

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 108 (1982)
Heft: 25

Artikel: Développement d'un nouveau type de mâts métalliques: lignes de transport d'énergie à 132 kV des Chemins de fer fédéraux
Autor: Bergier, Pierre / Crisinel, Michel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-74692>

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: 22.05.2025

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

Développement d'un nouveau type de mâts métalliques

Lignes de transport d'énergie à 132 kV des Chemins de fer fédéraux

par Pierre Bergier et Michel Crisinel, Lausanne

1. Introduction

Les CFF exploitent entre leur sous-station de Bussigny et celle de Genève une ligne de transport de 33 kV, destinée à alimenter en courant de traction, par l'intermédiaire des transformateurs de cette dernière sous-station, les lignes de contact des gares de la Praille et de Cornavin ainsi que du tronçon Genève-Nyon.

La section Bussigny-Nyon avait été établie la première, en 1929. Son prolongement jusqu'à Genève date d'une époque ultérieure. Le conducteur unique en cuivre dont elle était équipée n'avait qu'une section de 95 mm², valeur calculée au plus juste et devenue insuffisante après l'entrée en service de locomotives modernes de puissance élevée. La perte de potentiel qui se produisait alors jusqu'à Genève était telle que du côté secondaire des transformateurs, on ne mesurait plus que 13 kV au lieu de 15. Dans ces conditions, les engins de traction ne pouvaient fournir leur plein rendement, d'où il résultait des retards de trains causant de graves perturbations dans l'horaire.

La transformation de cette ligne de transport avec élévation de la tension de service répondait à une nécessité urgente. C'est ainsi que la Division des usines électriques de la Direction générale des Chemins de fer fédéraux (CFF) a confié à la Société générale pour l'industrie (SGI) l'étude du tronçon reliant la sous-station de Bussigny à une nouvelle sous-station située à Gland, sur un tracé d'une trentaine de kilomètres, le long de la voie ferrée.

Les caractéristiques de la nouvelle ligne de transport sont les suivantes:

- tension de service: mono-132 kV, 16 2/3 Hz;
- câbles conducteurs: 2 × 300 mm² Aldrey (un lacet);
- puissance de transit: max. 81 MVA à +40° C;
- câble coaxial: 1 × 147 mm² Aldrey/Alumoweld;
- isolateurs: L 75/22 à long fût.

Pour satisfaire aux exigences exprimées par les autorités concernées lors de la procédure d'approbation du projet, le maître de l'ouvrage s'est vu dans l'obligation de rechercher une solution esthétique homogène par rapport aux installations électriques existantes, soit unité

de matériaux, de rythme et intégration de la ligne au paysage. Pour ce faire, SGI, sous la direction de la Section des lignes de transport de la Division des usines électriques CFF, a développé un nouveau type de mât métallique, objet du présent article.

Pour respecter l'unité de rythme citée plus haut, il a été décidé de placer un mât de ligne de transport au droit d'un support de ligne de contact sur deux. Ceux-ci étant en général distants de 60 m au maximum, les portées entre mâts de ligne de transport ont été limitées à 120 m (fig. 1). La hauteur des mâts au-dessus du niveau de la voie, en tenant compte d'une distance verticale minimale de 14 m entre conducteurs et voies, de la flèche des conducteurs à 40 °C, ainsi que d'une distance minimale de 2,70 m entre conducteurs et câble coaxial, est en général de 20 m. Sauf exceptions dues à des conditions locales particulières, les contraintes ci-dessus ont pu être respectées.

Avant le démarrage de l'étude de détail proprement dite, deux modèles de mâts métalliques, l'un porteur et l'autre tenseur, furent montés au préalable en gare de Morges afin de mieux tester leur bonne intégration à l'environnement ferroviaire et pour pouvoir mieux étudier certains détails pratiques (système d'encastrement, accessibilité, protection contre la rouille, etc.).

2. Description des mâts

Les deux modèles de mâts ont été réalisés à l'aide de profils métalliques coupés en biais, retournés et ressoudés de façon à obtenir une forme triangulaire. Le mât porteur était composé d'un seul profilé HEA, renforcé dans sa partie inférieure par deux semelles soudées. C'est donc un profil ouvert sans rigidité torsionnelle. Le mât tenseur par contre était composé de deux profilés IPE reliés entre eux par des diaphragmes, formant ainsi un fût pyramidal avec une section à caisson à grande rigidité torsionnelle. L'ensemble des différents mâts (182 porteurs et 74 tenseurs) totalisant un poids d'environ 1300 t a été mis en soumission en novembre 1980 et adjugé à trois entreprises romandes en janvier 1981. Les mâts tenseurs ont été réalisés comme projetés initialement avec des profilés IPE. Les porteurs par contre, eu égard aux installations spéciales du constructeur, ont été réalisés à l'aide de tôles soudées, remplaçant les profilés HEA prévus à l'origine.

