COMMUNICATIONS

PARAMÈTRES DES COUPS DE FOUDRE

par K. BERGER, R.B. ANDERSON
et H. KRÖNINGER
du Comité d'Etudes n° 33
(Surtensions et coordination de l'isolement)

Rapport publié à la demande du Président du Comité
M. V. PALVA

1. — Introduction.

Le Comité suisse des recherches en haute tension exploite depuis 1943 une station de mesure des phénomènes de foudre au Mont San Salvatore près de Lugano, Suisse. L'objet principal de ces mesures était l'enregistrement des formes de courant des coups de foudre qui frappent deux pylônes de télévision installés sur cette montagne. Des photographies de nuit ont été prises de coups de foudre se produisant dans le voisinage et l'on a également procédé plus récemment à des enregistrements du champ électrique au cours des orages. Des rapports décrivant l'installation de mesure et rendant compte des résultats obtenus ont été publiés en premier lieu par Berger en 1955 [1, 2], puis par Berger et Vogelsanger en 1965 [3] et à nouveau en 1966 [4]. En 1967 Berger a présenté l'un des cinq articles sur la foudre parus dans une édition spéciale du Journal du Franklin Institute [5].

Finalement, les résultats des mesures effectuées entre 1963 et 1971 ont été publiés par Berger en 1972 [6] et l'année suivante [7]. Au cours de l'année 1972, une partie des données recueillies pendant la période 1963-1971 a été analysée plus en détail; un ordinateur a été utilisé cette fois pour déterminer les courbes de fréquences cumulées, séparément pour les coups de foudre positifs, pour les premières composantes et pour les composantes suivantes des coups de foudre négatifs, ainsi que pour calculer les corrélations correspondantes. Le présent rapport présente des formes de courant de foudre et donne un résumé de tous les résultats obtenus.

2. — Paramètres des courants de foudre.

2.1. — *Définition des catégories.*

On a trouvé que l'ensemble des coups de foudre frappant les pylônes du Mont San Salvatore pouvait

PAPERS

PARAMETERS OF LIGHTNING FLASHES

by K. BERGER, R.B. ANDERSON
and H. KRÖNINGER
of Study Committee No. 33
(Overvoltages and Insulation Co-ordination)

Paper published at the request of the Chairman of the Committee
Mr. V. PALVA

1. — Introduction.

Ever since 1943 the Swiss high-voltage research committee has been maintaining a lightning measurement station on the Monte San Salvatore near Lugano, Switzerland. The main purpose of these measurements was to record current shapes of lightning flashes striking two television towers on the mountain. During the night photographs were taken of lightning flashes occurring in the vicinity, and more recently recordings of the electric field during a thunderstorm were also made. Reports on the measuring installation and the results obtained were published first by Berger in 1955 [1, 2], and later by Berger and Vogelsanger in 1965 [3] and again in 1966 [4]. In 1967 Berger contributed one of the five articles on lightning for a special edition of the Franklin Institute Journal [5].

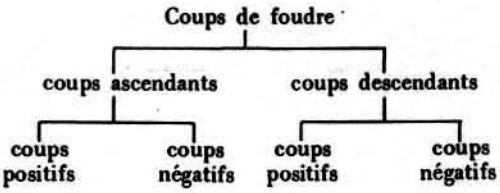
Finally, the results of measurements between 1963 and 1971 were published by Berger in 1972 [6] and in the following year [7]. During 1972 some of the data collected over the period 1963-1971 were analyzed in more detail; this time a computer was used to determine cumulative distributions for positive strokes, and for negative first and subsequent strokes separately, and to calculate relevant correlations. Representative lightning current shapes and a summary of all results are given in this report.

2. — Parameters of lightning currents.

2.1. — Definitions of categories.

It has been found that the ensemble of lightning flashes striking the towers on Monte San Salvatore

être groupé en catégories distinctes, comme il est indiqué ci-dessous.



Dans le présent rapport, la convention adoptée est que la polarité d'un coup de foudre est celle de la charge du nuage et elle peut facilement être identifiée d'après la polarité des courants mesurés. Les coups de foudre ascendants, qui constituent la majorité des coups au Mont San Salvatore, peuvent être identifiés par le fait qu'ils se ramifient vers le haut, quand une photographie du coup a été prise, ou, sinon, par la présence de courants de quelques centaines d'ampères se maintenant pendant des dizaines ou centaines de millisecondes et pouvant être suivis, soit immédiatement, soit après une brève interruption, d'une ou plusieurs impulsions de courant. D'autre part, les coups de foudre descendants se ramifient vers le bas et n'engendrent pas de courants de prédécharge de durée supérieure à quelques millisecondes.

Etant donné qu'on pense que les coups ascendants sont essentiellement associés à l'effet des pylônes de télévision installés sur le Mont San Salvatore, l'analyse présentée dans le rapport actuel traite uniquement des coups de foudre descendants, considérés comme plus représentatifs de la foudre naturelle. Toutefois, dans cette catégorie, un coup de foudre peut ne comporter qu'une seule impulsion de courant, ou, se composer au contraire d'une succession d'impulsions séparées par des intervalles de temps au cours desquels il ne s'écoule que peu ou pas de courant. On dit alors qu'il s'agit d'un coup de foudre multiple et, dans ce cas, la première impulsion présente des caractéristiques différant notablement de celles des impulsions suivantes, de sorte que lorsqu'on détermine les paramètres caractéristiques des impulsions composant les coups de foudre il est nécessaire de répartir celles-ci en deux catégories au moins, à savoir :

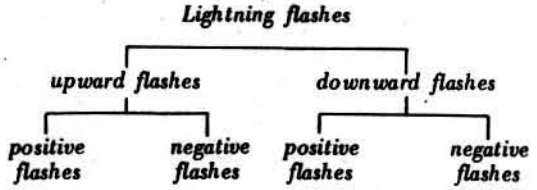
(a) première composante;
(b) composantes suivantes.

A la condition qu'il n'y ait pas d'autre facteur variable exerçant une influence significative sur le processus de la décharge de foudre, on devrait trouver, dans chacune de ces catégories de courants de coup de foudre, une population de courants homogène et l'on devrait pouvoir s'attendre à ce que l'ensemble des mesures fournisse des résultats uniformes, en dehors de différences mineures attribuables à des erreurs résiduelles. Ces résultats devraient donc présenter une répartition donnée (normale ou logonormale par exemple) autour de la moyenne de la population.

2.2. — *Choix des paramètres.*

La forme des coups de foudre et de leurs composantes peut être caractérisée par un petit nombre de

may be grouped into distinct categories as shown below :



The convention adopted in this report is that the polarity of flashes is taken from the polarity of the charge in the cloud and is easily identified by the polarity of the measured currents. Upward flashes, which constitute the majority of the flashes at San Salvatore, may be identified by the upward branching of the flash if a photograph of the flash was taken or, failing this, by the continuing currents of a few hundred amps lasting tens or hundreds of milliseconds that may be followed immediately or after short current interruptions by one or several impulse currents. Downward flashes, on the other hand, branch downward and do not produce predischarge currents lasting more than a few milliseconds.

