

## Chapitre III (QEE)

### Les surtensions

#### I. Introduction

Les surtensions sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale d'un circuit. Elles peuvent apparaître :

- entre phases ou entre circuits différents, et sont dites de mode différentiel,
- entre les conducteurs actifs et la masse ou la terre et sont dites de mode commun.

Leur caractère varié et aléatoire les rend difficiles à caractériser et n'autorise qu'une approche statistique en ce qui concerne leur durée, leurs amplitudes et leurs effets.

Une première classification est établie partir des critères tels que l'origine, la durée et la forme. Le tableau 1 présente les principales caractéristiques de ces perturbations.

type de surtension (causes)	coefficients de surtension MT-HT	durée	raideur du front fréquence	amortissement
à fréquence industrielle (défaut d'isolation)	$\leq \sqrt{3}$	longue $> 1\text{ s}$	fréquence industrielle	faible
de manœuvre (interruption de court-circuit)	2 à 4	courte 1 ms	moyenne 1 à 200 kHz	moyen
atmosphérique (coup de foudre direct)	$> 4$	très courte $1\text{ à }10\text{ }\mu\text{s}$	très élevée 1000 kV/ $\mu\text{s}$	fort

Tableau 1. Caractéristiques des différents types de surtensions.

En fait, les risques se situent essentiellement au niveau des dysfonctionnements, de la destruction de matériel et, en conséquence, de la non continuité de service. Ces effets peuvent apparaître sur les installations des distributeurs d'énergie ou sur les installations des utilisateurs.

Les perturbations peuvent conduire à :

- des interruptions courtes (réenclenchements automatiques sur les réseaux de distribution publique MT par lignes aériennes),
- des interruptions longues (intervention pour changement d'isolants détruits, voire remplacement de matériel).

Des appareils de protection permettent de limiter ces risques. Leur mise en œuvre nécessite l'élaboration réfléchie de niveaux cohérents d'isolation et de protection. Pour cela, la compréhension préalable des différents types de surtension est indispensable, c'est l'objet de ce chapitre.

## **II. Classification des surtensions**

### **II.1. Origine des surtensions :**

- Les surtensions d'origine externe, essentiellement la foudre.
- Les surtensions d'origine interne, dont la cause réside dans le fonctionnement (correct ou défectueux) de l'un des appareils constituant le réseau (disjoncteur, ....).

### **II.2. Durée des surtensions**

On distingue donc :

a/ les surtensions temporaires à fréquence de service (qqs secondes qqs heures).

b/ les surtensions transitoires répétitives ou non (durée de l'ordre de la ms).

Les surtensions transitoires sont elles mêmes subdivisées en deux catégories :

- Les surtensions de manœuvre
- Les surtensions de foudre

Pour les systèmes dont la tension la plus haute pour le matériel est inférieure à 245 kV, les surtensions à front lent ne sont en général pas critiques alors que les surtensions de foudre nécessitent d'être considérées avec soin. Pour les niveaux de tension plus élevés, les surtensions à front lent sont importantes à étudier tandis que les surtensions temporaires sont souvent moins critiques. Les surtensions de foudre doivent être considérées pour tous les niveaux de tension.

- Les études sur les surtensions à front lent (manœuvre) nécessitent l'analyse des conditions d'enclenchement et des topologies de réseau qui causent des surtensions pouvant excéder la tenue des équipements. Les événements typiques donnant lieu à des surtensions à front lent sont :
  - l'enclenchement ou le réenclenchement d'une ligne de transport ;
  - l'apparition d'un défaut et son élimination ;
  - l'enclenchement d'un condensateur ;
  - le déclenchement d'une charge inductive.

## **III. Surtensions à fréquence industrielle**

Sous cette appellation de fréquence industrielle sont regroupées les surtensions ayant des fréquences inférieures à 500 Hz (Rappel : les fréquences industrielles les plus fréquentes sont : 50, 60 et 400 Hz).

### **III.1. Surtension provoquée par un défaut d'isolement**

Une surtension due à un défaut d'isolement apparaît (figure 1) sur un réseau triphasé, lorsque le neutre est isolé ou impédant.

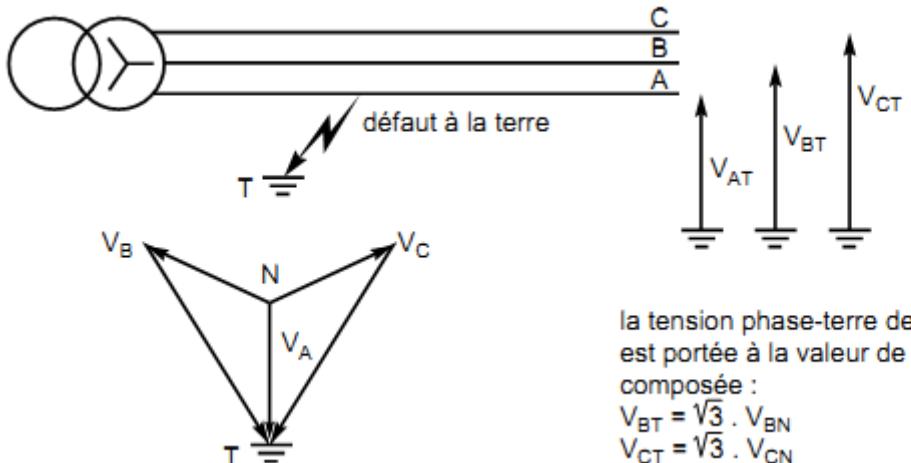


Figure 1. Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut d'isolement.

En effet, lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la masse ou la terre (blessure d'un câble souterrain, mise à la terre d'un conducteur aérien par des branchages, défaut dans un équipement...), la phase concernée est mise au potentiel de la terre et les deux autres sont alors soumises, par rapport à la terre, à la tension composée. De façon plus précise, lors d'un défaut d'isolement sur la phase A, un facteur  $S_d$  de défaut à la terre est défini par le rapport de la tension des phases B et C par rapport à la terre, à la tension simple du réseau.

L'équation ci-après permet de calculer  $S_d$  :

$$S_d = \frac{\sqrt{3}(k^2 + k + 1)}{k + 2} \quad (1)$$

$$\text{avec } k = \frac{X_o}{X_d}$$

$X_d$  étant la réactance directe du réseau vu du point de défaut, et  $X_o$  la réactance homopolaire.

A noter que :

- si le neutre est parfaitement isolé,

$$\text{soit } X_o = \infty : S_d = 3^{1/2} = \sqrt{3}.$$

- si la mise à la terre du neutre est parfaite soit  $X_o = X_d$  :  $S_d = 1$ .

- si, comme dans le cas général :  $X_o \leq 3X_d$  :  $S_d \leq 1,25$ .

### III.2. Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti)

Une surtension peut se produire lorsqu'une ligne longue est alimentée à l'une de ses extrémités et non chargée à l'autre. Elle est due à un phénomène de résonance qui se manifeste par une onde de tension à croissance linéaire le long de la ligne.

En effet, avec :

- L et C désignant respectivement l'inductance et la capacité totale de la ligne ;
  - $U_s$  et  $U_e$  étant les tensions à l'extrémité ouverte et à l'entrée de la ligne ;
- le facteur de surtension est égal à:

$$\frac{U_s}{U_e} = \frac{1}{1 - \frac{1 \cdot L \cdot C \cdot \omega^2}{2}} \quad (2)$$

Ce facteur de surtension est de l'ordre de 1,05 pour une ligne de 300 km et de 1,16 pour une ligne de 500 km. Ces valeurs sont sensiblement les mêmes pour les lignes HT et THT.

Ce phénomène se produit en particulier lorsqu'une ligne longue est brusquement déchargée.

### III.3. Surtension par ferrorésonance

La surtension est alors le résultat d'une résonance particulière qui se produit lorsqu'un circuit comporte tout à la fois un condensateur (volontaire ou parasite) et une self avec circuit magnétique saturable (un transformateur par exemple). Cette résonance peut apparaître surtout lorsqu'une manœuvre (ouverture ou fermeture d'un circuit) est réalisée sur le réseau avec un appareil dont les pôles sont séparés ou à fonctionnement non simultané.

Le circuit représenté par le schéma de la figure 2, avec en série une inductance à noyau saturable L et la capacité du réseau C, facilite la compréhension du phénomène.

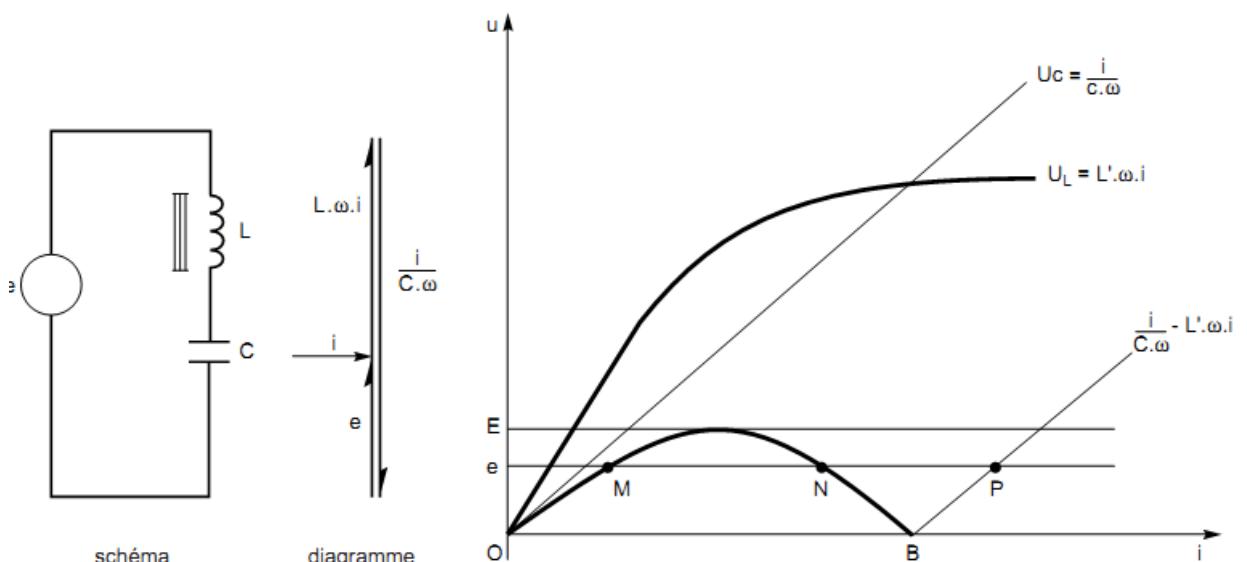


Figure 2. Principe de la ferrorésonance.

