

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 68 (1977)

**Heft:** 24

**Artikel:** Coordination Probabilistique de l'Isolement des Réseaux Electriques à Haute Tension

**Autor:** Aguet, M. / Blech, P. / Ianovici, M.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915096>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 20.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Coordination Probabilistique de l'Isolément des Réseaux Electriques à Haute Tension

Par M. Aguet, Ph. Blech et M. Ianovici

621.311.1:621.315.6:62-192;

Sur la base de données statistiques sur la foudre, l'article présente une méthode probabilistique de coordination de l'isolément des réseaux électriques à haute tension. La méthode tient compte des phénomènes d'amortissements, de déformation et d'écrêtages des surtensions, ainsi que des décharges disruptives irréversibles. L'application pratique d'une telle méthode montre des possibilités d'augmenter la fiabilité des réseaux électriques au moyen de dispositions constructives et d'exploitation.

Auf Grund von statistischen Angaben über Blitzenladungen wird eine probabilistische Methode zur Koordinierung der Isolationen in elektrischen Hochspannungsnetzen dargestellt. Die Methode berücksichtigt die Dämpfung, die Verformung und die Begrenzung der Überspannungen, ebenso die zerstörenden Entladungen. Mittels dieser Methode können Möglichkeiten aufgezeigt werden, elektrische Netze durch konstruktive und betriebliche Massnahmen betriebssicherer zu gestalten.

## 1. Introduction

La coordination de l'isolément est définie comme l'ensemble des dispositions prises dans un réseau électrique haute tension en vue d'éviter que des décharges disruptives d'isolations internes non autorégénérables aient lieu. Dans les cas où des décharges disruptives sont inévitables, on s'arrangera à localiser les amorçages d'arcs en des points où ils ne peuvent pas causer de dégâts. La coordination des isoléments est donc basée sur une corrélation entre les probabilités de surtensions dans le réseau en tenant compte des organes écrêteurs et celles des conditions de tenue des isolations internes non-auto-régénératrices du matériel électrique [1]<sup>1)</sup>. Les surtensions se manifestent par des phénomènes temporaires (quelques s à quelques h) et transitoires (ns à quelques s).

Les surtensions temporaires peuvent être dues p.ex. à un défaut monophasé à la terre, une ferorésonance [2] ou à l'influence entre lignes de tensions différentes. Comme surtensions transitoires, on distingue d'une part les surtensions internes ayant pour origine connue des manœuvres dans le réseau, d'autre part les surtensions externes qui ont pour cause des charges statiques (nuages orageux), des coups de foudre ou des explosions nucléaires (NEMP).

Dans l'étude de réseaux moyenne tension (1 à 34 kV) et haute tension (35 à 275 kV) on peut se borner à ne prendre en compte que les effets des surtensions dues à la foudre, ce qui n'est pas le cas pour des réseaux à très et ultra-haute tension où les surtensions de manœuvre deviennent relativement très importantes.

La méthode probabilistique de coordination des isoléments présentée pour le cas des surtensions de foudre peut être facilement appliquée à tout autre type de surtensions transitoires. Elle permet un meilleur choix technico-économique d'une politique de coordination de l'isolément en tenant compte de la durée de vie prévue pour le réseau. Ce choix aura lieu sur la base du niveau de fiabilité désiré pour le transport de l'énergie électrique (valeur du kWh perdu), ainsi que de la valeur de remplacement du matériel endommagé.

## 2. Statistique des courants de foudre

Afin d'établir la statistique des surtensions dues à la foudre dans un réseau électrique, il est nécessaire de connaître les paramètres fondamentaux de la foudre dans la région concernée.

La statistique des coups de foudre en ligne est obtenue en partant du coefficient céraunique  $N_c$  des statistiques météoro-

logiques correspondant au nombre de jours orageux par année en un lieu d'observation donné (fig. 1); le jour orageux étant défini comme un jour pendant lequel un coup de tonnerre au moins peut être entendu en un lieu d'observation donné. Malheureusement cette notion est particulièrement subjective et ne prend un caractère scientifique que lorsqu'elle est vérifiée par des mesures effectuées au moyen de compteurs de coups de foudre [4].

Une formule expérimentale permet de déterminer le nombre de coups de foudre par km<sup>2</sup> et par année [5]. On a établi, également par une méthode statistique, une relation liant  $N_c$  avec le nombre de coups de foudre touchant une ligne haute tension par km de longueur et par année  $N_m$  [6]

$$N_m = N_c \cdot h^{0,53}/400 \quad (2.1)$$

où  $h(m)$  est la hauteur moyenne des pylônes. Pour une ligne 220 kV dans la région lausannoise, avec  $N_c = 32$  et  $h = 30$  m, cette formule donne  $N_m \cong 0,5$  (km an)<sup>-1</sup>.

En ce qui concerne la statistique des courants de foudre, on adopte l'hypothèse de l'onde de choc de courant de foudre imposé [7; 8]. Les paramètres principaux des courants de foudre mesurés sont présentés au tableau I. Sur la base d'informations complémentaires recueillies dans les réseaux électriques, les histogrammes d'amplitude (fig. 2) et de temps de montée (fig. 3) des courants de foudre négatifs ( $\approx 80\%$  des cas) et positifs ( $\approx 20\%$  des cas) superposés ont été établis [9]. Il est à remarquer que les statistiques des courants de foudre sont limitées et ponctuelles et qu'il est d'un très grand intérêt de multiplier les mesures au moyen d'installations mobiles de déclenchement de la foudre.

