

**Surtension**  
**de déclenchement de transformateurs**  
**à vide et de lignes ouvertes**

Par

**K. Berger, Zurich**

Extrait

du Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens

Année 1953, N° 9



## 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 suisse<sup>1)</sup>.

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.

<sup>1)</sup> 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.

$\varepsilon$  Tension de court-circuit, en %.

$I_{\mu}$  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 monophasé).

## 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
Siebner . . . . .	50	50	Disjoncteur à bain d'huile . . . . .	16,5	1
Siebner . . . . .	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 orthoprojecteur . . . . .	3 × 15	4
Bickigen . . . . .	50	50	Disjoncteur orthoprojecteur . . . . .	3 × 15	5
Laufenburg . . . . .	50	50	Disjoncteur pneumatique . . . . .	5,75	6
Laufenburg . . . . .	6	50	Disjoncteur pneumatique . . . . .	5,75	7
Rempen . . . . .	50	50	Disjoncteur orthoprojecteur . . . . .	16,5	8
Bottmingen . . . . .	50	50	Disjoncteur orthoprojecteur . . . . .	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 orthoprojecteur . . . . .	23,3	13
Grüze . . . . .	15	16 2/3	Disjoncteur orthoprojecteur 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
Siebner . . . . .	150	50	Disjoncteur à bain d'huile . . . . .	8 et 45	F	16
Bickigen . . . . .	150	50	Disjoncteur orthoprojecteur 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 orthoprojecteur . . . . .	18...420	F	21
St. Johann . . . . .	110	50	Disjoncteur orthoprojecteur . . . . .	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	$\overline{\bullet}$
$k_L = \frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$	Facteur de surtension côté ligne	} lors du déclenchement d'une ligne ouverte	}	$\text{⚡}$	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)			$\text{⚡}$	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**

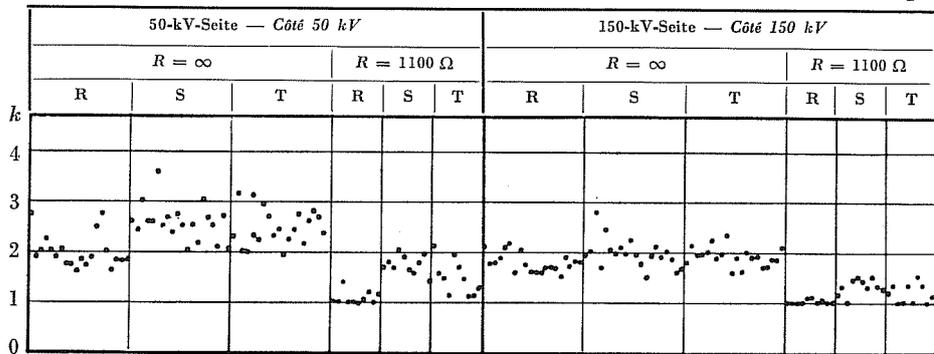
Les résultats des séries de mesures peuvent être groupés comme suit:

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



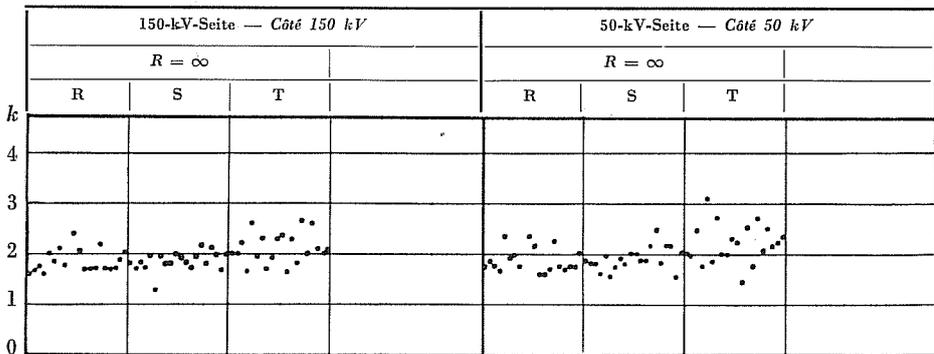
- D. Surtensions  
 $m = 20$   
 $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$   
 $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$



