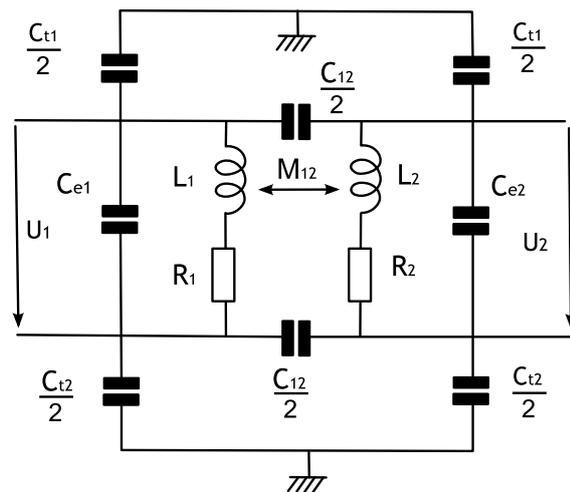


FIG. 3.2 – Capacités de couplage dans un transformateur

Les différentes capacités du schéma équivalent d'un transformateur, associées aux inductances des bobinages, sont susceptibles de présenter des fréquences de résonance. Si ces fréquences se trouvent dans le spectre d'une éventuelle surtension, celle-ci se trouvera amplifiée.

Les photocoupleurs ont également des capacités parasites. Seul un photocoupleur dont la fibre optique de transmission aurait une longueur d'au

moins une dizaine de centimètres, et dont les entrées et sorties seraient également séparées par la même distance, pourrait être un véritable écran aux surtensions.

3.7 Transmission par les chemins de câbles

Deux câbles qui se longent pendant des dizaines de mètres et même quelques mètres, peuvent se comporter comme un transformateur. Les variations de tension ($\frac{dv}{dt}$) sont très grandes, celles-ci sont susceptibles, par le fait, d'engendrer des variations de courant ($\frac{di}{dt}$) très grandes et par conséquent des surtensions dans les conducteurs voisins par couplage électromagnétique.

Il faut souligner que les conducteurs de cuivre nus d'équipotentialité des masses ou des terres ne devraient pas utiliser les chemins de câble car ils sont le siège de $\frac{di}{dt}$ importants lorsque les terres ou les masses se rééquilibrent. Il s'agit d'un couplage inductif dans la boucle formée par le conducteur et la terre (3.3). L'effet réducteur d'un blindage ou d'un élément en fer n'est valable que si le courant d'équilibrage passe ailleurs, c'est le principe de l'équipotentialité en mailles.

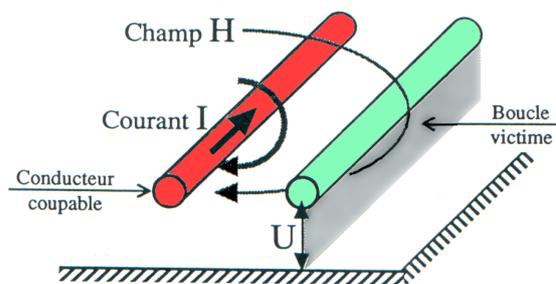


FIG. 3.3 – Couplage de champ magnétique

3.8 Vitesse de propagation

L'onde de surtension n'est pas un mouvement d'électrons. Elle communique à ceux-ci de proche en proche sur le conducteur, un niveau d'énergie

de « vibration ». Cette communication s'effectue environ à la vitesse $\frac{c}{2}$ ¹ avec un rendement énergétique plus ou moins grand suivant la conductivité du matériau. Pour les matériaux conducteurs de l'électricité (cuivre, aluminium, argent, or, fer), ce rendement est très bon et l'énergie de « vibration » se propage loin. Le processus s'arrête lorsque cette « vibration » des électrons est transmise à un élément moins bon conducteur (pastille de silicium, isolant) et qu'elle se transforme en courant puis en chaleur (destruction de pastille) ou en d'autres formes d'énergie comme l'ionisation.

La vitesse de propagation a beau être très grande (150 000 km/s) il faut cependant 10 ns à l'onde pour parcourir 1,5 mètre de conducteur et ceci nous ramène aux ordres de grandeur de la sensibilité des composants électroniques et du temps de réponse des parafoudres (chapitre 4.2.).

3.9 Surtensions secondaires

En particulier « remontées de potentiel » par la terre

Ces surtensions secondaires sont provoquées par un fort courant d'écoulement engendré par la surtension initiale (dont nous avons vu en 1.4. le processus de production).

Malgré leur caractère particulier, nous mentionnons ces surtensions à ce chapitre, car leur mode de transmission ne doit pas être oublié lorsqu'on examine un site. (voir 1.5.5).

¹pour les câbles isolés, la vitesse est plus petite.

Qualités d'une protection

4.1 Introduction

Laissons à Messieurs AGUET et IANOVICI le soin de définir un parafoudre :

«Les parasurtenseurs sont des appareils de sécurité dont le rôle est d'empêcher que la tension dépasse un certain seuil en aval de leur point d'installation.

« Les limiteurs de surtensions doivent :

- ✓ être rapides (quelques ns - μ s)
- ✓ posséder une très forte résistance d'isolement ($G\Omega$ - $T\Omega$) à l'état de repos
- ✓ éviter de provoquer des surtensions lors de l'amorçage
- ✓ posséder une faible capacité parasite (quelques nF)
- ✓ posséder une inductance propre très faible (quelques nH); (il faut également prendre garde à diminuer au maximum l'inductivité des connexions et la surface des boucles)
- ✓ être fiables »

4.2 Temps de réponse

4.2.1 Définition

Le temps de réponse d'un système est le délai entre l'instant où apparaît la surtension (tension supérieure au seuil du dispositif) et l'instant de mise en conduction (apparition d'un courant de 1 mA).