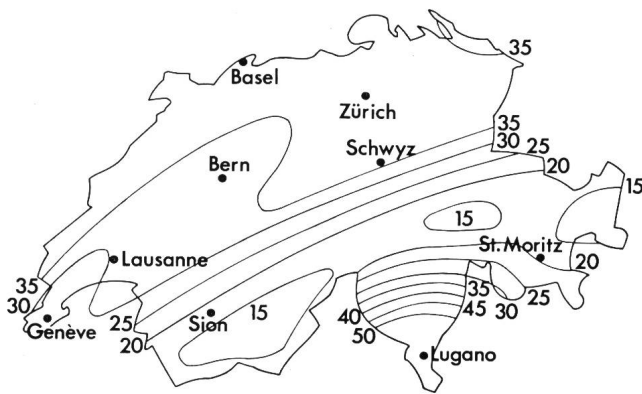


Fig. 1 Courbes isocérauniques de la Suisse

Les chiffres indiquent le nombre de jours de l'année où l'on a observé des orages proches ou lointains. Moyenne des années 1901-1960 [3]

<sup>1)</sup> Voir la bibliographie à la fin de l'article.

Valeurs caractéristiques mesurées	Polarité positive		Polarité négative	
	Valeurs moyennes	1% des cas	Valeurs moyennes	1% des cas
$\hat{I}$ (kA)	26	315	-26	-160
$\frac{di}{dt}$ (kA/ $\mu$ s)	2	10	-30	-100
$Q = \int_{t_i}^{t_f} i dt$ (C)	60	$qlq \cdot 10^3$	-5,8	-157
$\int_{t_i}^{t_f} i^2 dt$ ( $A^2 \cdot s$ )	$400 \cdot 10^3$	$qlq \cdot 10 \cdot 10^6$	$33 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^6$

$t_i, t_f$  temps initial, respectivement final des phénomènes enregistrés lors d'un seul coup de foudre

### 3. Moyens de protection contre les surtensions

#### 3.1 Action au point d'impact

La présence d'un câble de garde permet de réduire dans une proportion notable la probabilité d'apparition d'une onde de foudre sur une ligne [6]. Néanmoins, beaucoup de lignes en sont dépourvues ou, si elles en sont munies, l'impédance ( $R, L$ ) de mise à terre des pylônes auxquels ces câbles de garde sont reliés, est suffisamment grande pour provoquer lors de l'écoulement du courant de foudre à la terre une montée en tension des têtes de pylônes provoquant un contournement des chaînes d'isolateurs par un arc dit «en retour».

Dans tous les cas, la valeur de crête et la durée de la tension de foudre dans une phase de la ligne sont donc déterminés par les caractéristiques d'amorçage des chaînes d'isolateurs en lignes et des intervalles d'air entre phases. Ces éléments ont une courbe caractéristique «tension d'amorçage» en fonction du «temps de retard à l'amorçage» qu'on détermine par des mesures en onde de choc [10]. La fig. 4 montre comment on détermine, à partir de ces courbes pour une ligne donnée, la valeur de l'amplitude, du temps de montée et de la durée de l'onde de tension sur la ligne, connaissant la valeur de l'amplitude et du temps de montée de l'onde de foudre avant la coupure par une chaîne d'isolateurs.

#### 3.2 Amortissement et déformation pendant la propagation

Toute onde de courant se propageant dans une ligne électrique provoque une onde de tension dépendant de l'impédance caractéristique. Ces ondes de tension s'amortissent et se dé-

forment en fonction des valeurs linéiques des constantes de cette ligne [11]. Ces valeurs que l'on peut calculer à l'ordinateur en régime nominal [12] subissent des variations lors de chocs de foudre dus à l'effet couronne et à l'effet pelliculaire.

*Effet couronne:* Un conducteur soumis à une tension supérieure à sa tension critique s'entoure d'une gaine chargée appelée zone de charges d'espace de telle sorte que le champ électrique à la surface de cette gaine soit limité à la valeur du champ disruptif dans l'air. La présence de cette gaine chargée entourant le conducteur a pour conséquence d'augmenter le diamètre apparent de celui-ci et par là même d'augmenter sa capacité par rapport au sol et par rapport aux autres conducteurs. L'augmentation du courant de conduction transversal reste négligeable étant donné la faible énergie mise en jeu pour ioniser la zone de charges d'espace [11].

Dans le schéma équivalent d'un élément de ligne (fig. 5), la capacité  $C'$  devient une fonction de la tension  $C' = f(u)$ , ce qui pose un problème pour le traitement par ordinateur au moyen du programme d'analyse des régimes transitoires à disposition qui n'accepte que des éléments linéaires [13]. Le problème a été résolu en découpant l'onde de tension en tranches d'amplitude  $\Delta U$  assez petites pour pouvoir y considérer la capacité constante. Celle-ci est calculée pour chaque échelon de tension. On traite ensuite séparément la propagation de chaque tranche, et le résultat final est donné par la somme des résultats partiels obtenus. La fig. 6 donne un exemple d'un tel calcul pour une ligne sans pertes. Les temps de propagations des ondes partielles augmentent en fonction de la tension de