Il est alors possible de dessiner les trois courbes :

$-U_c = f(i)$ ,

- $U_L = g(i)$ ,
- $(U_L - (1 / C \cdot \omega) \cdot i) = h(i)$ ;
- la première est une droite de pente  $1 / C \cdot \omega$ ,
- la seconde présente un coude de saturation,
- et la dernière permet de visualiser deux points de fonctionnement (O et B) pour lesquels la tension aux bornes de l'ensemble LC est nulle et deux autres points de fonctionnement stables M et P ; N est un point d'équilibre instable.

Les tensions aux bornes de L et de C (point P) sont élevées. Le passage de M vers P peut n'être dû qu'à un transitoire qui augmente momentanément la tension à une valeur supérieure à E.

## IV. Surtensions transitoires

### IV.1. Surtensions de manœuvre

La modification brusque de la structure d'un réseau électrique provoque l'apparition de phénomènes transitoires. Ceux-ci se traduisent souvent par la naissance d'une onde de surtension ou d'un train d'ondes haute fréquence de type apériodique ou oscillatoire à amortissement rapide.

#### IV.1.1. Rappel théorique

De façon générale, un circuit électrique qui subit une perturbation (figure 3) à une réponse composée de la réponse forcée et de la réponse naturelle (libre). La réponse naturelle est reliée aux fréquences naturelles du circuit tandis que la réponse forcée est reliée aux sources imposées.

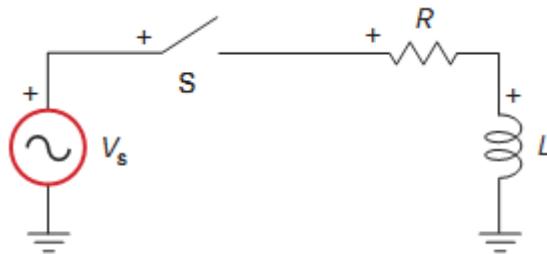


Figure 3. Exemple simple de circuit avec comportement transitoire.

Dans le cas du circuit de la figure 3, alimenté par une source de tension sinusoïdale, on peut démontrer que le courant du disjoncteur S enclenché pour alimenter une charge RL, est donné par l'équation :

$$i(t) = \frac{V_m}{(R^2 + \omega^2 L^2)^{1/2}} [\sin(\omega t + \theta - \varphi)] - \frac{V_m}{(R^2 + \omega^2 L^2)^{1/2}} [\sin(\theta - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}] \quad (3)$$

avec  $\tan \varphi = \omega L / R$ , et la définition de la source de tension :

$$V_s = V_m \sin(\omega t + \theta)$$

Le premier terme dans la partie droite de l'équation du courant  $i(t)$  représente la réponse forcée, soit le régime permanent. Le deuxième terme représente la réponse naturelle, soit la partie transitoire. Ce terme décroît selon la constante de temps ( $R/L$  dans le cas présent) du circuit et devient nul quand le régime permanent est atteint. On constate ici que si l'angle de fermeture remplit la condition  $\theta = \varphi$ , la partie transitoire est inexisteante.

#### - Surtension de commutation en charge normale

Une charge «normale» est essentiellement résistive, c'est-à-dire que son facteur de puissance est supérieur à 0,7. Dans ce cas, la coupure ou l'établissement des courants de charge ne posent pas de problème majeur. Le coefficient de surtension (rapport de l'amplitude de la tension transitoire et de la tension de service) varie entre 1,2 et 1,5.

#### IV.1.2. Surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de courants inductifs

Ce type de surtension a trois phénomènes génératrices : l'arrachement du courant, le réamorçage et le préamorçage. Le schéma de la figure 4 représente un réseau alimentant une charge à travers un disjoncteur et comporte :

- une source de tension sinusoïdale d'inductance  $L_1$  et de capacité  $C_1$ ,
- un disjoncteur  $D$ , non dissociable de ses éléments parasites  $L_{p1}$  et  $C_{p1}$ ,
- une charge inductive  $L_2$  dont on ne peut ignorer la capacité répartie symbolisée par un condensateur  $C_2$ ,
- enfin, une inductance de ligne  $L_0$ , généralement négligeable.

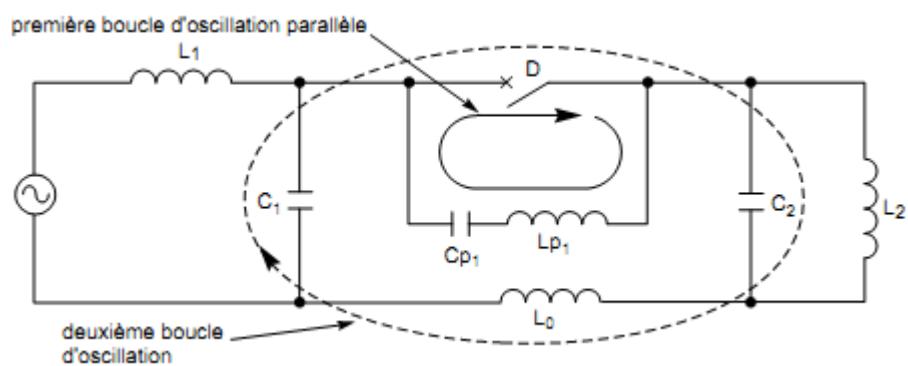


Figure 4 : circuit équivalent pour l'étude des surtensions provoquées par l'interruption de courants inductifs où :  $C_{p1}$  : capacité du disjoncteur,  $L_{p1}$  : inductance du disjoncteur.

#### - arrachement du courant

Lors de la coupure de courants de faibles valeurs, notamment inférieurs au courant nominal du disjoncteur, l'arc qui apparaît occupe un faible volume. Il est soumis à un refroidissement important lié à la capacité du disjoncteur à interrompre des courants très supérieurs. De ce fait, il devient

instable et sa tension peut présenter des variations relatives importantes, alors que sa valeur absolue reste très inférieure à la tension du réseau (cas du SF<sub>6</sub> ou du vide).

#### - *défaut proche en ligne*

Quand un disjoncteur coupe un courant de court-circuit, il est soumis à ses bornes à la tension transitoire de rétablissement (TTR). Celle-ci a une influence majeure sur la coupure du courant.

Quand le réseau est inductif, la coupure du courant a lieu à un instant où la tension est proche de son maximum. Si le défaut est proche du début de la ligne, l'ouverture du disjoncteur provoquera le long de la portion de ligne située entre le disjoncteur ouvert et le défaut des oscillations de tension rapides à cause des fréquences naturelles élevées de la portion de ligne. Ces oscillations vont provoquer, juste après l'ouverture du disjoncteur une augmentation très rapide de la TTR.

### IV.1.3. Surtension provoquée par les manœuvres sur des circuits capacitifs

Par circuits capacitifs, il faut entendre les circuits constitués de batteries de condensateurs et les lignes à vide.

#### - *mise sous tension de batteries de condensateurs.*

Lors de la mise sous tension de batteries de condensateurs, à priori sans charge initiale et dans le cas d'un appareil à manœuvre lente, un amorçage se produit entre les contacts au voisinage de la crête de l'onde 50 Hz. Il apparaît alors une oscillation amortie du système LC de la figure 5.

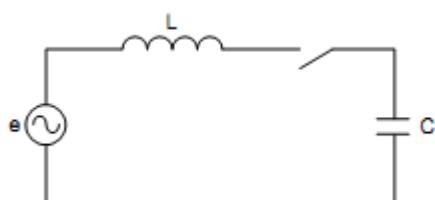


Figure 5. Schéma de principe d'un circuit de manœuvre de condensateurs.

La fréquence de cette oscillation est généralement nettement supérieure à la fréquence du réseau et l'oscillation de tension est sensiblement centrée autour de la valeur crête de l'onde 50 Hz. La valeur de tension maxi observée est alors de l'ordre de deux fois la valeur crête de l'onde 50 Hz. Avec un appareil à manœuvre plus rapide, l'amorçage ne se produit pas systématiquement au voisinage de la crête, la surtension éventuelle est donc plus faible.

Si une batterie de condensateurs est remise en service très peu de temps après sa séparation du réseau, elle possède une tension de charge résiduelle de valeur comprise entre zéro et la tension crête de l'onde 50 Hz. L'amorçage entre contacts se produit au voisinage d'une crête de polarité opposée (claquage sous une contrainte de deux fois la tension crête).

L'oscillation précédemment décrite se produit avec une impulsion initiale doublée. La valeur de tension maxi observée peut alors approcher trois fois la tension de crête 50 Hz.

Pour des raisons de sécurité, les batteries de condensateurs sont toujours équipées de résistances de décharges permettant d'éliminer les tensions résiduelles avec des constantes de temps de l'ordre de la minute. En conséquence, un facteur de surtension de 3 correspond à des cas bien particuliers.

