

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 44 (1953)
Heft: 9

Artikel: Surtensions de déclenchement de transformateurs à vide et de lignes ouvertes
Autor: Berger, K.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058069>

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: 12.01.2025

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

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Surtensions de déclenchement de transformateurs à vide et de lignes ouvertes

Par K. Berger, Zurich,

avec la collaboration d'un groupe de travail du Comité Technique 17A (Interrupteurs à haute tension) du Comité Electrotechnique Suisse

621.316.542.027.3 : 621.314.2.015.3 + 621.315.1.015.3

Ce rapport récapitule les résultats de mesures oscillographiques sur la grandeur des surtensions de déclenchement de transformateurs à vide et de lignes ouvertes dans des installations à haute tension. Ces mesures ont été exécutées en partie par la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH), en Suisse, et en partie par des fabricants suisses de disjoncteurs à haute tension dans des installations à l'étranger. Toutes ces mesures ont été collationnées par les soins de la FKH, sur demande du Comité d'Etudes no 17 (Appareils d'interruption de la CEI, auquel ce rapport a été présenté, lors de la réunion de Schéveningue, en automne 1952.

Der Bericht enthält eine Zusammenfassung der Resultate von oszillographischen Messungen über die Grösse der Überspannungen, die beim Ausschalten leerlaufender Transformatoren und Leitungen in Hochspannungsanlagen entstehen. Die Messungen sind zum Teil von der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) in der Schweiz, zum Teil von schweizerischen Fabrikanten von Hochspannungsschaltern in ausländischen Anlagen durchgeführt worden. Die Zusammenstellung aller Messwerte erfolgte durch die FKH im Auftrage des Comité d'Etudes No 17 (Schalter) der CEI; der Bericht wurde diesem in seiner Sitzung von Scheveningen im Herbst 1952 vorgelegt.

Sur demande du Comité Technique 17 A (Interrupteurs à haute tension) du Comité Electrotechnique Suisse (CES), la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH) a collationné tous les résultats des mesures sur les surtensions de déclenchement de transformateurs à vide de lignes ouvertes, qui lui ont été communiqués. Ces mesures proviennent en partie d'essais de couplage effectués par la FKH, à la demande d'entreprises électriques, dans des installations suisses à haute tension. D'autres séries de mesures ont été exécutées par des fabricants suisses de disjoncteurs à haute tension dans des installations à l'étranger. Le présent Rapport renferme tous les résultats des mesures qui nous ont été communiqués. Il a été présenté en automne 1952, à Schéveningue, lors de la réunion du Comité d'Etudes n° 17 de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI), qui désirait recevoir des informations sur la valeur des surtensions de déclenchement. Toutes les mesures concernent des disjoncteurs à haute tension de fabrication suisse¹⁾.

Les tableaux Ia et Ib donnent la liste des séries de mesures exécutées, avec indication de l'installation, de la tension, des transformateurs et du genre de disjoncteurs.

Les figures 1 à 23 indiquent les résultats de chaque série de mesures, tandis que la figure 24 récapitule tous les résultats concernant les transformateurs et la figure 25 ceux qui concernent les lignes.

A propos de ces figures, il y a lieu de remarquer que, par suite de la dispersion généralement considérable entre valeurs individuelles des surtensions, il est préférable d'indiquer toutes ces valeurs comme des points de mesure. Par contre, dans les tableaux synoptiques, on a indiqué uniquement la zone de dispersion des mesures, ainsi que la moyenne des surtensions mesurées.

¹⁾ Cette compilation a été close en automne 1952. Les résultats qui nous ont été communiqués par la suite feront éventuellement l'objet d'un rapport ultérieur.

Signification des symboles et désignations utilisés sur les figures 1 à 25

A. Caractéristiques de l'installation en essai

U_B Valeur efficace de la tension composée du réseau, durant les essais. Lorsque cette tension n'est pas exactement connue, on considère la tension nominale du réseau.

f Fréquence du réseau (50, 60 ou 16 $\frac{2}{3}$ Hz).

Genre de mise à la terre du point neutre: neutre mis directement à la terre, neutre isolé ou neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une bobine d'extinction.

P_{K_s} Valeur approximative de la puissance de court-circuit au point d'alimentation du réseau. Lorsque l'alimentation a lieu par un transformateur séparé, il s'agit de la puissance de court-circuit de ce transformateur.

B. Caractéristiques de l'objet déclenché à vide

a) Transformateur

Type et année de fabrication.

P_n Puissance nominale.

$\ddot{u} = \frac{U_{primaire}}{U_{secondaire}}$: Rapport de transformation à vide.

Lorsqu'il s'agit d'un transformateur avec régulateur à gradins:
Position de ce régulateur.

Couplage du transformateur: étoile—étoile, étoile—triangle ou triangle—étoile.

ε Tension de court-circuit, en %.

I_μ Courant magnétisant, en A, sous tension à vide, valeur efficace.

b) Ligne

L Longueur de la ligne, en km (longueur du conducteur, lorsque les essais n'ont lieu que sur une phase), valeur efficace.

I_c Courant capacitif de la ligne en A_{eff} (resp. du conducteur en cas d'essais monophasés).

Tableaux des séries de mesures figurant dans le Rapport

1. Séries de mesures sur les surtensions de déclenchement de transformateurs

Tableau Ia

Lieu de la mesure	Tension de l'installation kV	Fréquence Hz	Genre de disjoncteur utilisé	Puissance du transformateur déclenché MVA	Résultats des mesures sur figure
Siebnen	50	50	Disjoncteur à bain d'huile	16,5	1
Siebnen	150	50	Disjoncteur à bain d'huile	16,5	2
Bickigen	150	50	Disjoncteur à bain d'huile	3 × 15	3
Bickigen	150	50	Disjoncteur orthojecteur	3 × 15	4
Bickigen	50	50	Disjoncteur orthojecteur	3 × 15	5
Laufenburg	50	50	Disjoncteur pneumatique	5,75	6
Laufenburg	6	50	Disjoncteur pneumatique	5,75	7
Rempen	50	50	Disjoncteur orthojecteur	16,5	8
Bottmingen	50	50	Disjoncteur orthojecteur	23,3	9
Bottmingen	150	50	Disjoncteur pneumatique	23,3	10
Bottmingen	150	50	Disjoncteur à faible volume d'huile	23,3	11
Bottmingen	150	50	Disjoncteur à faible volume d'huile	23,3	12
Bottmingen	50	50	Disjoncteur orthojecteur	23,3	13
Grüze	15	16 1/3	Disjoncteur orthojecteur et disjoncteur à bain d'huile	3...9	14
Stadsforsen	220	50	Disjoncteur pneumatique	(2...66 A)	15

2. Séries de mesures sur les surtensions de déclenchement de lignes

Tableau Ib

Lieu de la mesure	Tension de l'installation kV	Fréquence Hz	Genre de disjoncteur utilisé	Longueur de la ligne déclenchée km	Ligne aér. F ou câble K	Résultats des mesures sur figure
Siebnen	150	50	Disjoncteur à bain d'huile	8 et 45	F	16
Bickigen	150	50	Disjoncteur orthojecteur et disjoncteur à bain d'huile	25	F	17
Grand Coulee	230	60	Disjoncteur pneumatique	(1...3) × 160	F	18
Fontenay	220	50	Disjoncteur pneumatique	136...828	F	19
Fallou	220	50	Disjoncteur à faible volume d'huile	20...240	F	20
Fontenay	220	50	Disjoncteur orthojecteur	18...420	F	21
St. Johann	110	50	Disjoncteur orthojecteur	35 + 16	F + K	22
Stadsforsen	220	50	Disjoncteur pneumatique	72 et 480	F	23

C. Caractéristiques du disjoncteur

Type et année de fabrication.

 U_n Tension nominale. P_{Ks} Puissance de déclenchement. n Nombre d'intervalles disruptifs par phase. p Pression de service de l'air, lorsqu'il s'agit d'un disjoncteur pneumatique. v Vitesse de séparation des contacts, lorsqu'il s'agit d'un disjoncteur à huile. R Valeur, en ohms, des résistances du circuit du disjoncteur, dans lequel la coupure a lieu en deux opérations. [Un trait (—) signifie: disjoncteur sans résistance.]

D. Surtensions

Sauf indication contraire, toutes les surtensions ont été mesurées à l'aide d'un oscillographe cathodique avec diviseur de tension capacitif.