Since upward flashes are thought to be primarily associated with the effect of the television towers on Monte San Salvatore, the analysis presented in this report deals exclusively with downward flashes which are believed to be more representative of natural lightning. In this category, however, a flash may consist of only one current stroke or a succession of such strokes separated by intervals during which little, if any, current flows. The latter is termed a multiple stroke flash and in such a flash the first stroke displays characteristics which differ markedly from those of the following strokes, and thus when determining the characteristic parameters of lightning strokes, these should be separated into at least two separate categories, i.e.,

(a) first strokes, and
(b) following strokes.

Provided there are no further variable factors exercising a significant influence on the process of the lightning discharge, there should now, within these categories of lightning flash currents, be a homogeneous population of currents, and all measurements could be expected to yield uniform results apart from minor differences attributable to residual errors. These results should therefore follow some distribution (e.g. normal or lognormal) about the population mean.

2.2. — Selection of parameters.

The lightning flash and stroke current shape may be characterized by a few parameters, which are

paramètres, qui présentent également de l'intérêt lorsqu'on considère les dommages susceptibles d'être causés par un coup de foudre. Les paramètres mesurés sont les suivants :

(a) *Coup de foudre.*

(i) courant de crête — pic de courant le plus élevé du coup de foudre;

(ii) durée du coup de foudre — durée pendant laquelle il y a écoulement de courant ou, dans le cas d'un coup de foudre multiple, le temps qui s'écoule jusqu'à la fin de la dernière impulsion;

(iii) intervalles sans courant — intervalles de temps pendant lesquels il ne s'écoule aucun courant mesurable;

(iv) charge du coup de foudre — charge totale transportée par un coup de foudre.

(b) *Composantes d'un coup de foudre.*

(i) courant de crête — pic de courant le plus élevé d'une impulsion;

(ii) durée de front — intervalle de temps compris entre le point 2 kA du front et le premier pic;

(iii) durée de l'impulsion — intervalle de temps compris entre le point 2 kA du front et le point de la queue où l'amplitude du courant est tombée à 50 % de sa valeur de crête;

(iv) vitesse de montée maximale (raideur de front du courant) — tangente à plus forte pente du front d'une impulsion;

(v) charge du choc — charge électrique transportée par la partie variable de l'impulsion (le point de la queue de l'onde de courant à partir duquel la charge transportée n'a plus été considérée comme faisant partie de la « charge du choc » a été déterminé en examinant la forme du courant et il n'est donc pas défini de façon précise);

(vi) charge de l'impulsion — charge totale de l'impulsion, c'est-à-dire la charge du choc majorée de toute charge transportée par le courant continuant à s'écouler après la fin du choc;

(vii) énergie présumée de l'impulsion — énergie qui aurait été dissipée par le courant de l'impulsion s'écoulant à travers une résistance d'un ohm, c'est-à-dire $\int i^2 dt$ A^2s ou J/ohm. Cette définition fera l'objet d'une discussion ultérieure pour accord.

2.3. — *Répartition des variates.*

La répartition des mesures individuelles (variates) des paramètres dans leurs catégories respectives joue un rôle important de guide dans l'estimation des valeurs à escompter pour les mesures futures. Celles-ci peuvent être déduites, soit d'une connaissance préalable du processus physique engendrant un coup de foudre, soit la répartition même des échantillons recueillis. La prise en considération du processus physique, dans la mesure où nous comprenons bien ce dernier, ne fournit pas de raisons conduisant impérativement à admettre telle ou telle

also of interest when considering the possible damaging effect of a lightning stroke. The parameters which have been measured are the following :

(a) The lightning flash.

(i) peak current — the highest current peak in the flash;

(ii) flash duration — the length of time during which there is current flow or, in the case of a multiple stroke flash, until the completion of the last stroke;

(iii) no-current intervals — intervals between strokes of a flash during which no detectable current is flowing;

(iv) flash charge — the total charge transferred by a flash.

(b) Lightning strokes.

(i) peak current — the highest current peak in a stroke;

(ii) front duration — the time interval between the 2 kA point on the front and the first peak;

(iii) stroke duration — the time interval between the 2 kA point on the front and the point on the tail where the current amplitude has fallen to 50 % of its peak value;

(iv) maximum rate of rise (current steepness) — the steepest tangent on the front of a stroke;

(v) impulse charge — the electric charge transported by the rapidly changing part of the stroke (the point on the current tail after which the charge transported is no longer considered part of the " impulse charge " was determined by inspection of the shape and is therefore not precisely defined);

(vi) stroke charge — the total charge in the stroke, i.e. the impulse charge together with any charge transported by continuing current after the impulse;

(vii) prospective stroke energy — the energy which would be dissipated by the stroke current flowing through a one-ohm resistor, i.e. $\int i^2 dt$ A^2s or J/ohm. This definition is subject to further discussion and agreement.

2.3. — Distribution of variates.

The distribution of individual measurements (variates) of the parameters in their respective categories is an important guide as to the values expected to be found in future measurements. It may be inferred either from a foreknowledge of the physical process leading to the lightning discharge or from the sample distribution itself. Consideration of the physical process, as far as we understand it, does not provide compelling reasons to assume any particular distribution. The sample data itself must therefore provide the clue to which of the known dis-

répartition particulière. Ce sont donc les données elles-mêmes prises comme échantillons qui doivent servir à faire découvrir celle des répartitions connues qui peut s'adapter à elles avec un degré de confiance suffisant. Dans le passé, la répartition logarithmique a été généralement acceptée et des analyses antérieures [6] ont montré que la courbe des fréquences cumulées sur une base logarithmique s'apparente suffisamment avec les données dont on dispose, à un tracé rectiligne. La répartition logarithmique a donc été admise dans la présente analyse. Il faut toutefois prendre garde, dans les déductions qui en résultent, au fait qu'il peut très bien y avoir d'autres répartitions convenant aussi bien ou même mieux à ces données.

tributions can be fitted to the data with a sufficient degree of confidence. Historically the logarithmic distribution has become generally accepted and past analyses [6] showed that cumulative distributions on a logarithmic base produce a reasonable fit of the data to a straight line. The logarithmic distribution has therefore also been assumed in this analysis. Caution should, however, be exercised when using the implications of this, since there may well be other distributions which fit the data just as well or better.

2.4. — *Résultats.*

Les figures 1 à 10 établies avec une base logarithmique, montrent les courbes des fréquences cumulées de dix des paramètres du courant de foudre. La ligne droite a été tracée en minimisant la somme des carrés des distances des points (également reliés entre eux par des lignes droites) et elle peut donc être utilisée pour obtenir la meilleure estimation possible de la moyenne et de l'écart-type σ des logarithmes des variates de la distribution de la population.

