

**64. — LES PHÉNOMÈNES DE SURTENSION
PAR TEMPS D'ORAGE
DANS LES RÉSEAUX AÉRIENS.
ÉTAT ACTUEL DE LEUR ÉTUDE EN SUISSE**

par

K. BERGER,

Dr. ing. de l'Association suisse des Électriciens, Zurich.

RÉSUMÉ

L'auteur donne un aperçu des études qu'il a faites sur les perturbations atmosphériques dans des installations et sur des lignes aériennes à haute et à moyenne tension, études dont il a été chargé par l'Association Suisse des Électriciens (ASE), et qui sont encore en cours à l'heure actuelle.

Ces essais ont été entrepris en été 1928 à l'aide d'un oscillographe cathodique enregistreur, qui fut construit d'après l'appareil de Dufour dans les ateliers de l'ASE en 1926 et 1927, et qui se trouve décrit dans le Bulletin de l'ASE, 1928. De 1928 à 1930 les enregistrements furent effectués avec un seul oscillographe; à partir de l'été 1930 les oscillographes en service furent au nombre de deux. Les observations portèrent sur une ligne monophasée à 132 kV. Les résultats montrent le genre de fatigue à laquelle sont soumises les installations électriques par suite de coups de foudre.

En particulier ils permettent de se rendre compte que les décharges de foudre indirectes, le mot étant pris dans le sens de la terminologie commune, ne représentent qu'une source de danger très restreinte. Les perturbations des lignes à haute et à moyenne tension ne sont pas causées, ainsi qu'on l'admettait généralement jusqu'alors, par des coups de foudre indirects, mais bien, soit par des décharges directes sur la ligne, soit par des étincelles de ligne provoquées par la foudre. Cette conclusion résulte des mesures faites simultanément sur plusieurs fils de la même ligne, à l'aide de deux oscillographes cathodiques placés au même endroit. Elle est corroborée par les expériences d'exploitation, dont l'auteur donne quelques exemples typiques. L'auteur décrit ensuite l'image du phénomène de perturbation, telle qu'elle résulte des mesures faites sur les lignes à haute tension, et la soumet à la discussion.

Les conséquences pratiques des essais faits jusqu'ici se dégagent en premier lieu de la constatation faite de l'absence de tout danger lors de décharges indirectes à proximité de lignes à très haute tension et à tension moyenne. En second lieu elles se dégagent de l'observation d'après laquelle, par suite de la foudre dans la majorité des cas, sinon dans tous, c'est tout d'abord un seul des conducteurs de la ligne qui se décharge à la terre. Les décharges multipolaires

ne sont pas provoquées directement par le coup de foudre, mais seulement indirectement, par des causes secondaires telles que l'amorçage de l'arc, ou une mise à la terre insuffisante du pylône. En troisième lieu la connaissance des ondes de tension provoquées par la décharge de la foudre permet d'étudier rationnellement la construction de parafoudres pouvant protéger efficacement la ligne contre les décharges atmosphériques qui se produisent à une certaine distance de ces appareils. Les essais ultérieurs porteront avant tout sur les phénomènes qui se produisent aux alentours immédiats de la décharge de la foudre.

I. — INTRODUCTION

Dès les premiers transports d'énergie électrique à distance, l'expérience montra que les lignes aériennes à basse et à haute tension étaient sujettes à des perturbations pendant les orages. Ces perturbations se manifestent de différentes manières. Dans les cas les plus simples on a une décharge unipolaire à la terre, ou bien un court-circuit, ou bien encore des décharges dans les stations branchées sur la ligne. Ces phénomènes provoquent bien souvent la destruction d'isolateurs et de poteaux en bois sur la ligne, et d'appareils plus ou moins chers dans les stations. Le manque d'un instrument de mesure convenable rendit impossible un examen exact de ces perturbations jusqu'à ces dernières années. Ce fut seulement en 1923, après que le tube de Braun eut été perfectionné par le physicien français P. Dufour jusqu'à pouvoir servir comme oscillographe (1), que l'on put songer à une étude sérieuse des surtensions causées par les orages dans les lignes aériennes. Ces études commencèrent en Suisse en automne 1926, sur l'initiative de l'Association Suisse des Electriciens (ASE). L'appareil de Dufour fut radicalement transformé dans le but d'en faire un instrument enregistreur répondant aux besoins des installations électriques (2). Etant donné qu'en d'autres pays on a également travaillé, soit antérieurement (3), soit même simultanément (4), à la solution de ces problèmes, un certain parallélisme des travaux, pour ce qui est du développement des oscillo-

(1) P. DUFOUR. — L'oscillographe cathodique, Paris 1923.

(2) K. BERGER. — Des transformations ultérieures de l'oscillographe cathodique comme instrument enregistreur, *Bulletin ASE*, 1928, nos 9 et 21.

(3) Nous mentionnons par ex. les travaux de H. NORINDER en Suède et de la Société d'Études des installations à très haute tension, en Allemagne.

(4) Nous signalons à ce sujet es mesures faites aux États-Unis sur une très large échelle. Au sujet du développement des oscillographes cathodiques, mentionnons aussi les travaux des Écoles Polytechniques d'Aix-la-Chapelle, Berlin et Dresde.

graphes en particulier, n'a pu être évité. La figure 1 montre les deux oscillographes de l'ASE, dont l'un fut construit dans ses ateliers à la suite de travaux qui durèrent un an et demi, et dont l'autre fut mis à sa disposition par la fabrique d'instruments Trueb, Täuber & Co. à Zurich. Les deux oscillographes sont mon-

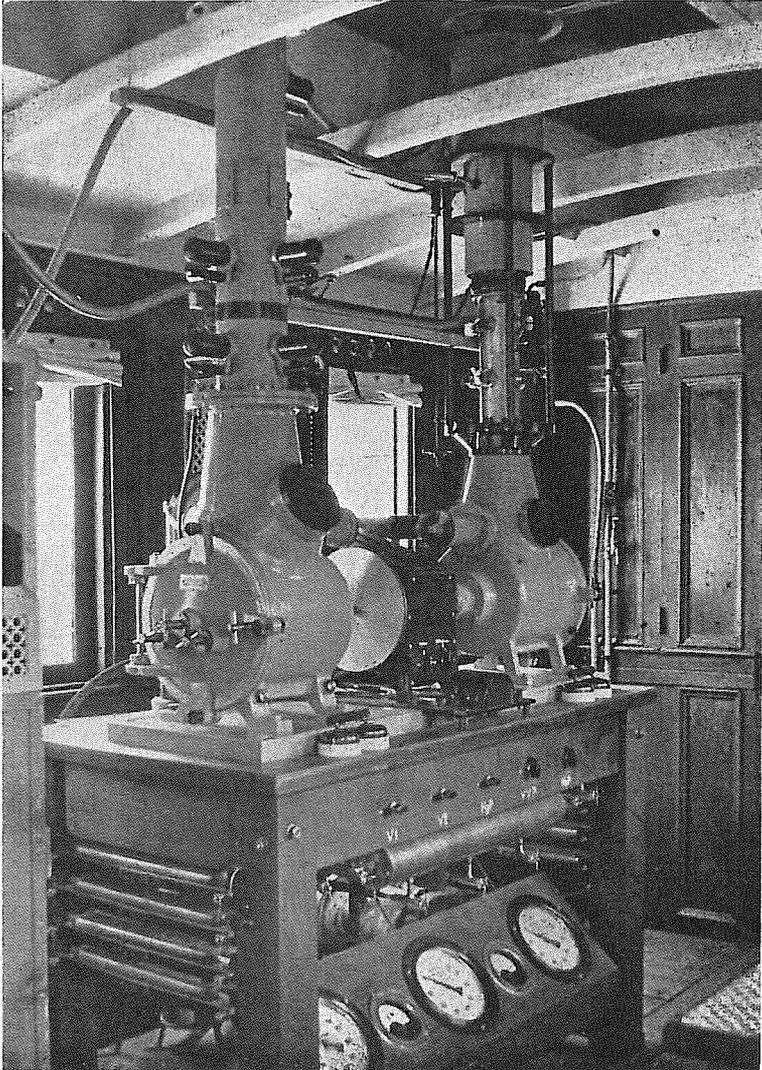


Fig. 1

Oscillographe cathodique double.

tés avec tous leurs accessoires dans un wagon de chemin de fer, et tout le dispositif d'enregistrement peut être déplacé sans grand démontage jusqu'à l'endroit voulu. La figure 2 montre l'inté-

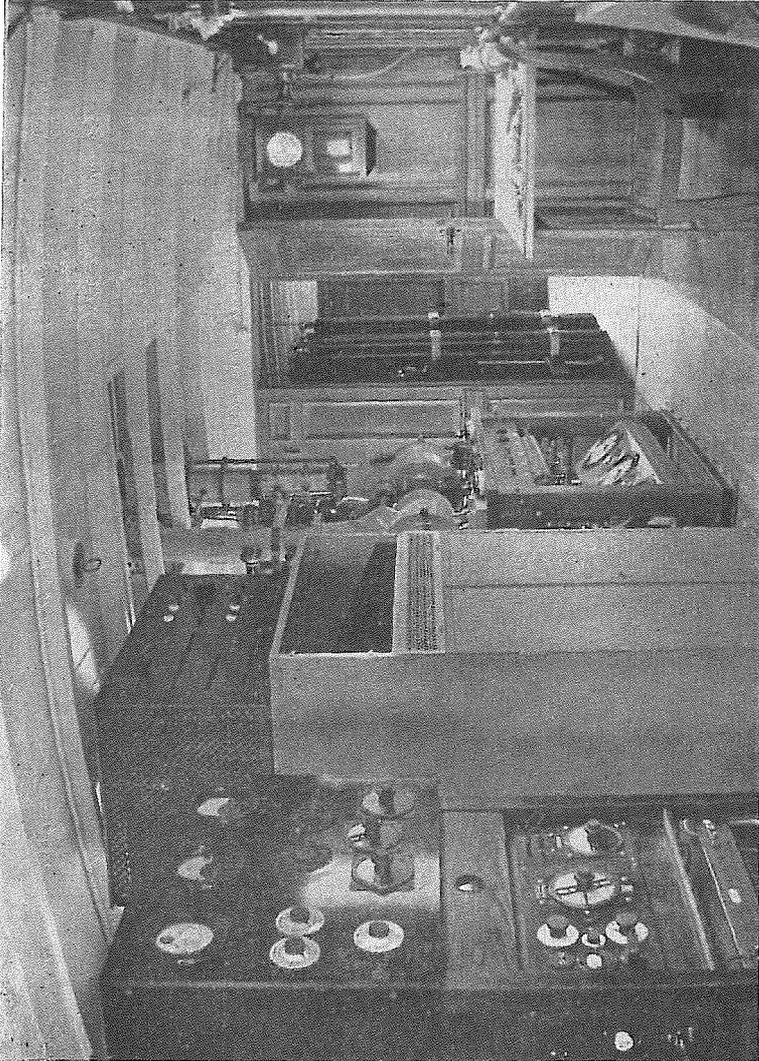


Fig. 2
Intérieur du wagon-laboratoire.

rieur de ce wagon, le compartiment d'enregistrement au premier plan, le compartiment des machines au fond. Nous possédons donc un petit laboratoire transportable, qui nous a été d'une très grande

utilité pour les essais oscillographiques sur les installations électriques. Nous saisissons l'occasion pour exprimer aux chemins de fer fédéraux Suisses nos remerciements pour toutes les facilités qu'ils nous ont obligeamment accordées. Les chemins de fer fédéraux mirent en outre à la disposition de l'ingénieur chargé des essais et de sa famille un deuxième wagon, aménagé en logement avec cabinet de travail. Les figures 3 à 5 montrent combien ces

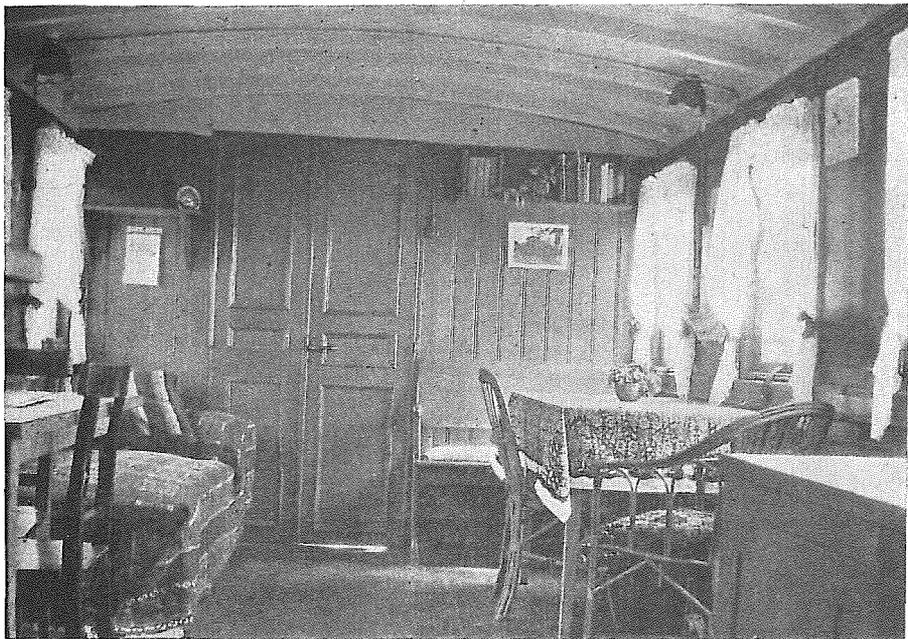


Fig. 3.

Wagon d'habitation (appartement).

petites pièces furent arrangées confortablement par la femme de l'ingénieur. Sa collaboration assidue, non seulement pour la « tenue du ménage », mais aussi et surtout comme assistante de l'ingénieur, a d'ailleurs contribué grandement à faciliter les travaux et a permis de poursuivre ceux-ci durant trois années, d'une manière très approfondie, ce dont je tiens à l'en remercier encore ici.

