LES PARAMETRES DE LA FOUDRE EN VUE DES APPLICATIONS INDUSTRIELLES

par

R.B. ANDERSON et A.J. ERIKSSON du Comité d'Études n° 33 (Surtensions et Coordination de l'isolement)

Rapport publié à la demande du Président du Comité M. K.H. SCHNEIDER

LIGHTNING PARAMETERS FOR ENGINEERING APPLICATION

by R.B. ANDERSON et A.J. ERIKSSON of Study Committee N° 33 (Overvoltages and Insulation Coordination)

Paper published at the request of the Chairman of the Committee Mr. K.H. SCHNEIDER

1. INTRODUCTION

Ce rapport a été préparé à la demande du Comité d'Etude 33 de la CIGRE (Surtensions et Coordination de l'Isolement) et paraît sous cette forme à la suite de la discussion d'une version antérieure présentée en 1979 au Colloquium du SC 33 en Roumanie. De plus, ce rapport fait suite à plusieurs documents de travail [1, 2, 3] soumis antérieurement au GT 33.01 — Foudre, par Hileman et Weck. L'approche utilisée reprend largement celle adoptée dans leurs rapports antérieurs.

L'objectif majeur de ce rapport est de présenter les informations les plus récentes concernant les paramètres des coups de foudre en soulignant en particulier ceux nécessaires aux applications industrielles.

On discutera ces paramètres dans trois chapitres principaux:

- a) Paramètres d'incidence on y discutera la probabilité que des amorçages au sol se produisent, ainsi que l'influence de la hauteur des structures et l'incidence de coups de foudre multiples.
- b) Amplitude des courants de crête souvent considérée comme le paramètre le plus important et donc discutée séparément.
- c) Paramètres de forme d'onde on discutera les vitesses de montée du courant de la décharge sur le front de l'onde.

2. PARAMETRES D'INCIDENCE

2.1. Densité d'amorçage de coups de foudre au sol (Ng)

C'est un paramètre fondamental à la base de toute estimation de la fréquence des coups de foudre et de leurs effets sur les réseaux électriques. Comme l'ont montré les analyses de sensibilité [4], toute imprécision ou incertitude notable dans l'estimation de la densité des amorçages au sol a une influence directe sur la prédiction du comportement d'un réseau.

Le paramètre N_g peut être déterminé sans problèmes à partir des enregistrements des compteurs de coups de

1. INTRODUCTION

This report is prepared at the request of CIGRE Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination) and appears in this form, following discussion of an earlier version which was presented at the 1979 Technical Colloquium of SC 33 in Roumania. This report is also a sequel to several earlier working documents [1, 2, 3] submitted to WG 33.01 – Lightning, by Hileman and Weck, and the approach followed is largely based upon that adopted in their earlier reports.

The principal objective of this report is to present up to date information on the parameters of the lightning ground flash — with particular emphasis upon those parameters required for engineering applications.

These parameters will be discussed under three main groupings:

- a) Parameters of incidence in which the probability of occurrence of ground flashes is discussed, together with the influence of height of structures, and the incidence of multiple stroke flashes;
- b) Peak current amplitude this is often regarded as the single most important parameter for engineering applications, and is therefore discussed separately;
- c) Impulse shape parameters in which the time dependent characteristics describing the rate of rise of the discharge current on the impulse front are discussed.

2. PARAMETERS OF INCIDENCE

2.1. Ground flash density (Ng)

This is a fundamental parameter, providing the basis for any estimation of the frequency of lightning effects upon electrical systems. As sensitivity analyses have shown [4], any substantial inaccuracies or uncertainties in the estimates of ground flash density have a direct influence on system performance predictions.

The parameter N_g may readily be determined from lightning flash counter registrations in a given area of

foudre dans une région déterminée, pourvu que les caractéristiques de réponse du compteur soient bien connues, par exemple :

concern, provided the response characteristics of the counter are reliably known, where, for example:

$$N_{g} = Y_{g} \cdot K/\Pi R^{2} g \tag{1}$$

οì

- Y_g est un facteur de correction pour compenser l'enregistrement par le compteur de décharges à l'intérieur des nuages ou entre-eux.
- K est le nombre total des coups de foudre enregistrés par le compteur et R_g est le rayon d'action effectif du compteur (distance jusqu'à laquelle sont comptés les coups de foudre).

La valeur de Y_g dépend du rapport des densités d'amorçage au sol ou aux nuages et des rayons d'action effectifs du compteur vis-à-vis des amorçages entre nuages ou au sol. Ces rapports doivent être observés et mesurés pendant une période suffisamment longue.

On peut obtenir Y_g d'une autre façon en notant sur une période suffisamment longue le nombre de coups de foudre à la terre ayant actionné le compteur par rapport au nombre total de coups de foudre des deux espèces enregistres par le compteur.

Deux compteurs de coups de foudre performants ont été récemment agréés par le GT 33.01 (Foudre) pour la mesure de la densité de coups de foudre au sol [5]:

- a) Le compteur CIGRE 500 Hz (à antenne verticale) qui a des caractéristiques fonctionnelles équivalentes à celles du compteur CIGRE originel (à antenne horizontale) [6];
- b) Le compteur CIGRE 10 kHz, qui est plus sensible aux coups de foudre à la terre et est recommandé pour étalonner le compteur 500 Hz et pour utilisation dans les régions où la densité de coups de foudre est élevée.

On donne ci-dessous les caractéristiques fonctionnelles de ces deux compteurs telles qu'elles ont été mesurées pendant une longue période au Transvaal (latitude 26°S) en Afrique du Sud [7]: where

 Y_g is a correction factor to offset the registration of some inter or intra-cloud flashes by the counter

K is the total number of lighting flashes registered by the counter and R_g is the effective range of the counter to ground flashes.

The value of $Y_{\rm g}$ is dependent upon the ratios of cloud flash to ground flash densities and the effective ranges of the counter to cloud-cloud or ground flashes respectively, and these ratios must be measured and observed over a sufficiently long period.

Alternatively, Y_g can be obtained by observing the number of ground flashes which operate the counter as a ratio to the total number of flashes of both kinds registered by the counter over a sufficiently long period.

Two improved lightning flash counters have recently been adopted by WG 33.01 (Lightning) for the measurement of ground flash density [5], viz.:

- a) The CIGRE 500 Hz vertical aerial counter which has operation characteristics equivalent to those of the original horizontal aerial CIGRE counter [6];
- b) The CIGRE 10 kHz counter, which is mostly responsive to ground flashes and is recommended for calibration of the 500 Hz counter, and also for use in areas of high lightning density.

The relevant operating characteristics of these two counters, as measured over a considerable period in the Transvaal (latitude 26°S) in South Africa [7], are given below:

Paramètre Parameter	Compteur 500 Hz 500 Hz counter	Compteur 10 kHz 10 kHz counter
R	37 km	20 km
Yg	0,83	0,95

Cependant, des mesures effectuées au Southeast Queensland, Australie [8], (également sous la latitude 26° S) conduisent à des valeurs de R_g égales à 33 ± 6 km pour le compteur 500 Hz alors qu'une estimation inférieure à 30 km a été faite antérieurement en Europe [9].

Néanmoins, des indications plus récentes [10] montrent que les rayons d'action effectifs vis-à-vis des coups de foudre au sol de 37 km pour le compteur 500 Hz et d'environ 20 km pour le compteur 10 kHz peuvent également s'appliquer aux régions tempérées (dans ce cas, l'Allemagne). En conséquence, le Groupe

However, measurements in Southeast Queensland, Australia [8] (also latitude 26° S) indicate values of R_g of 33 ± 6 km for the 500 Hz counter, while an earlier estimate of less than 30 km has also been recorded in Europe [9].

More recent evidence [10] however, indicates that effective ground flash ranges of 37 km for the 500 Hz counter and about 20 km for the 10 kHz counter may apply also in temperate regions (in this case, Germany). As a consequence, the CIGRE WG 33.01 has agreed that the 10 kHz counter should be used

given in Ref. [5].

cally of the form :

de Travail 33.01 de la CIGRE a admis que le compteur 10 kHz puisse être utilisé pour étalonner les compteurs CIGRE 500 Hz déjà installés - en utilisant les valeurs $R_g = 20 \text{ km}$ et $Y_g = 0.95$ – (Si nécessaire, le rayon d'action effectif du compteur peut être vérifié par la méthode donnée en [5]).

Dans le passé, alors qu'on ne disposait pas des mesures des compteurs de coups de foudre, une pratique courante consistait à se servir de relations dérivées de l'expérience ou même supposées; ces relations entre la densité de coup de foudre N_g et le niveau kéraunique T_d correspondant à la région concernée étant généralement de la forme :

$$N_g = a T_d^b$$

Une large gamme de valeurs de a et b a été adoptée par différents utilisateurs, valeurs résumées par Prentice

Plus récemment, il a été possible de tirer profit de l'installation pour une durée de 2 ans, de quelque 350 compteurs CIGRE 10 kHz répartis sur la plus grande partie de l'Afrique du Sud (régions pour lesquelles les valeurs de T_d vont de 3 à 110 jours d'orage). On a essayé de déduire des mesures directes [12] une relation liant N_g et T_d , comme le montre la figure 1. En reprenant la forme ci-dessus, cette relation est :

to check the calibration of those CIGRE 500 Hz

counters already installed - using the values of

 $R_g = 20 \text{ km}$ and $Y_g = 0.95$. (If necessary, the effec-

tive range of the counter can be checked by the method

In the past, where lightning flash counter measure-

ments were not available, it has been common practice

to use empirically derived, or even assumed, relationships between ground flash density $N_{\rm g}$ and the prevailing keraunic level $T_{\rm d}$ in the area of interest, typi-

More recently, it has been possible to take advantage of the deployment of some 350 CIGRE 10 kHz counters around the major area of Southern Africa for a two-year period (in regions experiencing values of Td ranging from 3 to 110 thunderstorm days), and a tentative relationship between N_g and T_d has been derived from direct measurements [12], as shown in Figure 1. Following the above form, this relationship is given as:

$$N_g = 0,023 T_d^{1,3} (2)$$

Cette relation est en bonne concordance avec la tendance générale qui se dégage des données globales disponibles (Fig. 2), données compilées à partir de celles collationnées par Prentice [11].

Au contraire, partant de plusieurs centaines d'observations issues de compteurs CIGRE 500 Hz, Popolansky [13] a proposé précédemment au Groupe de Travail 33.01 de la CIGRE (Foudre) une relation montrant que

This relationship also shows reasonable agreement with the trend through the available global data, given in Figure 2, which is compiled from data collated by Prentice [11].

By contrast, Popolansky [13] previously derived a relationship for CIGRE WG 33.01 (Lightning) from many hundreds of observations for CIGRE-type 500 Hz counters which gives the result that the number of re-

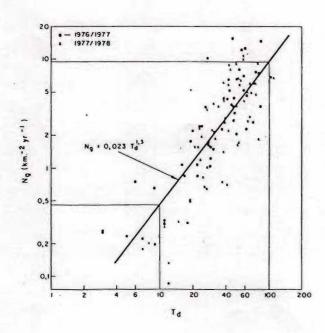


FIGURE 1

Relation entre le niveau kéraunique et la densité de coups de foudre au sol - données obtenues avec un compteur de coups de foudre en Afrique du Sud (basée sur 120 observations)

Relationship between keraunic level and ground flash density South African flash counter data (based upon 120 observations)

T_d: nombre annuel de jours d'orage

 N_g : densité annuelle de coups de foudre au sol N_g : Annual ground flock describes

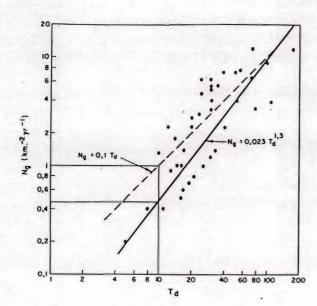


FIGURE 2

Relation entre le niveau kéraunique et la densité de coups de foudre au sol – données globales d'après Prentice Relationship between keraunic level and ground flash density Global data from Prentice

T_d: nombre annuel de jours d'orage

 T_d : Annual number of storm days N_σ : densité annuelle de coups de fi : densité annuelle de coups de foudre au sol

Ng: Annual ground flash density

le nombre annuel de coups K enregistré par le compteur pouvait être calculé par :

gistrations K per annum of the counter could be expressed by :

$$K = 14.71 T_d^{1.67} \tag{3}$$

Plus récemment, dans une communication au GT 33.01 (juin, 1979), Popolansky a indiqué qu'après un examen plus approfondi des données globales obtenues avec des compteurs CIGRE 500 Hz, l'exposant 1,67 s appliquait seulement aux données européennes et qu'il fallait réduire cet exposant à 1,3 pour l'analyse globale - étayant par cela la tendance de l'équation (2).

En attendant que de nouvelles données soient disponibles, il est proposé, à titre provisoire, que l'équation (2), (déduite de mesures directes), constitue la base de l'estimation de la densité de coups de foudre à partir des données kérauniques régionales.

La dispersion considérable affectant les données de la figure 1 - aussi bien que celles de la figure 2 - ne doit pas être négligée pour appliquer cette relation. Tenant compte de cette dispersion, on suggère comme règle approximative d'adopter la plage de valeurs sui-

More recently, in a communication to WG 33.01, (June, 1979), Popolansky reported that on further examination of the CIGRE 500 Hz counter global data, he concludes that the exponent is 1,67 for European data only, but reduces to 1,3 for the global analysis - thereby supporting the trend of equation (2).

For the interim therefore, until more data become available, it is proposed that equation (2) (being derived from direct measurements), provides a realistic basis for the estimation of ground flash density from regional keraunic data.

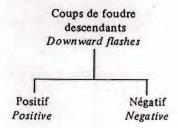
In applying this relation, the considerable scatter evident in the data given in Figure 1 should not be neglected (as well as that present in Figure 2). As an approximate guide, taking account of this scatter, adoption of the following range of values is suggested:

	N _g /km²/année N _g /km²/year				
T _d /année T _d /year	Calculé avec $N_g = 0.023 T_d^{1,3}$ Calculated from $N_g = 0.023 T_d^{1,3}$	Dispersion observée Observed scatter			
5	0,2	0,1 - 0,5			
10	0,5	0,15- 1			
20	1,1	0,3 - 3			
30	1,9	0,6 - 5			
40	2,8	0,8 - 8			
50	3,7	1,2 -10			
60	4,7	1.8 -12			
80	6,9	3 -17			
100	9,2	4 -20			

Finalement, on doit mettre l'accent sur le fait que des résultats corrects concernant la densité de coups de foudre ne peuvent être obtenus que par des mesures directes avec des compteurs fiables, et ce pendant un laps de temps suffisant pour tenir compte des variations annuelles à long terme.

2.2. Polarité et développement du coup de foudre

On peut distinguer quatre espèces principales de coups de foudre, selon la polarité du nuage chargé et la direction de propagation du leader:



Les coups de foudre ascendants se produisent principalement à partir des installations situées au sommet de montagnes ou à partir de très hautes structures et leur incidence relative dépend de la hauteur effective de la structure — ceci étant discuté plus longuement au paragraphe 2.3.

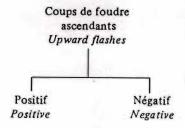
Plus récemment, Berger [14] a introduit une subdivision plus fine de ces quatre groupes pour prendre en compte les cas où des leaders se développent sans être suivis des courants du coup en retour, comme le montre la figure 3 où les cas décrits à la rangée supérieure ne comportent que le leader. Au contraire, la rangée inférieure dépeint les séquences où le leader se développe complètement et où le coup en retour se produit.

En pratique, en particulier pour ce qui touche les leaders ascendants, les situations des groupes 2 et 4 sont essentiellement limitées au cas des structures élevées et leurs caractéristiques seront évoquées au paragraphe 3.3. Les groupes 1a et 3a peuvent être classés comme décharges dans l'air, c'est-à-dire sans contact avec le sol alors que les groupes 1b et 3b caractérisent les coups de foudre à la terre classique, le groupe 1b étant prédominant

La majorité des applications industrielles sont concernées par les coups de foudre en retour et ne comportent It should be emphasized therefore that the correct results for ground flash density can only be obtained by direct measurements using reliable flash counters for a sufficiently long period of time, to allow for long term annual variations.

2.2. Polarity and flash development

Dependent upon the polarity of the cloud charges and the direction of propagation of the flash leader, four main categories of ground flash may be identified:



Upward flashes occur mainly from mountain-top installations or from very tall structures, and their relative incidence is dependent upon structure effective height – as discussed further in Section 2.3.

More recently, Berger [14] has introduced a further subdivision of the four groupings to take account of those occasions when developed leaders are not followed by impulse return stroke currents, as shown in Figure 3, where the top group depicts those instances when only leaders occur. In contrast, the lower group in Figure 3 depicts those circumstances in which complete leader and return stroke sequences occur.

In practice, especially with regard to upward leaders, the group 2 and 4 events are confined principally to tall structure situations and the characteristics of these events will be considered in Section 3.3. Groups 1a and 3a would be classified as air discharges (i.e. no contact with ground) and groups 1b and 3b characterize the normal stroke to the earth, group 1b geing predominant.