Cela implique que la fonction de densité de probabilité $w(x)$ ait la forme suivante :

$$w(x) = (1/x\sigma\sqrt{2\pi}) \exp \{(\log x - \mu)^2/2\sigma^2\} \qquad (1)$$

et qu'elle soit donc complètement définie par les deux paramètres μ et σ.

Lorsqu'on compare les valeurs réelles aux valeurs données par la droite de régression, il est évident que des différences appréciables peuvent apparaître. Dans certains cas, en particulier lorsqu'il s'agit des parties extrêmes de la répartition, on pourrait également prendre en considération les valeurs réelles pour la prédétermination des fréquences d'occurrence de la variable.

Il n'a pas été tracé de courbe de répartition pour l'énergie totale présumée du coup de foudre, étant donné que l'énergie des composantes consécutives à la première sont insignifiantes par rapport à celle de la première. Les résultats sont également présentés dans le tableau I, qui indique les valeurs correspondant respectivement aux fréquences cumulées pour des niveaux de probabilité de 95 %, 50 % et 5 % (ces valeurs étant lues sur la droite de régression).

En ce qui concerne le tableau I, les valeurs des courants de crête de la foudre sont corroborées par les distributions de fréquence publiées par Popolansky [8], qui a trouvé une valeur médiane de 28 kA, obtenue à partir de 624 valeurs de mesures de courant fiables effectuées sur des cheminées et des pylônes de grande hauteur, y compris 192 valeurs provenant des essais de K. Berger. Ce résultat incite à penser que les paramètres mesurés sur des coups de foudre descendants atteignant les pylônes de télévision de la montagne voisine de Lugano peuvent

2.4. — Results.

Figures 1 to 10 show, on a logarithmic base, the cumulative distributions of ten of the lightning current parameters. The straight line is the least squares fit to the points (which have also been connected by straight lines) and therefore may be used to obtain the best estimate of the mean μ and standard deviation σ of the logarithms of the variates in the population distribution.

The probability density function $w(x)$ is therefore implied to be :

and is fully defined by the parameters μ and σ.

When comparing actual values with values predicted by the regression line, it is clear that substantial differences may be found. In some cases, particularly where the extremes of the distributions are concerned, the actual values might also be considered when predicting frequencies of occurrence of the variable.

No distribution of total negative flash prospective energy has been drawn since the following stroke energies are insignificant when added to those of the first stroke. The results are also given in Table I showing the values for the cumulative distributions at the 95 %, 50 % and 5 % probability levels respectively. (As read off against the regression line).

Regarding Table I, corroboration of the values of peak lightning currents are shown in the distribution reported by Popolansky [8] who observes a median value of 28 kA obtained from 624 values of reliable current measurements made on tall chimneys and towers, including 192 values from Berger. This result tends to suggest that the measured parameters of downward flashes striking the television towers on the mountain in Lugano may be comparable with those of lightning striking tall structures in open country.

TABLEAU I – TABLE I

Paramètres typiques de la foudre.
Typical lightning parameters.

Fig. *No.*	N	Paramètre *Parameter*	Unité *Unit*	Pourcentage de cas dépassant la valeur indiquée dans le tableau *Per cent of cases exceeding tabulated value*		
				95 %	50 %	5 %
		Courant de crête *Peak current* (minimum 2 kA)				
1	101	premières composantes négatives et coups de foudre négatifs *negative first strokes and flashes*	kA	14	30	80
1	135	composantes suivantes négatives *negative following strokes*	kA	4,6	12	30
1	26	coups de foudre positifs (sans composantes suivantes) *positive flashes (no following strokes)*	kA	4,6	35	250
		Charge				
2	93	premières composantes négatives *negative first strokes*	C	1,1	5,2	24
2	122	composantes suivantes négatives *negative following strokes*	C	0,2	1,4	11
3	94	coups de foudre négatifs *negative flashes*	C	1,3	7,5	40
3	26	coups de foudre positifs *positive flashes*	C	20	80	350
		Charge du choc *Impulse charge*				
4	90	premières composantes négatives *negative first strokes*	C	1,1	4,5	20
4	117	composantes suivantes négatives *negatives following strokes*	C	0,22	0,95	4,0
4	25	coups de foudre positifs (une seule impulsion) *positive flashes (only one stroke)*	C	2,0	16	150
		Durée de front *Front duration*				
5	89	premières composantes négatives *negative first strokes*	μs	1,8	5,5	18
5	118	composantes suivantes négatives *negative following strokes*	μs	0,22	1,1	4,5
5	19	coups de foudre positifs *positive flashes*	μs	3,5	22	200

TABLEAU I (suite) — TABLE I (continued)

Fig. *No.*	N	Paramètre *Parameter*	Unité *Unit*	Pourcentage de cas dépassant la valeur indiquée dans le tableau *Per cent of cases exceeding tabulated value*		
				95 %	50 %	5 %
		di/dt maximal *Maximum di/dt*				
6	92	premières composantes négatives *negative first strokes*	kA/μs	5,5	12	32
6	122	composantes suivantes négatives et coups de foudre négatifs *negative following strokes and flashes*	kA/μs	12	40	120
6	21	coups de foudre positifs *positive flashes*	kA/μs	0,20	2,4	32
		Durée de l'impulsion *Stroke duration*				
7	90	premières composantes négatives *negative first strokes*	μs	30	75	200
7	115	composantes suivantes négatives *negative following strokes*	μs	6,5	32	140
7	16	coups de foudre positifs *positive flashes*	μs	25	230	2 000
		Intégrale (i^2dt) *Integral (i^2dt)*				
9	91	premières composantes négatives et coups de foudre négatifs *negative first strokes and flashes*	A^2s	$6,0 \times 10^3$	$5,5 \times 10^4$	$5,5 \times 10^5$
9	88	composantes suivantes négatives *negative following strokes*	A^2s	$5,5 \times 10^2$	$6,0 \times 10^3$	$5,2 \times 10^4$
9	26	coups de foudre positifs *positive flashes*	A^2s	$2,5 \times 10^4$	$6,5 \times 10^5$	$1,5 \times 10^7$
10	133	Intervalle de temps entre impulsions négatives *Time intervals between negative strokes*	ms	7	33	150
		Durée du coup de foudre *Flash duration*				
8	94	négatifs (y compris les coups de foudre à une seule impulsion) *negative (including single stroke flashes)*	ms	0,15	13	1 100
8	39	négatifs (non compris les coups de foudre à une seule impulsion) *negative (excluding single stroke flashes)*	ms	31	180	900
8	24	positifs *positive*	ms	14	85	500

