

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

**Band:** 89 (1998)

**Heft:** 21

**Artikel:** Lignes électriques aériennes CFF 132 kV : un nouveau concept, plus esthétique, plus performant et plus économique

**Autor:** Salperwyck, Luc / Cavalli, Ugo / Loosli, Pierre

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-902128>

### **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:** 15.10.2024

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

Tout en respectant les dispositions normatives en vigueur et en remettant en cause certains principes de premier abord intouchables, on peut, encore de nos jours, apporter aux lignes électriques aériennes des améliorations importantes. Sur la base de réflexions, calculs, essais mécaniques et électriques, cet article met en évidence de manière détaillée un nouveau concept qui permet de réaliser des lignes électriques aériennes plus esthétiques, plus performantes et plus économiques.

# Lignes électriques aériennes CFF 132 kV

Un nouveau concept, plus esthétique, plus performant et plus économique

■ Luc Salperwyck, Ugo Cavalli et Pierre Loosli

L'adoption par la Suisse en 1916 du système 15000 V et  $16\frac{2}{3}$  Hz pour l'électrification des chemins de fer a entraîné automatiquement la nécessité de construire des centrales à  $16\frac{2}{3}$  Hz, des centrales en commun avec des groupes 50 Hz et  $16\frac{2}{3}$  Hz, ou encore des centrales avec convertisseur de fréquence.

Il est évident que l'énergie produite par ces diverses centrales devait et doit

être transportée par des lignes de transport haute tension dans différents points du pays et alimenter ainsi, après transformation adéquate de la tension dans des sous-stations, les lignes de contact nécessaires au fonctionnement des trains. Ainsi, le réseau de lignes de transport CFF atteint de nos jours une longueur globale d'environ 1600 km sous 132, 66 ou 33 kV.

En Suisse, il existe donc deux réseaux de transport d'énergie électrique, l'un à 50 Hz couvrant les besoins de l'industrie, de l'artisanat et des ménages, et l'autre à  $16\frac{2}{3}$  Hz couvrant les besoins des CFF et celui d'autres compagnies; ces réseaux s'étendent tous les deux sur l'ensemble du territoire.

Du fait de la constante augmentation de la cadence horaire de trains, de leur accélération simultanée et de leur vitesse, prévue dans le programme Rail 2000, la

## Adresses des auteurs

Luc Salperwyck, ing. él. dipl. INPG-SIA et  
Ugo Cavalli, ing. él. SIA, Elec-Engineering SA  
Ingénieurs-conseils, ch. de la Fruitière 6  
1239 Collex-Genève et rue Juste-Olivier 22  
1260 Nyon

Pierre Loosli, ing. génie civil-ETS, CFF  
Direction énergie, Lignes de transport  
Industriestrasse 1, 3052 Zollikofen

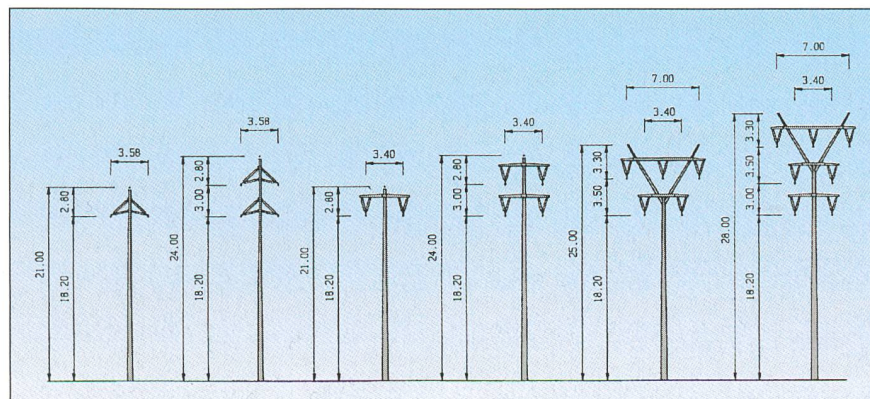


Fig. 1 Silhouettes de lignes compactes diverses avec suspensions Fanion horizontales et verticales. Mâts porteurs d'angle 0-20 grades