Les mâts sont calculés pour supporter outre les charges climatiques (neige et vent) celles provoquées par les équipements suivants:

- un câble coaxial, placé au sommet du mât et fixé rigidement à celui-ci, section Aldrey/Alumoweld 147 mm²;
- deux câbles conducteurs, placés aux extrémités des consoles, section Aldrey 301 mm²;
- quatre câbles conducteurs, section Cu 95 mm², fixés à une console auxiliaire placée à une hauteur quelconque le long du fût (portée maximum 70 m), ceci pour permettre exceptionnellement le montage de lignes détournées à 15 kV.

Par ailleurs, l'utilisation de tels mâts étant envisagée sur d'autres tronçons, la

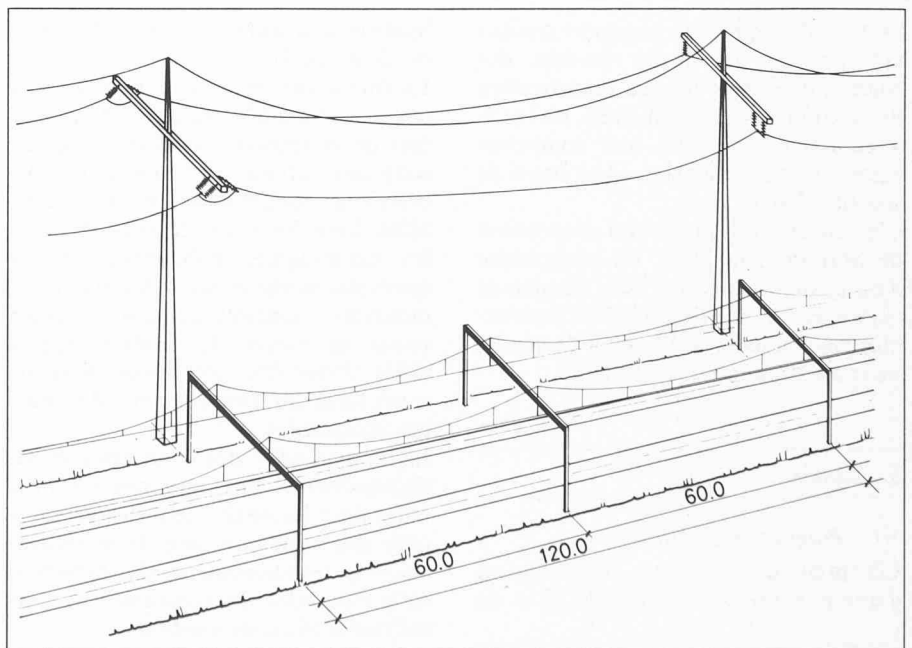


Fig. 1. — Vue générale d'une ligne de transport.

