Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 88 (1997)

Heft: 21

Artikel: Cheminement contrôle du courant de traction de retour : alimentation, mise à la terre, isolation et champs magnétiques et électriques des installations électriques à courant continu des transports publics urbains

Autor: Salperwyck, Luc / Pedrucci, Raphael / Cavalli, Ugo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902253

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: 14.08.2025

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

Le cheminement du courant de traction de retour des installations de chemins de fer en général, et des transports publics urbains (TPU) en courant continu en particulier, pose des problèmes de différentes natures. Le présent article propose un nouveau concept qui permet d'éradiquer à la source la totalité de ces problèmes. Une étude techno-économique, appliquée à plusieurs cas de figure correspondant aux réseaux des tramways de Genève, démontre que des économies substantielles sont possibles. De plus, elle montre que les perturbations apportées par les champs d'induction magnétique et les champs électriques peuvent être réduites de manière significative.

Cheminement contrôlé du courant de traction de retour

Alimentation, mise à la terre, isolation et champs magnétiques et électriques des installations électriques à courant continu des transports publics urbains

■ Luc Salperwyck, Raphael Pedrucci et Ugo Cavalli

Alors que les courants de traction suivent à l'aller des lignes bien définies, ils se répartissent sur le retour très largement autour du tracé. De ce fait, les conditions d'alimentation, de mise à la terre et d'isolation, de même que les champs électriques et magnétiques que les installations de traction monophasée engendrent, sont des sujets importants [1].

Selon [1], sur la base de calculs théoriques et de mesures effectuées sur le réseau ferroviaire monophasé des CFF, et dont les résultats coïncident parfaitement entre eux, le courant de traction de retour emprunte le sol à concurrence de 50%, et ce en dépit des importantes et coûteuses précautions prises pour concentrer la plus grande partie possible dudit courant de retour dans les rails, dans des câbles aériens de retour, ainsi que dans les câbles isolés posés sous terre à cet effet.

Ces constatations extrêmement intéressantes sont directement extrapolables au cas des transports publics urbains, en particulier aux tramways, à ceci près que les perturbations et les dommages engendrés par les courants de retour sont dans ce cas encore plus graves du fait qu'ils sont provoqués par des alimentations à courant continu, et du fait que ces perturbations et dommages agissent principalement dans des zones à forte concentration de population et d'activité humaine.

Alimentation des tramways

L'alimentation des tramways se fait actuellement de manière tout à fait similaire à celle des trains, c'est-à-dire par captage du courant au niveau d'une ligne de contact suspendue et par retour du courant par les rails. Dans la majorité des cas, le captage du courant se fait à l'aide de pantographe (figure 1, *a*); d'autres systèmes de captage du courant, à l'aide d'une perche similaire à celle des trolleybus (figure 1, *b*), existent également.

L'alimentation se fait habituellement en courant continu, typiquement avec des tensions de l'ordre de 600 à 900 V. Le courant consommé par une rame de tramway à double-caisse est de l'ordre de 500 A. De nouvelles rames triple-caisse consomment le double, soit environ 1000 A.

La figure 2 illustre de manière schématique les chemins empruntés par les cou-

Adresse des auteurs
Luc Salperwyck, ing. él. dipl. INPG-SIA
Raphael Pedrucci, ing. él. dipl. EPFL-SIA, et
Ugo Cavalli, ing. él. SIA, tous chez Elec-Engineering SA – Ingénieurs-conseils
6, ch. de la Fruitière, 1239 Collex-Genève
et 22, rue Juste-Olivier, 1260 Nyon

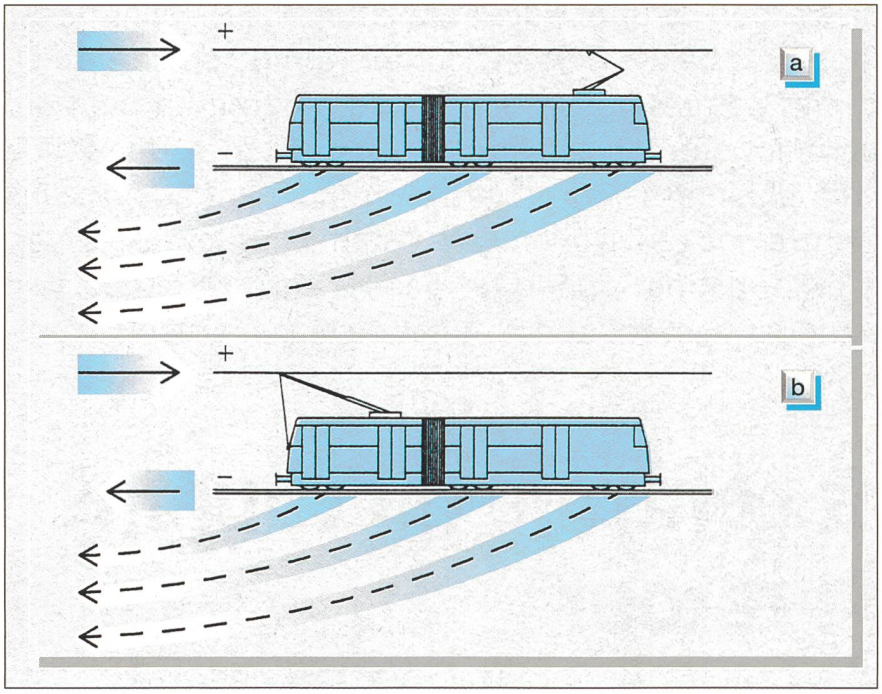


Figure 1 Dispositifs d'alimentation des tramways

a alimentation des tramways par ligne de contact simple et pantographe, et retour du courant de traction par les rails

b alimentation des tramways par ligne de contact simple et simple perche, et retour du courant de traction par les rails

rants à l'aller et au retour. Alors que le courant à l'aller ne peut passer que par la ligne de contact, le courant de traction de retour se partage entre plusieurs chemins en empruntant les circuits les moins résistifs qu'il rencontre, à savoir d'une part les rails de la voie de tramway, et d'autre part le sol et les diverses canalisations, ferraillage de bâtiment, etc. Le cheminement du courant de traction de retour varie donc constamment en fonction de la position du tramway.

Dans le cas des nouvelles constructions des lignes de tramway, les rails sont isolés du sol. Outre le fait que les dispositifs prévus se détériorent dans le temps et que leur isolation n'est donc plus efficace à terme, le principe même de l'isolation des rails rappelle qu'il s'agit bel et bien d'une des polarités du circuit d'alimentation des tramways et que, dans la mesure où cette polarité est isolée, cela crée une situation dangereuse, notamment en cas de court-circuit de la ligne de contact sur les rails, puisque dans ce cas le courant de court-circuit ainsi généré retourne aux sous-stations et qu'il élève le potentiel sur les rails au-delà des tensions de contact admissibles par rapport au sol immédiatement voisin.