II. — LA CARACTÉRISTIQUE TENSION-TEMPS DES PERTURBATIONS DANS LES LIGNES AÉRIENNES

a) Mesures effectuées sur des lignes de traction à 1.200 v. — La première tâche dans cette étude fut naturellement de déterminer la hauteur et l'allure des tensions atmosphériques dans les lignes aériennes. Nos premières mesures à l'oscillographe cathodique portèrent surtout sur la ligne de traction d'un chemin de

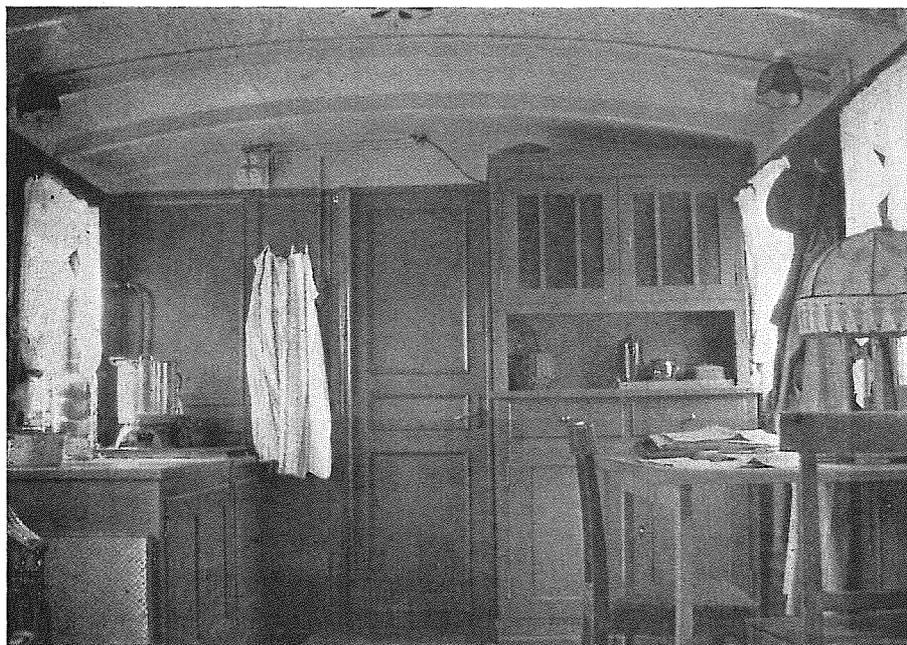


Fig. 4.

Wagon d'habitation (cuisine).

fer de banlieue, à courant continu de 1 200 volts. La figure 6 montre sa position géographique, les figures 7 à 10 quelques exemples d'oscillogrammes. Nous avons rassemblé les principaux résultats de nos observations dans la classification suivante :

1. Les surtensions atmosphériques se produisirent seulement au moment même d'une décharge de foudre à proximité de la ligne.

2. La ligne ne fut jamais frappée directement par la foudre. Toutes les observations portèrent sur les décharges « indirectes », qui n'influencent la ligne que par leur action électromagnétique à distance.

3. Sur environ 240 oscillogrammes enregistrés par l'oscillographe au moment des coups de foudre, la plupart accusent une amplitude de la surtension variant seulement entre quelques centaines et quelques milliers de volts. La ligne de traction était à la terre en permanence à l'aide d'une résistance de 100 000 ohms.



Fig. 5.

Wagon d'habitation (dortoir).

4. La durée de formation d'une surtension causée par un coup de foudre indirect est presque toujours de 500 à 1 000 microsecondes. La surtension disparaît ensuite dans un intervalle de temps déterminé par les constantes de la ligne.

5. La caractéristique tension-temps de la surtension a une forme analogue à celle de la tension-temps quand on charge un condensateur. En outre, deux autres phénomènes viennent s'y

superposer : d'une part, l'oscillation propre de la ligne influencée par la foudre, d'autre part une énorme quantité de points et d'échelons grands et petits disposés à intervalles irréguliers sur la courbe de la tension.



Fig. 6.

Tracé de la ligne de traction 1 200 V. : Zurich-Forch-Esslingen.

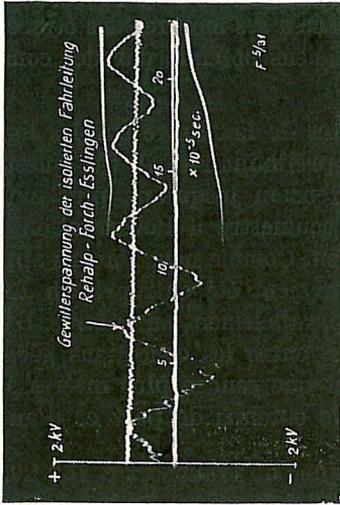


Fig. 8.

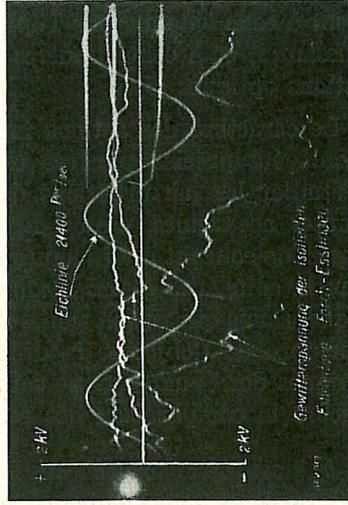


Fig. 10.

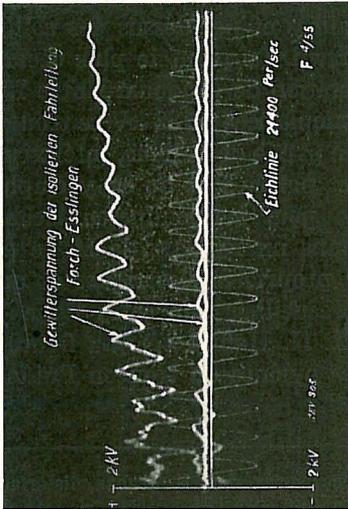


Fig. 7.

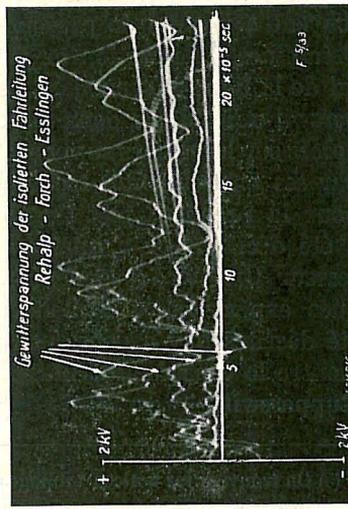


Fig. 9.

Fig. 7, 8, 9 et 10.

Exemples d'oscillogrammes pris sur la ligne de la figure 6.

6. La discussion des oscillogrammes conduit à une image des plus compliquées de ces phénomènes, et qui correspond exactement à celle obtenue par Töpler grâce à ses mesures des étincelles glissantes, et à celle d'autres physiciens obtenue par des constatations optiques (5).

Le caractère des actions indirectes de la foudre sur les lignes ayant été précisé par ces essais préliminaires, il fut question d'étudier les perturbations de la tension jusqu'aux plus hautes limites accessibles, c'est-à-dire de soumettre à l'observation des lignes de courant à très haute tension. Comme nous l'avons appris par la suite, des essais analogues avaient été entrepris en Amérique, essais qui furent poursuivis parallèlement aux nôtres. L'importance de l'objet et la différence entre les conditions géographiques des deux pays ne sauraient que rendre plus intéressante encore la comparaison des résultats obtenus de part et d'autre.

b) Mesures effectuées sur les lignes de transport à 132 kv. — Les oscillogrammes suivants ont été obtenus sur la ligne double de transport, sans bifurcations, la plus longue de la Suisse. Sa position est indiquée sur la figure 11. Elle appartient aux chemins de fer fédéraux et transporte le courant de l'usine de Vernayaz, souvent à travers de profondes vallées et par-dessus des collines préalpines, à la station de Rapperswil. Le point le plus occidental de la ligne se trouve à la sous-station de Puidoux. Entre Rapperswil et Puidoux, deux lignes monophasées à 132 kV se trouvent posées sur les mêmes supports. Cette partie de la ligne, intéressante par ses particularités techniques et par le fait qu'on y employa pour la première fois l'« aldrey » pour les conducteurs câblés, a été décrite il y a quatre ans dans un rapport de M. le professeur Dr. W. Wyssling (6). Ses propriétés électriques et quelques expériences d'exploitations recueillies sur cette ligne ont été décrites il y a deux ans par M. H. Habich (7). La figure 12 montre la construction normale des pylônes du tronçon Puidoux-Rapperswil.

(5) On trouvera les notices bibliographiques par ex. dans K. BERGER, dissertation, Zurich, 1930.

(6) W. WYSSLING. — Ligne électrique à longue portée des Chemins de fer Fédéraux Suisses, en alliage d'aluminium à conductibilité élevée et à haute résistance mécanique (Compte-rendu session 1927, tome I, p. 1124).

(7) H. HABICH. — Mesures effectuées et expériences réalisées en cours d'exploitation sur le réseau à 132 kV des Chemins de fer Fédéraux Suisses (Compte-rendu session 1929, tome III, p. 7.

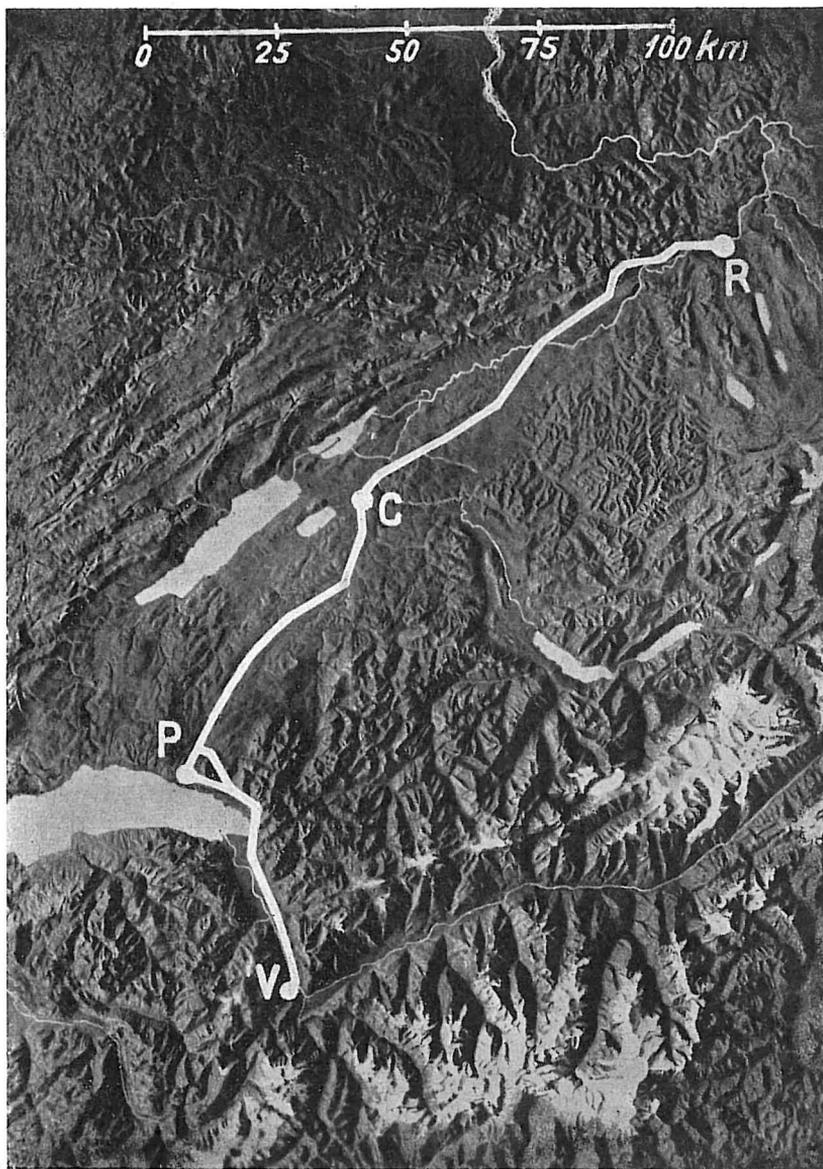


Fig. 11.

Tracé de la ligne de transport 132 kV des Chemins de fer Fédéraux.

De Puidoux à Vernayaz les deux lignes de 132 kV se trouvent posés sur des pylônes différents. La première est posée sur les mêmes pylônes que deux lignes monophasées à 66 kV (tension de régime) et forme avec celle-ci une canalisation multiple à trois circuits. La figure 21 montre un pylône de cette conduite endommagé par la foudre. La deuxième ligne à 132 kV est posée sur les mêmes pylônes que 2 lignes triphasées à 120 kV (tension de régime). Un pylône de cette conduite, également endommagé par la foudre (voir chapitre 3 a), est visible dans la figure 20.

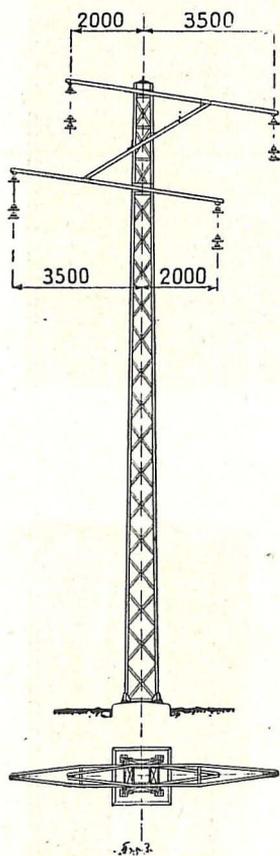


Fig. 12.

