

Chapitre 6

Surtensions

1. Définitions et origines

On désigne par **surtension** toute différence de potentiel anormale apparaissant dans les circuits électriques et qui est susceptible d'endommager les éléments de ces circuits (lignes, machines, etc..).

L'étude des surtensions peut être abordée de manière différente selon leur spectre de fréquence. Un phénomène électrique ou électromagnétique n'est jamais instantané : il doit se **propager**. Sa **vitesse de propagation** peut être très grande, mais pas infinie.

En pratique, le phénomène pourra être considéré comme instantané si sa **longueur d'onde** est beaucoup plus grande que les dimensions du système considéré.

Exemple :

Pour une ligne de 100 km, un phénomène à 50 Hz

$$\lambda = c \times \frac{1}{f} = 3.10^8 \times \frac{1}{50} = 6000 \text{ km}$$

peut être considéré comme instantané ; par contre pour un phénomène à 10 kHz ($\lambda = 30 \text{ km}$), il faudrait tenir compte de sa propagation.

Origines des surtensions :

Les surtensions peuvent avoir trois origines :

- atmosphériques
- manœuvres sur le réseau (phénomènes transitoires)
- surtensions à la fréquence de service dues au déclenchement de charges ou aux lignes à vide.

Pour éviter que les surtensions n'aient des suites catastrophiques sur les appareils, on construit ceux-ci de façon à ce qu'ils résistent à des surtensions à la fréquence nominale pendant 1 min et à des chocs normalisés. Pour éviter que la tension n'atteigne ces valeurs, on installera à l'entrée des postes de couplage des parafoudres qui s'amorcent à une tension définie et écoulent ces surtensions à la terre, puis interrompent le courant qui les traverse.

2. Propagation des ondes dans les lignes à constantes réparties

La théorie fait partie du cours de physique ; aussi nous bornerons-nous aux cas particuliers qui nous intéressent.

Les équations différentielles de la tension et du courant sont (d'après la règle de Kirchhoff et des nœuds) :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases}$$

où

R : résistance ohmique (Ω/m)

L : inductance (H/m)

C : capacité (F/m)

G : conductance transversale (S/m)

d'où l'on déduit l'équation commune à u et i

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = RGu + (RC + LG) \frac{\partial u}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

L'étude de la solution générale est assez complexe ; dans le cas où l'on a affaire à des ondes de haute fréquence, on peut admettre que les paramètres R et G ont peu d'influence, face à L et C . En posant

$$R = G = 0$$

ce qui revient à admettre que la ligne est sans pertes, c'est-à-dire que l'amortissement du phénomène est nul (il n'est d'ailleurs pas considérable dans les lignes usuelles), l'équation précédente devient :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

dont la solution générale est de la forme : $u = f_1(x - vt) + f_2(x + vt)$

avec v la vitesse de propagation du phénomène

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

où

c : vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s)

μ_r : perméabilité (1 dans le vide, dans l'air)

ϵ_r : constante diélectrique de l'isolant

f_1 et f_2 sont des fonctions arbitraires dépendant des conditions initiales.

$f_1(x - vt)$ est une onde progressive alors que $f_2(x + vt)$ une onde rétrograde.

Nous définissons l'impédance d'onde :

$$Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Des valeurs typiques pour cette impédance : 10 - 60 Ω pour câble d'énergie ; 100 - 150 Ω pour câble télécommunication ; 300 - 600 Ω pour une ligne aérienne.

La résolution du système d'équations donne pour le courant :

$$i = \frac{u}{Z_w} = \frac{f_1(x - vt)}{Z_w} - \frac{f_2(x + vt)}{Z_w}$$

3. Réflexion et réfraction

Lorsqu'une onde se propage dans un réseau, à chaque discontinuité, c'est-à-dire chaque fois que les paramètres changent de valeur, donc aussi l'impédance d'onde Z_w qui devient:

$$Z_{w2} = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$$

Une réflexion et une réfraction partielles vont se produire.