Rappelons le temps de réponse des composants primaires de protection :

- ✓ éclateur à air : 3 à 10 μ s
- ✓ tube à gaz rare : 0,1 à 3 μ s
- ✓ varistance (ZnO) : 1 ns à 10 ns
- ✓ diode zener : 2 ps à 0,1 ns

Tension résiduelle maximum en fonction de la raideur du front et du courant pour une varistance 40 joules, un tube à gaz ionisé et un FUSADEE

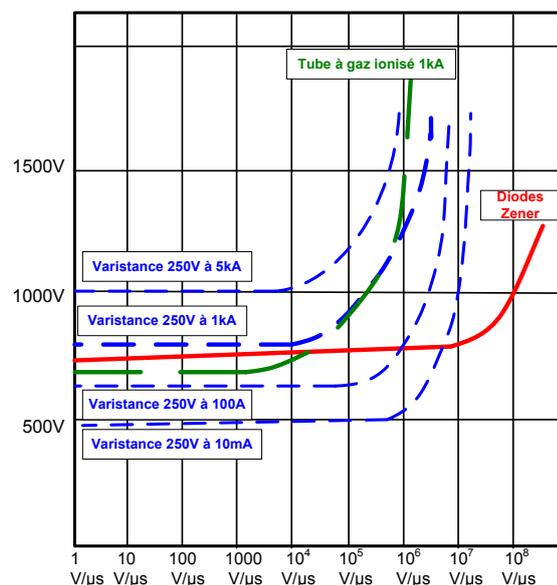


FIG. 4.1 – Tension résiduelle maximum en fonction de la raideur du front et du courant pour une varistance 40 joules, un tube à gaz ionisé et un FUSADEE

4.2.2 Courbes tensions – courants – fronts

Le temps de réponse ne donne pas en soi d'indication définitive sur la rapidité d'un parafoudre. La qualité de celui-ci est en premier lieu sa tension résiduelle.

Nous noterons, pour expliciter ce point, que les éclateurs sont très longs à amorcer, mais qu'après ce cap, le courant les traversant peut croître très vite sans que la tension aux bornes monte -elle diminue même-, tandis que les zeners et les varistances ont une courbe tension-courant ascendante, la tension grandissant lorsque le courant grandit. Cette différence est appelée, dans la norme CEI 61643-1 limitation en tension (zener, varistance) et coupure en tension (éclateurs, thyristors).

Les courbes de tension résiduelle en fonction de la raideur du front, donnent avec plus d'exactitude l'indication de qualité de protection. Le réseau de ces courbes en fonction du courant, est le meilleur diagramme de comparaison (figure 4.1).

4.3 Forte résistance à l'état de veille

Lorsque la tension appliquée au parafoudre est inférieure à son seuil de fonctionnement, il est souhaitable qu'aucun courant ne le traverse. Ainsi, sur le réseau d'énergie, la tension de service est de 230 V alternatif, il faut que le parafoudre puisse supporter cette tension de service en permanence.

Le parafoudre idéal devrait également retrouver son blocage (aucun courant) après avoir écoulé une surtension lorsque celle-ci a disparu. C'est le cas des zeners et des varistances, mais ce n'est pas le cas des éclateurs pour lesquels il faut que le courant cesse pendant un temps assez long (100 ms) pour qu'il puisse retrouver sa tension de service.

Une varistance en vieillissant augmente son courant de fuite à la terre. Lorsqu'un grand nombre de varistances se trouvent en parallèle sur le réseau 230 V, l'addition des courants de fuite peut, soit provoquer l'ouverture des différentiels sensibles, soit être dangereuse (4.7.2).

4.4 Éviter que le dispositif provoque une surtension

Cela peut apparaître comme une plaisanterie, mais non, les faits montrent pourtant que certaines combinaisons utilisant des inductances, ainsi que certains éclateurs, provoquent une surtension lors de leur amorçage.

Un parafoudre mal installé peut provoquer des surtensions lors de son amorçage particulièrement lorsque la ligne qui le relie à la terre longe d'autres câbles. Le très grand $\frac{di}{dt}$ des bons parafoudres crée un couplage inductif et donc une surtension sur ces autres lignes (voir 3.7).

4.5 Posséder une faible capacité

4.5.1 Capacité propre du parafoudre

Cette capacité ne gêne pas la fonction d'écoulement d'une surtension, au contraire, elle diminue le temps de réponse puisque la conduction est instantanée à travers cette capacité. Cette capacité est indésirable uniquement lorsque la tension de service est une tension HF, les signaux peuvent être déformés.

4.5.2 Ordres de grandeur

- ✓ Eclateur : quelques picofarad
- ✓ Varistance : de 0,1 nF à 10 nF
- ✓ zeners : de 0,1 nF à 2 nF
- ✓ FUSADEE hauts débits : 20 pF à 100 pF

4.6 Posséder une faible inductivité

4.6.1 Compréhension du processus

Pour comprendre cette nécessité, il convient de se reporter à la figure 4.2 et d'expliquer. Se rappeler aussi les descentes de paratonnerre en 1.5.3.3.

