

Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques à Haute Tension

112, Boulevard Haussmann, Paris

Session 1952. — 28 mai-7 juin

302. — COMPARAISON STATISTIQUE DES PERTURBATIONS PAR ORAGE DE QUELQUES GRANDS RÉSEAUX A TENSION ÉLEVÉE

Rapport présenté au nom du Comité n° 8
Foudre et surtensions,

par K. BERGER,
Président du Comité.

RAPPORT

Dans le rapport n° 333 de la session 1950 de la CIGRE, le Comité n° 8 a proposé d'établir une statistique relative aux perturbations orageuses des réseaux à haute tension sur une base internationale. Pour arriver à ce but, le Comité avait élaboré un questionnaire qu'il mettait à disposition de tous les exploitants intéressés.

Plusieurs entreprises ont fait usage ensuite de cette possibilité de comparer la susceptibilité de leurs réseaux aériens aux perturbations causées par la foudre, en présentant leurs expériences sous forme de statistique.

Jusqu'à présent, les exploitants suivants ont pris part à cette étude :

1) Angleterre : British Electricity Authority (Réseaux à 132 kV, 66 kV et 33 kV).

2) Suède : State Power Board (Réseau à 220 kV).

3) France : Électricité de France (Réseaux à 220 et 150 kV).

4) Italie :

Société Montecatini (Réseaux 70, 130, 220 kV).

Société Edison (Réseaux 50, 60, 90, 110, 150 kV).

Société Selt-Valdarno (Réseaux 30, 60, 120 kV).

Société Terni (Réseaux 65, 120, 150 kV).

Société Romana (Réseaux 60, 150 kV).

5) Afrique du Sud : Ville de Johannesburg (Réseau à 88 kV).

6) Canada : Hydro-Electric Power Commission of Ontario (Réseaux à 115, 230 kV).

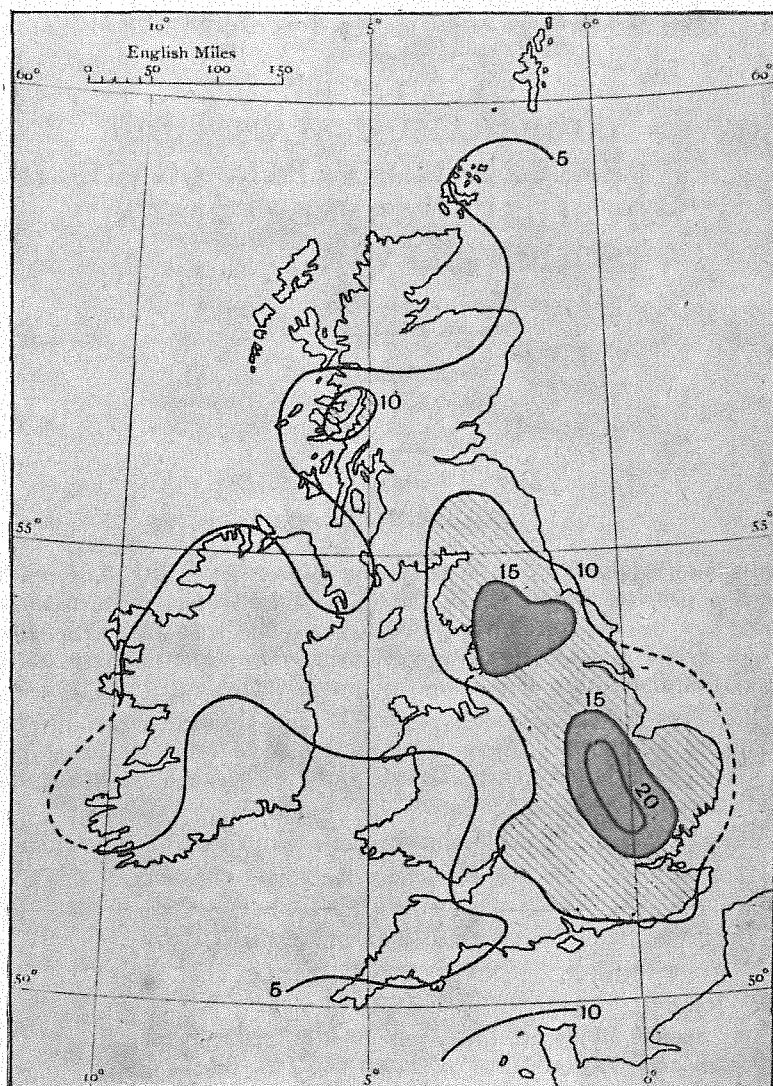


FIG. 1. — Angleterre.