Pour simplifier, considérons une onde rectangulaire se propageant à la vitesse v , le long d'une ligne d'impédance Z_{w1}

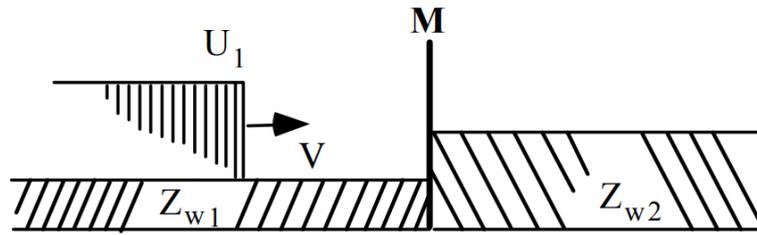


$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

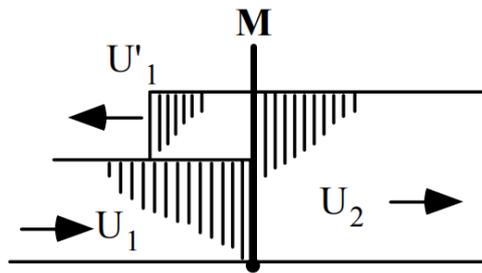
Il y circulera également un courant :

$$i_1 = \frac{u_1}{Z_{w1}}$$

A l'extrémité de la ligne, se trouve (point M) un élément (par exemple ligne, câble, transfo.) dont l'impédance d'onde est Z_{w2} .



u_1 , respectivement i_1 , est l'onde incidente ; appelons u_2 l'onde réfractée (transmise) et u'_1 l'onde réfléchie. Un instant plus tard on aura :



A tout instant :

$$u_1 + u'_1 = u_2$$

D'autre part,

$$i_1 + i'_1 = i_2$$

u_1, i_1, u_2, i_2 sont des ondes progressives

u'_1, i'_1 sont des ondes rétrogrades

Donc :

$$u_1 = Z_{w1} i_1$$

$$i_1 = \frac{u_1}{Z_{w1}}$$

$$u_2 = Z_{w2} i_2$$

$$i_2 = \frac{u_2}{Z_{w2}}$$

$$u'_1 = -Z_{w1} i'_1$$

$$i'_1 = -\frac{u'_1}{Z_{w1}}$$

En introduisant la valeur des courants et en combinant entre les équations des tensions et des courants, on établit que :

$$u'_1 = \frac{Z_{w2} - Z_{w1}}{Z_{w2} + Z_{w1}} u_1 \quad \text{et} \quad u_2 = \frac{2Z_{w2}}{Z_{w2} + Z_{w1}} u_1$$

On définit alors le facteur de réflexion :

$$r_u = \frac{Z_{w2} - Z_{w1}}{Z_{w2} + Z_{w1}}$$

et le facteur de transmission:

$$t_2 = \frac{2Z_{w2}}{Z_{w2} + Z_{w1}}$$

L'onde réfléchie sera **positive** si $Z_{w2} > Z_{w1}$; dans ce cas, il y aura augmentation de la surtension au point de transition ; par exemple, passage d'une ligne aérienne à un transfo, ou d'un câble à une ligne aérienne. Dans une telle situation, **c'est donc à l'endroit de la transition que l'on peut craindre une rupture de diélectriques.**

Cas particuliers :

a) ligne à vide : $Z_{w2} = \infty$

$$r = +1 \text{ et } t = 2$$

La tension est doublée à l'extrémité de la ligne ; le courant est nul car :

$$i_2 = \frac{u_2}{Z_{w2}} = 0, \quad i'_1 = -i_1$$

L'onde réfléchie est de même phase et de même amplitude.

b) ligne à terre ou en court-circuit : $Z_{w2} = 0$

$$r = -1 \text{ et } t = 0$$

La tension est nulle, mais le courant est doublé :

$$i'_1 = i_1, \quad i_2 = 2i_1$$

L'onde réfléchie est déphasée de 180° et de même amplitude.

c) ligne adaptée: $Z_{w2} = Z_{w1}$

$$r = 0 \text{ et } t = 1$$

Il n'y a pas de réflexion.

4. Surtensions atmosphériques

La foudre est une décharge électrique entre un nuage et le sol ou entre deux nuages. A la différence d'un condensateur, où les charges sont à la surface des électrodes conductrices, dans un nuage orageux, les charges sont portées par les gouttelettes d'eau ou les cristaux de glace ; leurs

déplacements sont relativement lents, de telle sorte qu'une décharge ne met en jeu qu'une partie des charges contenues dans le nuage.

Ainsi, un coup de foudre est généralement constitué d'une **série de décharges**, utilisant le même trajet d'éclair, et séparées les unes des autres d'un temps variant entre quelques dizaines de microsecondes jusqu'à quelques dixièmes de secondes.