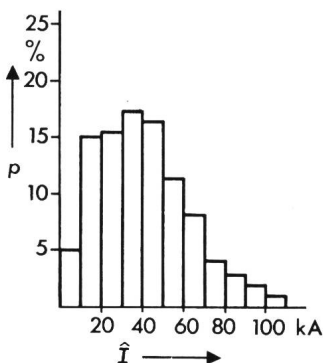


Fig. 2 Histogramme des amplitudes des courants de foudre

$p$  probabilité d'apparition  
 $\hat{I}$  valeur de crête du courant de foudre

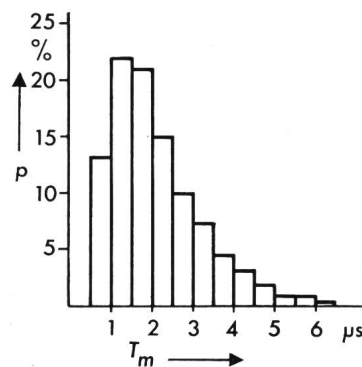


Fig. 3 Histogramme des temps de montée des courants de foudre

$p$  probabilité d'apparition  
 $T_m$  temps de montée

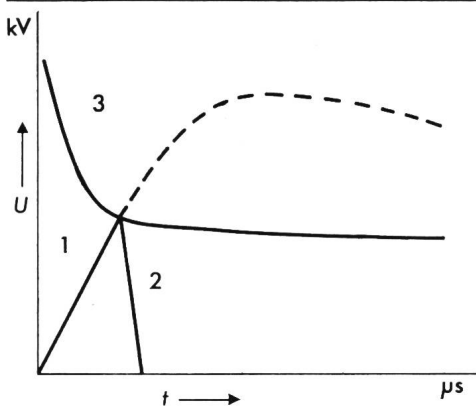


Fig. 4 Ecrêtage des ondes de tension de foudre par les chaînes d'isolateurs en ligne

- 1 onde de tension de foudre
- 2 queue de l'onde coupée
- 3 courbe de la tension d'amorçage en fonction du temps de retard à l'amorçage d'une chaîne d'isolateurs en ligne

telle sorte qu'après une certaine distance parcourue, le temps de montée de l'onde s'accroît considérablement ( $T_{m2} > T_{m1}$ ) provoquant une déformation favorable importante de l'onde.

**Effet pelliculaire:** On associe à une onde de choc une onde sinusoïdale dont la fréquence est telle qu'un quart de sa période représente le temps de montée de l'onde de choc (fig. 7). La fréquence associée  $f = 1/4 T_m$  détermine la profondeur de pénétration du courant de foudre dans le conducteur de la ligne. Celle-ci étant petite pour les fréquences en jeu (100 kHz à 1 MHz), l'inductance et la résistance longitudinales de la ligne augmentent considérablement [12] et par là même l'amortissement de l'onde et la déformation.

**Amortissement par le câble de garde:** Les lignes qui ne possèdent pas de câble de garde sur toute leur longueur en sont pour la plupart du temps munies dans les derniers kilomètres. En augmentant la capacité transversale, ce câble de garde renforce l'amortissement des ondes de foudre dans des proportions non négligeables. Le tableau II montre le résultat d'un calcul à l'ordinateur pour un réseau 220 kV.

### 3.3 Ecrêtage et limitation en durée des surtensions aux entrées des postes

Les organes de protection d'un poste haute tension doivent répondre aux trois exigences suivantes: permettre l'exploitation du réseau à tension maximale, amorcer pour permettre l'écoulement des surtensions à la terre et recouvrer leur pleine rigidité diélectrique après fonctionnement, éventuellement par déclenchement-réenclenchement de la ligne.

La construction des *parafoudres* est bien connue et permet dans une très large mesure de couvrir tous les besoins de la coordination de l'isolement des réseaux électriques. Néan-

#### Amortissement par le câble de garde

Tableau II

Courant de foudre (kA)	Temps de montée (μs)	Onde de tension					
		après la 1 <sup>re</sup> chaîne d'isolateurs		après 2 km de câble de garde		après 10 km de câble de garde	
		$U_{max}$ (MV)	$T_m$ (μs)	$U_{max}$ (MV)	$T_m$ (μs)	$U_{max}$ (MV)	$T_m$ (μs)
100	0,5	2,6	0,3	2,2	1,7	1,2	3,7

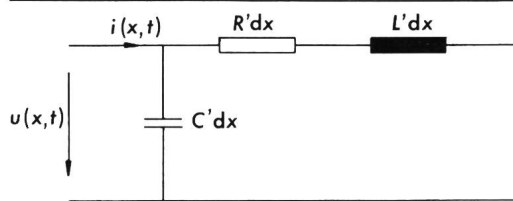


Fig. 5 Schéma équivalent d'un élément de ligne

$R', L', C'$  résistance, inductance et capacité linéiques  
 $i(x, t); u(x, t)$   
valeurs instantanées du courant et de la tension

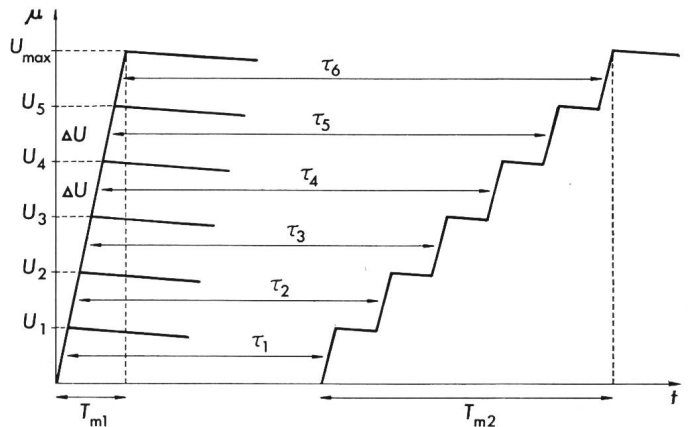


Fig. 6 Calcul de l'amortissement et de la déformation d'une onde de tension par découpage en échelons de tension