**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

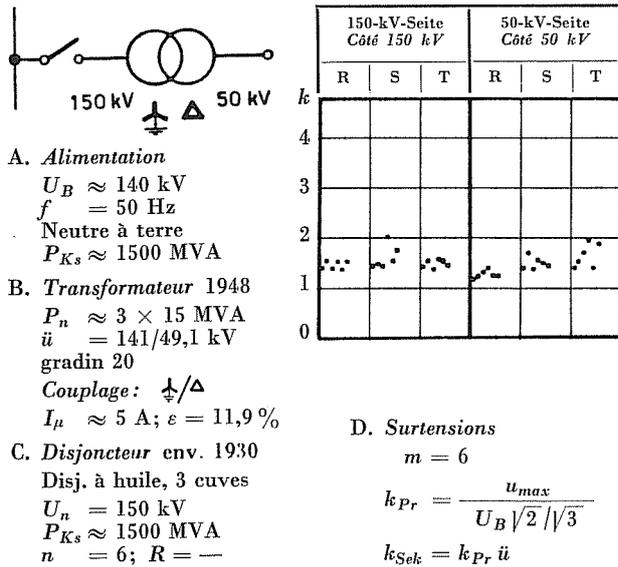


Fig. 3

Mesures à Bickigen, 150 kV

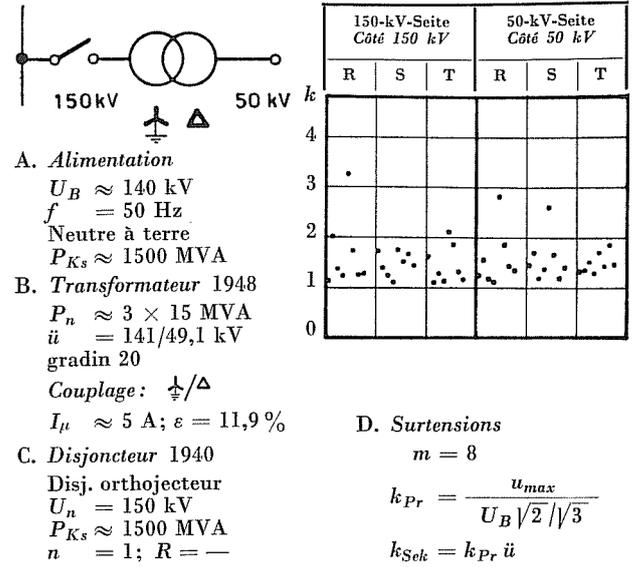


Fig. 4

Mesures à Bickigen, 50 kV

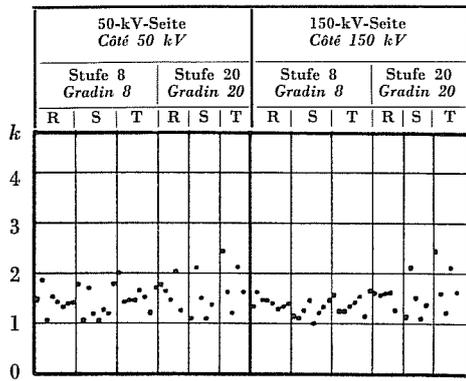
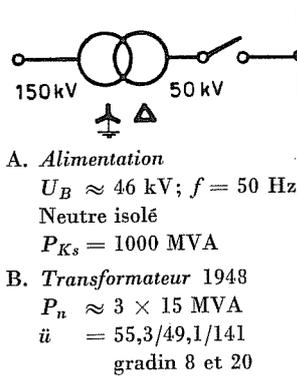


Fig. 5



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

Mesures à Laufenburg, 50 kV

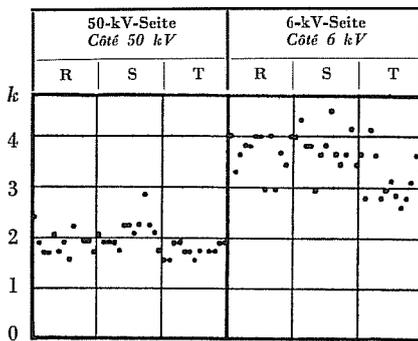
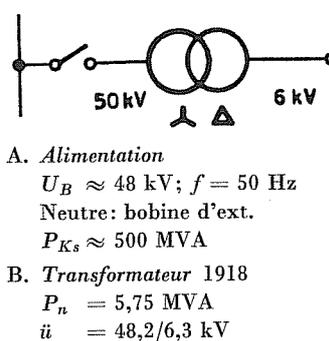


Fig. 6



Couplage:  $\frac{\Delta}{\Delta}$   
 $I_\mu \approx 3$  A;  $\varepsilon = 3,43\%$

Mesures à Laufenburg, 6 kV

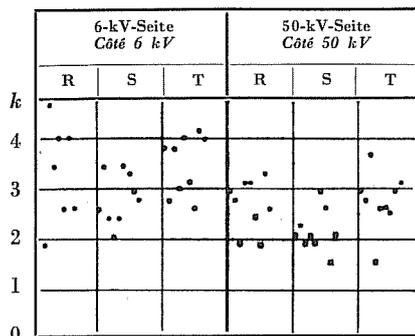
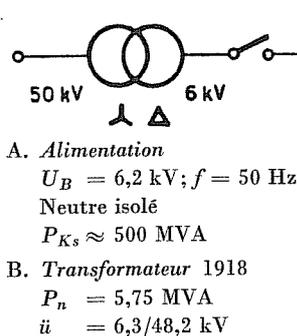