A l'intérieur du parafoudre, nous avons représenté son circuit équivalent avec sa capacité propre C, son inductance propre L. P représente

l'élément actif débarrassé de sa propre capacité et de sa propre inductance. Nous l'avons vu, du point de vue fonction écrêtage, la capacité n'est pas du tout néfaste (4.5), mais elle est choisie faible pour ne pas perturber le régime permanent de la ligne. Cette capacité ne peut donc se charger que par un courant très faible. Ce courant, à travers la capacité, n'a pas de retard, mais, par contre, il n'en est pas de même pour la branche L-P du parafoudre. L'élément actif P du parafoudre sera retardé dans son action de créer un courant rapidement élevé $\frac{di}{dt}$ très grand par l'inductance L

Nous comprenons pourquoi il est si important que l'inductance propre du parafoudre soit très faible. Il est illusoire d'utiliser en P des éléments rapides si l'inductance L annule ces effets. Par exemple, si la rapidité de P est de l'ordre de la nanoseconde, une inductance L de quelques microHenry ramènera cette rapidité à la microseconde pour une montée en courant vers 1 000 ampères.

Les constructeurs de parafoudres cherchent à combiner les avantages des divers composants disponibles (éclateurs, varistances, zeners), mais l'inconvénient majeur de ces « mixages » est de créer des inductances par la multiplication des connexions. Ces inductances peuvent être très néfastes et il est totalement anormal que l'inductance propre d'un parafoudre ne fasse pas partie des caractéristiques courantes annoncées par les constructeurs.

4.6.2 Effet bénéfique des masses

Voir 4.10.2.

4.7 Être fiable

4.7.1 Coup de foudre direct

La fiabilité, c'est la qualité qui consiste à garantir l'efficacité du dispositif parafoudre quoiqu'il arrive. Or, en matière de foudre, il peut se passer des choses surprenantes et imprévues, particulièrement des coups de foudre directs qui détruisent le parafoudre. Tout le monde a vu ces blocs noircis, éclatés, volatilés et aucun

constructeur ne peut y échapper. Heureusement, ces cas sont relativement rares, mais il est possible de concevoir des parafoudres qui protègent avant d'exploser.

4.7.2 Cas des varistances

Si la destruction aléatoire d'un parafoudre est compréhensible, et doit être considérée comme un risque acceptable, le cas des varistances mérite un examen particulier.

La destruction des varistances est en effet un phénomène non aléatoire, mais, au contraire, absolument certain, et cela après qu'elles aient absorbé une certaine quantité d'énergie (figure 10). Les protections à varistance doivent donc intégrer 2 déconnecteurs, l'un thermique situé dans la protection, l'autre limiteur de courant dans ou hors de la protection.

La norme NF EN 61643-11 exige ces déconnecteurs.