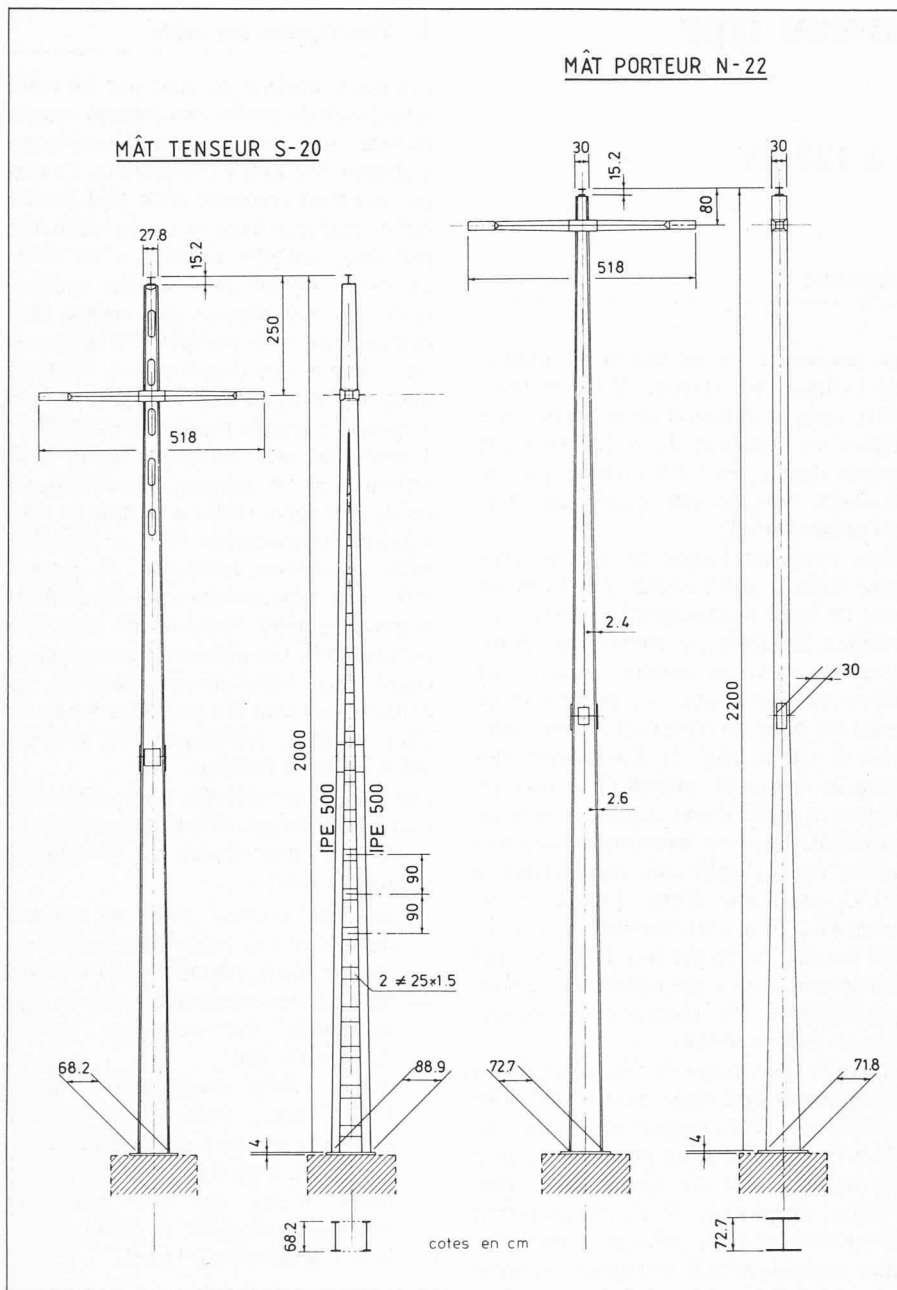


Fig. 2. — Plan des mâts d'essais.

Section des lignes de transport souhaitait pouvoir les tester au-delà des charges de service jusqu'à plastification des sections les plus sollicitées, de façon à en mieux connaître leur comportement sous charge ainsi que leur degré de sécurité effectif.

C'est ainsi que suite à une proposition de SGI de juin 1981, un programme d'essais fut organisé par cette dernière et réalisé avec l'aide de l'ICOM-Construction métallique et de l'Institut de géodésie et mensuration de l'EPFL [1]¹.

3. Essais

3.1 Programme d'essais

Les mâts destinés aux essais étaient d'une part un mât porteur de 22 m de

hauteur et d'autre part un mât tenseur de 20 m (fig. 2).

La forme des mâts, tant porteurs que tenseurs, variant en fonction de la hauteur de la section considérée, il en résulte une certaine difficulté, dans l'appréciation des déformations et de la stabilité. Pour les mâts tenseurs en outre, les diaphragmes horizontaux provoquent des moments secondaires dans les montants, moments qui ont été déterminés au moyen de formules approchées. Il était donc intéressant de savoir si ces formules conduisaient à des résultats acceptables.

La connaissance des contraintes et des déformations, dues aux charges prescrites pour les essais, permet donc de se faire une meilleure idée de la sécurité vis-à-vis des phénomènes d'instabilité et de la répartition des contraintes dans les différents éléments résistants.

Le programme d'essais mis au point par SGI comprenait pour chaque mât:

- un essai de torsion;
- un essai sous les charges de service, avec traction biaise;
- un essai avec augmentation proportionnelle des charges jusqu'à l'apparition de phénomènes d'instabilité ou de plastification des sections critiques.

3.1.1 Mât tenseur

Trois essais ont été exécutés:

1. *Essai de torsion* (fig. 3a): selon l'article 95 de l'Ordonnance fédérale sur les installations à fort courant (OF), le fût doit supporter le moment de torsion maximum dû à la rupture de un ou deux conducteurs. Ceci a été matérialisé dans l'essai en tirant de façon unilatérale avec une charge de 17,38 kN correspondant à la charge maximum d'un conducteur à 0 °C et supportant une charge de neige de 2 kg/m pour une portée de 120 m.

2. *Essais sous charges de service* (fig. 3b): il s'agissait de déterminer les contraintes et les déformations pour les charges de service, pour une température de 0 °C et une charge de neige de 2 kg/m selon l'article 94 de l'OF, ceci en tenant compte de l'angle de la ligne de 20 g.