A cet égard, il y a lieu de mentionner la gare CFF de Genève-Aéroport, qui a été conçue théoriquement à la suite d'une campagne de mesures de très grande envergure [2, 3] dont les résultats ont confirmé les calculs, selon un concept de mise à la terre précis et présentant la particularité d'avoir prévu des rails parfaitement isolés de la terre-ouvrage.

Bien que s'agissant d'une gare CFF purement $16^2/_3$ Hz 15 kV, elle a été traitée comme une gare courant-continu, compte tenu du fait que les rails sont galvaniquement connectés à quelques kilomètres de distance aux rails de la ligne CFF 1500 V courant-continu Genève–La Plaine–Paris et qu'une liaison galvanique rail–terre-ouvrage était donc à exclure sous peine de corroder à très court terme des parties enterrées des installations de l'aéroport international de Genève-Cointrin.

Afin d'éviter les dangers découlant de la mise sous tension des rails lors des démarrages des trains ou en cas de court-circuit, des court-circuiteurs s'enclenchant automatiquement à partir de 27 V entre les rails et la terre-ouvrage Aéroport – ce qui se passe à chaque démarrage de train – ont été installés. Ces court-circuiteurs s'ouvrent automatiquement dès que le train s'est éloigné – par mesure du courant résiduel – et les rails redeviennent alors parfaitement isolés.

Des mesures, effectuées sur le courant circulant dans les rails dans des cas analogues à ceux des tramways, ont prouvé que ce courant représente dans le meilleur des cas 50% du courant total de retour, la proportion de courant dans la terre pouvant passer dans la majorité des cas à 80, voire 90% du courant total, ce qui diminue le danger de mise sous tension des rails mais ce qui engendre les problèmes de corrosion.

Ces courants de traction de retour, continus, provoquent des corrosions électrochimiques très importantes sur les dispositifs métalliques souterrains par lesquels ils transitent. Les zones d'entrée du courant sur le dispositif sont de type cathodique; les zones de sortie du courant sont de type anodique, et l'ensemble est inséré dans le sol, qui se comporte comme électrolyte. Les zones de sortie du courant sont donc en danger de corrosion par électrolyse.

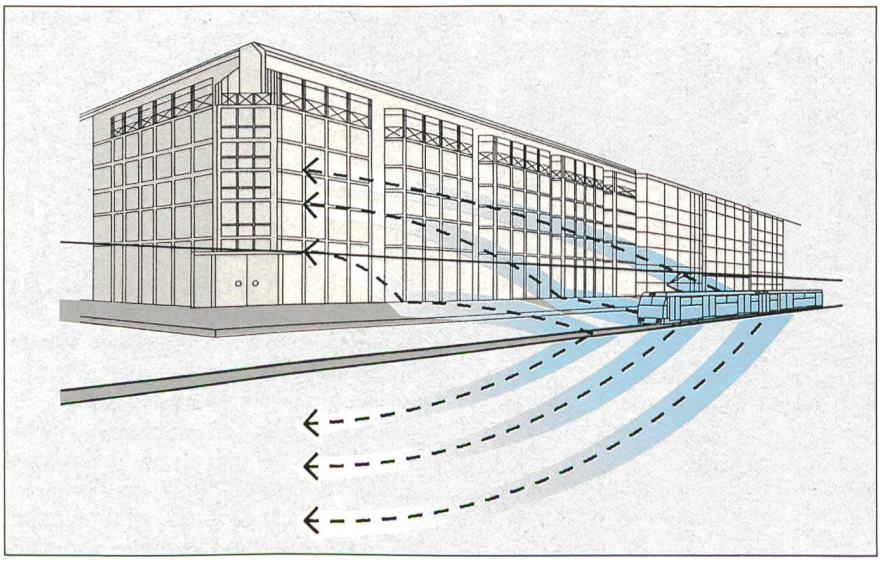


Figure 2 Courant de traction de retour pour les modes d'alimentation par ligne de contact simple selon figure 1

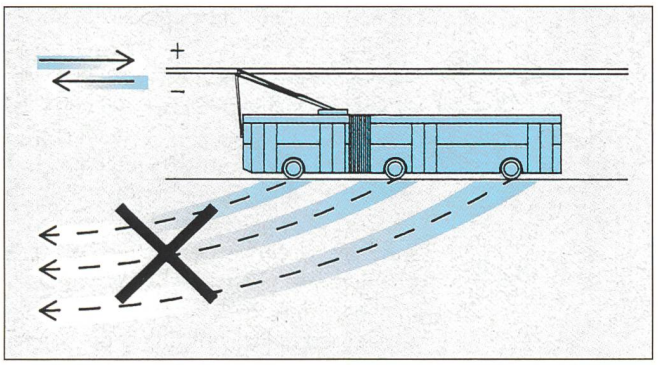


Figure 3 Dispositif d'alimentation des trolleybus par ligne de contact double et double perche

A titre de comparaison, les phénomènes de corrosion électrochimiques existent de manière naturelle entre les métaux et le sol. Ces phénomènes électrochimiques mettent en jeu des courants électriques de l'ordre du milliampère, à comparer avec les courants de traction de retour de plusieurs centaines d'ampères.

L'installation de dispositifs de protection cathodique et de drainage de courant est couramment utilisée pour remédier à ces inconvénients. Ces dispositifs sont onéreux et leur installation ne fait que déplacer le problème sans y remédier.

Une bien meilleure solution revient à éliminer le problème à la source, c'est-à-dire à canaliser les courants de traction de retour dans des conducteurs définis et dimensionnés pour cela. C'est notamment le cas de l'alimentation des réseaux de trolleybus.

Alimentation des trolleybus

Les trolleybus sont alimentés par un système à ligne de contact double et double perche tel que représenté schématiquement en figure 3. Ce mode d'alimentation présente l'avantage, par rapport à celui des tramways exposé précédemment, de définir les lignes pour le courant à l'aller comme au retour. Par conséquent, le courant qui alimente le trolleybus retourne aux sous-stations sans emprunter la terre.

Il arrive néanmoins, lorsque les résistances internes des sous-stations sont différentes, qu'une fraction du courant emprunte la terre. Dans ce cas, la ligne de contact dont la polarité est électriquement reliée à la terre se retrouve en parallèle avec une liaison de terre entre sous-stations. Cette liaison de terre écoule alors une faible partie du courant.