The majority of engineering applications are concerned with lightning return stroke events however, and

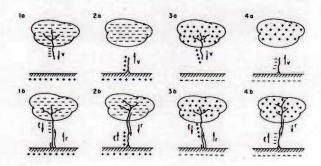


FIGURE 3

Les huit espèces de coups de foudre, distinguées d'après les directions du leader et du coup en retour — d'après Berger The eight types of lightning flash, based on directions of leader and return strokes — from Berger

généralement pas de structures de hauteur suffisante pour déclencher des coups ascendants à incidence élevée.

En conséquence, seuls les coups de foudre descendants sont considérés dans ce qui suit, et l'on discutera l'incidence relative des coups de foudre positifs et négatifs. Le tableau ci-dessous donne un aperçu de quelques données typiques. usually do not involve structures of sufficient height to initiate a high incidence of upward flashes.

Accordingly, downward flashes only are considered in the following section, which will discuss the relative incidence of negative and positive flashes. Representative data are illustrated in the following table.

Observateur Observer		Région Region Négatif Negative		nbre de coups de fo observés nber of flashes obse	% Positif Positive	
				Négatif Positif Negative Positive		
(1) Berger	[14]	Suisse Switzerland	129		129	0
(2) Anderson & Jenner	[15]	Rhodésie Rhodesia	131	9 .	140	6,4
(3) Anderson	[16]	Rhodésie Rhodesia	1 181	122	1 303	9,4
(4) Popolansky	[17]	Tchécoslovaquie Czechoslovakia	169	40	209	19,1
(5) Popolansky	[18]	Tchécoslovaquie Czechoslovakia	834	161	995	16,2
(6) Mackerras	[19]	Australie Australia	147	20	167	12,0
(7) Halliday	[20]	Afrique du Sud South Africa	267	16	183	5,7
Résultats groupés Combined results			2 858	368	3 226	11,4

Remarques sur les méthodes d'observation :

(1)	enregistrement direct du courant
(2) et (5)	par couplage magnétique sur les lignes de transport
(3), (6) & (7)	enregistrements des variations du champ électrostatique
(4)	enregistrements par couplage magnétique sur des cheminées de hauteur allant jusqu'à 140 m

Donc, une grande partie des coups de foudre descendants sont généralement de polarité négative, bien que les données disponibles concernant l'incidence réelle des coups de foudre positifs ne soient pas pleinement cohérentes et qu'il y ait aussi des variations en fonction de la saison et de la région considérée sur le globe.

Ainsi, quelques résultats de mesures concernant des courants positifs ont été obtenus en Norvège [21] pour un mât de 240 m durant des orages hivernaux. Une comparaison des orages, en été et en hiver au Japon [22] indique également des variations de l'incidence des coups de foudre positifs de 3 pour cent en été à 76 pour cent en hiver et il apparaîtrait que ces variations sont liées aux caractéristiques météorologiques des orages.

En conséquence, il est clair que de nombreuses données complémentaires sont nécessaires pour résoudre convenablement le problème des variations Notes on observation methods:

(1)	Direct current recordings
(2) and (5)	Magnetic links on transmission lines
(3), (6) and (7)	Electrostatic field change recordings
(4).	Magnetic link recordings on chimneys up

In general, therefore, the vast proportion of downward flashes involve negative polarity, but the available data on the actual incidence of positive flashes is not fully consistent, but may also vary seasonally and in different regions of the world.

For example, some results of positive current measurements have been obtained in Norway [21] on a 240 m mast during winter thunderstorms. A comparison of Japanese summer and winter thunderstorms [22] also indicates variations in positive flash incidence from 3 percent (summer) to 76 percent (winter), and it would appear that these variations could arise from storms having different meteorological characteristics.

It is clear from the above that considerably more data are required before questions regarding regional or even seasonal variations in the incidence of positive locales ou saisonnières de l'incidence des coups de foudre positifs. Une amélioration possible passe par l'utilisation de compteurs de coups de foudre à la terre sensibles à la polarité, dont le développement, basé sur le compteur CIGRE 10 kHz, a commencé en Afrique du Sud [23].

A titre provisoire cependant, résumer les résultats obtenus in situ conduit à formuler les conclusions suivantes au sujet des coups de foudre positifs:

- a) L'incidence de coups de foudre positifs peut varier considérablement dans les différentes régions du globe — les valeurs allant d'environ 5 pour cent ou moins à plus de 20 pour cent. Généralement, cette incidence est inférieure à 10 pour cent, mais on montre également que les orages hivernaux dans certaines régions du globe peuvent conduire à une incidence des coups de foudre positifs beaucoup plus grande.
- b) Il apparaît que l'incidence des coups de foudre positifs peut augmenter avec l'altitude et/ou avec un accroissement de la hauteur des structures (Popolansky [17]).
- c) Il apparaît également que la proportion de coups de foudre positifs peut s'accroître aux limites basse et haute de la distribution des amplitudes des courants de crête, comme cela est montré, par exemple par Golde [24].

Finalement, on doit remarquer que la seule étude complète des caractéristiques des formes d'onde de courant lors de coups de foudre positifs est celle faite par Berger [14]-[25] et qu'elle s'applique principalement aux coups de foudre ascendants et aux coups de foudre bipolaires dont Berger a enregistré une incidence égale à 6 pour cent environ.

Les caractéristiques des coups de foudre descendants seront discutées de façon plus complète aux paragraphes 3 et 4.

2.3. Effet des structures élevées sur l'incidence des coups de foudre

Fondamentalement, l'influence d'une structure (ou d'une installation située sur une montagne élevée) sur le mécanisme de la foudre est déterminée par le taux d'accroissement du champ électrostatique créé par la présence (ou la forme) de la structure en son voisinage. Des champs critiques peuvent être atteints grâce à l'approche des charges d'un leader descendant, ou plus rarement grâce aux charges considérables du nuage luimême. Le degré d'accroissement du champ est alors déterminé par les dimensions de la structure ou par le rapport (H/R) [26]-[27] caractérisant l'effet de pointe. A la limite, si le champ au voisinage de la structure devient suffisamment intense, une ionisation locale apparaît, donnant naissance à un leader ascendant si le champ est maintenu et si la charge disponible est suffisante.

Ceci implique que les plus hautes structures peuvent favoriser l'initiation de coups de foudre ascendants comme cela est confirmé par un bilan de l'incidence flashes can be adequately resolved. One possibility involves the use of polarity sensitive ground flash counters and development work based upon the CIGRE 10 kHz counter has commenced in South Africa [23].

For the interim, however, summarising the field results to date leads to the following tentative conclusions concerning positive flashes:

- a) The incidence of positive flashes may vary considerably in different regions of the world values ranging from about 5 percent or less, to more than 20 percent. Generally it is less than 10 percent but there is also an indication that winter thunderstorms in certain regions of the world may lead to a much greater incidence of positive flashes.
- b) There is an indication that the incidence of positive flashes may increase with altitude and/or with increasing structure height (Popolansky [17]).
- c) There is also an indication that the proportion of positive flashes may increase towards the low and high current limits of the peak current amplitude distribution, as discussed, e.g. by Golde [24].

Finally, it should be noted that the only comprehensive study of positive flash current impulse shape characteristics is that carried out by Berger [14, 25] and that this relates principally to upward flashes as well as to bipolar flashes, of which Berger recorded an incidence of about 6 percent.

The characteristics of negative downward flashes will be discussed fully in Sections 3 and 4.

2.3. The effect of tall structures on flash incidence

In principle the influence of a tall structure upon the lightning mechanism, (or of an installation upon a tall mountain), is determined by the degree to which the electrostatic field in the vicinity is intensified by the presence (or shape) of the structure. Critical fields are developed through the proximity of the approaching charges in a descending leader, or, in more rare cases, through the intense charges in the thundercloud itself. The degree of field intensification is in turn determined by the structure dimensions, or slenderness ratio (H/R) [26, 27]. In the limit, as the field in the vicinity of the structure becomes sufficiently intensified, local ionisation commences and, if the field is maintained and sufficient charge is available, an upward progressing leader is initiated.

This implies that taller structures would favour the initiation of upward flashes – as is borne out by the results of a survey of flash incidence on structures of

des coups de foudre sur des structures de hauteur variable dans différentes régions du globe [28], bilan qui a montré un net accroissement de l'incidence des coups de foudre ascendants avec l'accroissement de hauteur des structures (la proportion de coups ascendants allant d'environ 10 pour cent pour des structures ne dépassant pas 100 m à plus de 95 pour cent sur les structures de plus de 400 m).

En examinant les enregistrements de quelque 3000 coups de foudre pour un échantillon de 10000 structure-an, Eriksson [18]-[28] a trouvé que la relation de dépendance entre l'incidence des coups de foudre et la hauteur de la structure pouvait être proche de la forme:

varying height in different regions of the world [28]. which indicated a pronounced increase in upward flash incidence with increasing structure height, (ranging from about 10 percent upward on structures having height of about 100 m or less, to more than 95 percent upward on structures in excess of 400 m).

In examining the records of some 3000 flashes in a sample of 10000 structure years, Eriksson [12, 28] found that the dependency of flash incidence with increasing structure height could be approximated by the relationship:

$$N_f = 0.04 \exp(0.015 H_s) \tag{4}$$

où

 N_f = incidence annuelle moyenne de coups de foudre sur une structure se situant dans une région de densité de coups de foudre : $N_g = 1$ km⁻² année-1

et

 H_s = hauteur de la structure en m

En pratique, cependant, cet accroissement de l'incidence totale de coups de foudre avec la hauteur de la structure est pour une grande part consécutif à un accroissement exponentiel de l'incidence des coups de foudre ascendants avec la hauteur. En ce qui concerne les coups de foudre descendants, on a trouvé que l'incidence de coups descendants sur des structures pouvait être prise en compte en attribuant aux structures un rayon équivalent de capture R qui dépend de la hauteur de la structure suivant la relation approchée :

where

N_f = average annual incidence of flashes to a structure in an area experiencing a ground flash density $N_g = 1 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$

and

 $H_s = structure height in m.$

In practice, however, this increase in the total flash incidence with increasing structure height is largely the consequence of an exponential increase in the upward flash incidence with increased structure height. As regards the remaining downward flashes, it was found that the incidence of downward flashes to structures could be accounted for by ascribing an equivalent attractive radius R to structures, whose dependency on structure height took the approximate form;

$$R = 16,3 H_s^{0,61} \text{ m} ag{5}$$

Ceci implique que l'incidence de coups de foudre descendants sur une ligne peut être exprimée de façon approchée par :

 $N = (2R + W) \cdot N_g \times 10^{-1}$

 N_{σ} = densité annuelle de coups de foudre au sol (en km^{-2} année⁻¹)

W =largeur effective de la ligne en m

 H_s = hauteur effective de la structure qui, dans le cas d'une ligne, peut s'exprimer par $H_s = h_{gw} - 2/3$ de la flèche en milieu de portée (où hgw est la hauteur du câble de garde au niveau du pylône)

On doit souligner que la relation formulée par l'équation (5) représente une tendance moyenne parmi les données expérimentales - La figure 4 traduit la dispersion des rayons équivalents de capture observés pour différentes hauteurs de structure allant jusqu'à 100 m ces données ayant été compilées parmi les données disponibles [12]-[28]. Une dispersion d'environ ± 35

This implies that an approximation for the incidence

of downward flashes to a line could be expressed by :

coups/100 km/année (6a) flashes/100 km/year

 $N_g = annual ground flash density (in km^{-2} yr^{-1})$

W = line effective width in m

H_s = structure effective height, which in the case of a line is expressed as $H_s = h_{gw} - 2/3$ midspan sag - (where h_{gw} is the height of the shield wire at the tower)

It should be emphasized that the relation expressed in equation 5 represents a mean trend through the field data - Figure 4 depicts the scatter of the equivalent attractive radii observed for various structure heights up to 100 m - as compiled from the available field data [12, 28] and a dispersion of about ± 35 percent around this mean trend is evident. Any estimate of flash

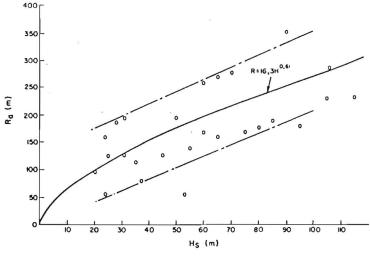


FIGURE 4

Variations observées du rayon de capture avec l'accroissement de hauteur de la structure Observed variations in attractive radius with increasing structure height

 H_s : hauteur de structure — structure height R_a : rayon de capture équivalent — Equivalent attractive radius

pour cent autour de cette tendance moyenne est évidente. Toute estimation de l'incidence de coups de foudre fondée sur l'équation (6a) est donc sujette à un taux de dispersion comparable.

Cette relation peut être comparée avec d'autres méthodes, comme par exemple l'approche de Burgsdorf/Kostendko [29]:

$$N = 2.7 \cdot H_s \cdot T_d/30$$

où

 H_s = hauteur effective de la ligne en m

 $T_d = incidence kéraunique annuelle$

Par ailleurs, une autre relation empirique couramment utilisée [30] est donnée par :

$$N = (4H_s + W) \cdot K \cdot T_d \times 10^{-1}$$

où

K est une constante qui permet de relier la densité de coups de foudre au sol au niveau kéraunique existant, K étant pris normalement égal à 0,15 ± 0,05

Le tableau suivant illustre les variations obtenues en utilisant ces relations dans le cas de deux exemples de lignes situées dans des régions de niveau kéraunique différent.

Il est évident que les différences qui figurent dans le tableau ci-après sont la conséquence des hypothèses, notamment le fait que les équations 6b et 6c supposent une relation linéaire entre le nombre de coups de foudre et la hauteur de la ligne d'une part et le niveau kéraunique d'autre part, alors que l'équation 6a a été déduite de données expérimentales qui montrent que ces relations ne sont pas linéaires. incidence based upon equation 6a is therefore subject to a similar degree of dispersion.

This estimating relation may be compared with other estimating methods, such as the Burgsdorf/Kostenko approach [29];

where again

 $H_s = line effective height in m$

 $T_d = annual keraunic incidence$

Alternatively, another empirical relation which is widely used [30], is given as;

where

K is a constant used to relate the ground flash density to the prevailing keraunic level and normally takes the values $K = 0.15 \pm 0.05$.

The following table illustrates variations in these estimating relations for two examples of lines in different keraunic regions:

It is evident that the differences which appear in the hereafter table are a consequence of the assumptions, namely that equations 6b and 6c assume a linear relationship of the number of flashes to both height of line and the keraunic level, whilst equation 6a was derived from field data, which indicated that neither relation was linear.

H _s (m)	W	T _d (jours)	Coups de foudre/100 km/an Flashes/100 km/year						
(m)	(m)	(days)	Е	quation (6a)	(1)	(6b)	(6c) ⁽²⁾		
			Mini. Min.	Moy. Mean.	Maxi. Max.		Mini. Min.	Moy. Mean.	Maxi Maxi
25	15	30 70	29 86	47 142	53 161	68 158	35 81	52 121	69 161
55	24	30 70	59 178	76 230	98 294	149 347	73 171	109 257	146 342

Remarques:

- Les valeurs de la densité de coups de foudre au sol utilisées dans cette méthode ont été déduites de T_d par la relation empirique donnée plus haut (équation 2). Les limites supérieure et inférieure de l'incidence moyenne calculée ont été fondées sur les limites supérieure et inférieure observées pour la tendance moyenne des données expérimentales (Fig. 4).
- Les limites supérieure et inférieure de l'incidence moyenne calculée sont fondées dans ce cas sur les limites respectives du facteur K défini ci-dessus.

De plus, on remarque que les résultats donnés par l'équation 6b correspondent pratiquement aux valeurs maximales obtenues par l'équation 6c, qui suppose :

Notes:

- The values of ground flash density used in this method were derived from T_d using the empirical relation given earlier as equation 2. The upper and lower limits to the calculated mean flash incidence were based upon the upper and lower limits observed in the trend of the field data — as shown in Figure 4.
- The upper and lower limits to the calculated mean incidence in this case were based upon the respective limits to the factor K, as noted above.

It is further noted that the results of equation 6b correspond very closely to the maximum values of equation 6c, which assumes that

 $N = 0.2 T_d/\text{année/km}^2$ $year/km^2$

Cette valeur correspond à la limite supérieure des données de Prentice (Fig. 2) et est donc probablement trop prudente.

D'un autre côté, les valeurs déduites de l'équation 6a ne sont pas très éloignées des valeurs moyennes obtenues par l'équation 6c.

Cette dernière suppose que $N_g = 0,15$ T_d , ce qui est apparu en accord avec le comportement de lignes de 115 à 161 kV observées par Chambers et Almon, et ce qui a été également adopté dans plusieurs études industrielles (Anderson [30]).

Ces variations montrent à l'évidence que les méthodes d'estimation de l'incidence de coups de foudre sur les lignes nécessitent un travail plus approfondi. L'étude et l'application des modèles électrogéométriques font actuellement l'objet de recherches actives et on espère que ceci aboutira à une amélioration des méthodes d'estimation.

A titre provisoire, il est proposé d'adopter, pour les calculs futurs, l'équation 6a qui a été déduite empiriquement de toutes les données disponibles concernant les structures élevées et qui inclut des relations entre N_g et T_d notoirement non linéaires.

De nouvelles données, relatives au comportement des lignes dans des régions de densité connue de coups de foudre au sol, permettront assurément de rationaliser encore plus l'approche, le besoin de pallier l'utilisation du paramètre T_d étant encore démontré.

This value corresponds to the maximum limit of Prentice's data in Figure 2 and is therefore probably too conservative.