Carte du nombre annuel moyen de jours avec tonnerre, dans " The Climate of the British Isles ", E.G. Bilham, Macmillan & Co (London).

Les réseaux anglais, suédois et français pour des tensions au-dessus de 100 kV ont chacun une longueur de plusieurs milliers de kilomètres. Les observations qui nous intéressent ont été relevées pour une période considérable (quinze ans pour les positions 1 et 2, trois ans pour la position 3). Après avoir discuté les résultats dans son sein, le Comité pense que les résultats statistiques de ces trois pays pourraient intéresser aussi les autres membres de la C.I.G.R.E.

A cette statistique on ajoutera à titre d'information les résultats moins complets concernant les réseaux italiens (1950) et du Canada (1948) portant sur des tensions supérieures à 100 kV.

Il est usuel de baser toute statistique de perturbations par orage sur les *niveaux isokérauniques*, c'est-à-dire les chiffres indiquant à chaque endroit le nombre de jours d'orage par an. En général les Offices météorologiques déterminent ce chiffre en définissant par jour d'orage une journée pendant laquelle on a entendu à l'endroit d'observation le tonnerre. S'il y a plusieurs orages le même jour, celui-ci n'est donc compté qu'une seule fois. Le tonnerre ne se fait plus entendre en général à des distances supérieures à 20 km environ.

Pour l'Europe centrale quelques cartes géographiques indiquant les niveaux isokérauniques ont été publiées. Nous les reproduisons ci-après dans les figures 1 à 4.

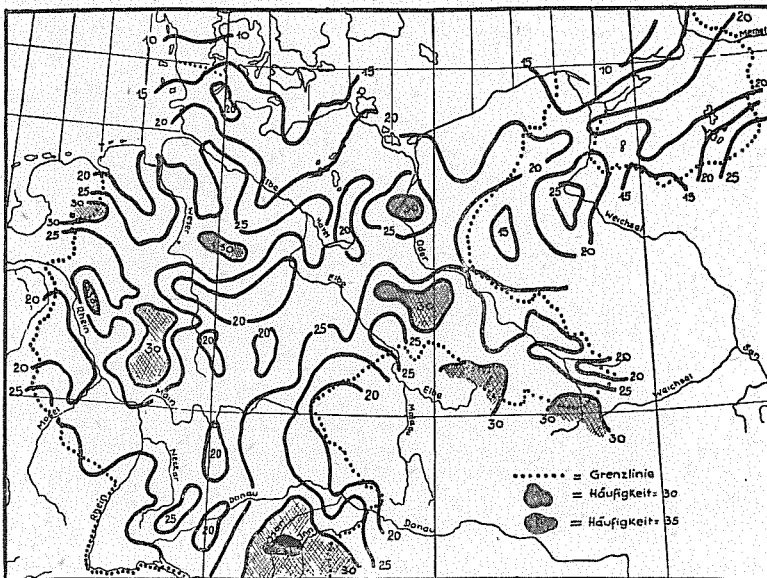


FIG. 2. — Allemagne.

Carte de la fréquence des orages, construite par Dr. F. Herath, publiée par H. Israel, Buchau, dans " Probleme der kosmischen Physik ", Bd. 25.