Ces observations, étayées par des calculs théoriques et par des mesures effectuées en grandeur réelle sur le réseau des trolleybus des Transports en commun de la Ville de Fribourg (TF), montrent que les courants dans le sol dépendent d'une part de la résistance interne des sous-stations, et d'autre part de la résistance équivalente de la prise de terre [4, 5].

Le graphique de la figure 4 illustre ce phénomène dans un cas concret avec trois sous-stations. Ce graphique montre que, cas échéant, par l'insertion de résistances additionnelles entre la prise de terre et la polarité négative de l'appareillage électrique de la sous-station, le courant transitant dans le sol peut être réduit à moins de quelques dixièmes de pour-cent du courant consommé par le trolleybus. Il s'agit donc de courants transitant par le sol qui sont de 800 à 1500 fois plus faibles que les courants observés dans le cas de l'alimentation des tramways.

De plus, le raccordement de la polarité négative des sous-stations à la prise de terre par des cellules composées de diodes montées en antiparallèle, comme indiqué en figure 5, permet de réduire à zéro le courant empruntant la terre entre les sous-stations. Plusieurs diodes sont montées en série dans chaque branche afin d'obtenir la tension de seuil voulue, celle-ci n'étant atteinte qu'en cas de défaut.

Modification proposée

La modification proposée, illustrée par la figure 6, consiste à doter les tramways d'une alimentation similaire à celle des trolleybus. Pour ce faire, la ligne de contact simple doit être remplacée par une ligne de contact double et le système de captage du courant doit être réalisé par un système à double perche.

En ce qui concerne le fonctionnement mécanique et dynamique, les tramways équipés de capteurs de courant identiques à ceux des trolleybus fonctionnent aussi bien que les trolleybus, sinon mieux. En effet, le tracé fixe de la ligne, c'est-à-dire des rails et par conséquent des fils de contact, font en sorte que les phénomènes de déperchage, qui constituent un inconvénient dans le cas des trolleybus, sont pratiquement réduits à néant dans le cas des tramways.

Les vitesses, accélérations et décélérations des tramways sont du même ordre de grandeur que celles des trolleybus; la modification proposée ne doit donc a priori poser aucun problème supplémentaire par rapport à ceux qui sont déjà connus et auxquels il a déjà été remédié pour les trolleybus. Cela est notamment corroboré par l'exemple des tramways du réseau de la STAS à St-Etienne (F), qui, comme le montre la figure 7, fonctionnent avec une alimentation par perche.

A propos de la sécurité des passagers, il est clair qu'aucune concession ne peut être faite et que le niveau de sécurité doit être au moins égal à celui qui existe actuellement. En fait, contrairement au cas des trolleybus où le moteur doit être à double ou à triple isolation pour éviter de mettre sous tension la carcasse du véhicule en cas de défaut du pôle positif, les tramways possèdent l'énorme avan-

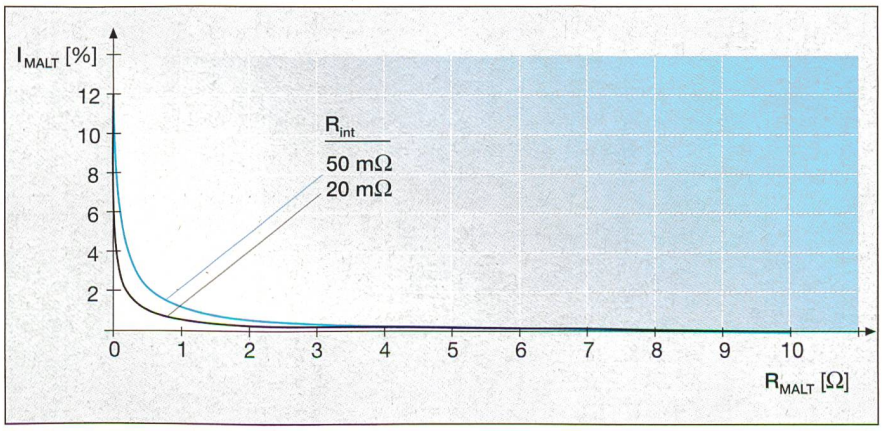


Figure 4 Variation du courant dans le sol

Cas de trois sous-stations avec le soutirage de courant à la hauteur de la première sous-station

I_{MALT} courant dans le sol en % du courant consommé par le trolleybus
R_{MALT} résistance des prises de terre
R_{int} résistance interne des sous-stations

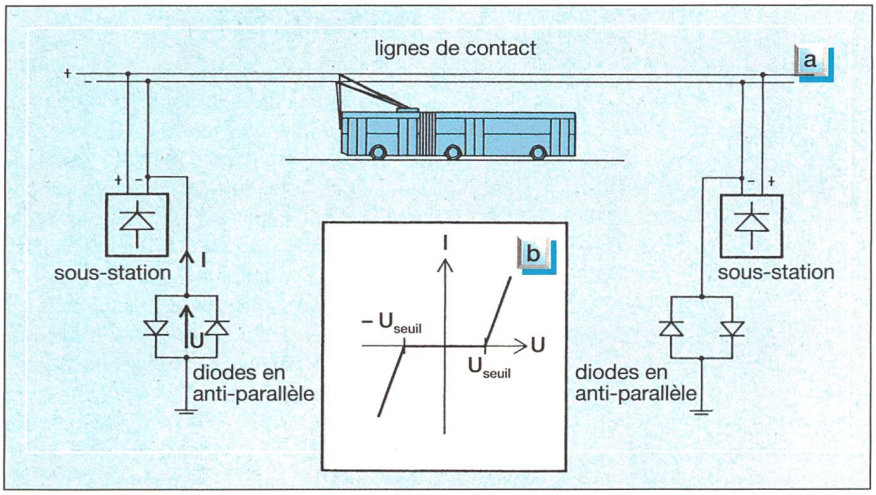


Figure 5 Raccordement des sous-stations à la terre, permettant la suppression totale des courants dans la terre

a schéma général
b caractéristique *I(U)* des diodes en anti-parallèle

tage de pouvoir écouler le courant de défaut à travers la carcasse et les rails en cas d'incidents électriques. Le problème de sécurité, qui existe pour les trolleybus, est donc inexistant pour les tramways.