On the other hand, the curve values derived from equation 6a are not far removed from the mean values of equation 6c.

This latter assumes that $N_g = 0.15 \, T_d$, which has been found to accord with the observed performance of 115 to 161 kV lines by Chambers and Almon, and has also been adopted in several engineering studies, as discussed by Anderson [30].

It is evident from these variations that methods for estimating flash incidence to lines require further work. The study and application of electrogeometric concepts of analysis is an area of active research at present and it is hoped that this may lead to improved estimating methods.

For the interim, since equation 6a has been derived empirically from all available tall structure data and includes proven non-linear relationships between $N_{\rm g}$ and $T_{\rm d}$, it is proposed that it be adopted for future calculations.

Further data relating to line performance in areas of known ground flash density will assuredly assist to rationalise the approach still further, and the need to resist using the parameter $T_{\bf d}$ is further demonstrated.

Finalement, on doit encore remarquer que l'effet premier d'un accroissement de hauteur de la structure est une prédominance accrue des coups de foudre ascendants sur les coups de foudre descendants. Puisqu'il y a des différences substantielles dans la distribution des amplitudes des courants de crête et dans les caractéristiques des formes d'onde, entre coups de foudre ascendants et descendants (ceci sera davantage discuté au paragraphe 3), les distributions des courants de foudre enregistrés sur les structures élevées peuvent résulter d'une combinaison de deux populations.

Cependant, la plus grande partie des applications aux lignes de transport concerne les hauteurs de structures d'environ 60 m ou moins) à l'exclusion éventuelle des traversées montagneuses) et on peut s'attendre à une très faible incidence de coups de foudre ascendants.

Par suite, les distributions de courants de foudre pour les structures de moins de 60 m peuvent être considérées comme très voisines de celles des lignes de transport. La distributions et les caractéristiques de forme d'onde sont discutées au paragraphe 3.

2.4. L'incidence et les caractéristiques des coups de foudre multiples

Il est bien connu que les coups de foudre au sol (aussi bien ascendants que descendants) présentent fréquemment un développement de décharges à répétition dans lequel la séquence constituée par le premier leader saccadé et le coup en retour est souvent suivie par une série rapide de un ou plusieurs coups en retour consécutifs — chacun comprenant une séquence "dart leader" et coup en retour consécut, et suivant le trajet d'arc créé par le premier leader saccadé.

En ce qui concerne les réseaux industriels usuels, ceci implique que ces réseaux soient capables éventuellement de supporter les effets de décharges en série pendant un court laps de temps et donc que les systèmes de protection supportent ces effets. (Par exemple, les temps morts au réenclenchement automatique des disjoncteurs doivent généralement être réglés supérieurs à la durée de la majorité des coups de foudre, et les parafoudres doivent être susceptibles d'amorcer plusieurs fois de suite et pendant des périodes courtes. Concevoir de tels réseaux de façon sûre nécessite à l'évidence une connaissance appropriée de la probabilité d'apparition et des caractéristiques des coups de foudre multiples.

Des données représentatives sont résumées ci-après.

a) Incidence des coups de foudre multiples

Des données provenant de plusieurs régions du globe sont données ci-dessous à titre d'exemple, alors qu'une courbe de synthèse "globale" est donnée par la figure 5.

Une dispersion considérable apparaît clairement, aussi bien entre les régions que dans une même région — ainsi les différents résultats enregistrés en Afrique du Sud. Ces variations peuvent résulter en partie des différentes méthodes de mesure adoptées — ce qui peut impliquer également une diversité des gammes de sensibilité. Par exemple, il apparaîtrait que les données obtenues par l'étude des variations de champ électrique (Schonland Finally, it should again be noted that the primary effect of increasing structure height is an increasing predominance of upward flashes over downward flashes. Since the peak current amplitude distributions and impulse shape characteristics of upward and downward flashes differ substantially (as will be discussed further in Section 3), the resultant lightning current distributions recorded on tall structures may involve the mixture of two sample populations.

However, the majority of transmission line applications involve structure heights of the order of 60 m or less, (possibly excluding mountain crossings), and a very low incidence of upward flashes may be anticipated.

Hence, lightning current distributions to structures not exceeding 60 m could be regarded as closely approximating those of transmission lines. The resulting distributions and impulse shape characteristics are discussed in Section 3.

2.4. The incidence and characteristics of multiple stroke flashes

It is well known that ground flashes (both upward and downward) frequently include a repetitious discharge process, in that the first stepped-leader/return-stroke sequence is often followed in short succession by a series of one or more subsequent strokes — each comprising a dart leader and subsequent return stroke sequence, and generally following the breakdown path traversed by the first stepped leader.

As far as practical engineering systems are concerned, this implies that such systems on occasion may be required to sustain the effects of the discharge of a series of strokes within a short interval of time and protective systems therefore must be capable of with-standing these effects. (For example, the dead times of autoreclosing switchgear should generally be set longer than the majority of flash durations, and surge arresters should be capable of repetitive discharge and reseal operations over short periods of time). In order to design such systems effectively therefore, an adequate knowledge of the probability of occurrence and the characteristics of multiple stroke flashes is clearly required.

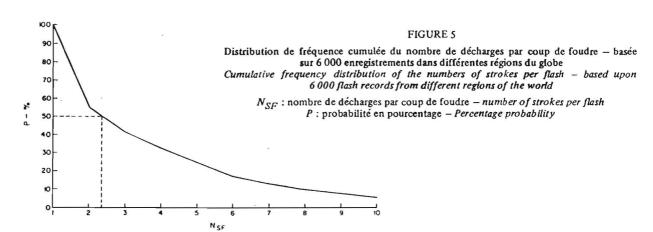
Representative data are summarised hereafter:

a) Incidence of multiple stroke flashes

Illustrative data from several regions of the world are summarised below, while Figure 5 depicts a "global" summarising curve.

Considerable dispersion is evident, both by region, as well as in one area — such as the various results recorded in Southern Africa. The variations might arise partly out of the variety of measuring methods adopted — which may also imply a variety of range sensitivities. For example, it would appear that the data obtained from electric field change studies (i.e. Schonland [31], Anderson [16] and Malan [37] show comparable

Observateur Observer		Région Region	Nombre de coups de foudre Number of flashes	Nombre moyen de décharges par coup de foudre Mean number of strokes/flash	Incidence de coup de foudre à décharge unique Single stroke flash incidence
Schonland	[31]	Afrique du Sud South Africa	1 800	4,2	25 %
Anderson	[16]	Rhodésie Rhodesia	1 405	3,4	36 %
Berger	[32]	Suisse Switzerland	1 026	1,8	76 %
Carte	[43]	Afrique du Sud South Africa	877	1,9	65 %
Eriksson	[34]	Afrique du Sud South Africa	638	2,5	51 %
Brantley	[35]	Floride Florida	206	2,4	42 %
Malan	[37]	Afrique du Sud South Africa	530	3,5	13 %
Résultats co Overall com	ombinés abined results		6 4 2 8	3,1	45 %



[31], Anderson [16] et Malan [37] montrent des tendances comparables – alors qu'il y a aussi un certain accord entre les deux ensembles de résultats obtenus par les techniques d'enregistrement CCTV, même s'ils proviennent de différentes régions du globe (notamment, Eriksson [34] en Afrique du Sud et Brantley en Floride [35]).

Une résolution différente peut aussi affecter ces données puisqu'une grande partie a pu être obtenue dans des orages plus intenses et ne sont donc pas nécessairement typiques des conditions générales à long terme.

En résumé, cependant, on peut remarquer que l'incidence des coups de foudre comportant une seule décharge varie de 76 pour cent en Suisse à environ 13 pour cent en Afrique du Sud. Les moyennes pondérées des données globales conduisent à une incidence de coups de foudre unique égale à 45 pour cent une incidence médiane de 2,3 décharges par coup de foudre. De façon générale également, la figure 5 montre que seulement 5 pour cent environ des coups de foudre comportent plus de dix décharges.

trends — while there is also a measure of agreement between the two sets of results obtained using CCTV recording techniques — even though these were from different regions of the world (namely, Eriksson [34] in South Africa and Brantley in Florida [35]).

A degree of selectivity may also be present in these data, since a substantial portion may have been obtained in more active thunderstorms and thus may not necessarily be representative of more general long term conditions.

In summary, however, it may be noted that the reported incidence of single stroke flashes varies from 76 percent in Switzerland to about 13 percent in Southern Africa. Taking weighted means of all the data leads to a single stroke incidence of 45 percent, and a median incidence of 2,3 strokes per flash. In general also, Figure 5 indicates that only about 5 percent of all flashes will exceed 10 strokes in number.

Le nombre moyen de décharges par coup de foudre semble varier de façon similaire de 4,2 (Schonland) à 1,8 (Berger), mais les moyennes pondérées conduisent à une valeur moyenne de trois décharges par coup de foudre environ, et on propose d'adopter cette valeur dans le cas général, bien que Cianos et Pierce [36] aient remarqué qu'il était possible que le nombre moyen de décharges par coup de foudre augmente près de l'équateur.

b) Durée du coup de foudre

Ici encore, une quantité considérable de données est disponible, qui montrent également une certaine dispersion, mais peut-être inférieure à celle des coups de foudre multiples.

Les caractéristiques expérimentales les plus typiques sont résumées ci-dessous :

The mean number of strokes per flash is found to vary similarly from 4.2 (Schonland) to 1,8 (Berger), but taking weighted means leads to an average value of about 3 strokes per flash, and it is proposed that the latter value be adopted for general purposes, although Cianos and Pierce [36] have noted the possibility that the mean number of strokes per flash could increase near the equator.

b) Flash duration

Here again, a considerable amount of data is available which also shows a measure of dispersion, but with perhaps less scatter than in the case of multiple stroke incidence

The salient features of representative data are summarised below:

	ervateur server	Région Region	Durée des coups de foudre (ms) dont 50% dont 10% dépassent: Flash durations 50% 10% Exceed: Exceed:		Remarques concernant la distribution Remarks on distribution
Malan	[37]	Afrique du Sud South Africa	200	465	incluant (les coups de foudre uniques including (single stroke
Kulijew	[38]	URSS USSR	430	800	inconnue unknown
Anderson	[16]	Rhodésie Rhodesia	67 177	543 543	incluant (les coups de foudre uniques including excluant excluding single stroke
Berger	[32]	Suisse Switzerland	13 180	400 600	incluant les coups de foudre uniques
Eriksson	[39]	Afrique du Sud South Africa	189	608	excluant { les coups de foudre uniques excluding { single stroke
Pierce	[40]	Royaume Uni United Kingdom	180	=	inconnue unknown

Pour déterminer la probabilité des durées des coups de foudre dépassant des limites données, la population complète, coups de foudre uniques inclus, doit être considérée dans la distribution. Cependant, eu égard à l'incertitude concernant la proportion de coups de foudre uniques rapportée plus haut, les distributions de durée de coup de foudre qui se rapportent aux seuls coups multiples sont généralement utilisées et la probabilité ainsi obtenue est corrigée en ajoutant la probabilité d'apparition des coups de foudre uniques.

La figure 6 montre trois de ces distributions parmi celles des références citées plus haut et une courbe moyenne est suggérée qui indique une valeur médiane de 200 ms et des limites à 95 pour cent et 5 pour cent respectivement de 64 et 620 ms.

In order to determine the probability of durations of flashes exceeding given limits, the total population, including single stroke flashes, must be included in the distribution. However, in view of the uncertainty regarding the proportion of single stroke flashes referred to above, flash duration distributions which refer to multiple stroke flashes only are generally used and the probability so obtained adjusted by adding the probability of occurrence of single stroke flashes.

Three such distributions taken from the above references are shown in Figure 6 and a suggested, mean curve is also shown which indicates a median value of 200 ms and 95 percent and 5 percent limits of 64 and 620 ms respectively.

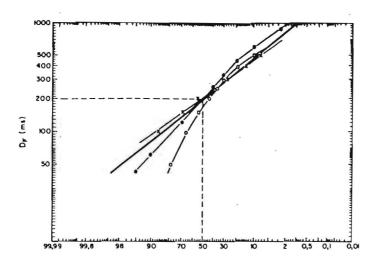


FIGURE 6

Pourcentage de coups de foudre multiples ayant des durées dépassant la valeur donnée en ordonnée Percent of multiple stroke flashes having durations exceeding value given by ordinate

-x- Malan -.- Eriksson -o- Anderson -x- Malan -.- Eriksson -o- Anderson moyenne

 D_F : durée du coup de foudre D_F : flash duration

Mean

Ainsi, par exemple, en considérant les possibilités de réenclenchements réussis sur des déclenchements dus à la foudre, l'expression suivante peut être utilisée: Thus, for example, in considering the possibilities of achieving successful auto-reclosing operations upon lightning trip-outs, the following expression may be used:

$$P(RC) = P(1) + [1 - P(DT)][1 - P(1)]$$

οù

P(1) = probabilité d'apparition d'un coup de foudre unique égale à 0,45 d'après la figure 5

 P(DT) = probabilité de coups de foudre multiples ayant des durées supérieures au temps mort (DT) du réenclencheur concerné - pris sur la figure 6

P(RC) = probabilité résultante de réenclenchement réussi.

Par exemple, soit un réenclencheur de temps mort égal à 500 ms, la probabilité de réenclenchement réussi sur coups de foudre multiples est donnée par :

where

P(1) = probability of single stroke flash occurrence - taken as 0,45 from Figure 5

P(DT) = probability of multiple stroke flashes having durations in excess of the particular recloser dead time <math>(DT) - read off from Figure 6

P(RC) = resultant probability of successful reclosure.

For example, considering a recloser having a dead time of 500 ms, the probability of successful reclosure upon multiple stroke flash operations is given as:

$$P(RC) = 0.45 + (1 - 0.09) \cdot 0.55$$

= 0.95

Remarque: Dans certains cas, il peut être commode de relier la durée de coup de foudre au nombre de décharges dans les coups multiples. Malan et Kulijew ont tous deux fourni des courbes de distribution des durées de coup de foudre en fonction du nombre de décharges.

c) Intervalle entre décharges

Des données typiques sont résumées ci-après :

Ici encore, on considère que les méthodes de mesure peuvent affecter les distributions résultantes. En particulier, les résultats obtenus par les méthodes d'enregistrement CCTV peuvent avoir une résolution insuffisante pour les intervalles entre décharges courts — à cause de l'échantillonnage des systèmes d'enregistrement vidéo et on considère en conséquence que ces résultats peuvent être biaisés jusqu'à des intervalles limites plus longs (Eriksson et Brantley). A cet égard, la limite inférieure a son importance puisque environ 10 pour cent des intervalles sont inférieurs à 10 ms.

Note: In certain instances it may be convenient to relate flash duration to the number of strokes in multiple stroke flashes. Both Malan and Kulijew have provided distribution curves of flash duration as functions of the stroke number.

c) Inter-stroke interval

Representative data are summarised hereafter:

Here again, it is considered that the methods of measurement may influence the resultant distributions. In particular, the results obtained for CCTV recording methods may not have sufficient resolution for short inter-stroke intervals — due to the limited framing rates of the video recording systems, and it is thought that these results may as a consequence be biased towards longer limit intervals (i.e. Eriksson, and Brantley). In this regard, the lower limit is of importance since about 10 percent of all intervals are less than 10 ms.

Observateur		Région	Intervalles de temps Time intervals (ms)		
Obse	Observer Region		dont 50 % dépa: 50 % exceed	dont 10 % ssent : 10 % exceed	
Anderson	[16]	Rhodésie Rhodesia	35	130	
Berger	[32]	Suisse Switzerland	33	104	
Schonland	[41]	Afrique du Sud South Africa	35	160	
Eriksson	[39]	Afrique du Sud South Africa	50	155	
Brantley	[35]	Floride Florida	70-80	-	
Pierce	[40]	Royaume Uni United Kingdom	65	190	

En conséquence, les valeurs généralisées suivantes sont proposées pour les intervalles entre décharges :

Accordingly, the following generalised values for inter-stroke intervals are proposed:

6 ms (95 %) - 35 ms (50 %) et/and 200 ms (5 %)

Remarque: Anderson [16] a examiné la dépendance entre les intervalles entre décharges et le rang des décharges et a trouvé que le premier intervalle entre décharges est de façon significative plus long que les autres — l'intervalle médian étant de 45 ms en comparaison d'une valeur d'environ 35 ms pour tous les intervalles.

En général, les coups de foudre multiples de polarité positive ont rarement été observés, bien que les valeurs des variations de champ proposées par Anderson [16] en comprennent plusieurs exemples — pour la plupart desquels le nombre de décharges n'excède pas 6. Cependant, dans les applications pratiques, on peut supposer que les coups de foudre descendants de polarité positive, quand ils se produisent, ont une plus grande probabilité de ne comporter qu'une décharge.

Cependant, un point à ne pas négliger au sujet des coups multiples est celui de leurs multiples branches lors de l'impact au sol. Ils peuvent présenter les traits d'un coup unique (avec embranchements à la racine) ou comporter une succession de coups multiples, de nature complexe et distincts dans l'espace — certains, bien que se produisant à intervalles comparables, peuvent contenir des leaders saccadés apparemment indépendants et peuvent aboutir à des points distants de plusieurs kilomètres de l'impact de la première décharge.