La surtension de déclenchement est la tension la plus élevée (u_{max} , valeur instantanée de pointe ou de crête) mesurée contre la terre au cours d'une opération complète de coupure par le disjoncteur. Le processus de déclenchement débute à l'excitation de la bobine de déclenchement du disjoncteur et se termine lorsque les tensions transitoires entre les trois phases sont devenues nulles.

Sur les figures 1 à 25, chaque surtension est représentée graphiquement par sa valeur relative, rapportée à la valeur de crête de la tension de pôle

ou de phase à la fréquence de service, valeur qui est exprimée par le facteur k .

Le facteur k a été mesuré pour chaque déclenchement enregistré, pour chacune des phases R, S et T, et consigné dans les graphiques des figures 1 à 23.

Lors du déclenchement de transformateurs à vide, les facteurs de surtension ont été déterminés aussi bien aux bornes de l'enroulement primaire (k_{pr}), qu'à celles de l'enroulement secondaire (k_{sek}). Lors du déclenchement de lignes ouvertes, les facteurs de surtension ont été déterminés du côté ligne (k_L) et du côté réseau (k_N) (dans le cas d'alimentation directe par le réseau) ou du côté transformateur (k_T) (dans le cas d'alimentation de la ligne par un transformateur individuel).

La tension composée du réseau, à l'instant du déclenchement, a été le plus souvent déterminée par la moyenne des trois tensions contre la terre multipliée par $\sqrt{3}$. La tension de phase a été déterminée par la valeur de crête, enregistrée sur l'oscillogramme avant la séparation des contacts, divisée par $\sqrt{2}$. Lorsque la courbe de la tension n'est pas sinusoïdale, les valeurs ainsi obtenues peuvent s'écarter de quelques pour-cents de la valeur efficace réelle. Il en est de même pour les courants.

Les définitions des facteurs de surtension et les symboles employés dans les graphiques, sont les suivants:

$k_{pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$	Facteur de surtension côté primaire du transformateur	} lors du déclenchement d'un transformateur à vide	}	m	Nombre de déclenchements exécutés dans des conditions identiques
$k_{Sek} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$				Facteur de surtension côté secondaire du transformateur	$\overline{\cdot}$
$k_L = \frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$	Facteur de surtension côté ligne	} lors du déclenchement d'une ligne ouverte	}	\int	Surtension limitée par claquage entre une borne et la terre
$k_N = \frac{u_{max N}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$	Facteur de surtension côté alimentation (réseau)			$\int \int$	Surtension ayant provoqué un claquage entre deux bornes voisines
$k_T = \frac{u_{max T}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$	Facteur de surtension côté alimentation (transformateur)				
$U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}$	Tension de pôle, valeur de crête (moyenne des trois phases)				

Résultats

Les résultats des séries de mesures peuvent être groupés comme suit:

Une comparaison entre les tableaux des figures 24 et 25 montre tout d'abord que les surtensions de déclenchement à vide sont nettement plus grandes dans le cas des transformateurs, que dans celui des lignes. Dans le premier cas, les surtensions atteignent 1 à 6,05 fois la tension de phase déclenchée. Les plus grandes surtensions lors du déclenchement

Mesures à Siebnen, 50 kV

Fig. 1

A. Alimentation

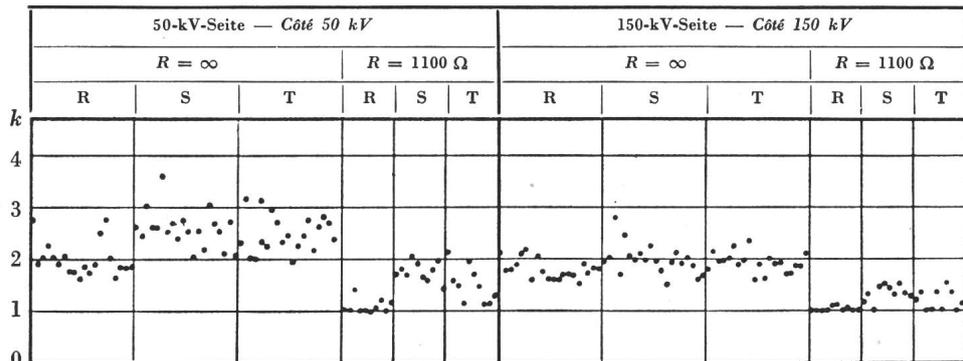
$U_B = 50 \text{ kV}$; $f = 50 \text{ Hz}$
 Neutre: bobine d'ext.
 $P_{Ks} \approx 1500 \text{ MVA}$

B. Transformateur 1925

$P_n = 16,5 \text{ MVA}$
 $\ddot{u} = 50,4/141 \text{ kV}$
 Couplage: \uparrow/\uparrow
 $I_\mu \approx 11 \text{ A}$; $\varepsilon = 10,5 \%$

C. Disjoncteur 1925

Disj. à huile, chambre d'ext., 3 cuves
 $U_n = 50 \text{ kV}$;
 $P_{Ks} \approx 1000 \text{ MVA}$; $n = 2$
 $V \approx 2,6 \text{ m/s}$
 $(V_{trav.} \approx 1,3 \text{ m/s})$
 $R = \infty/100 \Omega/\text{phase}$



D. Surtensions

$m = 20$
 $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$
 $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$



Mesures à Siebnen, 150 kV

Fig. 2

A. Alimentation

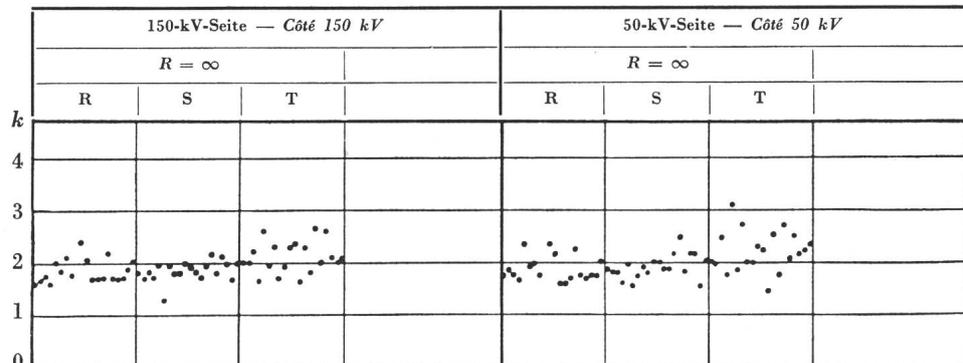
$U_B = 145 \text{ kV}$; $f = 50 \text{ Hz}$
 Neutre: bobine d'ext.
 $P_{Ks} \approx 1500 \text{ MVA}$

B. Transformateur 1925

$P_n = 16,5 \text{ MVA}$
 $\ddot{u} = 141/50,4 \text{ kV}$
 Couplage: \uparrow/\uparrow
 $I_\mu \approx 4 \text{ A}$; $\varepsilon = 10,5 \%$

C. Disjoncteur 1925

Disj. à huile, chambre d'ext., 3 cuves
 $U_n = 150 \text{ kV}$
 $P_{Ks} \approx 1500 \text{ MVA}$; $n = 2$
 $v \approx 3,9 \text{ m/s}$
 $(v_{trav.} \approx 1,95 \text{ m/s})$
 $R = \infty$



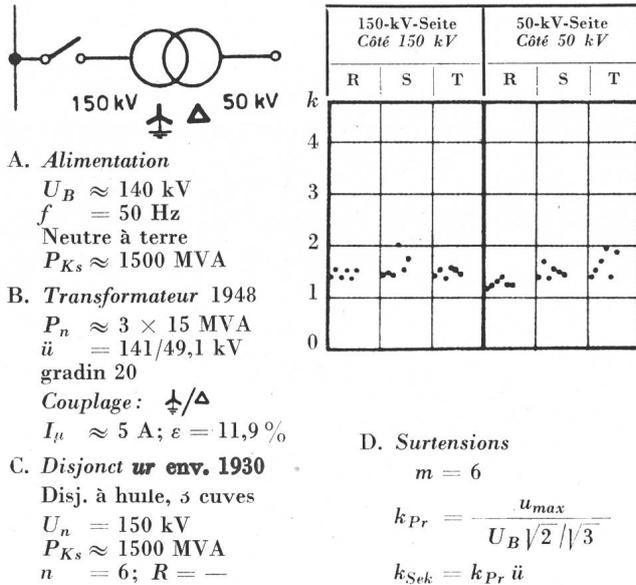
D. Surtensions

$m = 20$
 $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$
 $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$



