

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 52 (1961)  
**Heft:** 23

**Artikel:** Conception et particularités des transformateurs à 400 kV  
**Autor:** Lutz, H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059091>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 18.04.2026

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

# BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Organe commun de l'Association Suisse des Electriciens (ASE)  
et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité (UCS)

## Conception et particularités des transformateurs à 400 kV

Par H. Lutz, Zurich

621.314.21.027.840

*L'exposé donne un aperçu général des exigences auxquelles doivent répondre les transformateurs prévus pour un réseau à 400 kV, tout en observant les conditions exigées en Suisse. A côté des questions primordiales de rigidité diélectrique, les diverses possibilités de construction sont commentées. Un chapitre particulier traite des transformateurs de réglage qui, pour ces très hautes tensions, ne peuvent plus être exécutés de la manière classique. Enfin, quelques problèmes de transport et de mise en place sont brièvement expliqués.*

*Der Aufsatz gibt einen generellen Überblick über die Anforderungen, welche an die Transformatoren gestellt werden beim Übergang auf eine Netzspannung von 400 kV, wobei insbesondere die schweizerischen Verhältnisse ins Auge gefasst sind. Neben den zentralen Fragen der Spannungsfestigkeit werden die konstruktiven Möglichkeiten erörtert. Ein besonderer Abschnitt befasst sich mit den Regeltransformatoren, welche bei diesen Spannungen meist nicht mehr in der konventionellen Art hergestellt werden können. Ferner wird noch kurz auf einige Fragen bezüglich Transport und Aufstellung eingegangen.*

### 1. Introduction

C'est en décembre 1952, dans le cadre d'une assemblée de l'ASE [1]<sup>1)</sup>, que les problèmes de transport d'énergie à 380 kV ont été abordés pour la première fois en Suisse. Bien qu'auparavant déjà de tels réseaux à très haute tension étaient en service avec succès, en Suède par ex., personne n'eût songé que près de 10 ans plus tard, un premier réseau à 380 kV devait être également mis en service dans notre pays. Dans les débuts du transport à 380 kV on était d'avis que de telles hautes tensions n'étaient avantageuses que pour de très grandes distances seulement, distances qui n'interviennent pas en Suisse. Mais entre temps, la nécessité d'un transport à 380 kV devint le plus en plus pressante. En effet, l'utilisation intensive des forces hydrauliques, dans le canton des Grisons surtout, a augmenté considérablement les quantités d'énergie à transporter dans les centres de distribution, si bien qu'une exploitation à 220 kV nécessitant bon nombre de lignes aériennes eût amené de grandes difficultés, à cause de l'étroitesse des vallées et des cols et de la protection des sites. Par le fait que l'énergie transportable par ligne à 380 kV est à peu près 3 fois plus grande qu'à 220 kV, l'adoption de la tension supérieure permet de réduire considérablement le nombre des nouvelles lignes à construire, sans parler d'une réduction des frais d'investissement pour une tension plus élevée [2].

Vers 1956, deux grandes entreprises suisses d'électricité [Motor-Columbus et les Forces Motrices du Nord-Ouest Suisse (NOK)], se sont penchés sur ce problème. En fin 1957 déjà, les premiers transformateurs à 400 kV pour la Suisse étaient commandés et la première ligne à 400 kV allant des Grisons jusque dans la région de Bassersdorf (ZH) est actuellement en construction. Une élévation de tension des lignes du Gotthard et du Lukmanier est également prévue pour une liaison future

Nord-Sud, car entre temps, la nécessité pour la Suisse de se nouer au réseau européen à 400 kV devint croissante.

### 2. Les principales catégories de transformateurs à 400 kV

En principe, dans un réseau à 400 kV, les mêmes catégories de transformateurs peuvent être utilisées que dans un réseau à tension inférieure. Pratiquement, la signification de chaque sorte est toutefois très différente et jusqu'à présent, pour 400 kV, ce sont principalement les simples transformateurs élévateurs et les transformateurs d'interconnexion en couplage auto ainsi que leur combinaison qui ont fait apparition.

#### 2.1 Le transformateur élévateur

Le transformateur élévateur d'un rapport de 16/410 kV par ex., est destiné à une centrale. Toutefois, une certaine restriction est imposée par l'importance de la centrale. Par suite de l'ampleur des dépenses dues aux isolants, les transformateurs à 400 kV ne sont économiques qu'à partir d'une grandeur minimum. Dans la bibliographie, on trouvera que les plus petits groupes triphasés construits jusqu'ici atteignent déjà une puissance de 130 MVA. Dans la majorité des cas, de tels transformateurs sont toutefois conçus pour des puissances sensiblement plus élevées (jusqu'à 600 MVA) si bien que leur exploitation n'est économique que dans des centrales relativement grandes. Les transformateurs de centrales proprement dits n'ont pas de réglage sous charge de la tension mais par contre, ci et là, des prises au point neutre de la bobine haute tension, commutables hors tension [3].

#### 2.2 Le transformateur d'interconnexion

Le transformateur d'interconnexion est plus répandu que le transformateur élévateur. C'est le type

<sup>1)</sup> Voir bibliographie en fin d'exposé.

le plus important pour ces hautes tensions. Il est installé aux centres d'arrivée ou de distribution des lignes de transport d'énergie à tensions moins élevées telles que 220 kV, plus rarement 150 ou 110 kV. En moyenne, les puissances de groupe des transformateurs de ce genre sont naturellement encore plus élevées que celles pour des transformateurs élévateurs. A notre connaissance, elles varient entre 270 et 1000 MVA. Les transformateurs d'interconnexion sont normalement prévus pour couplage auto — également du reste comme pour des tensions inférieures — et pourvus, dans bien des cas, d'un réglage sous charge de la tension. Contrairement aux unités analogues de tension inférieure, le réglage s'effectue ici par un transformateur séparé afin de ne pas compliquer le transformateur de grande puissance par des bobines et organes de réglage.

### 2.3 Transformateurs combinés élévateurs et d'interconnexion

En vertu des motifs indiqués relatifs aux transformateurs élévateurs proprement dits, le transformateur combiné élévateur et d'interconnexion prend de plus en plus d'importance. Malgré sa grande puissance unitaire, il peut trouver place dans une petite centrale qui est en même temps le point de rencontre d'énergie de petites centrales voisines. L'apport de cette énergie a lieu déjà à 150 ou 220 kV. Pour l'ajustement réciproque des divers tensions, de tels transformateurs sont fréquemment pourvus d'un réglage en charge également.

En outre, ils travaillent aussi bien comme transformateurs à deux enroulements en élévateurs, que comme transformateurs de jonction couplés en auto. De par leur nature, ces unités offrent les plus gros problèmes lors de l'établissement des calculs et de la construction. Les premiers transformateurs à 400 kV installés en Suisse appartiennent à cette catégorie [5; 6].