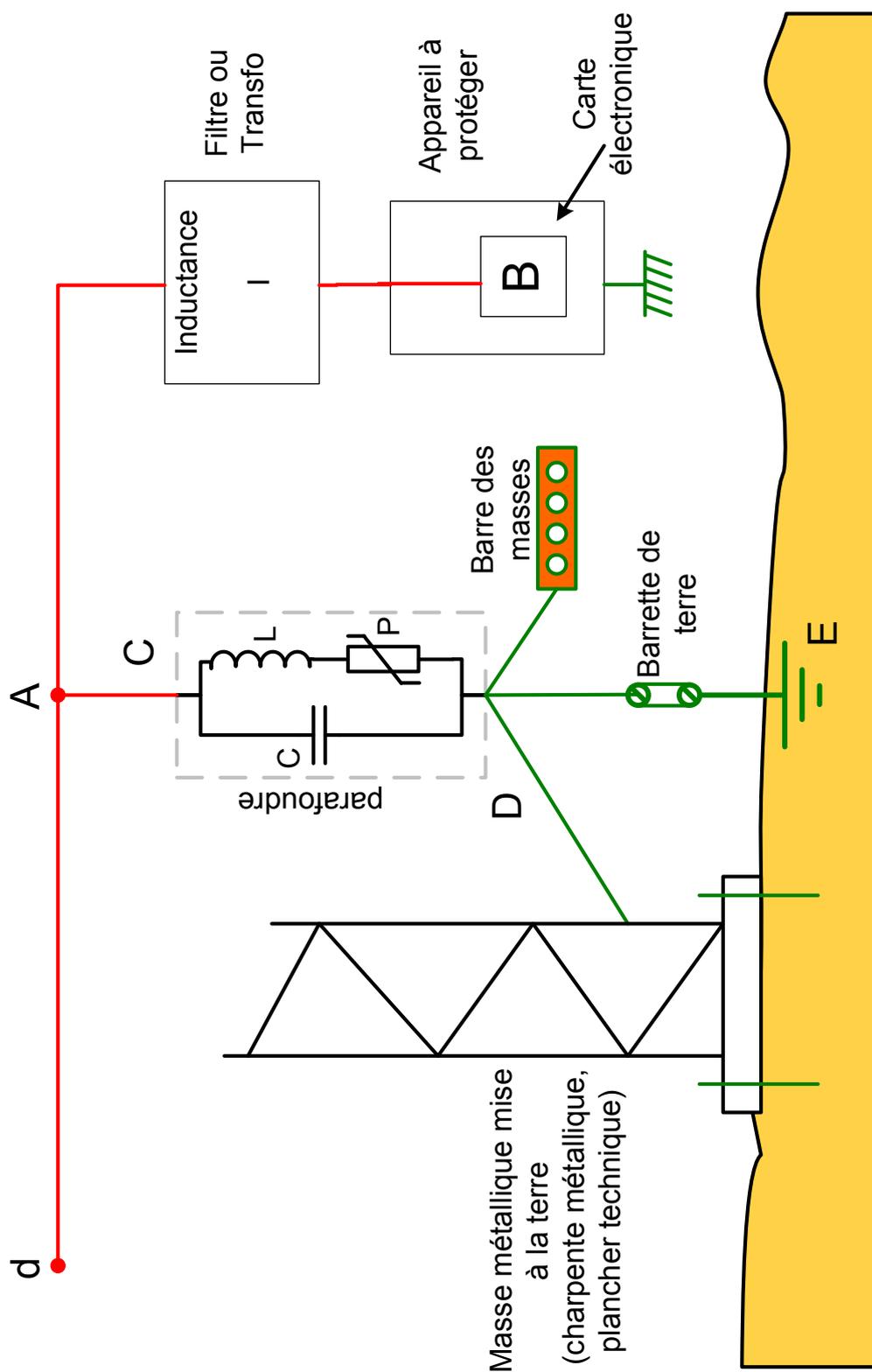


FIG. 4.2 – Connection des masses pour la protection foudre

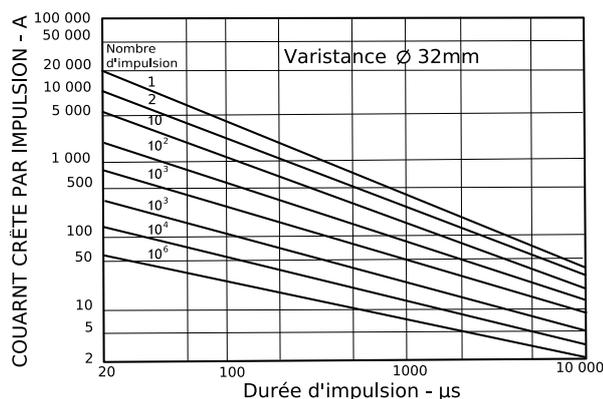


FIG. 4.3 – Une varistance V250HE est détruite soit par une impulsion de 5 000 A de durée 100 μ s, soit par 10 impulsions de 1 000 A de durée 100 μ s, soit par 10 000 impulsions de 100 A de durée 100 μ s.

Souvent, l'action du ou des déconnecteurs déconnecte le parafoudre et la protection disparaît.

Si la destruction des varistances est certaine, celle-ci n'est pas prévisible car il est impossible de mesurer à un instant donné la quantité d'énergie déjà absorbée. Pourtant, ce début de destruction s'accompagne d'une légère chute de tension de seuil et une mesure fine de cette tension permettrait de prévoir la destruction.

Compte tenu de cette déconnexion aléatoire, certains constructeurs ont eu l'idée de doubler le dispositif. C'est évidemment une solution, mais à notre avis, il faudrait au moins le tripler et même le quadrupler car la probabilité pour que les deux dispositifs meurent en même temps est très élevée. En effet, les varistances des deux dispositifs ayant absorbé les mêmes surtensions pendant une même période, sont à un degré de destruction voisin et la surtension de plus grande amplitude qui surviendra dépassera de loin l'énergie limite pour chacun des ensembles, la destruction sera donc instantanée pour les deux blocs.

4.8 Avoir un grand pouvoir d'écoulement

Cette qualité n'est pas mentionnée par messieurs Aguet et Ianovici (4.1) et pourtant, c'est le seul

point mis en avant par tous les constructeurs. Qu'en est-il vraiment ?

À notre avis, c'est un problème statistique :

Le grand pouvoir d'écoulement est nécessaire pour des probabilités faibles de voir réunies les conditions de générations de surtensions, de conditions de transmission et de conditions de réceptions.

Pour nous en expliquer, nous vous invitons à reprendre notre chapitre 1 et particulièrement le paragraphe 1.5.3. après avoir précisé qu'il s'agissait de la production de surtension la plus probable.

Dans ce paragraphe, il est mentionné les mesures de St Privat d'Allier sur une ligne moyenne tension située en son point le plus près à 50 m du point d'impact. Le lecteur averti aura sûrement remarqué que si les tensions mesurées étaient élevées (74 000 V), les fronts de montée étaient également élevés (60 kV/ μ s) l'intensité en résultant était ridiculement faible (86 ampères), en tous cas sans commune mesure avec l'intensité de foudre elle-même (maxi mesuré à St Privat = 40 kA).

Ce grand pouvoir d'écoulement n'est donc pas nécessaire dans le cas le plus probable des surtensions de foudre, à savoir l'induction électromagnétique.

Le grand pouvoir d'écoulement est en fait nécessaire dans quatre cas :

- Coup de foudre très proche ou direct : Dans ce cas, un pouvoir d'écoulement de 5kA (onde 8/20) est bien trop faible.

- Surtension de manœuvre : lorsque le parafoudre est proche de la source. En effet, ces surtensions sont produites par des sources d'impédance très faibles (transformateurs, machines industrielles) et donc peuvent générer des courants très élevés (jusqu'à 3kA).

- Surtensions temporaires : les courants générés peuvent atteindre 10kA.

- Courant de suite sur les lignes du réseau : dans ce cas, il s'agit de pouvoir écouler le courant provoqué par le réseau d'énergie lui-même (230V mode commun, 400V en mode différentiel). Lorsqu'au cours de l'amorçage la tension du

parafoudre est descendue en-dessous de la tension de service, le réseau a tendance à provoquer un courant dans cette impédance qui n'est plus infinie. Si le parafoudre n'a pas la capacité d'écouler le courant du réseau jusqu'à ce que les protections fonctionnent, il explose.