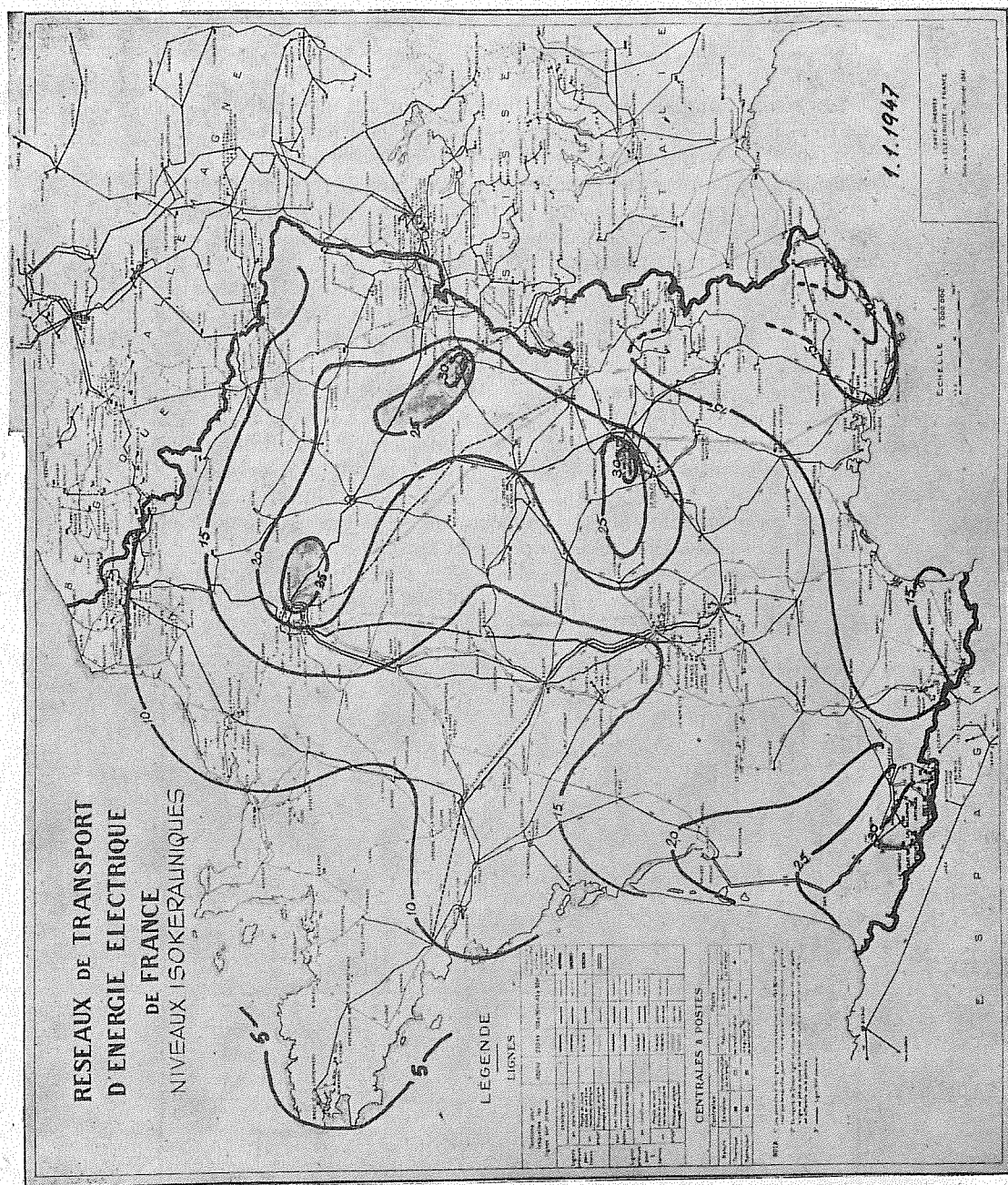


Fig. 3. — France.

Carte des réseaux de transport d'énergie électrique de France (E.D.F.) avec niveaux isokéraliniques, dressée par l'E. D. F., d'après les renseignements émanant de l'Office national météorologique, se rapportant à des observations de 200 stations environ pendant 10 à 40 ans.

Pour la Suède et l'Angleterre, la fréquence des orages est inférieure à celle de l'Europe centrale. (En moyenne 11 pour la Suède, et 5 à 20 selon la statistique anglaise.)