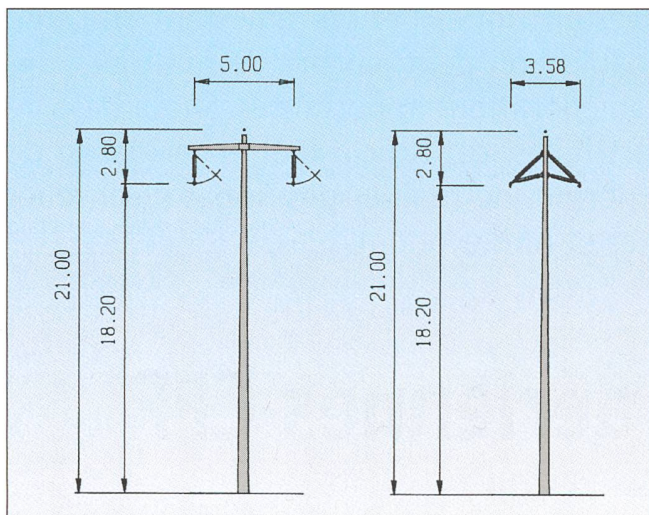


Fig. 2 Silhouettes utilisées pour les calculs

capacité du réseau de transport CFF doit être constamment augmentée, soit par la création de nouvelles artères, soit par la transformation à une tension plus élevée d'artères existantes.

### Nouveau concept

Le réseau de transport CFF de conception essentiellement radiale est constitué à environ 97% par des lignes aériennes et toute modification, transformation ou extension ne peut pratiquement être réalisée que par des lignes aériennes.

Confrontés à cette réalité et conscients de l'impact visuel négatif sur le paysage, la question s'est posée de savoir s'il était possible de concevoir et réaliser des lignes électriques aériennes ayant un impact moindre sur l'environnement, des caractéristiques mécaniques et électriques équivalentes à celle des lignes classiques et des coûts raisonnables.

La réponse est affirmative et elle va même au-delà des attentes car, comme cela est démontré ci-après, le nouveau concept permet la réalisation de lignes qui, outre l'amélioration de l'aspect esthétique, s'avèrent plus performantes et plus économiques, toutes contraintes mécaniques et électriques étant égales.

Divers pays en Europe et en Amérique ont essayé d'améliorer l'aspect esthétique des lignes électriques aériennes en chargeant des «designers» de concevoir les pylônes, à vrai dire avec un succès mitigé. Or, outre les pylônes, les paramètres sur lesquels on peut agir lors du projet d'une ligne électrique aérienne sont nombreux.

Un des principaux critères qui a toujours été pris en compte pour satisfaire à mauvais escient des critères économiques est qu'une ligne électrique aérienne doit être constituée par des tronçons recti-

lignes équipés de mâts porteurs entre deux mâts tenseurs qui permettent la réalisation d'angles plus ou moins importants.

Pour la conception des lignes compactes avec suspension Fanion, dont il est question dans cette contribution, on a fait fi de ce critère en le considérant comme obsolète. Les suspensions Fanion permettent de réaliser une ligne presque en totalité avec des mâts porteurs d'angle en lieu et place de mâts tenseurs d'angle. C'est dans cela que réside la particularité des suspensions Fanion qui permettent ainsi de choisir le tracé avec une grande liberté en abandonnant la notion d'alignement au profit d'un parcours plus naturel tenant compte d'exigences, à savoir locales, agricoles, forestières, environnementales, etc.

Pour le moment, ce système développé pour certaines lignes CFF est opérationnel pour des lignes 132 et 66 kV. Ce système de suspension est bien entendu non seulement applicable aux lignes CFF mais également à des lignes à trois conducteurs 50 Hz 130 kV ou encore à des lignes mixtes comme la figure 1 en donne quelques exemples.

### Comportement électrique

Un des avantages des suspensions Fanion est de pouvoir diminuer les distances entre phases et entre phases et terre.

On a ainsi une ligne compacte qui présente une inductivité réduite et une capacité accrue en comparaison des lignes conventionnelles. Par conséquent, pour délivrer une puissance égale à partir d'une source de tension identique, une ligne compacte engendre des chutes de tensions plus faibles, donc des courants et des pertes réduits par rapport à une ligne conventionnelle.

On a effectué le calcul du comportement électrique en ne considérant qu'un lacet 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz (fig. 2), négligeant l'influence des autres ternes ou lacets éventuels. La prise en compte du problème complet est possible en considérant tous les circuits dans le cas de lignes mixtes (fig. 1) et le mélange des fréquences et des géométries respectives, mais elle conduirait à des calculs complexes sans ajouter plus d'informations pertinentes à l'objectif fixé.