L'incidence de tels coups de foudre semble varier largement, dans une proportion de 10 à 30 pour cent de tous les coups de foudre au sol enregistrés [42]. Dans une étude récente de 291 coups de foudre, observés grâce aux techniques d'enregistrement sur bande vidéo, Eriksson a noté 41 coups de foudre complexes de ce type (soit environ 14 pour cent). Dans une étude comparable, mais grâce aux techniques utilisant une

Note: Anderson [16] has examined the dependency of inter-stroke intervals upon stroke order and has found that the first inter-stroke interval is significantly longer than the remainder – having a median interval of 45 ms compared to a value of about 35 ms for all stroke intervals.

In general, positive multiple stroke flashes have seldom been observed, although Anderson's field change data [16] do include several examples of positive multiple stroke field change records — the majority of which did not exceed 6 strokes in number. For all practical purposes however, it may be assumed that positive downward flashes, when they do occur, are more likely to be single stroke in nature.

One aspect of multiple stroke occurrence however, which should not be overlooked, is that of multiple earth terminations. These may be of a single stroke nature (i.e. 'root-branched'') or may involve a succession of spatially separate complex multiple stroke flashes — certain of which although occurring at comparable interstroke intervals, may include apparently independent stepped leaders and may terminate at points several kilometers removed from the first stroke of the flash.

The incidence of flashes of this type appears to vary widely with values in the range 10-30 percent of all ground flashes being reported [42]. In a recent study of 291 ground flashes recorded using video tape recording techniques, Eriksson has observed 41 complex flashes of this type (i.e. about 14 percent of the total). In a similar study in the same area, but using rotating camera techniques, Carte and de Jager [43] recorded

caméra (à tambour) tournante, Carte et de Jager [43] ont enregistré une proportion de 19 pour cent de coups multiples distincts dans l'espace sur un échantillon total de 1 000 enregistrements. En tenant compte qu'environ 55 pour cent des coups de foudre présentent des décharges multiples (voir plus haut), ceci signifie qu'un pourcentage significatif (environ 10 pour cent) des coups de foudre au sol comportent des canaux distincts lors de l'impact.

En ce qui concerne les racines multiples des canaux individuels, l'étude de plus de 4000 enregistrements faits par les auteurs avec une caméra céleste (comme d'ailleurs par Carte et autres [43]) a montré qu'environ 5 pour cent des coups de foudre au sol présentent de telles racines multiples. (Dans 95 pour cent des cas environ, on constate seulement deux branches).

Donc, si l'on veut tenir compte à la fois de l'arrivée de canaux distincts dans l'espace et des cas comportant des racines multiples, des facteurs de correction d'environ 10 ± 5 sont conseillés pour les valeurs de la densité de coups de foudre au sol telle qu'elle est déterminée à partir des enregistrements des compteurs.

3. DISTRIBUTION DES AMPLITUDES DES COU-RANTS DE CRETE

3.1. Coups de foudre descendants de polarité négative

En 1972, Popolansky [33] a effectué un large bilan des mesures des courants de foudre et attiré l'attention sur plusieurs sources d'erreur significatives dans de nombreuses distributions des courants crête. En tenant compte de ces facteurs, il a déduit une nouvelle courbe globale faisant la synthèse de la distribution des fréquences, courbe fondée sur quelque 624 mesures collationnées à partir de recherches effectuées en Suisse, Tchécoslovaquie, Pologne, Suède, Norvège, Grande-Bretagne, Australie et USA.

Il a alors approximé cette courbe par une distribution log-normale :

$$P(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\log I}} \int_0^I \frac{1}{I} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\log I - \log \overline{I}}{\sigma_{\log I}}\right)^2\right) dP$$
où
$$\overline{I} = 25 \text{ kA} \qquad \text{where} \qquad \overline{I} = 25 \text{ kA}$$

$$\sigma_{\log I} = 0.39 \qquad \qquad \sigma_{\log I} = 0.39$$

Plus récemment, Eriksson [28] a attiré l'attention sur l'influence importante des coups ascendants et descendants lors de la détermination des distributions mixtes résultantes pour les courants observés sur les structures élevées. Ceci avait été, en fait, commenté par Popolansky [44] en termes généraux, mais on peut noter que plus de 50 pour cent des données contenues dans sa courbe de synthèse proviennent de mesures effectuées sur des cheminées de hauteur non précisée. De plus, les données de Popolansky comprennent quelque 192 mesures venant de courants de crête positifs et négatifs enregistrés à San Salvatore, alors que Berger [14] a précisé récemment que tous les enregistrements de polarité positive faits dans cette station doivent être considérés comme des décharges ascendantes.

and 18 percent incidence of spatially separate multiple stroke channel occurrence, in an examination of 1000 flash records. Bearing in mind that about 55 percent of flashes display multiple stroke behaviour (as discussed earlier), this implies that a significant percentage of all ground flashes (i.e. about 10 percent) may, in fact, involve spatially separate channels to ground.

As far as multiple root termination of individual channels is concerned, examinations of more than 4000 all-sky camera records by the authors (as well as by Carte et al. [43]) have indicated that about 5 percent of ground flashes display such multiple root behaviour. (In about 95 percent of instances, only two roots are evident).

Therefore, in order to take account of both spatially separate channel occurrence and multiple root behaviour, correction factors of the order of 10 ± 5 percent are indicated in values of ground flash density determined from flash counter registrations.

3. DISTRIBUTION OF FLASH PEAK CURRENT AMPLITUDES

3.1. Negative downward flashes

In 1972 Popolansky [33] carried out a comprehensive review of lightning current measurements and drew attention to several significant sources of error in many of the earlier measured distributions of peak currents. Taking these factors into account, he derived a new global summarising frequency distribution curve, based upon some 624 measurements collated from investigations in Switzerland, Czechoslovakia, Poland, Sweden, Norway, Great Britain, Australia and the USA.

He then approximated this curve by the log-normal distribution;

More recently, Eriksson [28] drew attention to the important influence of upward and downward flashes in determining the resultant mixed distributions of currents observed in tall structures. This had, in fact, been remarked upon in general terms by Popolansky [44], but it may be noted that over 50 percent of the data comprising his summarising curve was derived from measurements on chimneys of undefined height. In addition, Popolansky's data included some 192 measurements from San Salvatore of both positive and negative peak currents, whereas Berger [14] has recently pointed out that all positive records from this station should, in fact, be classified as upward discharges.

En conséquence, lors de la réunion de 1978 du Groupe de Travail 33.01 de la CIGRE (Foudre), il a été décidé de déduire une courbe de synthèse modifiée comprenant seulement les mesures effectuées sûrement lors de coups de foudre descendants de polarité négative ou les mesures de courants de polarité négative provenant de structures de hauteurs inférieures à environ 60 m. Cette dernière limite de la hauteur a été adoptée car d'après l'analyse d'Eriksson [28], l'incidence de coups de foudre ascendants doit être bien inférieure à 10 pour cent dans cette gamme de hauteur.

Cette analyse a été faite conjointement par Popolansky [45] et Eriksson sur des ensembles de données comparables. Leurs résultats groupés ainsi que ceux correspondant à la distribution originelle sont donnés ci-dessous à titre de comparaison. Accordingly, at the 1978 meeting of CIGRE Working Group 33.01 (Lightning), it was resolved that a modified summarising curve should be derived, which comprised only confirmed negative downward flash measurements, or negative current measurements from structures having heights less than about 60 m. The latter limiting height was adopted, since from Eriksson's analysis [28] the incidence of upward flashes should be well below 10 percent in this height range.

This analysis was carried out jointly on similar sets of data by both Popolansky [45] and Eriksson, and their combined results are shown below, together with those from the original distribution for comparison.

Origine	Nombre de Valeurs média		Probabilité de dépasser 100 kA	Approximation log-normale log-normal approximation	
Source	valeurs Number of values	Median data	Probability of exceeding 100 kA	Médiane Médian	σ log I
Popolansky/Eriksson	338	34 kA	2,5 %	30 kA	0,32
Distribution originelle [33] Original distribution	624	28 kA	3,5 %	25 kA	0,39

L'échantillon [45] comprend des résultats obtenus en Australie (18 valeurs), Tchécoslovaquie (123 valeurs), Pologne (3 valeurs), Afrique du Sud (11 valeurs), Suède (14 valeurs), Suisse (125 valeurs) et USA (44 valeurs). Parmi toutes les valeurs de l'échantillon, la valeur la plus basse du courant a été de 3 kA. En comparant, l'approximation log-normale et la distribution résultante des fréquences cumulées, on a trouvé que l'ajustement n'était pas statistiquement significatif, bien qu'il fût le meilleur parmi plusieurs fonctions.

Une approche jugée très utile par les auteurs consiste à supposer arbitrairement la subdivision de la distribution des fréquences cumulées en deux régimes, un régime "écran" comprenant les courants inférieurs à 20 kA, et un régime amorçage secondaire comprenant les courants supérieurs.

L'allure de la distribution peut alors être représentée par deux lignes droites (tracées parmi les valeurs mesurées et en coordonnées log-normales) qui se coupent à environ 20 kA. Bien que cette approche ne soit pas nécessairement correcte statistiquement, elle peut être admise compte tenu de la petitesse relative des échantillons sur lesquels les distributions cumulées ont été basées. En réalité, les distributions mesurées constituent elles-mêmes des tirages au hasard parmi la population "vraie" des phénomènes de foudre. La représentation par deux lignes droites sécantes peut donc apparaître comme une approximation raisonnable. Les auteurs considérent que cela peut constituer une approche plus fructueuse que celle basée sur une approximation log-normale de la distribution globale - ce qui généralement conduit à un ajustement médiocre.

The data sample [45] comprised results from Australia (18 values), Czechoslovakia (123 values), Poland (3 values), South Africa (11 values), Sweden (14 values), Switzerland (125 values) and USA (44 values). In all instances, the lowest current value contained in these samples was 3 kA. In examining the lognormal approximation to the resultant combined cumulative frequency distribution, it was found that the resultant fit, although the best of several functions, was not statistically significant.

One approach which the authors have found useful is arbitrarily to assume the subdivision of the cumulative frequency division into two regimes, namely, a "shielding" regime comprising currents below 20 kA, and a "back-flash" regime comprising those currents in excess of 20 kA.

The trend of the distribution may then be represented by two straight lines (drawn through the measured data in a log-normal presentation), which intercept at about 20 kA. Although this approach is not necessarily statistically valid, allowance should be made for the comparative smallness of the samples on which the cumulative distributions have been based. In reality, the measured distributions are themselves random samples drawn from the "true" population of lightning events. The two straight-line intercept representation may therefore not be an unreasonable approximation and the authors consider that it may offer a more useful approach than that based upon a log-normal approximation through the whole distribution — which generally leads to a poor fit.

L'approche est illustrée par la figure 7 qui est basée sur la distribution des fréquences cumulées analysée par Popolansky et Eriksson. Les deux lignes droites ont été définies comme passant par les points suivants (choisis pour la commodité du tracé):

The approach is illustrated in Figure 7 which is based upon the cumulative frequency distribution analysed by Popolansky and Eriksson. The two straight lines may be defined by the following intercepts (which have been chosen to allow convenient plotting):

Courants "Ecran" Shielding currents				age secondaire' currents
I	Probabilité	I	•	Probabilité
4 kA	98 %	20 kA		80 %
10 kA	80%	90 kA		5 %

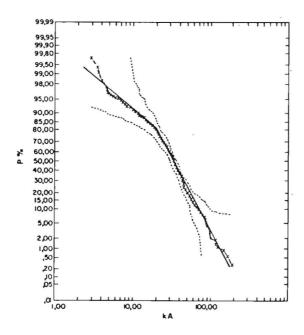


FIGURE 7

Distribution de fréquence cumulée des amplitudes des courants de foudre – Coups de foudre négatifs descendants Cumulative frequency distribution of lightning current amplitudes – Negative downward flashes

On peut voir sur la figure 7 que cette approche représente bien la distribution mesurée — du moins d'un point de vue subjectif.

Il est admis que des données supplémentaires sûres sont nécessaires pour définir de façon satisfaisante la distribution des amplitudes des courants de crête (ces données doivent aussi satisfaire les conditions de hauteur de structure et/ou de développement confirmé d'une décharge négative descendante). A titre provisoire, on propose d'adopter un courant médian de 34 kA pour application pratique aux réseaux et études industriels.

De plus, en attendant des données plus complètes, on suggère que la représentation par les deux régimes ci-dessus de la distribution des fréquences cumulées soit considérée comme une approche industrielle simple — de préférence peut-être à l'approximation log-normale.

3.2. Effet de la hauteur de la structure

Actuellement, il existe deux écoles. D'une part, l'application des concepts électrogéométriques [46] prédit une augmentation des courants médians avec

It may be seen in Figure 7, that this approach represents the trend of the measured distribution comparatively well – at least on a subjective basis.

It is accepted that additional reliable data is required (which still complies with the constraints of structure height and/or confirmed negative downward flash progression), in order adequately to clarify the distribution of peak current amplitudes. For the interim, it is proposed that a median current of 34 kA be adopted – for application to practical engineering systems and studies.

In addition, until such time as better data become available, it is suggested that the above two regime representation of the cumulative frequency distribution be evaluated as a simple engineering approach – in preference perhaps to the general log-normal approximation.

3.2. Effect of structure height

At present, two schools of thought exist. On the one hand, application of electrogeometric concepts [46] predicts an increase in median currents for flash distri-

la hauteur de la structure, d'autre part Popolansky [44] et Eriksson [28] ont montré que les données disponibles, bien que restreintes indiquent une diminution des courants médians mesurés sur les structures de hauteur croissante. De plus, il a été signalé que cette dernière tendance est explicable par la combinaison des distributions de coups de foudre ascendants et descendants ayant des valeurs médianes significativement différentes, les poids respectifs changeant avec l'augmentation de l'incidence des amorçages ascendants quand la hauteur de structure augmente.

En tenant compte des données connues provenant de mesures directes et concernant seulement des amorçages négatifs descendants sur des structures élevées, on peut établir comme suit une comparaison avec la nouvelle distribution résultante qui est proposée: butions with increasing structure height, whilst Popolansky [44] and Eriksson [28] have shown that the available data, although scanty, indicates a decrease in median currents when measured in structures of increasing height. Furthermore, it has been pointed out, that the latter trend is accountable in terms of the mixture of upward and downward flash distributions having significantly different median values, with the degree of mixing varying with the increasing incidence of upward flashes as structure heights increase.

Taking account of known data from direct measurements on downward negative flashes only to tall structures, a comparison may be made with the proposed new summarising distribution, as follows:

Paramètre Parameter	Distribution résultante summarising distribution	Eriksson	Berger
Hauteur de structure Structure height	60 m	60 m	60 m
Hauteur de colline (ou de montagne) Height of hill (mountain)		80 m	650 m
Hauteur effective ⁽¹⁾ Effective height	60 m	160 m	350 m
Courant médian Median current	34 kA	41 kA	32 kA

(1) Remarque: Les hauteurs effectives ci-dessus sont fondées sur l'incidence respective des coups de foudre descendants et ascendants telle qu'elle est discutée par Eriksson [12, 28].

(1) Note: The above effective heights are based upon the observed incidence of downward and upward flashes respectively as discussed by Eriksson [12, 28].

Donc, en l'absence de tout résultat contradictoire provenant de mesures directes, on considère sur la base de ce qui est dit ci-dessus qu'il n'apparaft aucune dépendance significative de la distribution des courants médians avec l'accroissement de hauteur des structures dans le cas des coups de foudre descendants de polarité négative.

En conséquence, et en l'absence de plus amples informations, on propose d'adopter la nouvelle distribution résultante sans dépendance vis-à-vis de la hauteur, pour l'application pratique aux structures industrielles.

On doit remarquer qu'il est possible que les distributions de courants de foudre changent en fonction de l'intensité des orages et de la région concernée.

La valeur médiane de 41 kA, qui est significativement plus élevée et qui a été mesurée par Eriksson [28] en Afrique du Sud et par Anderson [47] en Rhodésie, tendrait à confirmer cette proposition.

3.3. Coups de foudre ascendants de polarité positive

Les caractéristiques de forme d'onde des coups ascendants ont été analysées par Berger [14] de façon séparée selon qu'il s'agit de décharges positives, négatives ou bipolaires. Dans cette étude, il distingue également les On the above basis therefore, in the absence of any contradictory direct measured data, it is considered that there is no apparent significant dependency of distribution median current with increasing structure height, for negative downward flashes.

It is proposed accordingly, in the absence of further information, that the new summarising distribution be adopted without height dependency, for application to practical engineering structures.

It should be pointed out that a possibility exists that lightning current distributions may vary with storm severity and with regional location.

The significantly higher median value of current of 41 kA, as measured both by Eriksson [28] in South Africa and by Anderson [47] in Rhodesia, would tend to support such a proposition.

3.3. Upward and positive flashes

The impulse shape characteristics of upward flashes have been separately analysed by Berger [14] in respect of both negative and positive, as well as bipolar, discharges. In this study, he also distinguishes between

décharges avec coup en retour complet ou incomplet — coup de foudre de type 2a ou 2b, et 4a ou 4b sur la figure 3 — et il enregistre les paramètres concernant chacune des distributions correspondantes. (Remarque : Les paramètres des coups de foudre positifs ont été à l'origine analysés par Berger et autres [25] en 1975 — mais en supposant qu'il s'agissait de coups de foudre descendants). Dans une nouvelle analyse, il a augmenté l'échantillon de coups de foudre positifs et il a classé tous ces enregistrements comme coups de foudre ascendants. En conséquence, on ne dispose apparemment d'aucune source de résultats conséquente concernant les caractéristiques de forme d'onde des coups de foudre descendants de polarité positive.