La longueur totale de la ligne, de Rapperswil à Vernayaz, est de 210 resp. 216 km. Si l'on en excepte les transformateurs des deux sous-stations de Puidoux et Chiètres, la ligne est sans bifurcations sur toute sa longueur. Les deux circuits sont alimentés séparément. Le point neutre de tous les transformateurs du système est mis à la terre directement. Le réseau est dépourvu d'appareils de protection contre les surtensions. L'allure et l'amplitude des plus importantes surtensions provoquées par des décharges de foudre, mesurées sur ce réseau à 132 kV, ressortent des oscillogrammes suivants (fig. 13 à 17). L'évaluation en chiffres des oscillogrammes les plus importants figure dans le tableau I.

Le tableau 2 rend compte de la distribution de l'amplitude des surtensions provoquées par les orages, enregistrées par l'oscillographe et superposées à la tension de régime.

Nous condensons les résultats des oscillogrammes pris sur la ligne à 132 kV en une courte description de leurs caractéristiques essentielles :

1. Les surtensions causées par les coups de foudre ont très rarement des valeurs supérieures à 100 kV. Dans la plupart des cas la foudre ne cause que des surtensions inférieures à 5 kV en-

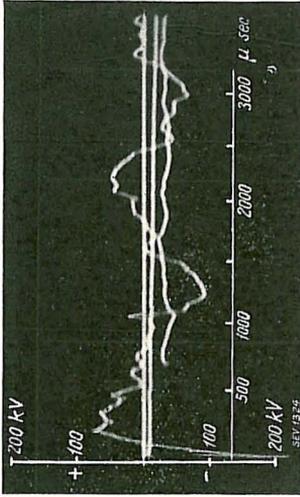


Fig. 15.

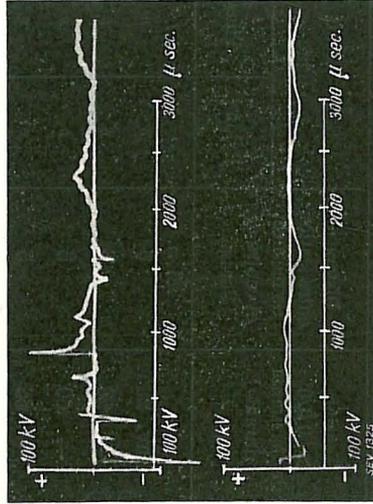


Fig. 16.

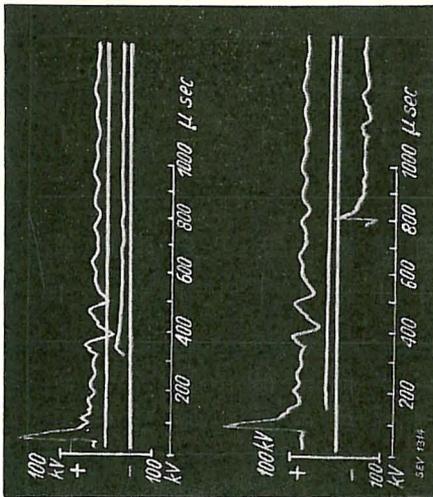


Fig. 13.

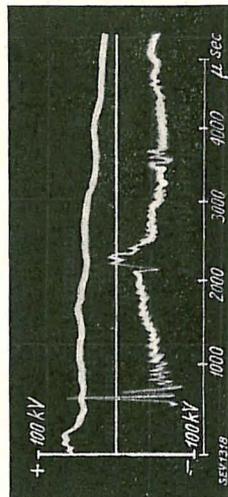


Fig. 14.

Fig. 13, 14, 15 et 16.

Exemples de surtensions mesurées sur la phase BU (Fig. 18)
de la ligne 132 kV (Fig. 11).

TABLEAU I

Quelques oscillogrammes de phénomènes de surtensions de foudre.

N°	Enregistré		Tension maximum		Durée totale de la tension de foudre μs	Tension > 50 0/0 du maximum durant μs	Distance entre station de mesure et centre de l'orage kilom.	Court-circuit de ligne	
	le	sur phase (Fig. 18)	Polarité kV maximum	atteinte en μs				Pylône	Phase
1	20-6-29	A. V.	+ 164	Env. 5	Env. 50	Env. 28	6	»	»
2	»	A. V.	+ 175	< 5	— 90	— 28	5	»	»
3	»	A. V.	+ 123	Env. 10	— 100	— 60	5	»	»
4	»	A. V.	+ 102	— 12	— 200	— 65	5	»	»
5	21-7-29	B. U.	+ 135	— 10	— 60	— 20	200	I 48	B. U.
6	24-5-29	B. U.	— 220	— 8	— 25	— 15	150	II 44	B. U.
7	25-7-29	B. U.	— 160	— 6	— 120	— 22	95	} La ligne était hors service.	
		B. U.	+ 98	< 5	— 220	— 20	95		
8	21-7-30	B. U.	— 290	10,5	— 120	— 22	10 + 20	»	»
		A. V.	+ 43	Env. 5	— 30	— 15	»	»	»
9	5-8-30	B. U.	— 92	— 1	— 70	— 3	5	»	»
		A. V.	+ 15	— 1	— 70	— 20	»	»	»

REMARQUE. — Les oscillogrammes 1 à 7 ont été relevés à l'une des extrémités de la ligne et enregistrent donc la tension des ondes réfléchies.

Les oscillogrammes 8 et 9 ont été mesurés dans une station de transit ; ils enregistrent donc l'amplitude de l'onde mobile traversant la station.

TABLEAU II

Amplitude de la tension de foudre près de la station de mesure		< 5 kV eff.	5 + 15 kV	15 + 50 kV	50 + 100 kV	> 100 kV
Nombre d'oscillogrammes par phase durant les périodes de mesure :	20-VI + 10-X 1929	210 + X*	65	40	5	5
	10-VII + 30-X 1930	300 + X*	35	20	3	3

(*) X désigne le nombre des surtensions de foudre qui ne purent plus être mesurées dans les oscillogrammes, leur potentiel étant inférieur à 1 000 V.

viron. Même pendant des orages violents au voisinage de la ligne, il est très rare qu'on constate une surtension de 100 kV ou davantage; les décharges à proximité immédiate de la ligne ne provoquent dans la plupart des cas que des surtensions sans importance. Nous reviendrons sur ce point par la suite.

2. Les tensions atmosphériques maximums produites par la décharge de la foudre sur les lignes à très haute tension atteignent, comme on sait, la tension de contournement des isolateurs; elles se chiffrent donc à plusieurs centaines de kVA des distances de 150 à 200 km du centre de la perturbation, ces tensions sont amorties jusqu'à 220 resp. 130 kV (tension de l'onde réfléchie).

3. La courbe des plus grandes ondes de tension causées par la foudre est caractérisée en général par un seul choc de front très raide, dans le sens positif ou négatif. Des oscillations à très haute fréquence ne furent observées que dans des limites très restreintes; par contre il arriva parfois que plusieurs chocs se produisirent dans un intervalle d'environ 1/1000 de seconde, provenant non pas de la réflexion de la ligne, mais bien de la décharge de foudre elle-même.

4. La durée d'un choc de tension causé par la foudre est d'environ 15 à 100 μ s, quand les surtensions sont de plus de 100 kV. On a observé 200 μ s dans un seul cas, sur un potentiel de 100 kV de l'onde réfléchie (n° 7 du tableau I).

5. L'allure et la durée de ces tensions étaient pratiquement les mêmes, que la ligne aérienne fût en service ou non. La dérivation des surtensions par les transformateurs est insignifiante, même si leurs points neutres sont mis à la terre directement.

6. Le front des ondes d'orages les plus brusques atteint dans les oscillogrammes à peu près la même raideur que celui des ondes

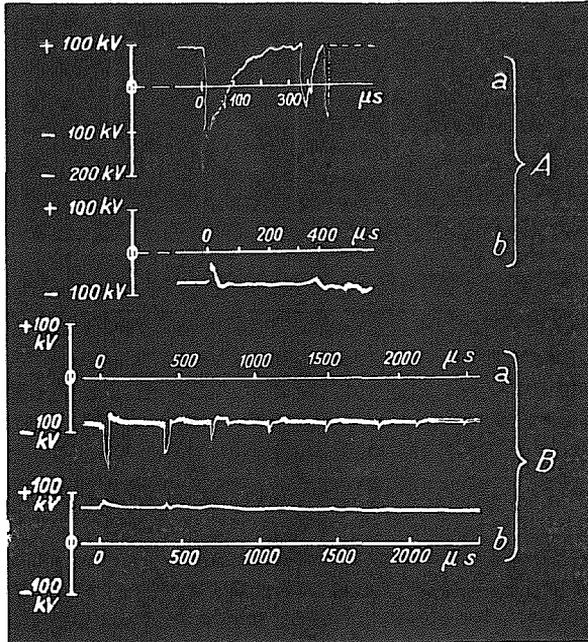


Fig. 17.

Exemples de surtensions mesurées sur la ligne de 132 kV (Fig. 11).

A = relevé le 21 juillet 1930 à 16 h. 07.	$\left\{ \begin{array}{l} a = \text{sur la phase BU (Fig. 18).} \\ b = \text{--- AV ---} \end{array} \right.$
B = relevé le 5 août 1930 à 13 h. 55.	

d'enclenchement produites artificiellement à égale distance. On en déduit que le front d'une onde d'orage peut être, à son point de départ, concentré sur moins d'une microseconde (μs).

7. Les surtensions d'orage d'un potentiel inférieur à 50 kV sont assez fréquentes; elles ont une forme très compliquée, leur front est beaucoup moins raide et leur durée plus longue. Leur courbe

a une certaine ressemblance avec celles de surtensions encore plus faibles, mesurées en 1928 sur la ligne de tension moyenne déjà mentionnée.

Nous avons donc appris à connaître la courbe des surtensions d'orage, telles qu'elles arrivent aux stations. Si je ne me trompe, nos résultats ont été confirmés par ceux des observateurs américains. En Amérique on a d'ailleurs mesuré des tensions encore plus élevées, ce qui provient évidemment du nombre sensiblement plus grand des stations de mesure et de la chance qu'on a d'enregistrer des perturbations provoquées par la foudre dans un rayon de 100 à 1 000 m de la station de mesure. L'amortissement de ces tensions élevées par l'effet de couronne est considérable, à tel point que les hautes tensions — comme nous l'ont appris les expériences américaines faites sur des décharges artificielles — sont déjà sensiblement amorties après quelques kms seulement de parcours sur la ligne.

Nous avons donc confirmé expérimentalement les bases théoriques pour la construction d'appareils susceptibles de protéger efficacement les installations électriques contre les surtensions causées par les décharges de foudre. Nous possédons également des données précises qui nous permettent de contrôler les appareils appelés à protéger les stations contre les décharges qui se produisent au dehors, et à plus de 2 km de distance de celles-ci. Les oscillogrammes montrent davantage encore : ils prouvent qu'il serait absolument inutile de vouloir protéger une ligne aérienne contre les décharges provoquées par la foudre par un parafoudre posé à l'intérieur d'une station. L'à-coup de tension est beaucoup trop subit pour cela; en d'autres termes, le caractère de la surtension est essentiellement celui d'une onde mobile transitoire : on a bien souvent une décharge de la ligne au foyer de la perturbation, avant que l'onde ait atteint le parafoudre.

Si l'on garde en vue le but de l'étude des orages, on se rend compte que nous n'avons résolu le problème qu'en partie et que nous sommes parvenus à protéger les stations contre les dégâts seulement. Ce qui reste à résoudre, c'est de trouver un dispositif évitant les interruptions de service par les coups de foudre sur les lignes aériennes elles-mêmes. La solution de ce problème est bien plus ardue, étant donné qu'elle exige la connaissance de ce qui se passe dans le pylône dérangé et dans la foudre elle-même. Les recherches ultérieures porteront donc sur l'endroit même où l'effet de la foudre s'est produit. Nous rendons compte par la suite des résultats que nous avons obtenus à ce sujet.

III. — RAYON ET GRADIENT DE LA SURTENSION DE Foudre

a) Expériences d'exploitation et statistique. — Avant de soumettre au lecteur les résultats des mesures effectuées sur place, il est intéressant de recueillir quelques observations faites en service et quelques données statistiques sur le même objet. La plupart proviennent de la division pour l'électrification des chemins de fer fédéraux, qui nous les a obligeamment communiquées. Dans le tableau 3 on trouve énumérées les perturbations causées par la foudre sur la ligne à 132 kV (200 kms) pendant les années 1929 et 1930. Par suite de la mise à la terre directe du point neutre, chaque décharge monophasée à la terre constitue un court-circuit. Chaque phase est munie de relais avec clapets et voyants à courant maximum, ce qui permet de reconnaître dans toutes les stations la phase affectée.

La figure 18 indique le nombre de contournements sur les 4 câbles du parcours Puidoux-Rupperswil, causés par les coups de foudre.