Les deux silhouettes examinées (fig. 2) représentent une ligne CFF avec un lacet 132 kV en configuration Classique et Fanion.

Le tableau I résume les valeurs par lacet nécessaires à l'évaluation du comportement des lignes.

On observe que pour le lacet compact, la résistance reste inchangée comme attendu, la réactance diminue de 6,1% et la capacité augmente de 6,5% par rapport à une ligne conventionnelle.

Dans ce calcul, on considère un lacet d'une longueur de 50 km avec une source constante de 132 kV à l'origine de la ligne alimentant une charge constante  $S = 80$  MVA à  $\text{tg } \Phi = 0,5$  ( $\cos \Phi = 0,894$ ) à l'extrémité de la ligne. Ce transit engendre environ le courant maximal dans les conducteurs. On considère la résistance à 80°C.

Profil	Type	R'd [ohm/km]	X'd [ohm/km]	w C'd [μS/km]
CFF-1 lacet	Classique	0,1326	0,1332	0,9617
CFF-1 lacet	Compact	0,1326	0,1251	1,0243

Tableau I Impédances linéiques

Longueur [km]	Profil CFF-1 lacet classique			Profil CFF-1 lacet compact		
	U2 [kV]	I1 [A]	Pertes [kW]	U2 [kV]	I1 [A]	Pertes [kW]
0	132,000	606	0	132,000	606	0
50	120,084	665	5874	120,368	663	5845

Tableau II Tensions, courants et pertes

Les calculs ont été effectués à l'aide d'un modèle triphasé en faisant les analogies suivantes:

On entre:

$$U_{\text{composé}} = \sqrt{3}/2 \times 132 \text{ kV} = 114,312 \text{ kV}$$

$$S_{\text{triphase}} = 3/2 S_{\text{CFF}} = 120 \text{ MVA}$$

$$Z'_{\text{direct}} = Z'_{uu} - Z'_{uv}$$

$$B'_{\text{direct}} = \omega(CN'_{uu} - CN'_{uv}) = \omega(C_{uo} + 2C_{uv})$$

On a en sortie:

$$I_{\text{CFF}} = I_{\text{phase}}$$

$$U_{\text{CFF}} = 2/\sqrt{3} U_{\text{composé}}$$

$$\text{Pertes}_{\text{CFF}} = 2/3 \text{ Pertes}_{\text{triphase}}$$

Dans ces conditions, on respecte les facteurs de similitudes entre un modèle triphasé et un modèle monophasé avec point milieu à la terre.

Le tableau II compare les valeurs obtenues avec une ligne conventionnelle et une ligne compacte. Les différences

des valeurs en faveur de la ligne compacte seraient beaucoup plus marquées pour une ligne compacte à 50 Hz, où la réactance est trois fois plus élevée qu'à  $16^{2/3}$  Hz.

Ce gain n'est pas spectaculaire, mais il n'est pas négligeable pour autant, ce qui permet d'affirmer qu'une ligne compacte présente un meilleur rendement.

### Comportement en court-circuit

Le comportement de la suspension Fanion, aussi bien dans sa version verticale (fig. 3) que dans sa version horizontale en console mobile (fig. 4), a fait l'objet d'essais au Centre d'Essai et de Formation (CEF) à Préverenges.

Ces essais ont pu reproduire, sur une large gamme de courants (1,8 kA à 19 kA), les courts-circuits suscep-

tibles d'apparaître sur une ligne CFF LT 132 kV.

Le comportement des systèmes tout au long des neuf essais sur la suspension dans sa version verticale (fig. 3) et des seize essais sur la suspension dans sa version horizontale (fig. 4) s'est révélé très satisfaisant. Quelque soient le lieu d'amorçage de l'arc et l'intensité du court-circuit, l'arc a toujours été repoussé vers le côté opposé au mât, sans causer de dégradation à l'objet en essai. Ceci a pu être constaté lors de l'examen minutieux pratiqué en fin d'essai.

Au regard de ces résultats, ce nouveau type de chaîne de suspension est à considérer du point de vue électrique comme tout à fait idoine à remplir son rôle.

### Champs électromagnétiques

Les travaux ayant pour but de définir scientifiquement l'influence des champs électromagnétiques sur les êtres vivants et de fixer les valeurs limite en deçà desquelles serait exclu tout risque d'atteinte à la santé sont nombreux.