Cependant, alors que ces coups de foudre positifs étaient classés comme ascendants par définition, Anderson [48] a fait remarquer qu'un leader ascendant pouvait être initié du sommet de la structure grâce à l'accroissement du champ créé par un leader descendant pouvant être complètement dissimulé par un nuage. Si les leaders ascendant et descendant se rejoignent dans le nuage, la décharge apparaît comme ascendante, alors qu'elle peut en fait constituer une partie d'un coup de foudre descendant.

Les coups de foudre positifs étant relativement rares et la plupart des structures des lignes de transport n'ayant pas une hauteur suffisante pour présenter une incidence élevée de coups ascendants, les caractéristiques de ces décharges ascendantes ne seront pas davantage discutées ici. On notera toutefois les paramètres suivants, extraits de l'analyse faite par Berger [14]:

incomplete and complete leader-return stroke discharges — i.e. flashes of either type 2a or 2b, and 4a or 4b in Figure 3 — and records the relevant parameters of each of the corresponding distributions. (Note: The parameters of positive flashes were originally analysed by Berger et al [25] in 1975 — but on the assumption that these were downward flashes). In his new analysis, he has extended the positive flash data sample and classified all these records as upward. In consequence, there is apparently non comprehensive source of data available on the impulse characteristics of positive downward flashes.

However, whilst by definition these positive flashes were classified as upward, Anderson [48] has pointed out that an upward leader could be initiated from the top of a structure by the field intensifying effect of a downward progression leader which might be completely obscured from view in a cloud. If the upward leader connected with a downward leader inside the cloud, the discharge would appear visually to be upward, whereas in effect it could be part of a downward flash.

Since positive flashes are comparatively rare and in view of the fact that the majority of power line structures are not sufficiently high to involve a high incidence of upward flashes, the characteristics of such upward discharges will not be discussed further here, except to note the following parameters, which have been extracted from Berger's analysis [14].

			gatif gative	Course de foudes
Paramètre Parameter		Décharges principales ascendantes Upward first strokes	Décharges secondaires ascendantes Upward subsequent strokes	Coups de foudre positifs ascendants Positive upward flashes
Sur la base d'une approximation log-normale: Based upon log-normal approximations	I G log I	0,25 kA 0,56	10 kA 0,31	36 kA 0,41

4. PARAMETRES DE FORME D'ONDE

4.1. Introduction et distributions

La première analyse complète des caractéristiques de forme d'onde des courants de foudre a été réalisée en 1975 avec les résultats obtenus par Berger au Mont San Salvatore [25] — analyse comprenant un résumé complet des paramètres de forme d'onde et de leurs distributions statistiques. Les corrélations entre ces différents paramètres ont été également considérées et par conséquent analysées de façon approfondie par Weck [2]. Donc, en tenant compte de ces travaux antérieurs, on traitera uniquement dans ce paragraphe de certains aspects de la forme des courants de dé-

4. IMPULSE SHAPE PARAMETERS

4.1. Introduction and distributions

The first comprehensive analysis of lightning current impulse shape characteristics was carried out in 1975 on Berger's measured data from San Salvatore [25] – leading to a full summary of impulse parameters and their statistical distributions. Correlations amongst various parameters were also examined and these have subsequently been analysed further by Weck [2]. In view of this previous work therefore, this section will only deal with certain aspects of the discharge current shape (for negative downward flashes only) – concentrating mainly on the front characteristics, which are

charge (pour les coups de foudre négatifs descendants seulement). On s'intéressera principalement aux caractéristiques du front, qui sont d'une importance particulière pour étudier le comportement des réseaux industriels.

Dans une analyse précédente [25], les caractéristiques de front avaient été définies en termes de vitesse maximale de montée du courant (c'est-à-dire la pente la plus forte) sur le front de l'onde, en considérant également la durée du front entre le point du front correspondant à 2 kA et la première crête de courant.

Pour étudier plus complètement les caractéristiques du front, plusieurs paramètres complémentaires ont été introduits, avec l'idée qu'une observation de leurs distributions et des corrélations éventuelles conduiraient à une meilleure représentation de la forme du front de l'onde.

Ces paramètres sont présentés sur la figure 8 sur la forme idéalisée d'une onde négative. De façon plus rigoureuse et en respectant davantage les normes, l'amplitude à 90 pour cent du front (en considérant l'amplitude de la première crête), a été utilisée comme base pour définir la plupart des paramètres complémentaires. Ceux-ci sont définis comme suit :

T-10: Durée du front correspondant à l'intervalle entre les points 10 pour cent et 90 pour cent sur le front. (On remarquera que dans ce cas le temps de front équivalent T_f est égal à T-10/0,8).

T-30: Durée de front correspondant à l'intervalle entre les points 30 pour cent et 90 pour cent sur le front. (On remarquera que dans ce cas le temps de front équivalent est égal à T-30/0,6).

TAN-10: Vitesse de montée du courant (c'est-à-dire tangente à la forme d'onde du front passant par le

of particular importance in engineering system performance prediction studies.

In the earlier analysis [25], the front characteristics were defined in terms of the maximum rate of rise of current (i.e. steepest tangent) on the front of a stroke, together with the front duration, determined between the 2 kA point on the front and the first peak of current.

In order to study the front characteristics more fully, several additional parameters have been introduced, in the belief that an examination of their distributions and possible correlations could lead to a better representation of stroke front shapes.

These parameters are shown on an idealised form of a negative stroke in Figure 8. As a more rigorous approach, and in order to be more consistent with standardised concepts, the 90 percent amplitude on the front (with respect to the first peak amplitude), has been used as a basis for definition of most of the additional parameters. These are defined as follows:

T-10: the front duration expressed as the interval between the 10 percent and 90 percent amplitude intercepts on the front. (Note that the equivalent front time T_f is equal in this case to T-10/0.8);

T-30: the front duration expressed as the interval between the 30 percent and 90 percent amplitude intercepts. (Note that the equivalent front time T_f is equal in this case to T-30/0.6);

TAN-10: the rate of rise of current (i.e. tangent to front shape at the 10 percent amplitude intercept).

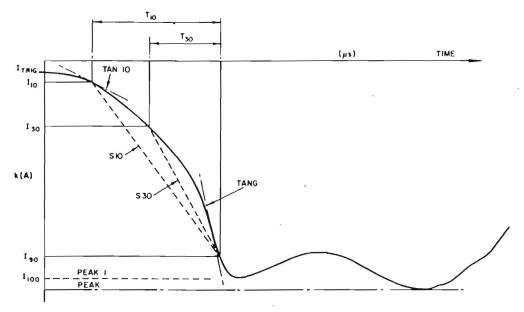


FIGURE 8

Definition des paramètres du front de l'onde — Illustration dans le cas d'une onde négative Definition of impulse front parameters — Illustrated for a negative impulse

point d'amplitude 10 pour cent). (Ce paramètre a été introduit pour avoir une évaluation des vitesses de montée à l'origine du courant — ou de la tension de la ligne — que les parafoudres peuvent subir).

- S-10 : Raideur moyenne du courant ou vitesse de montée du courant entre les points d'amplitude 10 pour cent et 90 pour cent.
- S-30: Raideur moyenne du courant entre les points d'amplitude 30 pour cent et 90 pour cent.
- TAN-G: Vitesse de montée maximale du courant sur le front. (C'est en fait le même paramètre que celui déjà introduit dans une étude antérieure [24]).

Il est apparu nécessaire, en particulier pour les formes de la décharge principale, de distinguer le premier pic de courant (I-PEAK 1) de la seconde crête (I-PEAK 2) qui peut se produire 5 à 10 µs plus tard. On a également examiné la relation existant entre les amplitudes de ces deux pics.

Les enregistrements des ondes faits par Berger ont été digitalisés auparavant [49]. Ils sont maintenant traités et analysés par ordinateur et tous les paramètres cités plus haut ont été déterminés pour la décharge principale comme pour les décharges secondaires — ainsi que les distributions de la fréquence cumulée de ces paramètres. (Remarque: Ceci diffère de l'analyse antérieure [3], [25] dans laquelle les paramètres de forme d'onde avaient été élaborés manuellement à partir des données).

Les distributions résultantes de certains de ces paramètres sont présentées à la figure 9a, b, c et elles concernent respectivement les formes de la décharge principale et des décharges secondaires.

Le test de normalité de Lillefors [50] a été appliqué à ces distributions (après transformation logarithmique) et a été trouvé significatif dans la majorité des cas au niveau 5 pour cent. Ceci est montré au Tableau I qui résume les moyennes μ et les écarts-types du logarithme des variables pour ces distributions ainsi que les niveaux de probabilité 95 pour cent, 50 pour cent et 5 pour cent — déterminés grâce à une approximation lognormale.

On peut souligner plusieurs points parmi ces résultats:

a) Les différentes estimations de la vitesse de montée du courant ou de la raideur peuvent être directement comparées avec les valeurs maximales évaluées manuellement auparavant [25] et qui figurent ci-après au Tableau II.

Tout d'abord, la nouvelle évaluation de Tan G indique des vitesses de montée maximales approximativement égales au double de celles de l'analyse antérieure, (si l'on considère la médiane et les extrêmes) — à cause sans doute des difficultés inhérentes à une évaluation manuelle précise de ce paramètre. La raideur déduite des points d'amplitude 30 pour cent et 90 pour cent est cependant plus faible que la vitesse de montée maximale trouvée dans chacune de ces évaluations et on peut supposer que les valeurs élevées de raideur ont lieu probablement pour des durées très courtes,

(This parameter was introduced in order to obtain an impression of the initial rates of rise of current (or line voltage) which surge arresters may experience):

- S-10: the average current steepness or rate of rise of current between the 10 percent and 90 percent amplitude intercepts;
- S-30: the average current steepness between the 30 percent and 90 percent amplitude intercepts;
- TAN-G: the maximum rate of rise of current on the front. (This, in fact, is the same parameter as that introduced in the earlier study [24]).

It was found necessary, especially for first stroke shapes, to distinguish between a first peak of current (I-PEAK 1) and a second crest (I-PEAK 2) — which may occur some 5-10 µs later. The relationship between these two amplitudes has also been examined.

Berger's impulse records had previously been digitised [49]. These have now been processed using a computerised system of analysis and all the above parameters determined for both first and subsequent stroke records — together with the cumulative frequency distributions of the relevant parameters. (Note: this is in contrast to the earlier analysis [3,25] in which the shape parameters had been determined from manual evaluation of this data).

The resultant distributions for certain of these parameters are shown in Figure 9a, b, c, and for first and subsequent stroke shapes respectively.

The Lillefors test [50] for normality was applied to these distributions (after log-transformation) and proved significant in the majority of cases at the 5 percent level, as shown in Table 1, which summarises the means μ and standard deviations of the logarithm of the variates (σ_{log}) in these distributions, together with the 95 percent, 50 percent and 5 percent probability intercepts — as determined from the log-normal approximations.

Several points arising out of these results may be noted:

a) The various estimates for the rate of rise of current or steepness may be directly compared with the maximum values previously evaluated manually [25] as shown in Table 2 hereafter.

Firstly, the new evaluation of Tan G indicates maximum rates of rise approximately twice those of the previous analysis, (with regard to both median and extremes), — due no doubt to the inherent difficulty of accurate manual evaluation of this parameter. The steepness based on a 30 to 90 percent intercept is, however, less than either of these analyses of maximum rate of rise and thus it may be assumed that high values of steepness probably occur for very short durations, considering that the total front time durations are also relatively short. The original data was also truncated

TABLEAU 1 - TABLE 1

Résumé des paramètres du front
Summary of front shape parameters

Paramètre Parameter	N N	Unités <i>Units</i>			by	Pourcentage de cas où la valeur du tableau est dépassée Percent of cases exceeding tabulated value		
			μ	σlog	Test positif Positive test	95 %	50 %	5 %
Décharges principales First stroke T-10	80	μs	4,5	0,25	non no	1,8	4,5	11,3
T-30	80	μs	2,3	0,24	oui	0,9	2,3	5,8
TAN-10	75	kA/μs	2,6	0,40	yes non	0,6	2,6	11,8
S-10	75 ·	kA/μs	5,0	0,28	no oui	1,7	5,0	14,1
S-30	73	kA/μs	7,2	0,27	yes oui	2,6	7,2	20,0
TAN-G	75	kA/μs	24,3	0,26	yes oui	9,1	24,3	65,0
PEAK-1	75	kA	27,7	0,20	yes oui	12,9	27,7	59,5
PEAK	80	kA	31,1	0,21	yes non	14,1	31,1	68,5
RATIO (P-1)/P	1 — 1		0,9	0,10	no 	-	_	_
Décharges secondaires Subsequent strokes T-10	114	μς	0,6	0,40	non	0,1	0,6	2,8
T-30	114	μs	0,4	0,44	no non	0,1	0,4	1,8
TAN-10	108	kA/μs	18,9	0,61	no oui	1,9	18,9	187,4
S-10	114	kA/μs	15,4	0,41	yes oui	3,3	15,4	72,0
S-30	114	kA/μs	20,1	0,42	yes oui	4,1	20,1	98,5
TANG	113	kA/μs	39,9	0,37	yes oui	9,9	39,9	161,5
PEAK-1	114	kA	11,8	0,23	yes oui	4,9	11,8	28,6
PEAK	114	kA	12,3	0,23	yes oui	5,2	12,3	29,2
RATIO (P-1)/P		_	0,9	0,09	yes			

Remarque: Dans chaque cas, les distributions sont exprimées en base 10.

Note: In each case, the above log-normal distributions are expressed in terms of the base 10.

en tenant compte du fait que les durées totales de front sont aussi relativement courtes. Les valeurs originelles étaient tronquées à $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$ et le fait que ce ne soit pas le cas dans l'analyse à l'ordinateur conduit à un résultat évident, en particulier dans le cas des données concernant les décharges secondaires, données qui comportent quatre valeurs dépassant $150 \text{ kA}/\mu\text{s}$ par exemple.

Il existe cependant une meilleure concordance avec les évaluations antérieures pour ce qui est des valeurs médianes dans ce dernier cas. La raideur des décharges secondaires est encore élevée par rapport à celle de la décharge principale, mais la différence est moins marquée que précédemment.

b) Les paramètres attachés à la raideur moyenne (S10 et S30) ont été introduits car certains auteurs at 100 ka/µsec and the effect of not repeating this in the computerised analysis is self evident, especially in the case of the data for subsequent strokes, which included four points in excess of 150 kA/µsec, for example.

There is however, a closer agreement regarding median values in the latter case, when compared with the earlier evaluations. The steepness on subsequent strokes is of course still high compared with first strokes but the difference is now less pronounced than previously.

b) The average steepness parameters (S10 and S30) were included in view of the preference of some authors

TABLEAU II - TABLE II

Paramètre Parameter		du ta Percer	Pourcentage des cas où la valeur du tableau est dépassée Percent of case exceeding tabulated value			
	95 %		50 %	5 %		
Décharges principales First strokes						
di/dt maximum : évaluation manuelle maximum di/dt : manual evaluation	kA/μs kA/μs	5,5	12	32		
Nouvelle évaluation (Tan G) New evaluation	kA/μs kA/μs	9,1	24	65		
S (30-90) S (10-90)	kA/μs kA/μs	2,6 1,7	7,2 5,0	20 14		
Décharges secondaires Subsequent strokes						
di/dt maximum : évaluation manuelle maximum di/dt : manual evaluation	kA/μs kA/μs	12	40	120		
Nouvelle évaluation (Tan G) New evaluation	kA/μs kA/μs	40	40	162		
S (30-90) S (10-90)	kA/μs kA/μs	4,1 3,3	20 15	99 72		

[36] les préfèrent à la vitesse de montée maximale. Il est cependant intéressant d'observer combien la dispersion sur la raideur moyenne est faible, en particulier dans le cas de la décharge principale — cela se voit sur les distributions de la figure 9b. Ceci suggère la possibilité d'une représentation simple du front, mais malheureusement, la dispersion sur la raideur moyenne pour les décharges secondaires est significativement plus élevée — Tableaux I et II.

c) Le Tableau III ci-dessous montre une comparaison des durées de front, ou des temps de montée T_f , avec les données obtenues antérieurement :

[36] for this parameter, compared to maximum rate of rise. It is interesting to observe therefore, especially for first stroke shapes — as shown by the distributions in Figure 9b, how small the dispersion in average steepness is. This suggests the possibility of a simple representation of the front shape but unfortunately, the dispersion in average steepness on subsequent strokes is significantly greater — as shown in Tables I and II.

c) A comparison of the front durations, or risetimes $T_{\rm fr}$ with the previous data is shown in Table III below:

TABLEAU III - TABLE III

	CAU III - IAI					
Paramètre-temps de front équiva Parameter-equivalent from tin	nètre-temps de front équivalent T_f ameter-equivalent from times T_f		Pourcentage des cas où la valeur du tableau est dépassée Percent cases exceeding tabulated value			
		95 %	50 %	5 %		
Décharges principales First strokes						
Evaluation antérieure de T_f par Berger Berger's previous evaluation T_f	μς	1,8	5,5	18		
déduite de T (10-90) derived from	μς	2,2	5,6	14		
déduite de T (30-90) derived from	μς	1,5	3,8	10		
Décharges secondaires Subsequent strokes	g.					
Evaluation antérieure de T_f par Berger Berger's previous evaluation	μς	0,2	1,1	4,5		
déduite de T (10-90) derived from	μς	0,2	0,8	3,5		
déduite de T (30-90) derived from	μς	0,1	0,6	3,0		

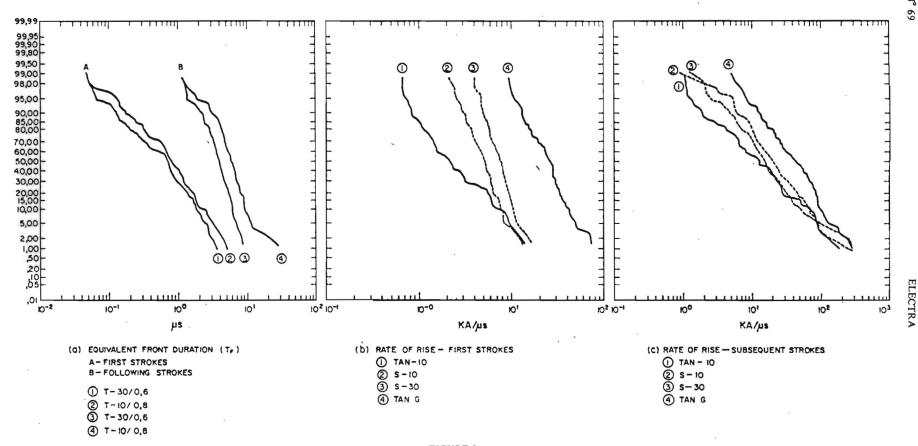


FIGURE 9

Distributions des fréquences cumulées des paramètres de forme du front d'onde Cumulative frequency distributions of impulse front shape parameters

- a) Durée de front équivalente (T_f) Equivalent front duration (T_f) A Décharge principale First strokes

 B Décharges secondaires Following strokes

 b) Vitesse de montée Décharges principales Rate of rise First strokes

 c) Vitesse de montée Décharges secondaires Rate of rise Subsequent strokes

La définition plus rigoureuse du temps de front (par rapport à l'analyse précédente) n'a pas beaucoup changé la valeur médiane pour la décharge principale, la dispersion étant légèrement inférieure. Les temps de front T-30 sont bien sûr inférieurs à cause de la forme généralement concave du courant de la décharge principale.