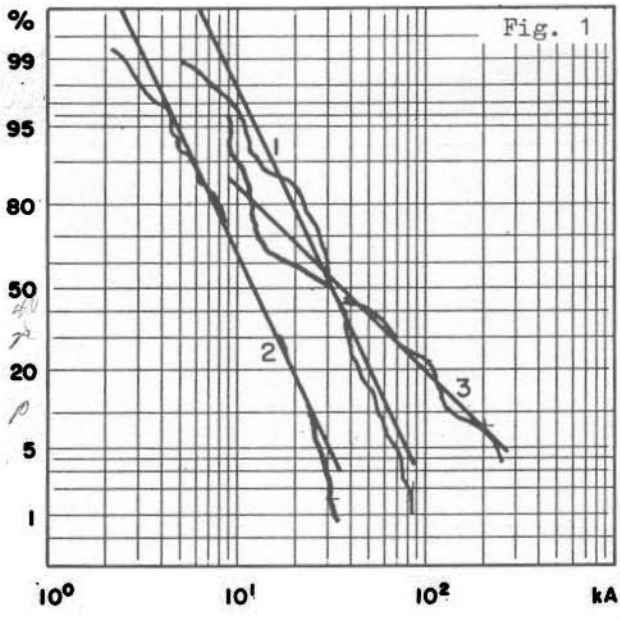


Figure 1

Courant de crête – I
(1) Premières impulsions négatives
(2) Impulsions suivantes négatives
(3) Impulsions positives ;

Peak current I
(1) Negative first strokes
(2) Negative following strokes
(3) Positive strokes

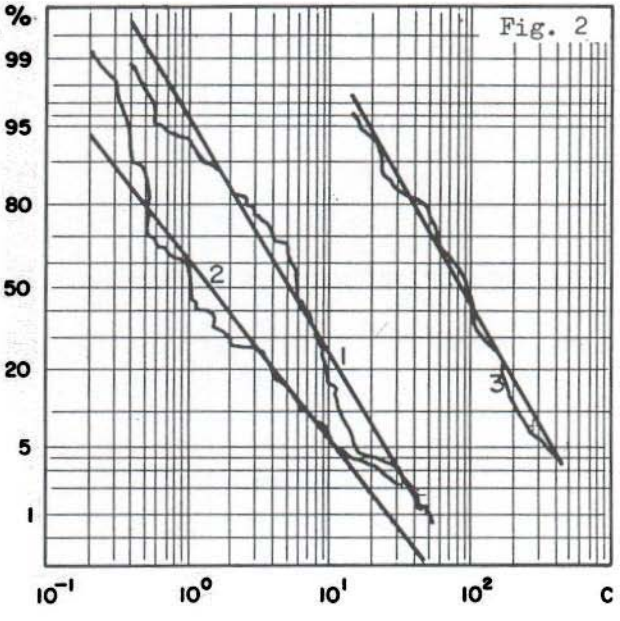


Figure 2

Charge de l'impulsion – Q (impulsion)
(1) Premières impulsions négatives
(2) Impulsions suivantes négatives
(3) Impulsions positives

Stroke charge – Q (stroke)
(1) Negative first strokes
(2) Negative following strokes
(3) Positive strokes

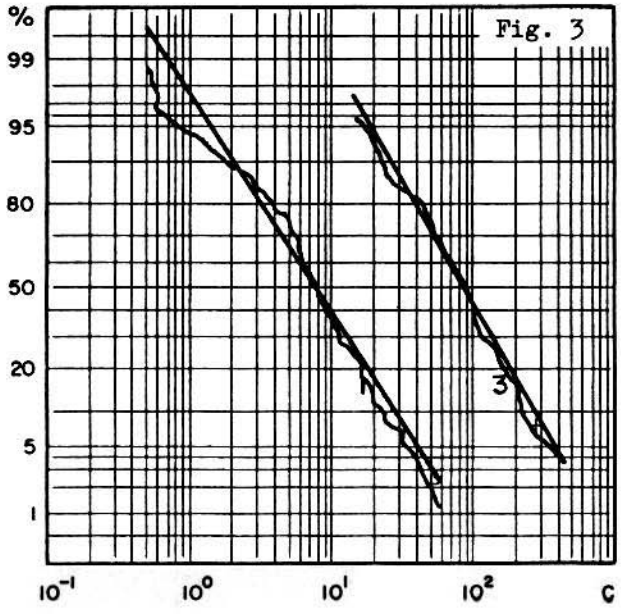


Figure 3

Charge du coup de foudre – Q (coup de foudre).
(1) Coups de foudre négatifs.
(3) Coups de foudre positifs.

Flash charge – Q (flash)
(1) Negative flashes
(3) Positive flashes

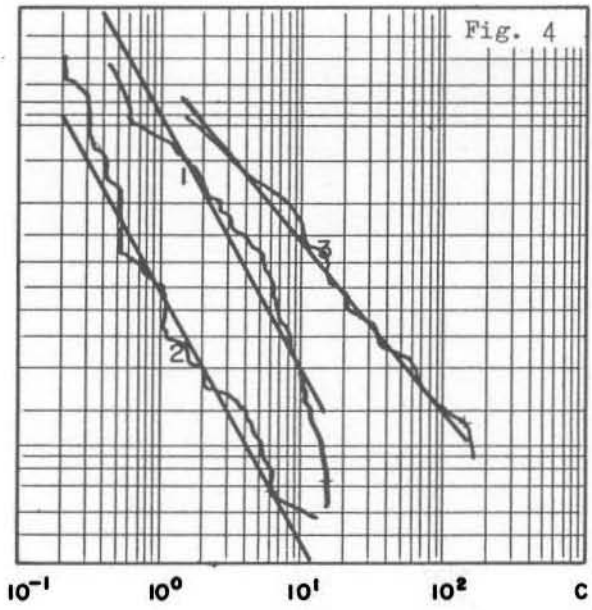


Figure 4

Charge du choc – Q (choc)
(1) Premières impulsions négatives
(2) Impulsions suivantes négatives
(3) Impulsions positives

Impulse charge Q (impulse)
(1) Negative first strokes
(2) Negative following strokes
(3) Positive strokes

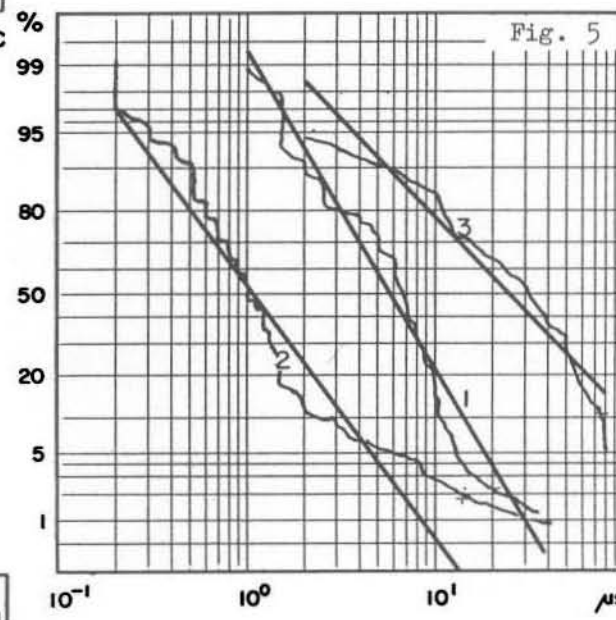


Figure 5

Durée de front – T (front)
(1) Premières impulsions négatives
(2) Impulsions suivantes négatives
(3) Impulsions positives.