### 3. Aperçu des unités construites jusqu'ici

Le genre de transformateur étant choisi pour une fonction déterminée, le dimensionnement a lieu comme

d'habitude selon la grandeur de la puissance nominale, le nombre de phases et le rapport de transformation. La table I donne les caractéristiques principales de quelques transformateurs à 400 kV récemment construits. Il en ressort que tous ces transformateurs ont été construits pour des puissances unitaires relativement élevées et de ce fait, la plupart du type monophasé. A l'encontre des types triphasés, la place perdue entre les bobines haute tension de différentes phases est relativement grande ainsi que les difficultés à transformer de telles grosses machines. Du fait que les transformateurs d'interconnexion sont presque exclusivement construits pour couplage auto, il est connu que la puissance du type et ainsi les dépenses se réduisent fortement. Puisque, avant tout à 400 et 220 kV mais également en dessous, les réseaux sont mis rigide-ment à terre, le couplage auto n'est aucunement désavantageux, au contraire, les pertes de passage dans le transformateur en sont encore réduites. Pour des tensions inférieures déjà, les autotransformateurs purement d'interconnexion sont munis également d'un bobinage tertiaire couplé en triangle, lequel permet, à côté de la compensation des harmoniques supérieures du courant magnétisant, l'adjonction d'un compensateur d'énergie réactive. Il est intéressant de constater que le transport à 400 kV débuta avant tout en Europe et en Russie, alors qu'aux USA on en est encore aux essais préliminaires. Il faut toutefois dire que là on pense encore aller plus haut, notamment jusqu'à 650...750 kV [8]. Il y a 4 à 5 ans, en Suisse, on parlait de puissances allant de 250...300 MVA par groupe triphasé alors que celle des premiers groupes exécutés était déjà de 400 et dernièrement même de 600 MVA.

### 4. Le problème de l'isolation

Les nombreux problèmes de développement des transformateurs à très haute tension ne sont pas dûs en premier lieu aux grandes puissances unitaires, mais bien aux très hautes tensions de service et d'essai. On se référera aux dispositions typiques de bobinages présentées en fig. 1. La rigidité diélectrique se différencie habituellement par rigidité à la perforation et rigi-

Divers transformateurs à très haute tension exécutés jusqu'ici

Tableau I

Catégorie	Pays	Puissance par unité MVA	Nombre de phases par unité	Rapport du groupe triphasé kV	Poids total sans huile et sans réfrigérateur t	Remarques
A. Transformateurs élévateurs	Suède	43	1	13,8/400		Premier transformateur à 400 kV 1951 [4]
	Suède	43,5	1	17,7/400		
	Suède	100	3	13,5/400		
	Suède	115	1	16 /370	155	
	Suède	200	1	18 /400	185	
	France	88	3	10,3/403	129	
B. Transformateurs d'interconnexion	Allemagne	220	1	400 /231	208	avec transformateur de réglage incorporé
	Suède	220	1	400 /150	170	
	Suède	170	1	425 /146		[7]
	Suède	333	1	400 /217	≈ 200	
	Finlande	140	1	380 /238	≈ 85	
	Russie	270	3	400 /110	252	
	Russie	90	1	525 /115	128	avec réglage sous charge avec transformateur réglage séparé
	France	100	1	380 /225	≈ 105	
Suisse	200	1	400 /242	120		
C. Transformateurs combinés	Suède	195/150/64	1	400/235/13,5		avec transformateur réglage séparé
	Suède	165/125/60	1	389/148/12,4		
	Suède	155/105/50	1	405/241/14		
	Suède	150/ 75/75	1	388/150/16		
	Suède	125/ 85/40	1	405/241/12,5		
	Suisse	133/ 93/40	1	410/248/13		

dité au cheminement ou longitudinale. Ainsi les tronçons  $a$  et  $b$  sont contraints à la perforation, tandis que dans la fig 1 a, la bobine haute tension, entre la prise à 400 kV et la fin mise à la terre, doit accuser une rigidité au cheminement, laquelle est déterminée par les isolants  $c$  et  $d$ .

Le dimensionnement d'un transformateur à 400 kV concernant les contraintes à la perforation, se base essentiellement sur des considérations au comparaisons à tensions moins élevées. En principe, les distances  $a$  et  $b$  doivent être choisies telles que les contraintes spécifiques ne dépassent que de peu celles à 220 kV par ex. Il faut toutefois noter que l'augmentation de la rigidité diélectrique n'est pas proportionnelle aux augmentations de distances d'isolement. Pour ces tensions, il est compréhensible que des essais sur modèles à distances d'isolement de grandeurs naturelles sont longs et coûteux. Afin de détourner au mieux les difficultés dues aux grandes contraintes inhomogènes des extrémités de bobines, ou tout au moins de les réduire dans le cas de transformateurs d'interconnexion (fig. 1 b), la prise à 400 kV est disposée, en général, au

sente l'avantage que l'huile peut constamment se renouveler entre les diverses couches solides; on peut ainsi mieux surveiller le comportement en service de l'isolation principale.

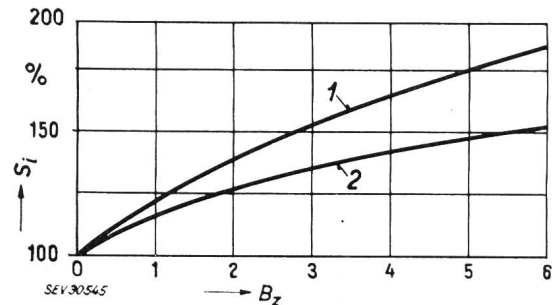


Fig. 2

Augmentation de la sécurité à la perforation d'un canal de dispersion d'une largeur de 100 mm avec division croissante par barrières de presspan de 5 mm d'épaisseur

- 1 Sécurité pour une sollicitation de tension alternative
- 2 Sécurité pour une sollicitation de tension de choc

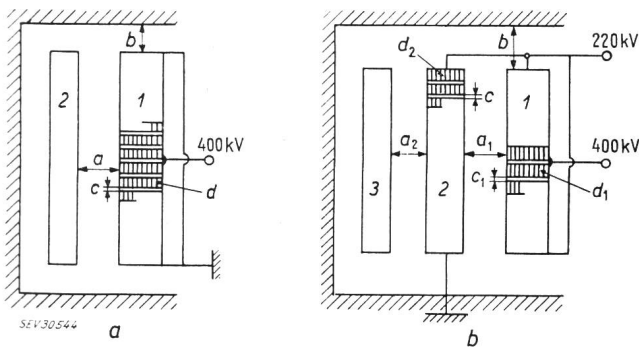


Fig. 1

Disposition des bobines et isolations

a d'un transformateur élévateur; b d'un autotransformateur d'interconnexion

1 Bobine haute tension; 2 Bobine basse tension; 3 Bobine tertiaire; a Isolation principale; b Isolation des distances terminales; c Isolation entre chaque galette; d Isolation entre conducteurs voisins