Les décharges entre nuage et sol sont **négatives** dans 90 % des cas ; elles frappent ainsi les points de l'électrode opposée aux points où le champ électrique est le plus fort : c'est-à-dire les pointes (arbres, clochers, pylônes, fils de lignes électriques, etc..).

On peut chiffrer approximativement les grandeurs d'un coup de foudre :

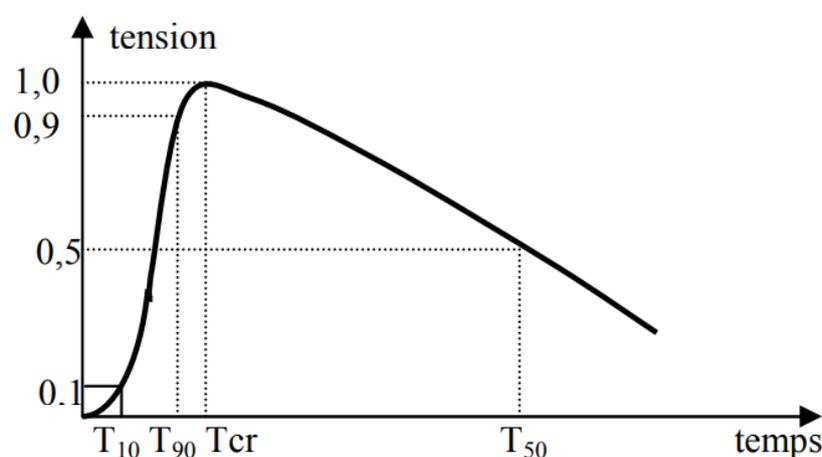
- ✓ 10^8 à 10^{10} V pour le potentiel d'un nuage ;
- ✓ 5 à 10 kV/m pour le champ électrique au voisinage du sol pendant les orages ;
- ✓ 20 à 60 kA pour l'intensité d'une décharge
- ✓ 200 kA pour des valeurs extrêmes
- ✓ 10 à 300 C pour les charges des nuages.

L'onde de choc présente un front de 1 à 5 μs et une durée de demi-amplitude de 20 à 50 μs (durée jusqu'à ce que la tension ait atteint la moitié de sa valeur maximum).

Les décharges négatives, partant du nuage suivant un canal nommé streamer, descendent vers le sol par échelons, avec une allure bifurquée. La vitesse de l'éclair est de 20 à 110 m/ μs , correspondant à une vitesse en ligne droite entre 15 et 65 m/ μs .

Onde conventionnelle :

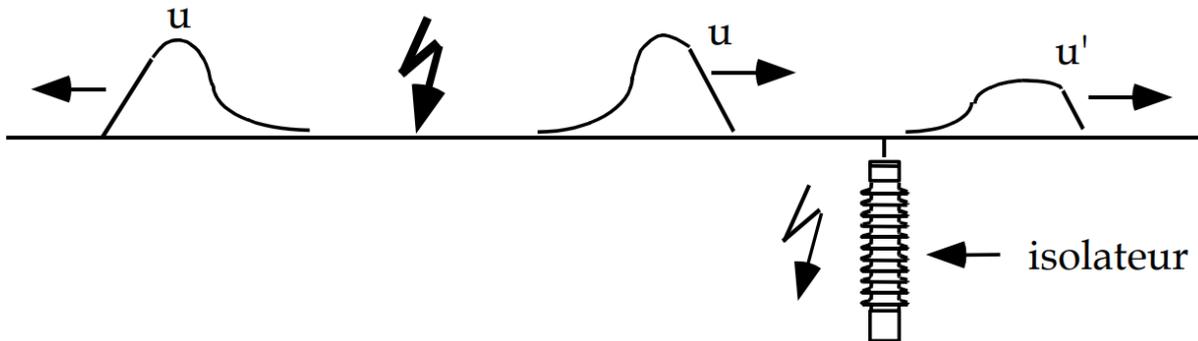
L'onde de choc conventionnelle est une onde normalisée que tous les constructeurs d'appareillage électrique HT utilisent pour effectuer les tests de contrôle.



coup de foudre négatif	coup de foudre positif
$T_{front}(90\%) = 1 \text{ à } 10 \mu s$	$T_{front}(90\%) = 10 \text{ à } 100 \mu s$
$T_{queue}(50\%) = 40 \text{ à } 200 \mu s$	$T_{queue}(50\%) = 500 \text{ à } 1000 \mu s$

Coup de foudre direct :

La décharge atteint directement un ou plusieurs conducteurs de ligne. Les charges s'écoulent dans la ligne, dans les deux sens, en y développant un potentiel dépendant de l'impédance d'onde.



