

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 43 (1952)

Heft: 14

Artikel: Installation d'essai et de mesure des pertes par effet de couronne de conducteurs à très haute tension placés sous conditions climatiques imposées ou naturelles

Autor: Seylaz, E. / Berger, K.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057883>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

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

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Installation d'essai et de mesure des pertes par effet de couronne de conducteurs à très haute tension placés sous conditions climatiques imposées ou naturelles

Communication de la Commission de l'ASE et de l'UCS pour les questions relatives à la haute tension

(E. Seylaz et K. Berger)

621.3.015.532.0014

Les auteurs décrivent une installation permettant la mesure, sous conditions climatiques artificiellement imposées dans une nasse de 14 m de long et 3 m de diamètre, et sous tension maximum de 300 kV contre terre, des pertes par effet de couronne qui apparaissent sur les conducteurs de lignes à haute tension. L'installation de climatisation de l'air dans l'enceinte et les montages de mesure des pertes y sont décrits et complétés par quelques résultats d'essais d'un échantillon de corde.

Es wird eine Messeinrichtung beschrieben, welche die Messung der Koronaverluste an Hochspannungsseilen bei künstlich hergestelltem Klima in einem Kessel von rund 14 m Länge und 3 m Durchmesser und bei Wechselspannungen bis 300 kV gegen Erde erlaubt. Die Einrichtungen zur Klimatisierung der Luft im Messgefäß, sowie die Einrichtungen für die Verlustmessung werden beschrieben und einige an einem Seilmuster gemessene Resultate erwähnt.

Préambule

Du fait de l'importance des quantités énormes d'énergie électrique qui doivent être transportées à grandes distances, l'établissement de réseaux fonctionnant sous des tensions de service très élevées s'avère nécessaire, voire même urgent si l'on veut éviter des pertes d'énergie et de tension excessives dans les conducteurs. Dès lors la connaissance approfondie de la grandeur des pertes par effet de couronne qui se manifestent dans les conditions d'exploitation sous très haute tension s'impose avec acuité. Ces pertes dépendent dans une large mesure des dimensions, construction et disposition des conducteurs, du régime climatique ambiant très variable et de la topographie du tracé de la ligne. La mesure des pertes sous toutes les conditions atmosphériques naturelles locales d'un tronçon d'essai monté en plein air exige beaucoup de temps. En outre, la comparaison des données obtenues ainsi pour des conducteurs de dimensions et constructions différentes s'avère délicate, car les conditions climatiques qui existent lors des mesures en plein air sont rarement exactement les mêmes. Par contre, la méthode qui consiste à mesurer les pertes qui se manifestent dans une atmosphère climatisée artificiellement présente le grand avantage de pouvoir garantir et reproduire des conditions météorologiques bien définies, ce qui autorise dès lors une comparaison sûre des résultats obtenus. De plus, ce procédé permet d'espérer pouvoir résoudre plus rapidement le problème du choix judicieux des conducteurs de lignes à très haute tension.

S'inspirant de ce point de vue, les exploitants et fabricants suisses, groupés dans la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH), décidèrent la création de l'installation d'essai et de mesure décrite ci-après.

Description de l'installation

L'élément principal de l'installation d'essai et de mesure est constitué par la nasse, c.-à-d. par un espace d'air enrobé d'une cuve métallique cylindrique étanche de 3 m de diamètre et environ 14 m de longueur dans l'axe de laquelle est tendu le conducteur à essayer. Ce dernier, isolé de la cuve, est ancré par deux traversées coaxiales pour haute tension montées dans les parois frontales de l'enceinte et qui assurent en même temps l'amenée de sa tension d'essai. L'air qui l'entoure peut être climatisé c'est-à-dire que ses pressions, température et humidité peuvent être variées dans une marge assez grande. De plus, on peut soumettre la corde d'essai à une pluie bien définie ou reproduire à sa surface une couche de givre de qualités différentes tout en la maintenant sous tension pouvant atteindre au maximum 300 kV contre terre.

Les pertes sont déterminées dans cette nasse par unité de longueur du conducteur. Toutes précautions doivent donc être prises pour que les valeurs mesurées correspondent uniquement à la zone où le champ électrique (sous tension inférieure à la tension critique) est purement radial et les équipotentielles sont des cylindres concentriques au conducteur. Les zones où le champ électrique est influencé par les hétérogénéités dues aux extrémités sont éliminées de la mesure.

Les mesures des pertes d'un conducteur monté en nasse permettent de calculer avec exactitude les pertes d'une ligne triphasée équipée de conducteurs identiques en recourant à la loi de conversion de Potthoff d'après laquelle:

l'égalité des pertes par unité de longueur d'un conducteur monté une fois en nasse et l'autre fois comme phase d'une ligne triphasée s'établit à égalité des champs électriques superficiels ou encore à égalité des charges électriques. Cette égalité des charges par unité de longueur peut être déter-

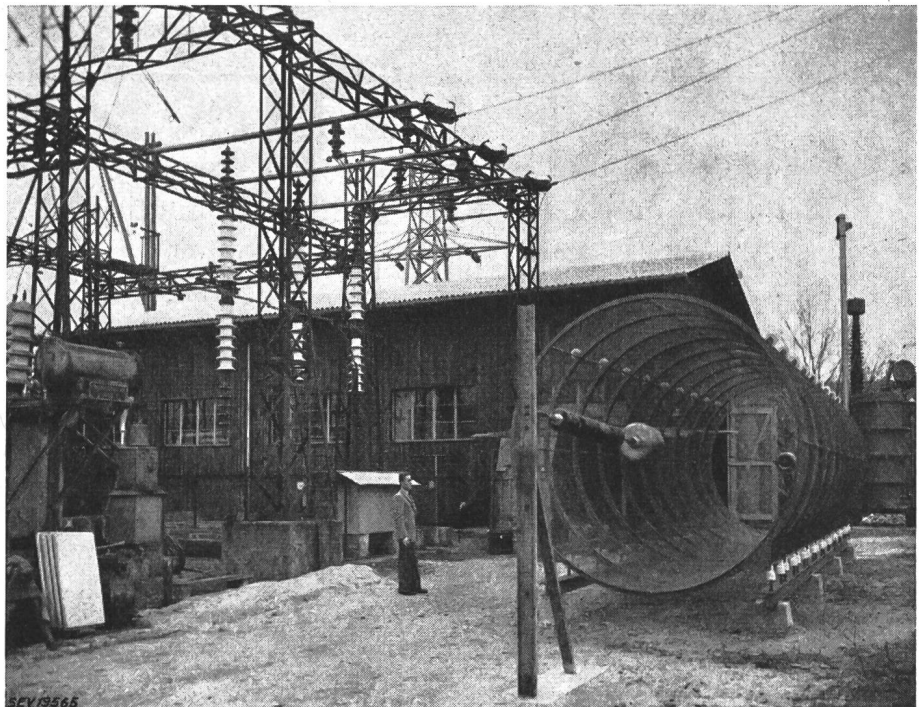
minée par mesure du courant de charge (qui doit être le même pour les deux systèmes considérés) ou par calcul, en considérant le produit de la tension par la capacité de service. Les lois de l'électrostatique permettant de calculer cette dernière avec exactitude, les tensions qui provoquent des pertes égales du conducteur de ligne et du conducteur en nasse seront dans le rapport inverse de leurs capacités.