$T_{m1}$  temps de montée initial  
 $T_{m2}$  temps de montée final  
 $\tau_{1,2,...}$  temps de propagation de chaque échelon de tension  
 $\Delta U$  échelon de tension

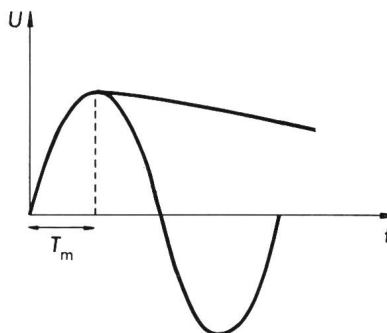


Fig. 7 Onde sinusoïdale associée à une onde de choc

$T_m$  temps de montée de l'onde de choc

moins, ils entrent pour une part non négligeable dans le coût de ces réseaux et de plus, peuvent être sujet à destruction lors de courants dépassant leur pouvoir d'écoulement nominal.

L'*éclateur* est dans son principe constitué d'un intervalle d'air séparant deux électrodes, l'une au potentiel de la ligne et l'autre à la terre. Le réglage de la distance d'amorçage résulte d'un compromis entre la valeur permettant une exploitation normale du réseau à fréquence industrielle (valeur minimale) et celle assurant une bonne protection des isolations internes des postes de couplage (valeur maximale). De cas en cas, on détermine cette distance par un essai de tenue à 50 Hz de l'éclateur. Pour éviter d'introduire des perturbations électromagnétiques par effet couronne, l'électrode haute tension de l'éclateur est de préférence un anneau de garde. L'électrode mise à la terre doit, quant à elle, permettre un soufflage efficace de l'arc de puissance amorcé par le contournement de l'éclateur et est de préférence une corne (fig. 8).

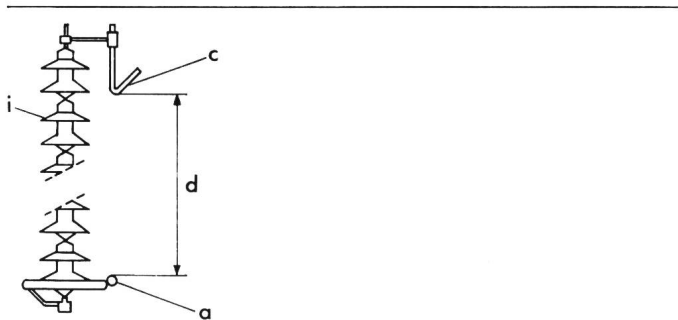


Fig. 8 Chaîne d'isolateurs munie d'un éclateur de protection corne-anneau

- a anneau au potentiel
- c corne mise à la terre
- i chaîne d'isolateurs
- d distance d'éclatement

Pour introduire l'action de l'éclateur dans le calcul, il est nécessaire de déterminer par des essais systématiques en choc sa courbe «tension d'amorçage-temps de retard à l'amorçage» (fig. 4). Les essais peuvent être faits uniquement pour des polarités négatives, les ondes de tension négatives étant les plus fréquentes et les plus dangereuses [6].

La courbe d'amorçage de l'organe de protection et l'onde de choc normalisée  $1,2/50 \mu s$  utilisée pour l'essai de tenue au choc déterminent des zones de protection et de claquage qui servent de base au calcul probabilistique.

#### 4. Comportement des isolations internes aux ondes de choc

Les isolations internes de l'appareillage soumis aux ondes de choc sont en général non auto-régénératrices (système huile-papier d'une traversée, d'un transformateur ou d'un câble) et le claquage de telles isolations a pour résultat un dommage permanent. Les transformateurs de puissance qui représentent l'appareillage le plus important à protéger dans les postes des réseaux HT sont, en règle générale, essayés à l'onde de choc  $1,2/50 \mu s$  et à des tensions de crête qui ne dépassent pas les valeurs auxquelles l'isolation doit tenir en choc (par exemple 1050 kV pour des réseaux de 220 kV).

Pour définir la protection des transformateurs d'un réseau HT, on peut parler de plusieurs zones dans le plan «tension-temps» (fig. 9), zones délimitées d'une part par la valeur de la tension de tenue au choc en onde  $1,2/50 \mu s$  de tout l'appareillage équipant le réseau, en particulier des transformateurs de puissance et d'autre part par la courbe d'amorçage de l'organe de protection du poste, courbe obtenue par des essais. Ces deux courbes ne sont pas affectées par la notion de probabilité; la valeur de crête de l'onde de choc normalisée ( $\hat{U}_s$ ) est une fonction bien déterminée du niveau de tension du réseau, tandis que la courbe d'amorçage est aussi une constante pour un type de protection choisi.

**Zone I:** zone de protection absolue du transformateur. Toute onde de choc ayant une pente telle qu'elle arrive dans cette zone et dont la valeur de crête est supérieure à la courbe (7) de la fig. 9 sera écrêtée par l'organe de protection à une valeur inférieure à la valeur dangereuse pour le transformateur (p.ex. l'onde (1)).

**Zone II:** zone de claquage du transformateur. Théoriquement cette zone est comprise entre l'ordonnée  $\hat{U}_s$  et la droite  $(du/dt)_{lim}$ . Cependant les valeurs statistiquement significatives

des amplitudes (minimum 5 kA) et des pentes des ondes de foudre (max.  $6,25 \mu s$ ) permettent de définir une limite inférieure des tensions de crête de foudre,  $\hat{U}_{lim}$ , pour chaque réseau étudié. Cette valeur doit être prise comme limite inférieure de la zone II, car il n'est pas possible de déterminer la limite de claquage réelle des transformateurs. En effet, le comportement des isolations internes soumises aux ondes de choc est mal connu et la complexité des isolations composites entrant dans la fabrication des transformateurs ne permet pas de se contenter d'études théoriques, ni d'extrapoler des résultats obtenus sur différents types de matériaux isolants à l'ensemble de l'isolation d'un appareil.