Fig. 7

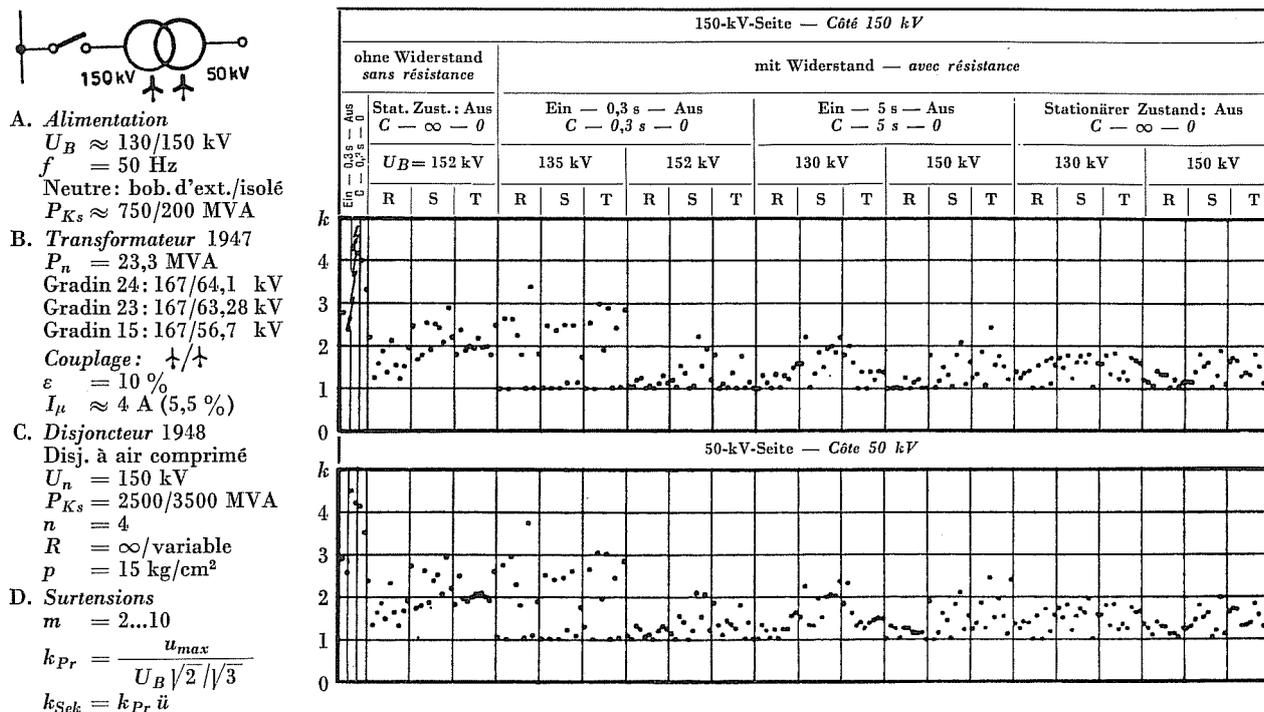


Couplage:  $\frac{\Delta}{\Delta}$   
 $I_\mu \approx 24$  A;  $\varepsilon = 3,43\%$



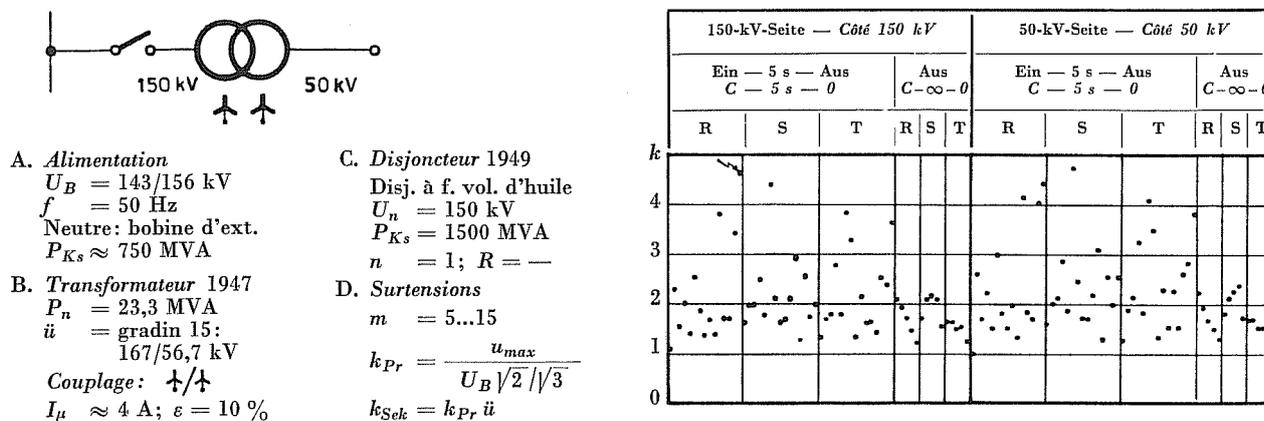
Mesures à Bottmingen, 150 kV

Fig. 10



Mesures à Bottmingen, 150 kV

Fig. 11



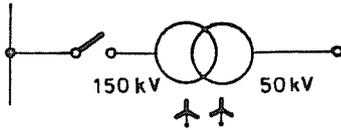
de transformateurs à vide apparaissent toujours aux bornes de ceux-ci, après leur séparation du réseau. Par contre, les plus grandes surtensions peuvent apparaître au transformateur lui-même, dans les cas spéciaux où la ligne est alimentée par un transformateur individuel, sans mise à la terre du point 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

coupure 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]<sup>1)</sup>. 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.

<sup>1)</sup> Voir la bibliographie à la fin de ce rapport.