Front duration – T (front)
(1) Negative first strokes
(2) Negative following strokes
(3) Positive strokes

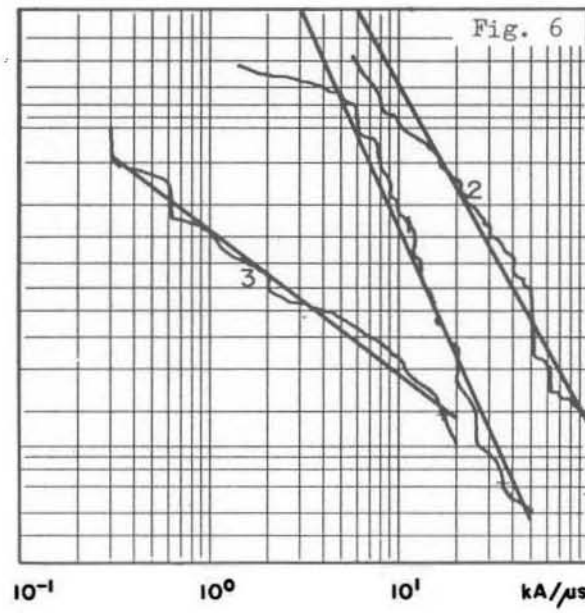


Figure 6

Vitesse de montée maximale du courant – di/dt (raideur de front du courant)
(1) Premières impulsions négatives
(2) Impulsions suivantes négatives.
(3) Impulsions positives.

Maximum rate of rise of current di/dt (current steepness)
(1) Negative first strokes
(2) Negative following strokes
(3) Positive strokes

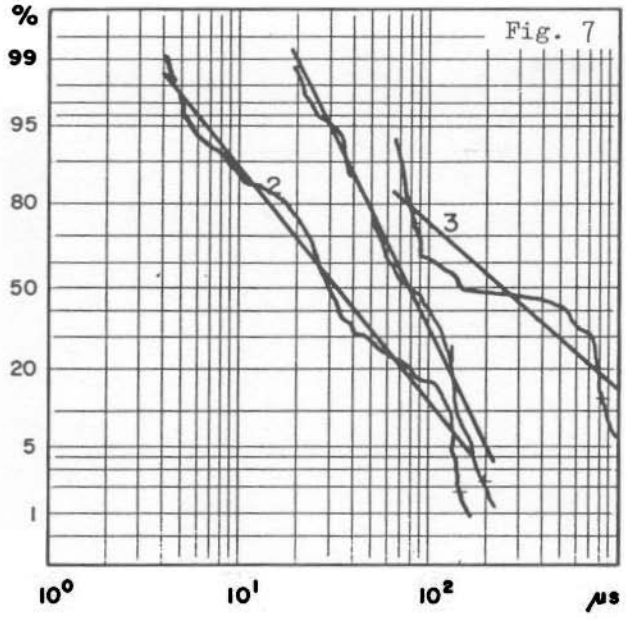


Figure 7

Durée de l'impulsion – T (queue)
(1) Premières impulsions négatives
(2) Impulsions suivantes négatives
(3) Impulsions positives

Stroke duration – T (tail)
(1) Negative first strokes
(2) Negative following strokes
(3) Positive strokes

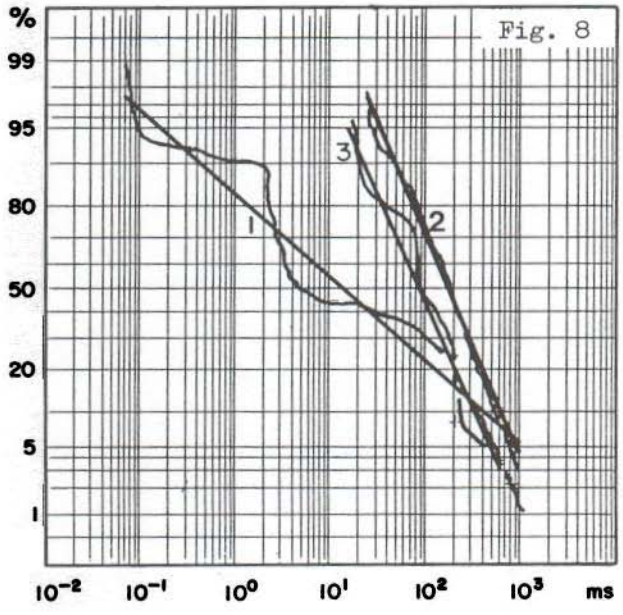


Figure 8

Durée du coup de foudre – T (coup de foudre)
(1) Coups de foudre négatifs y compris les coups de foudre simples.
(2) Coups de foudre négatifs non compris les coups de foudre simples.
(3) Coups de foudre positifs.

Flash duration T (flash)
(1) Negative flashes including single strokes
(2) Negative flashes excluding single strokes
(3) Positive flashes

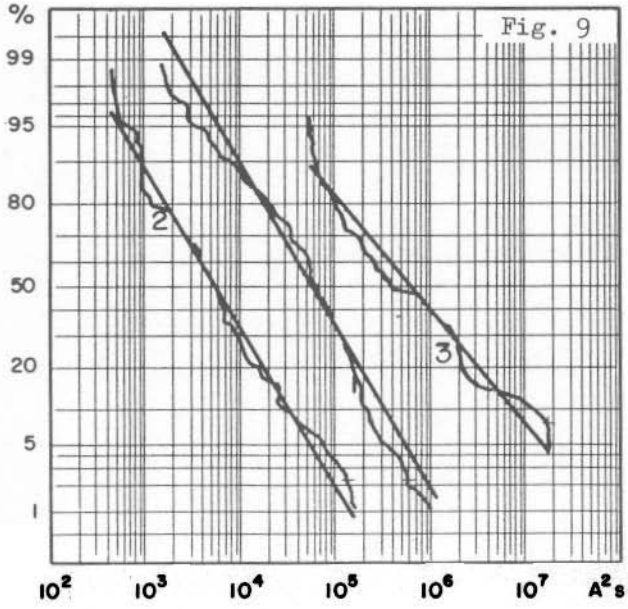


Figure 9

Energie présumée – $\int i^2\,dt$
(1) Premières impulsions négatives
(2) Impulsions suivantes négatives
(3) Impulsions positives