#### **- *mise sous tension de lignes ou câbles à vide.***

La fermeture lente d'un appareil sur un tel type de charge entraîne ici aussi un amorçage au voisinage de la crête du 50 Hz, l'échelon de tension appliqué à une extrémité de la ligne ou du câble va se propager et se réfléchir à l'extrémité ouverte. La superposition de l'échelon incident et de l'échelon réfléchi amène une contrainte en tension égale à deux fois l'échelon appliqué, aux amortissements près, et en faisant l'hypothèse que le 50 Hz est assimilable à du continu au regard de ces phénomènes. Ce type de comportement étant lié aux capacités et selfs réparties des conducteurs considérés, les lignes aériennes présentent en plus un couplage entre phases rendant la modélisation assez complexe. C'est surtout dans les lignes de transport (THT) que ce phénomène de réflexion est à prendre en compte, vu le faible écart relatif entre tension de service et tension d'isolement.

### **IV.2. Surtensions de foudre**

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive qui peut se produire lorsqu'une grande quantité d'électricité statique s'est accumulée dans des zones de nuages d'orage, dans ces nuages, entre eux ou entre de tels nuages et le sol (la terre ou la mer).

Les coups de foudre qui tombent sur les lignes aériennes provoquent des surtensions très importantes qui se propagent le long des lignes pour atteindre les postes situés aux extrémités. Il est nécessaire de spécifier les isolements des matériels et de déterminer les protections à installer sur le réseau (parafoudres, éclateurs) pour rendre acceptable économiquement le risque de défaillance des équipements à cause de la foudre : c'est un des objectifs de la coordination des isolements. Les surtensions de foudre provoquent aussi des amorcages des chaînes d'isolateurs des lignes aériennes qui dégradent la qualité de service aux points de livraison du réseau en donnant naissance à des coupures brèves ou des creux de tension.

#### **IV.2.1 Description du phénomène orageux nuage-sol**

La foudre est une décharge électrique d'une longueur de plusieurs kilomètres associée à une impulsion de courant transitoire de très forte amplitude. La source la plus commune de la foudre est

la séparation des charges dans les nuages d'orages, les cumulo-nimbus. Les orages les plus fréquents font suite à des fronts froids. A l'arrivée d'un de ceux ci, la masse d'air froid s'infiltra sous l'air chaud et le soulève ; ceci engendre des turbulences dans l'air chaud rejeté en altitude. Ainsi se forment les nuages d'orage ou les cumulo-nimbus.

La distribution des charges dans un nuage d'orage est la suivante : la partie supérieure, constituée de glace, est chargée positivement (région P), tandis que la partie inférieure constituée de gouttelettes d'eau est chargée négativement (région N). Souvent, un îlot de charges positives (région P) est enserré dans cette masse de charges négatives (figure 6).

Cet immense dipôle électrique provoque, par influence, le développement de charges de signes opposés (donc positives) sur la partie du sol qui se trouve à proximité. A l'approche d'un nuage orageux, le champ électrique atmosphérique au sol qui est de l'ordre d'une centaine de volts par mètre par beau temps commence par s'inverser, puis croît dans de fortes proportions. Lorsqu'il atteint 10 à 20 kV/m, une décharge au sol est imminente.

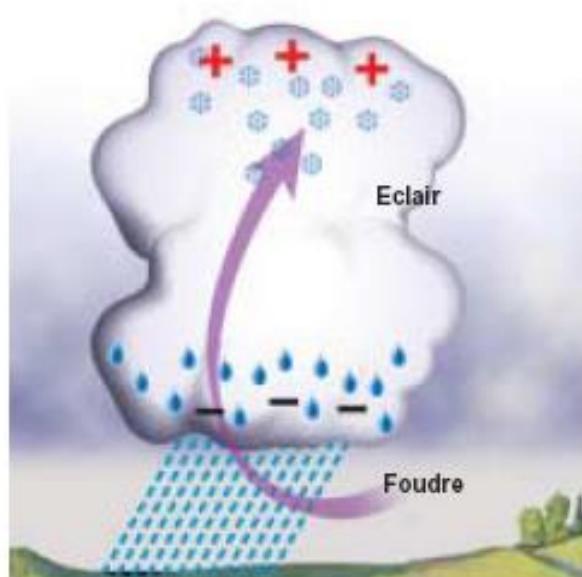


Figure 6. Structure générale d'un nuage orageux.

D'autres types de décharges sont répertoriés :

- les décharges entre nuages ;
- les décharges à l'intérieur des nuages.

Pour des raisons très pratiques (perturbations des réseaux électriques et de télécommunications, incendies, ....), les décharges de foudre qui ont été l'objet d'études approfondies sont les décharges nuage-sol.

#### IV.2.2. Classification des coups de foudre nuage-sol

On distingue quatre espèces principales de coups de foudre selon le sens de propagation du traceur (leader) et la polarité du nuage (sens d'écoulement du courant principal).

- les coups de foudre ascendants négatifs,
- les coups de foudre ascendants positifs,
- les coups de foudre descendants négatifs,
- les coups de foudre descendants positifs.

Un coup de foudre est dit ascendant, lorsque le leader (traceur) se propage à partir du sol. Il est descendant lorsque le traceur se développe à partir du nuage.

Un coup de foudre est dit négatif, si la partie négative du nuage se décharge, il est dit positif, si la partie positive se décharge. Les coups de foudre négatifs descendants et ascendants sont les plus fréquents, leur fréquence d'apparition est de l'ordre de 80 à 90% en régions tempérées.

Un phénomène de coup de foudre nuage-sol négatif comprend deux grandes phases principales:

- le développement d'une prédécharge de foudre (non visible), qui provoque le développement d'un canal chargé négativement vers le sol ;
- l'amorçage d'un premier arc en retour qui se propage depuis le sol vers le nuage.

##### *- Caractéristiques électriques*

Les arcs en retour sont responsables de la majorité des dégâts causés par la foudre. Le courant de l'arc en retour est de nature impulsionale, et sa forme se caractérise par une valeur de crête, un front de montée jusqu'à la crête (ou temps de montée) et un temps de décroissance (figure 7).

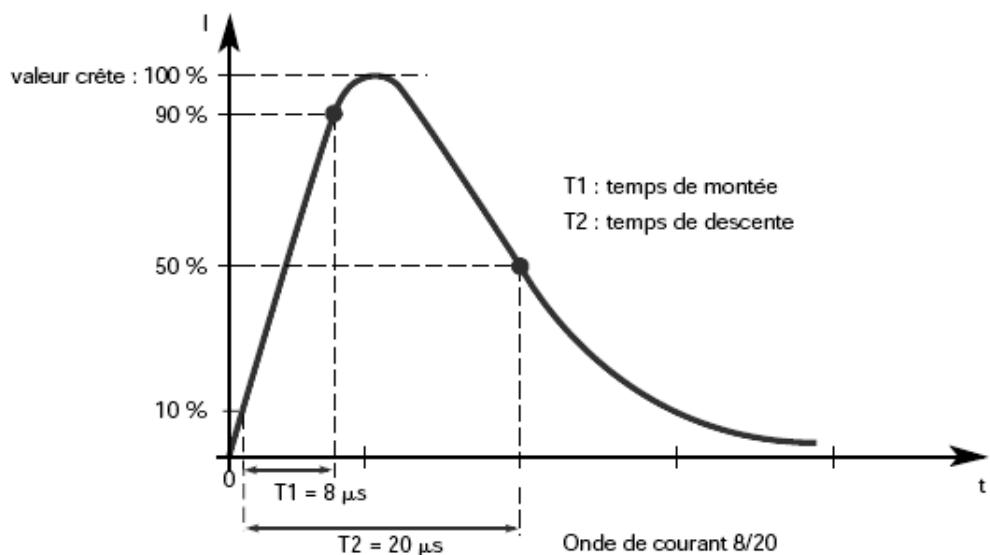


Figure 7. Onde de courant de foudre.

Généralement, il n'y a pas un seul arc en retour, mais plusieurs, en moyenne quatre éclairs, parfois jusqu'à une quinzaine. Ces arcs en retour (1<sup>er</sup> arc + arcs subséquents) se succèdent pendant 500 ms à 1 s; le premier arc est souvent le plus fort car il correspond à la décharge initiale des charges accumulées (figure 8).

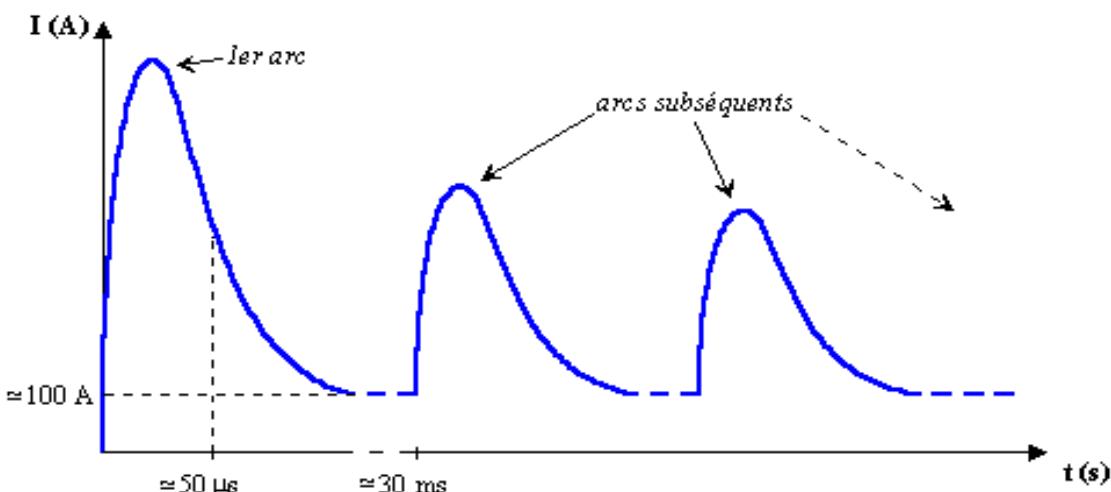


Figure 8. Evolution du courant de l'onde de foudre.