Dans le cas des décharges secondaires, les temps de front médians sont relativement plus faibles dans la nouvelle évaluation et la dispersion est légèrement inférieure.

Mise à part la définition plus rigoureuse du temps de front, on considère que les différences selon l'évaluation qui apparaissent dans les tendances présentées par les résultats reflètent la difficulté d'une évaluation manuelle de fronts d'onde très raides.

- d) Les variations dans la vitesse de montée du courant à hauteur de 10 pour cent de son amplitude (TAN-10), pour la décharge principale ainsi que pour les décharges secondaires, soulignent les différences des caractéristiques de forme d'onde entre la décharge principale et les décharges secondaires et illustrent la variété de contraintes que les protections sont amenées à subir en service.
- e) On peut remarquer comme le montre la figure 9c que les distributions des paramètres de vitesse de montée pour les décharges secondaires sont toutes semblables (TAN-10, S-10, S-30 et TANG G) impliquant une concavité nettement moins prononcée du front de l'onde, par rapport à celle des décharges principales.

On estime donc que les paramètres rassemblés au Tableau I permettent une large description des caractéristiques du front d'onde, dans le cas de la décharge principale comme dans celui des décharges secondaires, pour ce qui est des coups de foudre descendants négatifs sur les structures élevées. La façon d'appliquer ces résultats aux cas pratiques des coups de foudre frappant les réseaux industriels, par exemple les lignes de transport, ou même au cas des coups de foudre au sol, reste cependant une question ouverte, car le rôle du leader ascendant et son influence éventuelle sur la concavité marquée des décharges principales demandent des éclaircissements. Par ailleurs, des différences semblables entre la décharge principale et les décharges secondaires ont été également observées dans les enregistrements de coups de foudre descendants sur le mât de 60 m [28] en Afrique du Sud ce que montrent les exemples de la figure 10. Bien que cette structure soit plus basse que les pylônes du Mont San Salvatore d'environ 10 m, la hauteur effective, si on tient compte du terrain, est bien inférieure et l'effet de la structure sur les coups de foudre devrait être réduit.

A ce sujet, on peut trouver des indications en analysant les formes d'ondes initiales des variations du champ de radiation électro-magnétique dans le cas de coups de foudre au sol. Une grande quantité de résultats est disponible aux USA [51]-[54] où la recherche s'oriente également vers la détermination des caractéristiques de forme d'onde du coup en retour à partir de mesures à distance. Des données représentatives des temps de montée des variations de champ sont rassemblées au The more rigorous definition of front time (compared to the previous analysis), has, in the case of first strokes, not changed the median value greatly but the dispersion is slightly less. The T-30 front times are of course lower, because of the generally concave shape of the first stroke current.

In the case of subsequent strokes, the median front times from the new evaluation are relatively more reduced, and the dispersion slightly less.

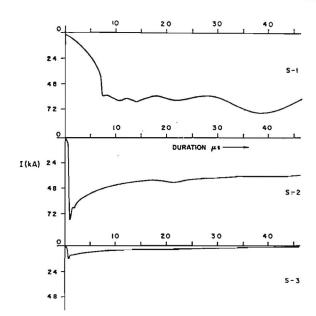
Apart from the more rigorous definition of front time, it is considered that the differences apparent in the trends of the newly evaluated data – in relation to the previous analysis, again reflect the difficulty of manually evaluating steeply rising impulse fronts.

d) The variations in the rate of rise of current at the 10 percent current level (TAN-10) for both first and subsequent strokes again highlight the differences in impulse shape chracteristics for first and following discharges and illustrate the range of stresses that protective equipment may well experience in service;

e) It may be noted also that the distributions of the rate of rise parameters for following strokes are all essentially similar (i.e. TAN-10, S-10, S-30 and TAN G), as shown in Figure 9c, implying a significantly less pronounced degree of concavity of the wavefront, compared to first strokes.

It is considered therefore, that the parameters summarised in Table I provide a comprehensive description of the front impulse shape characteristics for first and subsequent negative downward strokes to a tall structure. The applicability of these data to downward flashes to practical engineering systems, such as transmission lines, or event for strikes to the ground, remains an open question however, because the role of the upward connecting leader and its possible influence on the pronounced concave shape of first strokes requires clarification. On the other hand, similar differences between first and subsequent stroke shapes have also been observed in records of downward flashes to the South African 60 m mat [28] - as shown by the examples in Figure 10. Although this structure is about 10 m lower than the San Salvatore towers, taking the terrain into account the effective height is very much less and presumably the structure effect on lightning would also be reduced.

Some guidance in this respect may be obtained from analysis of the initial impulse shapes of electro-magnetic radiation field change recordings from flashes to open ground. A considerable amount of data is available from the USA [51-54] where research is also being directed towards deducing return-stroke impulse shape characteristics from such remote measurements. Representative field-change risetime data are summarised in Table IV — which also includes a small sample of records recently



S – 1 première décharge – First stroke

FIGURE 10 Exemple de formes d'onde de courant de foudre lors de coups multiples (enregistrement à la station d'Afrique du Sud) Example of multiple stroke lightning current impulse-shapes

recorded at the South African station

S - 2 seconde décharge - Second stroke S - 3 troisième décharge - Third stroke

Duration : durée

Tableau IV - qui comporte également un petit échantillon de données obtenues récemment en Afrique du Sud. Ces temps de montée ont tous été mesurés du zéro jusqu'à l'amplitude de crête et peuvent donc être comparés avec les valeurs déduites précédemment des temps de front équivalents T_f dans le cas des mesures directes de courant présentées au Tableau III. De plus, on a remarqué [36]-[54] que les effets de la propagation et de la résistivité du sol pouvait réduire la vitesse de montée mesurée des variations du champ de radiation.

Les différents auteurs travaillant dans ce domaine n'ont pas tenté d'analyser plus à fond les distributions des formes d'onde de variation du champ et seules les valeurs moyennes du temps de montée sont disponibles. En général, les données du Tableau 4 confirment que les temps de montée des variations de champ lors des décharges secondaires sont plus courts que ceux des décharges principales. Cependant, à partir des moyennes pondérées de ces valeurs, on peut indiquer des valeurs respectives d'environ 3,6 µs et 2,2 µs pour la décharge principale et les décharges secondaires.

Ces caractéristiques doivent être comparées avec les valeurs des temps de front médians T_f données au Tableau III, pour la première décharge et pour les suivantes. Ainsi, en admettant une loi log-normale pour ces distributions, les valeurs des variations de champ ont tendance à montrer des temps de front pour la décharge principale inférieure à ceux de Berger pour les courants directs - sauf en ce qui concerne T-30, où ces temps sont presque comparables. Ceci pourrait indiquer que les mesures sur un front de faible concavité donneraient naissance à des erreurs qui masqueraient le résultat.

Dans leur analyse des formes d'onde de variation de champ, Weidman et Krider [54] séparent la forme d'onde, dans le cas de la décharge principale comme dans celui des décharges secondaires, en deux parties : une composante initiale à faible pente, suivie d'une composante rapide. En guise d'explication, ils associent la première composante au développement de streamers

obtained in South Africa. All these risetimes were measured from zero to peak amplitude and thus should be compared with the previously derived values of equivalent front times T_f for direct current measurements shown in Table III. In addition, it has been pointed out [36, 54] that propagation and soil resistivity effects could reduce the recorded rate of rise of the radiation field change.

The various workers in this field have not attempted to analyse the distributions of field change impulse shapes more fully and values for mean risetime only are available. In general, the data in Table 4 do confirm that risetimes for subsequent stroke field change impulse shapes are shorter than for first strokes. However, taking weighted means of these data, values of about 3,6 µsec and 2,2 usec are indicated for first and subsequent strokes respectively.

These figures should be compared with the values of median front times T, shown in Table III, for first and subsequent strokes. Thus, allowing for the possible lognormality of these distributions, the field change data tend to indicate front times for first strokes which are less than shown in Berger's data for direct currents except in the T_{30} case, where the times are more nearly comparable. This might suggest that measurement on the slow concave front could give rise to errors which would mask this result.

In their analysis of field change impulse shapes, Weidman and Krider [54] divide the impulse shape for both first and subsequent strokes into an initial slow rising component followed by a very rapid component and, as one explanation, attribute the former to the development of upware connecting streamers which are known to occur even from the ground. (It

TABLEAU IV - TABLE IV

Comparaison des mesures du temps de montée des variations du champ électrique (du zéro à la crête 100 pour cent) Comparison of Electric Field change Risetime measurements (zero to 100 percent peak)

Observateur Observer	Paramètre Parameter	N N	Moyenne <i>Mean</i> (μs)	Ecart-type Std. deviation (µs)
Fischer et Uman [51]	Temps de montée de la décharge principale First stroke risetimes	436	3,7	1,6
	Temps de montée des décharges secondaires Subsequent stroke risetimes	480	3,0	1,1
Lin et Uman [52]	Temps de montée de la décharge principale First stroke risetimes	708	3,4-4,0	1,3-2,2
	Temps de montée des décharges secondaires Subsequent stroke risetimes	1 191	1,2-2,9	0,76-1,4
Tiller et al [53]	Temps de montée de la décharge principale First stroke risetimes	182	2,7-3,7	0,9-1,2
	Temps de montée des décharges secondaires Subsequent stroke risetimes	314	2,1-2,6	0,8-1,0
Weideman et Krider [54] ⁽¹⁾	Temps de montée de la décharge principale First stroke risetimes	172	4,0-4,1	1,6-1,7
	Temps de montée des décharges secondaires Subsequent stroke risetimes	164	0,6-0,	0,2-0,5
Eriksson	Temps de montée de la décharge principale First stroke risetimes	116	2,7-3,5	2,1-2,7
	Temps de montée des décharges secondaires Subsequent stroke risetimes	60	1,9-2,2	0,8-1,2

⁽¹⁾ Seules les composantes lentes des formes d'onde ont été analysées dans cet échantillon.

ascendants d'interception, streamers dont on sait qu'ils apparaissent même à partir du sol. (Il est intéressant de remarquer qu'ils suggèrent, dans leur interprétation des données, des longueurs de streamers ascendants d'interception dépassant 100 m).

En général cependant, il apparaîtrait que les différences observées dans les temps de montée des variations du champ électrique, entre les enregistrements correspondant à la décharge principale et ceux correspondant aux décharges secondaires ne sont pas aussi marquées que celles déduites des mesures directes des formes d'onde du courant faites au Mont San Salvatore. Il est évident qu'un grand nombre de données sont nécessaires pour éclaircir ces questions, mais il peut être judicieux de prendre une attitude prudente vis-à-vis des formes d'onde de la décharge principale. Dans ce cas, les distributions correspondant aux "paramètres les plus raides" (notamment S-30, T-30 et TAN G pour la décharge principale) peuvent fournir des indications.

is interesting also to note that in interpreting their data, they suggest interconnecting upward streamer lengths in excess of 100 m).

In general, therefore, it would appear that the differences observed in electric field change risetimes between first and subsequent stroke records are not as pronounced as those determined from analyses of directly measured current impulse shapes on San Salvatore. It is evident that more data are required to clarify these aspects, but it may be advisable to assume a conservative attitude regarding first stroke impulse shapes, and here the distributions given for the "steeper" parameters, (namely, S-30, T-30 and TAN G on first strokes), may provide guidance.

⁽¹⁾ Slow components of impulse shapes only were analysed in this sample

4.2. Corrélations

Les corrélations entre les différents paramètres des formes d'onde de foudre ont été examinées antérieurement — à partir des évaluations manuelles originelles des enregistrements de Berger [25]. Dans ce paragraphe, de simples analyses de régression ont été réalisées sur les paramètres de forme d'onde, à partir des données digitalisées et traitées par ordinateur. On a supposé une régression linéaire sur le logarithme des variables, du type:

$$y = ax^b$$
 (où, $\ln y = a + b \ln x$)

En accord avec les décisions prises lors de la réunion 1978 du Groupe de Travail 33-01 (Foudre), les amplitudes des courants de crête ont été considérées comme variables indépendantes, et les corrélations sur les paramètres de forme d'onde ont été examinées à la fois pour la décharge principale et pour les décharges secondaires, ainsi que la relation liant les amplitudes de courant de crête des deux types de décharge.

Les résultats sont résumés aux tableaux 5 et 6, des exemples étant donnés aux figures 11 et 12.

Correlations amongst various lightning impulse shape parameters have been examined previously — based upon the original manual evaluations of Berger's records [25]. In this section, simple regression analyses of the impulse shape parameters have again been carried out, using the digitised and computer processed impulse shape data. Linear regression of the logarithms of the variates was again assumed; i.e. relationships of the form.

In response

4.2. Correlations

In response to the decisions noted at the 1978 meeting of WG 33-01 (Lightning) the peak current amplitudes have been adopted as the independent variables, and both first and subsequent stroke impulse shape parameter correlations have been examined, together with the relationship between first and subsequent stroke peak current amplitudes.

The results are summarised in Tables 5 and 6, with examples shown in Figures 11 and 12.

TABLEAU V - TABLE V

		T-10	T-30	TAN-10	S-10	S-30	TANG
PEAK 1	l (premier) (first) (premier) (first)	0,40 0,33	0,47 0,45	(0,12)	0,30 (0,20)	(0,19)	0,43
PEAK	(suivant) (following)	(0,15)	(0,00)	(0,05)	0,31	0,23	0,56

Les parenthèses signifient que les coefficients sont endessous des valeurs critiques au niveau de confiance 5 pour cent. (Les degrés de liberté des échantillons concernant la décharge principale et les décharges secondaires s'étendent respectivement entre 64 et 112).

On peut remarquer plusieurs points:

- a) La relation entre les amplitudes des courants de crête de la décharge principale et des décharges secondaires a été également examinée, mais le coefficient de corrélation déduit était seulement de 0,03 ceci montrant que ces paramètres sont statistiquement indépendants, comme cela avait été déjà observé par Weck et Hileman [3].
- b) Au Tableau V, il apparaît que les paramètres de front de la décharge principale sont marginalement mieux corrélés avec les amplitudes du courant de crête de la décharge principale qu'avec la crête absolue suggérant que cette dernière peut être causée par des processus secondaires tels par exemple les charges drainées par les embranchements.
- c) A l'inverse des analyses antérieures [25], une corrélation significative existe entre les vitesses de montée maximales du courant TANG et les amplitudes de crête des décharges secondaires (r = 0.56, ce qui est encore significatif au niveau de confiance

The brackets denote those coefficients which were below the critical values at the 5 percent level of significance. (Degrees of freedom for first and subsequent stroke samples ranged between 64 and 112 respectively).