Ainsi que le démontre le tableau, en 1929 il n'y eut aucune perturbation bipolaire; toujours un seul des conducteurs fut déchargé à la terre. Ce phénomène frappant attira notre attention, d'autant plus qu'il a une portée pratique directe. Il est évident qu'en ce cas un réseau sans mise à la terre directe du neutre offre de grands avantages quant à la sécurité d'exploitation comparé à un réseau dont le neutre est mis à la terre directement. La foudre aurait simplement pour effet de produire des arcs accidentels à la terre par suite de surtensions ayant une courbe analogue à celle que montrent les oscillogrammes. Les isolateurs étant protégés contre les chocs de tension et contre les amorçages d'arc du courant de mise à la terre, un réseau mis à la terre indirectement, par exemple par des bobines d'amortissement ou d'extinction, serait entièrement protégé contre la foudre. *Nos observations nous engagèrent dès lors à essayer de préciser d'une manière plus exacte le rayon de la perturbation due à la foudre, ou plutôt, le rayon de la surtension autour du coup de foudre.* Cette constatation ne va pas sans une connaissance exacte du parcours de la décharge de foudre, et de la distance entre celui-ci (éventuellement aussi de ses branches latérales) et les câbles. Ce qui fait que l'observation des objets (arbres, maisons, pylônes, poteaux, etc.) frappés par la foudre dans le voisinage de la ligne devient de la plus grande importance. Par des mesures relevées

TABLEAU III

N°	Temps		Perturbation portant sur				Résistance de terre du pylône dérangé, mesuré	
			Localité	Pylône	Service (Fig. 18)	Phase (Fig. 18)	avec fil de terre	sans fil de terre
1929								
1	19-6.	16 01	Ve.	»	A	U	»	»
2	4-7.	14 46	Chénens	151	B	U	3,1 Ω	35 Ω
3	21-7.	16 54	St M.	48	B	V	?	?
4	21-7.	21 43	Ve.	19	B	U	?	?
5	24-7.	22 46	Ve-Pd.	?	B	U	»	»
6	24-7.	22 48	Ve-Pd.	?	A	U	»	»
7	24-7.	23 01	Oron	44	B	U	0,7 Ω	22,1 Ω
8	18-8.	7 22	» *	47	A	U	0,5 Ω	8,4 Ω
9	18-8.	7 22	» *	45	B	U	1,0 Ω	10,5 Ω
10	18-8.	22.49	B. Noir	45	B	V	?	?
1930								
1	29-4.	19 54	L'dorf	257	A	V	1,0 Ω	29 Ω
2	3-6.	16 42	Pd.	209	A	V	?	?
4	11-6.	8 »	Roche	109	B	U	?	?
6	6-7.	16 04	Ke-Ru	?	B	U	»	»
7	10-7.	16 54	V. St P.***	127	A	V***	2,1 Ω	6,8 Ω
					B	U***	2,1 Ω	6,8 Ω
<p>(*) Cette perturbation s'étendit simultanément à deux pylônes, qui n'étaient pas voisins (nos 45 et 47). A chaque pylône on eut la décharge d'une seule phase, mais les conducteurs des deux phases dérangées n'appartenaient pas au même service et se trouvaient être les plus éloignés du pylône.</p> <p>(**) Les deux oscillogrammes respectifs prouvent clairement que cette perturbation a été d'abord <i>unipolaire</i>, au moins durant deux demi-ondes du courant de court-circuit; la perturbation n'a donc pu affecter l'autre phase qu'à la suite d'une extension de l'arc vers celle-ci.</p>								

sur des antennes, la « Société d'études des installations à très haute tension » à Berlin (Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen) est arrivée à la même conclusion; avertie, par l'expérience et le calcul, de l'absence de danger en cas de décharges indirectes de la foudre, elle conclut à l'importance de ce genre d'observations (8).

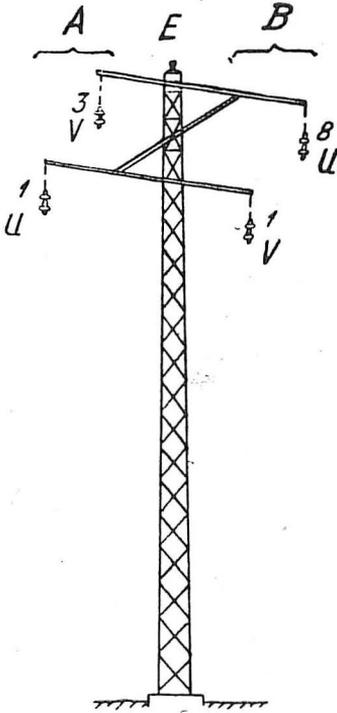


Fig. 48.

Nombre de perturbations par conducteur, parcours Puidoux-Rupperswil. A et B indiquent les deux services monophasés séparés.

Dans tous les autres cas, où toute trace de coup de foudre a disparu et où il n'est plus possible d'identifier sa position exacte, il faut se contenter de constater la différence entre les surtensions provoquées dans les câbles voisins et isolés les uns des autres, c'est-à-dire qu'il faut déterminer *le gradient de la surtension de foudre dans l'espace entre les câbles*. Notre tâche consista donc non seulement à observer les décharges directes de la foudre sur les pylônes, etc., mais en outre à mesurer simultanément les surtensions produites par la foudre sur les différents fils ou phases de la ligne. Des statistiques établies soigneusement pour déterminer le nombre et l'endroit précis des perturbations simultanées causées par la foudre dans différentes phases ou lignes, poursuivirent le même but.

Nous mentionnons d'abord les observations sûres faites pour déterminer le rayon de la surtension de foudre :

1. En 1929 la foudre frappa et incendia une maison distante d'environ 1 200 mètres de la ligne en observation. Les surtensions les plus élevées enregistrées par l'oscillographe à ce moment dans la ligne n'atteignirent pas 10 kV.

(8) Prof. A. MATTHIAS. -- Étude des orages et de la protection contre la foudre deuxième Conférence mondiale de l'énergie, Berlin 1930.

2. En 1930 j'eus connaissance de 2 coups de foudre qui avaient frappé deux maisons : l'un fut suivi d'un incendie dans la cave, l'autre causa de graves dégâts à la toiture, encore visibles aujourd'hui. La distance qui sépare les 2 maisons de la ligne de 132 kV est de 250, resp. 20 mètres. Le service ne fut nullement dérangé.

3. En 1928 la foudre frappa un poirier à une distance de 70 m de la ligne. L'éclatement est encore visible aujourd'hui. Le service n'en éprouva aucun dérangement.

4. La foudre tomba sur le toit de la halle de montage d'une sous-station, qui comporte des installations extérieures pour 15, 66 et 132 kV. Les effets mécaniques furent bien visibles (une plaque en éternite de la toiture fut perforée) sans que le poste ait eu à subir la moindre perturbation de service. La distance entre le toit et la partie métallique mise à la terre de l'installation extérieure est d'environ 2 m. Le toit, resp. le pont roulant, sont reliés à la même terre que cette installation.

5. Les observations de perturbations simultanées dans plusieurs lignes à haute tension donnent des résultats qualitatifs analogues. Je n'ai eu connaissance d'aucun cas, constaté avec certitude, où deux lignes à peu près parallèles et distantes horizontalement de plus de 10 m l'une de l'autre fussent troublées simultanément par la foudre; or, à cause de la densité de son réseau à haute tension, la Suisse est certainement le pays qui se prêterait le mieux à ce genre d'observations. Il semble donc qu'une perturbation causée par la foudre simultanément dans deux lignes distantes de plus de 10 m l'une de l'autre soit extrêmement rare. Je mentionnerai à ce sujet que sur les lignes de traction des chemins de fer fédéraux suisses, par exemple, des courts-circuits causés par la foudre se produisirent sans que la ligne voisine à 132 kV en fut troublée, et vice versa. La distance entre les deux lignes était, dans les cas notés avec certitude, de 600, 550, 400, 350, 240 et même seulement de 20, 11 et 8 m.

6. Un exemple entre bien d'autres pour ces perturbations de lignes voisines : une ligne à courant triphasé de 50 kV, avec neutre à la terre par des bobines d'extinction, fut mise à la terre sur l'un des pôles par une décharge de foudre qui se produisit dans ses environs immédiats. L'arc de mise à la terre persista pendant 10 minutes environ jusqu'à rupture du fil, qui tomba à terre, où il « brûlait » encore au moment du déclenchement de la ligne, ordonné à la suite d'une information téléphonique. A 140 m de

distance, deux lignes de 66 et 132 kV n'en éprouvèrent aucune perturbation.

7. Ces observations sont complétées par celles de perturbations survenues sur les lignes de traction à 15 kV des chemins de fer fédéraux. Etant donné qu'un des pôles du réseau monophasé est toujours à la terre, chaque décharge constitue un court-circuit et ces décharges seront constatées d'une manière aussi sûre que sur le réseau à 132 kV. Sur un nombre total de 140 courts-circuits causés par la foudre en 1930, année très fertile en orages, 90 furent suivis de destruction d'isolateurs. Dans tous ces cas, l'endroit où le court-circuit se produisit a pu être exactement relevé. Ont été détruits :

Dans 86 cas, 1 seul isolateur;

Dans 1 cas, 4 isolateurs le long du même câble;

Dans 1 cas, 2 isolateurs le long du même câble;

Dans 2 cas, 2 isolateurs distants l'un de l'autre de presque 1 m.

Ces deux dernières destructions s'expliquent très simplement par l'arc de court-circuit allant d'un isolateur à l'autre. A peu près la moitié de ces 90 perturbations eut lieu sur des lignes de traction à double voie, dont les fils de contact étaient distants l'un de l'autre d'environ 4 m. Ces derniers sont couplés en parallèle dans les stations seulement; ailleurs ils peuvent être considérés comme étant indépendants par rapport à la tension de la foudre. Sur tout le réseau on n'a eu connaissance d'aucun cas où, en dehors des stations, les deux fils de contact ou bien l'un d'eux et une artère d'alimentation suivant la voie, eussent été touchés simultanément par la foudre.

8. Les observations ultérieures concernant des pylônes qui supportent plusieurs lignes à haute tension, indépendantes les unes des autres. D'après nos expériences, une perturbation simultanée de deux lignes posées sur les mêmes supports et distantes entre elles de plus de 3 m est un phénomène qui se produit très rarement si l'on fait abstraction de tous les cas où une mise à la terre défectueuse du pylône ou bien un amorçage d'arc jouèrent un rôle certain.

Pour illustrer ces constatations purement statistiques, nous reproduisons quatre exemples de perturbations typiques, observées dans des conditions exceptionnellement favorables :

9. Le premier exemple se rapporte à un pylône de 29 m de hauteur, situé près du croisement d'une ligne de transport à 132 kV

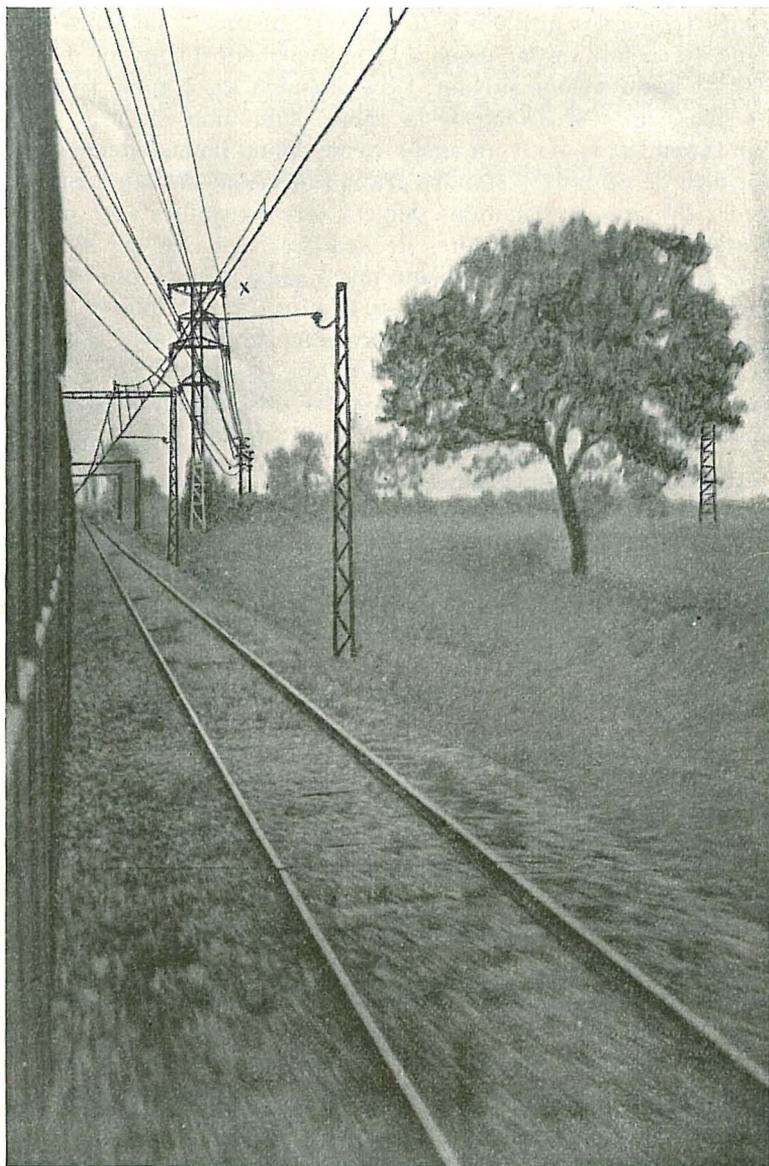


Fig. 49.

Pylône du croisement dérangé, p. 22, chap. III, 9.

et de deux lignes de traction à 15 kV. La figure 19 donne une vue du croisement. La ligne à 132 kV se trouve au-dessus de deux lignes triphasées à 120 kV (tension de régime). Le tracé de la ligne du chemin de fer passe à 11 m seulement du pylône dérangé et à 51 m du pylône suivant. Le croisement est à angle très aigu. La phase du côté droit (sur la photo) subit une décharge causée par la foudre, ce dont un agent voyer donna immédiatement avis. Au dire de celui-ci, la foudre frappa directement le pylône; toutefois, de telles affirmations doivent être accueillies avec circonspection. Les deux extrémités de la ligne triphasée qui se trouve sous la phase dérangée étaient mises à la terre à une distance d'environ 30 et 40 km du pylône. L'autre ligne triphasée (à gauche sur la photo) était en service; elle ne subit ni perte à la terre, ni court-circuit. La ligne de traction, qui croise les trois lignes de transport et dont l'isolement est trois fois plus faible, ne subit pas la moindre perturbation non plus.