Nous nous bornerons ici à décrire la nouvelle installation d'essai et de mesure aménagée sur l'emplacement de la station d'essai de la FKH à Gös-

Fig. 1

Vue générale de l'installation d'essai et de mesure de pertes par effet de couronne édiflée à Gös- gen dans la station d'essai de la FKH

Au premier plan, la nasse d'essai en plein air. A l'arrière plan, à gauche le hangar abritant l'enceinte climatique. A droite, on aperçoit le transformateur d'essai à haute tension



gen et dont la fig. 1 donne une vue générale. Les résultats obtenus et leur application pratique au calcul des pertes de lignes projetées ou en service feront l'objet d'une publication ultérieure.

Cette installation comprend les 4 parties bien distinctes suivantes dont nous commentons ensuite les caractéristiques principales:

prévue pour une ligne aérienne à haute tension, à une gamme de conditions climatiques très différentes, analogues à celles qui se présentent en plein air. Le régime climatique imposé devait être maintenu constant pendant la durée de mesure des pertes par effet de couronne sous différentes tensions. D'autre part, afin de vérifier l'importance de leur

influence sur les pertes, il s'agissait d'avoir la faculté de varier l'un quelconque des différents paramètres entrant en ligne de compte, les autres étant momentanément maintenus si possible invariables.

La maison Escher Wyss S. A. à Zurich construisit une enceinte cylindrique étanche à doubles parois, de 3 m de diamètre intérieur et environ 14 m de longueur totale, isolée thermiquement de l'ambiance et munie des organes complémentaires indispensa-

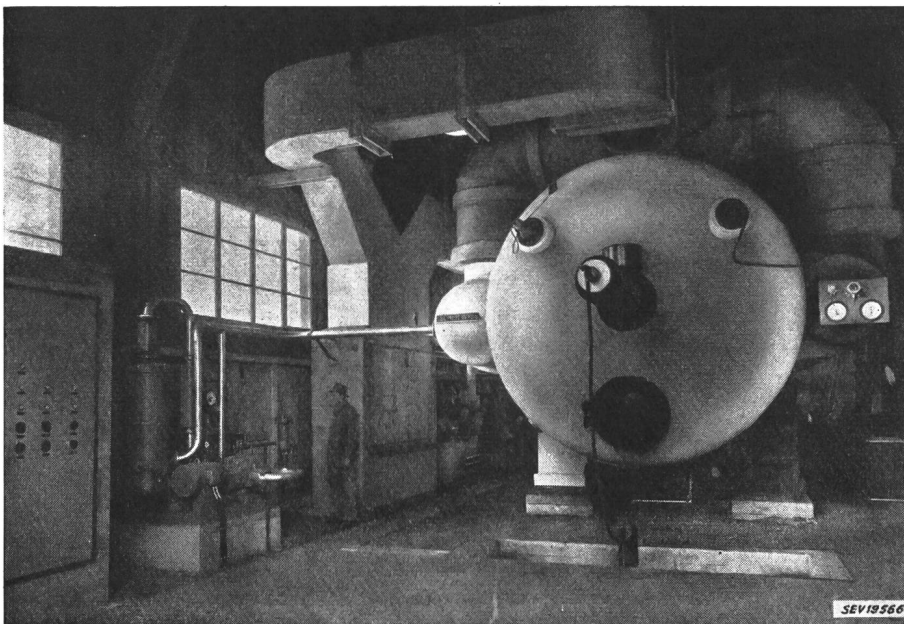


Fig. 2

Vue partielle de l'enceinte climatique étanche

1. La nasse fermée (ou enceinte climatique) et son installation de climatisation
2. La nasse d'essai en plein air
3. L'installation d'essai électrique et son alimentation
4. L'installation de mesures électriques et climatiques.

bles à l'obtention des conditions climatiques imposées. Constituant une installation d'un genre unique et particulier, de nombreux problèmes de construction et de montage restaient à résoudre. La Di-

rection et le personnel de la maison Escher Wyss ont mis tout en œuvre pour surmonter et éliminer les difficultés qui se présentaient et le résultat obtenu est tout à leur honneur. Une description de cette installation a été donnée par Monsieur A.

a) Températures entre + 40 et - 30 °C

La température désirée de l'air de l'enceinte est obtenue par réchauffage ou réfrigération du manteau intérieur par une solution de chlorure de calcium (saumure) circulant entre les parois 7 et 8 de l'enceinte.

Solution maintenue en circulation par la pompe 23, réchauffée dans le corps 24 ou refroidie dans l'évaporateur d'ammoniaque C. Réfrigération déterminée par la détente de l'ammoniaque, aspiré sous forme gazeuse par le compresseur 1, comprimé puis refroidi (par circuit eau courante) et précipité dans le condensateur; de là injecté sous forme liquide dans les différents organes réfrigérateurs (de la saumure, de l'huile-pétrole ou de l'air).

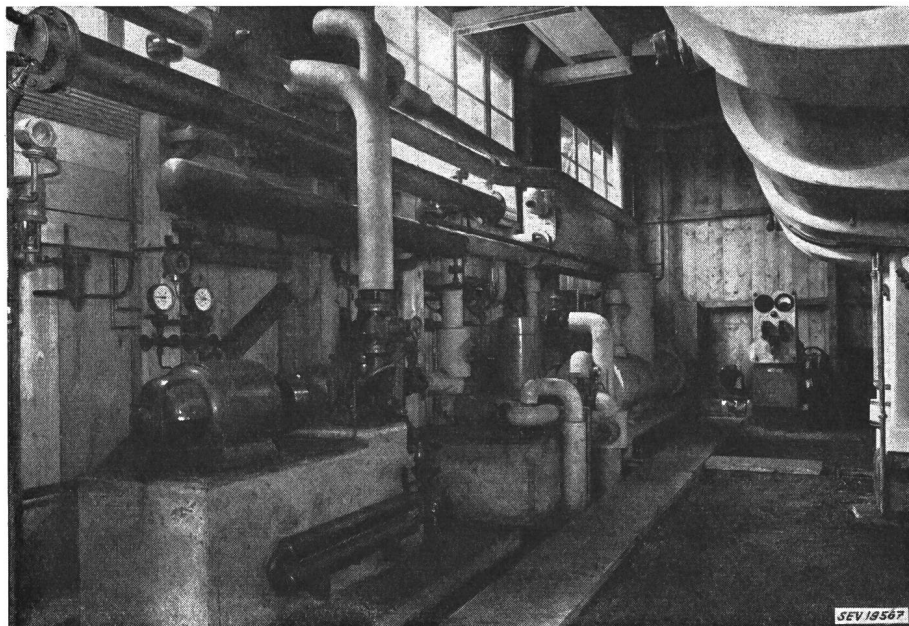


Fig. 3
Installation de climatisation de l'enceinte étanche

Kornfehl, ingénieur, dans la Revue Technique Suisse, n° 20/21 du 24 mai 1951. Nous y renvoyons ceux que cette publication pourrait intéresser du point de vue mécanique et thermique. A l'aide du schéma reporté en fig. 4, nous nous bornerons à

Parallèlement à ce processus de réfrigération par contact de la paroi 7, l'air est dirigé par ventilation vers son réfrigérateur et conduit ensuite à nouveau dans l'enceinte par les canaux isolés 29 prévus à cet effet.