Nombre d'événements	paramètre	unité	95%	50%	5%
101	Courant de crête	kA	14	30	80
135	Premier arc en retour	kA	4.6	12	30
	Arc en retour subséquent				
92	di/dt maximal	kA/μs	5.5	12	32
122	Premier arc en retour	kA/μs	12	40	120
	Arc en retour subséquent				
89	Temps de montée (2kA-crête)	μs	1.8	5.5	18
118	Premier arc en retour	μs	0.22	1.1	4.5
	Arc en retour subséquent				
90	Durée de l'impu. (2 kA-mi-amplitude)	μs	30	75	200
115	Premier arc en retour	μs	6.5	32	140
	Arc en retour subséquent				

Tableau 2. Paramètres du courant des décharges négatives.

#### IV.2.3. Points d'impact

La foudre peut tomber directement sur le sol, les structures ou les lignes. Dans tous ces cas les conséquences peuvent être néfastes du fait de la propagation par conduction ou par rayonnement. Le point d'impact du coup de foudre ne semble se déterminer que dans la partie inférieure de la

trajectoire (aux environs de 300 m d'altitude) : De nombreux facteurs locaux- arbres, bâtiments (effets de pointe), nature du sol, etc- peuvent avoir une action sur le lieu d'impact.

#### **IV.2.4. Effets de la foudre**

##### **IV.2.4.1. Les effets directs de la foudre**

Ils se produisent au point d'impact de la foudre et sont dus à l'écoulement du courant de foudre de très forte intensité dans les éléments plus ou moins conducteurs. Le passage du courant de foudre peut avoir pour conséquence : l'électrocution de personnes ou d'animaux (élévation du potentiel au sol), des incendies (effet thermique de la foudre) et la destruction de matériels par fusion ou déformation.

Lors d'un coup de foudre direct sur une ligne électrique ou un pylône, le courant peut se propager et atteindre toutes les installations distribuées par la ligne même si elles sont localisées à plusieurs kilomètres du point d'impact. Ces courants sont d'autant plus destructeurs que la majorité de l'énergie du coup de foudre est "conduite" par le réseau.

##### **- Coup de foudre direct sur une ligne de transport d'énergie**

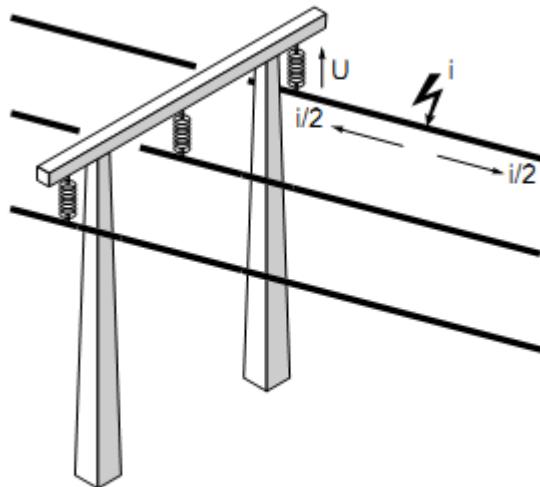
Il se manifeste par l'injection dans la ligne, d'une onde de courant de plusieurs dizaines de kA. Cette onde de courant, qui peut faire fondre des conducteurs en se propageant de part et d'autre du point d'impact (figure 9), provoque une augmentation de tension U donnée par la formule :

$$U = Zc \cdot i / 2 \quad (4)$$

avec  $i$  le courant injecté et  $Zc$  l'impédance homopolaire caractéristique de la ligne (300 à 1000 ohms).

$U$  atteint donc des valeurs de plusieurs millions de volts, ce qui n'est supportable par aucune ligne. En un point de celle-ci, par exemple au premier pylône rencontré par l'onde, la tension croît jusqu'à ce que se produise le claquage de la distance d'isolement (la chaîne d'isolateurs). Suivant que l'amorçage a eu lieu ou pas (fonction de la valeur du courant injecté dans la ligne) l'onde qui continue à se propager après le pylône est dite coupée ou pleine. Pour différentes tensions de réseau, il n'y a pas amorçage au-dessous du courant critique indiqué par la droite de la figure 10. Pour les réseaux dont la tension est inférieure à 400 kV, pratiquement tous les coups de foudre directs entraînent un amorçage et un défaut à la terre.

En fait, il est estimé que seulement 3 % des surtensions, observées sur le réseau public MT français 20 kV, dépassent 70 kV et sont donc imputables à des coups de foudre directs. De plus, du fait de l'atténuation de l'onde de tension au cours de sa propagation le long de la ligne, les surtensions maximales (très rares) à l'entrée d'un poste ou d'un bâtiment sont évaluées à 150 kV en MT. Rappelons que la plus haute tenue au choc de l'appareillage 24 kV est de 125 kV.



$$U = Z_c \cdot i/2$$

Figure 9. Coup de foudre direct sur un conducteur de phase, l'onde de courant se propage de part et d'autre du point d'impact.

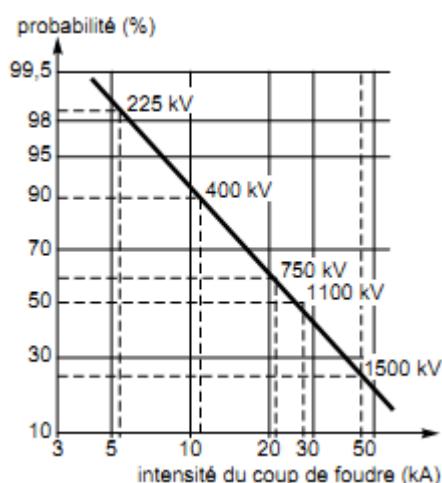


Figure 10. Distribution statistique de l'intensité des coups de foudre directs et intensités minimales d'amorçage en fonction du niveau de tension du réseau.

#### IV.2.4.2. Les effets indirects de la foudre

Ils sont issus des effets directs et transmis entre autre à l'installation électrique par :

- conduction ;
- rayonnement ou induction ;
- montée en potentiel du réseau de terre.

##### IV.2.4.2.1. Surtensions par induction

Tous les éléments métalliques localisés dans un périmètre proche d'un coup de foudre se comportent comme des antennes qui captent par "induction" les brusques variations du

rayonnement électromagnétique induit par la foudre. Des surtensions et des courants transitoires apparaissent ainsi sur tous les équipements qui leur sont reliés dont les effets sont proportionnels à la puissance et à la proximité du coup de foudre.

Même s'il constitue un moyen de protection contre l'impact direct de la foudre, l'enfouissement sous terre des réseaux ne constitue aucunement une garantie totale de protection contre l'effet indirect de la foudre.

*a/ Surtensions sur les structures aériennes et les lignes électriques et téléphoniques par induction électrique*

La décharge rapide qui intervient au moment du coup de foudre provoque des variations considérables du champ électrique au dessus du sol. Ces variations agissent par influence sur les conducteurs placés dans ce champ, toitures métalliques, pylônes, et les lignes aériennes (réseau électrique, téléphonique) qui vont en quelque sorte exporter la perturbation (figure 11). On peut se représenter les éléments en présence, nuage, sol, conducteur victime, comme les armatures de condensateurs chargés de très haute énergie. Ces condensateurs forment un réseau dans lequel ils sont mutuellement couplés. Toute décharge qui modifie subitement le potentiel entre deux armatures de l'un d'eux entraîne donc par couplage capacitif une modification plus ou moins importante des charges sur les autres. Il n'est plus nécessaire dans ce cas que la décharge se fasse entre une masse d'air et le sol pour constater une perturbation. Une décharge dans l'atmosphère peut agir de la même manière. Lorsqu'une ligne électrique aérienne est soumise sur une certaine longueur de son parcours à une variation brutale de champ, elle développe donc par influence une surtension qui va se propager de part et d'autre.

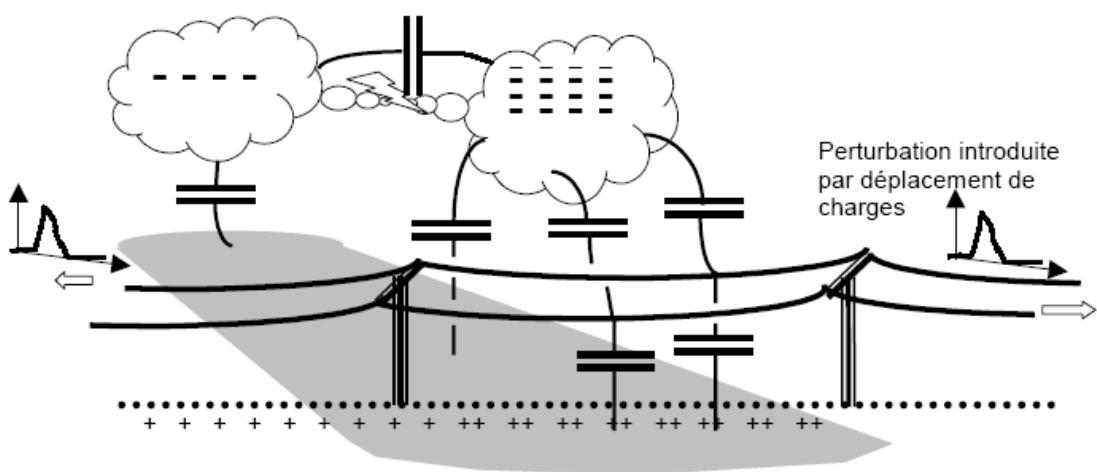


Figure 11. Schéma général du couplage par champ électrique.