Prospective energy – $\int i^2\,dt$
(1) Negative first strokes
(2) Negative following strokes
(3) Positive strokes

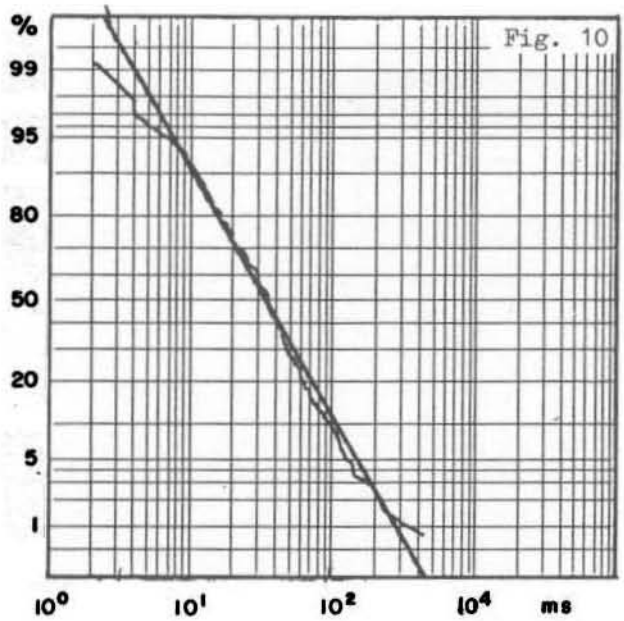


Figure 10
Intervalles sans courant entre impulsions négatives
No-current intervals between negative strokes

être comparables à ceux des coups de foudre atteignant des structures de grande hauteur en plaine.

3. — Corrélations entre les paramètres du courant de foudre.

On pourrait concevoir que des propriétés importantes de la décharge de foudre puissent être mises en lumière si certains des paramètres cités au paragraphe précédent étaient suffisamment corrélés. Si, par exemple, il existait une corrélation linéaire entre le courant de crête et la durée de front, on pourrait soupçonner l'existence d'une simple constante de temps, qui permettrait de calculer la vitesse de montée. Une simple analyse de régression considérant le courant de crête et les autres paramètres, puis séparément l'un après l'autre, a été effectuée autrefois [6] et ses résultats ont été présentés sous la forme de diagrammes de dispersion comportant aussi le tracé de la droite de régression. On a supposé une régression linéaire des logarithmes des variates, ce qui revient à dire qu'on a admis la relation $y = Ax^B$. Une représentation graphique de ce genre de régression est rassurante dans les premiers stades d'une analyse, mais, lorsqu'il s'agit seulement de faire l'essai d'une hypothèse de corrélation entre les paramètres ou entre les paramètres transformés il suffit de calculer le coefficient de corrélation et de vérifier sa validité à un niveau prédéterminé.

Les tableaux II, III et IV donnent les matrices des coefficients de corrélation calculés, respectivement pour les impulsions positives, pour les premières impulsions négatives et pour les impulsions suivantes négatives.

Les tableaux de coefficients de corrélation sont considérés, comme pouvant apporter une aide utile à la formulation d'un modèle de décharge de foudre.

3. — Correlation between lightning current parameters.

Important properties of the lightning discharge could conceivably be brought to light if some of the parameters mentioned in the previous sections were significantly correlated. If, for instance, the peak current and front duration were linearly correlated, a simple time constant to determine the rate of rise might be suspected. Simple regression analysis of peak current and other parameters, taken one at a time has been carried out before [6] and the results have been presented in the form of scatter diagrams showing also the linear regression line. Linear regression of the logarithms of the variates was assumed, i.e. the relationship $y = Ax^B$. Such a pictorial view of the regression is reassuring in the initial stages of an analysis but for the purpose of merely testing the hypothesis of correlation between the parameters, or transformed parameters, it is sufficient to compute the correlation coefficient and test its significance at a predetermined level.

Tables II, III and IV show the computed matrices of correlation coefficients in respect of positive strokes; negative first and negative following strokes.

The tables of correlation coefficients are considered to be useful as an aid to the formulation of a model on the lightning discharge. Some parameters,

TABLEAU II — TABLE II

Coefficients de corrélation entre les paramètres des premières impulsions positives (c'est-à-dire de coups de foudre positifs, car il n'y a pas de coups de foudre positifs multiples).

Correlation coefficients between parameters of positive first strokes. (or positive flashes, there being no positive multiple stroke flashes)

	Courant de crête *Peak current*	Durée de front *Front duration*	Vitesse de montée max. *Max. rate of rise*	Charge de choc *Impulse charge*	Energie *Energy*	Charge de l'impulsion *Stroke charge*	Durée de l'impulsion *Stroke duration*	Durée du coup de foudre *Flash duration*	charge du coup de foudre *Flash charge*
Courant de crête *Peak current*	1,00								
Durée de front *Front duration*	0,07	1,00							
Vitesse de montée max. *Max. rate of rise*	0,49	− 0,68	1,00						
Charge de choc *Impulse charge*	0,77	0,27	0,23	1,00					
Energie *Energy*	0,84	0,22	0,39	0,82	1,00				
Charge de l'impulsion *Stroke charge*	0,62	0,32	0,11	0,74	0,72	1,00			
Durée de l'impulsion *Stroke duration*	0,58	0,48	0,02	0,80	0,72	0,75	1,00		
Durée du coup de foudre *Flash duration*	0,33	0,112	− 0,15	0,24	0,17	0,64	0,24	1,00	
Charge du coup de foudre *Flash charge*	0,62	0,32	0,10	0,74	0,71	1,00	0,75	0,64	1,00

Les coefficients en caractères gras dépassent la valeur critique au niveau de signification de 5 %.
Coefficients in boldface exceed the critical value at the 5 % level of significance.
Degrés de liberté : 13.
Degrees of freedom : 13.

Certains des paramètres, tels que la charge de choc et la charge totale d'une impulsion, sont liés l'un à l'autre en vertu même de leur définition et il est évident qu'il existe entre eux une bonne corrélation. Néanmoins, l'existence ou l'absence de certaines autres corrélations peut fournir des indices significatifs quant au mécanisme probable de la décharge.

such as impulse charge and total stroke charge, are related as a result of their definition and a good correlation between them is self-evident. Nevertheless other correlations, or the lack of such, may provide significant pointers to the probable discharge mechanism.

4. — Formes typiques du courant de foudre.

4.1. — *Généralités.*

La constatation que les formes des premières impulsions positives, des premières impulsions négatives et des impulsions suivantes négatives sont nettement différentes, en ce qui concerne notamment les durées de front, nous a conduits à définir trois catégories d'impulsions. La bonne corrélation

4. — Typical lightning current shapes.

4.1. — General.