3. *Essais sous charges unilatérales* (fig. 3c): en cas de rupture des conducteurs, c'est en principe l'hypothèse déterminante pour le dimensionnement des mâts tenseurs. La charge était appliquée d'abord pour l'hypothèse prise en compte dans l'OF et correspondait pour la ligne Bussigny-Gland, à une traction longitudinale de 17,38 kN par conducteur, avec les charges verticales correspondantes; puis ces charges étaient augmentées proportionnellement jusqu'à l'apparition des zones plastifiées.

3.1.2 Mât porteur

Deux essais ont été exécutés:

1. *Essais de torsion*: bien que l'OF ne prescrive pas de résistance à la torsion pour les mâts porteurs, il est utile, pour la pratique du tirage des lignes, de connaître la plus grande différence de traction admissible entre les deux conducteurs. L'essai prévu consistait à appliquer une charge horizontale de 1 kN en bout de console selon le même schéma que pour le mât tenseur. On a également effectué un essai supplémentaire avec une charge de 2 kN.

2. *Essais sous charges de service*: comme pour le mât tenseur, on a appliqué les charges horizontales et verticales correspondant à une température de 0 °C, à une surcharge de 2 kg/m sur les conducteurs et le câble coaxial et à un angle de la ligne de 7 g.

On a ensuite augmenté proportionnellement les charges jusqu'à la formation d'une rotule plastique dans le joint boulonné.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

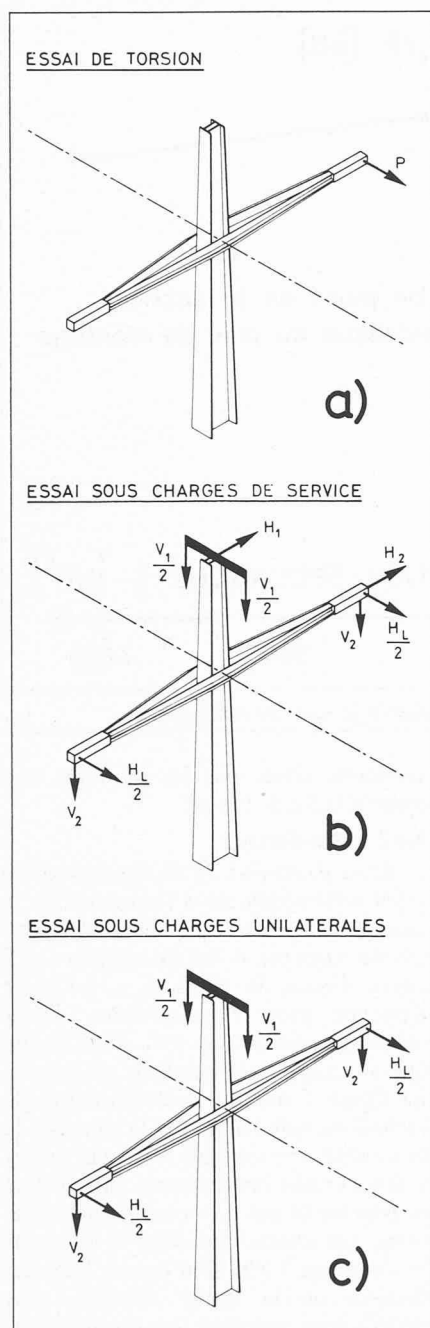


Fig. 3. — Schémas de charge.

3.2 Dispositifs d'essai

L'essai des deux mâts porteur et tenseur, exécuté en plein air sur la plate-forme spéciale d'Aigle (fig. 4), a nécessité les dispositifs de mise en charge et de mesure particuliers décrits ci-dessous.

3.2.1 Mise en charge

Les charges verticales ont été appliquées au moyen de lingots d'acier (contre-poids de lignes) de 15 et 25 kg environ disposés sur des palettes. Ces palettes étaient suspendues par des câbles métalliques avec tirefors aux extrémités de la console et d'une traverse placée perpendiculairement à la console en tête du mât. Le poids à vide de chaque palette avec son dispositif de suspension a été déterminé par pesage, de même que le poids précis des différents lingots. Les charges horizontales ont été appliquées au moyen de crics et de tirefors



Fig. 4. — Plate-forme d'essai à Aigle.

ancrés sur la dalle d'essais. Dans certains cas, des mouffles ont été utilisés pour démultiplier et ainsi réduire la force à exercer par les tirefors.

Ces forces étaient transmises aux mâts par des câbles métalliques passant par des poulies de renvoi ancrées dans la paroi rocheuse. Ces poulies étaient disposées de façon que la force s'exerce exactement dans la direction souhaitée. C'est pourquoi le positionnement exact des poulies de renvoi a nécessité la détermination préalable, par mesures géodésiques, des coordonnées d'un certain nombre de boucles d'accrochage ancrées dans le rocher. La fixation des câbles horizontaux sur les mâts a été faite par l'intermédiaire de dynamomètres à jauges de contraintes.