4.9 Impossibilité de placer les protections au niveau des cartes électroniques

Note liminaire

Fort heureusement, les fronts très raides atteignent rarement le cœur des gros ordinateurs, car ils sont atténués par les innombrables embûches qu'ils trouvent sur leur chemin (transformateurs ferrorésonnants, onduleurs, longueur de ligne). Ne sont, par contre, pas à l'abri, certains périphériques et interfaces.

Soulignons qu'en utilisant le mot "rarement", nous n'excluons pas la possibilité d'effets plus profondément destructeurs, cela, en particulier, sur des sites isolés ou "sensibles" (voir chapitre 1 - Origine des surtensions).

Lorsqu'un front raide de forte énergie atteint une carte, aucune protection n'est possible.

Pourquoi ?

Essentiellement parce qu'aucun retour n'est possible, si bien que l'énergie du front va se dissiper dans les différents composants en réalisant les dommages les plus importants à ceux qui ont une impédance élevée.

Si l'on dispose une jonction Zener aux bornes de l'alimentation de la carte, celle-ci ne se mettra pas en conduction car l'impédance de retour est infinie pour les fronts raides, la terre est trop loin. Pour être plus exact, nous dirons plutôt qu'un très faible courant peut se créer, dû à la charge capacitive des masses de la carte et des masses de la machine si elles sont très près. Ce courant, bien qu'il puisse contribuer à diminuer la raideur du front, n'aura pas d'effet véritablement significatif. Quant aux capacités, elles ont également très peu de possibilités d'atténuation. Au moment où elles se chargent, elles déforment, bien sûr, une partie

du front, mais le restituent aussitôt.

C'est ainsi qu'elles sont responsables de la transmission de celui-ci à travers les éléments d'isolement (transformateurs, photocoupleurs). Les fortes capacités de part leur construction bobinée ont une grande inductance et ne se chargent pas du tout sur un front raide.

4.10 Place d'une protection

Nous avons vu en 3.8 que le front de surtension franchit 1,5 m de ligne toutes les 10ns, il se propage donc à la vitesse de 15cm par nanoseconde.

Le temps que le courant s'établisse entre A et E (figure 4.2), le front aura parcouru sur le conducteur en direction de la carte électronique B une distance non négligeable et souvent même arrivé en B avant que le courant entre A et T soit établi.

On retrouve l'importance de ne pas placer la protection près de la carte sensible.

4.10.1 Effet d'accumulation d'une inductance

Lorsque le front atteint I (figure 4.2), cela signifie que tous les électrons libres du cuivre entre A et I sont excités à un certain niveau d'énergie de « vibration » que l'on peut traduire par l'existence d'un potentiel entre tous les points du conducteur et la terre. Si un courant est créé entre A et T, cet état d'excitation va disparaître par l'écoulement du courant. Il y aura même un courant non conservatif (J.J. MORF EPFL) de retour de I vers A et donc un effet de disparition de la surtension ou d'une manière plus imagée, le conducteur entre A et I va se « vider » de son potentiel à travers l'écoulement de A vers T.

Par contre, si la surtension a atteint l'inductance I, celle-ci va créer un effet de barrage pour le retour vers A de l'écoulement et une partie du potentiel va atteindre la carte B.

Il faut donc que le dispositif entre A et T se mette en conduction avant que l'inductance I soit atteinte. L'inductance I a également une capacité parasite

et les fréquences de résonance sont réjetées vers la carte.

4.10.2 Processus de mise en conduction du parafoudre

(4.2)

Entre A et C, il s'agit de parcourir un chemin à la vitesse de 15 cm par nanoseconde. Cette vitesse est grande, mais comme nous venons de le voir, il n'y a pas une nanoseconde à perdre et cette distance doit être réduite.

Elle peut être nulle si le fil conducteur vers l'appareil est branché directement aux bornes du parafoudre soit A et C confondus.. Cette connexion est indispensable en téléphonie ou courants faibles.

- entre C et D, il s'agit du temps de mise en conduction de l'élément P augmenté du temps de retard de l'inductance L, la capacité C étant négligeable.

- entre D et E, il s'agit de parcourir un chemin, celui-ci doit être très court et sans inductance, car celle-ci va augmenter le retard.

- entre E et F, la conduction s'effectue en trois temps. Dans un premier temps, le courant effectue la charge « statique » (ou capacitive) des bornes de prise de terre, plus leur masse est importante, plus le courant de charge « statique » est élevé. Ce courant s'établit instantanément comme dans un condensateur. Sur chacune des bornes de l'étoile, il s'établit un courant non conservatif (J.J. MORF) c'est-à-dire que le courant est plus élevé en E (valeur maxi) qu'en F de la même barre (valeur nulle). Dans un deuxième temps, il va s'établir un courant par conduction galvanique qui ne sera retardé que par les inductances propres des conducteurs et de la terre.

L'inductance d'une prise de terre hémisphérique est nulle. Les inductances des prises de terre courantes sont très faibles et presque négligeables ; par contre, la conduction galvanique ne permet pas des courants élevés car les matériaux ont de fortes résistivités. Dans un troisième temps (1 μs), les barres de l'étoile constituant la prise de terre vont transmettre leur excitation à leur environnement par l'ionisation des solutions de sels dans l'eau

de leur voisinage. Dans un quatrième temps, il se produira des microclaquages sous l'effet d'un fort courant.