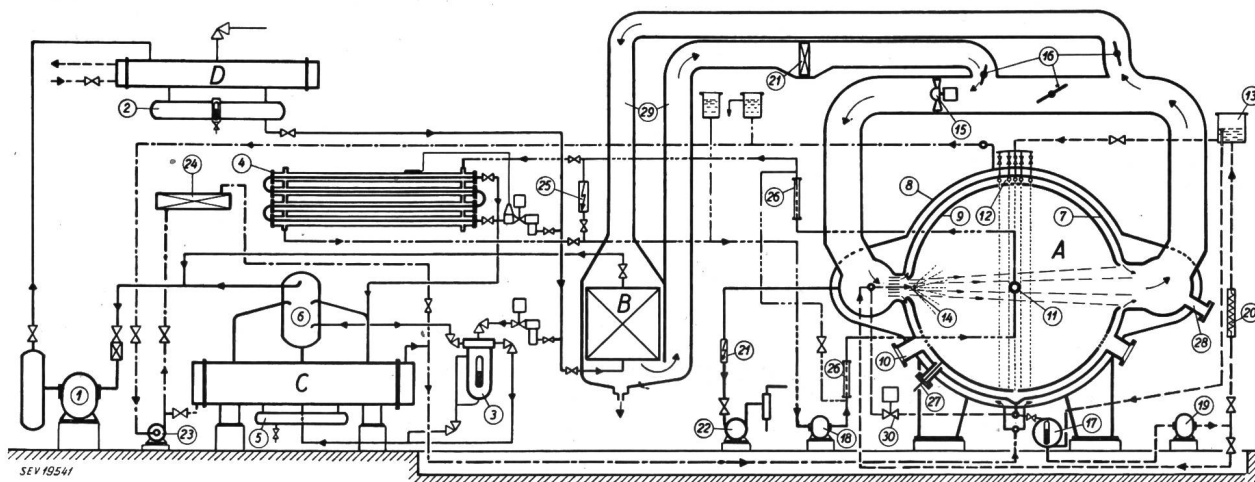


Fig. 4
Enceinte climatique, schéma de principe

A Enceinte climatique étanche; B Evaporateur d'ammoniaque de réfrigération de l'air; C Evaporateur d'ammoniaque de réfrigération de la saumure; D Condenseur; 1 Compresseur; 2 Réservoir de NH₃; 3 Régulateur de niveau; 4 Evaporateur d'ammoniaque de réfrigération du mélange d'huile et pétrole; 5 Récupérateur d'huile; 6 Séparateur de liquide; 7 Paroi de l'enceinte; 8 Paroi de

l'enceinte; 9 Anneaux de mesure; 10 Regards; 11 Conducteur d'essai; 12 Tubulures de formation de la pluie; 13 Réservoir distributeur d'eau; 14 Tuyères à brouillard; 15 Ventilateur; 16 Volets de réglage; 17 Réservoir d'eau distillée; 18 Pompe à huile-pétrole; 19 Pompe à eau; 20 Ohmmètre; 21 Chauffage électrique de l'air; 22 Pompe à vide-compresseur; 23 Pompe à saumure;

24 Chauffage électrique de la saumure; 25 Chauffage électrique du mélange d'huile et pétrole; 26 Conduite en porcelaine; 27 Points de mesure; 28 Orifices de mesure; 29 Canaux isolés; 30 Vanne électromagnétique
— Ammoniaque
- - - Saumure
- - - - Eau
- - - - Huile-pétrole

décrire ici brièvement le cycle des conditions climatiques auxquelles la corde d'essai II placée dans l'axe de l'enceinte peut être soumise et à commenter le fonctionnement des organes qui y contribuent.

b) Pressions entre 0,1 et 1,6 kg/cm² (pression absolue)

La pompe à vide 22 pouvant être également utilisée comme compresseur, permet d'atteindre rapidement des vides ou pressions quelconques situés

entre 0,1 et 1,6 kg/cm². Les pertes d'étanchéité de l'enceinte fermée étant faibles, la pompe-compresseur peut être déclenchée dès que le vide ou la pression désiré est atteint. La mesure des pertes par effet de couronne peut dès lors s'effectuer sous pression pratiquement constante.

c) Pluie

Des tubulures en cuivre 12 disposées dans l'espace libre aménagé entre le manteau 7 et les anneaux de mesure 9 portent, répartis tous les 10 cm le long de leur génératrice supérieure, des orifices de formation des gouttes d'eau. Latéralement ces tubulures sont subdivisées en 5 sections centrales distantes de 5 cm et 4 sections extérieures séparées de 10 cm, embrassant une surface totale de $0,6 \times 10$ m. Des robinets montés dans les conduites d'alimentation permettent en tout temps la mise en ou hors service d'une section quelconque et de régler la chute de pluie entre 1 et 5 mm/min. Dès lors on peut à choix soumettre la corde d'essai seule à l'action de la pluie ou, au contraire, la zone voisine sans que le conducteur même soit atteint par les gouttes, ou encore toute la zone de 6 m². Le diamètre des gouttes d'eau est de l'ordre de 5 mm. Ce diamètre correspond au cas de pluie sur la corde sans tension. Nous n'avons pas pu contrôler jusqu'ici si l'action du champ électrique intense aux environs de la surface de la corde sous tension produisait la scission des grosses gouttes d'eau.

L'obtention d'une pluie suffisamment régulière sur toute la surface constitue l'une des plus grosses difficultés rencontrées dans cette installation, mais elle est maintenant assez bien surmontée.

L'eau de pluie (eau distillée) évacuée de l'enceinte par des orifices prévus à cet effet s'écoule dans le réservoir 17 d'où elle est aspirée par la pompe 19 et refoulée dans le distributeur 13 qui alimente les sections 12, le surplus se déversant dans le réservoir 17. L'élément 20 autorise le contrôle de sa résistivité.

d) Vent

Les ventilateurs 15 placés dans 4 canaux reliés entre eux par des canaux longitudinaux produisent un fort vent transversal dans l'enceinte. Les volets mobiles 16 permettent d'en régler la vitesse dont le maximum atteint 8...10 m/s aux environs de la corde 11. Les chicanes disposées dans les orifices d'entrée impriment au vent une direction horizontale.

e) Brouillard

L'humidification de l'air de l'enceinte est produite par un système de tuyères 14 fonctionnant sous pression d'eau distillée, montées dans les bouches d'entrée d'air des canaux latéraux de ventilation. La qualité du brouillard obtenu ainsi convient très bien aux exigences des essais. Le diamètre des gouttes est de l'ordre de 50 µm, grandeur qui nous a été communiquée par le fabricant des tuyères. Elle est déduite de mesures microphotographiques.