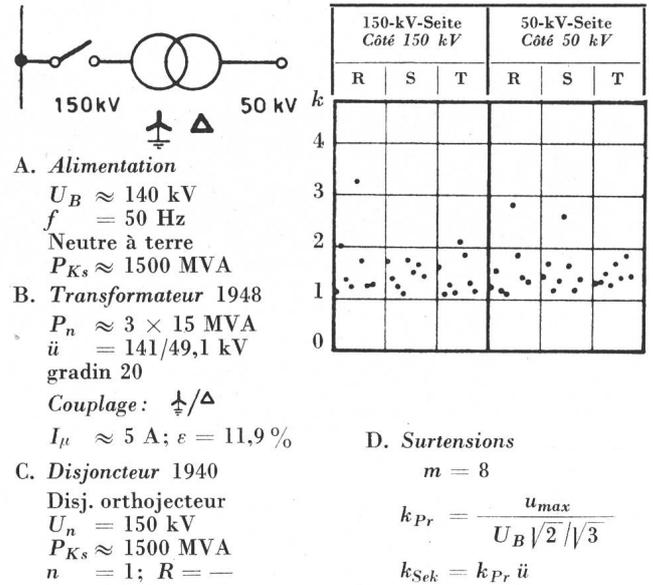
Mesures à Bickigen, 150 kV

Fig. 3



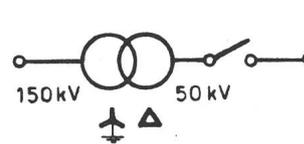
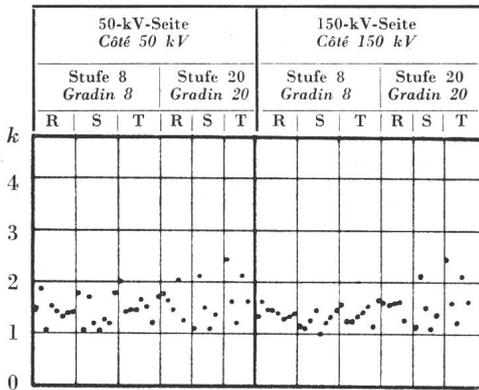
Mesures à Bickigen, 150 kV

Fig. 4



Mesures à Bickigen, 50 kV

Fig. 5



A. Alimentation
 $U_B \approx 46$ kV; $f = 50$ Hz
 Neutre isolé
 $P_{Ks} = 1000$ MVA

B. Transformateur 1948
 $P_n \approx 3 \times 15$ MVA
 $\ddot{u} = 55,3/49,1/141$
 gradin 8 et 20

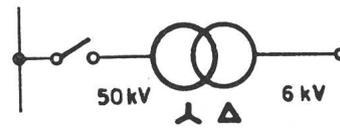
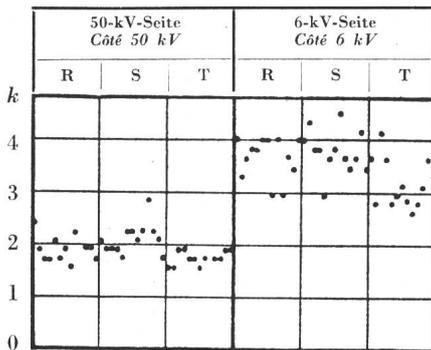
Couplage: $\frac{1}{2}/\Delta$
 $I_\mu \approx 15,5$ A
 $\varepsilon = 9,7/11,9\%$

C. Disjoncteur 1940
 Disj. orthojecteur
 $U_n = 45$ kV
 $P_{Ks} \approx 1000$ MVA
 $n = 1$; R = —

D. Surtensions
 $m = 5...8$
 $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
 $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$

Mesures à Laufenburg, 50 kV

Fig. 6



A. Alimentation
 $U_B \approx 48$ kV; $f = 50$ Hz
 Neutre: bobine d'ext.
 $P_{Ks} \approx 500$ MVA

B. Transformateur 1918
 $P_n = 5,75$ MVA
 $\ddot{u} = 48,2/6,3$ kV

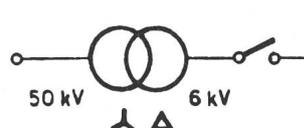
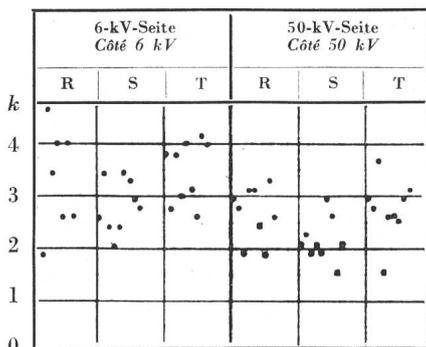
Couplage: Δ/Δ
 $I_\mu \approx 3$ A; $\varepsilon = 3,43\%$

C. Disjoncteur env. 1946
 Disj. pneumat.
 $U_n = 50$ kV
 $P_{Ks} = 600$ MVA
 $n = 2$; R = —
 $p = 12...14$ kg/cm²

D. Surtensions
 $m = 13$
 $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
 $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$

Mesures à Laufenburg, 6 kV

Fig. 7



A. Alimentation
 $U_B = 6,2$ kV; $f = 50$ Hz
 Neutre isolé
 $P_{Ks} \approx 500$ MVA

B. Transformateur 1918
 $P_n = 5,75$ MVA
 $\ddot{u} = 6,3/48,2$ kV

Couplage: Δ/Δ
 $I_\mu \approx 24$ A; $\varepsilon = 3,43\%$

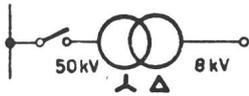
C. Disjoncteur 1946
 Disj. pneumatique
 $U_n = 11$ kV
 $P_{Ks} = 700$ MVA
 $n = 1$; R = —
 $p = 12...14$ kg/cm²

D. Surtensions
 $m = 9$
 $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
 $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$

Mesures à Rempen, 50 kV

a) sans résistance

Fig. 8a



A. Alimentation

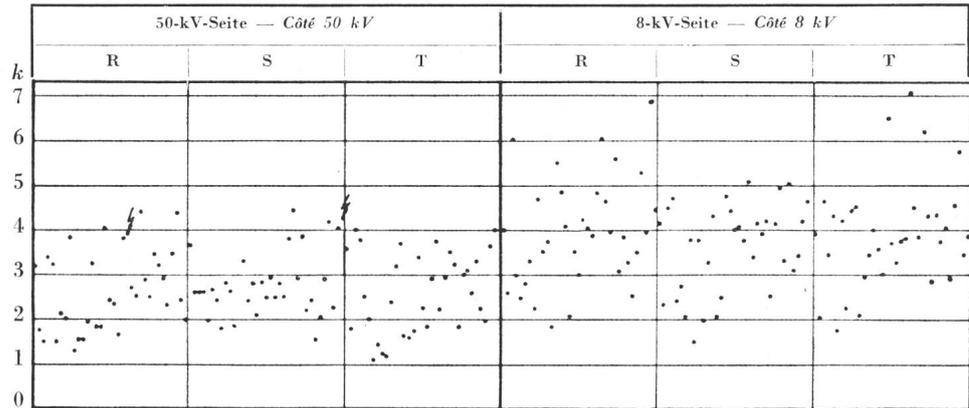
$U_B = 47,5/50...51$ kV
 $f = 50$ Hz
 Neutre: bobine d'ext./isolé
 $P_{Ks} \approx 500/200$ MVA

B. Transformateur 1925

$P_n = 16,5$ MVA
 $\ddot{u} = 50/8,8...9,58$ kV

Couplage: λ/Δ

$\varepsilon = 9,3\%$
 $I_\mu = 6,7$ A



C. Disjoncteur 1940

Disj. orthoprojecteur

$U_n = 60$ kV
 $P_{Ks} = 750$ MVA
 $n = 1$
 $v = 5$ m/s
 $R = \infty/5000 \Omega/10000 \Omega$

D. Surtensions

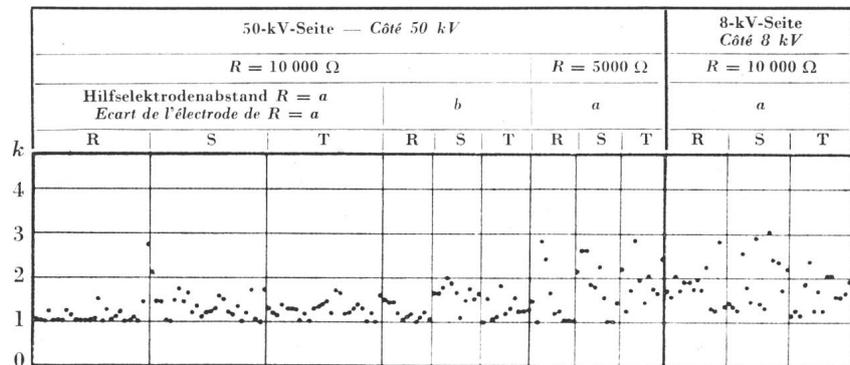
$m = 35$ sans résistance
 $m = 11...26$ avec résist.