L'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), dans sa publication N° 214 intitulée «Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder – 2. Teil: Frequenzbereich 10 Hz bis 100 KHz», fournit les valeurs limites d'immixtion recommandées en Suisse en ce qui concerne les valeurs efficaces de l'intensité du champ électrique et de l'induction magnétique.

Ces valeurs sont, pour une fréquence de  $16^{2/3}$  Hz utilisée par les CFF, de 10 kV/m pour l'intensité de champ électrique et de 300  $\mu$ T pour l'induction magnétique.

A titre de comparaison, les valeurs couramment rencontrées en Suisse pour la composante horizontale de l'induction magnétique terrestre sont de l'ordre de 20 à 30  $\mu$ T.

Les résultats du calcul ainsi obtenus sont valables de part et d'autre de l'axe de la ligne, à une hauteur de 1 m par rapport au sol (fig. 5 et 6).

On constate d'une part que les valeurs efficaces calculées sont très nettement inférieures aux valeurs limites recommandées en Suisse, et d'autre part que la géométrie de la ligne proposée par l'utilisation de suspensions Fanion, plus compacte que celle d'une ligne «classique» 132 kV CFF, diminue l'intensité des champs électromagnétiques émis.

On peut donc bien qualifier de telles lignes comme plus performantes également à ce point de vue.

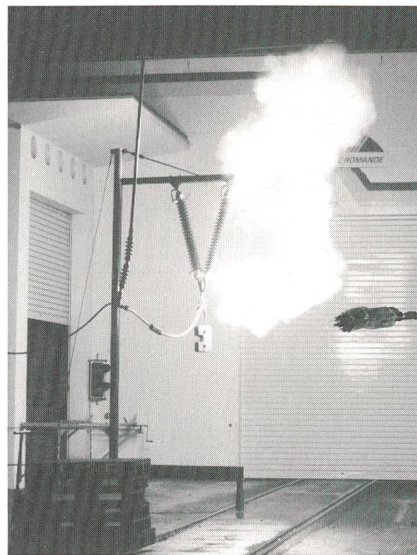
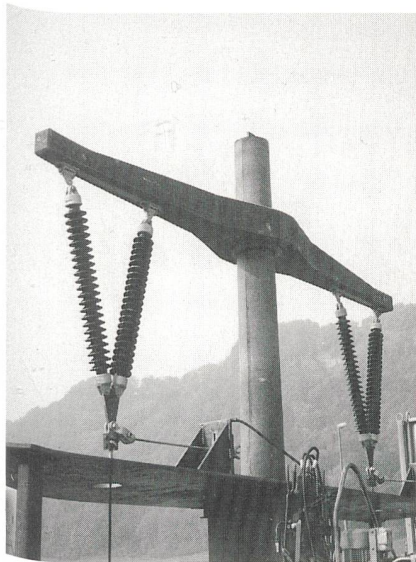


Fig. 3 Suspension Fanion verticale; à droite: essai de court-circuit

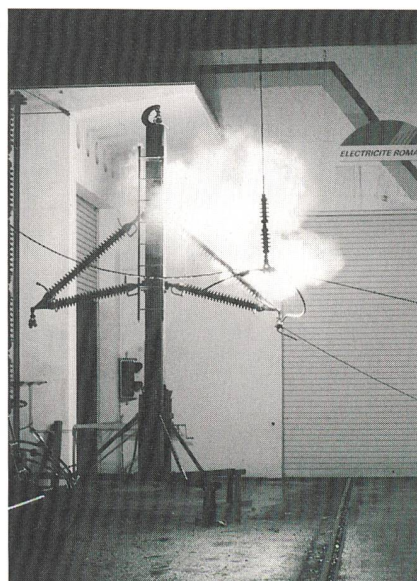
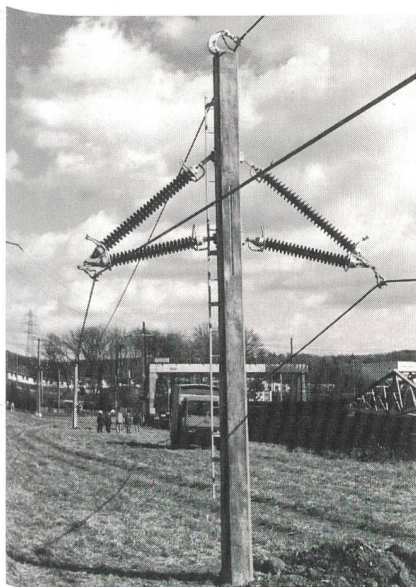