L'eau distillée utilisée, aspirée du réservoir 17 est refoulée dans la conduite des tuyères qui l'injectent sous forme de brouillard dans l'enceinte

climatique. L'ouverture ou la fermeture de la vanne à commande électromagnétique 30 produit la décharge ou la mise en charge rapide des tuyères.

f) Séchage de l'air

L'air humide refoulé dans son réfrigérateur y dépose par condensation une partie de son eau puis, réchauffé en 21, gagne l'enceinte à l'état sec, s'y humidifie à nouveau mais dans une proportion moindre qu'auparavant. La répétition prolongée de ce cycle d'opérations permet d'atteindre finalement l'humidité désirée qui peut être fixée entre 90 et environ 15 % de la saturation.

g) Givrage de la corde

Cette condition nécessite un tronçon de corde creuse et étanche. Le givrage de celui-ci est obtenu par le processus suivant:

Une solution à 50 % de pétrole et d'huile spéciale portée à basse température (— 30 à — 40 °C) dans le réfrigérateur 4, entraînée par la pompe 18, est refoulée sous pression dans le conducteur creux 11 qu'elle refroidit. L'air sursaturé d'eau (installation brouillard et un ventilateur en service) se condense et gèle au contact de la surface froide, formant ainsi peu à peu la couche de givre désirée, d'apparence blanche et granuleuse et accusant, grâce au vent, une certaine excentricité par rapport à l'axe de la corde, la couche étant la plus épaisse sur la surface exposée au vent. Par refroidissement des parois de l'enceinte, l'air est maintenu à une température voisine de 0 °C.

h) Chauffage de la corde

Au lieu de parcourir comme ci-dessus le circuit du réfrigérateur 4, la solution pétrole-huile est entraînée dans l'élément de chauffage 25 branché en parallèle, où sa température peut être portée à + 40...+ 50 °C au maximum. Cette possibilité de réchauffage des cordes creuses et étanches est importante en ce sens qu'elle permet de maintenir sa température supérieure à celle du milieu ambiant, réalisant ainsi fictivement l'effet produit par les pertes d'énergie ohmiques sur une ligne en exploitation.

i) Commande automatique

La plupart des organes de l'installation est à commande électrique automatique. La température de l'air de l'enceinte climatique peut être au besoin maintenue à une valeur constante (dans une certaine marge) fixée d'avance, entre +40 et —30 °C. Il en est de même de la température du mélange de réfrigération du conducteur. Des vannes automatiques, montées dans les conduites des circuits d'ammoniaque et d'eau courante, commandent le démarrage ou l'arrêt de compresseur 1 et assurent simultanément sa sécurité. Des relais thermiques contrôlent la marche des moteurs. En cas de défauts survenant dans l'installation (courts-circuits, surpressions anormales, déclenchement du secteur eau, etc.) ceux-ci sont immédiatement signalés au tableau de commande par des lampes-témoins, les verrouillages fonctionnent qui empêchent une remise en service qui reste dangereuse aussi longtemps que le défaut n'est pas écarté.

Ces mesures de sécurité étaient indispensables dans une telle installation susceptible de fonctionner pendant des heures sans surveillance particulière.

2. Nasse en plein air (fig. 1)

Afin de pouvoir contrôler les pertes d'échantillons de cordes sous conditions atmosphériques existantes à Gösgen, une nasse composée de 10 anneaux cylindriques grillagés de 2,9 m de diamètre et de 10 m de longueur totale a été aménagée en plein air. Son but est analogue à celui de l'enceinte dé-

crite plus haut, à la différence près qu'ici le régime climatique est donné par la nature et ne peut pas être imposé.

3. L'installation d'essai électrique et son alimentation

Le schéma général de principe des circuits d'essai et de mesure est reporté en fig. 5.

Le transformateur HT monophasé Tr_1 de 600 kVA alimenté sous tension filtrée, variable au moyen du régulateur d'induction Reg permet de

Fig. 5
Circuits d'essai et de mesure électriques; schéma de principe

Tr_0 Transformateur d'alimentation; Tr_1 Transformateur d'essai; Tr_2 Transformateur de mesure; Tr_3 Transformateur de mesure; Reg Régulateur d'induction; L_3C_3 Filtre pour le 3^e harmonique; L_5C_5 Filtre pour le 5^e harmonique; V_1 Voltmètre de contrôle; C_1C_2 Diviseur capacitif de mesure; V_2 Voltmètre statique de précision (Tension efficace U en kV); $SW-A$ Appareil de mesure de la tension de crête étalonné en $kV/\sqrt{2}$; F Cage Faraday; W Wattmètre de précision 30/300 mW; X Résistance série et correcteur de phase; C_x Objet essayé (corde d'essai); C_n Condensateur étalon à gaz comprimé; P Régulateur de potentiel

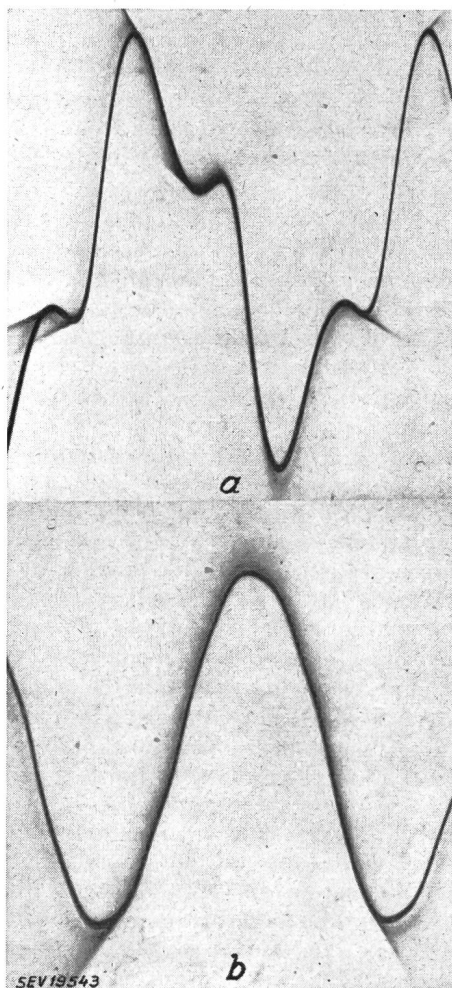
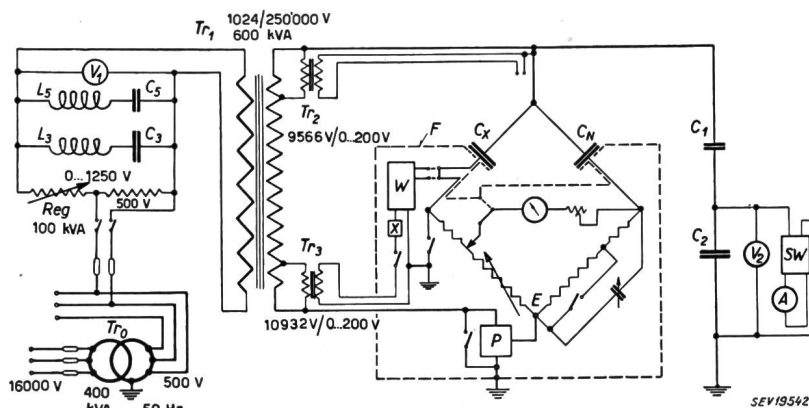


Fig. 6
Oscillogrammes de la tension aux bornes du transformateur
a sans filtre b avec filtre LC

porter le tronçon d'essai C_x à toutes tensions comprises entre 0 et 300 kV. L'efficacité du filtrage de la tension primaire ressort clairement des oscillogrammes annexés (fig. 6).