### b/ Perturbations produites par induction magnétique

Une décharge entre nuage et sol ou entre nuages entraîne des champs électromagnétiques qui engendrent sur les milieux conducteurs des tensions/courants dans une gamme de fréquence de 100 Hz à 10 MHz. Ces rayonnements peuvent être reçus par tout conducteur formant une antenne plus ou moins bien adaptée, mais c'est sous forme de champ d'induction magnétique «champ H» agissant sur des conducteurs formant une boucle de surface conséquente (figure 12) que son effet est le plus important. Pour une boucle de quelque 50 mètres carrés, la tension induite se chiffre en kilovolts. D'où la nécessité de réduire les boucles pour limiter les tensions induites.

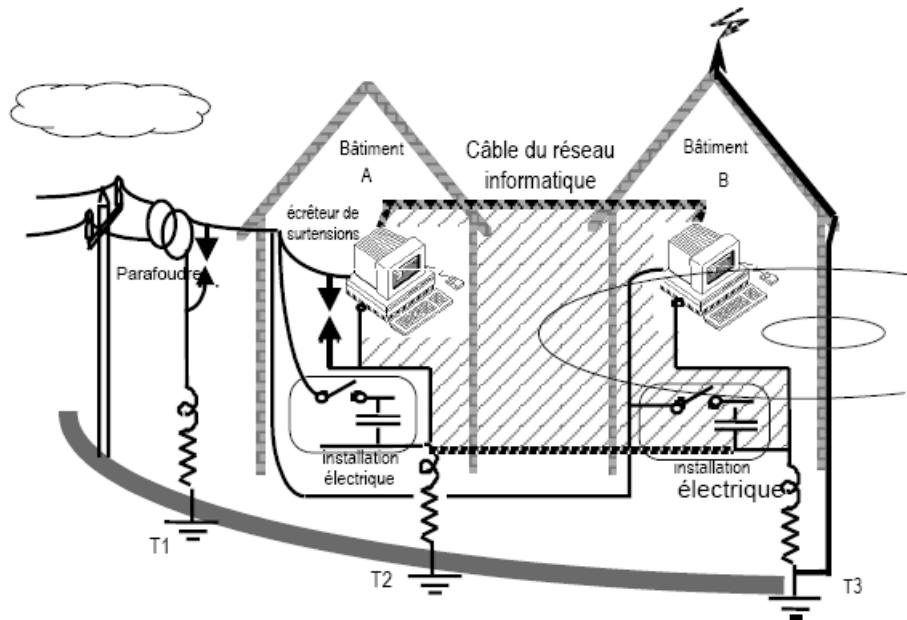


Figure 12. Schéma général du couplage par champ magnétique.

### c/ Surtensions par rayonnement électromagnétique

Même dans le cas d'un impact lointain, l'onde électromagnétique émise par le canal de foudre peut atteindre une installation de mise à la terre après couplage électromagnétique. En zone dite lointaine, les caractéristiques du champ EM rayonné ne dépendent que des propriétés du milieu dans lequel le champ se propage. Dans cette zone on dit que l'on a affaire à un couplage par champ électromagnétique ; il faut employer les équations de Maxwell pour calculer l'amplitude des perturbations électromagnétiques. Ainsi, l'effet indirect de la foudre se manifeste par l'apparition de surtensions induites par rayonnement électromagnétique.

### **Cas des transformateurs de puissance :**

Lorsque l'onde de tension résultant d'un coup de foudre traverse d'un transformateur MT/BT, la transmission se fait essentiellement par couplage capacitif. L'amplitude de la surtension ainsi transmise, observée sur le secondaire du côté BT, est inférieure à 10 % de ce qu'elle était du côté MT (généralement inférieure à 70 kV). Ainsi, sur les lignes BT, les surtensions induites sont en général inférieures à 7 kV.

#### **IV.2.4.2.2. Elévation de potentiel du sol**

Le courant de foudre, de nature impulsionnelle, présente des fronts de montée très raides. Dans ces conditions, il provoque une montée de potentiel très importante. Cela signifie qu'entre deux points proches situés à la surface du sol, va apparaître une différence de potentiel.

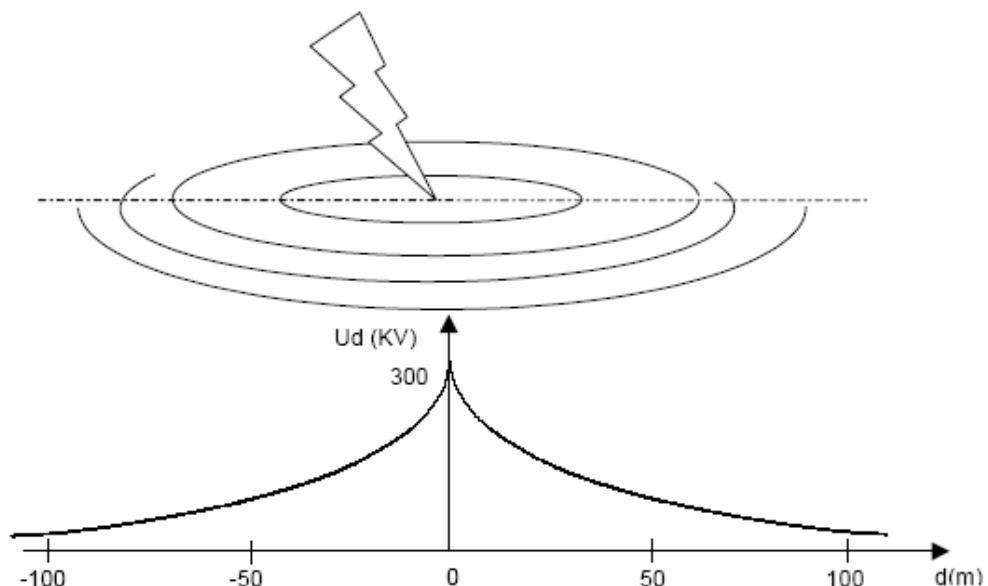


Figure 13. Elévation de potentiel du sol.

L'élévation du potentiel peut atteindre plusieurs centaines de Kilovolts à proximité du point d'impact (figure 13), et peut encore être très importante à plusieurs dizaines de mètres. Il en découle des différences de potentiel très importantes entre les différentes parties reliées à la terre d'un bâtiment, en particulier si les éléments conducteurs (armatures de béton, tuyaux, éléments de structure) ne sont pas reliés entre eux.

La meilleure protection est l'interconnexion de toutes ces structures métalliques.

Ces différences de potentiel se traduisent par :

- des destructions d'équipements électriques ou électroniques,
- des claquages entre descentes de paratonnerres et objets métalliques proches reliés au sol.

## V. Modélisation des surtensions transitoires dans le réseau électrique

### V.1. Principes de modélisation dans les réseaux électriques

L'approche de modélisation des régimes transitoires dans les réseaux électriques est fondée sur l'utilisation des éléments constitutifs de base des circuits électriques. L'analyse des transitoires dans les réseaux électriques est un processus mathématiquement complexe et nécessite l'utilisation de logiciels spécialisés. Des logiciels de type EMTP (Electromagnetic Transients Program), comme EMTP-RV [1], appliquent des méthodes numériques pour la représentation et la résolution de réseaux de différentes natures. La simulation des transitoires électromagnétiques s'applique à une large gamme de fréquences et nécessite donc une représentation très détaillée des composants. La simulation est effectuée entièrement dans le domaine du temps et l'objectif est de calculer les formes d'onde des variables d'état à un point arbitraire dans le réseau simulé. La représentation mathématique des composants de réseau pour la simulation des transitoires est un sujet très vaste.

#### V.1.1. Modélisation des lignes et des câbles

L'analyse des transitoires dans le réseau électrique nécessite une bonne représentation mathématique des lignes et des câbles.

##### V.1.1.1. Équations de base

L'équation différentielle d'une ligne de transmission uniforme dont les paramètres ne varient pas en fonction de la fréquence, est obtenue en analysant une section infinitésimale de ligne  $\Delta x$  (figure 14). La ligne est connectée au nœud de gauche k et au nœud de droite m. Si  $\Delta x \rightarrow 0$  alors on obtient les équations différentielles partielles d'une ligne de transmission :

$$\begin{aligned}\frac{dV(x, t)}{dx} &= -R'I(x, t) - L' \frac{dI(x, t)}{dt} \\ \frac{dI(x, t)}{dx} &= -G'V(x, t) - C' \frac{dV(x, t)}{dt}\end{aligned}\tag{5}$$

La transformée de Laplace de ces équations permet d'écrire :

$$\begin{aligned}\frac{dV(x, s)}{dx} &= -Z'I(x, s) \\ \frac{dI(x, s)}{dx} &= -Y'V(x, s)\end{aligned}\tag{6}$$

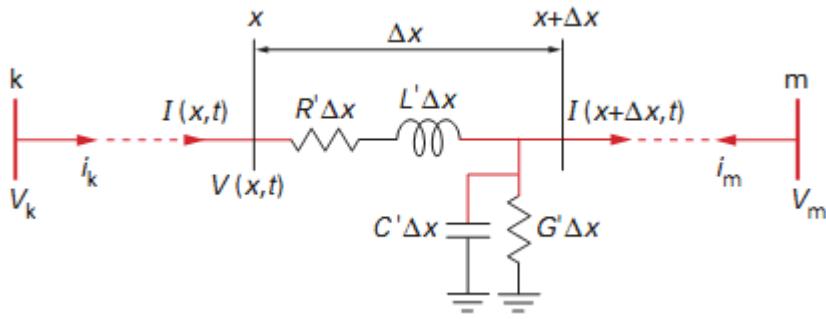


Figure 14. Modélisation de ligne à paramètres distribués.