Fig. 4 Suspension Fanion horizontale; à droite: essai de court-circuit

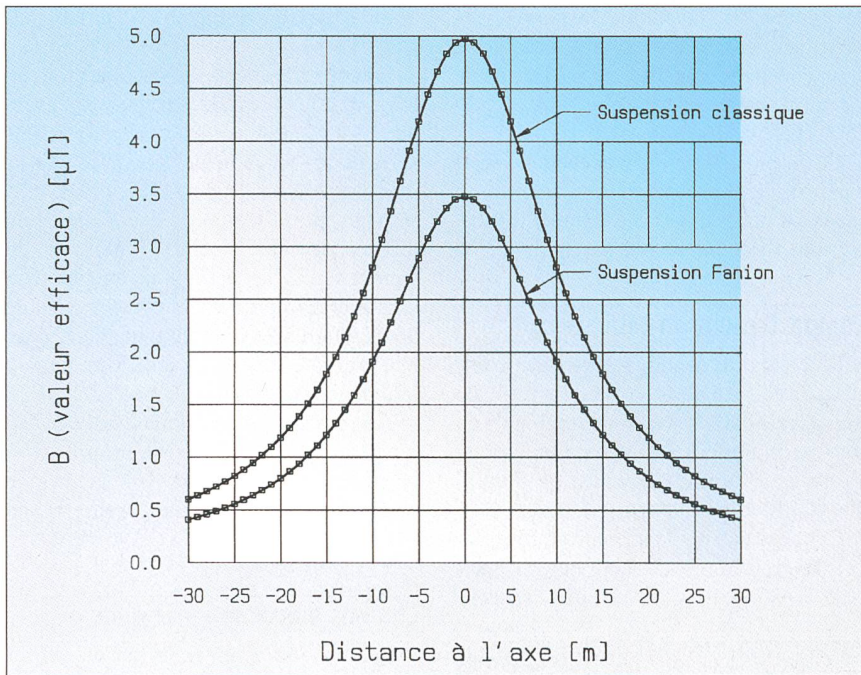


Fig. 5 Valeur efficace de l'induction magnétique [μT]

Valeur limite d'immixtion recommandée pour la valeur efficace de l'induction magnétique B: 300 μT (f=16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz)

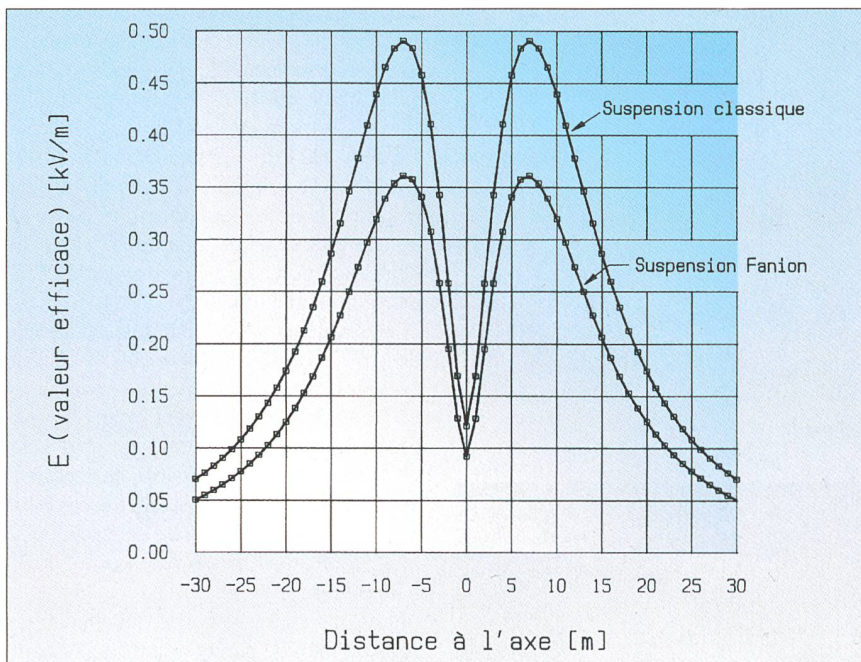


Fig. 6 Valeur efficace de l'intensité de champ électrique [kV/m]

Valeur limite d'immixtion recommandée pour la valeur efficace de l'intensité de champ électrique E: 10 kV/m (f=16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz)

### Comportement mécanique

Le comportement statique de la suspension Fanion a été étudié lors d'essais en vraie grandeur sur une suspension verticale (fig. 7). Les essais effectués doivent être considérés comme parfaitement concluants.