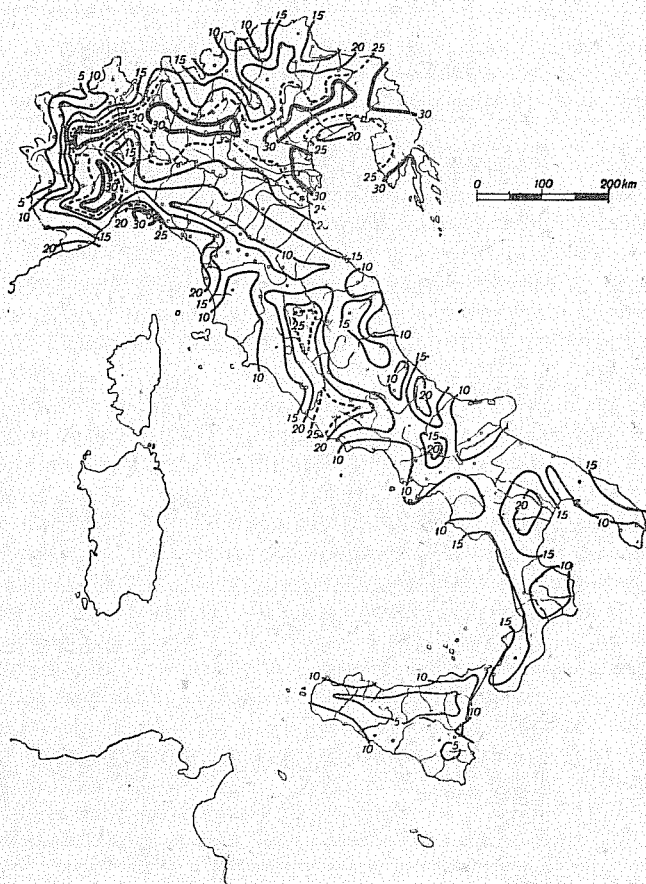


FIG. 4. — Italie.

Carte de la distribution du nombre de jours d'orage moyen par an, dressée par le professeur M. Bossolasco pour l'ANIDEL, publiée dans l'Energia Elettrica 1949 (fasc. 11-12, vol 26.).

La statistique se rapporte aux perturbations des lignes aériennes et des stations. Les renseignements obtenus jusqu'à présent se réfèrent en grande partie aux lignes aériennes. Le tableau n° 1 donne le résumé de la *statistique des perturbations des lignes*.

TABEAU 1.
Résumé des statistiques reçues jusqu'au printemps 1951.

Position	Société d'exploitation	Tension d'explo- tation kV	Longueur du tracé km	Niveau isokér. moyen	Tension de cont.		Fils de terre	Nombre de défauts			
					50 0/0 au choc kV crête	50 p/s kV eff		Année	Total	Causés par orage	
										total	par 100 km par an
1	Grid System (Angleterre).	33	1 460 à 1 710	5 à 20	300	180 ⁽⁴⁾	1	} 1934	(7)	549	2,4
		66 ⁽⁵⁾	193 à 316	»	500	300 ⁽⁴⁾	1			71	1,9
		132 ⁽⁵⁾	4 600 à 5 770	»	700	450 ⁽⁴⁾	1			442	0,6
2	Grid System.	33	1 600	13	300	150	1	1949	206	32	2,0
		132 ⁽⁵⁾	5 770	13	700	400	1	1949	294	40	0,7
3	Swedish Power Board.	220	4 000	11	+ 1 175	480	2	1936/49	?	119	0,53
4	Swedish Power Board.	220	»	»	— 1 200	»	»	1950	19	?	(182) ⁽⁵⁾
					(val. 31-12-49)					14	(0,81) ⁽⁵⁾
5	Electricité de France.	150 ⁽⁵⁾	6 800 ⁽¹⁾	10 à 30	9 à 10 ⁽³⁾	—	1 ⁽⁵⁾	1947	603	264	3,9
		150 ⁽⁵⁾	7 067 ⁽¹⁾	»	»	—	1 ⁽⁵⁾	1948	762	316	4,5
		150 ⁽⁵⁾	7 700 ⁽¹⁾	»	»	—	1 ⁽⁵⁾	1949	592	413	5,4
6	Electricité de France.	220 ⁽⁵⁾	3 500	»	14 à 18 ⁽³⁾	—	1 à 2 ⁽⁵⁾	1947	240	83	2,4
		220 ⁽⁵⁾	4 958 ⁽¹⁾	»	»	—	» ⁽⁵⁾	1948	424	171	3,5
		220 ⁽⁵⁾	4 950 ⁽¹⁾	»	»	—	» ⁽⁵⁾	1949	289	220	4,5
7	Montecatini. (Italie).	130	740	30	+ 770	475	—	1950	81	45	6
		220 ⁽⁵⁾	225	30	+ 1 200	515	1/2	»	16	8	3,5
8	Edison.	110 ... 150	3 696 ⁽¹⁾	20	—	—	?	1950	445	78	2,2 ⁽⁵⁾
9	Selt-Valdarno.	120	533	15	9 à 11 ⁽³⁾	—	?	1950	49	38	7,1
10	Terni.	120	206 ⁽²⁾	20	— 930	415	—	1950	100	20	9,7
		150	313 ⁽²⁾	15	— 1 015	450	0/1/2	1950	52	16	5,1
11	Romana.	150	203	20	+ 550	470	1	1950	9	5	2,4
12	Ontario (Canada).	115 ⁽⁵⁾	1 550	?	8 ⁽³⁾	—	1	1948		35	2,3
		230 ⁽⁵⁾	1 800		18 ⁽³⁾	—	2	»		6	0,33