Several points may be noted:

- a) The relationship between first and subsequent stroke peak current amplitudes was also examined but the resultant correlation coefficient was only 0,03 indicating that these parameters are essentially independent statistically, as had been observed previously by Weck and Hileman [3].
- b) From Table V, first stroke front parameters correlate marginally better with the amplitudes of the first current peak, rather than with the absolute peak suggesting possibly that the latter may also be determined by secondary processes such as the charges lowered in branches, for example.
- c) In contrast to the earlier analyses [25], a significant correlation is indicated between the maximum rate of rise of current TANG and subsequent stroke peak amplitudes, (r = 0.56), which is still significant at the 99 percent confidence level). As previously

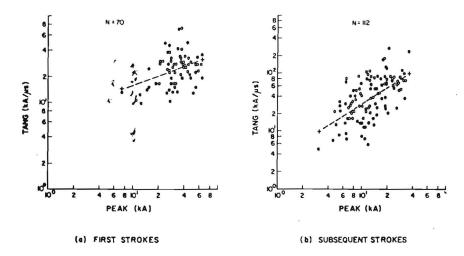


FIGURE 11

Corrélation entre les vitesses de montée maximales et les amplitudes des courants de crête Correlation between maximum rate of rise and peak current amplitude

a) Décharges principales - First strokes
 b) Décharges secondaires - Subsequent strokes
 Peak: Crête

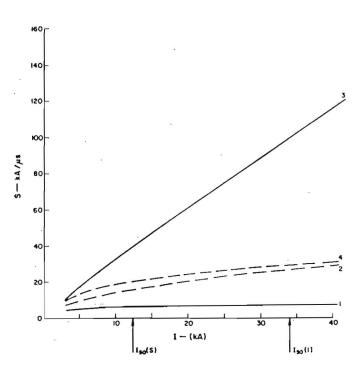


FIGURE 12

Relations déduites entre la raideur de l'onde S et l'amplitude du courant de crête l Derived relationships between Impulse steepness - S and peak current amplitude - I -

1 - S_m Décharges principales - First strokes

2 - S₃₀ Décharges principales - First strokes

 $3 - S_m$ Décharges secondaires - Subsequent strokes

4 - S₃₀ Décharges secondaires - Subsequent strokes

99 pour cent). Comme cela a déjà été noté, on considère que le manque de corrélation existant dans les analyses antérieures peut refléter les difficultés d'évaluation manuelle des vitesses de montée élevées.

En tenant compte que l'on peut représenter sous forme log-normale les distributions de nombreux paramètres de forme d'onde parmi ceux présentés au Tableau I, on peut appliquer la distribution log-normale

noted, it is considered that the lack of correlation in the earlier analyses may reflect the difficulties of manual evaluation of steep rates of rise.

Bearing in mind that the distributions of many of the impulse shape parameters presented in Table I may be represented by the log-normal form, the bivariate log-normal distribution may be applied, togebivariante avec les coefficients de corrélation correspondants pou établir entre la raideur S de l'onde et le courant de crête I des relations de la forme :

relationship between impulse steepness S and peak current I of the form :

$$S = aI^b$$

Cette analyse a été réalisée pour les raideurs maximales (S = TANG) et la raideur moyenne (S_{30}), pour la décharge principale et pour les décharges secondaires et elle se traduit par :

Décharges principales :

$$S_m = 3.9 I^{0.55}$$

($\sigma_{S/I} = 0.54$)

Décharges secondaires :

$$S_m = 3.8 I^{0.93}$$

($\sigma_{S/I} = 0.70$)

(Remarque: Dans l'analyse de la décharge principale, la distribution log-normale bivariante a été déduite des corrélations entre les paramètres de raideur et la première crête de courant (PEAK 1), puisque les données du Tableau 1 indiquent que seule la distribution de ce dernier paramètre peut être représentée par une loi log-normale).

Les relations données ci-dessus sont comparées graphiquement à la figure 13.

Une certaine prudence est cependant nécessaire pour appliquer ces expressions, puisqu'une dispersion existe certainement, comme le montrent les diagrammes de dispersion des figures 11 et 12 - et puisque les coefficients de corrélation sont variables - comme le montre par exemple le Tableau 6, dans le cas de la raideur maximale.

This analysis has been carried out for maximum steepness ($S_m = TANG$) and average steepness (S_{30}) for both first and subsequent strokes, as summarised below:

ther with the relevant correlation coefficients, to yield

First strokes:

$$S_{30} = 3.2 I^{0.25}$$

($\sigma_{S/I} = 0.61$)

Subsequent strokes

$$S_{30} = 6.9 I^{4,2}$$

($\sigma_{S/I} = 0.93$)

(Note: in the first stroke analysis, the bivariate lognormal distribution was derived from the correlations between the steepness parameters and the first current peak (PEAK-1), since the data in Table 1 indicate that only the distribution of the latter parameter could be represented by the log-normal form).

The above relationships are compared graphically in Figure 13.

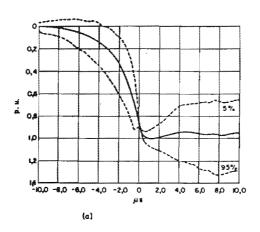
A degree of caution is necessary in applying these expressions, however, since dispersion is certainly present, as indicated by the scatter diagrams in Figures 11 and 12, as well as by the spread in the regression coefficients — shown for example in Table 6, for the case of maximum steepness.

TABLEAU VI – TABLE VI

Résumé des corrélations entre les vitesses de montée maximales et les courants de crête

Summary of correlations between maximum rates of rise and peak current

*	Décharges principales First strokes	Décharges secondaires Subsequent strokes
	dI/dt en fo	A. William Co.
Grandeur de l'échantillon Number of sample Coefficient de corrélation	70	112
Correlation coefficient	0,38	0,56
Coefficient de régression (b) Regression coefficient (b) Intervalle à 95 %, inférieur (b ₁)	0,38	0,92
Lower 95 % interval (b ₁)	0,15	0,65
Intervalle à 95 %, supérieur (b _u) Upper 95 % interval (b _u)	0,60	1,20
Ordonnée à l'origine (a) Intercept (a) Intervalle à 95 %, inférieur (a ₁)	6,6	3,9
Lower 95 % interval (a1)	3,1	1,9
Intervalle à 95 %, supérieur (a _u) Upper 95 % interval (a _u)	14,3	7,9



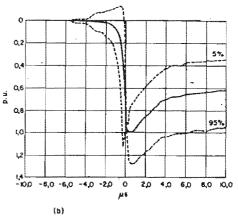


FIGURE 13

Formes de fronts de courants médians Median impulse current front shapes

a) Décharges principales - First strokes
 b) Décharges secondaire - Subsequent strokes

5. RESUME DES PROPOSITIONS

Dans ce paragraphe, on tentera de résumer les conclusions qui émergent des discussions précédentes et les paramètres de la foudre que l'on propose d'adopter pour les applications industrielles.

5.1. Paramètres d'incidence

5.1.1. Densité de coups de foudre au sol (Ng)

Autant que possible, les valeurs de N_g seront déduites de mesures directes faites avec des compteurs CIGRE. A défaut et bien que ce soit un mauvais compromis, on peut utiliser la relation ci-dessous pour obtenir une estimation approximative :

$$N_g = 0.023 \ T_d^{1,3} \ {\rm km}^{-2} \ {\rm ann\acute{e}e}^{-1} \ {\rm year}^{-1}$$

Les estimations de N_g qui en résultent sont sujettes à une dispersion d'environ \pm 100 pour cent. On conseille fortement aux pays ne disposant pas de mesures directes de N_g d'installer des compteurs dès que possible.

5.1.2. Incidence des coups de foudre positifs

Le coup de foudre descendant de polarité négative est considéré comme le processus de décharge le plus important dans la pratique vis-à-vis des réseaux industriels.

On constate cependant une incidence possible de coups de foudre positifs d'environ 10 pour cent et on estime vraisemblable que cette incidence varie avec la saison, comme avec les différentes régions du globe et avec la proéminence des structures. Ainsi, il apparaît nécessaire que l'incidence et les caractéristiques des coups de foudre positifs soient mesurées dans différents pays.

5. SUMMARISED PROPOSALS

In this section an attempt will be made to condense the conclusions emerging from the preceding discussions, and to summarise those lightning parameters which it is proposed should be adopted for practical engineering application.

5.1. Parameters of incidence

5.1.1. Ground flash density (N_{σ})

Whenever possible, values of $N_{\rm g}$ should be determined from direct measurements using CIGRE flash counters. Failing that, and recognising this as a poor compromise, the relationship below may be used to obtain an approximate estimate:

The resultant estimates of N_g are subject to a dispersion of about \pm 100 percent. Countries not having direct measurements of N_g are strongly advised to install counters as soon as possible.

5.1.2. Positive flash incidence

The downward negative flash is considered to be the most important discharge process for practical engineering systems.

The possibility of a positive flash incidence of about 10 percent is noted, however, and it is thought likely that this incidence may well vary seasonally, as well as in different regions of the world and on prominent structures. The incidence and characteristics of positive flashes thus requires to be measured in different countries.

5.1.3. L'effet des structures élevées sur l'incidence des coups de foudre

L'effet majeur des structures élevées est d'entraîner une augmentation substantielle des coups de foudre ascendants (avec l'accroissement des hauteurs) et donc de modifier la distribution des amplitudes des courants observés sur ces structures, la combinaison de coups de foudre ascendants et descendants étant fonction de la hauteur.

L'incidence moyenne des coups de foudre descendants sur les structures élevées peut être estimée à partir de la valeur de N_g usuelle dans la région concernée, et par une relation empirique donnant le rayon de capture équivalent :

$$N_d = N_g \pi R^2 \times 10^{-6}$$
 coups descendants/an

ù

$$R = 16,3 H_{\rm s}^{0,61} \, {\rm m}$$

pour une structure de hauteur H_s (en m).

Il existe cependant une possibilité, en attendant que soient disponibles des données plus précises sur les distances d'amorçages de la foudre aux lignes de transport, qui est d'estimer le nombre de coups de foudre frappant la ligne par l'expression suivante (sujette à une dispersion d'environ ± 50 pour cent):

$$N_d = N_g (2R + W) \times 10^{-1}$$

coups de foudre par 100 km/an

en prenant H_s comme hauteur effective moyenne des câbles de garde espacés de W (m), ou comme hauteur effective moyenne des conducteurs espacés de W pour obtenir la valeur de N_d la plus élevée.

5.1.4. L'incidence et les caractéristiques des coups de foudre multiples

L'incidence des coups de foudre multiples varie considérablement, mais, en moyenne 55 pour cent environ des coups de foudre comportent plus d'une décharge alors qu'environ 90 pour cent n'en comportent pas plus de huit.

On peut prendre égal à 3 le nombre moyen de décharges par coup de foudre. Si l'on exclut les coups de foudre comportant une seule décharge, il est proposé d'utiliser la distribution résultante donnée par la figure 6 pour laquelle la durée médiane du coup de foudre est d'environ 200 ms.

De même, on suggère d'adopter les valeurs généralisées suivantes pour les intervalles entre décharges: 35 ms (médiane) et 6 ms et 200 ms pour respectivement 95 pour cent et 5 pour cent des coups de foudre.

On remarque également qu'un pourcentage significatif de coups de foudre au sol (soit 5 à 10 pour cent environ et dans certaines circonstances davantage) peuvent présenter des racines réparties dans l'espace lors de l'impact. Les densités de coups de foudre au sol déterminées à partir des compteurs de coups de foudre devraient être accrues d'au moins 5 pour cent pour prendre en compte ce phénomène.

5.1.3. The effect of tall structures on flash incidence

The main effect of tall structures is to cause a substantial increase in the incidence of upward flashes (with increasing structure height) and thereby to modify the distribution of current amplitudes observed on such structures, due to the height dependent mixture of upward and downward flashes.

The average downward flash incidence to tall structures may be estimated from the prevailing value of N_g and an empirical relationship for an equivalent attractive radius R, as follows:

$$N_d = N_\sigma \pi R^2 \times 10^{-6}$$
 downward flashes per year

where

$$R = 16,3 H_s^{0,61} \text{ m}$$

for a structure height of H, (in m).

As one possibility therefore, until such time as more definite data are available on striking distances of lightning to transmission lines, the number of strikes to the line may be estimated from the following expression: (subject to a dispersion of about ± 50 percent):

$$N_d = N_g (2R + W) \times 10^{-1}$$

flashes per 100 km per year

using H_s as the mean effective height of earth or ground wires (m), spaced W (m) apart, or the mean effective height of conductors spaced W apart, whichever results in the greater value of N_d .

5.1.4. The incidence and characteristics of multiple stroke flashes

The incidence of multiple stroke flashes varies considerably, but, on average, about 55 percent of flashes have more than one stroke, while about 90 percent of flashes will not exceed 8 strokes.

The mean number of strokes per flash may be taken as 3. Excluding single stroke flashes, it is proposed that the summarising distribution given in Figure 6 be used, in which the median flash duration is about 200 msec.

Similarly, the adoption of the following generalised values for interstroke intervals is suggested: 35 msec (median), and 6 msec, and 200 msec, for 95 percent and 5 percent of flashes respectively.

It is noted also that a significant proportion of ground flashes (i.e. between about 5 percent and 10 percent and possibly on some occasions more) may display spatially distributed root termination behaviour. Ground flash densities determined from flash counters should be increased by at least 5 percent, to allow for this phenomenon.

5.2. Distribution des amplitudes des courants de crête des coups de foudre

5.2.1. Coups de foudre descendants négatifs

La distribution CIGRE [33] antérieurement déterminée a été modifiée pour ne contenir que les données correspondant soit aux mesures de coups de foudre descendants, soit aux coups de foudre issus de structures dont la hauteur ne dépasse pas 60 m. Les données en provenance de plusieurs régions du globe ont été analysées et la distribution cumulée résultante des amplitudes des courants de crête a une valeur médiane d'environ 34 kA. Bien que cela ne soit pas d'un point de vue statistique pleinement significatif, cette distribution peut être approximée par une loi log-normale de paramètres :

The earlier CIGRE distribution [33] has been modified to comprise only data either from downward flash measurements, or from structures having heights below 60 m. Data have been analysed from several parts of the world, and the resultant cumulative distribution of peak current amplitudes has a median value of about 34 kA. Although statistically not fully significant, this distribution may be approximated by a lognormal form having the parameters:

5.2. Distribution of flash peak current amplitudes

$$\overline{I} = 30 \text{ kA}$$
 $\sigma_{\log I} = 0.32$

Une autre approche qui peut être utile dans les applications industrielles consiste à considérer la distribution cumulée qui est représentée par deux droites sécantes en coordonnées log-normales qui passent par les points suivants :

An alternative approach which may be useful in engineering applications is to consider the cumulative distribution being represented by two straight line intercepts in a log-normal presentation — passing through the following intercepts:

ſ	Probabilité Probability
4 kA	98 %
20 kA	80 %
20 kA	80 %
90 kA	5 %

5.2.2. Effet de la hauteur de la structure

Sur la base des rares données disponibles, on suggère que la distribution résultante donnée ci-dessus soit adoptée et considérée comme indépendante de la hauteur pour l'application pratique aux structures industrielles.

5.3. Paramètres de forme d'onde

A l'inverse des analyses précédentes — qui avaient été basées sur une évaluation manuelle des données de Berger concernant la forme d'onde — on a analysé de nouveau ces données par un traitement à l'ordinateur des formes d'ondes digitalisées. On considère ce procédé comme exempt de toute subjectivité, subjectivité qui peut avoir affecté les évaluations manuelles précédentes.

On a souligné la caractérisation objective des formes de front, de la décharge principale et des décharges secondaires, lors de coups de foudre descendants négatifs et on donne un résumé complet des paramètres résultants dans les Tableaux I et II et dans les figures associées.

Une régression linéaire simple a été utilisée pour examiner les dépendances des paramètres du front des

5.2.2. Effect of structure height

On the basis of the little data available, it is suggested that the above summarising distribution be adopted without height dependency for application to practical engineering structures.

5.3. Impulse shape parameters

In contrast to previous analyses — which were based upon manual evaluation of Berger's impulse shape data, these data have been re-analysed using computerised analysis of digitised impulse shape data. This process is considered to be more independent of any measure of subjectivity, which may have been present during the earlier manual evaluations.

The emphasis has been placed upon objective characterisation of first and subsequent stroke front shapes of negative downward flashes and a full summary of the resultant parameters is given in Tables I and II, and the associated figures.

Simple linear regression was used to examine the dependencies of impulse shape front parameters upon

formes d'ondes avec les amplitudes des courants de crête de la décharge principale et des décharges secondaires.

On observe qu'il n'y a aucune corrélation entre les amplitudes des courants de crête de la décharge principale et celles des décharges secondaires, qui en moyenne atteignent environ 40 pour cent des amplitudes de la décharge principale. (Des valeurs médianes de 31 kA et 12,3 kA ont été obtenues pour les distributions des amplitudes des courants de crête respectifs de la décharge principale et des décharges secondaires).

Des corrélations positives existent entre les vitesses de montée maximales et les courants de crête, aussi bien pour la décharge principale que pour les décharges secondaires, et on a déduit les relations suivantes:

Décharge principale :
$$S_m = 3.9 I^{0.55}$$
 (kA/ μ s)
Décharges secondaires : $S_m = 3.8 I^{0.93}$ (kA/ μ s)

Il n'a été fait aucune nouvelle évaluation ni de la forme de la queue des courants de foudre, ni de la durée des décharges qui en résulte. L'évaluation antérieure des données de Berger [25] est considérée comme satisfaisante et elle donne les valeurs suivantes de la durée : the peak current amplitudes of first and subsequent strokes.