$$k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$$

$$k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$$

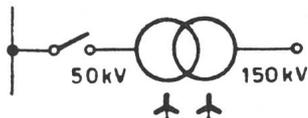
b) avec résistance

Fig. 8b



Mesures à Bottmingen, 50 kV

Fig. 9



A. Alimentation

$U_B = 46/53$ kV; $f = 50$ Hz
 Neutre isolé
 $P_{Ks} \approx 500$ MVA

B. Transformateur 1947

$P_n = 23,3$ MVA
 $\ddot{u} = \text{gradin } 15:56,7/167$ kV
 $\ddot{u} = \text{gradin } 1:45,2/167$ kV

Couplage: λ/λ

$I_\mu \approx 12$ A; $\varepsilon = 10\%$

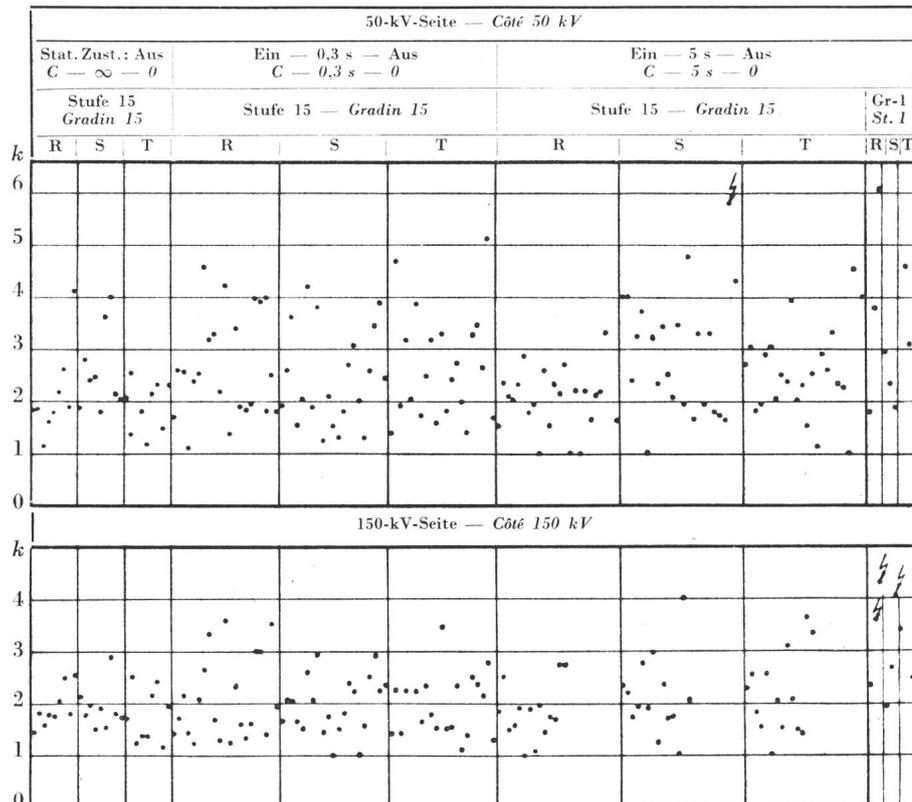
C. Disjoncteur 1940

Disj. orthoprojecteur
 $U_n = 60$ kV; $R = \text{---}$
 $P_{Ks} = 435$ MVA; $n = 1$

D. Surtensions $m = 3...24$

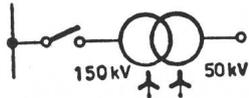
$$k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$$

$$k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$$

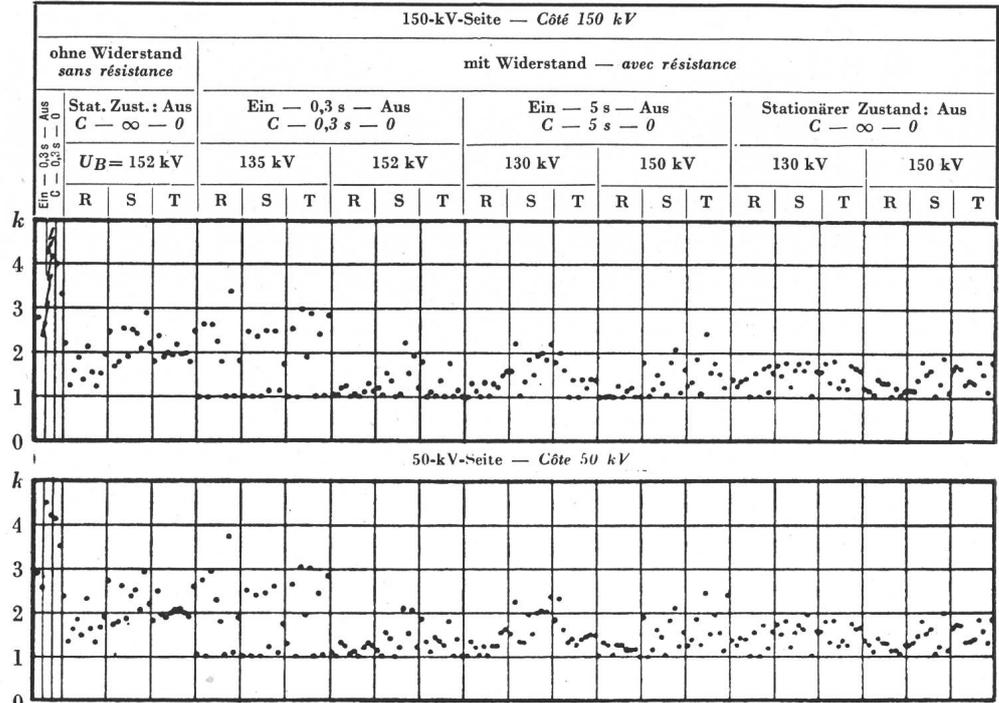


Mesures à Bottmingen, 150 kV

Fig. 10

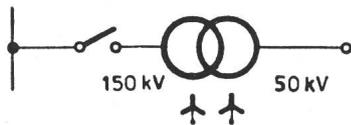


- A. Alimentation
 - $U_B \approx 130/150$ kV
 - $f = 50$ Hz
 - Neutre: bob. d'ext./isolé
 - $P_{Ks} \approx 750/200$ MVA
- B. Transformateur 1947
 - $P_n = 23,3$ MVA
 - Gradin 24: 167/64,1 kV
 - Gradin 23: 167/63,28 kV
 - Gradin 15: 167/56,7 kV
 - Couplage: \uparrow/\uparrow
 - $\varepsilon = 10\%$
 - $I_\mu \approx 4$ A (5,5%)
- C. Disjoncteur 1948
 - Disj. à air comprimé
 - $U_n = 150$ kV
 - $P_{Ks} = 2500/3500$ MVA
 - $n = 4$
 - $R = \infty$ /variable
 - $p = 15$ kg/cm²
- D. Surtensions
 - $m = 2...10$
 - $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
 - $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$

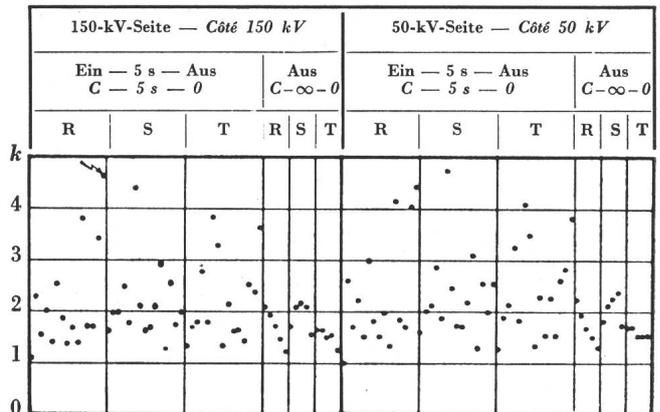


Mesures à Bottmingen, 150 kV

Fig. 11



- A. Alimentation
 - $U_B = 143/156$ kV
 - $f = 50$ Hz
 - Neutre: bobine d'ext.
 - $P_{Ks} \approx 750$ MVA
- B. Transformateur 1947
 - $P_n = 23,3$ MVA
 - $\ddot{u} =$ gradin 15: 167/56,7 kV
 - Couplage: \uparrow/\uparrow
 - $I_\mu \approx 4$ A; $\varepsilon = 10\%$
- C. Disjoncteur 1949
 - Disj. à f. vol. d'huile
 - $U_n = 150$ kV
 - $P_{Ks} = 1500$ MVA
 - $n = 1$; $R = -$
- D. Surtensions
 - $m = 5...15$
 - $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
 - $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$



de transformateurs à vide apparaissent toujours aux bornes de ceux-ci, après leur séparation du réseau. Par contre, les plus grandes surtensions peuvent apparaître au transformateur lui-même, dans les cas spéciaux où la ligne est alimentée par un transformateur individuel, sans mise à la terre du point neutre. Ces surtensions varient entre 1 et 4,5 fois la tension de phase. Les surtensions à la ligne déclenchée sont nettement plus faible qu'aux transformateurs déclenchés; comme le montre la figure 25, elles ne dépassent pas 1 à 2,5 fois la tension de phase. Ces différences sont compréhensibles, car le processus physique de déclenchement de transformateurs est tout à fait différent de celui de lignes. Ces deux cas doivent donc être considérés séparément.