Pour l'étude de la coordination de l'isolement d'un réseau de 220 kV, sur lequel la méthode probabilistique a été appliquée,  $\hat{U}_{lim} \cong 1500$  kV. Dans les calculs, on a admis que toutes les ondes de foudre qui se situent dans la zone II donnent lieu à un défaut (p.ex. l'onde (3), fig. 9).

#### 5. Calcul probabilistique de l'effet des ondes de choc

##### 5.1 Principe de la méthode

Sur la base des zones définies dans la fig. 9, on voit que la possibilité de claquage des isolations internes dépend de deux paramètres: de la valeur de crête de la tension du phénomène de choc et de la pente de l'onde de choc. Les courbes de probabilité de surtensions proposées par différents auteurs pour traiter d'une manière statistique les phénomènes en choc [14; 15] deviennent de ce fait des surfaces définies à partir du plan  $\hat{U}$  et  $du/dt$ .

On aura ainsi les surfaces  $p_i$  probabilités d'apparition des surtensions (fig. 10) et, par déduction,  $p_x$ -probabilités de surtensions en un point  $x$  du réseau (fig. 11). Cette dernière est établie en faisant intervenir la propagation d'ondes sur les conducteurs de phase. La probabilité de défaillance  $p_d(\hat{U}, du/dt)$  est donnée par l'intersection de la surface  $p_x$  avec un dièdre défini par deux demi-plans  $\hat{U} = \hat{U}_{lim}$  et  $du/dt = (du/dt)_{lim}$ , valeurs qui dans la fig. 9 déterminent la zone II.

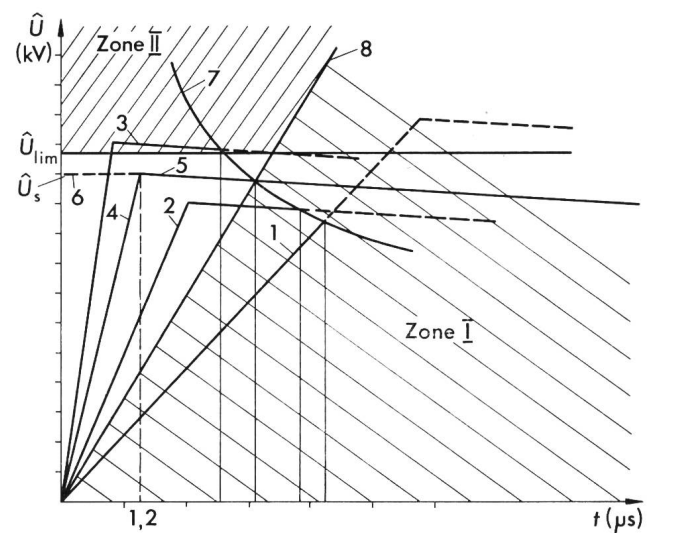


Fig. 9 Zones de protection des transformateurs

- $\hat{U}$  tension de crête
- $t$  temps
- 1, 2, 3 différentes ondes de choc
- 4, 5 droites qui schématisent l'onde de choc  $1,2/50 \mu s$
- 6 niveau de tenue au choc du transformateur
- 7 courbe d'amorçage de l'éclateur
- 8 droite  $(du/dt)_{lim}$

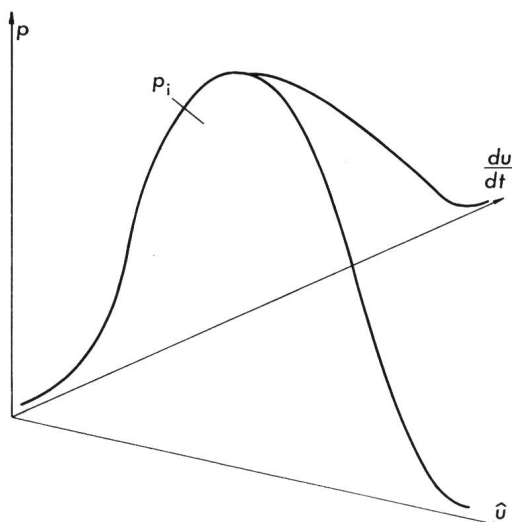


Fig. 10 Probabilité d'apparition des surtensions

$p_i$  surface des probabilités des surtensions  
 $\hat{U}$  valeur de crête de la tension  
 $(du/dt)$  pente de l'onde de choc

Le risque de défaillance se calcule alors en intégrant la probabilité de défaillance  $p_d$  entre les limites  $\hat{U}_{lim}$  à l'infini et  $(du/dt)_{lim}$  à l'infini, c'est-à-dire

$$r_d = \int_{\hat{U}_{lim}}^{\infty} \int_{(du/dt)_{lim}}^{\infty} p_d(\hat{U}, du/dt) d\hat{U} d(du/dt) \quad (5.1)$$

Pour résoudre cette intégrale, il faudrait en partant des données statistiques connues sur les courants de foudre, discrétiser les surfaces  $p_i$  et  $p_x$  et étudier tous les cas possibles de foudroiement. Cela reviendrait, par une simulation à l'ordinateur, à envoyer sur une ligne à des intervalles réguliers, p.ex. tous les km, des coups de foudre dont les caractéristiques seraient des combinaisons de toutes les amplitudes et de tous les temps de montée possibles, à en étudier la propagation sur le réseau, à tenir compte de l'écrêtage et à observer la surtension aux bornes des transformateurs. Cette méthode, si elle a l'avantage d'être systématique, est très lourde et nécessiterait un temps de calcul très important, car plusieurs milliers de cas seraient à envisager pour un seul poste de couplage.