milieu d'une bobine d'une colonne. La distance terminale  $b$  n'est donc plus qu'à isoler, dans un cas d'après le niveau d'isolement du point neutre, dans l'autre cas, d'après celui de la basse tension. Puisque c'est de la disposition radiale des bobines et isolants que dépend la largeur totale de transport du transformateur, on est en général lié dans la détermination de la distance  $a$ . Pour les fabricants suisses, cette largeur maximum est donnée par le profil des Chemins de Fer Fédéraux, dans la plupart des cas. Afin de doter le transformateur à 400 kV de la plus grande puissance possible, l'isolation principale doit être fortement sollicitée. Ceci est alors admissible ou bien en remplissant le canal de dispersion de matière isolante (papier), ou bien s'il est finement divisé par des barrières de presspan, de sorte que les canaux d'huile restants deviennent très étroits et accusent ainsi une rigidité diélectrique élevée. L'accroissement de sécurité à la perforation en fonction du nombre de barrières est donné par les courbes calculées de la fig. 2. On peut en déduire que, pour une même sécurité, le canal complètement rempli de papier imprégné d'huile offre la plus faible distance  $a$ , entre bobines haute et basse tension. Par contre, l'isolation en barrières un peu plus volumineuse, pré-

Pour ces hautes tensions, le problème de la rigidité diélectrique de cheminement est plus difficile à résoudre que celui du canal de dispersion ( $a$ ) ainsi que celui des distances terminales ( $b$ ). La hauteur du transformateur et ainsi la hauteur du noyau étant également limitée par le profil de transport, la place disponible pour la bobine haute tension n'est à peine plus grande que pour une bobine à tension plus basse. De ce fait, lors de l'essai et surtout à celui de la tension de choc indiqué dans la table II, les sollicitations deviennent extrêmement grandes. On ne peut ici qu'indiquer les possibilités permettant d'atteindre une rigidité suffisante de cheminement, elles ont déjà été décrites plus en détail ultérieurement [10].

Tensions d'essai de différents pays, pour transformateurs à très hautes tensions

Tableau II

Pays	Année	Tension de réseau kV	Tension d'essai de choc		Tension d'essai alternatif kV
			Onde pleine kV	Onde coupée kV	
Suède [4]	1952	400	1775	—	780
	1958	400	1500	—	660
Russie (env.)	1955	400	1500	?	700
	1958	500	1750	?	945
	1960 <sup>1)</sup>	500	1550	1650	750
France	1958	400	1450	—	630
Allemagne	1958	400	1425	1640	640
Finlande	1957	400	1650	1900	725
Suisse	1957	400	1550	—	680
CEI (projet)	1959	400	1550	min. 1550	680
			1425	1425	

<sup>1)</sup> Protection par parafoudre amélioré [9].

La rigidité longitudinale dépend principalement des contraintes entre les éléments ( $c$ ). Ces contraintes sont à leur tour fonction à la fois de la tension et de l'isolant entre ces éléments. Pour des raisons de refroidissement, cet isolant se compose en partie d'huile et de papier de chaque conducteur ( $d$ ). La rigidité longitudinale peut donc être augmenté soit par le renforcement de cette isolation, soit par une réduction de la tension apparaissant entre les galettes, pour le choc surtout. Une amélioration de la rigidité diélec-

trique longitudinale par l'agrandissement des espaces entre les galettes au moyen de capes entre celles-ci (fig. 3), ou par le renforcement de l'isolation du conducteur, réduit l'espace axial disponible pour le cuivre, si bien que la bobine doit être agrandie dans le sens radial. Ces bobines sont alors difficiles à refroidir, elles

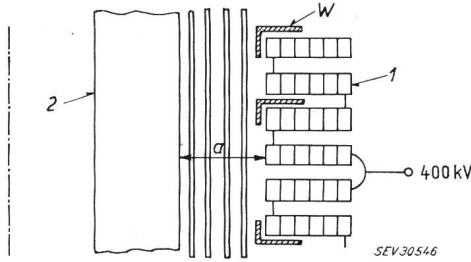


Fig. 3

Renforcement de l'isolation axiale de la bobine haute tension au moyen d'une cornière W

- 1 Bobine haute tension; 2 Bobine basse tension;
- a Isolation principale

deviennent très larges ainsi que le transformateur lui-même. Il est alors bien plus avantageux de chercher à obtenir une répartition de tension de choc telle qu'en aucun point de la bobine, des tensions partielles excessives n'apparaissent dans le sens longitudinal. On connaît, à ce sujet, bon nombre de méthodes plus ou moins efficaces. Elle tendent toutes à augmenter la capacité série  $C_s$  de la bobine par rapport à sa capacité contre terre  $C_e$ .

Le degré d'efficacité de la répartition de tension est défini généralement par la grandeur  $\alpha$ :

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_e}{C_s}}$$

Plus la valeur de  $\alpha$  se rapproche de 1, meilleur est le comportement de la bobine aux sollicitations de choc. A cet effet, il existe une très bonne méthode qui consiste à utiliser des bobines dites entrelacées. Elles ont été proposées pour la première fois par une maison anglaise [11] et adoptées dès lors de plus en plus, sous

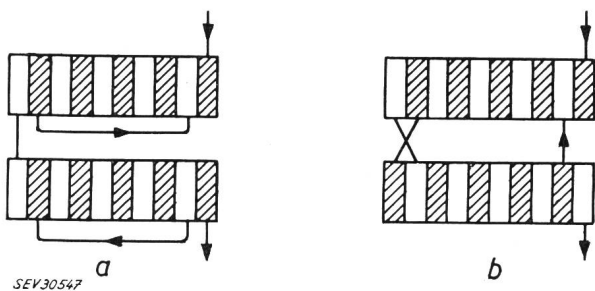


Fig. 4

Bobinages entrelacés à capacité série élevée

- a Galettes simples entrelacées; b Galettes doubles entrelacées

d'autres formes également. Le principe en est que chaque galette est parcourue toute ou en partie deux fois par un conducteur série (fig. 4). L'effet en est d'autant plus grand que les spires sont nombreuses dans le parcours du conducteur, entre l'entrée et la sortie de ce dernier, avant de refaire une deuxième fois le même trajet. La limite est toutefois donnée par la

tension entre conducteurs voisins, qui elle aussi est d'autant plus grande, plus tard a lieu le retour.

De plus, l'amélioration de la répartition de tension de choc par bobines entrelacées, par ex., a l'avantage que l'isolation de la bobine peut être presque complètement uniforme, ce qui influence favorablement le comportement de la bobine aux oscillations par la suppression de zones inconstantes, si bien qu'il en résulte une utilisation optimale de l'espace disponible ainsi qu'une bobine simple et insensible aux perturbations.