L'onde ayant touché la ligne se déplace le long de celle-ci. Au passage d'un isolateur, elle peut provoquer un amorçage si sa valeur dépasse la tension disruptive de l'isolateur, tension de contournement au choc. Une partie des charges s'écoule à la terre par le support (pylône par exemple). L'onde est alors réduite à une valeur u' .

Toutefois, aussi bien les valeurs u que u' sont très élevées et dépassent la tension provoquant un effet couronne ; cet effet consomme de l'énergie et réduit la tension u' .

Le coup de foudre direct est très dangereux pour le matériel. Aussi s'en protège-t-on par l'emploi des **fils de garde** , placés au sommet des pylônes et reliés à des prises de terre aussi soignées et rapprochées que possible.

Coup de foudre indirect :

Lorsque la foudre frappe directement un pylône ou un fil de garde, les charges s'écoulent à la terre. Le potentiel atteint par le pylône est défini par l'impédance de celui-ci, mais surtout par sa **résistance de mise à terre** , qui dépend de la surface des électrodes et des caractéristiques du terrain environnant. Lorsque cette résistance est importante, le potentiel atteint par le pylône peut dépasser la tension de contournement des chaînes d'isolateur. Une décharge se produit à **l'envers** , vers la ligne, et une onde mobile est injectée dans celle-ci, d'amplitude au moins égale à la tension de contournement.

Ce coup de foudre étant limité en tension, il est moins redoutable que le précédent.

5. Dispositifs de protection

Ils peuvent être classés en deux catégories :

- Parafoudres (ou déchargeurs) ;
- Éclateurs à tige ou de coordination.

Les principales grandeurs suivantes sont utilisées dans les **parafoudres** :

La **tension d'amorçage** est la tension minimum pour laquelle le parafoudre fonctionne. A 50 Hz, elle aura pour valeur au moins 2 fois la valeur efficace la plus élevée du réseau. Au choc, elle dépend très fortement de la forme d'onde ; elle est généralement définie pour une onde 1,2/50 ou 4/10 et 8/20 pour des ondes de courant.

La **tension résiduelle** est la tension maximum aux bornes du parafoudre pendant le passage du courant de décharge. Tension et courant sont liés par :

$$U_r = I_{décharge} \cdot R_{tot-parafoudre}$$

La **tension d'extinction** ou tension de désamorçage est la valeur la plus élevée de la tension de service pour laquelle le parafoudre interrompt son courant de suite. C'est généralement la valeur qui désigne le parafoudre.

Le **pouvoir de décharge** est l'intensité maximum du courant que le parafoudre peut écouler, plusieurs fois de suite, sans être endommagé.

Le **courant de suite** est le courant fourni par le réseau et qui subsiste un temps plus ou moins long après le passage du courant de décharge. Il doit s'annuler de lui-même à la fin d'une alternance de la tension.

Un parafoudre doit remplir les conditions suivantes :

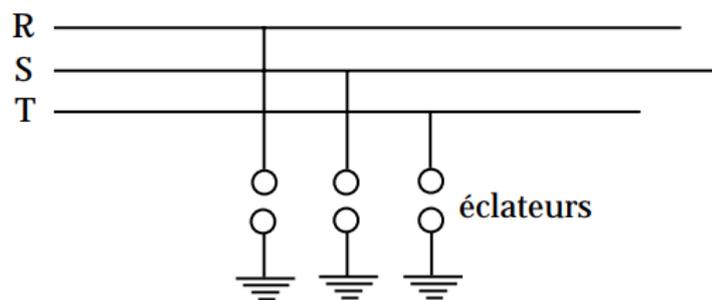
- ✓ A l'apparition d'une surtension, mettre le conducteur à la terre dans un temps très court ($<0,1\mu s$),
- ✓ Se désamorcer rapidement après l'écoulement à la terre de la décharge,
- ✓ Avoir une tension d'amorçage et une tension résiduelle aussi stables que possible pendant des années ; elles doivent en outre être indépendantes de la polarité et de la forme de l'onde, des conditions climatiques.

Les modèles des parafoudres les plus courants sont les parafoudres à éclateurs avec résistance et les parafoudres à oxydes métalliques, technique plus récente.