(⁰) Neutre mis directement à la terre. — (¹) Longueur du circuit. — (²) Réseau interconnecté. — (³) Nombre d'éléments des chaînes. — (⁴) A sec. — (⁵) 4 pour cent sans fil de terre. — (⁶) 16 pour cent sans fil de terre. — (⁷) 40 pour cent de tous les défauts de ligne sont causés par la foudre. — (⁸) Y inclus arcs à la terre supprimés par bobine d'extinction. — (⁹) Par 100 km de circuit.

L'étude comparative de ces statistiques fait relever les observations suivantes:

1) Le nombre spécifique de défauts (par 100 km de ligne et par an) est nettement supérieur en France et en Italie, comparé à la Suède et à l'Angleterre.

2) Le nombre spécifique de défauts croît plus vite que le « Niveau isokéraunique ». En effet, ce dernier ne tient pas compte de la sévérité des orages. En plus, il dépend de l'objectivité et de la qualité des observateurs.

3) Les chiffres anglais et français prouvent qu'il y a une diminution du nombre de défauts avec l'augmentation de la tension d'exploitation. Doubler la tension fait diminuer le nombre de défauts à 50 à 60 pour 100 environ, dans la gamme des tensions relevées.

4) Il s'ensuit qu'en augmentant l'isolement absolu des lignes à très haute tension, on peut augmenter encore leur sécurité en temps d'orages, malgré l'élévation plus grande en-dessus du sol des lignes à tension supérieure.

5) En extrapolant la courbe du nombre spécifique de défauts en fonction de la tension d'exploitation jusqu'à la tension zéro, on obtient le nombre de coups de foudre par 100 km et par an sur le tracé de la ligne.

Le tableau n° 1 ne contient pas l'influence certainement très importante de la *résistance de mise à terre des pylônes*. En effet, la construction des grandes lignes avec fils de terre est telle que la mesure de la résistance par pied de pylône est assez compliquée, parce que cette mesure exige l'isolement des fils de terre du pylône mesuré. D'autre part, il est absolument nécessaire de connaître cette résistance par pylône et non pas celle avec fils de terre reliés. *La question d'un amarrage facilement isolable du fil de terre se pose donc du point de vue de l'exploitation.* La statistique relevée par la Suède, qui a été mise à notre disposition par le « State Power Board », contient des renseignements intéressants sur l'effet de la mise à terre des pylônes.

Pour arriver à ce but, les perturbations de position du tableau 1 ont été groupées par l'exploitant selon la résistance de mise à terre des pieds des pylônes. L'expérience de quatorze ans a donné les chiffres du tableau n° 2.

TABLEAU 2.