Il est intéressant de constater, en étudiant les problèmes de rigidité longitudinale, que celle-ci est dépendante de la sollicitation radiale. En réduisant de plus en plus la distance entre les bobines haute et basse tension, pour une même isolation axiale de la bobine haute tension, la rigidité longitudinale de celle-ci diminue avec l'augmentation du champ radial, tout d'abord lentement, ensuite toujours plus rapidement suivant les résultats des mesures indiqués dans la fig. 5. Cela signifie que, même pour la meilleure isolation, le canal principal de fuite doit accuser également une largeur minimum si l'on ne veut pas rencontrer des difficultés insurmontables dans l'isolation axiale.

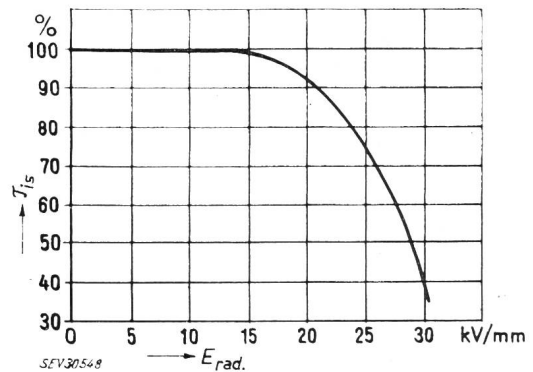


Fig. 5

Réduction de la rigidité diélectrique axiale d'une bobine par augmentation de la contrainte radiale vis-à-vis de la bobine voisine

Le contrôle de la rigidité à la tension a lieu normalement par les essais habituels de tension induite et de choc. Bien que ces essais confirment pratiquement et suffisamment les aptitudes de l'objet, des méthodes de mesures plus raffinées sont demandées aujourd'hui, surtout pour des transformateurs à haute tension. L'une d'entre elles est l'essai d'ionisation par lequel la preuve doit être fournie qu'aucune effluve ne se produise à l'intérieur du transformateur, pour des tensions alternatives de 1,2...1,3 fois la valeur de la plus haute tension de service. Toutefois, l'opportunité et la réalisation de telles mesures est encore en discussion par les spécialistes car, d'une part, la nuisance de telles décharges n'est pas encore bien définie et, d'autre part, les méthodes de mesure ainsi que l'interprétation des résultats en sont encore au stade de développement. Ces questions seront à nouveau objets de discussion lors des réunions de la CIGRE à Paris, en 1962.

### 5. Aspects constructifs

Comme d'autres grands transformateurs, ceux à 400 kV sont pourvus habituellement de noyaux en tôles à cristaux orientés et recuites, afin de réduire autant que possible les pertes dans le fer ainsi que

l'ensemble des dimensions. On réalise souvent des unités monophasées à deux ou trois noyaux bobinés pourvus de retours magnétiques (fig. 6). Il est de ce fait possible d'agrandir la longueur du noyau, ce qui est propice à la rigidité longitudinale de la bobine haute tension, en vertu des motifs indiqués. En outre, il est plus facile de loger le nombre de spires relativement grand pour 400 kV. Les mêmes avantages sont obtenus dans la construction caractérisée par un seul noyau bobiné à tôles disposées radialement (fig. 7).

la bobine peut être endommagée par des contraintes de compression de l'ordre de 160 à 200 kg/cm<sup>2</sup>. La fig. 8 montre la disposition simple et robuste d'une bobine à 400 kV.

Au sujet des connexions, on utilise principalement des conducteurs en cuivre, souvent sous forme de tube, isolés au papier. Un grand diamètre permettra de diminuer le champ électrique en surface. Les connexions relativement épaisses résultantes demandent à être simplifiées à l'extrême et on tend à les raccourcir le plus

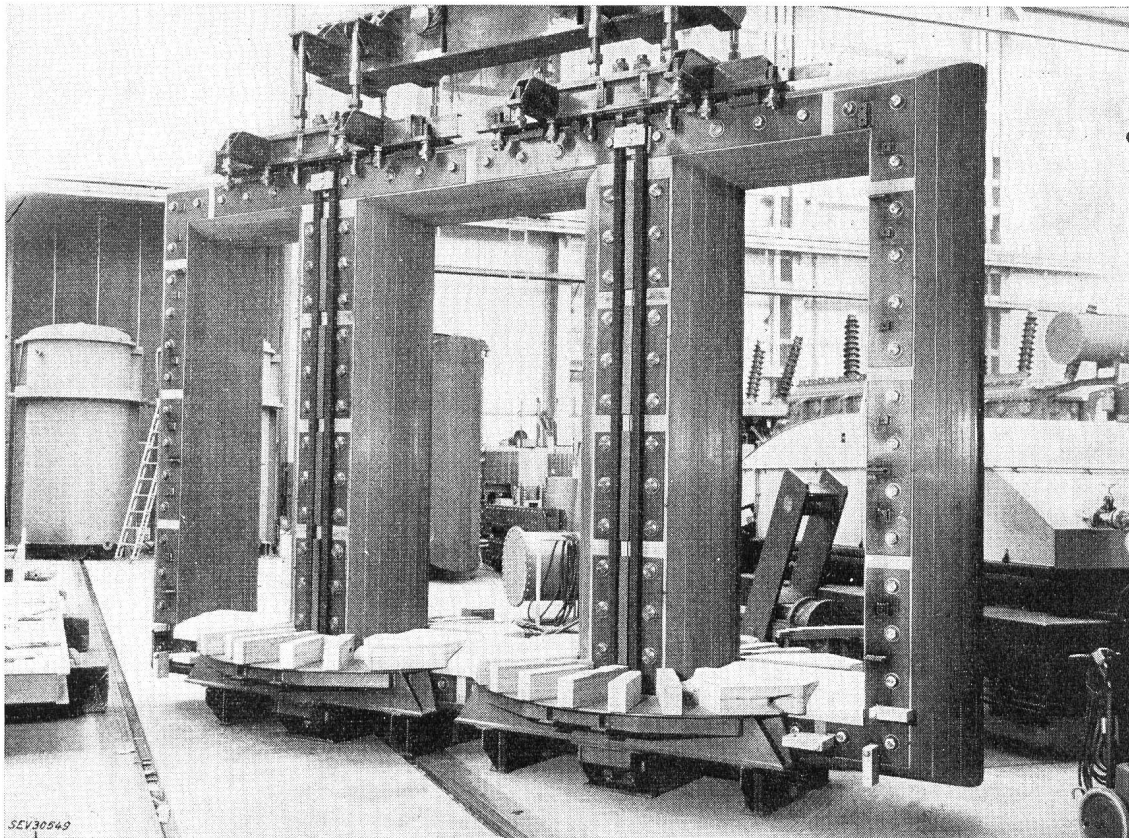


Fig. 6

Partie magnétique d'un autotransformateur monophasé  
(type Oerlikon)