Les connexions aux organes haute tension de l'installation sont exécutées en tubes de cuivre de 44 mm à l'intérieur desquels sont disposés les différents câbles de mesure. En outre, ce montage évite la formation d'effluves trop intenses.

La corde d'essai est fixée entre deux traversées HT à condensateurs, montées dans les parois frontales de l'enceinte climatique. Construites pour 300 kV celles-ci doivent en outre pouvoir supporter sans dommage l'effort de traction indispensable à l'obtention d'une flèche minimum. L'enceinte étant soumise à des variations de température assez importantes, l'effort supplémentaire dû à la dilatation pouvait devenir dangereux. C'est pourquoi des ressorts ont été intercalés entre têtes de traversées et corde qui limitent l'effort maximum à environ 1 tonne.

D'autre part, lors de la mesure sous tension (décrite plus loin) des pertes par effet de couronne, le tronçon d'essai est alimenté indirectement par l'intermédiaire de l'instrument de mesure et doit donc être isolé des traversées qui le supportent. Dans ce but, des isolateurs ont été insérés dans le circuit. Des écrans métalliques de 500 mm de diamètre montés sur les têtes des traversées et enrobant les extrémités de la corde et leurs accessoires éliminent toute possibilité de formation d'effluves importants.

4. Installation de mesures électriques et climatiques

A. Mesures électriques

a) Mesure de la tension

La mesure de la tension appliquée à la corde d'essai est réalisée par le potentiomètre à division

capacitive C_1-C_2 (voir schéma en fig. 5). La valeur efficace de la tension partielle en C_2 est indiquée par le voltmètre statique V_2 de précision. La valeur de crête est déterminée par le circuit $SW-A$, branché en parallèle, dans lequel des tubes électroniques chargent un condensateur à la tension de crête alternative dont le microampèremètre A à cadre mobile et résistance interne élevée mesure la valeur. Ce montage de mesure des valeurs efficace et de crête permet ainsi de contrôler d'une manière très simple la forme de la courbe de tension, approximative cependant, car dans le cas d'égalité des indications des deux instruments, on ne peut pas encore affirmer que celle-ci soit absolument sinusoïdale. Quelques mesures comparatives des tensions sont consignées dans le tableau I.

Comparaison des tensions obtenues avec ou sans filtrage de la tension d'alimentation du transformateur d'essai Tr_1 (voir fig. 5)

Tableau I

Tension non filtrée				Tension filtrée			
V_1 U_1 V	V_2 U kV	$SW-A$ $\hat{U}/\sqrt{2}$ kV	$\hat{U}/\sqrt{2}$ U	V_1 U_1 V	V_2 U kV	$SW-A$ $\hat{U}/\sqrt{2}$ kV	$\hat{U}/\sqrt{2}$ U
env. 100	env. 38	36,2	env. 1,08	100	—	—	—
200	55	58	1,055	200	env. 60	60	env. 1
300	81,4	87	1,07	300	81,4	80,8	0,993
400	102,6	111	1,082	400	105,6	104	0,987
500	127,2	139,8	1,10	500	127,8	125,4	0,983
600	152,4	174	1,143	600	152	148,2	0,977
700	176,8	206,2	1,168	700	174,2	170,4	0,978
800	201,6	232,6	1,155	800	199	196	0,985
900	227	261,2	1,15	900	224	220,6	0,985
				1000	246,6	243	0,986
				1060	262	259	0,989

b) Mesure des pertes par effet de couronne

Quant à la mesure des pertes par effet de couronne, quelques remarques préliminaires s'imposent. Les résultats des essais effectués ici sur des tronçons de corde de courtes longueurs doivent ensuite pouvoir être interprétés sans autre pour la construction de lignes définitives. Cette condition exigeait de sérieuses précautions pour la précision de mesure de ces faibles puissances. C'est pourquoi deux méthodes de mesure comportant chacune deux variantes ont été envisagées:

L'emploi d'un milliwattmètre spécial de haute précision d'une part, et de l'autre l'utilisation d'un pont de Schering, les deux mesures pouvant être faites «sous tension» ou «à terre».

Par l'intermédiaire de câbles blindés le transformateur de mesure Tr_3 alimente le circuit de la bobine tension du wattmètre W (tension max.: 200 V), la bobine du circuit courant étant parcourue directement par le courant du condensateur C_x à essayer. Le transformateur d'alimentation Tr_2 ou Tr_3 et le circuit tension du wattmètre introduisent un déphasage qui a été éliminé sous 50 Hz en adaptant un circuit auxiliaire RC produisant un déphasage inverse de même grandeur. L'ajustage du condensateur a été obtenu en mesurant au wattmètre les pertes pratiquement nulles d'un condensateur étalon à gaz comprimé. Lorsque le condensateur est adapté le courant est exactement en quadrature avec la tension et l'indication de l'instrument reste

nulle sous toutes tensions. Le wattmètre possède deux échelles de mesure, l'une pour les valeurs de 0 à 30 mW, l'autre de 0 à 300 mW. Si l'on tient compte du rapport de transformation du transformateur de son circuit tension qui est de 1250, ces étendues de mesure sont alors comprises entre 0 et 37,5 W respectivement entre 0 et 375 W. Les plus petites puissances pouvant être mesurées avec cet instrument sont de l'ordre de $1/4$ W qui correspondent à environ 40 W/km, phase. Cette puissance équivaut à une tg de l'angle de pertes de $1/1000$ sous 100 kV ou de $2,5 \cdot 10^{-4}$ sous 200 kV.

La méthode de mesure au pont de Schering est bien connue et nous ne la commenterons pas ici. Cependant une modification du montage habituel a dû être opérée ici où l'écran des différentes parties du circuit ne pouvait pas être porté à une tension d'équilibrage quelconque. En effet, une partie importante de celui-ci, constituée par l'enveloppe 7 de l'enceinte climatique (voir fig. 4) ne peut être isolée de la terre sans d'énormes difficultés. Le problème de l'équilibrage des écrans du pont consiste à les maintenir constamment en grandeur et en phase au potentiel de la diagonale, afin d'éliminer l'influence des courants capacitifs perturbateurs. Une solution consiste à isoler le pôle E du transformateur HT et du pont, relié habituellement à la terre, et à le porter au moyen d'une impédance auxiliaire P sous une tension telle que la diagonale soit maintenue au potentiel de l'écran, c'est-à-dire à celui de la terre. Cette solution qui convient dans le cas de l'installation décrite ici, nécessite la sortie isolée du pôle «terre» du bobinage haute tension du transformateur Tr_1 .