Toutes les équations présentées ci-avant correspondent au cas d'une ligne à un seul conducteur. Dans le cas d'une ligne triphasée ou si on tient compte de tous les conducteurs d'une ligne aérienne (câbles de garde et conducteurs de phase), il faut reprendre les équations avec des vecteurs et des matrices (caractères en gras) :

$$\frac{d^2\mathbf{V}(x, s)}{dx^2} = \mathbf{Z}'\mathbf{Y}'\mathbf{V}(x, s) \quad (7)$$

$$\frac{d^2\mathbf{I}(x, s)}{dx^2} = \mathbf{Y}'\mathbf{Z}'\mathbf{I}(x, s)$$

En utilisant la théorie des valeurs propres, il est possible de transformer ces équations couplées des quantités en phase aux quantités modales de manière telle que les équations deviennent découplées. Cela signifie que les produits  $\mathbf{Z}'\mathbf{Y}'$  et  $\mathbf{Y}'\mathbf{Z}'$  sont des matrices diagonales. Les équations modales sont résolues comme les équations d'une ligne monophasée. La transformation inverse est utilisée pour passer des quantités modales aux équations en phase du réseau connecté à la ligne multiphasée.

La représentation des lignes aériennes et des câbles nécessite l'utilisation de modèles détaillés prenant en compte en particulier :

- les couplages capacitifs et inductifs entre les parties conductrices ;
- les pertes dans le sol ;
- la propagation et la variation des paramètres en fonction de la fréquence.

Les modèles de type **FD** pour les lignes et de type **FDP** pour les câbles sont les plus appropriés. Il demeure acceptable d'utiliser les modèles de type **CP** en l'absence de données supplémentaires requis pour la construction des modèles de type **FD** et de type **FDP**.

Le modèle **CP** est le modèle à paramètres distribués et constants. C'est le modèle de premier niveau qui permet de représenter les délais de propagation pour les lignes et les câbles.

Le modèle **FD** permet de représenter la dépendance fréquentielle des paramètres, mais utilise une matrice de transformation constante calculée à une fréquence.

Le modèle **FDP** est le modèle le plus précis car il permet de tenir compte complètement de la variation fréquentielle des paramètres, il est donc plus utile pour les câbles.

### V.1.1.2. Modèle électrique du canal de foudre

Des études très approfondies ont montré que les coups de foudre peuvent être modélisés par un générateur de courant à la base du canal dont l'amplitude peut varier de quelques kA à quelques centaines de kA. Le canal ionisé est ensuite considéré comme une antenne verticale sur laquelle va circuler un courant dit "courant d'arc en retour". La propagation de ce courant le long du canal est à l'origine d'un rayonnement électromagnétique. Dans ce qui va suivre nous donnons un bref aperçu sur la modélisation du courant à la base du canal et du courant de l'arc en retour.

#### a/ Courant à la base du canal

Le courant à base du canal  $i(0,t)$  doit être spécifié afin de déterminer le courant en fonction de la hauteur et du temps le long du canal de retour  $i(z,t)$  (figure 15).

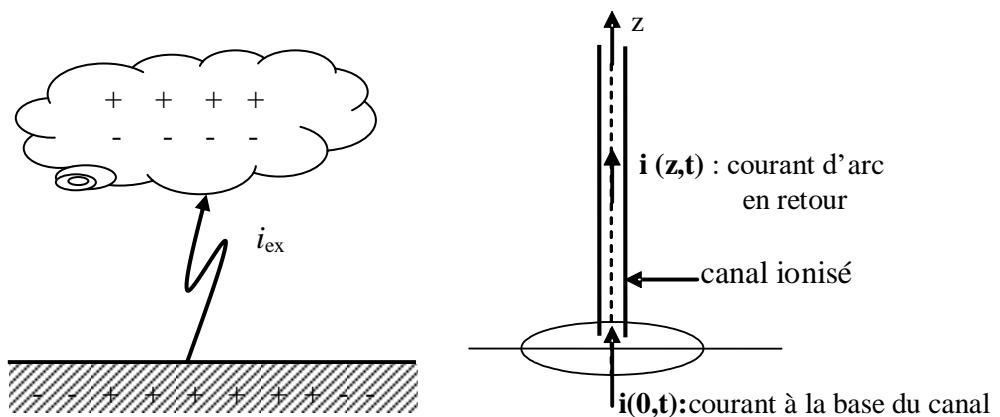


Figure 15. Décharge nuage – terre et réciproquement (représentation du canal ionisé).

Dans la littérature deux expressions analytiques sont le plus souvent utilisées pour représenter le courant à la base du canal. En premier la fonction bi – exponentielle (figure 16).

$$i(0,t) = I_0 (\exp(-\alpha \cdot t) - \exp(-\beta \cdot t)) \quad (8)$$

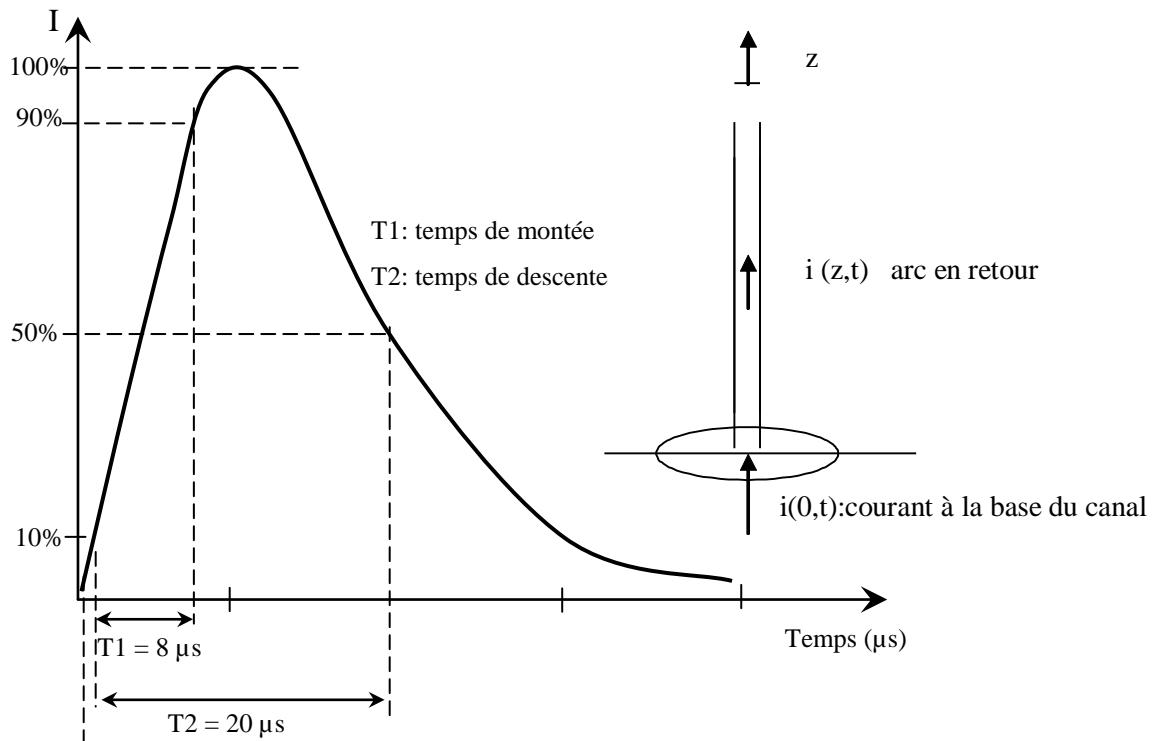


Figure 16. Onde de courant.

Puis, plus récemment F. Heideler a proposé une nouvelle expression analytique :

$$i(0,t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (9)$$

Où :

$$\eta = \exp\left(-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^n \sqrt{n \frac{\tau_2}{\tau_1}}\right) \quad (10)$$

Avec :

$I_0$  : l'amplitude du courant à la base du canal ;

$\tau_1$  : la constante de temps de front ;

$\tau_2$  : la constante de décroissance ;

$\eta$  : facteur de correction de l'amplitude ;

$N = 2 \div 10$ .

L'expression analytique de F. Heideler a été préférée à la fonction double exponentielle habituellement employée car elle a l'avantage de présenter une dérivée nulle pour  $t = 0$ , ce qui correspond aux observations expérimentales.

### *b/ Courant d'arc en retour*

Plusieurs modèles de distribution spatiotemporelle du courant d'arc en retour ont été développés durant ces dernières années.

Les modèles les plus cités sont :

- Le modèle de Bruce et Gold (BG);
- Le modèle Transmission Line (TL) ;
- Le modèle Travelling Current Source (TCS);
- Le modèle de Diendorfer et Uman (DU);
- Modèle Modified Transmission Line (MTL).

Ce dernier modèle, conduit à des résultats très concordants avec la mesure, il est le plus utilisé pour la modélisation de l'arc en retour ; il suppose que l'intensité du courant de foudre décroît exponentiellement pendant sa propagation, ce qui s'exprime mathématiquement par la relation :

$$i(z,t) = i(0,t - \frac{z}{v}) \exp(-\frac{z}{\lambda}) u(t - \frac{z}{v}) \quad (11)$$

$\lambda$  : constante de décroissance qui décrit la réduction de l'amplitude du courant avec la hauteur ;

$v$  : la vitesse de l'arc en retour (de l'ordre de 1/3 de la vitesse de la lumière) ;

$u$  : la fonction échelon.

## **V.2. Méthodes numériques pour l'analyse des transitoires**

Dans la littérature plusieurs méthodes numériques sont proposées pour l'analyse des surtensions transitoires dans le réseau électrique :

- les ondes mobiles,
- la théorie des réseaux,
- résolution numériques des équations des lignes,
- .....

Un exposé plus détaillé est proposé dans le cours intitulé : transitoires dans les réseaux électriques (S3 du M2.).

### **Exemple de surtension de manœuvre**

Un exemple d'étude d'enclenchement des bancs de condensateurs est présenté sur la figure 17. Le réseau électrique est en général assez vaste et comprend un grand nombre d'appareils et de systèmes, mais dans la plupart des études sur les transitoires, il est suffisant de représenter de façon détaillée une section réduite du réseau et d'employer un équivalent pour le reste du réseau.