Le comportement dynamique de la suspension Fanion a été testé sur une

ligne d'essai (fig. 8 et 9) en créant successivement la rupture d'un isolateur à l'intérieur de l'angle de la ligne, la rupture d'un isolateur à l'extérieur de l'angle de la ligne, la rupture d'un conducteur et finalement la rupture du deuxième conducteur. La rupture d'un isolateur à l'intérieur de l'angle de la ligne (fig. 8), ne présente aucun problème. La rupture d'un isolateur à l'extérieur de l'angle de

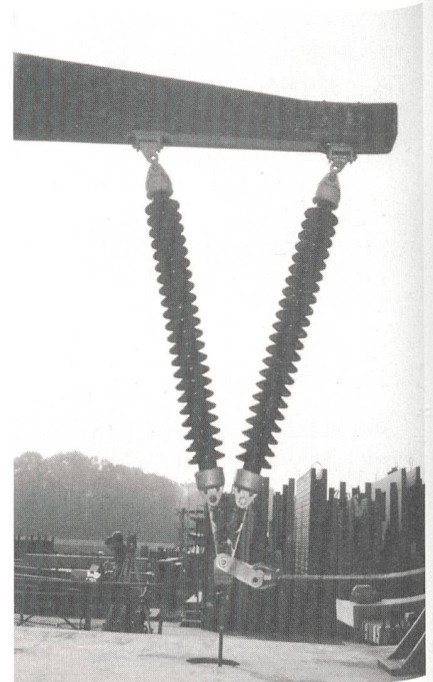


Fig. 7 Essai statique

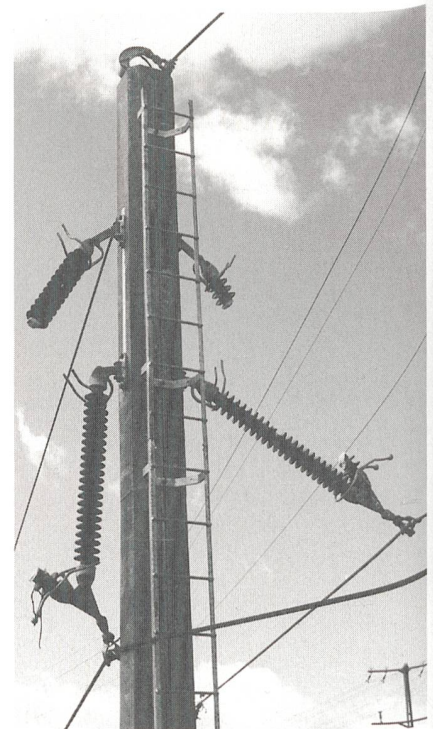


Fig. 8 Essais dynamiques

la ligne (fig. 8 et 9), phénomène bien plus délicat, ne présente pas non plus de problème.

En effet, pour pouvoir pivoter autour de son axe sous l'effet des forces qui agissent sur lui, l'isolateur restant est obligé de plier la tige qui fait partie de l'armature d'arc; cette tige agit ainsi comme un amortisseur empêchant l'isolateur de frapper avec violence le mât (fig. 8).

