

**Zeitschrift:** Ingénieurs et architectes suisses  
**Band:** 113 (1987)  
**Heft:** 22

**Artikel:** Câbles sous-marins oui, câbles souterrains non: pourquoi?: à propos d'une journée d'étude  
**Autor:** Morf, Jean-Jacques  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-76446>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 18.02.2026

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

TABLEAU 3. — Récapitulation des résultats.  
Chaudière Strebel - brûleur Cuénotherm - 39 kW -  $\lambda = 1,15$ .

N°	Additif	Conc. ‰	$\Delta NO_x$ ppm	$\Delta NO_x$ %	$\Delta CO$ ppm	$\Delta CO$ %
2	Ferrocène (2,5%), solvants, etc.	0,5	0	0	0	0
16	Solution aqueuse de chlorure de cuivre	1	0	0	0	0
18	Additif à base de MMT	0,5	-3	-5	+2	+15
19	MMT pur	0,5	-3,5	-6	-4	-36
22	Ferrocène pur	0,5	-4,5	-8	-2	-18
29	Fer organométallique + tensioactif	0,5	0	0	0	0
30	Fer organométallique + tensioactif	0,5	+0,5	+1	+2	+15
5	Emulsifiant + 5% H <sub>2</sub> O	1	-4	-7	-5	-45
31	Solution aqueuse de métaux (Fe, Mn)	~0,5	-0,75	-1	0	0
32	Emulsion prototype à 1% d'eau		-7,5	-12	+24	+240
32	Emulsion prototype à 2% d'eau		-11	-18	+20	+200

leurs effets à long terme sur l'encrassement des équipements.

L'addition d'eau à l'huile extra-légère semble être le meilleur procédé pour réduire les émissions de NO<sub>x</sub>. L'efficacité du procédé est cependant liée aux caractéristiques physico-chimiques de telles émulsions. Les émulsions standards permettent de diminuer les NO<sub>x</sub> de 1 à 2% par pour-cent d'eau. Les microémulsions en revanche permettent de réduire les NO<sub>x</sub> de 15 à 20% par pour-cent d'eau. Cette différence est essentiellement liée à l'utilisation de quantités importantes de surfactants et de cosurfactants.

#### Adresse de l'auteur:

Dominique Noir,  
ing. dipl. EPFL/SIA, PhD  
Bonnard et Gardel,  
ingénieurs-conseils SA  
61, av. de Cour  
1001 Lausanne

## Câbles sous-marins oui, câbles souterrains non : pourquoi ?

### A propos d'une journée d'étude

par Jean-Jacques Morf, Lausanne

**Le problème du remplacement des lignes aériennes à très haute tension par des câbles souterrains a suscité bien des passions en Suisse romande ; le résultat très net d'une votation n'a toutefois pas mis un terme aux discussions à ce sujet. Les journées d'étude qui lui seront prochainement consacrées à l'EPFL permettront de mieux cerner les perspectives et les limites des câbles souterrains. L'article qui suit constitue une introduction et une invitation à cette importante manifestation<sup>1</sup>.**

Dans la controverse concernant la possibilité de mettre sous terre des lignes à très haute tension, une contradiction flagrante frappe les esprits scientifiques : D'une part, plusieurs lignes sous-marines à très haute tension existent et sont en service depuis plusieurs années. D'autre part, aucune entreprise d'électricité, sauf une, ne s'est hasardée à inclure un tronçon de câbles souterrains dans une ligne à très haute tension du réseau d'Europe.

Il y a plusieurs raisons à cette réticence. L'EPFL, en collaboration avec plusieurs sociétés techniques, organise, les 3 et 4 novembre, deux journées internationales destinées à donner toute la clarté sur ce sujet controversé.

Pendant la première journée, les exploitants d'installations existantes exposeront les problèmes et le mode de fonctionnement de leurs câbles sous-marins et souterrains à très haute tension :

- Canada Vancouver : 30 + 6 km, 500 kV, 60 Hz, 1200 MW, avec réserve de 100% ;

- Italie Messine : 27 km, 400 kV, 50 Hz, 1000 MW ;
- Autriche Vienne : 12+6+4 km, 400 kV, 50 Hz, 1000 MW ;
- France-GB : 7+45+18 km,  $\pm$  270 kV continu, 2000 MW ;
- Spreitenbach : 2,5 km, 220 kV, 50 Hz, 900 MW.

L'utilisation de câbles à très haute tension pose de multiples problèmes qui seront présentés les 3 et 4 novembre ; l'un d'eux est l'effet capacitif des câbles qu'il convient de compenser par des bobines d'inductance. On trouvera ci-après un extrait de l'introduction consacrée à ce problème, mais les journées donneront une information plus complète.