10. Un deuxième exemple concerne un pylône un peu moins haut de la même ligne, représenté sur la figure 20. Chacune des lignes triphasées est munie ici, comme on le voit, d'un sectionneur aérien. Un coup de foudre, qui se produisit à proximité du pylône, détruisit d'un coup l'isolateur servant de pivot à la barre de contact du sectionneur, tandis que la barre resta dans la position fermée sur les contacts fixes. Cette canalisation triphasée ne possédant pas de mise à la terre directe du point neutre, on ne remarqua aucun dérangement dans le service. De même le service de la ligne à 132 kV, placée au-dessus, ne subit aucune perturbation. Comme pour le pylône du cas précédent, la distance entre ce pylône et la ligne de traction à 15 kV est très petite, puisqu'elle est de 8 m environ. La ligne de traction ne subit aucune perturbation, malgré son isolation plus faible.

11. La figure 21 illustre le troisième exemple. Elle montre un pylône portant trois lignes à haute tension, l'une de 132 kV en bas et deux de 66 kV en haut. La première ligne comporte des chaînes de 7 isolateurs, les deux autres de 3. Sur ce pylône, une phase de la ligne à 132 kV se déchargea à la suite d'un coup de foudre très proche, qui fut observé par quatre personnes. Deux cultivateurs, qui se trouvaient pendant cet orage sous un noyer à 8 m du pylône seulement, furent vivement impressionnés par l'intensité du phénomène, mais en furent quittes pour la peur et un ébranlement nerveux passager. Les deux autres observateurs étaient des monteurs de la ligne de traction, qui se trouvaient à quelque 500 m,

sur une éminence, et qui eurent l'impression que la foudre avait frappé directement la ligne. Les deux lignes à 66 kV situées au-dessus de la phase troublée à 132 kV ne subirent ni mise à la terre, ni court-circuit, ni aucune autre perturbation. Le pylône frappé se trouve à 600 m environ d'un poste où des parafoudres munis

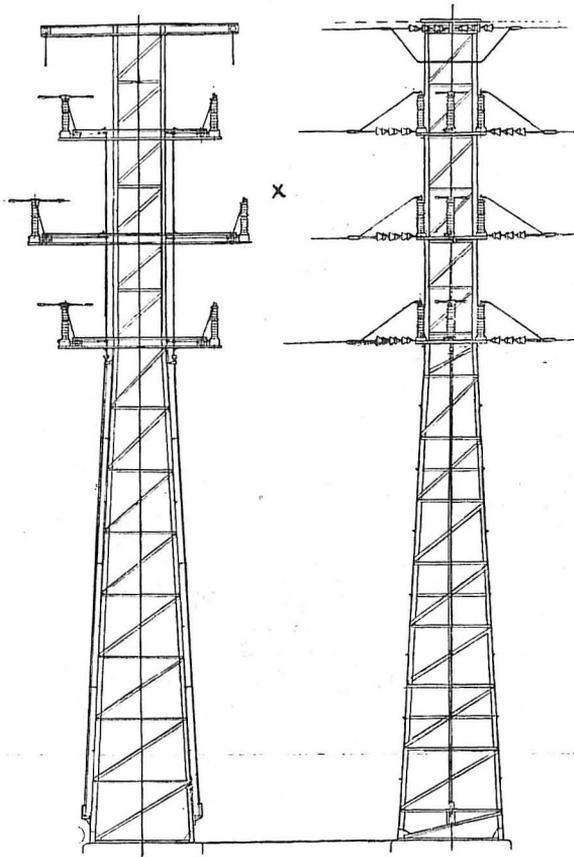


Fig. 20.

Croquis du pylône sectionneur dérangé, p. 24, chap. III, 10.

Échelle : 1/250.

de compteurs automatiques sont branchés sur chaque phase des deux lignes à 66 kV. A cet instant, aucun des quatre parafoudres ne réagit. Par contre une borne de traversée de la phase à 132 kV dérangée sur le pylône fut sérieusement endommagée, et même complètement détruite lorsqu'on réenclencha le courant.

12. Un dernier exemple, qui montre cette fois ce qui ne devrait pas être : la foudre frappa un pylône en fer qui n'était pas muni de fil de terre; tous les quatre isolateurs des deux lignes à 66 kV qu'il portait furent contournés. En outre, un mât de la ligne de traction à 15 kV, suivant parallèlement à 3 m de distance, fut simultanément endommagé, ainsi que son isolateur. Les recherches

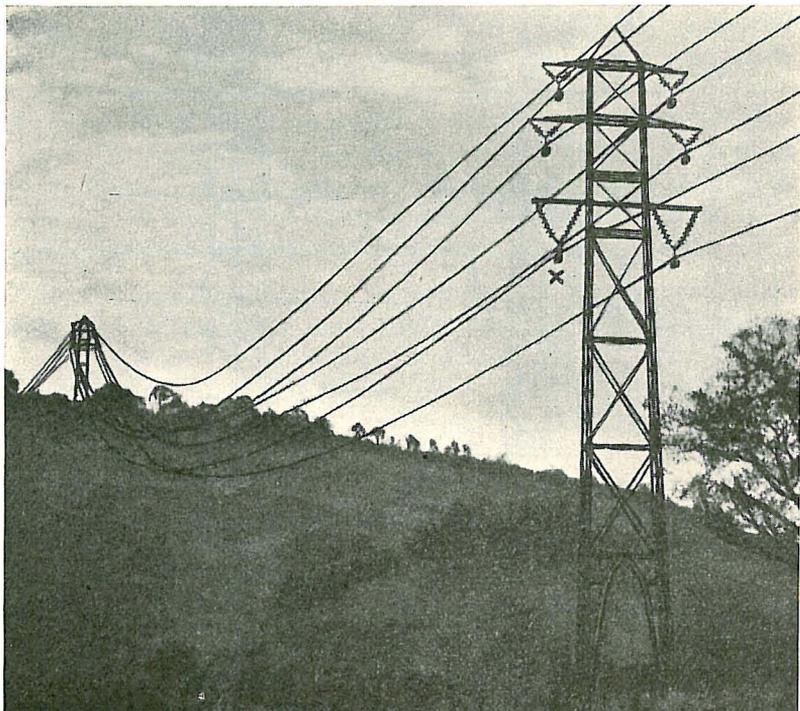


Fig. 21.

Pylône n° 209 dérangé, chap. III.

révélèrent que la connexion de mise à la terre entre le pylône à 66 kV et les rails avait été accidentellement supprimée et que ce pylône n'était donc plus mis à la terre. L'arc s'amorça alors sur le pylône voisin, qui se trouvait en bon contact avec la terre, provoquant un autre court-circuit. Ce cas, unique parmi toutes les perturbations, est des plus significatifs.

Toutes nos observations portent à croire que le rayon d'influence

de la surtension est restreint, et le gradient de surtension très grand. Cette dernière affirmation est corroborée par les mesures oscillographiques faites simultanément sur plusieurs fils voisins, mesures dont nous avons déjà fait remarquer l'importance. Il nous reste à rendre compte des résultats des oscillogrammes doubles, enregistrés dans la deuxième moitié de l'été 1930.

b) Mesures comparatives relevées sur la même ligne, avec plusieurs oscillographes cathodiques installés au même endroit. — Ces mesures furent faites sur les deux câbles supérieurs de la ligne double Puidoux-Rupperswil (voir *fig. 18*). La distance moyenne entre les fils est d'environ 5,5 m en projection horizontale, d'environ 2,5 m en projection verticale. Les résultats de ces mesures, traduits en chiffres dans le tableau 2, sont en résumé les suivants :

1. La comparaison entre les tensions de foudre mesurées sur les deux câbles montre que jusqu'à une amplitude maximum absolue de 50 kV environ, de la tension causée par la foudre en dehors des stations, *les surtensions dans les deux câbles considérés ont la même polarité, à peu près la même allure et à peu près la même amplitude*. Le fait que le rapport des deux amplitudes diffère généralement un peu de 1, comme permettent de le constater les quelques 250 oscillogrammes relevés, s'explique d'abord par la position non exactement symétrique des conducteurs par rapport au fil de terre (*fig. 18*, phases AV et BU) ,et ensuite par les différences de position des deux artères de la ligne double à proximité de la station de mesure. Nous montrerons par la suite que les caractéristiques soulignées plus haut sont l'effet de la décharge indirecte, celle-là même qu'on trouve décrite jusqu'à ce jour dans tous les manuels. Nous avons donc la preuve immédiate et irréfutable que les décharges indirectes provoquent dans les lignes aériennes des ondes mobiles ayant une tension qui va jusqu'à 50 kV environ, comme le montrent les quelques exemples d'oscillogrammes des figures 22 à 24.

2. Quant aux tensions d'ondes causées par la foudre et atteignant un potentiel d'environ 100 kV ou plus, les résultats sont entièrement différents : *la différence entre les amplitudes de la tension dans les câbles voisins est très grande, la polarité des deux ondes est souvent inverse, leur durée n'est pas la même (fig. 17 A)*. Dans la deuxième moitié de l'été 1930, nous n'avons malheureusement pas pu enregistrer plus de deux cas. Les essais devront être

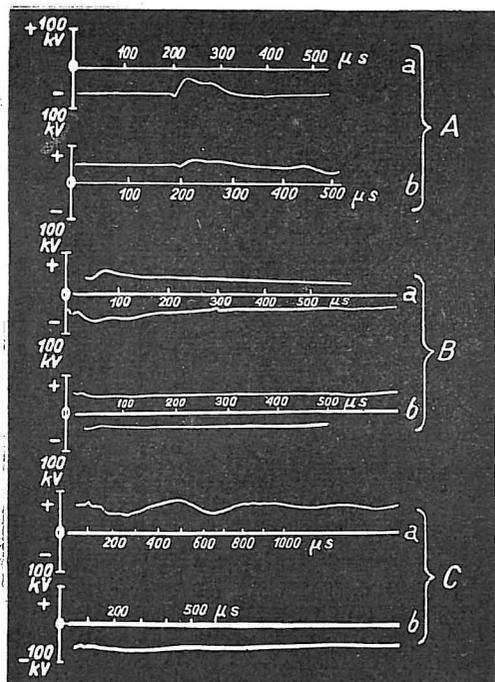


Fig. 22.

Oscillogramme *a* : ligne B aboutissant à la station de mesure ; l'oscillogramme indique la tension de l'onde réfléchie.

Oscillogramme *b* : ligne A traversant la station de mesure ; l'oscillogramme indique la tension de l'onde libre.

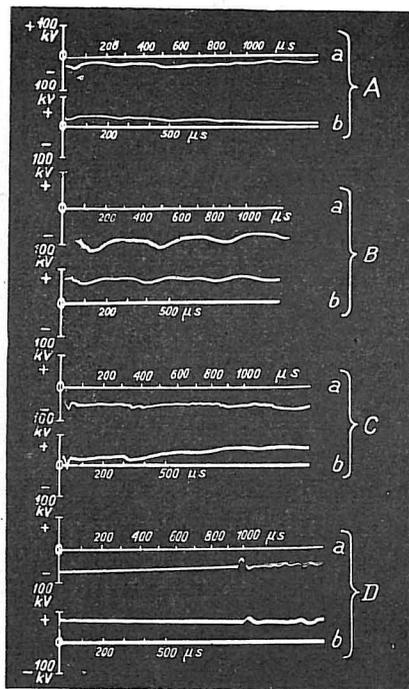


Fig. 23.

Les deux lignes A B (Fig. 18).

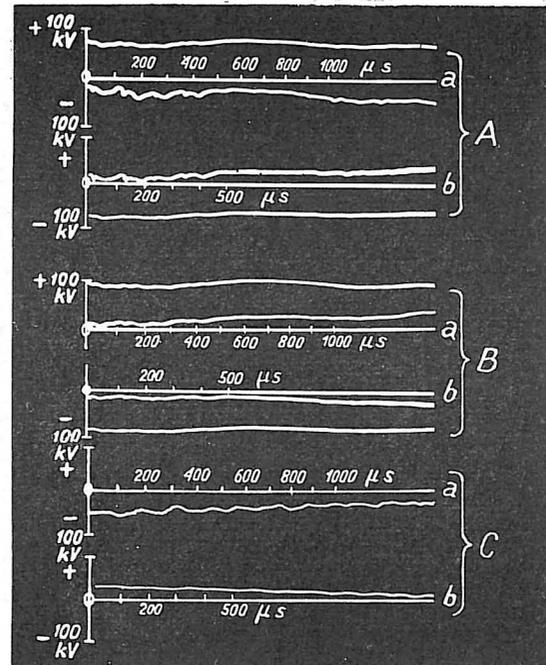


Fig. 24.

Les deux lignes A B (Fig. 18) traversant la station de mesure.

Fig. 22, 23 et 24.

Oscillogrammes comparatifs de décharges atmosphériques indirectes :

A B C représentent des oscillogrammes relevés à différents instants.

a et *b* représentent deux oscillogrammes relevés au même instant sur différentes phases : les oscillogrammes *a* sur la phase BU (Fig. 18) ; les oscillogrammes *b* sur la phase AV (Fig. 18).

poursuivis dans cette direction pour que l'on puisse disposer d'un plus ample matériel. Dans le premier cas, nous avons une tension d'onde d'orage d'environ — 290 kV et qui se superpose à la phase U du service B (*fig. 18*). Sur la phase V du service A (*fig. 18*) on enregistra une surtension de + 43 kV. Les deux tensions sont donc très différentes et sont en outre de signes contraires. La durée de la première surtension, qui est plus élevée, est plus grande que celle de la deuxième surtension. Les deux ondes de surtension diffèrent donc de forme.

Dans le deuxième exemple (*fig. 17 B*) nous avons une onde de surtension de — 92 kV qui se superpose à la phase BU et une onde de + 15 kV superposée à la phase AV. Les signes sont opposés. Nous tâcherons de nous rendre compte si et comment ces mesures et ces observations peuvent être expliquées par l'image que l'on se fait aujourd'hui des décharges directes et indirectes. A cet effet, examinons de plus près ces phénomènes. Nous verrons que le phénomène provoquant la perturbation est différent de la description qu'on en avait donnée, et qu'il faut abandonner l'idée qu'on s'en faisait. Ceci est valable pour la décharge directe aussi bien que pour la décharge indirecte. Notre nouvelle interprétation, basée sur des observations sûres, nous fournit une image nouvelle du phénomène de perturbation, qui explique à son tour tous les résultats de mesure et d'exploitation. C'est ce que nous entreprendrons de démontrer dans le prochain chapitre.