The observation that positive first stroke, negative first stroke and negative following stroke shapes are distinctly different, particularly in so far as the front durations are concerned, has led to the designation of three categories of strokes. Good correlation between parameters such as peak current,

TABLEAU III – TABLE III

Coefficients de corrélation entre les paramètres des premières impulsions négatives.
Correlation coefficients between parameters of negative first strokes.

	Courant de crête *Peak current*	Durée de front *Front duration*	Vitesse de montée max. *Max rate of rise*	Charge de choc *Impulse charge*	Energie *Energy*	Charge de l'impulsion *Stroke charge*	Durée de l'impulsion *Stroke duration*	Durée du coup de foudre *Flash duration*	charge du coup de foudre *Flash charge*
Courant de crête *Peak current*	1,00								
Durée de front *Front duration*	0,37	1,00							
Vitesse de montée max. *Max. rate of rise*	0,36	– 0,21	1,00						
Charge de choc *Impulse charge*	0,77	0,25	0,39	1,00					
Energie *Energy*	0,88	0,30	0,42	0,89	1,00				
Charge de l'impulsion *Stroke charge*	0,61	0,29	0,19	0,91	0,78	1,00			
Durée de l'impulsion *Stroke duration*	0,56	0,33	0,10	0,51	0,52	0,43	1,00		
Durée du coup de foudre *Flash duration*	0,08	0,25	– 0,02	0,14	0,10	0,23	0,11	1,00	
Charge du coup de foudre *Flash charge*	0,54	0,36	0,19	0,72	0,64	0,78	0,44	0,64	1,00

Les coefficients en caractères gras dépassent la valeur critique au niveau de signification de 5 %.
Coefficients in boldface exceed the critical value at the 5 % level of significance.
Degrés de liberté : 77
Degrees of freedom : 77

observée entre les paramètres tels que le courant de crête, la charge du choc et la durée de queue confirme que les formes de courant sont similaires dans chaque catégorie, ce qui incite à construire une forme typique pour chacune d'elles.

impulse charge and tail duration confirm that shapes within the categories are similar, and this suggests the construction of typical shapes for each of these categories.

4.2. — *Construction d'une forme de courant.*

Pour trouver une ordonnée $\bar{i}_k$ de la forme moyenne d'un courant d'impulsion de foudre, toutes les ordonnées i_k du point K des courbes enregistrées séparément ont été ajoutées et le résultat divisé par m, nombre des ordonnées mesurées.

On a donc :

4.2. — Constructing the shape.

To construct an ordinate $\bar{i}_k$ of the mean lightning stroke shape all ordinates i_k at point k on the separate curves have been added and the result divided by m, the number of ordinates.

Hence

$$\bar{i}_k = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} i_{jk} \qquad (2)$$

où m est le nombre total de courbes utilisées pour la détermination de $\bar{i}_k$ au point k. Ce nombre est variable du fait de la différence des longueurs d'enregistrement, due aux techniques d'enregistrement et de chiffrage [3].

where m stands for the total number of curves contributing to $\bar{i}_k$ in the point k. The number varies as a result of different record lengths, caused by the recording and digitizing techniques [3].

TABLEAU IV – TABLE IV

Coefficients de corrélation entre les paramètres des impulsions suivantes négatives.
Correlation coefficients between parameters of negative following strokes.

	Courant de crête *Peak current*	Durée de front *Front duration*	Vitesse de montée max. *Max. rate of rise*	Charge de choc *Impulse charge*	Energie *Energy*	Charge de l'impulsion *Stroke charge*	Durée de l'impulsion *Stroke duration*
Courant de crête *Peak current*	1,00						
Durée de front *Front duration*	0,28	1,00					
Vitesse de montée max. *Max. rate of rise*	0,11	– 0,49	1,00				
Charge de choc *Impulse charge*	0,69	0,13	0,31	1,00			
Energie *Energy*	0,69	0,22	0,15	0,72	1,00		
Charge de l'impulsion *Stroke charge*	0,43	0,26	0,28	0,62	0,54	1,00	
Durée de l'impulsion *Stroke duration*	0,25	– 0,05	0,30	0,44	0,37	0,12	1,00

Les coefficients en caractères gras dépassent la valeur critique au niveau de signification de 5 %.
Coefficients in boldface exceed the critical value at the 5 % level of significance.
Degrés de liberté : 73
Degrees of freedom : 73

Avant de faire la somme puis la moyenne des ordonnées i_k, il est nécessaire de s'assurer que les courbes sont convenablement alignées, c'est-à-dire que les points i_{jk} de l'équation (2) correspondent au même stade du développement physique de la décharge de foudre. Le front raide des formes de courant est une caractéristique appropriée et facilement reconnaissable dans toutes les impulsions et c'est pourquoi les enregistrements ont été alignés en faisant coïncider les points d'amplitude 50 % de tous les fronts. Une technique différente, qui calcule la fonction d'intercorrélation entre les deux courbes et déplace l'une des courbes d'une quantité égale au retard au bout duquel la fonction a un maximum, a abouti à une forme moyenne presque identique, ce qui prouve la valeur de la première méthode (beaucoup plus simple que la seconde). De plus, toutes les courbes ont été ramenées à une même amplitude de crête prise comme unité avant de faire les moyennes.

Before summing and averaging the points i_k it is necessary to ascertain that the curves are properly aligned, i.e. the points i_{jk} in equation (2) should correspond to the same stage in the physical development of the lightning flash. The sharply rising front of the stroke shape is a suitable and easily recognisable feature in all strokes and the records were therefore aligned in such a way that the 50 % amplitude points on the fronts coincided. A different technique, which computes the cross-correlation function between two curves and shifts one curve by an amount equal to the lag at which the function shows a maximum, produced an almost identical mean shape, proving the merit of the first (much more simple) method. In addition, all curves were converted to a unit peak amplitude before averaging.

(a) *Premières impulsions positives.*

Bien que les impulsions positives soient caractérisées par des charges plus élevées et des fronts moins raides que leurs correspondantes négatives, elles n'ont pas entre elles suffisamment de caractéristiques communes pour permettre d'obtenir une forme de courant moyenne acceptable. C'est peut-être dû aussi en partie au petit nombre de coups de foudre positifs enregistrés dans la période considérée. C'est pourquoi nous nous sommes contentés de

(a) Positive first strokes.

Although positive strokes are characterized by greater charges and slower fronts than their negative counterparts, they do not have enough common features to produce an acceptable mean current shape. This may also be due partly to the small number of positive strokes which were recorded in the period. A selection of 4 of the most typical of 21 recorded curves is therefore shown in Figure 11.