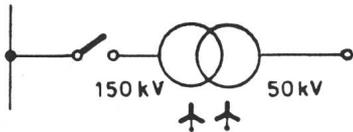
a) Les surtensions de déclenchement de transformateurs à vide ou, d'une manière générale, lors de la

coupe de faibles courants inductifs, sont dues à la rupture prématurée de l'arc instable du disjoncteur, avant le passage stationnaire du courant par zéro. Sans compter les caractéristiques des parties de réseau de part et d'autre du disjoncteur (transformateur, bobines d'inductance, etc.), la grandeur des surtensions dépend du mode de régénération diélectrique de l'espace entre contacts, durant la succession rapide de réamorçages dans le disjoncteur, sans laquelle la surtension dans le transformateur atteindrait des valeurs inadmissibles [1]¹⁾. A cet égard, cette rapide succession de réamorçages est très utile, puisque cela limite les surtensions. On peut d'ailleurs toujours considérer la surtension dans un transformateur comme étant composée de la tension du réseau à laquelle vient s'ajouter ou se soustraire la tension entre contacts du disjoncteur.

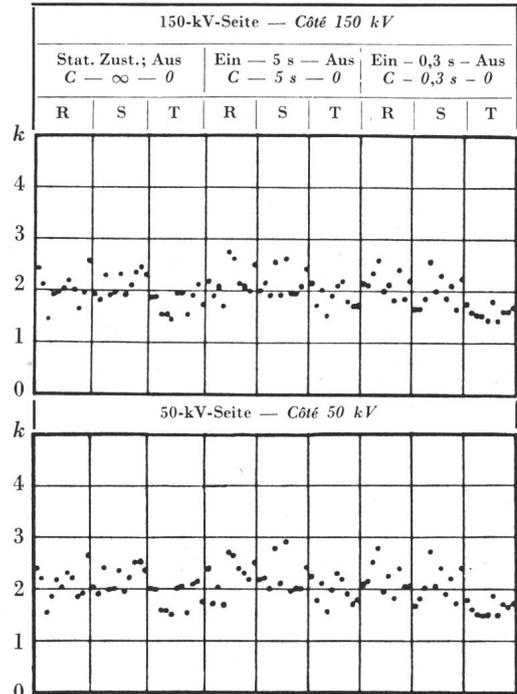
¹⁾ Voir la bibliographie à la fin de ce rapport.

Mesures à Bottmingen, 150 kV

Fig. 12

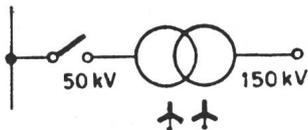


- A. Alimentation
 - $U_B = 150 \text{ kV}; f = 50 \text{ Hz}$
 - Neutre: bobine d'ext.
 - $P_{Ks} \approx 750 \text{ MVA}$
- B. Transformateur 1947
 - $P_n = 23,3 \text{ MVA}$
 - $\ddot{u} = \text{Gradin 15:}$
 $167/56,7 \text{ kV}$
 - Couplage: $\updownarrow/\updownarrow$
 - $I_\mu \approx 4 \text{ A}; \varepsilon = 10 \%$
- C. Disjoncteur 1949
 - Disj. à f. vol. d'huile
 - $U_n = 150 \text{ kV}$
 - $P_{Ks} = 1500 \text{ MVA}$
 - $n = 1$
 - $R = 10000 \Omega$
- D. Surtensions
 - $m = 10 \dots 11$
 - $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
 - $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$

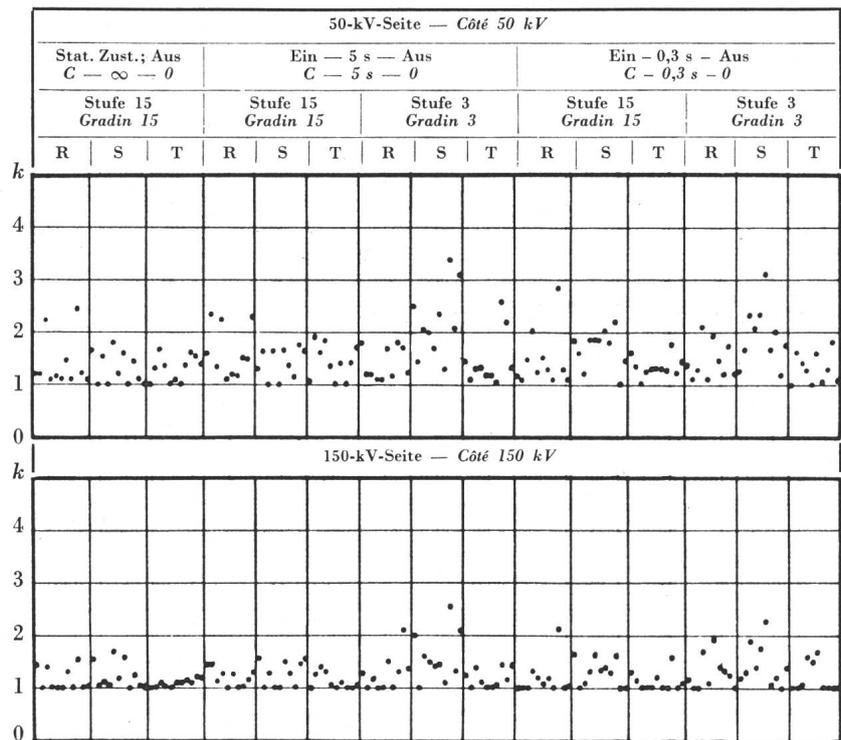


Mesures à Bottmingen, 50 kV

Fig. 13



- A. Alimentation
 - $U_B = 47 \text{ kV}; f = 50 \text{ Hz}$
 - Neutre isolé
 - $P_{Ks} \approx 500 \text{ MVA}$
- B. Transformateur 1947
 - $P_n = 23,3 \text{ MVA}$
 - $\ddot{u} = \text{Gradin 15: } 56,7/167 \text{ kV}$
 - $\ddot{u} = \text{Gradin 3: } 46,8/167 \text{ kV}$
 - Couplage: $\updownarrow/\updownarrow$
 - $I_u \approx 12 \text{ A}; \varepsilon = 10 \%$
- C. Disjoncteur 1952
 - Disj. orthoprojecteur
 - $U_n = 60 \text{ kV}$
 - $P_{Ks} = 435 \text{ MVA}; n = 1$
 - $R = 2000 \Omega$
- D. Surtensions
 - $m = 10 \dots 11$
 - $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
 - $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$