IV. — LE PHÉNOMÈNE DE PERTURBATION CAUSÉ PAR LA FOUDRE

a) *Effet indirect.* — L'image généralement acceptée aujourd'hui du coup de foudre indirect est représentée sur la figure 25. Un nuage chargé d'électricité positive se formant lentement au-dessus de la ligne, induit dans celle-ci des charges négatives, qui forment écran partiel dans le champ nuage-terre. Comme le nuage est toujours très grand par rapport à la distance entre deux conducteurs aériens, ceux-ci U et V, portent à peu près la même charge d'induction. Si la charge du nuage disparaît assez brusquement par suite de la foudre, les charges négatives dans les deux câbles U et V sont libérées et produisent à leur tour un champ instantané entre la ligne et la terre. Cet effet dépend, comme on le sait, en majeure partie de la rapidité avec laquelle s'opère la compensation. Les deux charges s'écoulant dans les deux câbles

engendrent deux ondes mobiles transitoires qui ont la même amplitude, le même signe (\pm) et la même forme, et qui peuvent être enregistrées à un point de mesure quelconque de la ligne, où elles apparaissent sous forme de variations temporaires de la tension. Cette idée du phénomène confirme exactement nos mesures des

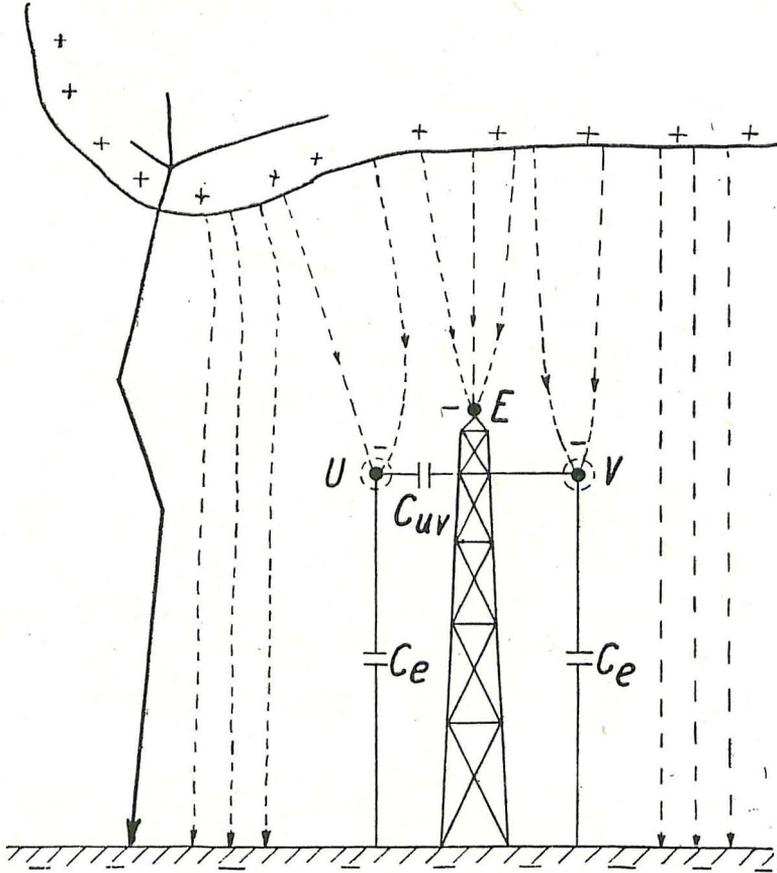


Fig. 25.

Coup de foudre indirect.

tensions causées par la foudre et inférieures à 50 kV. Les surtensions au-dessus de 50 kV se comportent d'une manière absolument différente. Leur cause ne peut pas être recherchée dans les coups de foudre indirects. Ce problème, qui a occupé la science pendant de longues années, aurait donc trouvé ainsi une solution expérimentale bien étayée.

b) Décharge directe de la foudre (*fig. 26*). — Dans le moment qui précède la décharge, les deux câbles U et V sont chargés négativement, exactement comme dans le cas *a* (décharge indirecte). Si nous supposons à présent que la foudre avance du nuage vers la terre (durant une infime fraction de seconde, bien entendu),

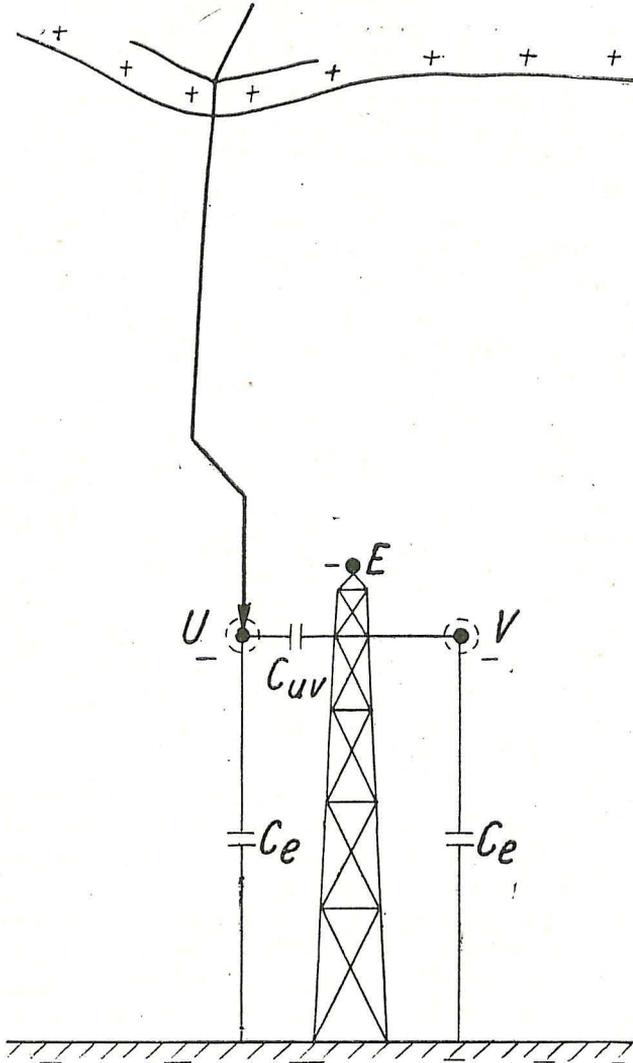


Fig. 26.

Coup de foudre direct.

les charges négatives dans les conducteurs s'en trouveront augmentées, la charge de foudre qui approche étant positive. Il s'en suivra un écoulement de charges positives le long de la ligne, dans les deux directions.

La foudre touchant le conducteur U, y apporte dans un temps extrêmement court un excédent énorme de charge positive. La charge négative induite par le nuage s'équilibre avec celui-ci par le canal de la foudre. Le courant de la foudre se déchargeant sur le conducteur provoque dans la phase U des ondes mobiles d'une très grande amplitude, qui s'éloignent dans les deux directions et peuvent éventuellement se décharger à leur tour sur les poteaux ou pylônes voisins. Il est évident qu'à ce moment la foudre et le conducteur sont en série; tout le courant de la foudre s'écoule dans le conducteur. Pour fixer les idées, on pourrait désigner ce phénomène par *décharge directe à écoulement total dans la ligne*.

Par l'effet de la foudre s'approchant de la phase U, la phase V se charge négativement à un potentiel toujours plus élevé; une quantité toujours plus grande de charges positives est refoulée le long des conducteurs dans les deux sens. Au moment où la foudre décharge son courant sur la phase U, des ondes mobiles transitoires sont induites dans la phase V à cause de l'accouplement électromagnétique entre les deux phases. Leur amplitude est par exemple, dans la ligne mesurée, d'environ 27 % de celle de l'onde mobile transitoire principale de la phase U. A cause de la petite distance entre V et l'endroit même où la foudre frappa, deux ondes mobiles transitoires partiront donc, chacune dans une autre direction, le long de la phase V, et leur amplitude est 27 % de celle de l'onde produite dans la phase U. Tant que la tension d'effluves se trouve dépassée, l'amortissement de la surtension de la phase U sera plus grand que celui de la surtension de la phase V. L'oscillographe enregistrera donc deux ondes de tension, dont le rapport est plus petit que 1 : 0,27, toujours en restant plus grand que 1 : 1. Le chiffre exact de ce rapport dépend de la distance à laquelle l'oscillographe se trouve placé du centre de la perturbation. Dans tous les cas il est à prévoir que les deux ondes des phases U et V auront la même polarité, et à peu près la même forme et la même durée.

Si nous comparons les résultats de nos mesures avec la description du phénomène que nous venons de donner, on constate que ce phénomène n'est enregistré nulle part; ceci ne signifie pas, à notre avis, qu'il ne puisse pas avoir lieu, mais bien qu'il faudra poursuivre les essais dans cette direction. Par contre,

les mesures montrent qu'il doit exister encore un phénomène qu'il nous reste à interpréter.

c) **Le phénomène de perturbation d'après les mesures oscillographiques comparatives (fig. 27).** — Qu'un nuage positif se trouve à une certaine hauteur au-dessus de la ligne; que la terre et l'espace près de la terre soient chargés négativement, l'intensité du champ atteignant une certaine limite la foudre commencera à jaillir par une étincelle à la couche limitrophe entre les deux charges. Cette étincelle avancera du côté des charges négatives plus rapidement que de l'autre. Aux extrémités de l'étincelle la chute de potentiel est énorme, tandis que dans le canal de l'étincelle s'établit un arc bon conducteur, en vertu de la loi de Töpler. La foudre atteint finalement la terre. Le passage à la terre produit dans la résistance terrestre R_c une chute de potentiel. Suivant l'intensité du courant de la foudre, dont la valeur maximum est d'environ 10^5 A, d'après les mesures de Töpler, de Matthias et d'autres, et suivant la valeur de la résistance terrestre, cette chute de potentiel sera d'environ $10^6 + 10^7$ V. La chute de la foudre causera donc très rapidement dans l'espace environnant, qui jusqu'alors possédait une charge statique, une surtension positive de l'ordre de grandeur mentionné. Par suite du petit gradient de tension dans le canal de la foudre, la chute de potentiel dans la résistance terrestre sera plus grande que celle qui existe dans la partie du canal qui va de la terre jusqu'à la hauteur de la ligne. La composante du champ, qui varie rapidement, aura par conséquent aux alentours immédiats de la foudre une *direction radiale à celle du canal*. Des charges négatives non encore compensées se trouvant en outre dans l'espace à une certaine distance du canal, un autre champ se formera dans l'espace environnant la ligne, du côté opposé à ce canal. L'espace entre les câbles est situé par contre comme dans une cage, les câbles mêmes formant écran. En première approximation, la ligne peut être considérée comme étant dans le champ d'un condensateur ayant pour électrodes une plaque et une tige. Par suite de la concentration du champ aux environs du canal et des câbles, c'est sur ceux-ci que des étincelles se produiront en premier lieu, si toutefois l'intensité du champ est suffisante. Les ramifications bien connues jailliront du canal principal de la foudre, qui déchargent et rechargent l'espace environnant. Des étincelles analogues peuvent jaillir des câbles de la ligne. Deux éventualités sont possibles :

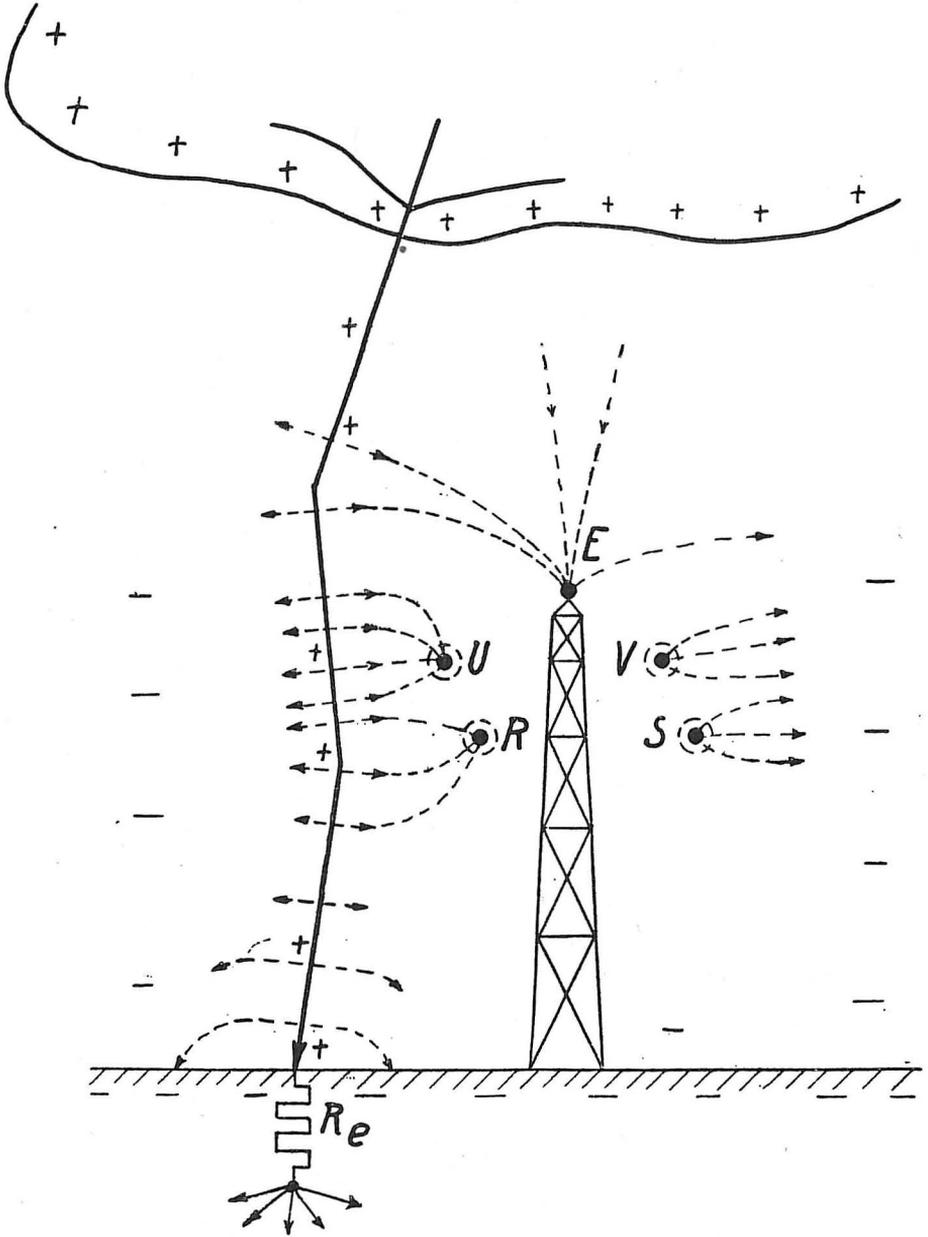


Fig. 27.