Lors des mesures dites «sous tension» les deux instruments disposés dans la cage de Faraday F sont reliés au tronçon d'essai par un câble isolé au polythène et blindé. Afin de ne mesurer que les pertes de l'objet C_x celui-ci est (comme nous l'avons déjà mentionné) isolé des traversées qui le supportent. L'alimentation de la traversée située en fin de ligne est assurée par un fil de cuivre isolé de faible diamètre, logé dans le tube central de la corde creuse.

Pour les mesures dites «à terre», 10 anneaux cylindriques en laiton 9, de 1 mètre de long et 2,9 m d'ouverture, sont montés concentriquement à la corde d'essai. Des traversées en porcelaine 27 disposées dans les parois de l'enceinte permettent la mesure du courant de pertes capté par chacun d'eux. Cette disposition autorise le contrôle de la répartition du champ électrique et des pertes le long de la corde d'essai. Répartition qui n'est pas linéaire par suite de l'influence des extrémités (écrans antieffluves renfermant pinces d'amarrage et tête des traversées). Il est bien évident que seules les pertes du tronçon de corde situé dans la zone du champ radial peuvent être prises en considération pour des déductions d'ordre pratique. Les mesures effectuées «sous tension» et «à terre» ne peuvent dès lors pas être comparées sans correction préalable car les pertes déterminées «sous tension» correspondent à la longueur totale du tronçon d'essai, y comprises celles de la zone située dans le voisinage des extrémités qui sont nettement plus faibles.

Dans le but d'obtenir une comparaison exacte et un contrôle sûr des méthodes de mesure «sous tension» et «à terre», nous avons monté un tube de cuivre de 25 mm de diamètre composé de trois tronçons isolés les uns des autres et dont seul le tronçon central de 6 m était relié à l'instrument de mesure. Les résultats des mesures avec wattmètre faites «sous tension» (6 m) et «à terre» (anneaux 3 à 8 couplés en parallèle) sont reportés sur les graphiques de la fig. 7. A sec comme sous pluie, ils concordent parfaitement. D'autre part les résultats de quelques mesures de comparaison faites «à terre» et à sec, avec pont de Schering et wattmètre sont reportés en fig. 8. Elles se réfèrent à un tronçon de corde de cuivre de 20 mm de diamètre et par conséquent leur valeur absolue ne peut pas être comparée aux mesures précédentes relatives au tube de 25 mm. Cependant elles démontrent également une belle concordance des méthodes de mesure.

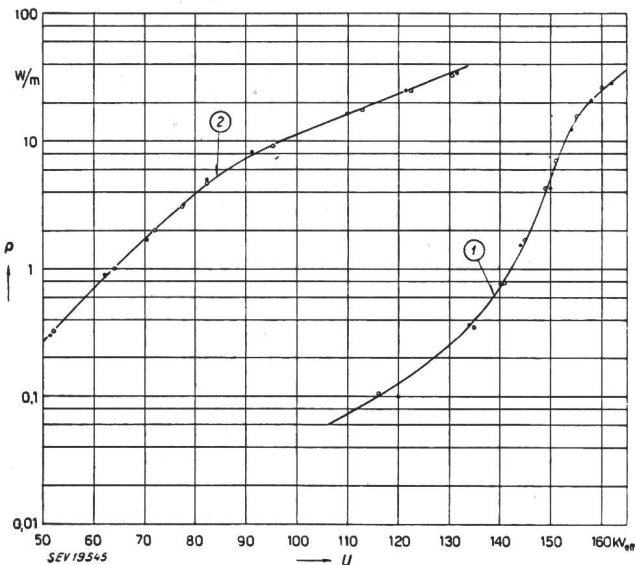


Fig. 7

Comparaison de mesures des pertes effectuées avec wattmètre «à terre» ou «sous tension». Tube de cuivre de 25 mm ϕ 1 à sec; 2 sous pluie; ● mesures «à terre». Anneaux 3...8 couplés en parallèle (6 x 1 m); ○ Mesures «sous tension». Tronçon central de 6 m de longueur

Il est utile de commenter ici les mesures faites au pont. Par suite de l'instabilité de l'effet de couronne sur une courte longueur de corde, l'angle de perte varie constamment sous une tension donnée. L'équilibrage du pont s'avère ardu et exige beaucoup de temps. La bande de dispersion des mesures est assez grande. L'utilisation du pont est cependant indispensable pour la mesure exacte de la capacité C_x de la corde par rapport aux anneaux et pour le contrôle de sa répartition longitudinale.

Comparées aux mesures de pertes au pont, celles effectuées avec wattmètre présentent quelques avantages sérieux:

Rapidité des mesures: une série complète de $P = f(u)$ peut se faire en 8 à 10 minutes, tandis qu'effectuées au pont elles exigent 30 à 40 minutes. Le wattmètre permet donc de mieux relever les variations de pertes qui se produisent lors d'un changement rapide de l'état de surface de la corde.

Du fait de la faible impédance de son circuit courant (260 Ω), la précision de mesure du wattmètre est moins influencée par l'état d'isolement des anneaux de mesure. Chacun de ces derniers est supporté par 20 isolateurs en «stéatite» de 130 mm de diamètre. Afin de maintenir suffisante la valeur de

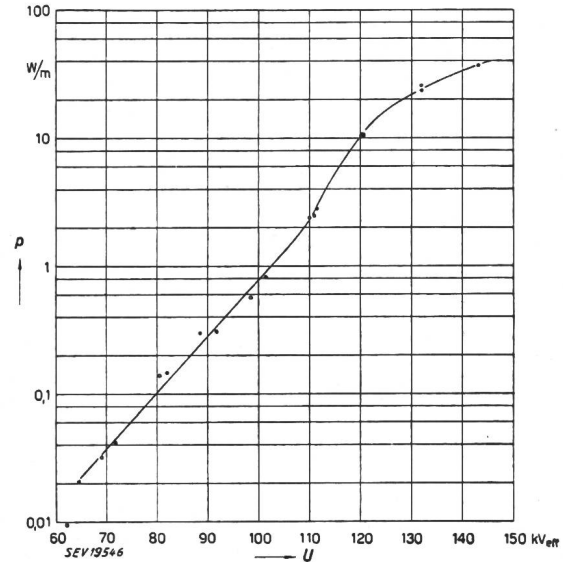


Fig. 8

Comparaison des méthodes de mesures effectuées au wattmètre ou au pont de Schering. Corde de cuivre de 20 mm ϕ Mesures «à terre», à sec. Anneaux 3...8 couplés en parallèle (6 x 1 m); ● Mesures au wattmètre; ○ Mesures au pont de Schering

leur résistance d'isolement sous toutes conditions climatiques leur surface a été enduite d'une légère couche de graisse silicone. A l'état sec la résistance d'isolement des anneaux 3 à 8 couplés en parallèle est d'environ 40 M Ω , sous pluie elle tombe à environ 0,1 M Ω , donc encore suffisante pour ne pas influencer les mesures wattométriques.