133 MVA,  $\frac{410}{\sqrt{3}} / \frac{248}{\sqrt{3}}$  kV, à deux noyaux bobinés et deux retours magnétiques

Dans le paragraphe précédent, l'essentiel a été dit au sujet des bobines et isolations. Il est compréhensible que pour les très grandes puissances des réseaux à 400 kV (10 000...20 000 MVA), la rigidité des bobines aux courts-circuits doit être particulièrement étudiée. Dans les transformateurs à grandes puissances, la sollicitation du cuivre de la bobine externe se trouve déjà dans la limite d'élasticité de 0,2 % du matériau. Pour des cuivres façonnés, cette limite se situe à environ 4...10 kg/mm<sup>2</sup>, lors de sollicitations statistiques. Pour des sollicitations dynamiques, on ne peut tabler qu'avec des valeurs faiblement supérieures. Les sollicitations axiales à la compression atteignent également des valeurs qui peuvent même dépasser 100 kg/cm<sup>2</sup> dans les pièces d'espacement en presspan entre les galettes, et ceci pour des dispositions complètement symétriques des bobines. On compte que

possible. Dans ce but, la borne à 400 kV est alors placée de telle sorte que son extrémité inférieure aboutisse vers la prise située au milieu de la bobine haute tension. Les connexions sont maintenues si possible de telle sorte qu'aucun cheminement ne puisse se produire contre les parties mises à terre. Un nouveau genre de connexion à la borne a été développé pour les courants élevés, nécessitant de grosses sections de cuivre. Au lieu d'introduire un câble peu maniable à travers la borne, la connexion aboutit à une fiche à l'extrémité inférieure de la borne. La fig. 9 montre une de ces fiches en coupe qui donne pleine satisfaction, également lors de courants de courts-circuits élevés, comme on a pu le démontrer par des essais à brefs courants temporisés à 3 s, d'une valeur de 30 fois le courant nominal. De telles fiches de courant permettent un montage et démontage facile des grandes bornes.

## 6. Réglage de la tension des transformateurs à 400 kV

Comme déjà mentionné au paragraphe 2, les transformateurs d'interconnexion ainsi que les transformateurs combinés sont souvent pourvus d'un réglage de tension en charge, mais du côté basse tension. Les raisons pour lesquelles le réglage a pratiquement toujours lieu par un transformateur séparé, ont été en partie déjà énoncées. Les principaux arguments contraires aux transformateurs à 400 kV à réglage de tension en une seule unité, sont la facilité de transport et la sécurité de service, où ces deux propriétés sont contradictoires. Le transport demande des dimensions très réduites, ce qui diminue la sécurité de service et vice versa. En raison de ces motifs, l'unité est généralement divisée en un autotransformateur de grande puissance et un transformateur série de réglage relativement plus petit, selon schéma de la fig. 10 par ex., (réglage dit

Fig. 7  
Partie magnétique à tôles radiales d'un autotransformateur monophasé (type Brown Boveri)

$$133 \text{ MVA}, \frac{400}{\sqrt{3}} / \frac{250}{\sqrt{3}} \text{ kV}$$

La grandeur du noyau correspond à une puissance de type de 100 000 kVA

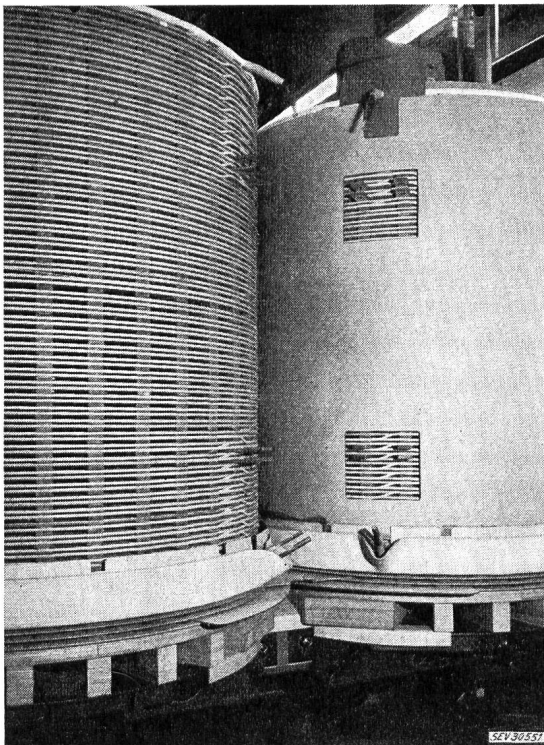
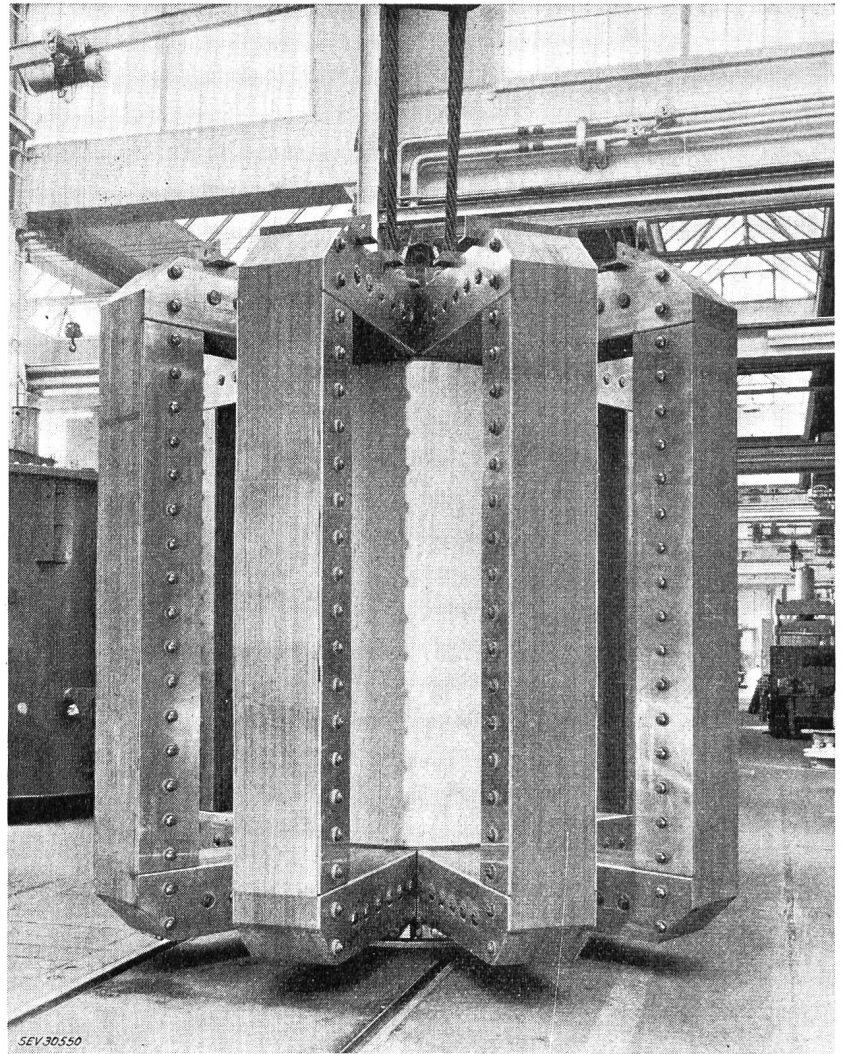


Fig. 8  
Bobine à 400 kV avec entrée haute tension dans le milieu de la colonne  
Contrôle de la répartition de tension de choc par entrelacement des spires

indirect). Le transformateur série est alors alimenté par la bobine tertiaire de l'autotransformateur. L'avantage de cette disposition est aussi que la tension supplémentaire positive ou négative induite dans le transformateur de réglage peut être ajoutée, soit en phase, soit décalée, à la basse tension de l'autotransformateur, suivant que le transformateur de réglage est excité par la même phase ou l'une des deux autres de l'autotransformateur (réglage dit longitudinal ou transversal).