It is observed that there is no correlation between first and subsequent stroke peak current amplitudes, but that on average subsequent strokes attain about 40 percent of the first stroke amplitudes. (Median values of 31 kA and 12,3 kA were obtained for the peak current distributions of first and subsequent strokes respectively).

Positive correlations are indicated between maximum rates of rise and peak currents, for both first and subsequent strokes and the following relations have been derived.

First strokes
$$S_m = 3.9 I^{0.55}$$
 $(kA/\mu s)$
Subsequent strokes: $S_m = 3.8 I^{0.93}$ $(kA/\mu s)$

No new evaluation of the shape of the tail of lightning current impulses has been made nor of the consequent duration of strokes. The previous evaluation of Berger's data [25] is considered adequate, giving values of duration as follows:

	Pourcentage des cas qui dépassent la valeur du tableau Percent of cases exceeding tabulated values		
•	95 %	50 %	5 %
90 décharges principales négatives 90 negative first strokes	30 μs	75 μs	200 μs
115 décharges secondaires négatives 115 negative following strokes	6,5 μs	32 μs	140 μs

6. CONCLUSION

On a essayé dans ce rapport de passer en revue les connaissances disponibles au sujet des paramètres de la foudre qui sont de première importance dans les applications industrielles, et d'aboutir à des propositions concernant leurs différentes valeurs et les relations qui les lient.

Dans un grand nombre de cas, les données sont plutôt réduites et ces propositions doivent rester expérimentales jusqu'à ce que des données supplémentaires ou de meilleure qualité puissent être obtenues et jusqu'à ce qu'elles apportent des éclaircissements sur les différentes questions abordées.

Un point important est contesté qui est de savoir si les formes d'onde de courant, qui sont enregistrées de façon très complète dans des stations telles que San Salvatore, sont réellement représentatives des formes d'onde impliquées dans les coups de foudre au sol ou sur des structures de moindre hauteur. Ce point a été examiné dans le Chapitre 4 et une timide conclusion serait que les différences entre les caractéristiques de

6. CONCLUDING REMARKS

This paper has attempted to review the available knowledge on those lightning parameters of primary importance in engineering applications and to arrive at specific proposals for various values and relationships.

In many instances, data are rather scanty and these proposals must remain tentative until more, or better data may be obtained which may clarify the various aspects involved.

On important point at issue is the question of whether the comprehensive current impulse shapes recorded at stations such as San Salvatore are, in fact, representative of the shapes involved in discharges to the ground, or to structures of lesser height. This point was examined in Section 4, and a tentative conclusion is that the differences between first and subsequent stroke impulse shape characteristics may be less pronounced for dis-

forme d'onde de la décharge principale et des décharges secondaires sont moins marquées pour les coups de foudre au sol que pour ceux observés sur des structures très élevées.

A titre provisoire, une autre approche consisterait à utiliser les caractéristiques de temps de front médian décrites aux figures 13a et 13b. On les a obtenues en normalisant toutes les formes d'onde de courant à leurs amplitudes au niveau 90 pour cent et en les alignant sur ce critère, par un mode de sommation similaire à celui employé dans l'estimation antérieure d'une forme d'onde "moyenne" [25]. Dans ce cas cependant, en tenant compte que beaucoup de paramètres du front d'onde pouvaient être correctement représentés par des distributions log-normales (comme le montre le Tableau 1), cette approximation a été retenue et les courbes donnent les valeurs médianes qui en découlent, ainsi que les niveaux 5 pour cent et 95 pour cent qui ont été déterminés à intervalles imposés sur le front pour les données normalisées globales. Ceci donne un moyen simple pour prévoir la dispersion des caractéristiques deformes d'onde de la décharge principale et des décharges secondaires. (Il est à remarquer qu'on ne doit attacher aucune signification aux discontinuités des courbes correspondant aux niveaux 5 pour cent et 95 pour cent, discontinuités qui sont proches du point commun d'alignement. Ceci provient de la technique de sommation et est une conséquence du fait que toutes de formes d'onde de la décharge principale et des désant ainsi arbitrairement à zéro les dispersions des distributions).

On n'a pas essayé dans ce rapport d'examiner les concepts électro-géométriques ou les relations donnant les distances d'amorçage, en considérant qu'il était nécessaire de définir d'abord de façon correcte les paramètres industriels fondamentaux de la foudre. Au vu des hypothèses faites dans la pratique industrielle moderne [1,55], il apparaîtrait que des erreurs se compensant mutuellement sont en fait présentes dans les études actuelles devant déterminer les performances. Ainsi, la relation empirique pour calculer N_g , qui est suggérée au chapitre 2, indique la possibilité de valeurs plus basses de ce paramètre pour une valeur déterminée de T_d – en comparaison avec la pratique antérieure. Par ailleurs, la distribution cumulée modifiée qui est proposée pour les amplitudes de courant, donnée au chapitre 3 et supposée indépendante de la hauteur, comme cela est suggéré, indique des valeurs médianes du courant substantiellement plus élevées que celles prévues antérieurement. Cependant, en prenant en compte les deux aspects, l'incidence résultante des coups de foudre ayant des courants dépassant une certaine amplitude peut rester similaire à celle calculée sur la base des hypothèses actuelles, justifiant ainsi les corrélations entre les performances réelles et prévues des lignes de transport.

Il apparaîtrait donc nécessaire d'évaluer les conséquences de l'adoption de certaines propositions contenues dans ce rapport avant que leur influence sur d'autres facteurs tels que les concepts électro-géométriques puisse être examinée.

charges to ground, than have been observed on taller structures.

For the interim, an alternative approach could be to utilize the median front time characteristics depicted in Figures 13a and 13b. These have been arrived at by normalising all current impulse shapes to their 90 percent amplitudes and aligning them upon this point, in a summation process similar to that followed in the earlier estimation of an "average" impulse shape [25]. In this case, however, in view of the fact that many of the front parameters may be adequately represented by lognormal distributions (as shown in Table 1), this approximation was assumed and the curves depict the subsequent median values, together with the 5 percent and 95 percent intercepts, which were determined at prescribed intervals along the front, for the normalised and summated data. This provides a simple means for observing the anticipated dispersion of first and subsequent stroke impulse shape characteristics. (Note that no significance should be attached to the discontinuities in the 5 percent and 95 percent intercept curves close to the point of shape alignment. These arise out of the technique of summation and are a consequence of the fact that all shapes were aligned at this point - thereby arbitrarily forcing the standard deviations of the distributions to zero).

No attempts have been made in this paper to examine any electrogeometric concepts or striking distance relationships, since it was considered necessary that the basic lightning engineering parameters should first be adequately defined. When viewed in the light of assumptions in modern engineering practice [1,55], it would appear that mutually compensating errors may, in fact, be present in existing performance studies. For example, the empirical relation for N_g suggested in Section 2, indicates the possibility of lower values for this parameter for a given value of T_d – compared to previous practice. On the other hand, the proposed modified cumulative distribution for current amplitudes, given in Section 3, taken together with the absence of height dependency, as suggested, indicates substantially higher median values of current, than previously assumed. When both aspects are taken into account however, the resultant incidence of strikes having currents in excess of a particular magnitude may still be similar to that calculated on the basis of present assumptions, thus accounting for close correlations between predicted and actual line performance.

It would appear necessary therefore that the impact of the adoption of several of the proposals contained in this paper should be evaluated, before their influence upon other factors, such as electrogeometric concepts, can be examined.

7. REMERCIEMENTS

Les auteurs ont apprécié la contribution de H. Kröninger, qui a prêté son concours au traitement statistique des données concernant les formes d'onde et qui a développé les techniques informatiques pour leur analyse.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors record their appreciation of the contributions of H. Kröninger, who assisted with the statistical processing of the impulse shape data and who developed the computerised techniques of impulse shape analysis.

8. BIBLIOGRAPHIE - 8. REFERENCES

- [1] A.R. Hileman. Parameters of the lightning flash. 33-77 (WG 01) 11 IWD.
- [2] K.H. Weck. Application of lightning parameters. 33-74 (WG 01) 10 IWD.,
- [3] K.H. Weck and A.R. Hileman. Application of lightning parameters current shape and amplitudes of multiple strokes. 33-78 (WG 01) 11 IWD.
- [4] Liew Ah Choy and M. Darveniza. A sensitivity analysis of lightning performance calculations for transmission lines. *IEEE Trans. PAS*; Vol. PAS-90, 1971, pp. 1443-1451.
- [5] R.B. Anderson, H.R. Van Niekerk, S.A. Prentice and D. Mackerras. Improved lightning flash counters. Draft article for publication in Electra based upon 33-78 (TF 33-01-01) 5 IWD.
- [6] S.A. Prentice. CIGRE lightning flash counter: Parts I and II. Electra No. 22, May 1972, pp. 149-171.
- [7] R.B. Anderson, D.V. Meal and M.A. Smith. Eleventh progress report on the development and testing of lightning flash counters in the Republic of South Africa — during 1978/79. CSIR Special Report ELEK 168, May 1979.
- [8] S.A. Prentice and D. Mackerras. Recording range of a lightning flash counter. *Proc. IEE* (London), Vol. 116, No. 2, February 1969, pp. 294-302.
- [9] G. Fruhauf, H. Amberg and W. Wirster. Wirkungsweise und Reichweite von Blitzzahlern. Elektrotech. Z., Ausg. 1966 (b), Suppl. 6, pp. 1-46.
- [10] R. Muhleisen and R.B. Anderson. Private communication. December 1978.
- [11] S.A. Prentice. Frequency of lightning discharges. Lightning, Vol. 1, Chapter 14. (Academic Press, London 1977), edited by Golde.
- [12] AJ. Erksson. Reply to discussion on paper "Lightning and tall structures". Trans. S. African Inst. of Elec. Engs, Vol. 70, No. 5, May 1979.
- [13] F. Popolansky. Correlation between the numbers of lightning flashes registered by lightning flash counters, the number of thunderstorm days and the duration of thunderstorms. CIGRE Report SC 33-71 (WG 011TF 01) 08/CS-IWD, May 1971.
- [14] K. Berger. Lightning-current parameters of upward strokes measured at Monte San Salvatore, Lugano. C.E. Trans. 7358, from Bull. SEV/VSE 69, pp. 353-359, April 1978.
- [15] R.B. Anderson and R.D. Jenner. A summary of eight years of lightning investigation in Southern Rhodesia, Part I, Trans. S. African Inst. of Elec. Engs 1954, Vol. 45, Part 7, p. 215.
- [16] R.B. Anderson. The lightning discharge Part 1. Ph. D. Thesis CSIR Special Report ELEK 12, 1971.
- [17] F. Popolansky. The dependence of polarity of lightning currents on the frequency distribution measured on objects with various heights in CSSR. 33-74 (WG 01) 08 IWD.
- [18] F. Popolansky. Measurement of lightning currents in Czechoslovakia and the application of obtained parameters in the prediction of lightning outages of EHV transmission lines. Mesure des courants de foudre en Tchécoslovaquie et application des paramètres obtenus à la prévision des interruptions ducs à la foudre sur les lignes de transport à très haute tension. CIGRE 1970, No. 33-03.
- [19] D. Mackerras. A comparison of discharge processes in cloud and ground lightning flashes. Jour. Geophys. Res., Vol. 73, No. 4, February 15, 1968.
- [20] E.C. Halliday. The polarity of thunderclouds. Proc. Roy. Soc., A. Vol. 138, 1933.
- [21] J. Huse. Lightning current measured on a 240 m high radio broadcasting tower. 33-78 (WG 01) 07 IWD.
- [22] T. Takeuti, M. Notaro, H. Ishikawa and S. Israelsson. Notes and correspondence on the two types of thunderstorm deduced from cloud to ground discharges observed in Sweden and Japan. J. Met. Soc. of Japan, Vol. 55, No. 6, December 1977, pp. 613-617.
- [23] R.B. Anderson, H.R. Van Niekerk, D.V. Meal and M.A. Smith. Tenth progress report on the development and testing of lightning flash counters in the Republic of South Africa during 1977/78. CSIR Special Report ELEK 148, July 1978.
- [24] R.H. Golde. Lightning currents and related parameters. Chapter 9 of Lightning, Vol. I (Academic Press, London, 1977).
- [25] K. Berger, R.B. Anderson and H. Kröninger. Parameters of lightning flashes. Electra No. 41, July 1975, pp. 23-27.
- [26] R.B. Anderson, A.J. Eriksson and H. Kröninger. Lightning and tall structures some preliminary observations. 4th Int. Conf. on Gas Discharges, IEE Conf. Publication No. 143, September 1976.
- [27] R.B. Anderson. Measuring techniques. Lightning, vol. 1, Chapter 13. (Academic Press, London 1977), edited by Golde.
- [28] AJ. Eriksson. Lightning and tall structures. Trans. S. African Inst. of Elec. Engs, Vol. 69, Pt 8, August 1978, pp. 238-252.
- [29] V.V. Bourgsdorf. Lightning protection of overhead transmission lines and operating experience in the USSR. Protection contre la foudre des lignes aériennes de transport d'énergie et données expérimentales sur son exploitation en URSS. CIGRE 1958, No. 326.
- [30] J.G. Anderson. Lightning performance of EHV-UHV lines Chapter 12 of Transmission line Reference Book 345 kV and above (EPRI - Palo Alto, Ca. USA, 1975).
- [31] B.F.J. Schonland. The lightning discharge. Handbuch der Physik, Vol. 22, pp. 576-628. (Springer Verlag OHG, Berlin, 1956).

- [32] K. Berger. The earth flash. Chapter 4 of Lightning, Vol. I (Academic Press, London 1977).
- [33] F. Popolansky. Frequency distribution of amplitudes of lightning currents. Electra No. 22, May 1972, pp. 139-147.
- [34] A.j. Eriksson, H.R. Van Niekerk, G.W. Bourn and B.B. Van Zyl. Lightning ground flash multiple stroke discriminator. Proc. IEE, Vol. 125, No. 6, June 1978.
- [35] R.D. Brantley, J.A. Tiller and M.A. Uman. Lightning properties in Florida thunderstorms from video tape records. J. Geophys. Res, Vol. 80, No. 24, August 1975, pp. 3402-3406.
- [36] N. Cianos and E.T. Pierce. A ground lightning environment for engineering usage. SRI Technical Report 1, August 1972.
- [37] D.J. Malan. The relation between the number of strokes, stroke interval and the total duration of lightning discharges. Geofisica Pura e Applicato Milan, Vol. 34, pp. 224-230, 1956.
- [38] D.A. Kulijew. Oscillographische Blitzuntersuchungen in der Gebirgsgegend Aserbaidshans. 13th Int. Blitzschutzkonferenz, Vienna, 1976.
- [39] A.J. Eriksson. The measurement of lightning and thunderstorm parameters, result for the 1977/78 season. CSIR Special Report ELEK 149, 1978.
- [40] E.T. Pierce. Electrostatic field changes due to lightning. Qtrly Jour. Roy. Met. Soc., 81 (348), pp. 211-228, 1955.
- [41] B.F.J. Schonland, D.J. Malan, H. Collens. Progressive lightning II. Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 152, p. 595.
- [42] A.J. Eriksson. An unusual lightning flash? Weather, Vol. 32, No. 3, March 1977, pp. 102-106.
- [43] A.E. Carte, J.C.G. De Jager. Multiple strokes of lightning. J. Atmos. Terr. Phys., Vol. 41, pp. 95-101, 1979.
- [44] F. Popolansky. Preliminary report on lightning observations on high objects in CSSR. 33-76 (WG 01) 24 IWD.
- [45] F. Popolansky. Frequency distribution of lightning current amplitudes on lower objects. 33-79 (WG 01) 5 IWD.
- [46] M.A. Sargent. The frequency distribution of current magnitudes of lightning strokes to tall structures. IEEE Trans. PAS-95, No. 5, September/October 1976.
- [47] R.B. Anderson. A comparison between some lightning-parameters measured in Switzerland with those in Southern Africa. A report to CIGRE WG 33-01 CSIR Special Report ELEK 6, May 1971.
- [48] R.B. Anderson. Contribution to the discussion of Eriksson's paper (28). Accepted for publication in Trans. S. African Inst. of Elec. Engs.
- [49] H. Kroninger. Further analysis of Prof. Berger's San Salvatore lightning current data. CSIR Special Report ELEK 53, July 1974.
- [50] W.J. Conover. Practical non-parametric statistics. Chapter 6, (John Wiley & Sons Inc.) New York, 1971.
- [51] R.J. Fisher, M.A. Uman. Measured electric field risetimes for first and subsequent lightning return strokes. J. Geophy. Res., Vol. 77, No. 3, January 1972.
- [52] Y.T. Lin, M.A. Uman. Electric radiation fields of lightning return strokes in three isolated Florida thunderstorms. J. Geophy. Res., Vol. 78, No. 33, November 1973.
- [53] J.A. Tiller, M.A. Uman, Y.T. Lin, R.D. Brantley. Electric field statistics for close lightning return strokes near Gainesville, Florida. J. Geophys. Res., Vol. 81, No. 24, August 1976.
- [54] C.D. Weidman, E.P. Krider. The fine structure of lightning return stroke waveforms. J. Geophys. Res., Vol. 83, No. C12, December 1978.
- [55] M. Darveniza, M.A. Sargent, G.J. Limbourn, Liew Ah Choy, R.O. Caldwell, J.R. Currie, B.C. Holcombe, R.H. Stillman, R. Frowd. Modelling for lightning performance calculations. Submitted for publication 1978.