Etendue des transformations

La transformation d'un réseau de tramway pour passer d'une alimentation à ligne de contact simple vers une alimentation à ligne de contact double est un problème complexe, qui est toutefois tout à fait soluble grâce à l'emploi d'une méthodologie correcte et rigoureuse. Cette méthodologie doit être basée sur une transformation étape par étape du réseau et des véhicules de manière à ce que l'exploitation puisse continuer de manière continue. Le passage de l'ancien mode d'alimentation au nouveau mode peut alors se faire très rapidement, typiquement en l'espace d'une nuit.

La méthodologie permettant les transformations doit porter sur la transformation de la ligne de contact, sur la transformation des sous-stations par le raccordement du second conducteur de la ligne de contact et l'insertion d'une résistance additionnelle pour la prise de terre, ainsi que sur la transformation des véhicules par l'adjonction et le raccordement de deux perches sur le toit des tramways, par la suppression du pantographe et par l'isolation des polarités d'alimentation du moteur. Pendant la phase intermédiaire, l'alimentation des tramways peut se faire à l'aide d'une seule perche et d'une seule ligne de contact, l'autre perche restant repliée sur le toit du tramway.

Il faut noter que la transformation proposée présente le grand avantage d'unifier complètement le réseau au point de vue du matériel équipant les lignes de contact et du matériel de captage du courant. Par ailleurs, ce système présente une plus grande souplesse d'exploitation, par la possibilité de faire circuler en appoint des trolleybus sur les lignes de tramway.

Calcul techno-économique

Après avoir montré la faisabilité technique de la transformation proposée, ainsi qu'avoir exposé les avantages que l'on peut en attendre, il s'agit maintenant d'en montrer le bien-fondé d'un point de vue économique. Cette démonstration revient à comparer les charges annuelles résultant de la construction et de l'exploitation de lignes de tramway, d'une part pour une alimentation classique par ligne de contact simple, pantographe ou perche simple et retour du courant de traction par les rails, et d'autre part pour une alimentation par ligne de contact double et double perche.

Les charges annuelles se répartissent en dépenses d'exploitation, charges financières, frais de renouvellement et frais de réparation des ouvrages enterrés. Les *dépenses d'exploitation* représentent les matières consommables, les salaires, les frais généraux et les frais d'entretien et de réparation. Les *charges financières* comprennent l'intérêt des capitaux immobilisés correspondant au compte de premier établissement, c'est-à-dire aux frais engagés pour la construction ou pour la modification des installations, l'amortissement des capitaux correspondant au matériel perdu ou endommagé en fin de concession et les impôts relatifs aux capitaux. Les *frais de renouvellement* concernent le matériel exploité, usé ou détérioré.

Les *frais de réparation des ouvrages enterrés* concernent le remplacement des conduites enterrées ainsi que l'installation de systèmes de protection cathodique et de drainage de courant, les réparations des structures métalliques endommagées telles qu'installations de citernes, armatures de fondations, de ponts, etc. Enfin, les manques à gagner en exploitation, occasionnés par les ruptures des conduites et les dommages aux câbles et aux structures, sont pris en compte. Il faut relever que les frais de réparation des ouvrages enterrés, sont supportés par les utilisateurs du sous-sol en zone urbaine, utilisateurs qui sont différents des entreprises de transports publics urbains.

Les *frais de construction,* qui permettent de calculer le compte de premier établissement, comprennent les frais de travaux et d'installation. Dans le cas de la construction d'une nouvelle ligne de tramway, ces frais portent sur les rails, sur l'isolation des mâts, sur la modification des autres structures telles que l'isolation des ponts, sur les lignes de contact, sur l'adaptation des dispositifs de captage des véhicules – pantographe ou perche –, sur l'isolation des moteurs des tramways

Figure 6 Dispositif d'alimentation préconisé des tramways par ligne de contact double et double perche

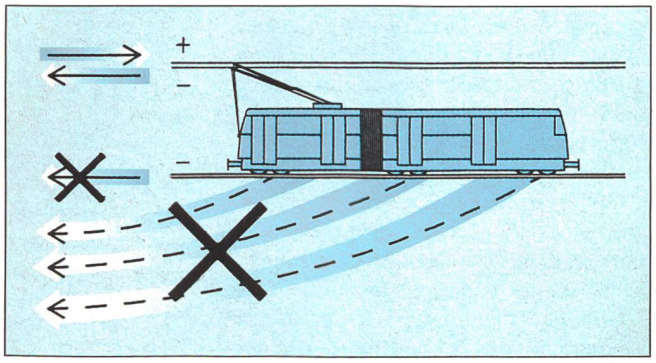


Figure 7 Tramways du réseau de la STAS à St-Etienne (F), alimentés par ligne de contact simple et perche

et sur les sous-stations. Le compte de premier établissement inclut également les *frais généraux financiers,* à savoir les frais d'études et de direction des travaux et les intérêts intercalaires sur le capital engagé pendant la période de construction. Enfin, le compte de premier établissement inclut le fond de roulement qui permet l'exploitation des installations en attendant les premières recettes.

Un calcul techno-économique classique complet permet d'estimer quelles doivent être les recettes permettant de couvrir les charges annuelles dépensées pour la construction d'une installation et pour son exploitation. Dans le cas présent, le but du calcul techno-économique est de comparer deux solutions techniques. Cela revient donc à comparer les charges annuelles correspondant à chaque solution.

Application du calcul techno-économique à des cas concrets

Pour montrer la faisabilité économique de la transformation proposée, le calcul techno-économique exposé précédemment est appliqué au cas de Genève, pour le réseau des tramways des Transports Publics Genevois (TPG). Celui-ci compte actuellement deux lignes de tramway (n° 12 et 13) empruntant au total 10,9 km de voies à double sens (figure 8).

Le premier calcul consiste à comparer les charges annuelles résultant de l'exploitation du réseau actuel par rapport aux charges annuelles générées par la transformation de ce réseau existant et par son exploitation sous sa forme transformée.

Un deuxième calcul permet de tenir compte des extensions prévues pour le réseau des tramways genevois à court et à moyen terme. Ces extensions consistent à construire des nouveaux tronçons de voies à double sens pour une longueur totale d'environ 7,8 km.

Enfin, un troisième calcul permet de tenir compte de la construction future du métro léger dans l'agglomération genevoise. Le projet du métro léger prévoit des véhicules fonctionnant sur des voies étroites de type tramway. La ligne actuellement prévue pour le métro léger, à savoir Meyrin–Annemasse, empruntera en partie des lignes existantes de tramway et nécessitera la construction d'environ 15,2 km de voies supplémentaires à double sens. Le tableau I résume ces trois cas d'application du calcul techno-économique.