Pos.	Résistance moyenne par pylône	Nombre total de défauts en 14 ans	Km $\times$ ans	Nombre spéc. de défauts par 100 km et an
1	55 Ω	7	1 760	0,40
2	150 Ω	95	13 600	0,70

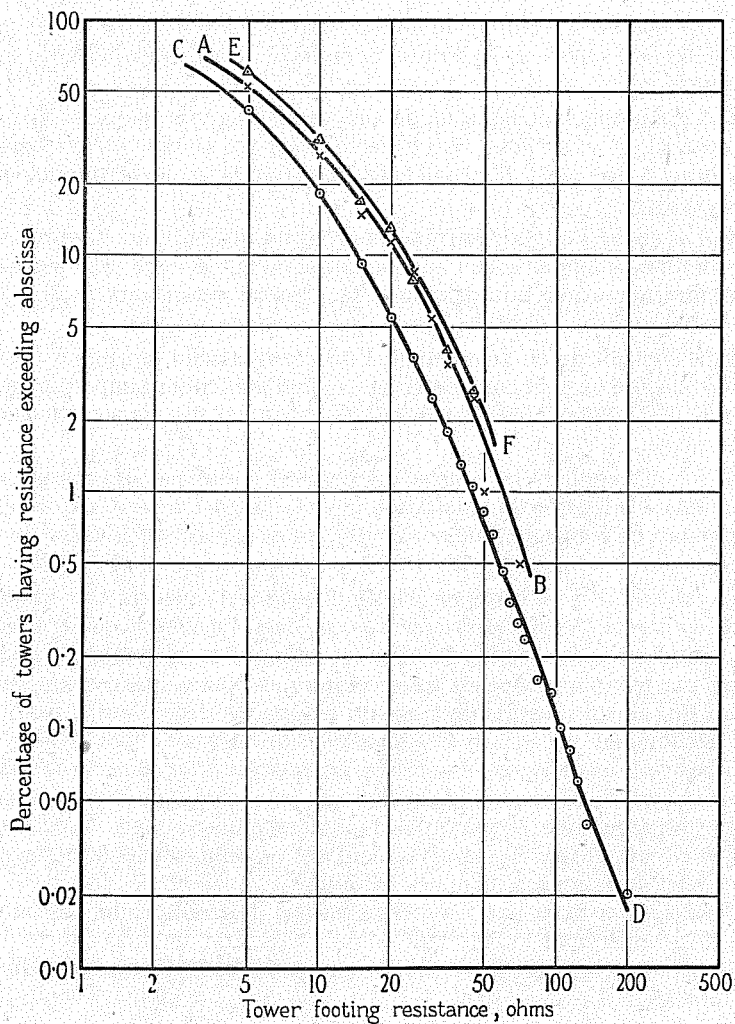


FIG. 5. — Effet de la résistance de mise à la terre des pylônes sur la fréquence des dérangements par coup de foudre.

Fréquence des différentes valeurs de résistance $\odot$.

Fréquence des dérangements $\times$.

Fréquence des dérangements multipolaires Δ .

Les chiffres font ressortir une sensibilité nettement plus élevée des mauvaises mises à la terre, la disposition des conducteurs et des fils de terre étant exactement la même dans les deux cas (ligne à 220 kV).

Un résultat analogue a été relevé par la statistique anglaise ⁽¹⁾, dont nous reproduisons une figure (*fig. 5*).

Il s'ensuit que la courbe de probabilité des résistances des pieds des pylônes perturbés est plus élevée (*AB* et *EF*) que celle de tous les pylônes mesurés (*CD*) du réseau à 132 kV.

Le Comité est de l'opinion qu'une extension de la statistique en ce qui concerne l'influence des mises à la terre des pylônes serait utile.

Un deuxième point méritant une étude plus approfondie est celui de la disposition du ou des fils de terre. La statistique suédoise contient quelques renseignements à ce point aussi, parce qu'elle compare le nombre de défauts pour deux types de pylônes (formes en *H* ou en *TT*) dont les résistances des pieds ne diffèrent pas beaucoup. La figure 6 montre le croquis coté des pylônes. Le tableau 3 résume les chiffres y relatifs du nombre de défauts.

La variation du nombre de défauts (0,26-0,40) semble être plus grande que ce qu'il fallait attendre à cause de la variation des résistances de mise à la terre (38 à 55 Ω), selon le tableau 2. L'avantage de la meilleure disposition des fils de terre (*H* ou *TT*) semble quand même bien moins prononcé que celui de la bonne mise à la terre des pylônes, compte tenu des résistances moyennes assez élevées.