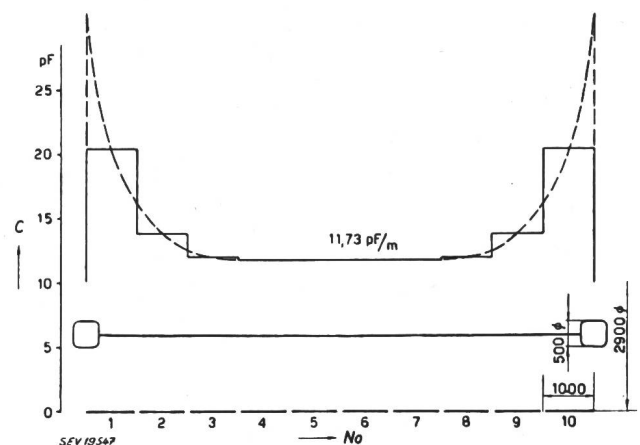


Fig. 9

Répartition longitudinale de la capacité du tube de cuivre de 25 mm ϕ par rapport aux anneaux de mesure de 2,9 m ϕ Mesure au pont de Schering sous tension efficace de 50 kV; Pertes par effet de couronne $\cong 0$

Ces multiples raisons nous ont conduit à effectuer la plupart des mesures au moyen du wattmètre «à terre», ne recourant à l'emploi du pont que pour la mesure de la capacité de la corde et le contrôle

périodique de l'exactitude des mesures au wattmètre.

La répartition longitudinale de la capacité du tube de 25 mm par rapport aux anneaux de mesure est reportée en fig. 9. La capacité calculée à partir des dimensions du tube et des anneaux est de 11,7 pF/m et concorde très bien avec la capacité mesurée de 11,73 pF/m.

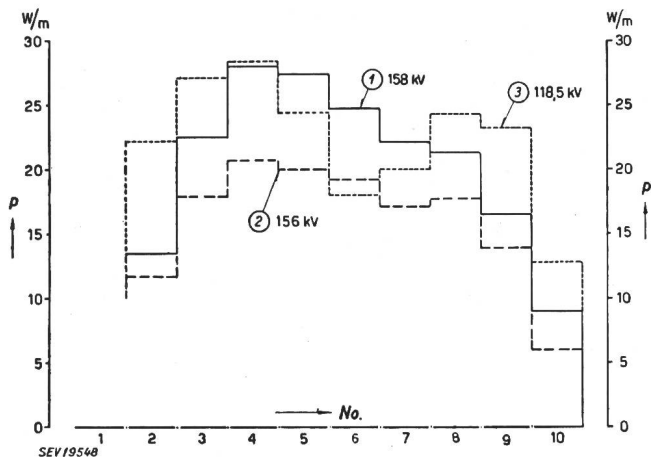


Fig. 10 Répartition longitudinale des pertes par effet de couronne. Tube de cuivre de 25 mm ϕ . 1 à sec, le matin du 7. 11. 51, sous 158 kV; 2 à sec, le soir, du 7. 11. 51, sous 156 kV; 3 sous pluie irrégulièrement répartie, le 16. 11. 51, sous 118,5 kV

En fig. 10 sont reportés quelques exemples de répartition longitudinale des pertes. A sec, cette répartition apparaît au premier abord assez irrégulière (graphiques 1 et 2). La présence d'aspérités à la surface du tube est, en partie, très probablement la cause de l'allure de cette répartition qui, pour être plus régulière dans la zone centrale (correspondant aux anneaux 3...8) devrait pouvoir être déterminée avec un tube à surface parfaitement lisse et propre. D'autre part, une faible variation de la tension appliquée détermine, dans ce domaine de la

apparaissent sous forme d'une petite aspérité centrale entourée d'une zone de couleur foncée de 3 à 5 mm de diamètre. La présence de quelques aspérités réparties irrégulièrement le long du conducteur peut suffire à déterminer des pertes locales, en particulier dans la zone de la tension critique où les pertes commencent à se manifester.

Le graphique 3 représente la répartition des pertes mesurée sous pluie irrégulière. On observait que la surface du tube correspondant aux anneaux 6 et 7 n'était pas uniformément exposée à la pluie, ce qui explique les faibles pertes mesurées en cet endroit.

Concernant les mesures de répartition des pertes le long du tronçon d'essai il faut remarquer que le phénomène de formation des effluves est très instable dans la zone du coude de la courbe des pertes. Dans la partie supérieure de cette courbe la stabilité des pertes est bien meilleure et la répétition des mesures sous conditions climatiques et pour un état de la surface du conducteur exactement identiques donne des résultats pratiquement semblables. Par contre, si ces conditions ne sont pas remplies, des différences notables peuvent être constatées.

Par suite de son mauvais isolement, les pertes de l'anneau 1 n'ont pas pu être déterminées.

La mesure des pertes du tronçon de corde d'essai monté dans la nasse en plein air se fait au moyen des mêmes méthodes et instruments de mesure. Les 10 anneaux sont supportés par des isolateurs en porcelaine qui assurent leur résistance d'isolement élevée sous toutes conditions atmosphériques. Une ligne à 50 kV étant montée dans le voisinage immédiat de la nasse, un treillis protecteur collectant les courants parasites à la terre a dû être installé.

B. Mesures climatiques

Des manomètres et thermomètres adaptés dans les parois de l'enceinte climatique en indiquent la pression et température internes. Le contrôle de

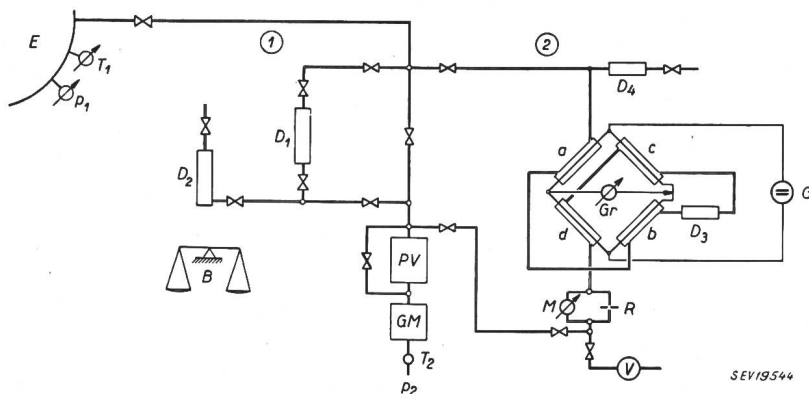


Fig. 11 Mesure de l'humidité ① Méthode de mesure par absorption; ② Méthode de mesure au pont (BBC); E Enceinte climatique étanche; PV Pompe à haut vide; GM Gazomètre; D1...D4 Dessiccateurs; p1, p2, M Manomètres; T1, T2 Thermomètres; G Source de courant; Gr Instrument de mesure (g/m³); a, b, c, d Branches du pont; R Diaphragme; V Ventilateur; B Balance de précision (Sensibilité 2 mg, tare 500 g)

courbe, une variation importante de la valeur des pertes (voir fig. 7). Or, la mesure des pertes partielles correspondant aux différents anneaux exige un certain temps (environ 15 min) durant lequel la tension peut avoir varié quelque peu.