Les données chiffrées qui ont été introduites pour le calcul techno-économique ont été obtenues grâce aux excellents contacts que les auteurs ont avec les différents organismes compétents, à savoir: Canton de Genève, Ville de Genève, Services Industriels de Genève. D'autres données proviennent d'entreprises spécialisées dans les travaux relatifs à la construction de lignes de tramway et de trolleybus. Les données fournies par ces entreprises ont été confirmées par les intervenants cités précédemment. Enfin, les données relatives à l'immobilisation des capitaux correspondant au compte de premier établissement sont les suivantes: amortissement en 20 ans à un taux d'intérêt annuel de 6%.

L'histogramme de la figure 9 illustre, pour les trois cas décrits précédemment, les charges annuelles correspondant d'une part, à l'exploitation du réseau des tramways avec une alimentation par pantographe, et d'autre part à la modification du système d'alimentation et à l'exploitation avec des véhicules équipés de double perche. Les charges annuelles tiennent compte notamment de l'intérêt des capitaux immobilisés des comptes de premier établissement, ainsi que des frais de réparation des ouvrages enterrés pour le remplacement de conduites (1/3 de 4000 m/an à 600 fr./m), pour les fouilles ponctuelles (50 fouilles/an à 5000 fr. chacune) et pour la mise en place de systèmes de protection cathodique pour un montant de 100 000 fr./an. Les longueurs, quantités et montants unitaires de réparations effectuées chaque année ont été indiquées par les Services Industriels de Genève et par les entreprises qui les effectuent.

La première constatation, extrêmement favorable, est que la transformation de l'existant se solde par une diminution de 86% des charges annuelles, soit un montant de plus de 1 700 000 fr./an. Cette constatation est fondamentale, car contrairement à Genève qui a décidé pour des raisons qui lui sont propres d'étendre à neuf un réseau de tramways presque entièrement démantelé, ce qui justifie les calculs techno-économiques selon les cas des figures 9, *b* et 9, *c*, la plupart des communautés urbaines ont conservé soigneusement l'infrastructure de leurs réseaux de tramways et se retrouvent dans le cas de la figure 9, *a*, limité à la seule transformation de l'existant. Les résultats selon figure 9, *b* et 9, *c*, tenant compte des extensions sont encore plus démonstratifs en valeur absolue; les économies sur les charges annuelles se montent respectivement à 3 300 000 fr./an et 6 400 000 fr./an.

Figure 8 Rames de tramways bi-caisses des Transport Publics Genevois dans les rues basses de Genève

	[km]	Cas *a*	Cas *b*	Cas *c*
Transformation des lignes actuelles (N° 12 et 13)	10,9	X	X	X
Extension à moyen terme (sections Stand, Palettes, Acacias, Sécheron et Grand-Lancy)	7,8		X	X
Extension à long terme (métro léger)	15,2			X
Longueurs totales en km des lignes à double sens	**33,9**	**10,9**	**18,7**	**33,9**

Tableau I Cas d'application du calcul techno-économique

a transformation des lignes existantes
b transformation des lignes existantes et extension à moyen terme
c transformation des lignes existantes et transformation à long terme (métro léger)

Champs d'induction magnétique et champs électriques

Alors que les lignes de transport de l'énergie électrique à haute tension ont fait l'objet de nombreuses études relatives aux champs d'induction magnétique et aux champs électriques que ces lignes produisent, ce domaine est rarement abordé en ce qui concerne les lignes d'alimentation des transports publics urbains. Cela est paradoxal, puisque dans le premier cas les lignes électriques aériennes survolent principalement des champs et que leur influence sur les êtres humains est faible voire inexistante. Ce n'est bien évidemment pas le cas des transports publics urbains.

Une ligne de tramway ou de trolleybus peut être assimilée à un ensemble de conducteurs portés à différents potentiels et dans lesquels circulent différents courants selon le cas. Il est possible de calculer, dans ces conditions, l'intensité des champs d'induction magnétique et des champs électriques qui sont ainsi générés, notamment au niveau des utilisateurs des transports publics ainsi alimentés ainsi qu'au niveau des passants dans le voisinage des lignes de tramway et de trolleybus.

Les graphiques de la figure 10 illustrent les résultats d'un tel calcul. La figure 10, *a* indique que l'intensité du champ d'induction magnétique est réduite d'un facteur 10 lorsque l'on passe du mode d'alimentation par lignes de contact simple au mode d'alimentation par lignes de contact double. La figure 10, *b* montre la variation de l'intensité du champ électrique, cette intensité diminue d'environ 50% du côté de la ligne de contact de polarité négative.

Les valeurs absolues des champs ainsi calculés restent en deçà des valeurs limites édictées par divers organismes [6–8] à l'issue de campagnes de mesure, par exemple de type épidémiologique (Irpa, OFEFP et pré-normes Cenelec). Il faut néanmoins remarquer que l'innocuité des champs correspondant à ces valeurs limites n'a, pour l'instant, pas été entièrement démontrée et que l'état actuel des connaissances demeure assez lacunaire dans ce domaine.

Par ailleurs, la diminution observée des champs d'induction magnétique et des champs électriques dans le cas de l'alimentation par lignes de contact doubles va dans le sens des recommandations de l'Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (OFEFP/Buwal) selon lesquelles les immissions doivent être réduites dans un but de prévention grâce à des mesures techniques à la source [7].

La diminution dans une part importante des champs d'induction magnétique et des champs électriques générés par les dispositifs d'alimentation des lignes de transports publics urbains ne sont pas actuellement une raison suffisante pour opter pour l'un ou l'autre des modes d'alimentation. Néanmoins, elle est de nature à soutenir considérablement l'alimentation des tramways par ligne de contact double, du fait que les valeurs limites édictées ne pourront à l'avenir que diminuer et devenir plus sévères en fonction des nouvelles recherches et découvertes qui seront faites.