Courants induits dans les gaines, mode de mise à la terre des gaines, tensions induites entre les gaines, échauffement, refroidissement forcé, insertion d'un tronçon de câble dans un réseau maillé à très haute tension, comportement en régime normal, lors de manœuvres, lors de coups de foudre, taux de disponibilité, coûts globaux comprenant le génie civil, les câbles, les bobines de compensation, les dispositifs de surveillance et de sécu-

rité, l'entretien, le personnel d'exploitation...

Les techniques de l'isolation à l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) et l'utilisation de la supraconductivité seront également montrées.

Le texte complet des conférences sera remis aux participants des journées.

#### Effet capacitif, courant à vide, compensation

Alors que les problèmes liés aux courants dans les gaines se posent dès les premiers mètres d'une installation câblée, l'effet capacitif ne prend de l'importance qu'à partir de plusieurs dizaines de kilomètres pour les câbles et de plusieurs centaines de kilomètres pour les lignes aériennes. La figure 1 illustre en trois étapes les raisons pour lesquelles la capacité électrique des câbles est si élevée : faible distance d'isolement, gaine entourant le conducteur, permittivité élevée (effet capacitif) de l'isolant.

Le rapport  $R/r$  entre le rayon intérieur  $R$  de la gaine mise à la terre et le rayon  $r$  du conducteur est déterminant pour la capacité électrique d'un câble. Pour une ligne aérienne, ce sont les rapports  $h/r$  et  $d/r$  qui sont déterminants ( $h$  = hauteur au-dessus du sol,  $d$  = distance entre deux conducteurs de phase).

La figure 2 montre l'intensité du courant à vide qui passe dans un câble alimenté d'un seul côté lorsqu'il n'y a pas d'utilisateur à l'autre extrémité. Si le câble est assez long, ce courant ne peut plus être négligé. Dans le cas des câbles de Vancouver, qui présentent une capacité de 290 nF/km, le courant capacitif à 60 Hz et sous une tension de 525 kV/ $\sqrt{3}$  est de 33 A/km. Pour une longueur de 36 km, le courant à vide atteindrait 1190 A, ce qui est proche du courant maximal admissible au point de vue thermique.

<sup>1</sup> On trouvera le programme de ces journées en p. B 158 de ce numéro.



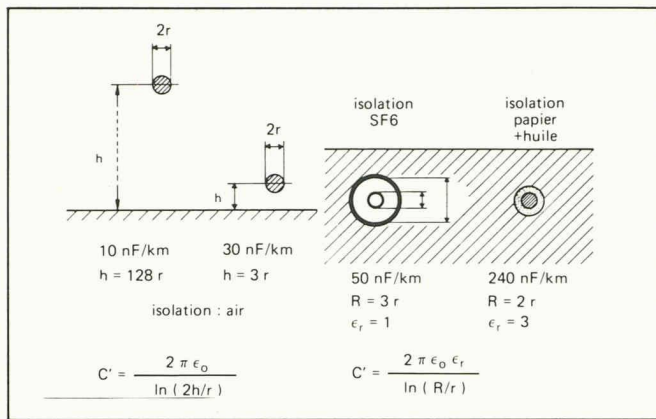


Fig. 1. — Variation de l'effet capacitif suivant la disposition des conducteurs et suivant la matière isolante :

$h$  = hauteur du conducteur au-dessus du sol

$r$  = rayon du conducteur

$R$  = rayon intérieur de la gaine métallique ou de l'écran

$\epsilon_r$  = permittivité relative de l'isolant (2,5 à 3,5)

$$2 \pi \epsilon_0 \frac{1 \text{ nF}}{18 \text{ m}} = 55,6 \text{ pF/m}$$

L'effet capacitif d'un câble peut être vingt fois supérieur à celui d'une ligne aérienne.

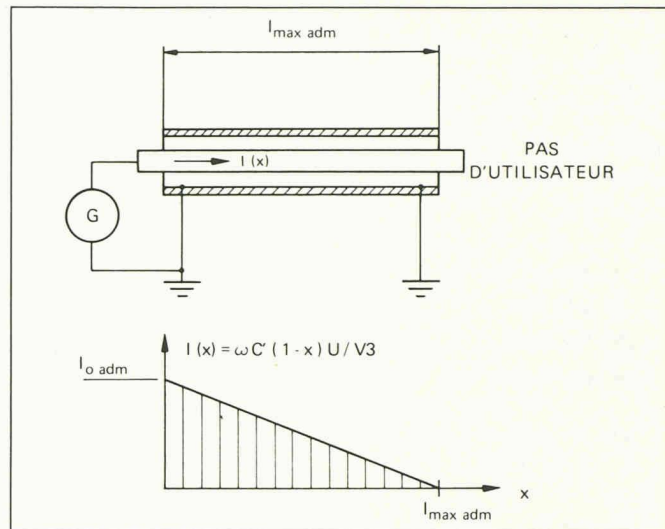


Fig. 2. — Courant capacitif dans un câble à vide (pas d'utilisateur en bout de ligne).