Il est compréhensible qu'une unité partagée en deux transformateurs logés chacun dans une cuve séparée est un peu plus onéreuse que si elle était comprise dans un seul autotransformateur de réglage. Pour un rapport de tension de 410/200...295 kV et une puissance traversante monophasée de 133 MVA, on obtient approximativement le rapport suivant de la puissance totale du type:

- a) Autotransformateur plus transformateur de réglage 100 %
- b) Autotransformateur à réglage direct à inversion . . 84 %
- c) Transformateur de réglage à deux enroulements . 133 %

La puissance légèrement plus élevée du type de l'unité en deux parties a) donne une augmentation de prix d'environ 8 % par rapport à b), ce qui est relativement minime comparativement aux avantages gagnés. De par sa nature, un transformateur de réglage pose de bien plus grands problèmes de rigidité à la

tension de choc qu'une unité sans réglage. On doit, avant tout, éviter qu'en n'importe quel point de la bobine de réglage et pour une position quelconque du

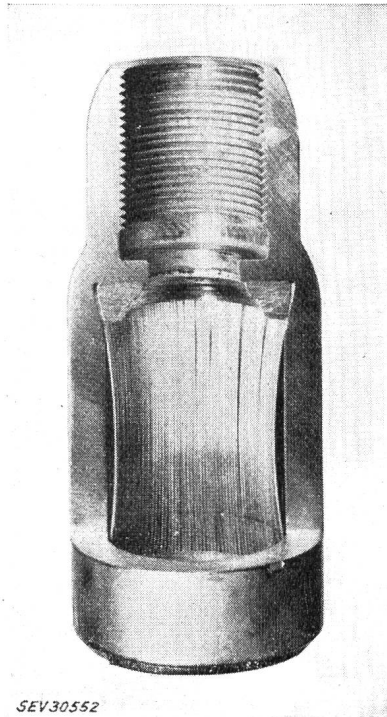


Fig. 9

Coupe à travers la douille de contact (type Multi-Contact) d'une fiche pour bornes haute tensions à grands courants

premier cas, le transport est naturellement problématique, c'est pourquoi en Suisse par ex., on a préféré

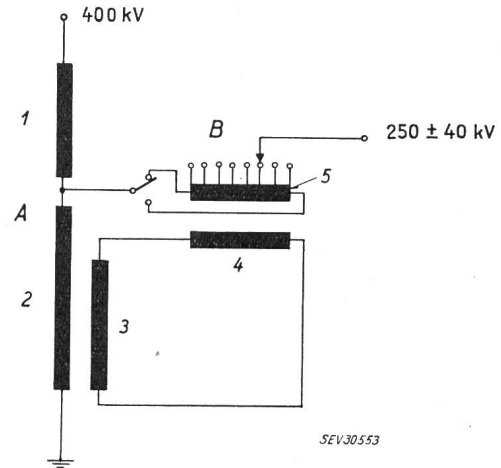


Fig. 10

Schéma de couplage monophasé d'une unité de réglage comprenant un autotransformateur (A) et un transformateur série (B)

1 Bobine haute tension de l'autotransformateur; 2 Bobine basse tension de l'autotransformateur; 3 Bobine tertiaire de l'autotransformateur; 4 Bobine d'excitation du transformateur série; 5 Bobine de réglage du transformateur série

la seconde solution. Afin de simplifier au plus les installations lors de cuves séparées, les deux unités sont disposées côte-à-côte suivant la possibilité. La fig. 11 montre un autotransformateur relié à son transformateur de réglage, du côté 220 kV par des bornes et du côté tertiaire par des barres de cuivre traversant

régulateur sous charge, la tension n'oscille à des valeurs bien supérieures à celle de ce point lors de la tension nominale d'isolation [6]. A cet effet, on utilise parfois des parafoudres ou des résistances dépendantes de la tension pour limiter les tensions de choc dangereuses. De tels parafoudres sont connectés, par ex., aux deux extrémités de la bobine de réglage, contre la terre, ainsi qu'entre ces deux extrémités [12]. Ces protections ont le désavantage d'entraver un essai irrécusable de choc de l'unité de transformateur combinée. Au reste, pour un dimensionnement approprié, ils remplissent certainement la tâche demandée.

Il se présente deux possibilités de construction pour la combinaison d'autotransformateurs et de transformateurs de réglage. Comme unités indépendantes, ils peuvent être aussi bien disposés dans une même cuve [12] que dans deux cuves séparées [5; 6]. Dans le