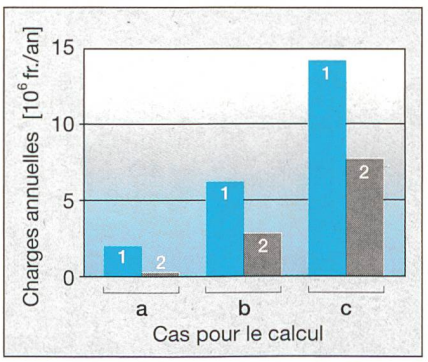


Figure 9 Comparaison des charges financières

Comparaison des charges annuelles représentant les frais de construction et les frais d'exploitation des lignes de tramways des TPG en fonction de leur mode d'alimentation

1 ligne de contact simple et pantographe ou simple perche
2 ligne de contact double et double perche
a transformation des lignes existantes
b transformation des lignes existantes et extension à moyen terme
c transformation des lignes existantes et transformation à long terme (métro léger)

Synthèse des avantages et inconvénients

Parmi les *avantages* du système d'alimentation préconisé des tramways peuvent être énumérés:

- coût de premier établissement inférieur lors de nouvelles constructions ou d'extensions de réseaux existants,
- charges annuelles (frais fixes et frais variables) inférieures aussi bien lors de nouvelles constructions ou d'extensions de réseaux existants que lors de la seule transformation d'un réseau existant donné,
- uniformisation et simplification des lignes de contact,
- uniformisation du système de captage de courant, qui devient identique pour tous les véhicules (tramways et trolleybus),
- normalisation du système d'alimentation par la mise en pratique d'un concept unique, en lieu et place des deux concepts actuels qui sont à plusieurs égards incompatibles et que l'on s'efforce de faire cohabiter,
- possibilité de faire circuler en appoint des trolleybus sur le parcours des tramways,
- augmentation de la sécurité des personnes et des choses,
- études et travaux relativement importants à entreprendre, d'un niveau technique assez élevé, bienvenus dans le contexte conjoncturel actuel avec à la clef, non seulement aucune dépense, mais au contraire des économies pour la collectivité,
- suppression pure et simple des courants de traction de retour, source pernicieuse de problèmes techniques et onéreux de corrosion des canalisations publiques (eau, gaz, électricité, etc.),
- diminution considérable des perturbations électromagnétiques néfastes pour les équipements électroniques et dont l'effet est encore inconnu sur les organismes vivants.

Parmi les *inconvénients* sont à mentionner:

- les désagréments inévitables dus aux travaux de transformation des lignes de contact, désagréments qui peuvent être

réduits quasiment à néant pour les usagers par une planification rigoureuse,
- la faiblesse des perches par rapport au pantographe aussi bien aux plans mécanique qu'électrique.

En ce qui concerne le dernier point mentionné ci-dessus comme inconvénient, à savoir la faiblesse des perches par rapport au pantographe, il y a lieu de relever plusieurs considérations:

Les trolleybus et les tramways soutirent à la ligne de contact une intensité d'environ 500 A. Les tramways à double-caisse accouplés fonctionnent avec deux pantographes et l'intensité soutirée à chaque pantographe reste donc la même, à savoir 500 A. Les nouveaux tramways à triple-caisse équipés d'un seul pantographe soutirent une intensité double, c'est-à-dire 1000 A qui, bien que de courte durée, commence à devenir importante eu égard à la capacité thermique de la ligne de contact. En effet, la capacité thermique d'une ligne de contact de 107 mm^2 Cu, qui est celle couramment utilisée dans tous les réseaux, est en régime permanent d'environ 350 A.

Cela dit, il y a également lieu de signaler qu'en ce qui concerne le pantographe, on en est de nos jours à la troisième ou quatrième génération et que les améliorations techniques, aussi bien au plan mécanique qu'au plan électrique, ont été importantes au fil des ans. En ce qui concerne les perches, elles sont depuis longtemps pratiquement les mêmes, bien que là aussi des améliorations aient été faites; les perches normales sont capables de soutirer un courant permanent de 350 A et un courant de pointe de 1000 A durant une trentaine de secondes. Il est clair que des maisons spécialisées seraient certainement capables de développer des perches en utilisant des matériaux comme par exemple la fibre de carbone en lieu et place des fibres de verre actuellement utilisées, ainsi que les prises de courant proprement dites de manière à ce qu'elles soient capables d'absorber des courants plus importants. Cela dépend évidemment du marché potentiel, car si pour une cinquantaine de perches on ne peut manifestement pas investir des sommes importantes pour la recherche et le développement, la question se poserait différemment pour le marché potentiel qui représenterait la totalité des transports publics électriques de Suisse.

L'inconvénient mentionné peut donc aussi être interprété comme un avantage dans la mesure où un marché suffisamment important justifierait les recherches, études et travaux de réalisation d'un prototype puis de perches en série, ce qui constitue un travail de relativement haute technologie et ce qui pourrait donc finalement être considéré de nos jours comme un problème bienvenu à résoudre à plusieurs points de vue.

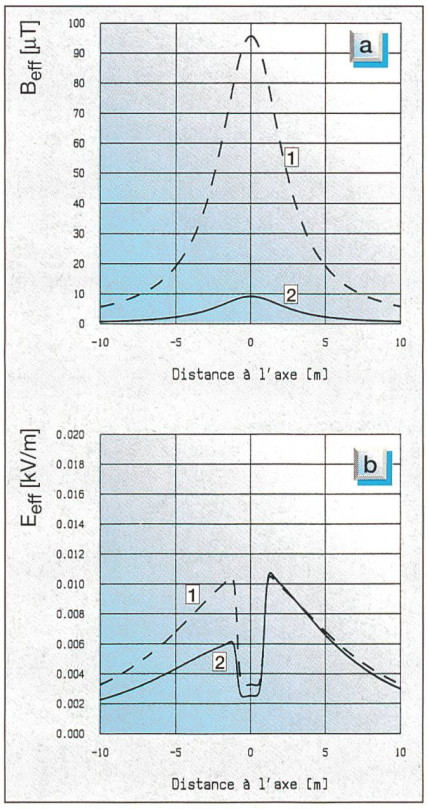


Figure 10 Champs électromagnétiques générés par les systèmes d'alimentation des tramways et des trolleybus dans le véhicule

1 ligne de contact simple
2 ligne de contact double
a champs d'induction magnétique B_{eff} (valeurs efficaces)
b champs électriques E_{eff} (valeurs efficaces)

Conclusions

Le cheminement du courant de retour des installations de chemins de fer en général a toujours été un problème dès le début de l'électrification à partir du moment où l'on a décidé d'utiliser l'un ou les deux rails comme conducteurs de retour du courant à la sous-station d'alimentation. Ces problèmes sont allés en croissant, compte tenu de l'augmentation des puissances de traction, et ils ont toujours posé et posent à plus grande raison de nos jours des problèmes de différentes natures, à savoir problèmes d'influence électromagnétique sur les câbles de télécommunication et de télécommande ainsi que d'une manière plus générale sur l'environnement, et problèmes de corrosion électrochimique qui se manifestent de manière aiguë lorsque ces courants de retour sont des courants continus comme dans le cas des tramways.