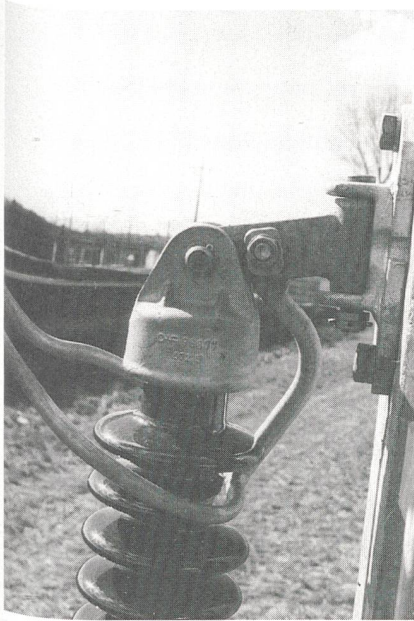


Fig. 9 Armature d'arc jouant le rôle d'amortisseur

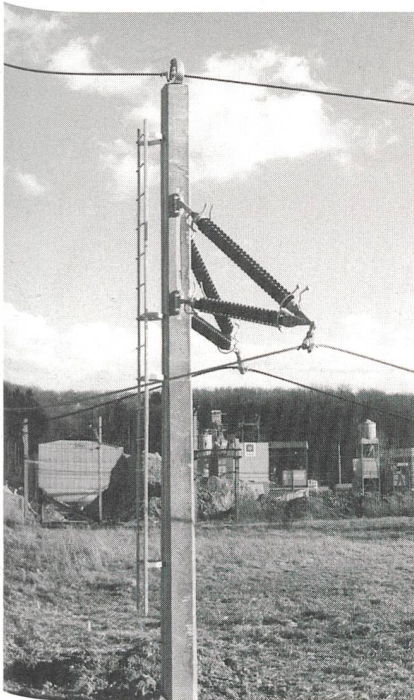


Fig. 10 Rupture des deux conducteurs (rotation horizontale des chaînes sur le mât N° 3)

Au moment de la rupture d'un conducteur, la demi-console Fanion pivote de 90° et s'immobilise après quelques oscillations dans la direction de la ligne.

Mécaniquement, la ligne supporte donc parfaitement cette situation, la condition étant que le mât porteur supporte, outre l'effet dynamique, la traction unilatérale entière d'un conducteur agissant dans l'axe du mât.

La rupture du deuxième conducteur (fig. 10) entraîne le même phénomène; la ligne ne subit pas non plus de dégâts mécaniques, à condition que le mât porteur

présente une résistance correspondant à l'effet dynamique et à la traction unilatérale de deux conducteurs agissant simultanément dans l'axe du mât.

La pince de suspension présente le degré de liberté voulu et n'entraîne aucun effort secondaire. Elle se positionne automatiquement de manière à ne supporter que des efforts de traction dans la même direction que les isolateurs, qui ne peuvent donc être sollicités que par des efforts de traction ou de compression.

On peut donc affirmer que le comportement mécanique d'un tel type de ligne est excellent et que la probabilité de ruine de ces types de lignes est deux fois inférieure à la probabilité de ruine d'une ligne conventionnelle avec suspension classique par un isolateur.

### Aspect économique

Les coûts de premier investissement pour une ligne CFF 132 kV comportant un lacet avec suspension Fanion horizontale sont d'environ 30% inférieurs à ceux qu'il faut consentir pour une même ligne conventionnelle. Cela est facilement compréhensible si l'on songe au fait que

- les consoles des mâts porteurs sont supprimées
- le nombre de mâts porteurs est considérablement augmenté et celui des mâts tenseurs diminué en conséquence
- les fondations sont proportionnellement moins coûteuses
- la suspension Fanion coûte le même prix qu'une suspension conventionnelle avec un seul isolateur avec contrepoids et environ la moitié qu'une suspension double avec contrepoids
- les travaux de montage sont moins onéreux

### Conclusions

Les premières lignes électriques aériennes datent certainement du début du siècle passé, après la découverte de l'électricité quelques années auparavant. Les premières lignes électriques «modernes» à haute tension ont été construites au début de ce siècle et le réseau de transport CFF par exemple est encore constitué aujourd'hui à raison de 70% de lignes construites dans les années 1920.

Les principaux critères régissant la construction des lignes qui sont semblables pratiquement dans tous les pays, ont été figés dans des lois et des règlements d'application, la première fois en Suisse en 1933 et une deuxième fois sans modifications significatives en 1994.