3.2.2 Mesure des forces

Les charges verticales ont été déterminées par addition des poids des lingots d'acier placés sur les palettes, en tenant compte du poids propre du dispositif de suspension.

Les forces horizontales ont été mesurées par des dynamomètres de 20 kN et 100 kN de capacité. Ces dynamomètres à jauges de contraintes avaient préalablement été étalonnés en laboratoire. Le signal électrique émis par chaque dynamomètre était amplifié par un pont de mesure et relevé manuellement.

3.2.3 Mesure des déformations spécifiques

Des jauges de contraintes à fil résistant ont été collées en atelier en différentes sections des mâts et sur la console du mât tenseur. La disposition a été choisie de façon à pouvoir déterminer les efforts de flexion dans les différentes sections des mâts (encastrement à la base, joint de montage) et de la console, ainsi que sur quelques diaphragmes du mât tenseur pour estimer leur participation à la résistance globale. Les jauges de

contraintes étaient revêtues d'un produit de protection contre l'humidité et contre les chocs. Elles ont été reliées à la chaîne de mesure par l'intermédiaire de câbles blindés.

La chaîne de mesure comportait 50 voies. Les lectures ont été faites automatiquement une voie après l'autre pour chaque palier de charge à la cadence de 60 voies par minute. Les lectures ont été répétées trois fois pour chaque palier de charge. Les valeurs des déformations spécifiques ont été imprimées sur papier et perforées sur ruban, ce qui a permis le dépouillement par ordinateur.

3.2.4 Mesure géodésique des déplacements

Les flèches horizontales en quatre points de chaque mât ont été mesurées par visées aux théodolites. Chaque point visé était muni d'une cible, garantissant ainsi une précision sur les coordonnées de 1 à 2 mm. Toutefois certaines mesures ont été rendues moins précises en raison des oscillations dues au vent et des conditions d'éclairage.

Lors de l'essai sur le mât porteur, on a également mesuré le soulèvement de la plaque de base à l'encastrement sur la dalle d'essai par des mesures de nivellement.

3.3 Déroulement des essais

Les essais ont eu lieu les 5 octobre (mât tenseur) et 7 octobre (mât porteur) 1981 à Aigle, conformément au programme prévu. Dans les deux cas, l'essai a débuté après midi par des mises en charge de réglage, suivies des mises à zéro des amplificateurs des dynamomètres. Pour ces opérations de mise à zéro, les câbles métalliques de mise en charge étaient détachés ou complètement détendus, de façon qu'ils n'exercent aucune force horizontale sur les mâts.

L'après-midi a été consacré aux cas de charge de torsion et aux cas de charge

de service, pendant la durée desquels on pouvait estimer que les conditions d'ensoleillement et de température ne variaient pratiquement pas. Quant à l'essai jusqu'à la ruine, il n'a débuté qu'après le coucher du soleil, de façon qu'il n'y ait pas de superposition d'effets thermiques avec les déformations imposées par les charges. Il a duré jusqu'aux environs de 21 h, ce qui a nécessité la pose de projecteurs, afin d'éclairer la station d'essai et les cibles visées pour la mesure des flèches horizontales. Pour pouvoir détecter l'apparition des premières plastifications de l'acier lors de l'essai jusqu'à la ruine, les zones les plus sollicitées (encastrement et joint de montage) ont été peintes au lait de chaux. Lors des mises en charge, l'application des charges verticales a toujours précédé celle des charges horizontales.

3.4 Résultats d'essais et comparaison avec les calculs

Le dimensionnement des mâts a tenu compte d'une part des charges dues à la ligne principale à 132 kV et d'autre part des efforts supplémentaires dus à la présence des lignes détournées à 16 ou 33 kV. Les essais n'ont tenu compte que des efforts dus à la ligne principale.

3.4.1 Mât tenseur

1. *Essai de torsion*: la charge prévue de 17,38 kN a été appliquée à l'extrémité de la console côté ouest, alors que les dispositifs de suspension des charges verticales étaient en place. Les résultats montrent que le mât supporte aisément la rupture d'un conducteur, la contrainte maximale mesurée dans la section d'encastrement étant de 47,6 N/mm². Les flèches horizontales mesurées étaient supérieures aux flèches calculées, les différences pouvant être expliquées par la déformation des consoles dont le calcul ne tient pas compte, ainsi que par le déplacement des boulons dans le joint de montage.