L'addition de tous ces temps donne le véritable temps de réponse d'un parafoudre.

Prenons quelques exemples :

Si le temps de réponse de P est de 1 μs (éclateurs les plus rapides), l'onde de surtension peut parcourir au moins 1000 x 15cm, soit 150m, avant que le parafoudre s'amorce.

Le temps d'ionisation de la terre (1 μs) laisserait parcourir 150m à l'onde, s'il n'existait pas les deux autres modes de conduction cités plus haut.

Pour réduire le temps de mise en conduction de A vers T, nous ne pouvons agir que sur P, L et sur la forme de la prise de terre. En effet, la distance entre D et E, même très courte, présente déjà quelques mètres, voire quelques dizaines de mètres et c'est autant de dizaines de mètres que parcourra l'onde vers I.

Pour augmenter la valeur du courant de charge capacitive des masses de la prise de terre (phénomène le plus rapide), il faut augmenter la masse de tous les éléments métalliques de la connexion de terre (fils de grosse section 16 ou 32 mm²), piquets de terre de gros diamètre plantés en étoile ou en patte d'oie. Cette charge capacitive très rapide n'a plus d'effet au-delà de 5m d'un conducteur linéaire.

L'addition des masses ne peut donc se faire qu'en étoile au point de raccordement du câble.

La connexion d'une masse métallique importante directement au parafoudre accentue le premier écoulement du front (figure 4.2). En « captant » le premier $\frac{di}{dt}$, elle évite une surtension secondaire créée entre D et E ($U = L \frac{di}{dt}$).

4.11 Compatibilité des protections surtension énergie avec les diverses protections du réseau d'énergie

4.11.1 Disjonctions intempestives des disjoncteurs différentiels

Les parafoudres créent des défauts à la terre. Lorsque ceux-ci ont une durée suffisante (8ms) et une intensité supérieure au calibre du disjoncteur différentiel, celui-ci déclenche.

Pour éviter cette action, il est recommandé de choisir des différentiels légèrement retardés (45ms) de type **S**.

4.11.2 Destruction de la protection en court-circuit

Tout parafoudre ou parasurtenseur meurt tôt ou tard. Certains meurent en court-circuit et les protections amont sont sollicitées. Les résistances de court-circuit sont plus ou moins élevées.

Ces courts-circuits nécessitent une déconnexion du parafoudre ou du réseau, la déconnexion du parafoudre supprime la protection, la déconnexion du réseau interrompt la distribution.

La déconnexion du parafoudre s'effectue par fusibles ou disjoncteur en parallèle dans la ligne du parafoudre (figure 4.4). Leur courbe de réponse doit être compatible avec la capacité en court circuit du parafoudre.

La déconnexion du réseau peut s'effectuer aussi par fusible. La déconnexion par disjoncteur différentiel est bien meilleure pour deux raisons. Premièrement, c'est le premier défaut à la terre qui déconnecte, deuxièmement, le disjoncteur différentiel laisse passer sans s'ouvrir les forts courants de foudre (5000A) tant que leur durée ne dépasse pas quelques millisecondes.

La norme NF EN 61643-110 exige la déconnexion. Le déconnecteur est soit associé en série avec le parafoudre, soit incorporé au parafoudre, soit associé au parafoudre dans la ligne d'alimentation (cas du FUSADEE).

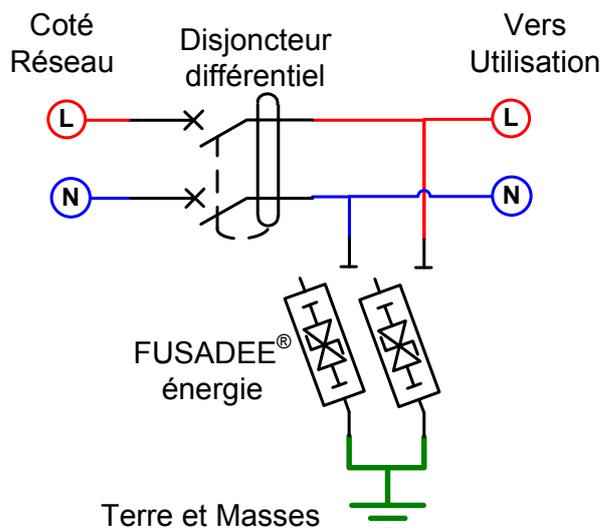


FIG. 4.4 – Installation d'un FUSADEE avec son déconnecteur associé pour la continuité de protection (En régime TT)

4.12 Conclusion

Pour conclure l'étude des qualités d'un parafoudre, on se doit de rappeler une nouvelle fois que les connaissances en matière de foudre sont extrêmement récentes. On ne saurait donc s'étonner de rencontrer sur le marché des dispositifs de protection totalement aberrants par rapport à la ligne qui se dégage des études récentes. Parmi ces dispositifs, nous citerons les prises de courant parafoudre dont l'inefficacité est certaine du fait de leur liaison à la terre.

Mode commun, Mode différentiel

5.1 Définition

- Mode commun

Surtension entre neutre et terre, Surtension entre phase et terre, Surtension entre conducteur actif téléphone et terre, Surtension entre deux conducteurs et la terre, d'une manière générale, surtension entre conducteurs et la terre ou une masse.

- Sollicitation en mode différentiel

La surtension apparaît entre deux fils constituant un circuit d'entrée ou entre deux fils constituant un circuit de sortie.