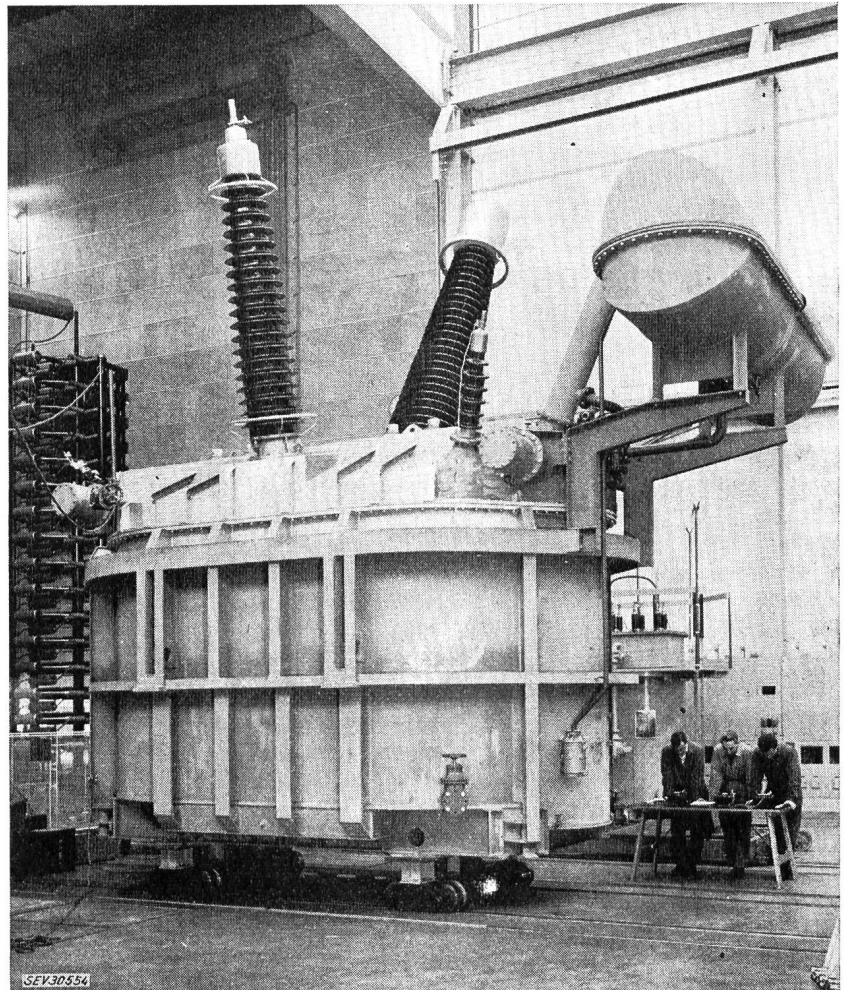


Fig. 11

Autotransformateur

$\frac{410}{\sqrt{3}} / \frac{249}{\sqrt{3}}$  13 kV pour une puissance traversante de 133 MVA d'un groupe à réglage indirect. Devant, la borne 220 kV et deux brides de raccordement pour les connexions tertiaires

un canal d'huile. Dans une exécution de Brown Boveri (fig. 12), toutes les connexions électriques même, entre les deux transformateurs partiels, ont lieu dans huile.

En rapport aux transformateurs de réglage, les régulateurs en charge pour 220 kV forment un chapitre particulier. Il s'agit ici d'une exécution spéciale, où la rigidité diélectrique de chaque pièce doit satisfaire aux exigences du groupe de réglage tout entier. Dans le schéma de la fig. 10, les surtensions du réseau à 220 kV portent directement sur le régulateur en charge. En raison des grandes puissances, ces commutateurs sont naturellement dimensionnés pour de très fortes intensités et surintensités, ce qui les rend assez volumineux.

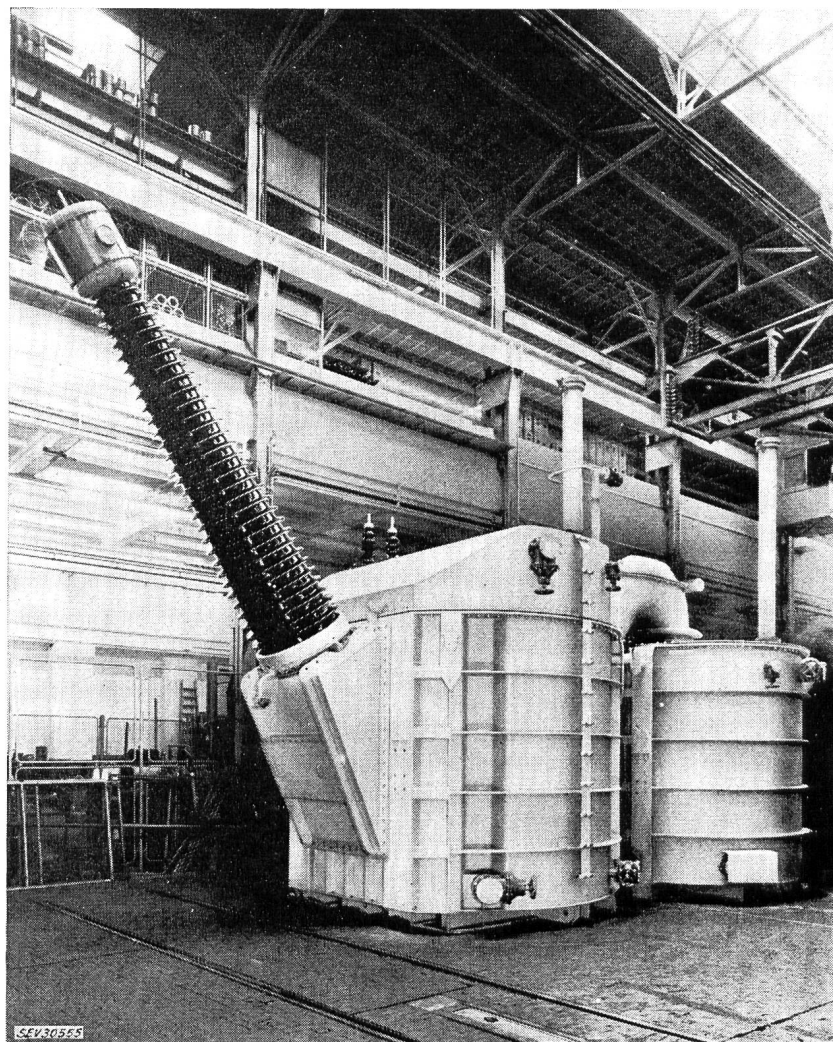
## 7. Transport et mise en place

Ces grandes unités à 400 kV donnent lieu à de sérieux problèmes de transport, vu leurs poids et dimensions élevés. On peut alors entrevoir l'éventuelle possibilité de les transporter par pièces détachées, comme il a déjà souvent été le cas lors de basses tensions. Mais les choses se passent autrement à 400 kV. Des deux possibilités: a) essais en fabrique — démonter — expédier — remonter, respectivement b) monter — démonter — expédier — remonter — essais sur place, aucune ne peut donner satisfaction. Dans le cas a), pendant le remontage, les bobines et isolants absorbent de l'humidité qu'on ne peut extraire que très difficilement

Fig. 12  
Unité monophasée combinée  
(type Brown Boveri)

composée d'un autotransformateur et d'un transformateur série, puissance traversante

$$\text{de } 133 \text{ MVA à } \frac{420}{\sqrt{3}} / \frac{250}{\sqrt{3}} + 17 \frac{3,29}{\sqrt{3}} / 10,5 \text{ kV}$$



par la suite, surtout avec les possibilités réduites de traitement sur place. La déshumidification absolue de l'huile est la condition capitale pour la sécurité en service d'un transformateur à 400 kV. Dans le cas b), ces désavantages n'existent pas. Par contre, le contrôle de la rigidité diélectrique est pratiquement impossible ici, les gros appareils nécessaires tels qu'un générateur de choc, par ex., ne sont pas transportables. Ces motifs ont, jusqu'ici, empêché le transport en pièces détachées d'une unité à 400 kV. On simplifiera naturellement la dislocation de tels transformateurs en transportant l'huile séparément et en remplissant la cuve d'un gaz bien desséché. Mais le but primordial doit être également ici, de ne tolérer absolument aucune infiltration d'humidité. Le poids en est bien réduit par la vidange de l'huile, mais non les dimensions naturellement. Celles-ci doivent être, dès le début, choisies de telle sorte qu'elles ne dépassent pas les cotes maximum tolérées des chemins de fer ou des routes. De