Il est donc nécessaire d'envisager une autre approche qui, tout en réduisant le temps de calcul, fournisse des résultats convaincants.

### 5.2 Calcul probabilistique du risque de défaillance

Pour réduire le temps de calcul il est nécessaire de choisir parmi tous les cas possibles de foudroiement un échantillonnage limité, mais assez représentatif pour assurer une bonne précision. Cela revient à remplacer les surfaces discrétisées de probabilités  $p_i$  et  $p_x$  par des mailles moins denses couvrant toute la surface, ce qui peut être réalisé à l'aide de la méthode de Monte-Carlo [9; 16; 17; 18] adaptée à l'ordinateur. Par cette méthode on choisit, d'une façon aléatoire mais avec un poids fonction de la possibilité d'apparition donnée par les statistiques, les valeurs d'amplitude, de temps de montée et de point d'impact d'un coup de foudre sur une ligne. Une fois une telle combinaison de paramètres d'un coup de foudre créée, on la

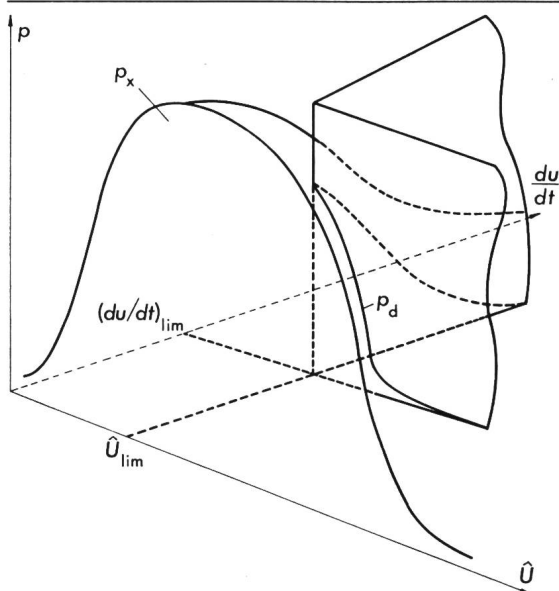


Fig. 11 Détermination de la probabilité de défaillance

$p_x$  surface des probabilités de surtensions en un point  $x$  du réseau  
 $\hat{U}_{lim}; (du/dt)_{lim}$  limites de la zone II de la fig. 9

fait tomber sur un conducteur de phase de la ligne, et à l'aide de l'ordinateur on étudie les points suivants:

1. Possibilité d'amorçage de la chaîne d'isolateurs la plus proche du point d'impact en utilisant la courbe d'amorçage des types de chaînes d'isolateurs qui équipent la ligne. La courbe mesurée expérimentalement est introduite sous forme mathématique par une équation de la forme

$$\hat{U} = A + B/t^n \quad (5.2)$$

où  $A$ ,  $B$  et  $n$  sont des coefficients déterminés par essais ou par régression polynomiale, par la méthode des moindres carrés, à partir de la courbe mesurée. Si l'amorçage n'a pas lieu, une onde pleine se propagera sur la ligne en direction du poste qu'on étudie, tandis que dans le cas contraire il y aura propagation d'une onde coupée.

2. Propagation de l'onde pleine ou coupée le long de la ligne avec amortissement et déformation, en tenant compte de la théorie développée. Ce calcul de propagation se fait en utilisant la méthode de calcul des ondes mobiles, basée sur la méthode de Bergeron [7; 13].

3. Amorçage ou non-amorçage des organes de protection à l'entrée du poste HT (parafoudres, éclateurs) en fonction de la valeur de crête et du temps de montée de l'onde amortie et déformée arrivant sur l'organe de protection et de la courbe «tension d'amorçage-temps de retard à l'amorçage» déterminée expérimentalement pour chaque type de parafoudre ou d'éclateur.

4. Effets de l'onde coupée ou pleine sur l'appareillage existant dans le poste. A l'aide du diagramme de la fig. 9, on détermine en fonction de la zone où se situe l'onde qui arrive dans le poste, s'il y a ou non un risque de claquage pour chaque coup de foudre tombant sur la ligne.

Pour un poste donné, cette procédure est répétée par l'ordinateur  $N_m \times L \times N_L \times N_A$  fois, où  $N_m$  est le nombre moyen de coups de foudre touchant une ligne par km et par an,  $L$  la longueur de la ligne (km),  $N_L$  le nombre de lignes arrivant dans

le poste considéré et  $N_A$  le nombre d'années (au moins 5 pour avoir un résultat valable du point de vue probabilistique). L'organigramme général du paquet de programmes COORD mis au point pour effectuer cette étude de coordination de l'isolement est montré dans la fig. 12.