Les CFF sont conscients de ces problèmes, preuves en sont les publications qu'ils ont faites dans ce domaine et qui sont mentionnées dans la bibliographie du présent article, ainsi que les dispositions prises variant d'un endroit à un autre, en fonction de concepts particuliers inhérents aux problèmes précis se présentant à chaque fois.

S'agissant de transport public à courant continu, le présent article propose un nouveau concept qui permet d'éradiquer à la source la totalité des problèmes inhérents au retour des courants de traction. En effet, les phénomènes de corrosion électrochimique, et tout particulièrement ceux provoqués par les courants de traction de retour, causent des dommages considérables aux diverses structures métalliques, conduites enterrées ou structures de ponts qui se trouvent à proximité des lignes de tramway.

Les mesures à prendre, en application à ce nouveau concept, sont diamétralement opposées dans leur principe à celles qui consistent habituellement à observer les courants de traction de retour et leurs effets sur tous les ouvrages métalliques souterrains du sous-sol urbain, puis à tenter de remédier au coup par coup à l'aide d'installations ponctuelles de protection cathodique et de drainage de courant, ainsi que par la réparation et le remplacement de toutes les conduites et de tous les ouvrages dégradés. En réalité, c'est la communauté, prise au sens large, qui provoque et répare ces dégâts. Cette attitude paraît difficilement acceptable, même si les services et organismes qui provoquent les dégradations ne sont pas les mêmes que ceux qui les réparent.

Les mesures proposées dans le présent article sous-entendent une remise en question des connaissances sur le fonctionnement réel des réseaux de tramways, ainsi que l'opportunité d'améliorer ces connaissances et les technologies qui sont sous-jacentes. Les calculs techno-économiques démontrent que des économies substantielles de l'ordre de 1 700 000 fr./an sont déjà possibles simplement en transformant l'existant. Ces calculs et ces valeurs sont appliquées au cadre de Genève, pour les lignes 12 et 13 actuelles.

A partir de là, toute extension du réseau améliore le bénéfice de l'opération en diminuant le compte de premier établissement des nouvelles constructions de lignes et surtout en éliminant complètement les charges annuelles dues aux réparations des dégâts causés par les courants de traction de retour et dues à l'installa-

tion des systèmes de protection cathodique et de drainage de courant, etc. A moyen et long terme, les économies sont doublées à quadruplées par rapport à celles engendrées par la simple transformation de l'existant.

Comme corollaire aux avantages déjà mentionnés, il faut relever la diminution par un facteur 10 de l'intensité des champs d'induction magnétique et la réduction de moitié de l'intensité des champs électriques générés par les conducteurs d'alimentation électrique des lignes de tramway grâce à l'adoption du nouveau système d'alimentation.

En conclusion, le passage au nouveau système d'alimentation est une opportunité pour les exploitants de réseaux de transports publics urbains et pour la communauté en règle générale, pour améliorer les connaissances et les technologies relatives à ces modes de transport tout en réalisant des économies substantielles au plan financier.

Bibliographie

[1] *M. Lörtscher:* Gezielte Rückstromführung in Bahnstromanlagen – Erdungsverhältnisse und Magnetfelder bei einphasigen Bahnanlagen, ein stets aktuelles Bahnstromthema. Bull. SEV/VSE 87(1996)21, S. 19–27.

[2] Raccordement ferroviaire Genève–Aéroport: Prévention contre les perturbations électromagnétiques. Publication CFF 1er arrondissement (1985).

[3] *M. Aguet, U. Cavalli, M. Ianovici, H. Sauvain, B. Schaedeli et Ch. Zufferey:* Impact électromagnétique de liaisons à haute tension en site urbain. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à haute tension, Session 1984, 29 août au 6 septembre, n° 36–07.

[4] *U. Cavalli, L. Salperwyck et P. Pauchard:* Transports publics et économies d'énergie – alimentation électrique de trolleybus. Bull. ASE/UCS 82(1991)19, p. 22–26.

[5] *U. Cavalli, L. Salperwyck, M. Stalder, F. Stalder et P. Pauchard:* Elektrische Speisung der Trolleybusse – Die heute gültigen Vorschriften sollten geändert werden. Bull. SEV/VSE 85(1994)1, S. 32–40.

[6] Magnetically induced currents in the human body. IEC-EDF (1995), ISBN 2-8318-0000-5.

[7] Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder – 2. Teil: Frequenzbereich 10 Hz bis 100 kHz. Buwal: Schriftenreihe Umwelt Nr. 214, 1993.

[8] Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world. ENV 50121-2, 1996.

[9] Loi fédérale du 24 juin 1902 concernant les installations électriques à faible et à fort courant. OF 734.0: Installations électriques.

[10] Ordonnance sur les installations électriques des chemins de fer du 5 décembre 1994 (OIEC).

[11] Directives d'application de l'Ordonnance sur les installations électriques des chemins de fer (OIEC). RS 734.42, AB-VEAB, du 31 mai 1995.

[12] Commentaires concernant l'Ordonnance sur les installations électriques des chemins de fer (OIEC). RS 734.0, KOM-VEAB, du 14 septembre 1995.

[13] Directives pour la protection contre la corrosion provoquée par les courants vagabonds d'installations à courant continu. Commission de corrosion de la SSC Zurich, C3f, édition 1995.

Rückströme in Tramstromanlagen besser kontrollieren

Speisung, Erdungsverhältnisse, Streuströme und elektromagnetische Felder in Gleichstrom-Traktionsnetzen

Nach der frühen Elektrifizierung der Bahnen war die Rückstromführung bei Bahnstromversorgungen stets ein grosses Problem; es ist auch heute noch nicht auf zufriedenstellende Art gelöst. Bei den meist einphasigen Anlagen werden die Rückströme über die Gleise und das Erdreich geleitet, mit der Folge, dass sie sich weiträumig und praktisch unkontrollierbar in der Umgebung verteilen (Fig. 1 und 2). Speziell bei den öffentlichen elektrischen, mit Gleichstrom gespeisten Verkehrsmitteln ist dies ein gravierendes Problem, da die Streuströme nicht nur elektromagnetische Störungen, sondern auch kostspielige Korrosionsschäden verursachen.