La statistique française enferme une fraction de lignes sans fils de terre (4 pour 100 environ pour les lignes à 150 kV, 16 pour 100 environ pour les lignes à 220 kV). Le nombre de défauts relatif à ces fractions de lignes est quelques fois plus grand que celui des lignes avec fils de terre. L'exploitant remarque qu'au moins une partie de la différence très nette pourrait s'expliquer par le fait que les lignes sans fils de terre sont situées dans des régions à niveau isokéraunique élevé.

Le Comité croit que l'extension de la statistique dans le sens d'une meilleure comparaison des différentes dispositions des fils de terre serait utile.

La statistique se réfère aussi aux *perturbations causées dans les stations*. Spécialement on a cherché à élucider deux questions :

- 1) Quels sont les points faibles de l'isolement des stations?
- 2) Quelles sont les expériences gagnées avec les parafoudres pour les tensions très élevées?

Le résultat de la statistique des stations n'est pas encore assez large pour qu'on puisse tirer des conclusions définitives. Tandis que les perturbations sur les lignes se présentent partout à peu près de la même

(1) Dr. J.S. FORREST, The Performance of the British Grid System in Thunderstorms. Proc. J.E.E., June et Dec. 1950 (*fig. 7*).

TABLEAU 3.

Pos.	Pylônes	Résistance moyenne des pieds des pylônes	Nombre total de défauts	Km $\times$ ans	Nombre de défauts par 100 km et an
1	A et B	38 Ω	18	6 950	0,26
2	C et D	55 Ω	7	1 960	0,40

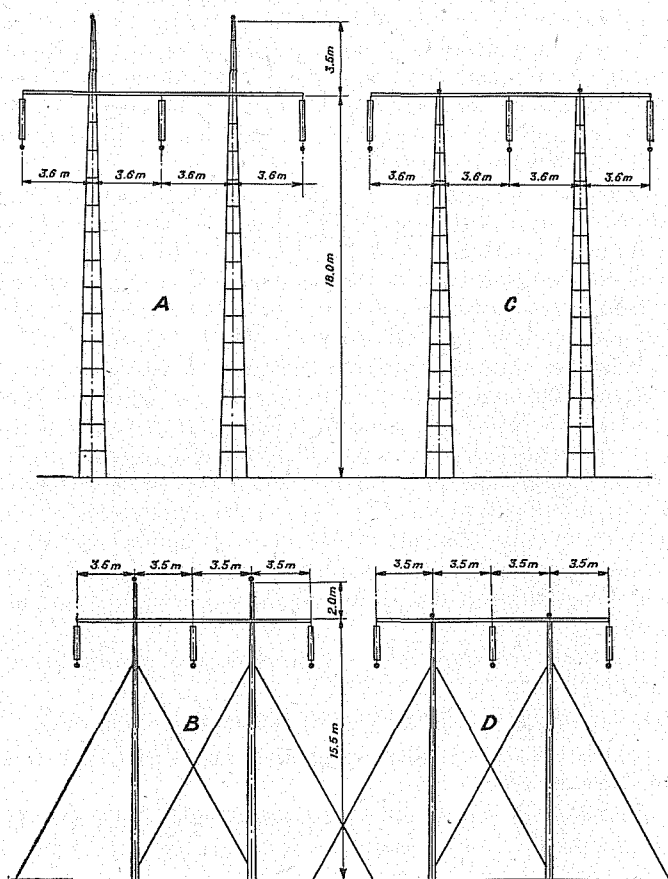


FIG. 6. — Croquis coté des pylônes H et TT du réseau suédois à 220 kV.

A et C : Constructions en acier.

B et D : Constructions en bois.

manière partout à peu près de la même manière (déclenchement automatique, suivi dans la très grande majorité des cas par le réenclenchement automatique ou à main), l'aspect des dégâts est différent dans les différents pays. Cette différence est causée en partie par la manière différente de la mise à terre du neutre du système.

Dans les réseaux avec mise à la terre par bobine d'extension (Suède jusqu'en 1950) on constate un nombre considérable de défauts de disjoncteurs, et en second lieu de parafoudres (220 kV). Ces défauts n'ont pas été causés par des surtensions atmosphériques, mais sont la suite de surtensions internes lors du branchement et du déclenchement des lignes. Sans doute le changement à la mise à la terre directe du neutre, effectué en 1950, sera favorable au meilleur comportement des disjoncteurs et au meilleur succès des parafoudres.