Nouvelle image du phénomène de perturbation.

1. Une ramification latérale de la foudre atteint la ligne et la branche en parallèle sur le canal de la foudre. La ligne se trouve pour ainsi dire en dérivation sur la terre par le canal de la foudre. La tension causée par la foudre dans la ligne est limitée par la chute de potentiel dans la résistance de passage de la foudre à la terre. Si nous appelons décharge directe celle où il se présente une connexion quelconque entre la ligne et la foudre, ce que nous avons décrit serait donc une décharge directe. Pour préciser, et pour bien marquer la différence entre ce cas et celui, précédemment défini (voir *b*) où la foudre frappe directement la ligne et s'écoule totalement dans celle-ci (représentation qu'on se fait généralement du coup de foudre direct), on pourrait parler ici d'une *décharge directe à écoulement partiel dans la ligne*.

2. On peut toutefois imaginer que la foudre ne touche la ligne par aucune de ses ramifications, que l'on n'a donc aucune décharge directe, ni à écoulement partiel, ni à écoulement total dans la ligne. Dans ce cas, la foudre pourrait toujours tomber assez près de la ligne, pour que les composantes instantanées du champ, dirigées radialement au canal, fussent assez intenses et que la concentration du champ dans ses alentours immédiats fût assez grande pour que des étincelles jaillissent de l'un des conducteurs. Dans ce cas il s'agirait d'étincelles glissantes, resp. d'aigrettes glissantes, pareilles à celles qui se produisent aux isolateurs de traversée à des tensions bien inférieures. Elles avancent dans l'espace chargé environnant la foudre, avec une rapidité moyenne, en neutralisant entièrement ou partiellement le champ qui en fut la cause. Malgré la tension élevée, l'énergie emmagasinée dans ces étincelles n'est pas très grande. Nous appellerons ces étincelles, en tant qu'elles proviennent de la ligne mais n'aboutissent pas au canal de la foudre, *étincelles propres de la ligne, ou étincelles de ligne*.

Supposons à présent qu'une pareille étincelle jaillisse d'un câble quelconque, fil conducteur ou fil de terre. Le jet de l'étincelle déchargera automatiquement de l'excès d'intensité du champ, tous les câbles qui se trouvent du même côté de la ligne. C'est-à-dire que le phénomène se réduira en premier lieu à la production de cette étincelle *unipolaire*, qui jaillit de la ligne et se dirige du côté de la foudre; par conséquent nous n'aurons qu'une décharge unipolaire de ce câble sur le ou sur les pylônes voisins et par là à la terre. Si, par contre, la décharge affecte plus d'une phase, il

faut en attribuer l'origine à des causes secondaires, par exemple extension de l'arc aux autres conducteurs ou chute de tension exagérée du courant qui s'écoule dans la terre, par suite d'une mise à terre insuffisante du pylône. Nous reviendrons plus tard sur ce point.

Il est évident que le jaillissement d'étincelles de ligne plus faibles est possible aussi du côté de la ligne opposé à la foudre, si toutefois l'espace environnant se trouve être suffisamment chargé. Ce sera généralement le cas. Nous aurons de ce côté une deuxième étincelle de compensation, qui jaillit et décharge ce côté de la ligne du champ environnant, de sorte que d'autres étincelles ne suivront point. Toutefois, cette étincelle apporte des charges à la ligne et y provoquera des ondes mobiles transitoires, qui ont un signe opposé à celui des charges et des ondes produites par l'autre étincelle, jaillissant du côté de la foudre. En général la deuxième étincelle est plus petite et a une durée plus courte que l'autre. Ce sont précisément ces caractéristiques que présentent les oscillogrammes comparatifs, pris sur deux câbles, lorsque les surtensions sont élevées.

Il est évident que ce même phénomène doit se produire à la suite de décharges horizontales aussi bien qu'à la suite de décharges tombant de biais. Le câble le plus exposé sera celui qui se trouve être le plus proche de la foudre. Ce câble sera le plus souvent ou l'un des conducteurs du haut, ou bien le fil de terre; voilà comment s'explique son effet de protection de la ligne, effet qui a été démontré par les statistiques américaines. De même, les deux résultats les plus importants de nos observations : petitesse du rayon d'influence et grande valeur du gradient de la surtension, s'expliquent par la formation d'étincelles, comme nous l'avons décrit. Le fait que l'un des câbles de la ligne est affecté plutôt qu'un autre, dépend en premier lieu de la disposition des conducteurs, fils de terre, pylônes, etc. Ce qui paraît assuré, c'est que les câbles du milieu sont moins exposés aux perturbations que ceux placés en dehors. La tension momentanée de régime et les charges de l'espace peuvent aussi jouer un rôle. Nos oscillogrammes relevés sur les lignes à haute tension et nos observations nous ont fait abandonner le point de vue (*b*) suivant lequel toutes les perturbations seraient produites par des décharges directes. La conclusion qui se dégage de nos essais est que, dans la plupart des cas, les perturbations proviennent de phénomènes tels que nous les avons décrits sous *c*. Nous considérons comme ayant leur origine dans des décharges directes (*b*), les perturbations où, par

exemple, des poteaux de bois volent en éclats et où, la foudre et un tronçon de la ligne étant couplés en série, tout le courant de la foudre se décharge sur la ligne et les pylônes.

d) **Effets secondaires à l'endroit de la perturbation.** — L'image de la perturbation ne saurait être complète, si nous ne tâchions de nous faire une idée de ce qui se passe immédiatement après la première décharge. Par suite d'un contournement d'isolateur, il y aura formation d'un arc et en même temps une chute de potentiel, à cause du courant passant du pylône à la terre. Ces deux phénomènes peuvent avoir pour conséquence la décharge ultérieure d'autres phases. L'amorçage de l'arc sur les autres phases est d'autant plus probable — à égales distances entre les phases, et la force du vent restant constante — que le courant de mise à la terre ou de court-circuit sera plus intense et durera plus longtemps. Dans les réseaux dont le neutre n'est pas mis à la terre directement, le courant à la terre peut être réduit sensiblement par des bobines d'extinction, qui rendent un amorçage très improbable; mais dans les réseaux dont le neutre est mis à la terre directement, un arc de court-circuit se produit, dont le courant n'est limité que par la puissance du réseau.

Dans le réseau monophasé à 132 kV observé, qui comporte deux groupes d'usines, la puissance nominale des machines placées à l'une des extrémités du réseau est de 35 à 40 MVA par service. A l'autre extrémité du réseau, d'autres machines, qui développent à peu près la même puissance, travaillent sur un parcours d'environ 100 km de ligne à 66 kV et, à l'aide de transformateurs, sur les deux services à 132 kV. L'énergie de court-circuit livrée de ce côté est donc sensiblement inférieure à l'autre. La puissance de court-circuit monophasé à la terre est de 100 à 200 MVA environ.

Les relais sont réglés de telle sorte que les interrupteurs auront déclenché automatiquement après une à trois secondes, suivant l'endroit où le court-circuit s'est produit. Les arcs de court-circuit entre les deux phases du réseau atteignent une longueur qui, d'après des expériences effectuées par la division pour l'électrification des chemins de fer fédéraux suisses (C. F. F.), dépassent 18 m s'ils ne sont pas déclenchés auparavant. M. Habich, chef de section aux C. F. F., l'auteur du rapport mentionné à la page 6, aura peut-être l'obligeance de nous montrer un film qu'il a pris de ces arcs de grande puissance. Pour éviter les courts-circuits multipolaires, il est donc de toute première importance que les relais soient réglés de manière qu'ils réagissent avec une rapi-

dité extrême. Les expériences d'exploitation prouvent que cette rapidité est parfaite dans le réseau observé.

En second lieu la perturbation peut s'étendre par suite de la mise à terre insuffisante du pylône. A cause de la chute de potentiel du courant de décharge, le pylône se trouve être sous tension par rapport à la terre. Le courant de l'étincelle de ligne (cas c2), est trop faible pour qu'il puisse charger le pylône à une surtension dangereuse. Mais s'il s'agit d'une décharge directe avec écoulement total sur le pylône ou dans la ligne (cas b), cette surtension est déterminée par la résistance de la mise à terre du pylône et par la moitié au moins du courant de décharge, étant donné qu'en cas de coup de foudre dans la portée, ce courant se partage et se dirige dans les deux directions. Pour le cas de décharge directe avec écoulement partiel dans la ligne (c1), le courant de décharge est plus faible, une partie du courant total s'écoulant directement à la terre par le canal principal. On n'aura donc la valeur maximum que dans le cas (b) où la foudre se décharge directement, soit dans un pylône soit dans la ligne à proximité immédiate et d'un pylône; elle est égale à :

$$U_m = J_m R.$$

U_m = tension maximum du pylône par rapport à une terre neutre;

J_m = intensité maximum du courant de décharge;

R = résistance de la prise de terre du pylône pour cette intensité.

La mise à la terre des pylônes de la ligne à 132 kV observée est faite avec un très grand soin; elle peut, d'après les notions actuelles, être considérée comme excellente. Les petits tableaux ci-dessous le prouvent; les chiffres indiqués pour la résistance de terre ont été relevés sur le tronçon Puidoux-Rupperswil, donc sur les trois quarts environ du parcours total de la ligne.

Sans câble de mise à la terre :

Résistance de terre en ohms	< 5	5 — 10	10 — 30	30 — 100	100 Ω
Nombre de pylônes. . . .	92	152	334	98	17 dont 1 pylône > 200 Ω

Avec câble de mise à la terre :

Résistance de terre en ohms	< 1	1 — 3	3 — 10	> 10
Nombre de pylônes.	265	334	91	»

D'après les connaissances que nous possédons aujourd'hui, l'intensité maximum du courant de décharge atteint en chiffre rond 100 000 A. Si nous supposons que la résistance de terre du pylône est de 10 ohms, nous aurons donc un potentiel de 1 million de volts dans le pylône. Sur les lignes à moins de 200 kV, des décharges secondaires du pylône sur des phases quelconques, non encore touchées par la perturbation, peuvent s'ensuivre dans un temps extrêmement court après la décharge de la première phase touchée par la foudre, resp. après la décharge sur le pylône. La connaissance exacte de ce phénomène, qui se produit avec une extrême rapidité, demande l'enregistrement soit du maximum du courant passant par le pylône, soit du potentiel de ce pylône par rapport à la terre neutre. Par contre, les perturbations multipolaires provoquées par l'amorçage de l'arc suivront la perturbation primaire seulement après un certain temps, et pourront être relevées par des ampèremètres à enregistrement plus lent, insérés dans les réseaux qui sont en connexion directe avec la terre. Nous résumons notre point de vue de la manière suivante :

1. Les perturbations des lignes à haute tension et à tension moyenne ne sont pas causées par des décharges indirectes, dans le sens habituel du mot, et tel qu'il se trouve décrit jusqu'ici dans les manuels. D'après ceux-ci ce seraient les variations rapides du champ entre le nuage et la terre qui provoqueraient les surtensions; or pour cela la rapidité de ces variations est trop faible.

2. La perturbation se produit toujours avec formation d'étincelles sur quelques-uns des fils de la ligne. Il faut distinguer trois cas :

Dans le premier, l'étincelle de ligne se perd dans les charges de l'espace, soit du côté où se trouve le canal de la foudre, soit du côté opposé, par rapport à la ligne (coup de foudre indirect, avec

production d'étincelles sur la ligne, causées par le champ radial environnant le canal de la foudre, *étincelles de ligne*).

Dans le deuxième cas, l'étincelle fait le pont entre la ligne et le canal de la foudre (*décharge directe à écoulement partiel dans la ligne, celle-ci étant branchée en dérivation sur le canal de la foudre*).

Dans le troisième cas, qui est probablement le plus rare, la foudre se décharge en plein sur un des fils (*décharge directe à écoulement total dans la ligne, c'est-à-dire couplage en série du canal de la foudre et de la ligne*).

3. Nos essais prouvent que, sur les lignes à haute tension, c'est toujours un seul des fils (phases) qui, à l'origine, se trouve être touché par la décharge. La multipolarité des courts-circuits causés par la foudre est toujours, ou presque toujours, une conséquence d'autres causes secondaires, telles que, en particulier, l'amorçage de l'arc et la mauvaise terre au pylône.

V. — LA PROTECTION CONTRE LES SURTENSIONS D'ORAGE

Le but des études relatives à la protection contre les surtensions causées par les orages, n'est plus seulement aujourd'hui d'éviter des dégâts, mais encore d'éviter des interruptions quelconques pouvant se produire dans le service à la suite de ces surtensions. Le problème présente les aspects les plus variés; sa solution dans les installations existantes n'est le plus souvent qu'une question purement économique. Ce rapport ne prétend nullement épuiser ces vastes questions; il s'agit ici simplement de donner quelques-uns des principes qui nous semblent les plus importants :

1. Toute installation doit être construite et isolée de manière à résister sûrement, sans appareils de protection, aux surtensions causées par les manœuvres du service, enclenchements et déclenchements, ou par des arcs à la terre, courts-circuits, etc.