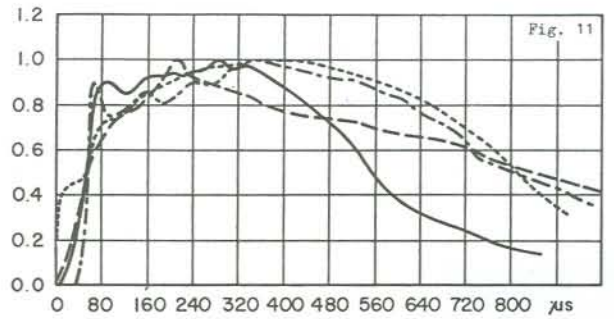


Figure 11
Formes de courant typiques – Impulsions positives
Typical current shapes – positive strokes

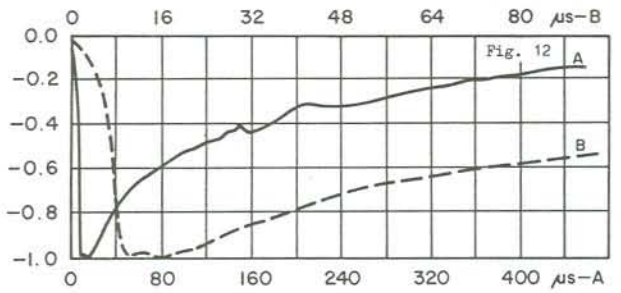


Figure 12
Forme de courant moyenne A – échelle des temps inférieure
Premières impulsions négatives B – échelle des temps supérieure
Mean current shape A – lower time scale
Negative first strokes B – upper time scale

reproduire sur la figure 11 un choix de 4 des courbes les plus typiques parmi les 21 courbes enregistrées.

(b) *Forme des premières impulsions négatives.*

La figure 12 montre la moyenne des formes de premières impulsions de courant négatives, tracée avec deux échelles de temps différentes (A et B). Dans la zone de 120 à 160 µs, le nombre de courbes utilisées pour la détermination de la courbe passe de 88 (enregistrements courts et longs) à 10 (enregistrements longs seulement), ce qui explique l'ondulation qu'on constate dans cette zone. Un autre défaut de précision, inhérent à la technique d'enregistrement employée à l'origine [3], se produit dans le voisinage de 200 µs et il est très probable qu'il est ici aussi une source d'erreurs résiduelles.

(b) Negative first stroke shape.

Figure 12 shows the mean negative first stroke current shapes on two different time scales (A and B). In the region between 120-160 µsec. the number of curves contributing to the mean curve changes from 88 (short and long recordings) to 10 (only long recordings) which explains the ripple in this area. A further inaccuracy, inherent in the original recording technique [3], occurs at around 200 µsec., most likely also contributing to residual errors here.

(c) *Forme des impulsions suivantes négatives.*

La figure 13 montre la moyenne de 76 formes d'impulsions suivantes négatives, tracées ici aussi avec deux échelles des temps (A et B). Un trait particulièrement frappant de ces courbes est la modification assez brutale de pente de la queue au bout d'environ 5 µs, suivie d'une décroissance lente

(c) Negative following stroke shape.

Figure 13 shows the mean of 76 negative following stroke shapes, again on two time scales (A and B). A striking feature of these curves is the rather abrupt change in slope of the tail after about 5 µsec. and the subsequent slowly decaying tail. Errors due to the same recording technique referred to above can

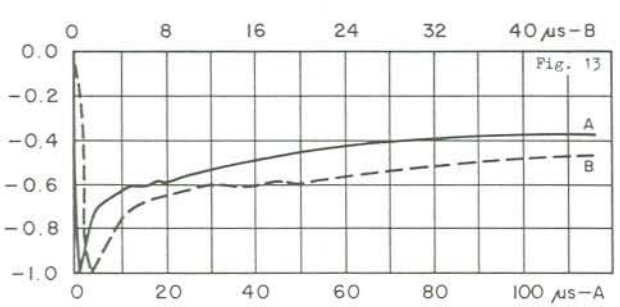


Figure 13
Forme de courant moyenne A – échelle des temps inférieure
Impulsions suivantes négatives B – échelle des temps supérieure
Mean current shape A – Lower time scale
Negative following strokes B – upper time scale

de la queue. Des erreurs dues à la même technique d'enregistrement, auxquelles il a été fait allusion plus haut, peuvent être tenues responsables de l'ondulation observée aux environs de 20 µs. Au delà de 50 µs après le début, le tracé devient incertain, car dans la plupart des enregistrements originaux, les amplitudes des courants à l'échelle adoptée sont très faibles et ne peuvent être lues avec précision.

be held responsible for the ripple at approximately 20 µsec. After about 50 µsec. from the start, accuracy deteriorates since the current amplitudes in most of the original records were very low on the scale and could not be accurately resolved.

5. — Remerciements.

Les auteurs remercient la Fondation suisse pour l'aide qu'elle leur a généreusement apportée pour l'exécution de leurs travaux au Mont San Salvatore et sans laquelle ils n'auraient pas été en mesure de recueillir ces données. Ils expriment également leurs remerciements au Conseil de la recherche scientifique et industrielle d'Afrique du Sud pour le financement des travaux de H. Kröninger, qui a participé pendant un an à l'analyse des données.

5. — Acknowledgements.

The authors thank the Swiss Foundation for their generous support of the work on Monte San Salvatore, without which these data could not have been compiled. Thanks are also due to the Council for Scientific and Industrial Research of South Africa for financing the work of H. Kröninger who assisted in the analysis of the data over the period of one year.

Bibliographie — References

[1] K. BERGER – "Die Messeinrichtung für die Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore". Bull. SEV, n°5, 1955, pp. 193-232.

[2] K. BERGER – "Resultate der Blitzmessungen der Jahre 1947-1954 auf dem Monte San Salvatore". Bull. SEV., n°9, 1955, pp. 405-456.

[3] K. BERGER et E. VOGELSANGER – "Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955-1963 auf dem Monte San Salvatore". Bull. SEV., Bd. 56 (1965), n°1, pp. 2-22.

[4] K. BERGER et E. VOGELSANGER – "Photographische Blitzuntersuchen der Jahre 1955-1965 auf dem Monte San Salvatore". Bull. SEV., Bd 57 (1966), n°13, pp. 599-620.

[5] K. BERGER – "Novel observations on lightning discharges : results of research on Mount San Salvatore". Journal of the Franklin Institute, vol. 283, n°6, june 1967.

[6] K. BERGER – "Methoden und Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei lugano in den Jahren 1963-1971". Bull. SEV., Bd. 63 (1972), n°24, pp. 1403-1422.

[7] K. BERGER – "Oszillographische Messungen des Feldverlaufs in der Nähe des Blitzeinschlages auf dem Monte San Salvatore". Bull. SEV., Bd. 64 (1973) n°3, pp. 120-136.

[8] F. POPOLANSKY – "Distribution de fréquence des amplitudes des courants de foudre". Frequency distribution of amplitudes of lightning currents. Electra n°22 (mai 1972), pp. 139-147.