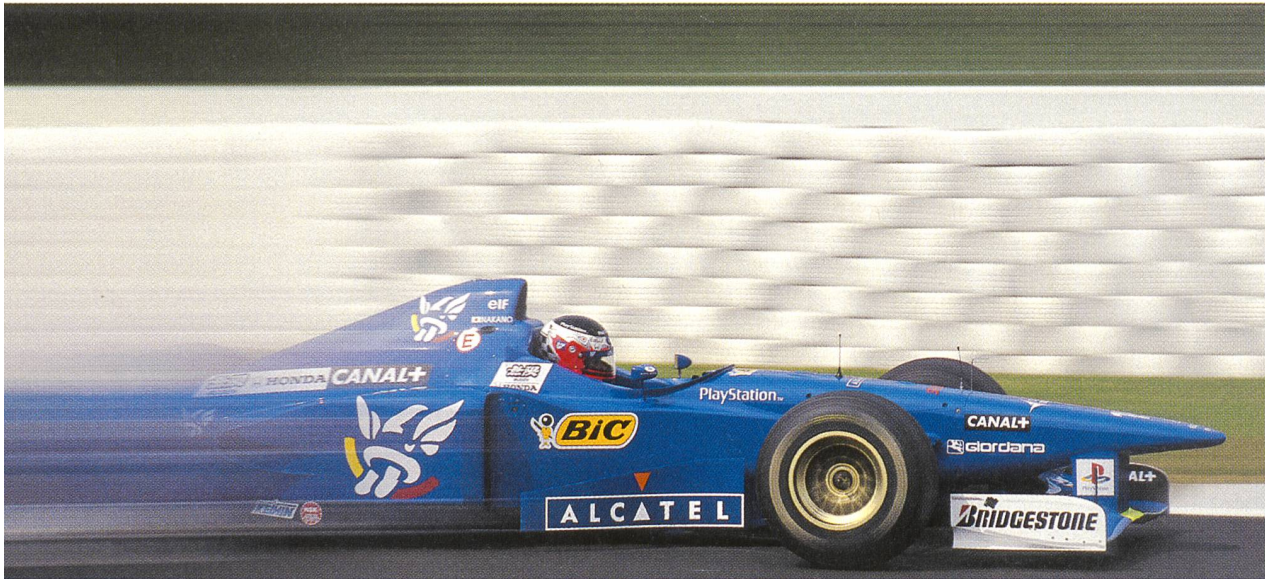
Durant toutes ces années, les lignes électriques aériennes ont fait l'objet d'études théoriques et de recherches expérimentales très importantes et on aurait donc tendance à penser que, de nos jours, il n'est plus guère possible d'apporter des modifications au mode de faire en vigueur.

Cet article montre que tout en respectant les dispositions normatives en vigueur et en remettant en cause certains principes de premier abord intouchables, on peut, encore de nos jours, apporter à ces ouvrages des améliorations importantes. Cette contribution met en évidence de manière détaillée un nouveau concept qui permet de réaliser des lignes électriques aériennes plus esthétiques, plus performantes et moins chères.

Au point de vue de l'application des moyens informatiques utilisés de nos jours pour le projet de lignes électriques aériennes, il n'y a pratiquement aucune différence. Un plus grand savoir-faire est par contre nécessaire en phase de projet, ce qui est un avantage ultérieur du nouveau concept.

## Neue 132-kV-Freileitungen der SBB

Steigende Zugzahlen, höhere Geschwindigkeiten und gleichzeitige Beschleunigungen der Züge werden auch in Zukunft einen weiteren Ausbau des Verteilnetzes der SBB erfordern. Dies kann durch den Bau neuer Trassen oder durch eine Erhöhung der Nennspannung im bestehenden Netz erfolgen. Die Autoren beschreiben die Entwicklung einer neuen Aufhängung für Überlandleitungen, der sogenannten Fanion-Aufhängung, die sich für Nennspannungen bis 132 kV eignet. Die entwickelte Aufhängung ist in der Lage, bei Winkelleitung die durch den Leiter hervorgerufenen Kräfte aufzunehmen. Bei Neu- oder Umbau von Leitungen können somit Tragwinkelmaste anstatt Abspannwinkelmaste in mehrerer Hinsicht vorteilhaft vorgesehen werden. Durch Berechnungen und Tests konnte bestätigt werden, dass die Fanion-Aufhängung der klassischen Bauweise in technischer und ökonomischer Hinsicht überlegen ist. Daher werden gewisse neue und umzubauende Übertragungsleitungen der SBB zukünftig nach dieser Bauart ausgeführt werden.



# ALCATEL KABEL SCHWEIZ

## IMMER IN DER POLE POSITION

*Wir sind der führende Kabelhersteller in der Schweiz.*

*Wir konzipieren und installieren Energiekabel- und Telecomkabelnetze  
schnell und zuverlässig.*

*Gemeinsam mit den Netzbetreibern, unseren Kunden,  
planen wir die notwendigen Infrastrukturen, die wir später schlüsselfertig realisieren. Sei der Entwurf einfach oder komplex, wir berücksichtigen die Bedürfnisse unserer Kunden in bezug auf die Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit ihrer Investitionen und bieten individuelle Lösungen von hoher Qualität.*