2. Les surtensions provoquées par les orages seront combattues indépendamment de celles mentionnées ci-dessus. Les principes sur lesquels cette protection se base sont dictés par la connaissance de l'allure et de l'amplitude des surtensions, ainsi que par celle du phénomène perturbateur à l'endroit même. Avant tout, il s'agit de voir clair dans ces phénomènes; la question de la protection ne vient qu'après. Dans ce but, il est extrêmement impor-

tant de ne pas se borner à des essais de laboratoire, mais de porter les investigations dans les réseaux eux-mêmes.

Nous ne sommes pas assez avancés pour pouvoir établir des directives qui puissent être utiles de façon générale, mais ce qu'il nous est permis d'affirmer, d'après nos résultats, se trouve résumé dans les aperçus suivants :

a) **La protection des stations.** — A moins que les appareils (isolateurs, interrupteurs, transformateurs) ne soient construits de manière à résister sans dommage à tous les choes de tension que provoquent les orages et qui sont canalisés vers les installations par les lignes aériennes, il faudra limiter la surtension par un dispositif spécial de protection, tel que parafoudre à la station ou isolement plus faible des lignes au voisinage de la station. L'isolement des appareils coûteux (transformateurs, interrupteurs) doit être plus fort que celui de ce point faible. Les transformateurs modernes à bain d'huile offrant une grande sécurité, une protection spéciale contre les ondes à front raide ne sera pas nécessaire en général dans les installations modernes. Où, d'autre part, les génératrices travaillent encore directement sur les lignes, il est préférable de construire ces machines de manière qu'elles résistent à ces ondes à front raide ou d'intercaler un transformateur à enroulements séparés entre ligne et génératrices, plutôt que d'avoir recours à un dispositif spécial de protection. Il s'agit donc seulement de limiter l'amplitude des ondes dans les stations, de façon qu'il ne se produise plus de elaquages par suite de réflexions partielles ou totales des ondes incidentes. Abstraction faite des centres de perturbation qui se trouvent à moins de 2 km de distance de la station, le problème des parafoudres repose aujourd'hui sur des bases solides, et n'est plus qu'une question de construction rationnelle et d'économie. En ce qui concerne les coups de foudre frappant la ligne à moins de 2 km de distance de la station, il serait désirable que la connaissance du courant de la foudre qui se décharge dans la ligne fut approfondie. Le phénomène se complique alors du fait que le temps employé par l'onde pour parcourir cette distance deux fois est plus court que la durée de la surtension, d'où il s'ensuit un jeu d'ondes entre la station et le centre de la perturbation, qui peut augmenter la fatigue du parafoudre dans certains cas.

b) **La protection des lignes aériennes.** — On a proposé jusqu'ici les solutions suivantes, qui, en partie, sont déjà soumises à des essais :

1. On tâche d'éviter la décharge de la ligne en adoptant un meilleur isolement (chaînes de 14 à 17 éléments et deux fils de terre). Les expériences faites en Amérique prouvent que cette solution n'est pas d'une efficacité suffisante, vu qu'elle ne supprime pas entièrement les perturbations causées par la foudre.

Cette solution ne saurait offrir de grands avantages en Europe.

2. Elimination des décharges de la ligne à l'aide de parafoudres disposés sur les phases de la ligne, à intervalles réguliers d'environ 1 km et destinés à éviter les contournements d'isolateurs. Les résultats de ces essais ne nous sont pas encore bien connus. Ils dépendront en premier lieu du genre de la perturbation, à savoir de l'intensité du courant de foudre s'écoulant dans la ligne. Nos observations prouvant que, dans la plupart des cas, la ligne ne reçoit qu'une très faible partie de toute l'intensité de ce courant, cette solution, qui fait l'objet d'essais en Amérique, pourrait conduire éventuellement à des résultats pratiques. Reste à savoir si elle sera assez économique pour pouvoir être adoptée pour les réseaux européens, et si le nombre des perturbations s'en trouvera sensiblement diminué.

3. On a proposé de tendre en forme de cage autour de la ligne des fils de terre protecteurs qui formeraient écran entre la ligne et l'atmosphère. Cette proposition a été faite quand on admettait encore que l'effet indirect de la décharge de foudre jouait le rôle principal. L'efficacité de ce dispositif semble évidente à présent, si l'on accepte la nouvelle conception que nous avons donnée du phénomène. Les statistiques américaines portant sur des lignes munies ou non de fils de terre prouvent que le nombre de perturbations est plus faible pour les premières. Les mesures faites simultanément sur plusieurs conducteurs donnent les directives à suivre pour installer rationnellement un certain nombre de fils protecteurs. L'emploi de plusieurs fils plutôt que d'un seul sur les lignes à haute et à très haute tension, est évidemment une question purement économique. L'emploi d'un fil de terre se justifie non seulement sur les lignes à très haute tension, mais encore sur les lignes à tension moyenne.

4. Si l'on munit d'une tige de paratonnerre le sommet de chacun des pylônes, il faudra que deux de ces pylônes soient en mesure de drainer toute la région intermédiaire, en d'autres termes d'attirer sur eux toutes les décharges de foudre qui pourraient troubler la ligne. Cette solution paraît douteuse, d'abord parce

que souvent la connexion des pylônes avec la terre ne saurait être suffisante, et ensuite parce qu'on ne pourrait jamais donner à ces pylônes une hauteur suffisante pour qu'ils puissent protéger efficacement le tronçon de ligne intermédiaire, non seulement contre la décharge de la foudre elle-même, mais encore contre toutes les étincelles secondaires de la foudre. Les essais sur modèles en tôle entre nuage et terre ne sont pas assez concluants pour trancher cette question.

5. La proposition faite à peu près en même temps et indépendamment, d'un côté par la Société d'Etudes des installations à très haute tension à Berlin, et par nous-mêmes de l'autre, et qui revient pratiquement à permettre une décharge unipolaire de la ligne toutes les fois que la tension dépasse une certaine amplitude, donnée par les constantes de la ligne, aurait certainement une portée pratique, surtout s'il était établi que la perturbation primaire porte toujours sur un seul des conducteurs, et que les perturbations multipolaires ne se produisent qu'à la suite d'une mauvaise terre des pylônes ou d'un amorçage d'arc.

Dans une telle hypothèse, la construction de lignes à haute tension, sans connexion directe du neutre à la terre, serait dès aujourd'hui assurée par l'emploi d'isolateurs qui résistent aussi bien aux chocs de tension qu'aux arcs. Les réseaux munis de bobines d'extinction soigneusement réglées et d'isolateurs Motor satisfont maintenant déjà à toutes ces exigences. *Les expériences faites sur le plus grand réseau suisse, qui est protégé de la sorte, ont donné des résultats excellents en ce qui concerne la sûreté du service par temps d'orage.*

Les réseaux avec neutre à la terre sont encore assujettis à un plus grand nombre de perturbations, par le fait que chaque décharge unipolaire forme court-circuit. La proposition faite de déclencher et de réenclencher rapidement et automatiquement la phase affectée seulement, mériterait d'être mise à l'essai. La stabilité des grands réseaux paraît être sauvegardée dans la plupart des cas de courts-circuits unipolaires à la terre (9). Des surtensions ne sont pas à craindre à cause de la mise à la terre du point neutre. On évitera les interruptions de service et les dégâts aux installations, en choisissant l'armature de manière que les isolateurs de la ligne résistent à l'arc de court-circuit de courte

(9) L. A. TERVEN. — Results of power system stability studies, West Penn Power Co. *El. Journal*, juin 1930.

durée. L'emploi de répartisseurs de champ en forme d'anneaux ou de cornes spécialement adaptées a déjà permis d'atteindre ce but, comme l'ont montré quelques rapports présentés à la session 1929 de cette Conférence (10). Cette protection est réalisée avec moins de dépenses et d'une manière plus sûre et plus simple que par l'emploi de parafoudres disposés sur la ligne, qui peuvent eux-mêmes conduire à des accidents.

VI. — LES PROCHAINS BUTS A ATTEINDRE DANS L'ÉTUDE DES ORAGES

1. L'étude ultérieure de la décharge de foudre aura pour but de constater ce qui se passe à l'endroit-même de la perturbation. En premier lieu, il est important de constater tous les cas où la foudre frappe directement un pylône. Il faudra se rendre compte ensuite du rayon d'influence de la surtension provoquée par la décharge de foudre, et mesurer l'intensité du courant qui traverse le pylône. Pour établir cette intensité, on peut procéder de deux manières qui sont également bonnes : on mesure, soit l'intensité à l'aide d'un shunt sur le pylône, soit la tension maximum du pylône par rapport à une terre neutre. Cette dernière mesure a une portée pratique directe parce qu'elle permet d'abord d'établir l'existence de décharges secondaires du pylône sur les phases et leurs conséquences, ensuite de déterminer quelle est la résistance terrestre maximum permise pour les lignes à haute tension.

2. On procédera simultanément à des mesures de surtensions, étendues à plusieurs conducteurs, ou si possible à tous. Ces mesures nous donneront des éclaircissements ultérieurs sur le rayon et sur le gradient des surtensions dues aux décharges de foudre, et par là même sur le phénomène de la perturbation dans toute sa durée. Elles permettront de se faire une idée claire de la meilleure disposition des fils de terre. Enfin, on complétera les observations portant sur les pylônes, en relevant dans combien de cas une décharge multipolaire se produit à la suite d'une décharge unipolaire primaire.

(10) M. BARRÈRE. — Les arcs de puissance sur les isolateurs et la protection des chaînes d'isolateurs.

H. B. VINCENT. — L'élaboration de la corne d'amorçage V. S.

3. C'est en troisième lieu seulement qu'interviendront les essais et les expériences d'exploitation sur les dispositifs de protection qui auront été reconnus suffisamment efficaces contre les effets de la foudre. On étudiera ensuite les réseaux à tension moins élevée pour pouvoir établir de quelle manière et dans quelles limites les connaissances acquises sur les lignes à très haute tension leur sont applicables. Un vaste champ d'investigations s'ouvre devant nous; l'étude demande nécessairement la collaboration de tous les pays. C'est pour contribuer dans une certaine mesure à atteindre ce but, que cette étude a été présentée.

CONCLUSION

1. Les décharges indirectes de foudre produisent sur les lignes des ondes de surtension ne dépassant guère 50 kV environ.

2. Les ondes de surtension de plus de 50 kV d'amplitude ne sont pas produites par les variations du champ vertical nuage-terre, causées par la décharge. Leur formation est étroitement liée à la production d'étincelles, qui aboutissent à la ligne ou qui en jaillissent.

3. Les étincelles de ligne mentionnées sous 2 sont ou bien des branches latérales de la foudre, ou bien des étincelles qui jaillissent de la ligne et qui n'aboutissent pas au canal de la foudre, mais seulement aux charges de l'espace environnant ce canal.

4. Le courant qui s'écoule de l'atmosphère dans le fil touché est, dans la plupart des cas, sensiblement moins fort que le courant qui circule dans le canal de la foudre (courant de foudre).

5. Dans la très grande majorité des cas, la perturbation primaire des lignes à très haute tension est unipolaire.

Les courts-circuits multipolaires se produisent à la suite de l'amorçage de l'arc, ou par suite de terre insuffisante.

6. Les fils de terre sont un moyen de protection très recommandable, servant à réduire la fréquence des perturbations non seulement sur les réseaux à très haute tension, mais aussi sur les réseaux ordinaires à haute tension.

7. A supposer qu'on ait muni la ligne d'un dispositif éteignant l'arc à la terre, et qu'on ait eu soin que les isolateurs de ligne soient convenables et les armatures suffisantes, le réseau dont le neutre est isolé sera moins dérangé par la foudre que le

réseau avec neutre directement à la terre. D'après les études qui font l'objet de ce rapport, il est possible d'installer les lignes à très haute tension, dont le neutre n'est pas mis à la terre directement, de manière qu'elles présentent une sécurité presque parfaite contre toutes les décharges de la foudre.

8. Dans les réseaux dont le neutre est mis directement à la terre, la protection contre ces perturbations et contre les dégâts et interruptions de service, semble être suffisamment assurée, même s'il se produit des courts-circuits unipolaires à la terre, à condition toutefois qu'on ait munis le réseau d'un dispositif qui déclenche et réenclenche assez rapidement la phase troublée seule, et qu'on évite par des armatures appropriées l'éclatement des isolateurs affectés. D'après les expériences faites jusqu'ici, la stabilité du réseau (marche en parallèle des centrales) n'en souffre pas; une interruption de la fourniture d'énergie ne sera donc pas à craindre.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
Résumé	1
I. — Introduction	2
II. — La caractéristique tension-temps des perturbations dans les lignes aériennes	6
<i>a)</i> Mesurages effectués sur des lignes de traction de 1 200 V.	6
<i>b)</i> Mesurages sur les lignes de transport de 132 kV.	10
III. — Rayon et gradient de la surtension de foudre	18
<i>a)</i> Expériences de service et statistique	18
<i>b)</i> Mesures comparatives sur la même ligne relevées avec plusieurs oscillographes cathodiques.	27
IV. — Le phénomène de perturbation causé par la foudre	29
<i>a)</i> Effet indirect	29
<i>b)</i> Effet direct de la foudre.	31
<i>c)</i> Le phénomène de perturbation d'après les mesures oscillographiques comparatives.	33
<i>d)</i> Effets secondaires à l'endroit de la perturbation	37
V. — La protection contre les surtensions d'orage.	40
<i>a)</i> La protection des installations	41
<i>b)</i> La protection des lignes aériennes	41
VI. — Les prochains buts à atteindre dans l'étude des orages.	44
Conclusions.	45