Réseau d'énergie : entre deux phases ou entre une phase et le neutre

Réseau téléphonique : entre deux conducteurs actifs.

Les appareils du réseau (transformateurs, condensateurs) créent, eux, toujours leurs surtensions en mode commun puisqu'ils sont tous connectés à la terre.

Il est certain que deux surtensions simultanées en mode commun engendrent une surtension en mode différentiel, et inversement une surtension en mode différentiel engendre des surtensions en mode commun puisque le neutre est la terre. C'est le cas des commutations triphasées.

Les surtensions issues des défauts de réseau (1.3.2) sont toutes créées en mode commun sans exception.

Les « remontées » de potentiel par la terre (1.5.5) engendrent par définition des surtensions en mode commun.

La foudre (1.5) engendre également, la plupart du temps des surtensions en mode commun. Seules certaines variations de champs magnétiques dans des boucles isolées peuvent créer des surtensions en mode différentiel.

On voit donc que les surtensions sont produites à 99

5.2 Production des surtensions

En se reportant au chapitre 1, on peut noter que les perturbations électromagnétiques de manœuvre (1.3.1) peuvent créer des surtensions en mode différentiel. Il s'agit de celles créées par les récepteurs tels que : moteurs, soudeuses, fours, thyristors (quoique ces appareils puissent être connectés à la terre et qu'il puisse exister une composante à la terre). Ces surtensions en mode différentiel apparaissent surtout en régime de neutre isolé.

5.3 Sensibilité des appareils

La masse d'un appareil étant reliée à la terre, c'est son isolation qui doit résister à la surtension en mode commun.

Il faut au moins 3000V pendant 1 ms pour



claquer un isolant normalement dimensionné. Les appareils ne sont donc apparemment pas très sensibles aux surtensions en mode commun.

Remarques

Les appareils électroniques sont en général branchés entre phase et neutre, et on pourrait en conclure qu'ils sont sensibles uniquement aux surtensions en mode différentiel.

Les circuits intégrés des appareils téléphoniques sont branchés sur une paire téléphonique avec isolement ou non par photocoupleur et on pourrait également en conclure qu'ils sont sensibles uniquement en mode différentiel.

Si cette subdivision était si simple, il n'y aurait pas de casse puisque les surtensions sont produites en mode commun et que les appareils sont sensibles en mode différentiel.

Notons tout d'abord que le neutre est connecté à la terre au transformateur, il en découle donc que toute surtension réseaux a une composante mode commun et une composante phase neutre (mode différentiel). En conséquence, les appareils branchés entre phase et neutre sont touchés.

Nous avons vu au chapitre 2 que la propagation des surtensions s'effectuait sur un seul conducteur, donc en mode commun, et que les appareils (4.9) étaient sensibles à ce pic de surtension libérant son énergie dans les puces de circuit intégré, le retour du courant étant tout simplement les masses de connexions de « masse ». Dans ce cas, la destruction se fait sans retour de l'onde, c'est-à-dire sans conducteur de retour et donc intégralement en mode commun.

D'autre part, nous venons de voir (5.2) que toute surtension en mode commun a une composante en mode différentiel et vice-versa, il résulte de tout ceci, d'une manière assez surprenante, que tous les appareils sont affectés par les surtensions en mode commun.

5.4 Processus d'élimination d'une surtension

Nous avons vu qu'il faut créer un courant pour évacuer l'énergie de la surtension. En mode

différentiel, si une surtension survient par exemple entre deux phases du réseau et que sa raideur est assez grande (plus de 1000 V/ μ s), son énergie devrait être dissipée par le parafoudre branché entre les deux phases en question. Le parafoudre ne dissipe de l'énergie que si un courant est créé ($W = UI t$). Compte tenu de la raideur du front, le courant va mettre plusieurs dizaines de microsecondes à s'établir, car la ligne de retour va jusqu'au transformateur (plusieurs centaines de mètres) et l'inductance linéique est importante.

Au contraire, si le parafoudre est relié à la terre (mode commun), les inévitables composantes en mode commun de la surtension en mode différentiel seront évacuées rapidement à la terre et il ne subsistera que des restes sans danger.

En mode différentiel, il n'est possible d'évacuer que des fréquences basses (quelques dizaines de kKz). Ces surtensions sont très bien filtrées par les conditionneurs de réseau, alimentations stabilisées, transformateurs ferorésonnants, et ne font pas partie, à notre avis, du domaine des parafoudres.

Il s'ensuit qu'une protection efficace est montée impérativement en mode commun.

N.B. : Deux protections identiques en mode commun réalisent une protection au double des tensions de seuil en mode différentiel.

Méthodologie

Pour aborder une opération de protection, il faut avoir présent à l'esprit l'ensemble de ce qui vient d'être exposé, savoir que le problème ne se résout pas uniquement en utilisant des parafoudres performants, savoir que la protection de l'alimentation ne suffit pas toujours.

Il y a un ensemble de précautions à prendre outre veiller aux alimentations, il faut être attentif au cheminement des entrées et des sorties et aux connexions de terre.

Une autre approche consiste à observer « la casse » et à disposer des protections sur les conducteurs qui paraissent véhiculer la surtension. La casse suivante donnant la preuve ou non du bien-fondé de l'intervention. Cette approche doit évidemment se faire en ayant bien en mémoire les principes précédemment énoncés.

Lorsque l'intensité distribuée n'est pas trop importante (moins de 160A) et que le bâtiment est assimilable à une cage de Faraday avec des dimensions raisonnables (moins de 300m²), il suffit de protéger toutes les lignes venant de l'extérieur (énergie, téléphone, transmissions d'informations, antennes).