Pour ne pas dépasser le courant maximum admis à vide  $I_{0 \text{ adm}}$ , la longueur maximale pour un câble sous tension nominale  $U$  et sans compensation réactive est :

$$I_{\text{max adm}} = I_{0 \text{ adm}} \sqrt{3} / \omega C' U$$

$\omega C'$  = susceptance (pour lignes aériennes : 2 à 8  $\mu\text{S/km}$ ; pour câbles isolés : 30 à 300  $\mu\text{S/km}$ )

$U$  = tension composée du système

Il est donc nécessaire de compenser ce courant capacitif par une charge inductive composée de bobines d'inductance. La figure 3 montre un exemple où la totalité du courant capacitif est compensée par une seule bobine d'inductance placée au milieu du câble.

En réalité le problème est plus complexe pour divers motifs :

- la charge utile en bout de ligne peut elle-même contenir une part inductive qui rend le problème moins aigu ;
- l'élévation de tension due à l'effet capacitif et la nécessité de sous-exciter les alternateurs diminuent la stabilité du réseau ;

- si l'on dispose de transformateurs à gradins, aux extrémités de la liaison dans un réseau maillé, le problème peut en partie être résolu par un réglage adéquat des gradins ;

- l'effet capacitif est parfois le bienvenu, comme c'est le cas à Vancouver pour les câbles à 137 kV (voir conférence de R. G. Foxall).

### Espoirs et limites

L'ensemble du réseau de l'UCPTE comporte actuellement plus de 50 000 km de

lignes à 380 kV et autant de lignes à 220 kV.

L'impact de ces lignes est essentiellement visuel et fait naître l'espoir que toutes ces lignes pourront un jour être remplacées par des câbles souterrains.

Cet espoir est renforcé par plusieurs constatations.

Pour des tensions inférieures à 220 kV, le remplacement de lignes aériennes par des câbles souterrains est devenu chose courante dans les zones habitées ; il est donc naturel de penser que la chose se fera aussi un jour à plus grande échelle pour des tensions plus élevées.

Les grands transports d'énergie par oléoducs et gazoducs sont presque entièrement souterrains ; on souhaite aussi ne plus voir les grands transports d'énergie électrique sillonner le ciel.

Quelques installations par câbles sous-marins à 380 kV et même à 500 kV montrent que le problème est techniquement possible.

Enfin les techniques des câbles à isolation gazeuse (SF6) et de la supraconductivité éveillent des espoirs ; elles seront évoquées par R. Ottischnig et R. K. Maix dans les deux derniers exposés.

Mais les limites de toutes ces techniques et plus spécialement leur coût élevé nous obligent à garder raison. On en jugera certainement différemment au prochain millénaire. Ce sera l'objet de la table ronde qui doit clore ces deux journées.

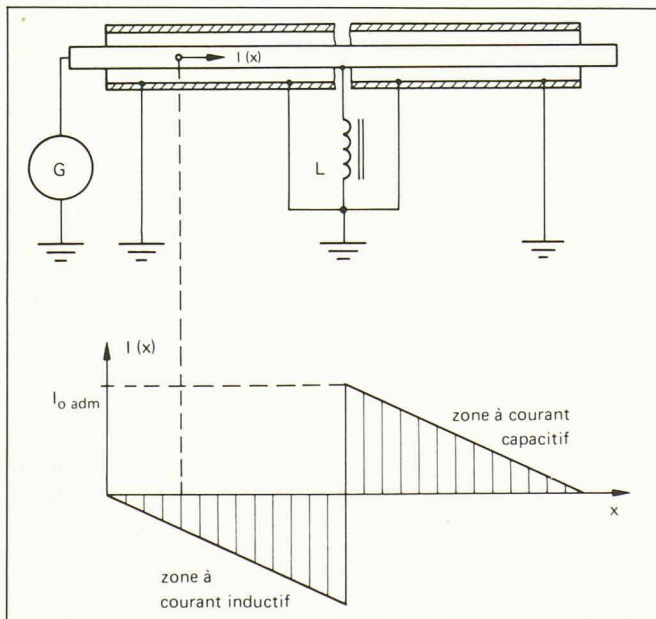


Fig. 3. — Compensation du courant capacitif par une seule bobine d'inductance  $L$  placée au milieu du câble (cas simplifié). Une bobine d'inductance consomme un courant en opposition de phase avec le courant capacitif. On peut donc compenser un courant capacitif par un courant inductif. Dans le cas de Vancouver, la compensation a été faite en trois endroits (voir exposé de R. G. Foxall).

Adresse de l'auteur :  
Jean-Jacques Morf  
Sentier du Lycée 1B  
1009 Pully