Dans le cas de la figure 17, l'équivalent est calculé selon les besoins de l'étude. Le choix des modèles est relié au type de problème étudié et à son contenu fréquentiel. Dans cet exemple, on utilise une source idéale derrière une impédance de Thévenin, car il n'est pas nécessaire de représenter une machine synchrone dans les détails, ni les autres conducteurs du réseau. L'approche classique qui permet de calculer les impédances de Thévenin est d'utiliser un logiciel de calcul des courts-circuits. Ce type de logiciel permet d'obtenir les impédances de séquence positive (ou directe) ( $Z_1$ ) et homopolaire ( $Z_0$ ) à un point donné du réseau. On peut améliorer l'équivalent de Thévenin en tenant mieux compte du comportement fréquentiel du réseau équivalent. Dans cet exemple, on ajoute la résistance  $R_{Th}$  et le condensateur  $C_r$ .

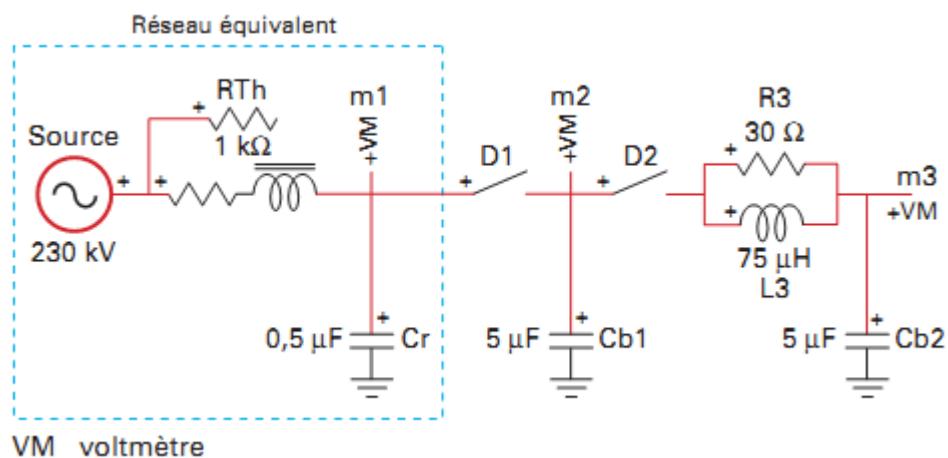


Figure 17. Exemple de modélisation pour l'enclenchement des bancs de condensateur, schéma unifilaire d'un circuit triphasé.

Dans d'autres cas, il faut aussi modéliser la ligne de transport qui connecte le poste étudié au reste du réseau. Le réseau est en général équilibré, ce qui fait que les impédances de séquence positive et négative (ou inverse) sont identiques, mais les études de transitoires doivent tenir compte des conditions de déséquilibre. Il faut noter que même si la figure 17 simplifie la présentation en utilisant un schéma unifilaire, les phases des disjoncteurs ne fonctionnent pas nécessairement aux mêmes instants, notamment pour la commande d'ouverture.

L'onde de tension au capteur  $m_1$  pour la phase c du circuit de la figure 17 est présentée figure 18. Le réseau de 230 kV est initialement au repos. Un premier régime transitoire est initié à 175 ms par la fermeture de  $D_1$  et un deuxième à 225 ms par la fermeture de  $D_2$ . Le système retourne au repos (régime permanent) vers 275 ms, mais à une tension d'exploitation légèrement supérieure à la tension initiale.

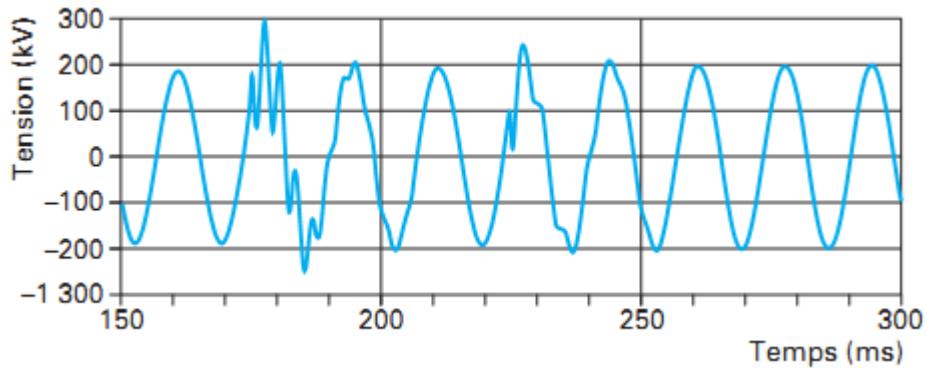


Figure 18. Exemple de comportement transitoire, mesure de tension au capteur m1, phase c.

## **VII- Protection contre la foudre**

De graves avaries de matériels électriques propres aux postes aériens du réseau électrique et électroniques connectés peuvent se produire au cours d'orages, lorsque la foudre atteint une ligne aérienne ou le sol dans le voisinage immédiat de l'installation à protéger ou encore une antenne radio placée sur le toit d'un bâtiment.

### **VI.1. Les moyens de protection contre la foudre**

La protection en général est d'autant meilleure qu'un écoulement maximal des perturbations vers la terre est assuré le plus près possible des sources de perturbations.

#### **VI.1.1. Protection primaire**

Son but est de limiter les impacts directs sur les ouvrages électriques en détournant la foudre vers des lieux d'écoulement privilégiés. Le détournement de la foudre de façon contrôlée vers des points précis se fait au moyen de paratonnerres et de câbles de garde.

#### **VI.1.2. Protection secondaire**

Son principe est de créer un circuit de dérivation à la terre, permettant ainsi l'écoulement du courant de foudre, par amorçage ou conduction. Deux types d'appareils sont utilisés pour limiter la tension : l'éclateur, plus ancien, et le parafoudre qui tend à le supplanter dans de nombreuses applications.

## **VI.2. Protection du réseau de transport d'énergie contre la foudre**

### **VI.2.1. Protection par câble de garde**

La protection contre l'impact direct de la foudre sur le réseau de transport d'énergie est réalisée par un câble de garde (figure 19) pour les lignes aériennes, par un filet de garde aérien auquel est relié, par des fils de descentes métalliques, une grille de mise à la terre pour les postes aériens.

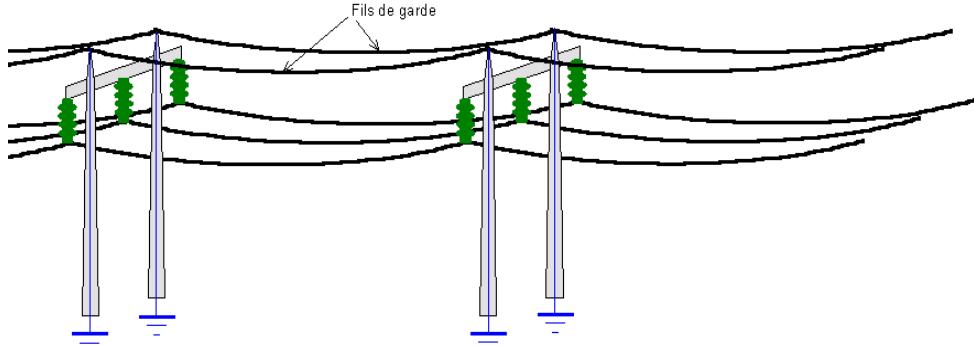


Figure 19. Protection des lignes aériennes par câbles de garde.

#### - *Principe du câble de garde*

Le câble de garde est initialement prévu pour prévenir l'impact direct du coup de foudre sur les lignes de transport d'énergie. Son positionnement est réalisé sur la base d'un modèle dit électrogéométrique (figure 20). La zone de capture du câble de garde est d'autant plus étendue que le coup de foudre est intense. En utilisant le modèle électrogéométrique, la position du câble de garde est choisie en fonction des contraintes mécaniques et du design du pylône. Cette position est définie par l'intersection de l'axe de symétrie du pylône et d'un arc de cercle (figure 20). Généralement le point d'intersection est sur le sommet du pylône et un seul câble de garde est utilisé. Dans certains cas, deux câbles de garde sont nécessaires.

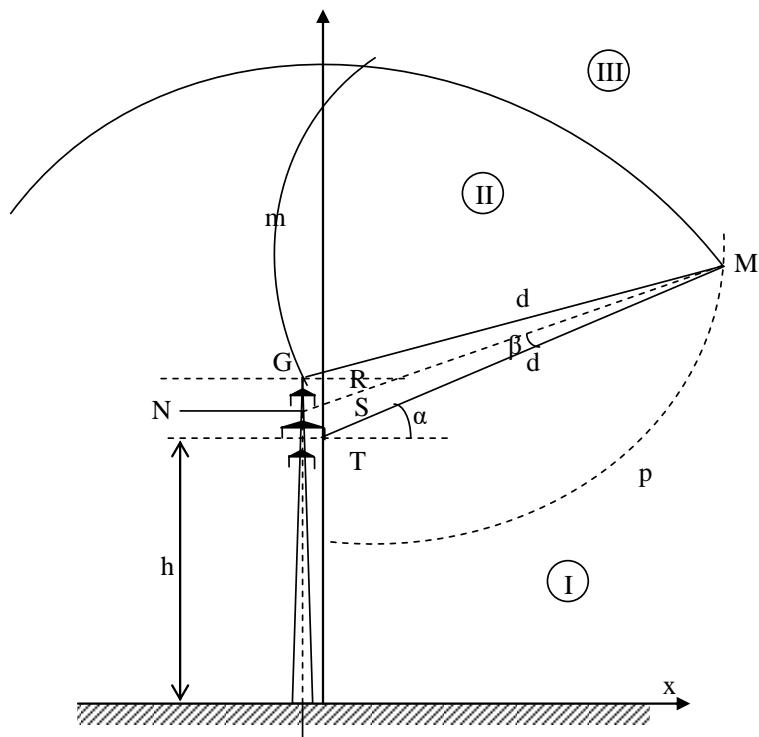


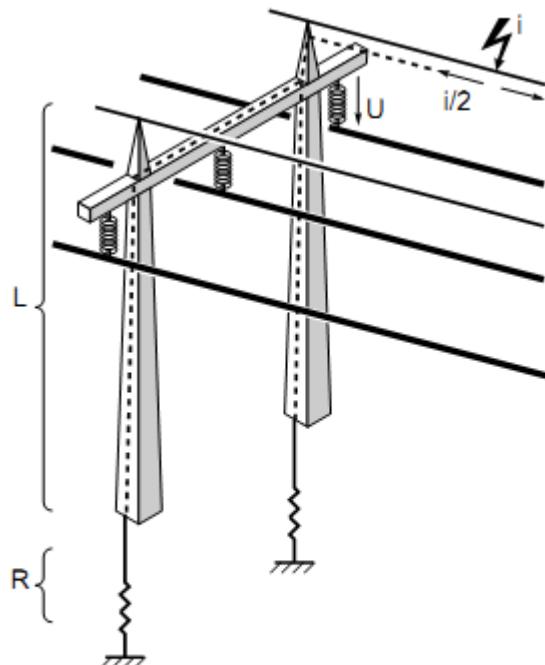
Figure 20. Modèle électrogéométrique de la foudre.