Valeurs de terre

La Figure 7.1 de l'excellent livre de Alain CHAROY - Tome 2 - ne saurait être mise en doute. Elle indique bien que, si le câblage est effectué comme indiqué, la résistance de terre est indifférente pour l'efficacité du parafoudre (ici représenté par une varistance et une impédance Série Z).

Figure 1.4. : relier les limiteurs de surtension au plus court de la masse (la résistance de terre est indifférente)

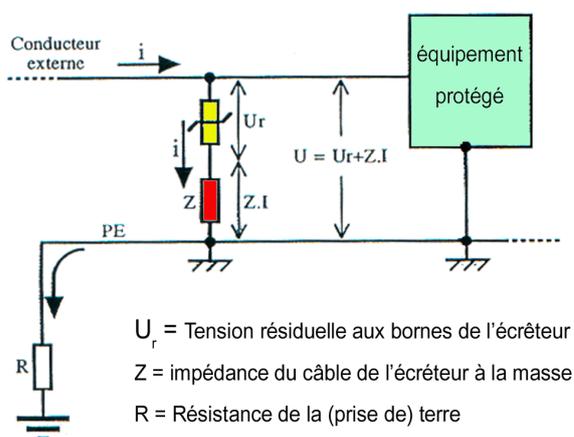


FIG. 7.1 – relier les limiteurs de surtension au plus court de la masse (la résistance de terre est indifférente)

La plupart des connexions de parafoudres respectent ce câblage et on pourrait penser que la valeur de la terre est indifférente.

Examinons le cas de l'alimentation d'une chaudière de chauffage central (Figure 7.2).

L'application de la norme NF C 15-100 conduit l'installateur à connecter la masse de la chaudière et, donc, les tuyaux, à la barrette-terre du tableau électrique.

Cet ensemble métallique a un couplage à la terre, représenté par l'impédance Z. La valeur de ce couplage oscille entre 8 Ohms et 50 Ohms et, donc, reste du même ordre de grandeur que la prise de terre (Différentiel à 300 ou 500mA).

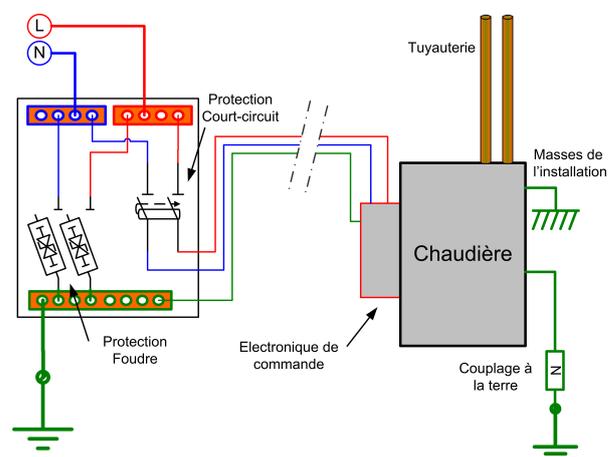


FIG. 7.2 – Cas de la protection de la carte de commande d'une chaudière

Lors du fonctionnement du parafoudre, un courant impulsionnel va se diriger à la fois vers la prise de terre et vers le couplage de la chaudière, en suivant le conducteur de protection vert-jaune,

qui va du tableau à la chaudière. La longueur de ce conducteur de protection peut être importante et, comme le retour de courant se fait dans la terre, la boucle inductive a une très grande surface. On génère, donc, une impulsion sur les conducteurs -phase et neutre- et on met en danger l'électronique de commande de la chaudière, du fait du fonctionnement du parafoudre.

D'où l'intérêt d'une bonne Terre; c'est la meilleure certitude dans cet océan d'incertitudes.

Pour éviter cet inconvénient, il y a deux recommandations simples à respecter :

Avoir une bonne terre :

Une terre de 10Ω canaliserait 99 % du courant impulsionnel, du fait de la forte impédance de ligne de l'alimentation de la chaudière.

Avoir une ligne directe et courte pour connecter le parafoudre au puits de Terre

Ce qui divise le courant, ce sont les impédances et, comme il s'agit de courant impulsionnel, l'inductance est prépondérante. Une longueur de fil de quelques mètres en plus, des coudes pour passer un obstacle sont autant de facteurs, pour augmenter une inductance.

Si ces longueurs et ces coudes sont utiles dans la ligne d'alimentation de la chaudière, ils sont nuisibles dans la ligne qui va du parafoudre au puits de terre.

L'exemple de la chaudière n'est pas unique. Les couplages des masses à la terre sont très fréquents et très nombreux ; ils atteignent parfois moins de 1 Ohm.

Citons : - les tuyaux d'alimentation en eau, qui sont souvent en cuivre (l'installateur a évidemment raccordé la baignoire à la borne-terre du tableau, par un fil vert-jaune). - dans l'agriculture, les installations de traite, les abreuvoirs, les silos métalliques. - dans l'industrie, les charpentes métalliques et les bâtis de machine.

Dans ce dernier cas, on peut « espérer » que le phénomène est atténué par les liaisons équipotentielles en cuivre nu entre les masses, à condition qu'elles ne passent pas dans les chemins de câbles. Comme il n'en est généralement rien, les parafoudres de tête ne servent pas à grand chose, sauf si le puits de terre de tête fait 1Ω .

Édition octobre 2008
François GIRARD - ADEE