In diesem Artikel wird ein neues Speisekonzept erläutert, welches erlaubt, durch eine definierte Rückstromführung – wie schon bei Trolleybussen – die störenden Streuströme bereits an der Quelle zu verhindern (Fig. 3–7). Technoökonomische Berechnungen hinsichtlich der öffentlichen Verkehrsmittel der Stadt Genf wurden für verschiedene Fälle durchgeführt; sie zeigen, dass die vorgeschlagene Modifikation des Tramstromnetzes Einsparungen von mehreren Millionen Franken pro Jahr gestatten würde; Erweiterungen des vorhandenen Netzes würden zusätzliche Einsparungen mit sich bringen (Fig. 8 und 9, Tab. I). Zusätzlich könnten mit dem vorgeschlagenen Konzept die durch die Tramstromversorgung verursachten elektromagnetischen Felder erheblich reduziert werden (um Faktor 10 bei den Magnetfeldern und um rund 50% bei den elektrischen Feldern, siehe Fig. 10) und damit Fragen der elektromagnetischen Beeinflussung, deren Grenzwerte heute noch zur Diskussion stehen, entschärft werden.

ETG SEV/ASE

Connaissez-vous l'ETG?

La Société pour les techniques de l'énergie de l'ASE (ETG) est un *Forum national* qui s'occupe des problèmes actuels des systèmes d'énergie électrique dans le cadre global de toutes les formes de l'énergie. En tant que *société spécialisée de l'Association Suisse des Electriciens* (ASE), elle se tient à la disposition de tous les spécialistes et utilisateurs intéressés du domaine des techniques de l'énergie.

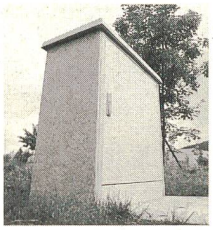
Pour de plus amples renseignements et documents, veuillez prendre contact avec l'Association Suisse des Electriciens, Luppmenstrasse 1, 8320 Fehraltorf, téléphone 01 956 11 11.

Die Verteilung von Energie im Niederspannungsbereich ist jetzt noch schöner geworden.

Funktionalität, schlichtes modernes Design, und natürlich Qualität waren die wichtigsten Kriterien bei der Gestaltung der Kabelverteilkabine FLORIDA.

Das Resultat kann sich sehen lassen. Als Standardausführung ist sie in grauem Sichtbeton, geschliffen oder in geschliffenem Jurasplit erhältlich. Auf Kundenwunsch aber auch in anderen Ausführungen.

Alle Ausführungen wirken dank der gradlinigen Form, dem rundum vorstehenden Dach und den farblich abgestuften Türrahmen und Türen ausgesprochen leicht, klassisch und doch modern. Und das Schönste: FLORIDA Kabelverteilkabinen erhalten Sie zu einem Preis, der sich ebenfalls sehen lässt.



Seit mehr als 50 Jahren sorgen unsere Trafostationen und Kabelverteilkabinen für den nötigen Energie-Nachschub

ABB Proelektra AG
Herbergstrasse 21
9524 Zuzwil
Tel. 071 / 944 22 22
Fax 071 / 944 22 36

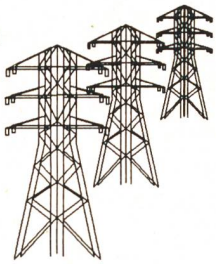
ABB

ZET

ZIMMERLI ENERGIE - TECHNIK

Schutzsysteme

- Analysen
- Zustandsaufnahmen
- Einstellungen
- Inbetriebsetzung



- Prüfung mit mobiler Messanlagen für:
  - Generatoren
  - Transformatoren
  - Schaltanlagen

Dienstleistungen

- Projektleitung
- Projektierung
- Beratung
- Bewertung/Expertisen
- Machbarkeitsstudien
- Bestimmung Restlebensdauer technischer Anlagen
- Netzanalysen
- Störanalysen
- Alternativenergien

Büro Poschiavo: 082/5 19 43
Fax: 082/5 19 43

Büro Mühlethal: 062/751 69 51
Fax: 062/751 60 68

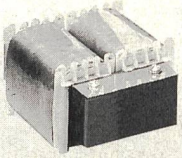
Hotline: 077/47 07 80
24-Stunden-Service

Transformatoren

Lagerprogramm und kundenspezifische Lösungen

ISO 9001 zertifiziert

- Sicherheits/Steuer/Trenntransformatoren
- Gleichspannungsstromversorgung
- Netz- und Glättungsdrosseln ausführbar mit Fe/Ferrit/Fe-Pulverkernen



fragen Sie uns an: Tel. 01-953 21 21

Lapp-Textima AG, CH-8335 Hittnau,
Fax 01-953 21 29

LAPP-TRANSFORMATOREN

Technische Beschichtungen

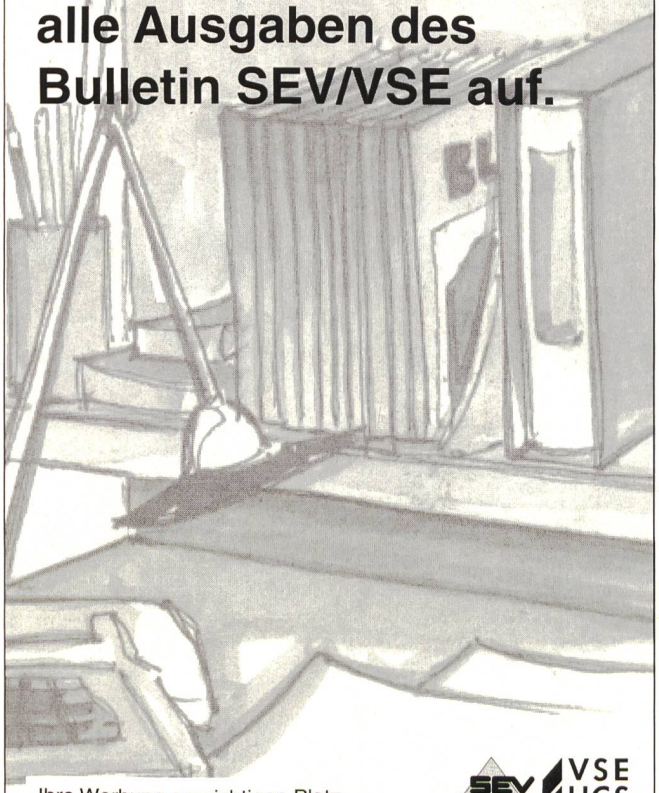
- Chemie-Korrosionsschutz
- Elektrische Isolationen
- Antihaft-/Gleitbeschichtungen
- Hochtemperatur-Beschichtungen

EPOSINT

Kunststoffwerk, CH-8505 Pfyn/TG
Telefon 052 765 21 21, Fax 052 765 18 12

Verlangen Sie unsere Dokumentation

40% der Leser bewahren alle Ausgaben des Bulletin SEV/VSE auf.



Ihre Werbung am richtigen Platz.
Wir beraten Sie gerne. **Tel. 01/448 86 34**

SEV AGE VSE UCS