Mesures à Bottmingen, 150 kV



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 kV

Couplage:  $\uparrow/\uparrow$

$I_\mu \approx 4 \text{ A}; \varepsilon = 10 \%$

C. Disjoncteur 1949

Disj. à f. vol. d'huile  
 $U_n = 150 \text{ kV}$   
 $P_{Ks} = 1500 \text{ MVA}$   
 $n = 1$   
 $R = 10000 \ \Omega$

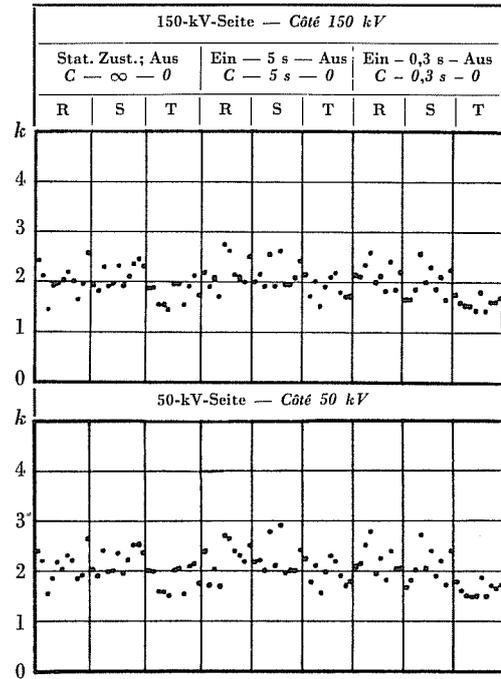
D. Surtensions

$m = 10...11$

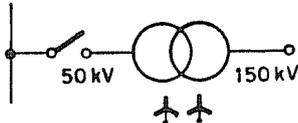
$$k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$$

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

Fig. 12



Mesures à Bottmingen, 50 kV



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:  $\uparrow/\uparrow$

$I_u \approx 12 \text{ A}; \varepsilon = 10 \%$

C. Disjoncteur 1952

Disj. orthojecteur  
 $U_n = 60 \text{ kV}$   
 $P_{Ks} = 435 \text{ MVA}; n = 1$   
 $R = 2000 \ \Omega$