Les parafoudres seront toujours placés le plus près possible des installations à protéger, ou aux jonctions lignes aériennes-câbles.

Les éclateurs

Le moyen le plus simple de protéger un réseau est de placer des éclateurs selon le schéma ci-après :



Bon marché et facilement réalisable, l'éclateur présente un grave inconvénient : l'arc amorcé par la surtension crée un milieu ionisé qui fait que le courant de suite est pratiquement égal au courant de court-circuit. Il s'ensuivra une **interruption de service** provoquée par les protections contre les surintensités, ce qu'il faut naturellement chercher à éviter. D'autre part, son fonctionnement dépend des conditions atmosphériques.

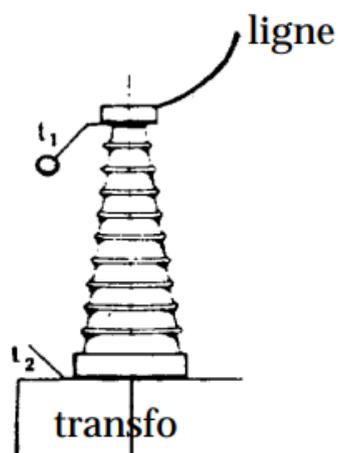
Éclateurs à tiges ou de coordination

Ils sont constitués de deux tiges de quelques mm de diamètre, placées suivant le même arc, et reliées l'une (t_1) à l'appareil à protéger, l'autre (t_2) à la terre. L'extrémité sous tension (t_1) est munie d'une sphère pour limiter l'effet couronne. La distance entre les tiges fixe la valeur de la tension d'amorçage. Pour cela, l'une des tiges est coulissante.

Son niveau de protection au choc est approximativement donné par :

$$U = 10 (d + 1) [kV_{crête}]$$

d = distance des tiges en cm.



Ces éclateurs n'ont pratiquement aucun pouvoir de coupure. Ils sont destinés en **dernier ressort** à écrêter les surtensions dans le cas où les autres systèmes n'auraient pas fonctionné.

On préférera donc l'usage de parafoudres pour assurer une bonne **coordination de l'isolement**, avec plus de sécurité.

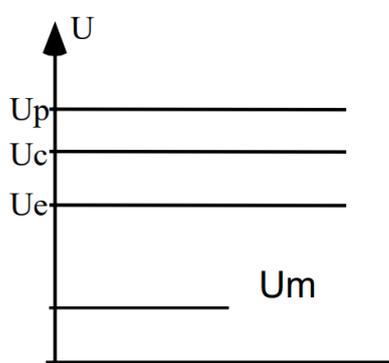
6. Coordination de l'isolement

On entend par coordination de l'isolement, l'ensemble des mesures qui sont prises pour éviter des décharges disruptives de perforation ou de contournement dans le matériel des installations.

Ces conditions sont obtenues en respectant des tensions de tenue minimales pour les diverses parties des installations. Il s'est donc avéré nécessaire de fixer des règles internationales et nationales (Commission Electrotechnique Internationale - CEI -). Ces règles définissent d'une part les tensions d'essais du matériel électrique et, d'autre part, les conditions dans lesquelles ces essais doivent être effectués. Par une gradation des tensions d'essai, on obtient ainsi une coordination de l'isolement correcte.

Les systèmes d'isolation peuvent être composés des trois états de la matière : **solide, liquide et gazeux**. Les caractéristiques diélectriques doivent répondre aux sollicitations maximales, à long terme. La valeur du champ maximum juste avant un claquage définit la **rigidité diélectrique** du matériau. **Cette valeur est différente pour les ondes de choc et les ondes alternatives**.

Les appareils dont la coordination de l'isolement est correcte, présentent les niveaux de tension de la figure ci-dessous.



U_p : tension de perforation (isolation interne)

U_c : tension de contournement (isolation externe)

U_e : tension d'essai fixée par les règles de coordination des isolements (prescriptions CEI).

U_m : tension de service la plus élevée

Tension de perforation ou de claquage

La tension de perforation ou de claquage est celle qui conduit à la perforation ou percement de l'isolation interne : décharge complète et destructive au travers de l'isolant. Cette tension doit être évidemment plus grande que la tension de contournement de l'appareil.

Tension de contournement, tension de cheminement

La tension de contournement est la tension disruptive, qui produit une décharge dans l'air, le long de l'isolation externe de l'appareil. Cette tension doit être plus élevée que la tension d'essai. En effet, selon les règles précitées, l'appareil soumis à la tension d'essai ne doit présenter aucun contournement au cours des essais.