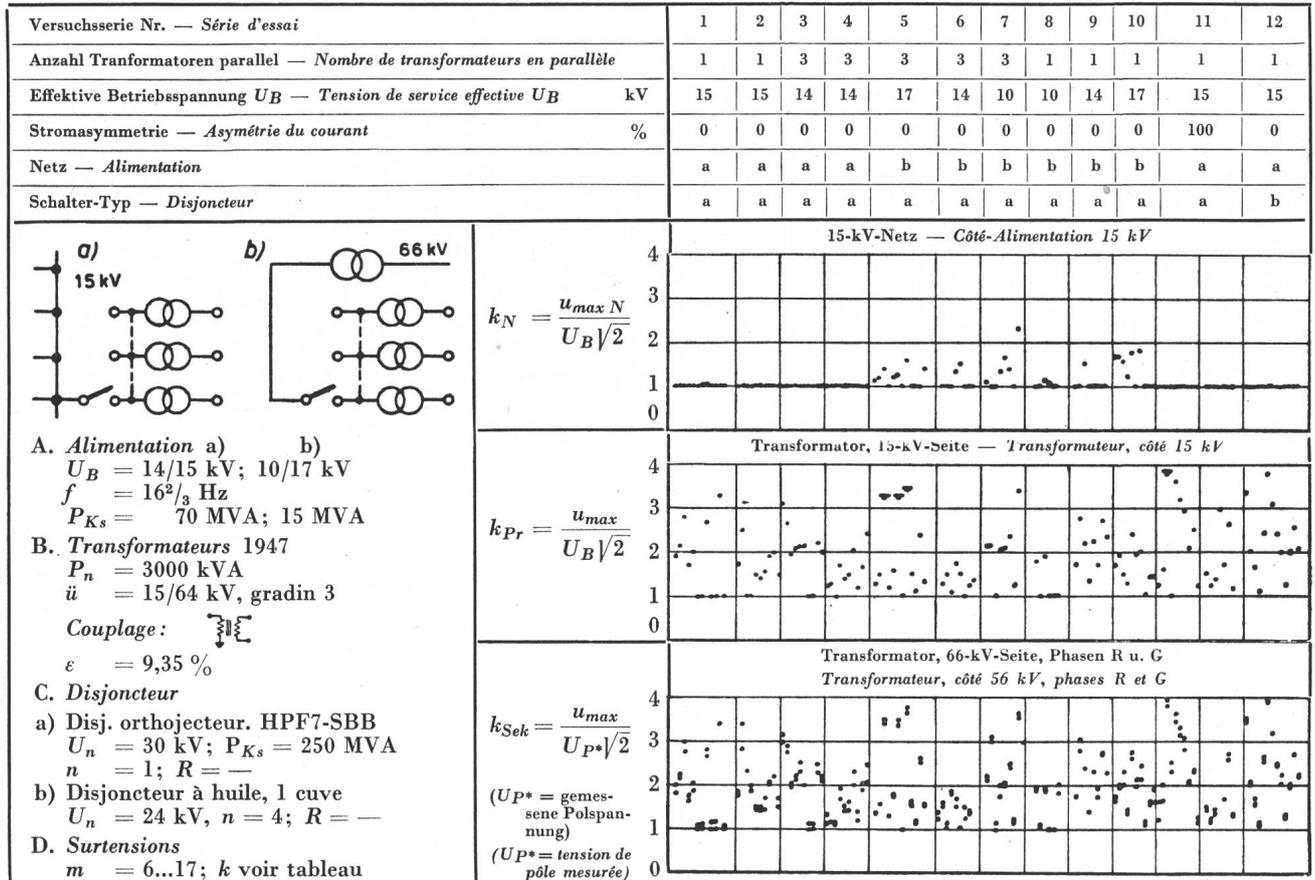
Lorsque le réseau d'alimentation est très puissant, la surtension au transformateur est limitée par la tension maximum qui peut se présenter entre contacts du disjoncteur, c'est-à-dire soit la tension de réamorçage du disjoncteur, soit la tension résiduelle aux résistances de shuntage. Dans le cas d'un réseau souple, non rigide, la tension du réseau d'alimentation peut, elle aussi, s'écarter légèrement de sa forme normale, par suite de ces réamorçages, de sorte que ce réseau exerce une certaine influence sur la valeur

de la surtension au transformateur [2; 3]. Il ne s'agit alors pas uniquement d'un problème de disjoncteur, mais d'un problème complexe concernant à la fois le disjoncteur et le réseau.

Pour le disjoncteur, il faut en outre tenir compte du fait qu'il doit déclencher non seulement de faibles courants inductifs, mais aussi d'intenses courants de court-circuit ou des lignes ouvertes ou encore des réseaux se trouvant en opposition de phase. Il en résulte des exigences qui sont en contradiction avec

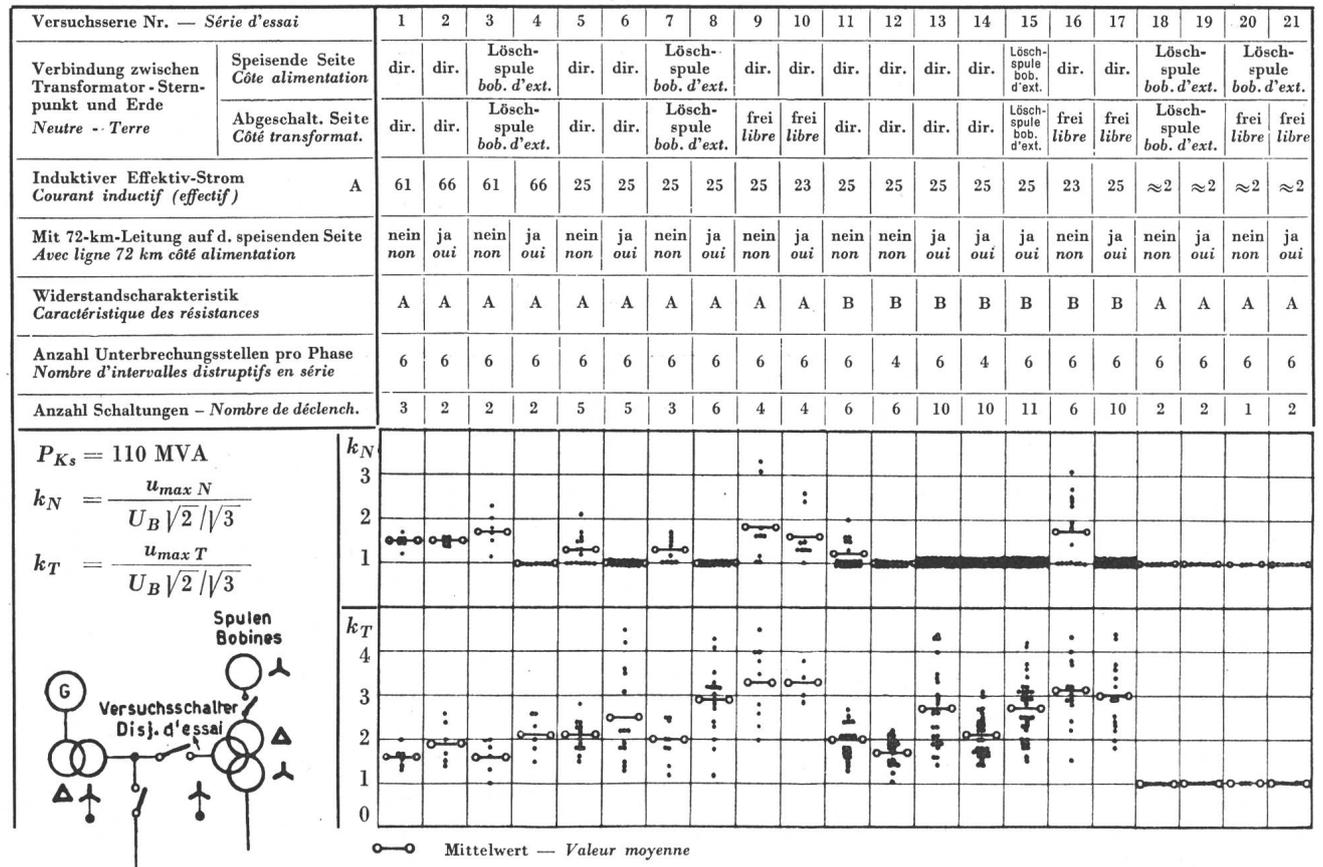
Mesures à Grütze, 15 kV

Fig. 14



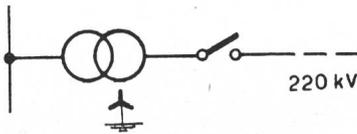
Mesures à Stadsforsen, 220 kV

Fig. 15



Mesures à Fontenay, lignes 220 kV

Fig. 21



A. Alimentation

$U_B = 220 \text{ kV}; f = 50 \text{ Hz}$
Neutre à terre

B. Lignes

$L = 18, 214, 420 \text{ km}$
 $I_c = 8,5, 63, 102 \text{ A}$

C. Disjoncteur

Disj. orthoprojecteur
HPF-14
 $U_n = 220 \text{ kV}$
 $P_{Ks} = 5000 \text{ MVA}$
 $n = 1; R = -$

D. Surtensions

$m = 1...14$
 $k_L = \frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$
 $k_N = \frac{u_{max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$

I_c A	8,5	63	102
Länge km Longueur km	18	214	420
k_L	4		
	3		
	2		
	1	•••••	•••••
	0		
k_N	4		
	3		
	2		
	1	•••••	•••••
	0		

Mesures à St. Johann, ligne 110 kV St. Johann-Mallnitz

Fig. 22

A. Alimentation

$U_B = 110 \text{ kV}$
 $f = 16^{2/3} \text{ Hz}$
Bobine d'ext.