2. *Essais sous charges de service*: la déformation transversale mesurée en tête du mât sous charges de service ainsi que celle mesurée à 7 m au-dessus de la pla-

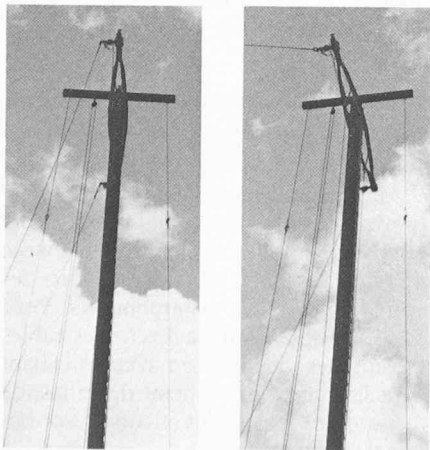


Fig. 5. — Essai de torsion: à gauche mât non chargé, à droite mât chargé.

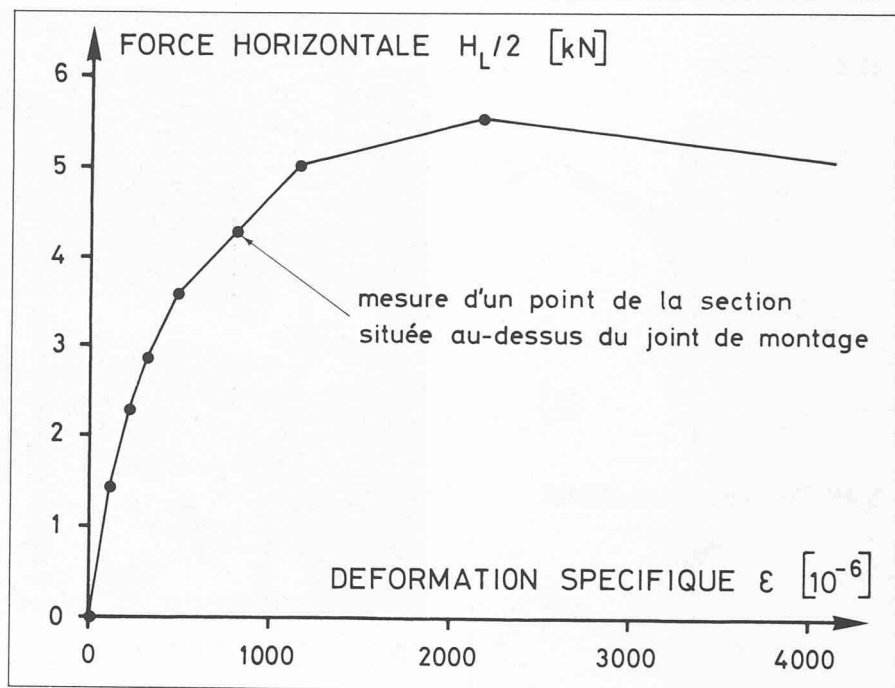


Fig. 6. — Allure de la courbe $H_L/2 - \epsilon$ de l'essai jusqu'à la ruine du mât porteur.

que de base sont environ 20% supérieures aux déformations calculées. Cela provient à notre avis de l'élasticité de l'encastrement par plaque de base et boulons, raison pour laquelle, lors de l'essai du mât porteur, nous avons demandé la mesure de la déformation de la plaque de base de 40 mm d'épaisseur. A la base du mât, les contraintes mesurées coïncident à quelques pour-cent près aux contraintes calculées. La répartition des contraintes est également conforme à ce que l'on attend. A proximité du joint boulonné, le flux des efforts est perturbé, et les contraintes maximales ramenées vers les axes des boulons. Les jauges placées vers les angles des profils indiquent des contraintes nettement plus faibles, spécialement dans le cas des charges unilatérales.

3. *Essais sous charges unilatérales*: les déformations longitudinales sont plus faibles que calculées, ceci étant dû à la présence des diaphragmes, négligés dans le calcul. Les contraintes mesurées dans la section critique correspondent à 5% près aux contraintes calculées. Lors de l'augmentation des charges, on n'a pas observé de phénomènes d'instabilité élastique. La ruine du mât a été obtenue par plastification de la section de base, les charges étant environ 3,5 fois les charges maximales de service.

4. *Comportement des boulons*: les boulons ont été mis en place et serrés sans clef dynamométrique et sans que nous ayons donné d'instructions à ce sujet à l'équipe de montage. Avant l'essai, on a contrôlé le serrage des boulons et les résultats ont varié entre 40 et 50 kgm. Ce degré de serrage s'est révélé largement suffisant et la transmission des efforts s'est faite par frottement entre les cou-

vre-joints serrés par les boulons, ceci jusqu'à la fin de l'essai.