Tension d'essai

La tension d'essai ou de tenue est fixée par les règles nationales ou internationales et permet une coordination correcte de l'isolement.

Quelques définitions complémentaires :

On appelle **tension de tenue à fréquence industrielle** la valeur efficace la plus élevée de la tension à la fréquence de service que le matériel doit supporter pendant une minute entre sa partie active et la masse, sans qu'il ne se produise de décharge disruptive de perforation ou de contournement.

On appelle **tension de tenue au choc** la valeur de crête de la tension de choc en onde pleine de forme normalisée que le matériel doit supporter dans des conditions spécifiées.

Le **niveau d'isolement** d'un matériel donné est défini par les valeurs de tenue à fréquence industrielle et de tenue au choc.

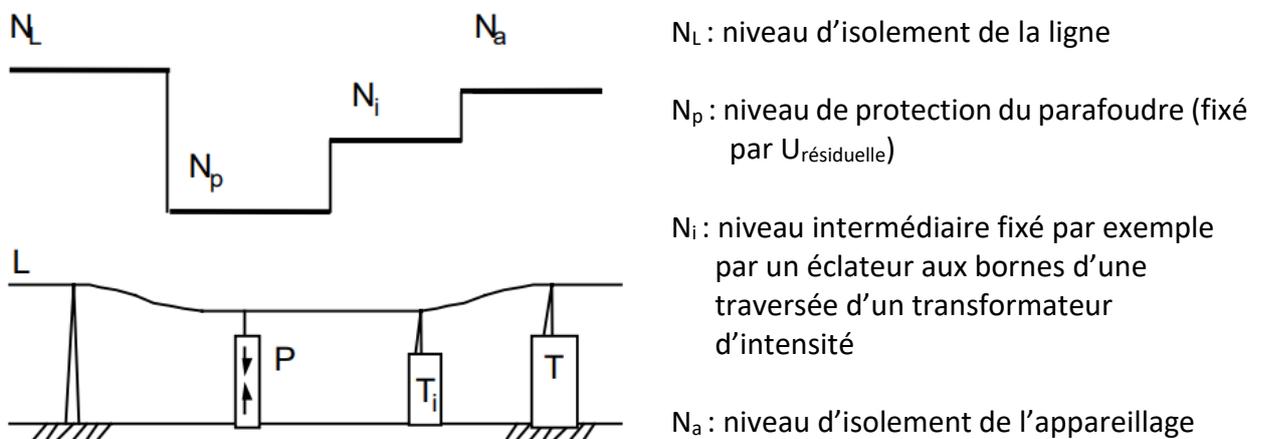
Le **niveau de protection au choc** d'un dispositif de protection est la valeur de crête la plus élevée de la tension qui peut exister entre ses bornes lors de l'application d'une onde de choc normalisée. Pour un parafoudre à résistance variable, ce sera la tension résiduelle correspondant à l'intensité de décharge la plus élevée à laquelle on puisse s'attendre. Il est clair qu'il faudra veiller à ce qu'une relation convenable existe entre ce niveau de protection et le niveau d'isolement du matériel. Roth recommande un niveau de protection d'environ 25% au-dessous du niveau d'isolement.

Gradation des niveaux d'isolement dans un réseau

Il est pratiquement impossible, pour des raisons économiques d'isoler, parfaitement un réseau. Des surtensions très fortes créeront ainsi des perturbations, d'où les dispositions suivantes :

- ✓ Limiter l'importance de ces perturbations, si possible pas d'interruption de service ;
- ✓ Limiter les dégâts à des parties secondaires facilement accessibles et remplaçables ;
- ✓ Les lignes, étant peu accessibles, seront bien isolées d'où fil de garde dès 30 kV ;
- ✓ Les sous-stations étant bien surveillées, les surtensions peuvent être bien contrôlées.

De ces principes, on comprend que la gradation des niveaux d'isolement des diverses parties est indispensable.



Exemple de tensions d'essais pour le matériel de poste selon la CEI ou l'ASE

Tension de service la plus élevée U_m kV eff.	Tension d'essai à fréquence industrielle à 50 Hz		Tension d'essai au choc Onde 1,2/50 μ s kV (crête)
	Matériel poste kV eff.	Transfo et C en kV eff.	
12	35	28	75
24	55	50	125
72.5	140	140	325
245	460	460	1050