manière à ce que ces dimensions limites puissent être exploitées à l'extrême, les compagnies de transport doivent également faire quelques concessions. Elles consistent à préparer le chemin de transport, tolérer de plus faibles distances à la ligne de contact, éliminer les obstacles, etc. Les transports par chemins de fer à voie étroite sont particulièrement délicats. Pour les premiers transformateurs de Suisse à 400 kV, le poids admissible n'était que faiblement supérieur à 90 t et on opérait avec des distances de 10 cm entre rail et

transformateur (fig. 13a), respectivement de 5 à 10 cm entre transformateur et ligne de contact à 10 kV (fig. 13b), où dans ces cas, une plaque isolante a été disposée par sécurité au dessus du transformateur. La mise en place à la station a lieu normalement après avoir remonté les pièces transportées séparément telles que bornes, réservoir d'expansion, réfrigérateur etc. Le point le plus délicat est un nouveau remplissage sur place de l'huile que l'on a transportée, au mieux, sous vide dans des fûts spéciaux. L'huile devrait être transvasée sous vide très poussé dans le transformateur, au moyen d'une installation de traitement transportable, afin que toutes les parties isolantes soient exemptes de gaz et imprégnées d'huile. Le reste des travaux, entr' autre la connexion des deux transformateurs, ne pose pas de problèmes spéciaux. De telles unités sont encore protégées par des parafoudres aussi bien du côté basse tension que de côté haute tension.

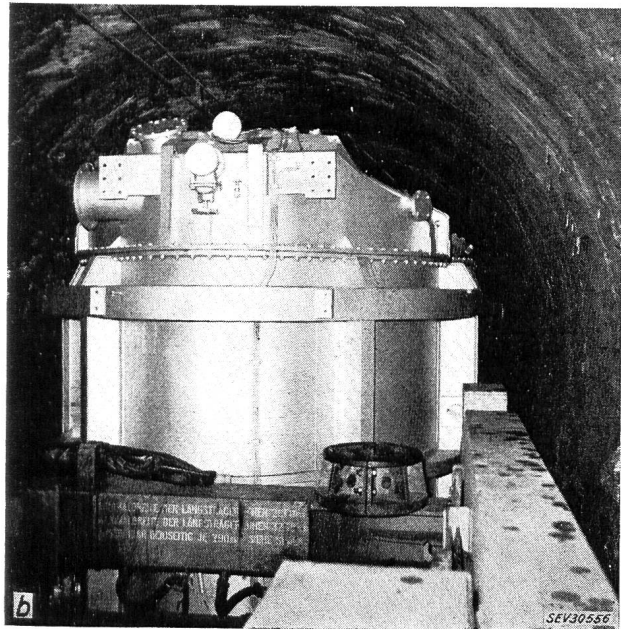


Fig. 13

Transport par wagon spécial d'un autotransformateur à 400 kV sur les chemins de fer rhétiques

On remarquera les distances très faibles aux rails et à la ligne de contact

a Distance entre rail et transformateur environ 10 cm

b Distance entre transformateur et ligne de contact 5...10 cm

## 8. Conclusion

La conception et la construction des transformateurs à 400 kV demande de sérieuses études préliminaires et des travaux de développement détaillés. En Suisse, les principaux problèmes de base ont été déjà résolus il y a quelques années et notre grosse industrie est en mesure de fabriquer des unités à très hautes tensions absolument sûres en service et satisfaisant à toutes les exigences. Les essais ainsi que les exécutions pour des tensions de réseau de 525...750 kV, en Amérique et en Russie, indiquent bien que le développement à 400 kV ne s'arrête pas. En Suisse également, des études sont déjà en cours dans cette direction, comme le montre par ex. la bibliographie [13]. Les puissances nominales ont aussi toujours tendance à monter, si bien que l'on doit apporter un intérêt tout particulier aux problèmes de transports.

Afin d'éviter un exposé trop volumineux, de nombreuses questions de détails n'ont été que brièvement traitées. Ceci est d'autant plus justifié qu'une bibliographie spéciale et abondante est à disposition dans ce domaine.

## Bibliographie

- [1] *Itchner, M.* Transformatoren für 380-kV-Übertragungsleitungen. Bull. ASE 44(1953)4, p. 145...151.
- [2] *Roser, H.*: Succès de la rationalisation dans l'industrie de l'électricité. Bull. ASE 52(1961)15, p. 575...585.
- [3] «*Savoisienne*»: Groupe de transformation 225/400 kV pour l'équipement du réseau français d'interconnexion. Rev. gén. Electr. 66(1957)3, p. 152...158.
- [4] *Stenkvist, E.*: Voltage Testing of the First 380 kV Transformers. Asea J. 25(1952)4/5, p. 67...69.
- [5] *Edlinger, A.*: Autotransformateurs à 400/220 kV. Rev. Brown Boveri 47(1960)5/6, p. 292...305.
- [6] *Lutz, H. et B. Gloor*: Die 400-kV-Transformatoren für die Zentrale Tavanasa der Kraftwerke Vorderrhein A.-G. Bull. Oerlikon -(1961)345, p. 26...36.
- [7] *Casper, W.*: Die 380-kV-Transformatorgruppen des Umspannwerkes Hyvinkää (Finnland). BBC-Nachr. 42(1960)9, p. 455...473.
- [8] *Anonyme*: First Phase of Project EHV Nears Completion. (General Electric). Electr. Wld. 154(1960)9, S. 74.
- [9] *Kalinitchenko, I. S.*: Transformatoren mit Spannungen von 330 bis 550 kV. Westnik Elektropromyshlemosti 32(1961)3, p. 1...4. (= russe).
- [10] *Brechna, H. et Wittgenstein*: Entwicklungen auf dem Gebiete der 400-kV-Transformatoren. Bull. Oerlikon -(1958)331, p. 146...156.
- [11] *Chadwick, A. T., J. M. Ferguson, D. H. Ryder et G. F. Stearn*: Nouveau type d'enroulement pour transformateurs, améliorant la répartition des tensions de choc. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 13<sup>e</sup> session 1950, t. 2, rapp. 107.
- [12] *Drabeck, J., R. Kùchler et K. Schlosser*: Die 380-kV-Transformatoren in Rommerskirchen und Hoheneck. ETZ-A 79(1958)7, p. 207...216.
- [13] *Goldstein, A. et W. Frey*: Transmission d'énergie à très haute tension. Rev. Brown Boveri 46(1959)4, p. 227...250.

## Adresse de l'auteur:

*Heinrich Lutz*, Chef du département de construction des transformateurs, Ateliers de Construction Oerlikon, Zurich 50.