L'observation de la surface du tube, après son démontage, révèle très bien à l'œil nu les traces laissées par les effluves. Au microscope ces traces

l'humidité sous différentes températures, vides ou pressions posait un problème délicat en particulier sous basses températures. Il s'agissait de trouver des méthodes de mesure n'exigeant pas trop de temps et de recourir à un appareillage robuste et bon marché. D'autre part, il était nécessaire d'utiliser au moins deux méthodes de mesure afin de pouvoir contrôler chacune d'elles par l'autre. Deux métho-

des très différentes ont finalement été adoptées, la première dite d'absorption, la seconde basée sur la variation de la conductibilité thermique de l'air avec le degré d'humidité de celui-ci. Cette variation est mesurée par un montage en pont développé et construit par BBC à Baden. Les deux méthodes sont schématisées en fig. 11.

La méthode bien connue dite d'absorption est simple: l'air dont on doit vérifier l'humidité, aspiré par la pompe à haut vide *PV* traverse le dessiccateur D_1 où il se dessèche puis est refoulé dans le gazomètre *GM* qui en détermine le volume sous pression et température ambiantes. La vérification de l'augmentation de poids du dessiccateur D_1 au cours de l'expérience au moyen d'une balance de précision (sensibilité de 2 mg, tare 500 g) et le volume d'air écoulé permettent de déduire la valeur de l'humidité absolue de l'air de l'enceinte. La connaissance de sa température autorise dès lors le calcul de l'humidité relative. Dans le contrôle du volume il est nécessaire de tenir compte de la différence des températures de l'air dans l'enceinte ou dans le gazomètre. La pompe *PV* travaille sous vide poussé. Cette solution a été adoptée en prévision des mesures sous vide dans l'enceinte. Au contraire, lorsque celle-ci se trouve sous pression, la pompe *PV* est hors service et l'air s'écoule par la conduite montée en parallèle. Le dessiccateur D_2 est prévu pour les cas de mesure sous vide de manière à pouvoir, en fin d'expérience, avant de procéder à la pesée, remplir à nouveau D_1 avec de l'air sec. D_1 et D_2 sont constitués par des bouteilles spéciales en verre au fond desquelles est placé un tampon de laine de verre supportant la pierre ponce concassée enrobée de pentoxyde de Phosphore (P_2O_5) qui fonctionne comme agent absorbant l'eau. Sa pression de vapeur est inférieure à 10^{-4} cm Hg.

Cette méthode de mesure par absorption de l'humidité de l'air donne d'excellents résultats sous toutes conditions climatiques. Une mesure exige un certain temps (10...15 min) mais elle est sûre, à condition de prendre certaines précautions. Par exemple de s'assurer que le tampon de laine de verre sur lequel est disposé le dessiccateur, ne contient plus trace d'humidité sans quoi celle-ci peut être entraînée par l'air sec hors de la bouteille et fausser ainsi la pesée. Etre certain que les conduites d'amenée d'air humide au dessiccateur possèdent une température suffisante pour éviter toute condensation interne. A cet effet, ces conduites sont munies d'un système de chauffage électrique qui maintient leur température à environ $+ 60$ °C.

Le principe de la méthode de mesure de l'humidité au moyen du pont est le suivant:

L'air humide aspiré dans le cylindre étanche *a* s'écoule vers *b*, puis est desséché dans le dessiccateur D_1 , traverse à l'état sec les cylindres *c* et *d* et s'écoule enfin vers la pompe *PV*. L'appareil *M-R* permet de contrôler le débit d'air qui peut être maintenu à la valeur désirée. Les cylindres étanches *a*, *b*, *c*, *d* sont maintenus sous haute température pour éviter toute condensation interne. Dans leur axe sont fixés de fins fils de platine chauffés, qui

forment entre eux les branches d'un pont dont les sommets sont reliés à une source de courant d'une part, de l'autre à l'instrument de mesure. L'air humide des cylindres *a* et *b* possède une conductibilité thermique plus élevée que celle de l'air sec des cylindres *c* et *d*. Cet effet détermine par conséquent une réduction de la température, donc de la résistance ohmique des fils de platine correspondants, d'où l'établissement d'un déséquilibre du pont. Le courant qui circule dès lors dans l'instrument *Gr* constitue une indication directe de l'humidité absolue de l'air. L'échelle de *Gr* peut être ainsi étalonnée en g/m^3 .

Une description complète de cet appareil de mesure a été donnée dans le Schweizer Archiv n° 8, août 1945, p. 238...241, par Monsieur E. Kobel, ingénieur aux laboratoires de physique de BBC à Baden. Convenablement étalonné ce système de mesure rapide de l'humidité de l'air donne des résultats très utiles dans la gamme des pressions et températures prévues pour les essais, pour les humidités supérieures à $1 g/m^3$. Les humidités inférieures ne peuvent pas être bien contrôlées avec l'instrument monté dans l'appareil. Quelques essais se feront ultérieurement avec un instrument plus sensible.

Lors d'essais effectués avec la nasse située en plein air, l'humidité relative et la température de l'ambiance sont déterminées au moyen d'un hygromètre à aspiration à deux thermomètres et de ses courbes d'étalonnage qui permettent également de déduire la valeur de l'humidité absolue. La pression est contrôlée par un baromètre indicateur.

Conclusions

Comme le démontre l'exposé ci-dessus, la nouvelle installation d'essai et de mesure de pertes par effet de couronne de conducteurs sous conditions climatiques imposées aménagée à Gösgen par la FKH, permettra sans aucun doute d'effectuer des recherches très intéressantes dont les résultats rendront d'appréciables services à la technique moderne.

Elle sera sous peu complétée par une installation de mesure de tensions radiophoniques perturbatrices qui fera l'objet d'une communication ultérieure.

Que tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont apporté leur concours à la réalisation de cette œuvre soient ici vivement remerciés, en particulier la maison Escher Wyss & Cie, qui n'a pas redouté l'effort et les frais que lui ont occasionnés la construction de la nasse.

Qu'on nous permette en outre d'adresser une pensée émue et reconnaissante à la mémoire de Monsieur H. Habich, ancien Président de la FKH, qui par ses connaissances très étendues, sa compréhension et ses vues très larges contribua hautement à atteindre le but envisagé.

Adresses des auteurs:

E. Seylaz, ingénieur à la FKH, Gösgen (SO).

K. Berger, professeur, Dr ès sc. techn., ingénieur chargé des essais de la FKH, 301, Seefeldstrasse, Zurich 8.