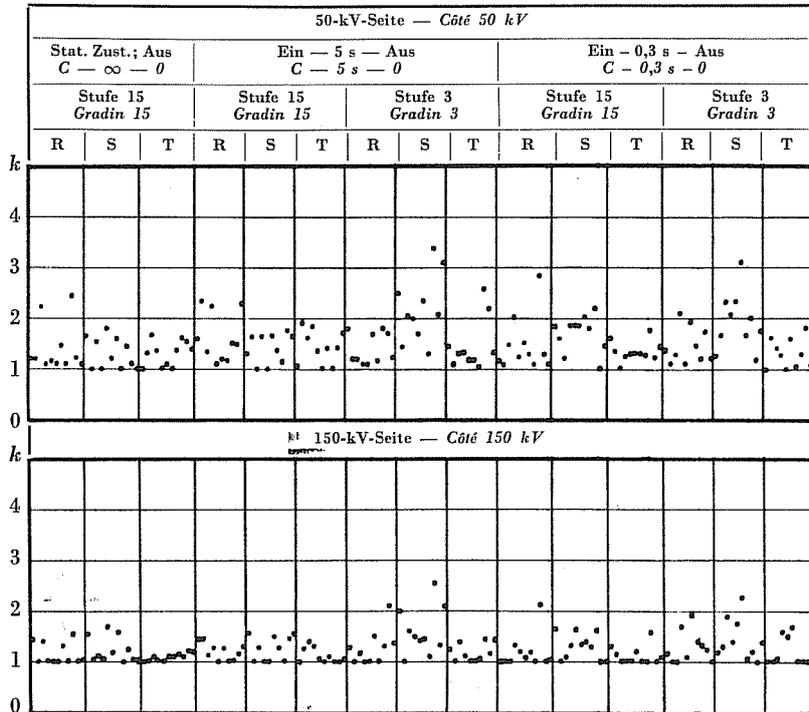
D. Surtensions

$m = 10...11$

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

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

Fig. 13



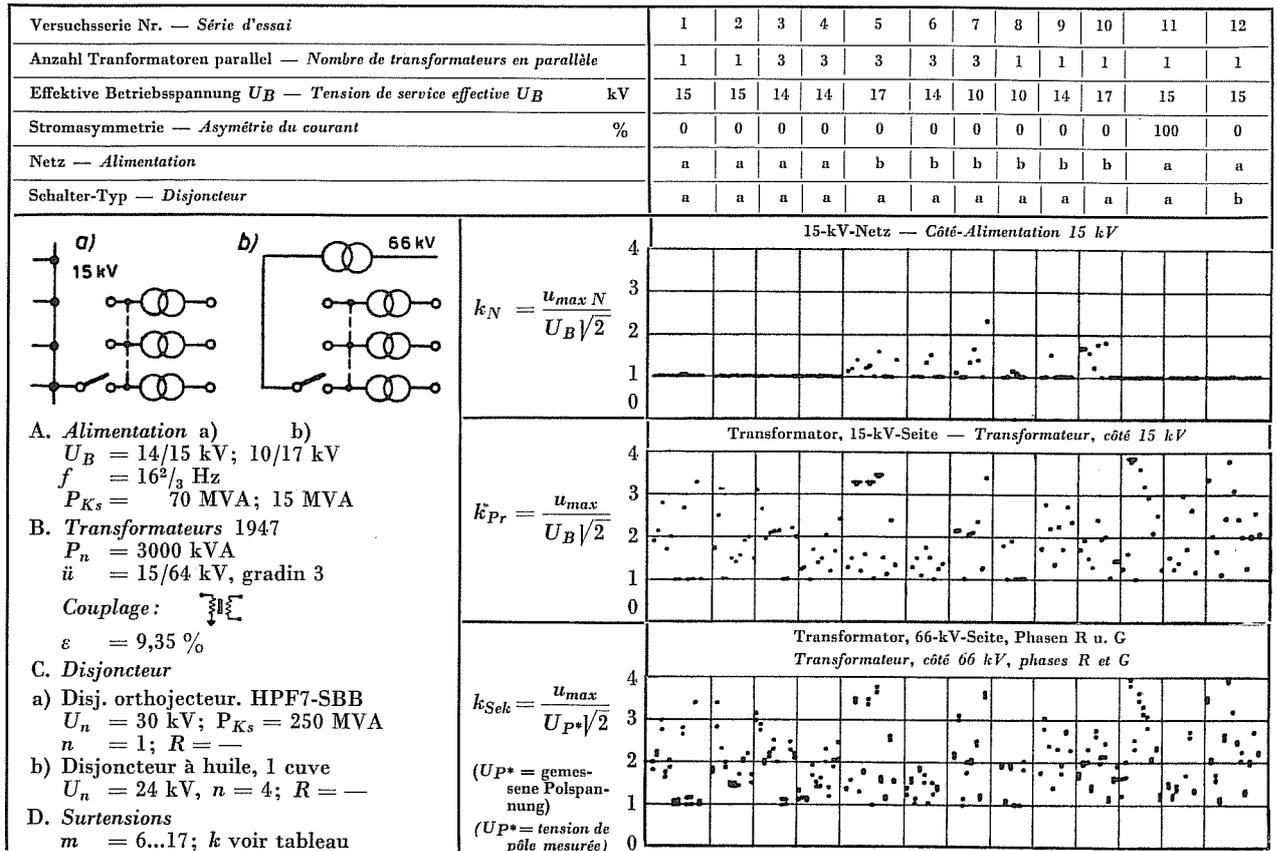
Lorsque le réseau d'alimentation est très puissant, la surtension au transformateur est limitée par la tension maximum qui peut se présenter entre contacts du disjoncteur, c'est-à-dire soit la tension de réamorçage du disjoncteur, soit la tension résiduelle aux résistances de shuntage. Dans le cas d'un 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