3.4.2 Mât porteur

1. *Essai de torsion*: la charge prévue de 1 kN a été appliquée à l'extrémité de la console côté ouest, alors que les dispositifs de suspension étaient en place. En cours d'essai, la décision a été prise d'entente avec le mandataire, d'augmenter la charge à 2 kN, étant donné que le niveau des charges le permettait. La figure 5 montre la déformation de torsion du mât visible par la rotation de la console. Les résultats montrent qu'il y a assez bonne concordance entre calcul et essai en ce qui concerne les déformations. Les contraintes dans le fût, pour la charge de 2 kN, sont encore bien au-dessous de la limite élastique. On pourra donc autoriser lors du tirage des lignes des différences de charge de 2 kN entre conducteurs.

2. *Essai sous charge de service*: la déformation mesurée au sommet du mât sous les charges de service montre l'importance du soulèvement de la plaque de base. Compte tenu de ce phénomène annexe, la concordance est bonne (11%).

L'essai a ensuite été conduit jusqu'à la ruine, qui s'est produite par cisaillement des boulons dans le joint de montage. Le glissement des boulons dans le joint central s'est produit au-delà des charges de service. L'évolution des déformations spécifiques mesurées par chaque jauge à chaque palier de charge a été enregistrée sur bande perforée, ce qui a permis le dépouillement par ordinateur et le dessin automatique des courbes $H_L/2 - \epsilon$ (force horizontale-déformation spécifique, fig. 6). La ruine du mât est due à l'effet du second ordre. Les grandes flèches horizontales dues aux forces H_L ont conduit à une excentricité des points

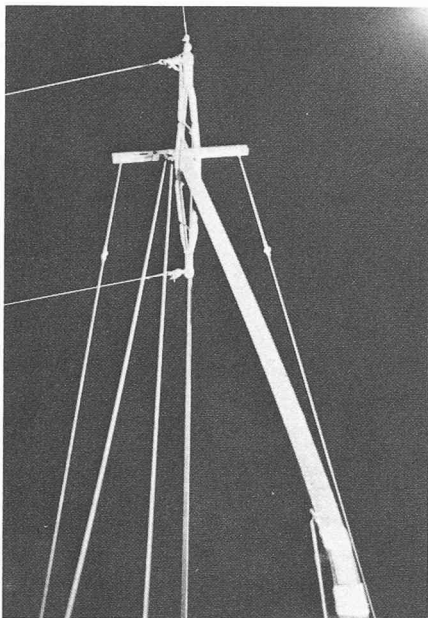


Fig. 7. — Mât porteur en cours d'essai.

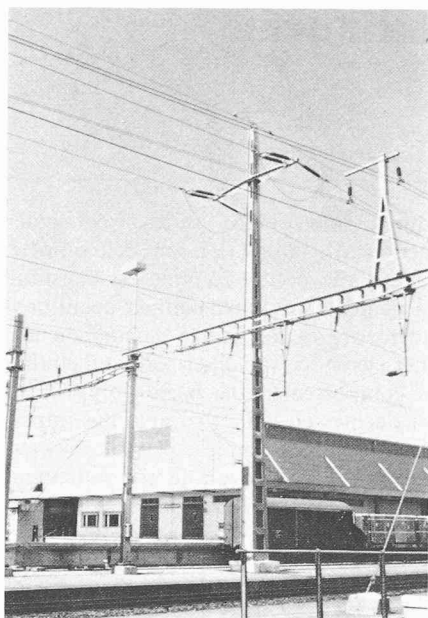


Fig. 9. — Mât tenseur en gare.

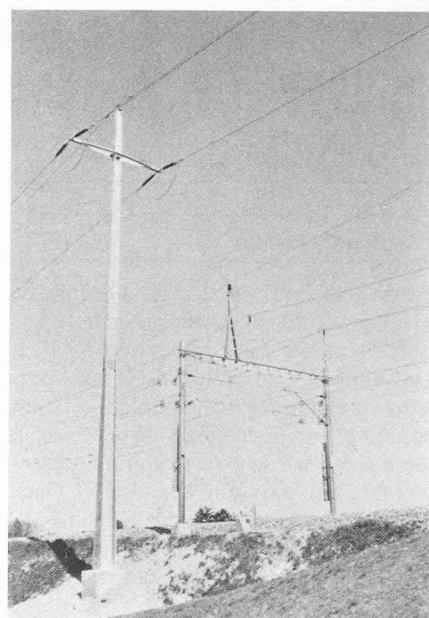


Fig. 10. — Mât porteur d'angle en pleine voie.

d'application des charges verticales V , ce qui a provoqué une augmentation non linéaire des moments de flexion. La figure 7 donne une vue du mât porteur en cours d'essai. La figure 8 montre les boulons du joint de montage cisailés, après démontage du mât.

Les résultats d'essais ont été comparés à ceux donnés par une méthode de calcul développée à l'ICOM [2] et exposée dans l'article qui suit [3].

3.5 Conclusion des essais

Dans l'ensemble, les deux mâts se sont comportés de façon satisfaisante. Pour les charges de service, les déformations en tête de mâts et les contraintes maximales mesurées correspondent au calcul et aucun phénomène d'instabilité n'est apparu, bien que les charges aient été portées jusqu'à 3,5 fois les charges de service. Des divergences sont cependant apparues dans les sections non critiques. Ceci étant dû au fait que l'essai n'a pas eu lieu en laboratoire mais en plein air et que pour les sections peu sollicitées, les phénomènes secondaires tels qu'ensoleillement, variation de température, effet du vent ou déplacement des boulons engendrent des contraintes et des

Remerciements

Les auteurs remercient la Section des lignes de transport de la Division des usines électriques des CFF de leur avoir donné l'occasion de réaliser un essai grandeur nature, permettant de confronter théorie et réalité. Ils expriment leur reconnaissance à toutes les personnes qui, d'une façon ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de ces mesures.

déformations du même ordre de grandeur que les charges elles-mêmes.

C'est ainsi que pour les mâts tenseurs, les contraintes dans les diaphragmes horizontaux de liaison ont été plus élevées que prévu, alors que les moments secondaires dans les profils étaient plus faibles.

Pour les mâts porteurs également, la concordance entre calcul et mesure au niveau des charges de service était bonne. La poursuite de l'essai n'a pas permis de déceler une instabilité caractérisée, malgré les fortes déformations obtenues en cours d'essai.

4. Montage des mâts

Les opérations de montage des mâts sur le tronçon Bussigny-Gland ont débuté

en janvier 1982 et se dérouleront jusqu'au printemps 1983, au fur et à mesure de l'avancement des fondations et selon le programme prévu. Les travaux sont rendus difficiles par la présence du trafic ferroviaire qui ne peut être interrompu. Certains mâts sont montés avec des grues automobiles, si les conditions topographiques le permettent. Pour d'autres, seul un accès par la voie ferrée est possible. Il faut alors utiliser une grue circulant sur la voie ferrée, l'opération devant s'effectuer de nuit, entre le dernier train du soir et le premier du matin.

Les tronçons de ligne déjà équipés à Morges, Saint-Prex et Gland s'intègrent de façon harmonieuse aux installations ferroviaires existantes et on peut constater que le rythme de un mât pour 120 m, ainsi que la limitation à une vingtaine de mètres de la hauteur du câble coaxial au-dessus des rails, conduisent à un résultat esthétique satisfaisant (fig. 9 et 10).

Bénéficiant dès lors de l'expérience acquise par SGI, tant dans les domaines de l'étude des mâts, des détails et contrôles de fabrication que dans leur montage dans des conditions difficiles, les CFF l'ont chargée de l'étude de mâts analogues munis de 2 lacets 132 kV (4 conducteurs), de section supérieure et dimensionnés de façon à pouvoir être utilisés dans certains cas spéciaux comme supports de ligne de contact.

Adresse des auteurs:

Pierre Bergier, ing. dipl. EPFL/SIA
chef du service de génie civil
de la SGI
Chemin des Délices 9
1006 Lausanne

Michel Crisinel, ing. dipl. EPFL/SIA
ICOM-Construction métallique
Ecole polytechnique fédérale
de Lausanne, GCB (Ecublens)
1015 Lausanne

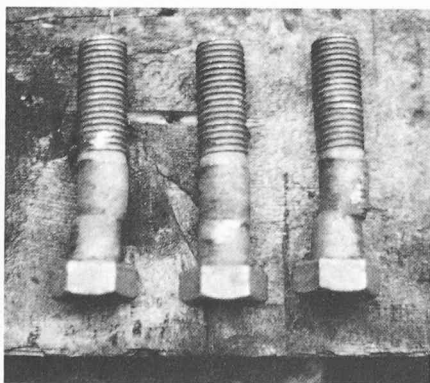


Fig. 8. — Boulons cisailés.

Bibliographie

- [1] BERGIER, P., CRISINEL, M. et OPPERMAN, G., *Essais statiques de deux mâts métalliques standards*. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, ICOM-Construction métallique, rapport d'essais ICOM 088, 1981.
- [2] OPPERMAN, G., *Comportement spatial des poutres-colonnes à section ouverte et parois minces*. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, thèse n° 434, 1982.
- [3] OPPERMAN, G., *Déversement d'un mât métallique en double-té*. Ingénieurs et architectes suisses. Lausanne, vol. 108, n° 25, 1982.