Dans les réseaux avec mise à la terre directe du neutre (Angleterre, France), on constate surtout des dégâts aux transformateurs de puissance et de mesure.

Ces expériences ont eu pour suite l'introduction d'éclateurs de protection au voisinage des transformateurs dans les deux pays. Les écarts des éclateurs à tige montés à ce but sont assez petits :

Pour le réseau à 132 kV anglais, on commença en 1935 avec $32' = 81$ cm, en réduisant avec le temps, de manière que tous les transformateurs soient équipés aujourd'hui d'une corne de protection de $26' = 66$ cm. Ces éclateurs ne sont pas montés aux bornes des transformateurs, afin d'éviter de les abîmer, mais entre ceux-ci et les transformateurs de mesure alimentant les relais de protection. Depuis 1935 il y a eu 46 amorçages de ces éclateurs de protection ; on évalue 1,5 amorçages par 100 transformateurs et par an.

Dans le réseau français, l'Électricité de France a introduit récemment les écarts suivants des éclateurs :

pour le réseau à 150 kV.....	55 à 68 cm
pour le réseau à 220 kV.....	80 à 100 cm

Dans 19 stations équipées de 39 éclateurs (31 aux départs des lignes, 8 aux transformateurs) depuis deux ans, on a constaté 64 amorçages, dont 43 dus aux orages.

Ces expériences font poser la question si et de combien les constructeurs de transformateurs réduisent l'isolement des transformateurs à neutre mis à terre, comparé à celui des transformateurs à neutre isolé. L'impression est que la coordination de l'isolement interne et externe des transformateurs avec neutre à la terre n'est plus suffisante, de telle sorte qu'il faut recourir forcément aujourd'hui à une réduction très importante de l'isolement extérieur au moyen des éclateurs de protection.

La question posée est de nature économique ; pour la résoudre il faudrait d'abord connaître le niveau de l'isolement interne des transformateurs, ce qui exige des essais de choc sur une base étendue.

Le Comité est de l'avis que la statistique des perturbations et surtout des appareils abîmés dans les stations et de l'efficacité des protections devrait être poursuivie et amplifiée.

Pour tous ceux qui sont intéressés dans cette statistique des effets des surtensions atmosphériques, nous reproduisons ici le tableau révisé des questions concernant les perturbations des lignes.

Les questionnaires détaillés sont à la disposition des exploitants intéressés ; le Secrétariat de la C.I.G.R.E. s'est chargé de la distribution sur demande.

TABLEAU 4.

1 Position	2 Société d'explo- itation	3 Tension d'explo- itation kV	4 Longueur			5 Niveau isokéraunique	
			du tracé km	du circuit km	valable pour an	moyen (longue période)	pendant période d'obser- vation (1)

1 Position	6 Tension de contournement		7 Fils de terre		8 Résistance de terre des pieds des pylônes	
	50 0/0 au choc kv de crête (2)	50 p : s à sous pluie kV _{eff}	Nombre	Angle de protection au pylône	moyenne	90 0/0 des résistances entre Ω et Ω

1 Position	9 Nombre des défauts (3)			
	Année	Total	Total	causés par orage par 100 km et par an

(1) Si ce nombre n'est pas connu, caractérisez la période d'observation, p. ex. : Riche ou pauvre en orages, etc.

(2) Si non connu, nombre d'éléments par chaîne, ou écart entre électrodes.

(3) Par *défaut* on comprend ici une perturbation causant le déclenchement automatique d'un disjoncteur ou d'un fusible à haute tension dans la station.

Dans les réseaux avec mise à terre par bobines d'extinction, on recommande de mentionner comme deuxième chiffre le nombre de mises en terre passagères causées par orages, dont l'arc a été supprimé par les bobines d'extinction.

Dans les réseaux à déclenchement et réenclenchement automatiques par phase chaque déclenchement sera compté comme unité, sans tenir compte du nombre de phases déclenchées à la fois.

Extrait de la *Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques*.
Session 1952.