### 5.3 Résultats d'un calcul probabilistique

A titre d'exemple, nous donnons les résultats obtenus pour un poste de couplage d'un réseau 220 kV équipé de deux transformateurs où arrivent 5 lignes HT et qui est protégé uniquement par des éclateurs montés sur chaque ligne à l'entrée du poste. Le niveau céraunique de la région était  $N_C = 30$ . Les longueurs des lignes étaient comprises entre 75 km et 160 km, ce qui a donné en utilisant la formule (2.1) des nombres probables de coups de foudre par année sur les lignes compris entre 32 et 68, respectivement pour la ligne la plus courte et la plus longue. Une des lignes étant équipée d'un câble de garde sur toute sa longueur, on a admis, que le risque de foudroie-ment était diminué de 50 fois [6], ce qui a donné 1 coup de foudre probable sur cette ligne chaque année.

En considérant un certain nombre de couplages possibles et en faisant le calcul probabilistique sur 5 ans pour chaque couplage, on constate que:

- lorsque toutes les lignes sont connectées, la tension aux bornes du transformateur est inférieure de 22 % à la tension que laisse passer l'éclateur. Le temps de montée est le même.
- lorsque deux lignes sont couplées, la tension aux bornes du transformateur est la même que la tension à l'éclateur et le temps de montée est toujours le même.
- lorsqu'une seule ligne est couplée, la tension aux bornes du transformateur est supérieure de 7 % à la tension à l'éclateur. Puis elle oscille avec un faible amortissement à la fréquence d'environ 1,2 MHz.

Enfin on constate que quand un ou deux transformateurs sont couplés, les tensions sont sensiblement égales. Les trois cas étudiés sont résumés dans le tableau III. Les résultats montrent l'importance du couplage du poste. Les surtensions n'atteignent des valeurs dangereuses dans le poste que lors-

Risque de défauts par année dans un poste d'un réseau 220 kV

Tableau III

Cas	Nombre de lignes couplées	Nombre de trans-formateurs couplés	Nombre de défauts possibles
1	1 1	1 2	2 2
2	2 2	1 2	2 2
3	5 5	1 2	< 1 < 1

qu'une ou deux lignes seulement sont couplées. On peut en conclure que dans ces cas seulement, environ 1% des coups de foudre frappant les lignes (soit 2 sur 214 coups par année) sont dangereux et peuvent provoquer des défauts. Ce chiffre de deux défauts par année paraît élevé, mais il faut tenir compte du fait qu'une seule des 5 lignes arrivant dans le poste étudié est pourvue d'un câble de garde sur toute sa longueur, que la protection est assurée seulement par des éclateurs et que la consigne est de coupler toutes les lignes, même à vide, en cas d'orage.

### 6. Conclusion

L'étude des paramètres qui entrent en jeu dans la coordination de l'isolement d'un réseau HT et la méthode probabilistique mise au point pour son calcul ont permis de mettre en évidence les points suivants:

1. Le coût élevé de l'appareillage qui équipe un réseau HT rend nécessaire de telles études car elles permettent de choisir une solution technico-économique raisonnable avec un risque de défaillance admissible.
2. Pour avoir les données nécessaires à de telles études il convient d'augmenter les statistiques sur les paramètres des courants de foudre par des mesures sur les lignes (compteurs de coups de foudre, boucles de mesure des courants de foudre) et à partir de stations mobiles de déclenchement de la foudre.
3. Le phénomène d'amortissement et de déformation des ondes de choc lors de leur propagation le long des lignes joue un rôle favorable très important.
4. Les résultats de l'étude effectuée pour un réseau 220 kV muni uniquement d'éclateurs à l'entrée des postes montrent que des éclateurs bien dimensionnés peuvent protéger d'une manière efficace les postes. D'autre part le nombre de lignes arrivant au poste intervient dans une large mesure dans le risque de claquage; il est avantageux de maintenir le maximum de lignes couplées, même en cas de faible charge, pour réduire le nombre de défauts possibles.

### Annexe I

L'équation liant le courant et la tension dans la figure 5 est pour une ligne sans pertes ( $R' = G' = 0$ )

$$-\partial i(x, t)/\partial x = \partial(C' \cdot u)/\partial t \quad (I.1)$$

$i$  valeur instantanée du courant

$u$  valeur instantanée de la tension

$x$  distance le long de la ligne

$t$  temps

$C'$  valeur linéique de la capacité de la ligne

Cette équation devient

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = u \frac{\partial C'}{\partial t} + C' \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t} \left( u \frac{\partial C'}{\partial u} + C' \right) \quad (I.2)$$

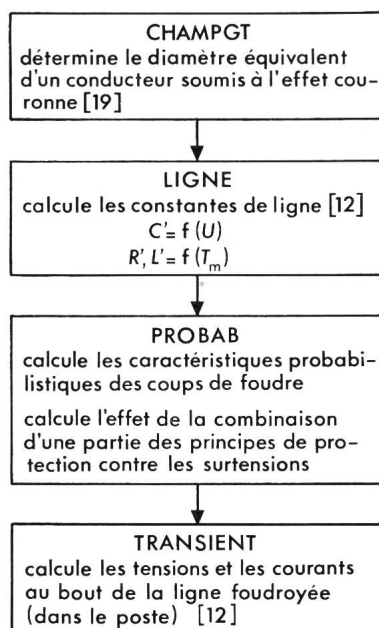


Fig. 12 Organigramme général du paquet de programmes COORD

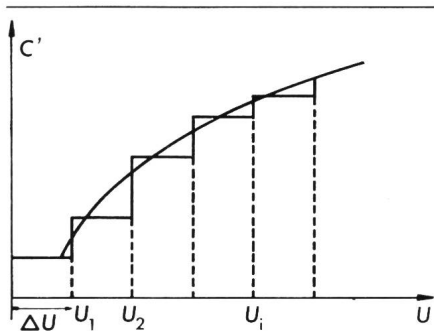


Fig. 13 Variation de la capacité linéique  $C'$  d'une ligne HT en fonction de la tension  $u$