B. Lignes

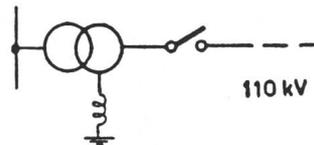
St. Johann-Mallnitz
 $L = 35,2 \text{ km}$
ligne aérienne
+ 15,7 km câble
 $I_c = 60...78 \text{ A}$

C. Disjoncteur

Disj. orthoprojecteur, HPF 11
 $U_n = 110 \text{ kV}$
 $f = 16^{2/3} \text{ Hz}$
 $n = 1 R = -$

D. Surtensions

$m = 8$
 $k_L = \frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$



k	Phase	Phase
	II	V
2		
1	•••••	•••••
0		

Mesures à Stadsforsen, lignes 220 kV

Fig. 23

Verbindung zwischen Transformator-Sternpunkt und Erde Neutre — Terre	direkt direct	über Löschspule par bobine d'extinction	über Löschspule par bobine d'extinction	direkt direct	direkt direct	über Löschspule par bobine d'extinction	über Löschspule par bobine d'extinction	über Löschspule par bobine d'extinction
Mit Serie-Kondensator 31000 kVA ungefähr Mitte Leitung — Avec condensateur 31000 kVA en série env. au milieu de la ligne	nein non	nein non	nein non	nein non	ja oui	ja oui	ja oui	nein non
Leitungslänge — Longueur de la ligne km	72	72	72	480	480	480	480	480
Mit Erdschluss einer Phase Avec mise à terre d'une phase	nein non	nein non	ja oui	nein non	nein non	nein non	ja oui	ja oui
Effektiver Strom — Courant (eff.) A	27	27	36/0	190	190	190	280/0	280/0
Anzahl Schaltungen — Nombre de déclenchements	4	4	4	4	3	1	2	2

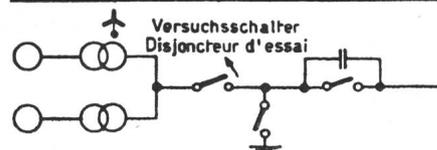
A. Alimentation	k_N	$\frac{u_{max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{max N}}{U_B \sqrt{2}}$	$\frac{u_{max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{max N}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{max N}}{U_B \sqrt{2}}$	$\frac{u_{max N}}{U_B \sqrt{2}}$
		3							
B. Lignes	k_L	$\frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2}}$	$\frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	$\frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2}}$	$\frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2}}$
		3							

A. Alimentation
 $U_B = 220 \text{ kV}; f = 50 \text{ Hz}$
Neutre à terre
par bobine d'extinction
 $P_{Ks} = 320 \text{ MVA}$
2 Transformatoren à 50 MVA
9,8/230 kV

B. Lignes
 $L = 72; 480 \text{ km}$
 $I_c = 27; 190 \text{ A}$
sans mise à terre
36/0; 280/0
avec mise à terre

C. Disjoncteur 1951
Disj. à air comprimé, DCVF
 $U_n = 220 \text{ kV}$
 $P_{Ks} = 5000 \text{ MVA}; n = 6$
 $p = 15 \text{ kg/cm}^2; R \text{ variable}$

D. Surtensions
 $m = 1...4$
 k_N et k_L : voir tableau



$U_B = 220 \text{ kV}$
—○—○— Mittelwert
Valeur moyenne
● Maximalwert — Valeur maximum

Fig.	Lieu	Caractéristiques du réseau				Disjoncteurs				Transformateurs				Déclenchements				Surtensions				Schéma	
		Réseau	Point neutre mis à terre isolé	Av. ligne 72 km, côté alimentat.	Fréquence Hz	Puissance de court-circuit MVA	Tension nominale kV	Type	Résistance en Ω	Puissance de coupure MVA	Année de construct.	Puissance nominale MVA	Avec bobines	ϵ %	α	Tension de service kV	Courant à vide Aeff.	Nombre de déclenchements	Cycle de déclenchements	Facteur côté ligne	max. de surtension côté transformateur prim. second.		Représentation graphique
1	Siebnen	AKW/NOK	Bobine d'extinction	50	1500	50	à grand vol.d'huile	1100	1000	1925	16,5		10,5	141/50,4	50	11	20	C-∞-0	3,60	2,80			
2						150			1500						145	4	20		2,12	1,50			
3	Bickigen	BKW	direct	50	1500	150	à grand vol.d'huile		1500	1930	3x15		11,9	141/48,1	140	5	6	C-∞-0	2,09	1,90			
4			isolé		1000	45	orthoprojecteur		1000	1940			9,7/11,9		46	15,5	13		3,28	2,80			
5																			2,40	2,40			
6	Laufenburg	ATEL	Bobine d'extinction isolé	50	500	50	à air comprimé		600	1946	5,75		3,43	48,2/6,3	48	3	13	C-∞-0	2,85	4,50			
7						11			700						6,2	24	9		4,66	3,65			
8	Rempen	AKW	Bobine d'extinction	50	500/200	60	orthoprojecteur		750	1940	16,5		9,3	50/88,88	50	6,7	35	C-∞-0	4,42	7,05			
9	Bottmingen	ATEL	isolé	50	500	60	orthoprojecteur		435	1940	23,3		10	167/45,56	46/53	12	9	C-∞-0	4,15	2,88			
10			Bobine d'extinction		750/200	150	à air comprimé		2500	1948					150	4	10	C-0,3 s-0	5,15	3,60			
11					750		Résistance variable		3500								20	C-∞-0	6,05	4,34			
12							à faible vol.d'huile		1500	1949						5	15	C-5 s-0	2,90	2,95			
13			isolé		500	60	Orthoprojecteur	10000	2000	435	1952				47	12	11	C-0,3 s-0	4,30	4,50			
14	Grüze	CFP		16 ² /3	70/15	30	Orthoprojecteur		250		3		9,35	64/15	10/17		63		3,80	3,95			
15	Stadsforsen	Kungliga Vattenfallsstyrelsen	direct Bobine d'extinction direct Bobine d'extinction libre Bobine d'extinction libre	50	110	220	à air comprimé	Résistance variable	5000	1951	60	3x9,8 kV; 10 MVA 1x9,8 kV; 10 MVA Transformateur seul	21,4 (9,8/220 kV)	8,8/132/220	220	61	3	C-∞-0	1,70	2,00			
			non													66	2		1,60	2,60			
			non													61	2		2,30	2,00			
			oui													66	5		1,00	2,60			
			non													25	5		2,10	2,80			
			oui														3		1,05	4,50			
			non														6		1,70	2,50			
			oui														23	4	3,30	4,50			
			non														25	5	2,60	3,80			
			oui														2		1,00	1,00			
			non														1						
			oui														2						

Fig.	Caractéristiques du réseau				Disjoncteurs			Trans- formateurs d'alimen- tation	Ligne à vide			Nombre de dé- clenche- ments	Facteur max. de surtension k		Représentation graphique: ● côté alimentation ▲ côté ligne	Schéma de principe			
	Lieu	Réseau	Point neutre mis à terre isolé	Fré- quence Hz	Puissance de court- circuit MVA	Tension nominale kV	Type		Résistance en Ω	Puissance de coupure MVA	Année de construction		Tension de service kV	Longueur km			Courant à vide A	côté alimen- tation	côté ligne
16	Stebnen	Ligne Töss Grynau	isolé	50		150	à grand volume d'huile	—	600	1925	16,5 MVA 50/150 kV	140	48 8	7 14	2,8 4,5	2,2 2,3			
17	Bickligen	Ligne Berne	direct	50		150	à grand volume d'huile orthojecteur	—	800 1500	1930 1940	3 x 15 MVA 50/150 kV	138	24,5	6 11	2,3 —	2,3 2,4			
18	Coulee Dam		direct	60	6800	220	à air comprimé	Résistance variable	6000	1951		235/√3	160	62 115 156	4	1,0			
19	Fontenay		direct	50	2000	220	à air comprimé	avec et sans résistance en Ω	3500/5000	1945/1950		220	136 314 474 828	45 116 195 412	4 2	1,1 1,2 1,3 1,6			
20	Fallou		direct	50	2000	220	à faible volume d'huile	—	5000			220	19,5 143 240	8 55 92	2 7 3	2,2 2,1 2,0			
21	Fontenay		direct	50		220	orthojecteur	—	5000			220	18 214 420	8,5 63 102	1 9 14	— 1,65 1,85	1,10 1,80 2,05		
22	St. Johann	Ligne Mallnitz	Bobine d'extinction	16 ² /3		110	orthojecteur	—				110	35,7 ligne + 15,7 câble	60...78	8	1,6			
23	Stadsforsen		direct Bobine d'extinction	50	320	220	à air comprimé	Résistance variable	5000	1951	60 MVA 9,8/132/220 kV	220	72	27	4	1,0 1,9 1,4	1,1 1,0 1,2		
			direct Bobine d'extinction										480	190	3	1,3 1,2	1,2		
													280/0	2	2,0	2,0			

1) conducteur de 160 km, essais monophasés
 2) conducteurs de 160 km, essais monophasés
 3) conducteurs de 160 km, essais monophasés

(⁴ $k = \frac{I_{max}}{220/\sqrt{2}}$; avec une phase mise à la terre

5) avec conducteurs en série au milieu de la ligne
 6) avec conducteur en série au milieu de la ligne, avec une phase mise à terre
 7) sans conducteur en série au milieu de la ligne, avec une phase mise à terre

Légende de la représentation graphique:
 valeur minimum valeur maximum
 moyenne arithmétique

une rapide régénération diélectrique de l'espace entre contacts [4; 5]. Ainsi donc, si les disjoncteurs sont construits pour satisfaire à *une* exigence, il se peut qu'ils répondent moins bien à d'autres exigences, qui ont peut-être autant d'importance pour l'exploitation. Un exemple en est donné plus loin, sous b), lors du déclenchement de lignes ouvertes. Alors que dans ce cas la limitation de la valeur des surtensions s'obtient principalement en *évitant* des réamorçages, c'est-à-dire en cherchant à obtenir une régénération diélectrique aussi rapide que possible de l'espace entre contacts, c'est exactement le contraire qui est nécessaire lors du déclenchement de transformateurs à vide.

Pour cette raison, il faut tolérer une certaine marge de surtensions. L'essentiel est qu'elles n'atteignent pas une valeur inadmissible. Ces surtensions peuvent être ramenées à des valeurs non dangereuses à l'aide de résistance dans le disjoncteur, dans les cas où un disjoncteur sans résistance permettrait aux surtensions d'atteindre des valeurs trop élevées au transformateur à vide. Les mesures ont montré que les surtensions les plus dangereuses se présentent lors du déclenchement de courants inductifs d'une intensité efficace de l'ordre de 5 à 40 A. Du fait que les courants de coupure dans le disjoncteur ne dépassent pas certaines limites, cela permet également de limiter les surtensions de déclenchement à vide par des parafoudres ordinaires, branchés entre le transformateur et la terre. En ce qui concerne l'énergie du champ magnétique du transformateur, qu'ils doivent absorber, ces parafoudres ne sont pas sollicités plus fortement que par l'énergie qu'ils sont capables d'absorber lors du fonctionnement dû à des surtensions d'origine atmosphérique.

b) Les surtensions de déclenchement de lignes ouvertes sont dues aux oscillations qui se produisent entre le réseau d'alimentation et la ligne ouverte, au moment des réamorçages dans le disjoncteur. L'amplitude de ces oscillations est donnée par la différence des tensions de part et d'autre du disjoncteur au moment d'un réamorçage. L'une de ces tensions est celle du réseau d'alimentation, l'autre celle de la capacité encore chargée de la ligne. Cette différence de tension atteint chaque fois son maximum une demi-période après un passage par zéro du courant de charge stationnaire. L'allure de la régénération diélectrique entre contacts du disjoncteur doit être telle, que cette séquence particulière de réamorçages soit très improbable ou qu'il ne se produise pas du tout de réamorçage. Les mesures ont montré que ces conditions sont généralement satisfaites. Pour tous les disjoncteurs suisses essayés et pour toutes les longueurs de lignes, même très grandes, les surtensions mesurées ont toujours été modestes. Or, c'est la valeur de ces surtensions qui importe, et non pas le nombre de réamorçages.

Par rapport aux surtensions de déclenchement de faibles courants inductifs, les surtensions de déclenchement de lignes ouvertes sont dans tous les cas beaucoup moins élevées. Pour les séries de mesures en question, elles n'étaient jamais dangereuses.

c) En ce qui concerne les essais mentionnés sous a) et b), il ne faut pas oublier que, pour toutes les

surtensions de déclenchement, la dispersion, et par conséquent la probabilité de la présence de valeurs élevées, jouent un grand rôle. Il s'agit là d'un *problème de statistique*. Les surtensions sont d'autant plus rares, qu'elles sont plus élevées. C'est pourquoi le nombre de mesures exécutées pour une même disposition joue un rôle considérable au point de vue de la valeur maximum des surtensions mesurées: plus les mesures sont nombreuses, plus la surtension maximum mesurée d'une série quelconque de mesures sera élevée [6].

En outre, en ce qui concerne les surtensions de déclenchement de transformateurs à vide, lors des séries de mesures sous a), il y a lieu de remarquer que les essais mentionnés concernaient en partie des installations dans lesquelles des surtensions ou des court-circuits dus à des surtensions avaient déjà été observés en service. Il se peut qu'il y ait de nombreux endroits où les surtensions de déclenchement sont plus faibles que dans les installations qui ont fait l'objet de ces mesures. Une généralisation des résultats exige donc, ici aussi, une certaine prudence.

Enfin, nous attirons l'attention sur le fait que les figures 1 à 25 indiquent uniquement la *valeur des surtensions*, mais non la *raideur* des variations de tension. Cette raideur dépend avant tout de la grandeur du saut de tension (Δu) et de la constante de temps ou du temps propre du circuit de choc au voisinage immédiat du disjoncteur (capacité du transformateur et de ses lignes d'amenée, distance jusqu'à la terre du point neutre, etc.). En revanche, la raideur de la variation de tension n'est guère influencée par le disjoncteur lui-même, du moins lorsque celui-ci ne renferme pas de résistances.

Bibliographie

- [1] Berger, K. et R. Pichard: Die Berechnung der beim Abschalten leerlaufender Transformatoren, insbesondere mit Schnellschaltern, entstehenden Überspannungen. Bull. ASE t. 35(1944), n° 20, p. 560...570.
- [2] Baltensperger, P.: Surtensions lors du déclenchement de faibles courants inductifs. CIGRE t. 2(1950), rap. 116.
- [3] Meyer, H.: Les problèmes fondamentaux que pose la construction des disjoncteurs. Revue Brown Boveri t. 37(1950), p. 108...122.
- [4] Vogelsanger, E.: Etude des courants et tensions maxima pouvant solliciter un disjoncteur dans un réseau monophasé ou polyphasé lors de la coupure de courts-circuits. CIGRE t. 1(1946), rap. 119.
- [5] Meyer, H.: Compte-rendu des essais sur réseau exécutés avec un nouveau type de disjoncteur pneumatique à très haute tension. CIGRE 1952, rap. 115.
- [6] Pichard, R.: Comparaison des surtensions survenant lors du déclenchement d'une ligne ouverte alimentée par un transformateur dont le neutre est isolé ou mis directement à la terre. CIGRE 1952, rap. 114.
- [7] Baltensperger, P.: Déclenchement d'un transformateur à vide par un disjoncteur pneumatique moderne Brown Boveri à 150 kV dans la sous-station de Bottmingen de l'ATEL. Revue Brown Boveri t. 39(1952), n° 8/9, p. 335...340.
- [8] Baltensperger, P.: Abschaltung leerlaufender Leitungen und kleiner induktiver Ströme mit einem modernen 220-kV-Brown Boveri Druckluftschalter im schwedischen Kraftwerk Stadforsen. Brown Boveri Mitt. Bd. 38(1951), Nr. 12, S. 391...410.
- [9] Killgore, C. L. et W. Wanger: Essais d'un disjoncteur pneumatique Brown Boveri à la centrale de Grand Coulee 230 kV, 10 000 MVA. CIGRE 1952, rap. 137.
- [10] Amstutz, A. et H. Meyer: Essais directs de disjoncteurs pneumatiques sur un réseau. Revue Brown Boveri t. 37(1950), n° 4/5, p. 136...143.

Adresse de l'auteur:

K. Berger, docteur, ingénieur, professeur, chef des essais de la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension, 301, Seefeldstrasse, Zurich 8.