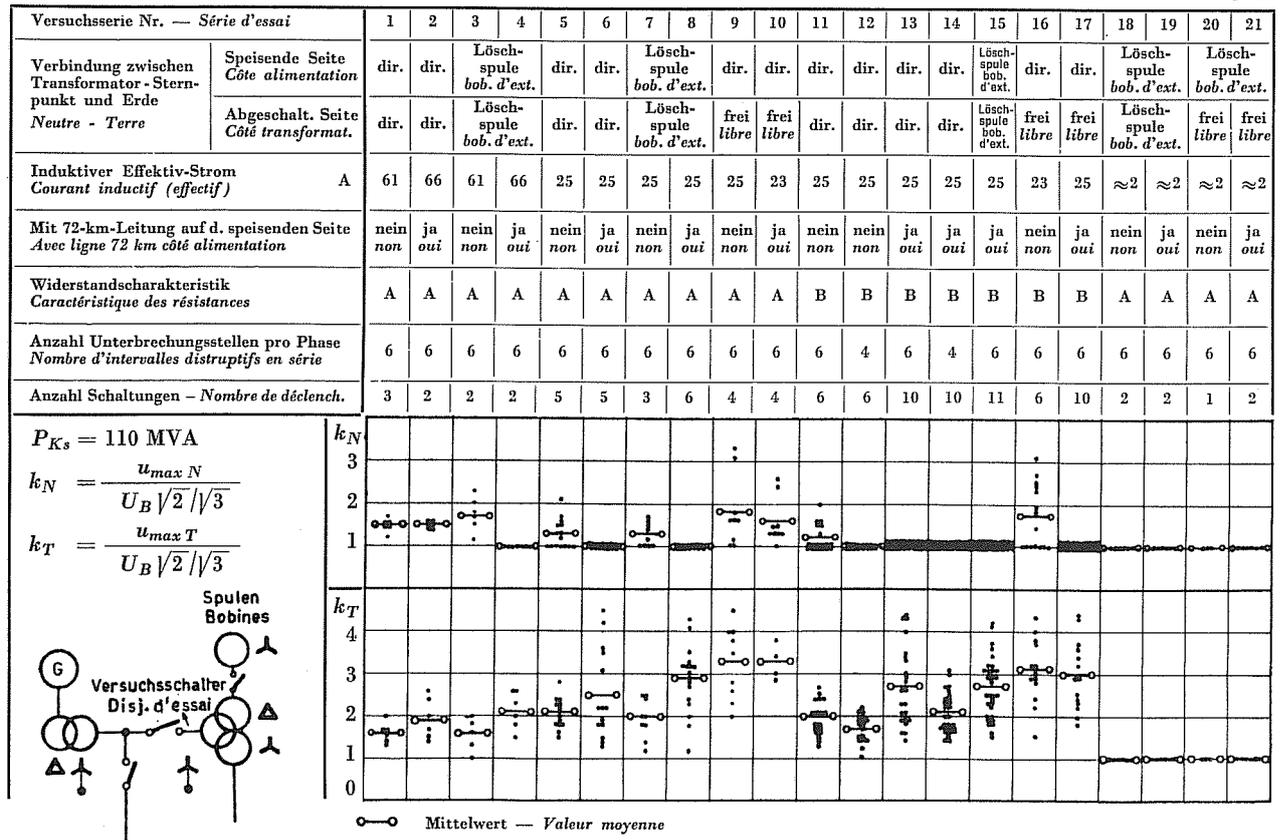
Mesures à Grütze, 15 kV

Fig. 14



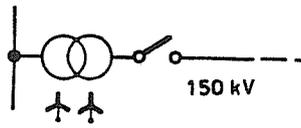
Mesures à Stadsforsen, 220 kV

Fig. 15



**Mesures à Siebnen, Ligne 150 kV, Siebnen-Grynau-Töss**

Fig. 16

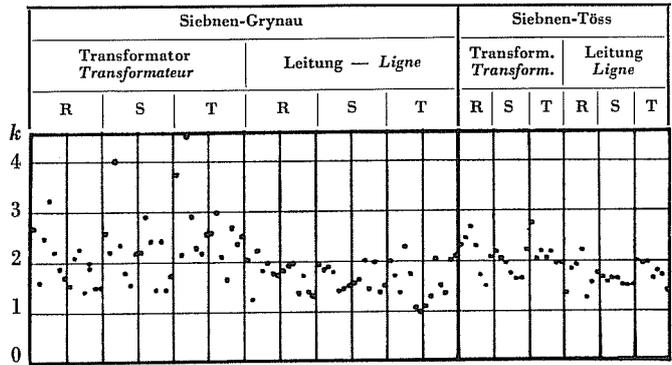


**A. Alimentation**  
 $U_B = 50 \text{ kV}$   
 $f = 50 \text{ Hz}$   
 Neutre 150 kV isolé  
 Trsf. 16,5 MVA  
 50/150 kV  
 $U_{BTr} = 140 \text{ kV}$

**B. Ligne**  
 Siebnen-Grynau 8 km  
 Siebnen-Töss 48 km

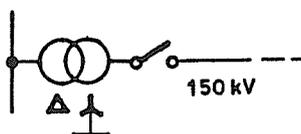
**C. Disjoncteur 1925**  
 Disj. à huile, 3 cuves  
 $U_n = 150 \text{ kV}$   
 $P_{Ks} = 600 \text{ MVA}$   
 $n = 2; R = -$

**D. Surtensions**  
 $m = 7$   
 $k_N = \frac{u_{max} N}{U_{BTr} \sqrt{2} / \sqrt{3}}$   
 $k_L = \frac{u_{max} L}{U_{BTr} \sqrt{2} / \sqrt{3}}$



**Mesures à Bickigen, ligne 150 kV, Bickigen-Berne**

Fig. 17



k	Öl-Kesselschalter Disj. à huile						Ölstrahl-Schalter Disj. orthojecteur							
	Trsf. Trsf.			Leitung Ligne			Leitung 150 kV Ligne 150 kV							
	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T		
3														
2														
1														
0														

**A. Alimentation**  
 $U_B = 50 \text{ kV}$   
 $f = 50 \text{ Hz}$   
 Neutre à terre  
 Trsf.  $3 \times 15 \text{ MVA}$   
 50/150 kV,  
 gradin 24  
 $U_{BTr} = 138 \text{ kV}$

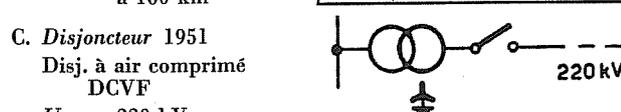
**B. Ligne**  
 Bickigen-Berne 24,5 km

**C. Disjoncteur**  
 a) Disj. à huile, env. 1930  
 $U_n = 150 \text{ kV}$   
 $P_{Ks} = 800 \text{ MVA}$   
 $n = 6; R = -$   
 b) Disj. orthoject. env. 1940  
 $U_n = 150 \text{ kV}$   
 $P_{Ks} = 1500 \text{ MVA}$   
 $n = 1; R = -$

**D. Surtensions**  
 $m = 4...11$   
 $k_N = \frac{u_{max} N}{U_{BTr} \sqrt{2} / \sqrt{3}}$   
 $k_L = \frac{u_{max} L}{U_{BTr} \sqrt{2} / \sqrt{3}}$

**Mesures à Grand Coulee, lignes 220 kV**

Fig. 18



Effekt. Phasen- span- nung Tension de phase (eff.) kV	Effekt. Lade- strom Courant de charge (eff.) A	Anzahl Rück- zündun- gen Nombre de réamor- çages	Über- span- nungs- faktor Facteur des sur- tensions
136	62	—	1
136	115	—	1
136	156	—	1

**A. Alimentation**  
 $U_B = 235 \text{ kV} / \sqrt{3}$   
 $f = 60 \text{ Hz}$   
 Neutre à terre  
 $P_{Ks} \approx 6800 \text{ MVA}$

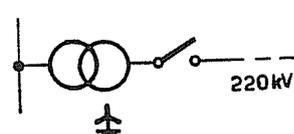
**B. Lignes**  
 $I_c = 62, 115, 156 \text{ A}$   
 1 2 3 cond.  
 à 160 km

**C. Disjoncteur 1951**  
 Disj. à air comprimé  
 DCVF  
 $U_n = 220 \text{ kV}$   
 $P_{Ks} = 6000 \text{ MVA}$   
 $n = 8$   
 $p = 15 \text{ kg/cm}^2$   
 R variable