Si la foudre tombe sur le pylône ou le câble de garde, l'écoulement du courant provoque l'augmentation du potentiel de la masse métallique par rapport à la terre (figure 21). La surtension U correspondante peut atteindre plusieurs centaines de kV.

$$U = R \cdot \frac{i}{2} + \frac{L}{2} \cdot \frac{di}{dt} \quad (12)$$

avec R, résistance en onde raide de la prise de terre et L, l'inductance du pylône et/ou du conducteur de mise à la terre.

Lorsque cette tension atteint la tension d'amorçage d'un isolateur, il se produit un «amorçage en retour» entre la structure métallique et un ou des conducteurs actifs. Pour les tensions de réseau supérieures à 150 kV, cet amorçage en retour est peu probable. La qualité de la prise de terre des pylônes joue un rôle important. A partir de 750 kV, il n'y a pratiquement plus aucun risque d'amorçage en retour, ce qui justifie l'installation de câbles de garde sur les lignes à THT. En dessous de 90 kV, ces câbles ne constituent une protection efficace que si la prise de terre des pylônes est excellente.



$$U = R \cdot \frac{i}{2} + \frac{L}{2} \cdot \frac{di}{dt}$$

Figure 21 : lorsque la foudre tombe sur le câble de garde, l'écoulement du courant provoque l'augmentation du potentiel de la masse métallique du pylône par rapport à la terre.

## VI.2.2. Les parafoudres

Le parafoudre est un dispositif installé dans les réseaux électriques pour la protection contre les surtensions transitoires et la limitation de la durée et de l'amplitude des courants de suite, dus à l'amorçage.

### VI.2.2.1. Type de parafoudre

Plusieurs technologies de parafoudre sont disponibles ainsi. Les parafoudres peuvent comporter différentes composantes internes (figure 22):

- Les éclateurs ;
- Les varistances ;
- Les diodes d'écrêtage.

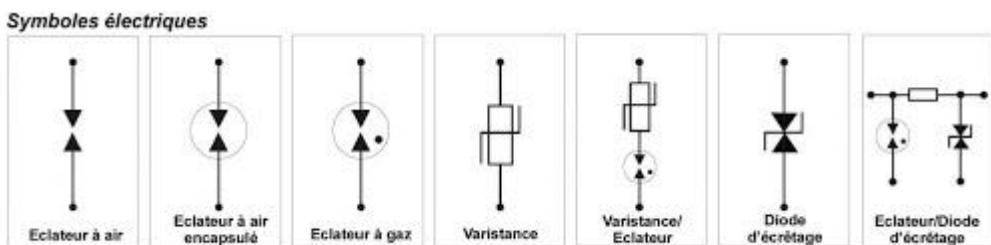


Figure 22. Symboles électriques des parafoudres.

Ces composants ont pour but de limiter rapidement les tensions apparaissant à leurs bornes; cette fonction est obtenue par modification brutale de leur impédance à un seuil de tension déterminé.

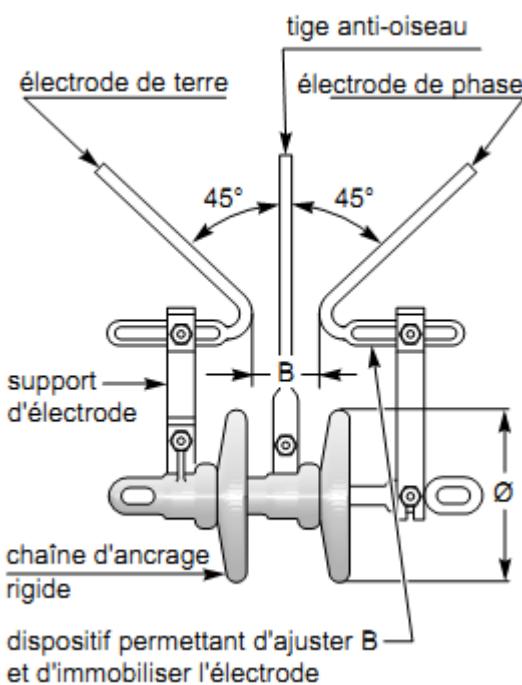


Figure 23. Eclateur MT avec tige anti-oiseaux.

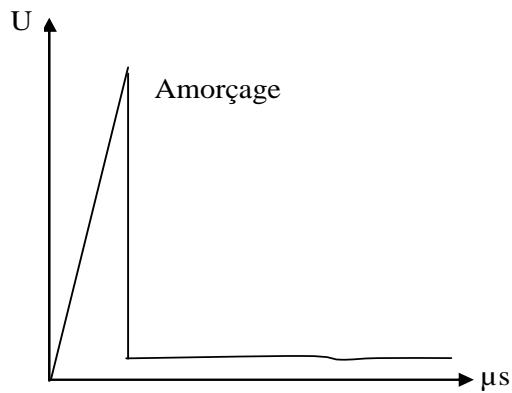


Figure 24. Amorçage par un éclateur.

Deux comportements sont possibles

- **Amorçage** : le composant passe de l'état de très haute impédance au quasi court-circuit, c'est le cas des éclateurs (figure 23). Un éclateur est un dispositif électrique utilisé pour limiter les surtensions (fonction de parasurtenseur) et réaliser des courts-circuits ultra-rapides par un arc électrique provoqué par l'ionisation d'un gaz (figure 24). Les éclateurs sont constitués de deux électrodes face à face dans un milieu qui peut être l'air ambiant (éclateur à air), de l'air ou dans un milieu clos (à air encapsulé) ou du gaz (éclateurs à gaz).

- **Écrêtage** (parafoudre figure 25): après un seuil de tension déterminé, le composant passant en faible impédance, limite la tension à ses bornes, c'est le cas des varistances et diodes d'écrêtage (figure 26).

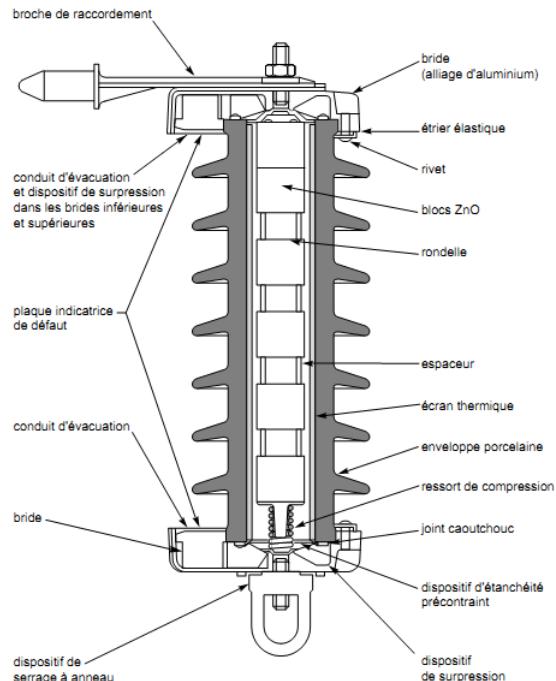


Figure 25 : exemple de structure d'un parafoudre ZnO en enveloppe porcelaine pour le réseau

20 kV.

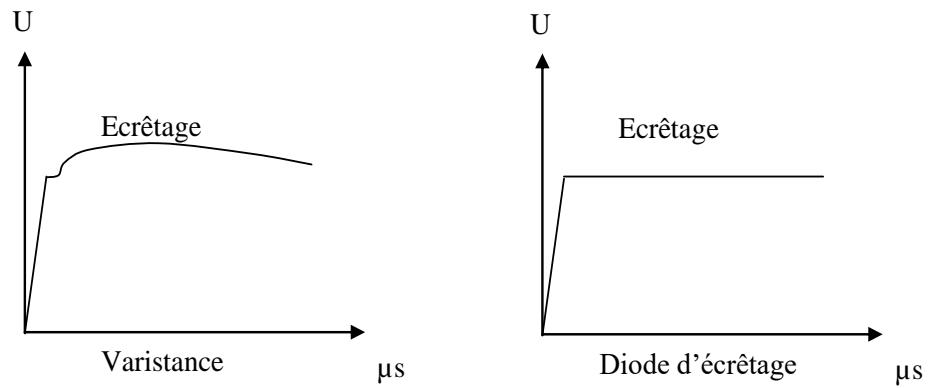


Figure 26. Ecrêtage par une varistance ou une diode d'écrêtage.

[1] DOMMEL (H.W.). – EMTP Theory Book. Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, British Columbia, avr. 1996.