La fonction  $C' = f(u)$  calculée à l'ordinateur [12, 19] est représentée à la figure 13. Soit la fonction en escalier représentée sur cette même figure une approximation de  $C' = f(u)$ . On aura pour toutes les valeurs  $U_i$  de  $u$

$$\frac{\partial C'}{\partial u} = \frac{\Delta C'}{\Delta U} \cdot \delta(u - U_i) \quad (\text{I.3})$$

avec  $\delta(u - U_i) = 0$  pour  $u \neq U_i$  et  $\delta(u - U_i) = \infty$  pour  $u = U_i$  (fonction de Dirac). Sachant que

$$\int_{U_{i-\varepsilon}}^{U_{i+\varepsilon}} \frac{\Delta C'}{\Delta U} \delta(u - U_i) du = \frac{\Delta C'}{\Delta U} \quad (\text{I.4})$$

$$\text{et que } \int_{U_{i-\varepsilon}}^{U_{i+1-\varepsilon}} \frac{\Delta C}{\Delta U} \delta(u - U_i) du = 0 \quad (\text{I.5})$$

on remplace toute intégration intervenant dans le calcul par une somme d'intégrations bornées aux limites des zones de tensions définies à la fig. 13 par les valeurs  $U_i$ ,  $U_{i+1}$ , etc.

$$\int_0^{U_{\max}} f(\theta) d\theta = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \int_{U_{i-1}+\varepsilon}^{U_i-\varepsilon} f(\theta) d\theta \quad (\text{I.6})$$

avec  $n(U_i - U_{i-1}) = U_{\max}$

pour peu que quelle que soit l'expression de  $\theta$ , on remplace  $C'$  par un  $C'_{\text{mod}}$  modifié:

$$C'_{\text{mod}} = C' + U_i \frac{\Delta C'}{\Delta U} \quad (\text{I.7})$$

Il ne suffit donc pas d'utiliser pour chaque échelon de la tension la capacité  $C'$  qui y correspond. Il faut y ajouter un élément correctif dû à la non-linéarité de  $C'$ .

## Bibliographie

- [1] M. Aguet, P. Blech et M. Ianovici: Calcul du risque de défaillance par coups de foudre d'un réseau électrique haute tension. Rapport du Meeting International du Groupe des Renardières, Cardiff, 31 août...2 septembre 1977.
- [2] A. Germond: Conditions de ferorésonance dans les systèmes triphasés. Thèse No. 213 de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1975.
- [3] M. Bouët et M. Schüepp: Climat et temps III. Berne, Service Topographique Fédéral, 1970.
- [4] S.A. Prentice: Compteurs de coups de foudre CIGRE. Electra (1972)22, p. 149...171.
- [5] R.H. Golde: The frequency of occurrence and the distribution of lightning flashes to transmission lines. Trans. AIEE 64(1945)-, p. 902...910.
- [6] C. Gary, C. Cimador et R. Fieux: La foudre: Etude du phénomène - Application à la protection des lignes de transport. Rev. Gén. Electr. 84(1975)1, p. 24...34.
- [7] A. Mauduit: Méthode graphique de Bergeron pour l'étude de la propagation des ondes le long des lignes électriques. Rev. Gén. Electr. 63(1954)4, p. 191 à 221.
- [8] H. Prinz: Die Blitzentladung in Vierparameterdarstellung. Bull. SEV/VSE 68(1977)12, S. 600...603.
- [9] J.G. Anderson: Monte Carlo computer calculation of transmission line lightning performance. Trans. AIEE PAS 80(1961)55, p. 414...420.
- [10] H. Kläy: Neue Erkenntnisse über den Lichtbogenschutz. Bull. SEV/VSE 68(1977)12, S. 582...584.
- [11] R. Pélissier: Les réseaux d'énergie électrique. Tome 4: Propagation des ondes électriques sur les lignes d'énergie. Paris, Dunod, 1975.
- [12] P.A. Chamorel et J.-J. Morf: Graphique interactif appliqué au calcul des constantes de lignes aériennes. Bull. ASE/UCS 67(1976)6, p. 290...295.
- [13] Electromagnetic transients program, user's manual. Portland/Oregon, Bonneville Power Administration, 1973.
- [14] A. Boillot: Coordination de l'isolement et retard à l'amorçage. EdF Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, Serie B (1971)1, p. 65...82.
- [15] L.O. Barthold et L. Paris: Etude probabilistique de la coordination de l'isolement. Electra (1970)13, p. 41...58.
- [16] J.R. Currie, L.A. Choy and M. Darvenzia: Monte Carlo determination of the frequency of lightning strokes and shielding failures on transmission lines. IEEE Trans. PAS 90(1971)5, p. 2305...2312.
- [17] M.A. Sargent: Monte Carlo simulation of the lightning performance of overhead shielding networks of high voltage stations. IEEE Trans. PAS 91(1972)4, p. 1651...1656.
- [18] T. Kawamura e.a.: Emploi d'une méthode statistique pour la coordination de l'isolement des postes contre les surtensions dues aux coups de foudre. CIGRE Rapport No. 33-06, 1974.
- [19] P.A. Chamorel: Calcul et représentation des champs électriques aux environs d'une ligne à haute tension triphasée avec conducteurs en faisceaux. Bull. ASE/UCS 67(1976)16, p. 854...858.

## Adresse des auteurs

M. Aguet, Ph. Blech et M. Ianovici, Chaire d'installations électriques, EPFL, 16 chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.