**Surtensions**  
 $m = 4$   
 $k_L = \frac{u_{max} L}{U_B \sqrt{2}}$

**Mesures à Fontenay, lignes 220 kV**

Fig. 19



$I_c$ A	45	116	195	412				
	Länge km Longueur km	136	314	474	828			
Schalter Disjoncteur	DBF	DCVF	DCF	DBF	DCVF	DBF	DCVF	DCF
	2							
1								
0								

**A. Alimentation**  
 $U_B = 220 \text{ kV}; f = 50 \text{ Hz}$   
 Neutre à terre  
 $P_{Ks} = 2000 \text{ MVA}$

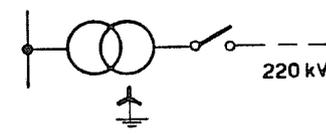
**B. Lignes**  
 $L = 136, 314, 474, 828 \text{ km}$   
 $I_c = 45, 116, 195, 412 \text{ A}$

**C. Disjoncteur 1945/50**  
 Disj. à air comprimé  
 DBF, DCVF, DCF  
 $U_n = 220 \text{ kV}$   
 $P_{Ks} = 3500/5000 \text{ MVA}$   
 $n = 6$   
 $p = 15 \text{ kg/cm}^2$   
 R = DBF et DCF:  
 sans résistance  
 R = DCVF: avec  
 résistance variable

**D. Surtensions**  
 $m = 1...2$   
 $k_L = \frac{u_{max} L}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$

**Mesures à Fallou, lignes 220 kV**

Fig. 20



$I_c$ A	8	55	92
	Länge km Longueur km	19,5	143
3			
2			
1			
0			

**A. Alimentation**  
 $U_B = 220 \text{ kV}$   
 $f = 50 \text{ Hz}$   
 Neutre à terre  
 $P_{Ks} \approx 2000 \text{ MVA}$

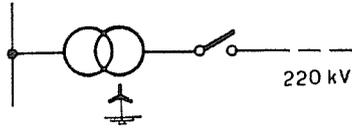
**B. Lignes**  
 $L = 19,5, 143, 240 \text{ km}$   
 $I_c = 8, 55, 92 \text{ A}$   
 $C_{Ph} = 0,19, 1,31, 2,25 \mu\text{F}$

**C. Disjoncteur**  
 Disj. à f. vol. d'huile,  
 TOF  
 $U_n = 220 \text{ kV}$   
 $P_{Ks} = 5000 \text{ MVA}$   
 $n = 1; R = -$

**D. Surtensions**  
 $m = 2...7$   
 $k_L = \frac{u_{max} L}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$

Mesures à Fontenay, lignes 220 kV

Fig. 21



A. Alimentation

$U_B = 220$  kV;  $f = 50$  Hz  
Neutre à terre

B. Lignes

$L = 18, 214, 420$  km  
 $I_c = 8,5, 63, 102$  A

C. Disjoncteur

Disj. orthojecteur  
HPF-14  
 $U_n = 220$  kV  
 $P_{Ks} = 5000$  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

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

B. Lignes

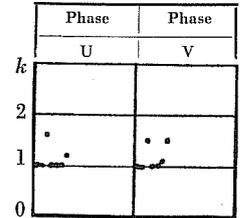
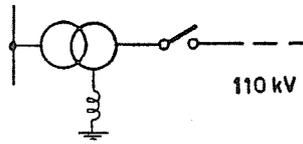
St. Johann-Mallnitz  
 $L = 35,2$  km  
ligne aérienne  
+ 15,7 km câble  
 $I_c = 60...78$  A

C. Disjoncteur

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

D. Surtensions

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



Mesures à Stadsforsen, lignes 220 kV

Fig. 23

Verbindung zwischen Transformator-Sternpunkt und Erde Neutre — Terre	direkt direct	über Löserspule par bobine d'extinction	über Löserspule par bobine d'extinction	direkt direct	direkt direct	über Löserspule par bobine d'extinction	über Löserspule par bobine d'extinction	über Löserspule 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

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

B. Lignes

$L = 72; 480$  km  
 $I_c = 27; 190$  A  
sans mise à terre  
36/0; 280/0  
avec mise à terre

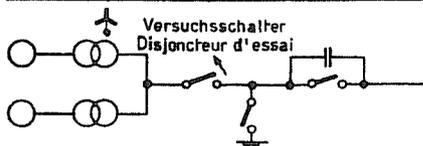
C. Disjoncteur 1951

Disj. à air comprimé, DCVF  
 $U_n = 220$  kV  
 $P_{Ks} = 5000$  MVA;  $n = 6$   
 $p = 15$  kg/cm<sup>2</sup>;  $R$  variable

D. Surtensions

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

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



$U_B = 220$  kV

—○—○— Mittelwert  
Valeur moyenne

● Maximalwert — Valeur maximum

**Surtections lors de déclenchements à vide de transformateurs**

Fig. 24

Fig.	Lieu	Caractéristiques du réseau			Disjoncteurs			Transformateurs			Déclenchements			Surtections		Schéma						
		Réseau	Point neutre mis à terre isolé	Av. ligne 72 km, côté alimentat.	Fréquence Hz	Puissance de court-circuit MVA	Tension no. min. kv	Type	Résistance en $\Omega$	Puissance coupure MVA	Année de construct.	Puissance nominale MVA	Avec bobines	$\epsilon$	$\mu$		Tension de service kv	Courant à vide Aeff. $\sim$	Nombre de cycles de déclenchements	Cycle de déclenchements	Facteur max. de surtension côté transformateur prim. / second.	Représentation graphique
1	Slebner	AKW/NOK	Bobine d'extinction		50	1500	à grand vol. d'huile	1100	1000	1925	16,5		10,5	141/89,4	50	11	20	C-∞-0		3,60 / 2,80		
2																				2,12 / 1,50		
3	Bickl-	BKW	direct		50	1500	à grand vol. d'huile		1500	1930	8x15		11,9	141/89,1	140	5	6	C-∞-0		2,09 / 1,90		
4	gen		isolé			1000	ortho-jecteur			1940			9,7/11,9		46	8			3,28 / 2,80			
5									1000						46	13			2,40 / 2,40			
6	Laufen-	ATEL	Bobine d'extinction		50	500	à air comprimé		600	1946	5,75		3,43	48,2/6,3	48	3	13	C-∞-0		2,85 / 4,50		
7	burg		isolé			200	ortho-jecteur		700				9,3	50/8,8, 9,6	6,2	24	9		4,66 / 3,65			
8	Rempen	AKW	Bobine d'extinction		50	500/200	ortho-jecteur	5000/10000	750	1940	16,5				50	6,7	35	C-∞-0		4,42 / 7,05		
9	Bot-	ATEL	isolé		50	500	ortho-jecteur		435	1940	23,3		10	167/45,56	46/53	12	9	C-∞-0		4,15 / 2,88		
10	mingen		Bobine d'extinction			750/200	à air comprimé		2500	1948					150	4	10	C-5s-0		5,15 / 3,60		
11						750	Résistance variable		3500								20	C-0,3s-0		6,05 / 4,34		
12							à table vol. d'huile		1500	1949							5	C-∞-0		2,90 / 2,95		
13			isolé			500	Ortho-jecteur	2000	435	1952					47	12	11	C-0,3s-0		4,30 / 4,50		
14	Grüze	OFF	direct		16 2/3	70/15	Ortho-jecteur		250				9,35	64/16	10/17		63	C-∞-0		3,80 / 3,95		
15	Stads-	Kunigla Watten-falle-styralen	direct	non	50	110	à air comprimé	Résistance variable	5000	1951	60	3x9,8 kv; 10 MVA	21,4 (9,8/220 kv)	9,8 / 132/220	220	61	3	C-∞-0		3,45 / 3,79		
	forsen		Bobine d'extinction	oui			à grand vol. d'huile								15	48	2		3,80 / 4,00			
			Bobine d'extinction	non												25	13					
			direct	oui												66	2					
			Bobine d'extinction	non												61						
			direct	oui												66						
			Bobine d'extinction	non												25	5					
			direct	oui													3					
			Bobine d'extinction	non													6					
			libre	oui													4					
			Bobine d'extinction	non													23					
			libre	oui													25					
			Bobine d'extinction	non													2					
			libre	oui													1					
			Bobine d'extinction	non													2					
			libre	oui													1					

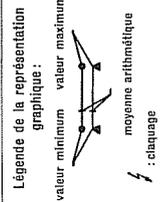


Fig. 25

**Résultats des essais de déclenchement de lignes à vide, exécutés dans des réseaux à haute tension**

Fig.	Caractéristiques du réseau			Disjoncteurs				Ligne à vide			Facteur max. de surtension k		Schéma de principe							
	Lieu	Réseau	Point neutre mis à terre isolé	Fréquence Hz	Puissance de court-circuit MVA	Tension nominale kV	Type	Résistance en $\Omega$	Puissance de coupure MVA	Année de construction	Trans-formateurs d'alimentation	Tension de service kV		Longueur km	Courant à vide A	Nombre de déclenchements	côté alimentation	côté ligne	Représentation graphiq.: ● côté alimentation ▲ côté ligne	
16	Siebnen	Ligne Töss Grynau	isolé	50		150	à grand volume d'huile	—	600	1925	16,5 MVA 50/150 kV	140	48		7	2,8	2,2			
17	Blickigen	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 / $\sqrt{3}$	160		4	—	1,0			
19	Fontenay		direct	50	2000	220	à air comprimé	avec et sans résistance en II	3500/5000	1945/1950		220	136 314 474 828		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		2 7 3	2,2 2,1 2,0				
21	Fontenay		direct	50		220	orthojecteur	—	5000			220	18 214 420		1 9 14	— 1,65 1,85	1,10 1,80 2,05			
22	St. Johann	Ligne Malnitz	Bobine d'extinction	16 <sup>2</sup> /3		110	orthojecteur	—				110	35,7 ligne + 15,7 câble	60...78	8	—	1,6			
23	Stadsforsen		direct Bobine d'extinction direct Bobine d'extinction	50	320	220	à air comprimé	Résistance variable	5000	1951	60 MVA 9,8/132/220 kV	220	72		4	1,0 1,9 1,4 1,3 1,2	1,1 — 1,0 1,2			

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

(<sup>4</sup>  $k = \frac{I_{max}}{220/2}$  ; avec une phase mise à la terre  
<sup>5</sup> avec conducteurs en série au milieu de la ligne  
<sup>6</sup> avec conducteur en série au milieu de la ligne, avec une phase mise à terre  
<sup>7</sup> 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 contournements 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 ( $\Delta u$ ) 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:

D<sup>r</sup> ès sc. techn. K. Berger, professeur, ingénieur chargé des essais de la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH), 301, Seefeldstrasse, Zurich 8.



AG. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei