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: 82 (1991)

Heft: 19

Artikel: Transports publics et économies d'énergie : alimentation électrique de trolleybus

Autor: Cavalli, Ugo / Salperwyck, Luc / Pauchard, Pierre

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903016

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: 08.08.2025

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

Transports publics et économies d'énergie – alimentation électrique de trolleybus

Ugo Cavalli, Luc Salperwyck et Pierre Pauchard

Des reflexions et calculs théoriques montrent qu'il est possible de réaliser des économies d'énergie électrique sur les pertes d'alimentation dans les caténaires des réseaux de trolleybus. Ces nouvelles conceptions ont été confirmées par des essais en vraie grandeur réalisés sur le réseau des transports en commun de Fribourg (TF). Le mode de faire préconisé par cette étude correspond entièrement aux directives du Conseil fédéral contenues dans le programme «Energie 2000» pour une utilisation rationnelle de l'électricité.

Theoretische Berechnungen und Überlegungen zeigen, wie beim Betrieb von elektrischen Netzen öffentlicher Verkehrsmittel durch geeignete Massnahmen elektrische Energie gespart werden kann. Diese neuen Vorstellungen wurden überprüft durch Messungen im Versorgungsnetz der Verkehrsbetriebe der Stadt Freiburg (TF). Die empfohlenen Massnahmen entsprechen vollständig den Richtlinien des Bundesrates zum Programm «Energie 2000» für eine rationelle Anwendung der elektrischen Energie.

Adresses des auteurs

Ugo Cavalli, ing. él. SIA, et *Luc Salperwyck*, ing. él. dipl. INPG, Elec-Engineering SA – Ingénieurs-Conseils, 6, ch. de la Fruitière, 1239 Collex-Genève, et 22, rue Juste-Olivier, 1260 Nyon, et *Pierre Pauchard*, ing. él. ETS, Chef de la section des installations électriques GFM/TF, 3, rue de Pilettes, 1700 Fribourg.

Réflexions préliminaires

Le schéma classique d'un réseau de trolleybus, tel que défini par les ordonnances et directivces en vigueur, est illustré en figure 1, *a*. Chaque section d'alimentation est reliée à une seule sous-station, est indépendante et est isolée du reste du réseau en un point de coupure omnipolaire. Un tel réseau est dit *en antenne*. Sur ce type de réseau, le trolleybus tire le courant d'une seule sous-station à la fois.

Il est techniquement envisageable de boucler électriquement les sous-stations, comme le montre la figure 1, *b*. Sur ce type de réseau, le courant tiré par un trolleybus est fourni par plusieurs sous-stations simultanément; la contribution respective de chaque sous-station est fonction de plusieurs paramètres, et notamment des tensions à vide, des résistances internes des sous-stations et des résistances des caténaires (variable en fonction de la position du consommateur de courant). Un tel réseau est dit *en parallèle*.

Un trolleybus se déplaçant sur un réseau dont les sous-stations sont bouclées (réseau parallèle) engendrera des pertes moindres que le même trolleybus se déplaçant sur le même réseau dont les sous-stations ne sont pas bouclées (réseau antenne), ce qui entraîne des économies d'énergie.

Dans la première partie de l'article, les raisonnements et calculs théoriques sont faits pour un parcours entier tel que défini par la figure 1, *c*. Les lignes de contact sont supposées dou-

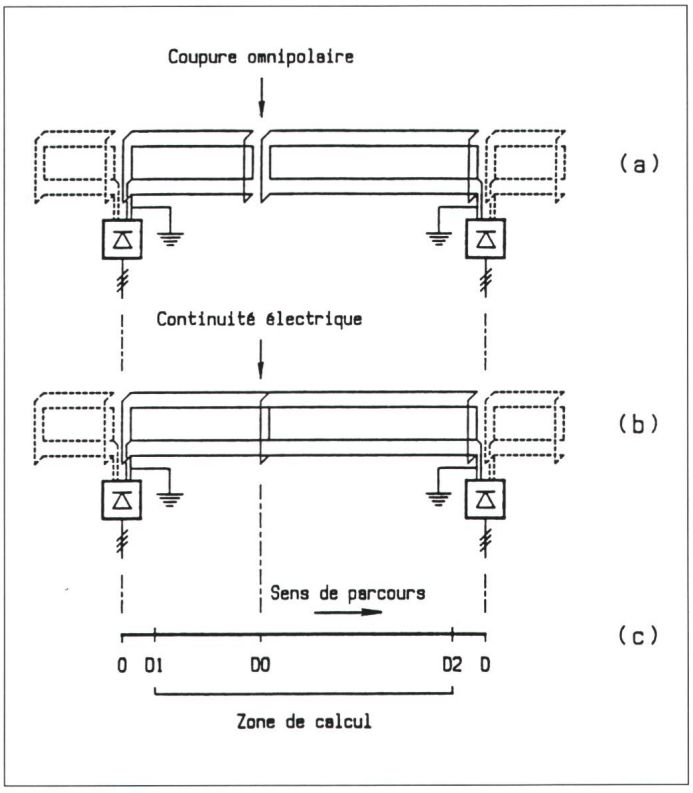


Figure 1
Description schématique d'un réseau d'alimentation de trolleybus

a réseau en antenne
b réseau en parallèle
c dimensions du parcours
0 origine de l'abscisse à l'endroit de la première sous-station
D abscisse de la deuxième sous-station
D0 abscisse du point de sectionnement omnipolaire
D1 abscisse de début de calcul
D2 abscisse de fin de calcul

bles et régulièrement pontées, et la vitesse du trolleybus est supposée constante. Dans la deuxième partie, les résultats de la vérification expérimentale sont présentés afin de confirmer la théorie.

Approche théorique

Postulats de calcul

Pour décrire le fonctionnement électrique d'un trolleybus, il sera utilisé successivement deux postulats.

Le premier postulat repose sur une observation mécanique des énergies mises en jeu lorsque le trolleybus effectue un trajet. A condition que la vitesse et le poids du véhicule soient identiques entre deux parcours successifs, on peut écrire que la puissance mécanique et électrique nécessaire au véhicule est identique entre les deux parcours. Cette puissance dépend, outre des deux paramètres vitesse et poids, de la pente du parcours, des coefficients de frottement de roulement et de pénétration dans l'air et des dimensions du véhicule. Moyennant l'hypothèse supplémentaire que la pente du parcours est constante, la puissance mécanique et électrique nécessaire au trolleybus sera considérée comme constante sur tout le parcours (*postulat $P_t = cte$*).

Le second postulat repose sur une observation de la commande électronique asservie du moteur électrique des trolleybus modernes. Cette commande règle l'intensité (de courant) absorbée par le moteur électrique, en fonction de la valeur instantanée de divers paramètres: vitesse, puissance nécessaire, et dans une certaine mesure, tension disponible. Ainsi, l'intensité apparait comme la grandeur électrique caractéristique du fonctionnement. En pratique, sous réserve de certaines conditions (tension suffisamment élevée, puissance nécessaire élevée), l'évolution de l'intensité constitue un phénomène relativement reproductible de cas en cas. Aussi est-il possible de considérer, de manière simplifiée mais réaliste, que la valeur de l'intensité absorbée par le moteur a une valeur constante sur tout le parcours (*postulat $I_t = cte$*).

Par définition, le premier postulat suppose que les performances mécaniques restent identiques d'un essai à l'autre. Par contre, le second postulat induit le fait que le trolleybus consomme une puissance proportionnelle à la tension disponible (qui dépend elle-même du courant tiré et du schéma de l'alimentation électrique); c'est-à-dire que les performances mécaniques (accélération, vitesse, charge transportable) sont fonction de la tension disponible et du bouclage ou non-bouclage des sous-stations.

Postulat P_t = cte

On peut représenter la puissance perdue dans les caténaires en chaque point d'un parcours, selon que les sous-stations sont en antenne (figure 2, *a*) ou en parallèle (figure 2, *b*). En intégrant ces pertes *dans les caténaires sur un parcours,* on obtient les expressions littérales des *énergies perdues* dans les modes antenne (E_a) et parallèle (E_p):

$$E_a = \frac{U_0}{2R_{lin}v}\left\{U_0 \ln\left|\frac{D_0(D-D_0)}{D_1(D-D_2)}\,\frac{U_0+f(D_0)}{U_0-f(D_0)} \cdot \frac{U_0-f(D_1)}{U_0+f(D_1)}\,\frac{U_0-f(D-D_2)}{U_0+f(D-D_2)}\,\frac{U_0+f(D-D_0)}{U_0-f(D-D_0)}\right| - 2[f(D_0)-f(D_1)-f(D-D_2)+f(D-D_0)]\right\} - \frac{P_t}{v}(D_2-D_1) \qquad (1)$$

$$\text{avec } f(x) = \sqrt{U_0^2 - 4R_{lin}P_t x}$$

$$E_p = \frac{U_0^2}{2R_{lin}v}\ln\left|\frac{D_2}{D_1}\,\frac{D_1-D}{D_2-D}\right| - \frac{P_t}{v}(D_2-D_1) - \frac{U_0}{2R_{lin}v}\left[2\sqrt{R_{lin}P_tD}\,\ln\left|\frac{g(D_2)-\sqrt{R_{lin}P_tD}}{g(D_1)-\sqrt{R_{lin}P_tD}}\right| + U_0\ln\left|\frac{g(D_2)-U_0}{g(D_2)+U_0}\,\frac{g(D_1)+U_0}{g(D_1)-U_0}\right| + U_0\ln\left|\frac{g(D_2)+2\sqrt{R_{lin}P_tD}+U_0}{g(D_2)+2\sqrt{R_{lin}P_tD}-U_0} \cdot \frac{g(D_1)+2\sqrt{R_{lin}P_tD}-U_0}{g(D_1)+2\sqrt{R_{lin}P_tD}+U_0}\right|\right] \qquad (2)$$

$$\text{avec } g(x) = \sqrt{U_0^2-4R_{lin}P_tx(1-x/D)} - 2\sqrt{R_{lin}P_t/D}\,x$$

v	vitesse du trolleybus
U_0	tension à vide des sous-stations
P_t	puissance consommée par le trolleybus
R_{lin}	résistance linéique de caténaire
D	abscisse de la deuxième sous-station
D_0	abscisse du point de sectionnement omnipolaire
D_1	abscisse de début de calcul
D_2	abscisse de fin de calcul

Pour le parcours qui a été utilisé dans les essais en grandeur réelle, et qui est décrit à la figure 3, le rapport E_p/E_a évolue comme indiqué en figure 4. Les valeurs de E_p/E_a sont comprises entre 0,44 et 0,62.

Postulat I_t = cte

Les figures 5, *a* et 5, *b* indiquent les pertes dans les caténaires en chaque point d'un parcours, selon que les sous-stations sont en antenne ou en parallèle. L'énergie perdue en mode antenne (E_a) et parallèle (E_p) s'exprime par (3) et (4):

$$E_a = \frac{R_{lin}I_t^2}{v}\left(D_0 - \frac{D_1^2}{2} - \frac{D_2^2}{2} + DD_2 - DD_0\right) \qquad (3)$$

$$E_p = \frac{R_{lin}I_t^2}{v}\left(\frac{D_1^3}{3D} - \frac{D_1^2}{2} - \frac{D_2^3}{3D} + \frac{D_2^2}{2}\right) \qquad (4)$$

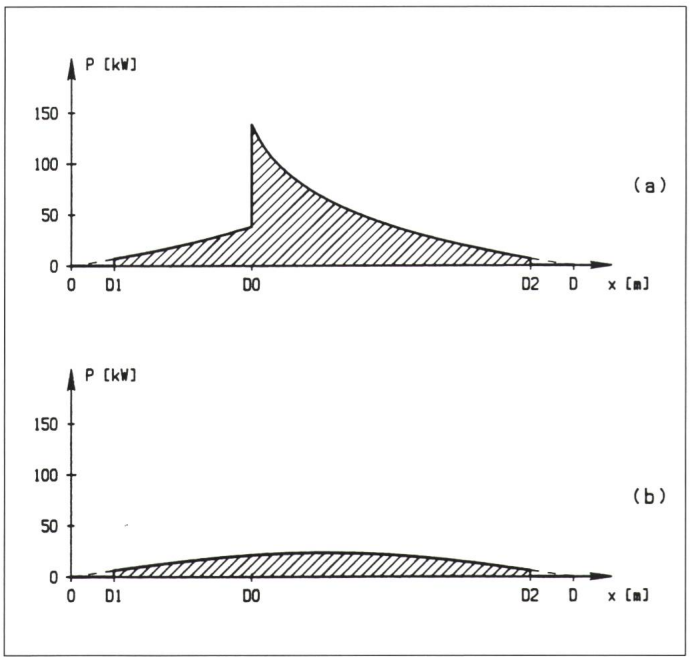


Figure 2
Pertes dans les caténaires
Postulat: *puissance* trolleybus constante
a réseau en antenne
b réseau en parallèle
P puissance perdue dans les caténaires
x distance de parcours
D0, D1, D2, D voir légende de la figure 1

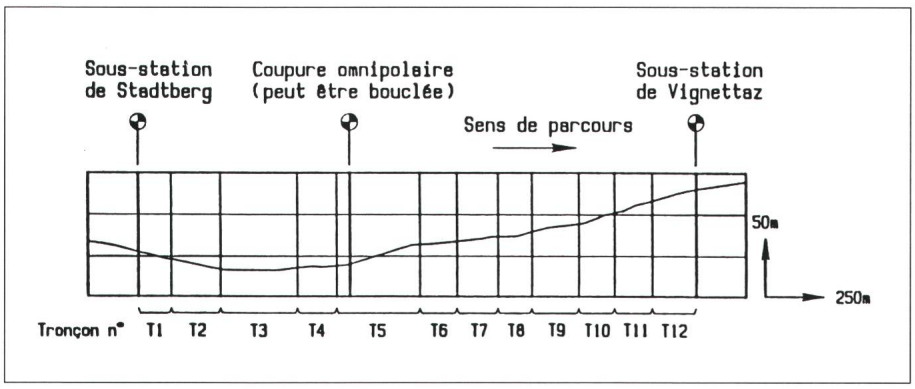


Figure 3 Description du parcours des essais
Profil en long du parcours
Répartition des tronçons *T1 – T12*

Le rapport des pertes E_p/E_a ne dépend que des dimensions du parcours. Pour le parcours étudié, ce rapport vaut environ 0,62.

Résumé des calculs

En partant de l'un ou de l'autre des deux postulats vus ci-avant, on peut calculer le potentiel d'économie en énergie.

La figure 6 représente, dans le cas du postulat I_t = cte, les économies d'énergie réalisables (en % de l'énergie fournie dans le mode antenne), en fonction du rendement de l'alimentation. Ces courbes montrent, par exemple, que la transformation en parallèle d'un réseau d'alimentation en antenne ayant un rendement de 70% apportera une économie d'énergie de l'ordre de 11%.

Les calculs théoriques basés sur les deux postulats différents donnent des résultats homogènes et comparables. Le premier postulat s'applique de façon plus immédiate aux anciens trolleybus, pour lesquels la commande consistait en un rhéostat, et pour lesquels le moteur consommait l'intensité de courant voulue, fonction de la puissance nécessaire et de la tension disponible. Le second postulat correspond mieux au fonctionnement des trolleybus modernes, à commande électronique.

Vérification expérimentale

Les essais ont consisté en la détermination expérimentale des pertes dans les caténaires engendrées par la circulation d'un trolleybus (figure 7) entre les deux sous-stations de Vignettaz et de Stadtberg du réseau de trolleybus des Transports en commun de Fribourg. Ces pertes ont été déterminées dans deux cas différents de fonctionnement du réseau au point de vue du schéma d'alimentation des lignes de contact, à savoir:

– Alimentation des caténaires en antenne avec coupure omnipolaire des lignes de contact approximativement au milieu entre les deux sous-stations. Dans ce cas, lors du parcours du trolleybus entre les deux sous-stations, celles-ci l'alimentent indépendamment l'une de l'autre sur la portion de caténaire entre la sous-station respective et la coupure omnipolaire des lignes de contact approximativement au milieu.

– Alimentation de la caténaire en parallèle après pontage électrique de la coupure omnipolaire. Dans ce cas, lors du parcours du trolleybus entre les deux sous-stations, celles-ci alimentent le trolleybus simultanément sur toute la longueur du parcours.

La figure 3 montre le profil en long correspondant au parcours. Celui-ci a été décomposé en douze tronçons

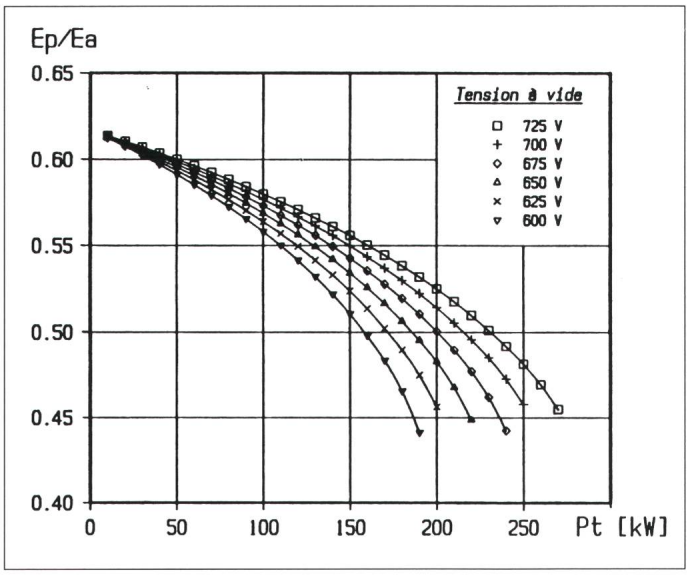


Figure 4
Comparaison des pertes dans les modes parallèle et antenne
Postulat: *puissance* trolleybus constante
E_p pertes dans les caténaires en mode parallèle
E_a pertes dans les caténaires en mode antenne
P_t puissance consommée par le trolleybus

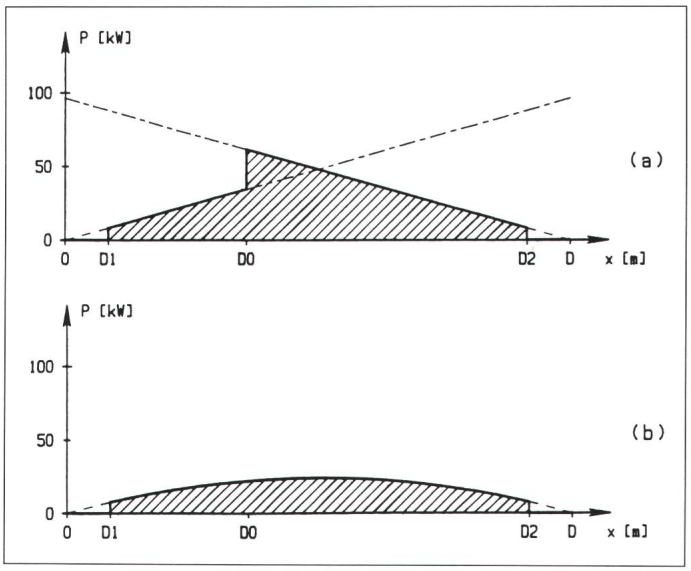


Figure 5
Pertes dans les caténaires
Postulat: *intensité de courant* du trolleybus constante
a réseau en antenne
b réseau en parallèle
P puissance perdue dans les caténaires
x distance de parcours
D0, D1, D2, D voir légende de la figure 1

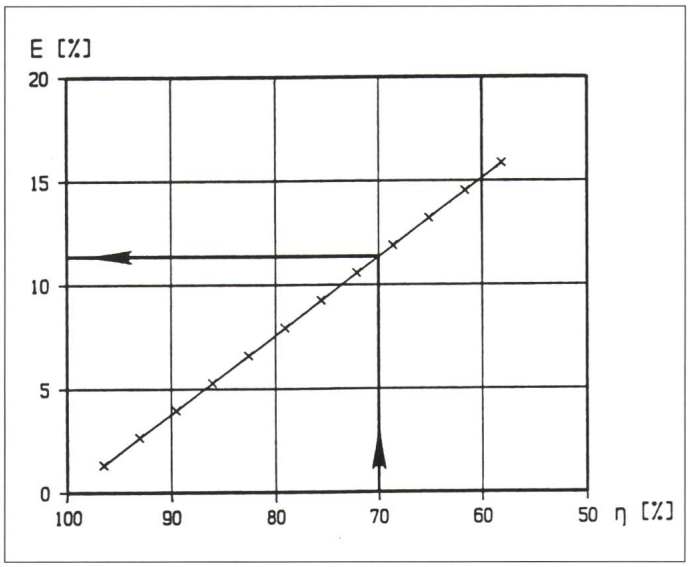


Figure 6
Graphique du potentiel en économie d'énergie
E économie d'énergie apportée par la transformation du schéma électrique du mode antenne en mode parallèle
η rendement des caténaires (énergie consommée par le trolleybus, en pour-cent de l'énergie totale fournie par les sous-stations)

T1–T12, chaque tronçon correspondant à *un départ et à un arrêt*.

Pour déterminer les pertes engendrées par la circulation d'un trolleybus, des postes de mesures (figure 8) ont été disposés dans les deux sous-stations et dans le véhicule. Chaque poste de mesure était équipé d'un enregistreur graphique de la tension, du courant et de la puissance, ainsi que d'un compteur d'énergie. Les pertes ont été calculées par soustraction de l'énergie consommée par le trolleybus de l'énergie fournie par les sous-stations.

Dans l'intervalle d'une nuit (21/22 mars 1991), il a été procédé à quatre séries d'essais, chaque série se composant d'un essai en antenne et d'un essai en parallèle. La figure 9 fournit un exemple, numérisé pour des besoins de calcul, d'un enregistrement graphique relevé lors de ces essais.

D'un point de vue temporel, les quatre séries d'essais sont comparables entre elles. Une différence sensible existe entre les durées de parcours pour les essais antenne et parallèle. Cette différence confirme l'observation faite lors des essais par le conducteur et par les occupants du trolleybus; en effet, il a été nettement observé que le trolleybus accélerait et roulait plus vite (environ 5 km/h de plus) lorsque les sous-stations étaient en parallèle.

D'un point de vue énergétique, le calcul du rapport des pertes dans les caténaires entre les modes parallèle et antenne, effectué entre tous les essais, indique une valeur moyenne de 0,9. La théorie prévoyait un rapport correspondant de l'ordre de 0,5 (hypothèse P_t = cte) à 0,6 (hypothèse I_t = cte).

L'incertitude des mesures montre que les pertes d'énergie que l'on peut calculer à partir des résultats souffrent d'une imprécision du même ordre de grandeur que les valeurs elles-mêmes. Toutefois, l'analyse des autres valeurs calculées, notamment le rendement, montre que les erreurs de mesures, si elles sont sensibles, ne représentent pas la seule explication de cette différence entre théorie et pratique.

Pour expliquer les résultats précédents, il a pu être mis en évidence le fait que le trolleybus avait un comportement différent selon que l'alimentation était en mode antenne ou en mode parallèle. Ce fait, déjà suggéré par l'analyse temporelle, est confirmé par la lecture de la puissance consommée par le trolleybus sur les enregistrements graphiques. A titre d'exemple, toutes choses étant par ailleurs comparables, on obtient les valeurs suivantes:

- Essai antenne n° 3 (A3): P_t = 198 kW
- Essai parallèle n° 3 (P3): P_t = 240 kW

Par conséquent, il y a lieu de transformer la valeur de l'énergie des pertes dans les caténaires en mode parallèle (E_p) en une nouvelle valeur (E_p') correspondant à un trolleybus consommant la même puissance qu'en mode antenne, valeur qui sera comparable à l'énergie des pertes dans les caténaires en mode antenne (E_a). Pour les essais A3 et P3, les résultats sont les suivants:

- valeurs brutes : $E_p/E_a = 0{,}97$
- valeurs corrigées : $E_p'/E_a = 0{,}62$

Le résultat après transformation a le même ordre de grandeur que ce que laissaient prévoir les calculs qui étaient basés sur les mêmes valeurs (en mode antenne et en mode parallèle) pour la puissance P_t et le courant I_t respectivement:

- théorie (P_t = cte) : $E_p/E_a = 0{,}48$
- théorie (I_t = cte) : $E_p/E_a = 0{,}62$

La transformation, qui a permis de comparer les modes parallèle et antenne en pratique, confirme donc la théorie énoncée précédemment.

Les résultats expérimentaux montrent donc que le bouclage des sous-stations d'un réseaux de trolleybus permet de réaliser des économies d'énergie en diminuant les pertes dans les caténaires, tout en augmentant la puissance que développent les véhicules. Ces résultats sont particulièrement remarquables, puisqu'ils mettent en évidence un gain simultané des per-

Figure 7 Véhicule utilisé pour les essais
Trolleybus bi-mode des TF

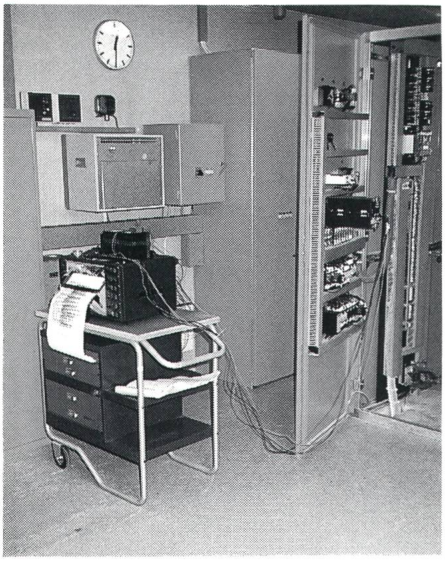


Figure 8 Appareillage de mesure
Connexion à l'armoire de commande de la sous-station de Vignettaz

formances et du rendement de l'alimentation électrique.

Conclusions

Les réflexions et calculs théoriques exposés dans cet article montrent qu'en adoptant le bouclage d'un réseau de trolleybus plutôt que son exploitation en antenne telle que prévue par les normes, il est possible de réduire les pertes dans les caténaires en les multipliant par un facteur de 0,5 à 0,6 tout en réduisant la chute de tension en ligne d'au moins 50%. Au-delà des économies sur les pertes (frais variables), on peut également dire que cette manière de procéder engendre des économies sur les investissements (frais fixes), ce qui pourrait être aisément mis en évidence par une étude techno-économique.

Les essais effectués les 21/22 mars 1991 sur les réseaux des Transports publics de Fribourg (TF) ont confirmé la théorie, à savoir que l'on peut réaliser des gains d'énergie par la simple modification du schéma électrique d'alimentation des trolleybus. Cette modification est effectuée sans supplément de coût sur un réseau bien conçu. L'économie d'énergie ainsi réalisée s'accompagne par ailleurs d'un gain de performance des vehicules (accélération et vitesse).

Une telle modification de la conception des réseaux d'alimentation des trolleybus n'est pas tout à fait conforme au projet de révision des «Ordonnances sur les installations électriques des Chemins de Fer» et aux «Directives pour la protection des structures métalliques contre la corrosion provoquée par les courants vagabonds d'installations à courant continu», en ce qui concerne l'alimentation des trolleybus. Il convient donc, en l'occurrence, d'analyser avec les Offices fédéraux compétents, les dispositions de type légal et normatif en vigueur pour mettre en évidence les contradictions et les obstacles techniques y relatifs qui en découlent.

En effet, suivant l'idée directrice des directives du Conseil fédéral pour une croissance qualitative exprimées dans le programme «Energie 2000», un des objectifs est l'utilisation rationnelle de l'électricité en visant une augmentation qualitative de la valeur ajoutée, un plus large recours au savoir faire, la diminution des obstacles existants (normes), une amélioration systématique des rendements, une approche globale des problèmes, etc.

Il est fait allusion par ailleurs dans ces directives aux connaissances détaillées et lacunaires sur la consommation effective d'équipements et installations électriques, connaissances qui doivent être fondamentalement améliorées par des études, des campagnes de mesures ainsi que des projets pilotes. C'est dans ce contexte que l'étude et les essais effectués constituent un exemple concret permettant d'attirer l'attention sur les relations entre les lois et les normes relatives à l'utilisation rationnelle de l'électricité.

L'étude et les essais effectués, qui ont mis par ailleurs en évidence outre les résultats concrets exposés ci-avant un nombre considérable de phénomènes qui méritent d'être mieux connus, s'inscrivent parfaitement dans le programme d'impulsion Ravel (Utilisation rationnelle de l'électricité) lancé par la Confédération (Office fédéral des Questions Conjoncturelles) et dont le champ d'action – transport – ne comporte pour le moment aucun projet d'étude ou de diffusion.

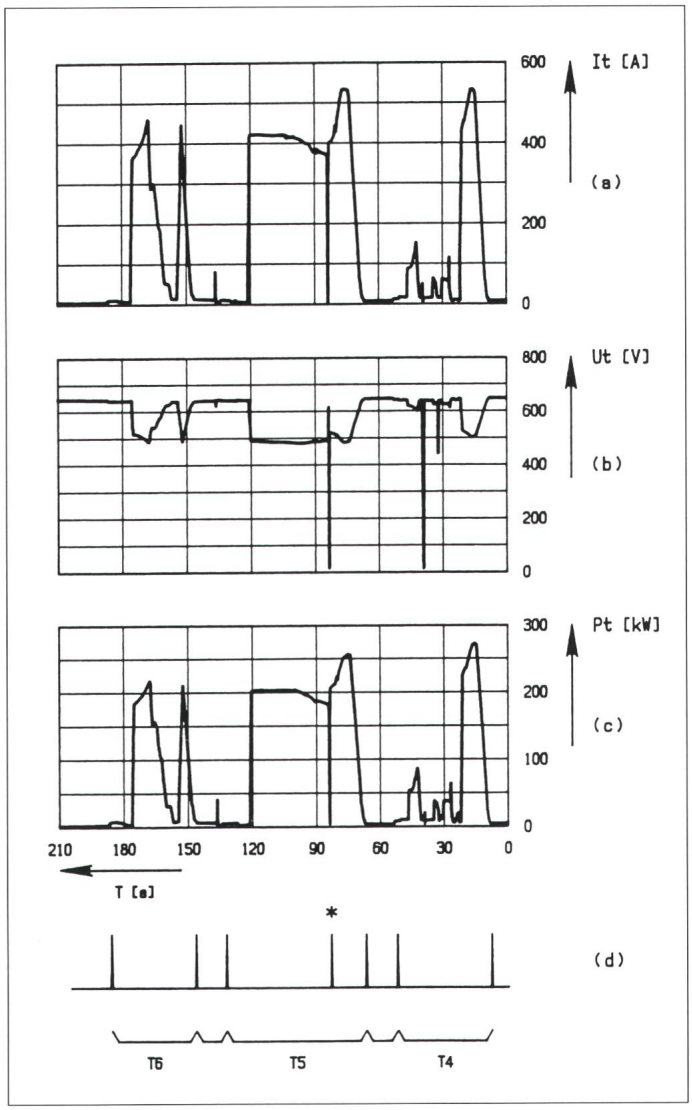
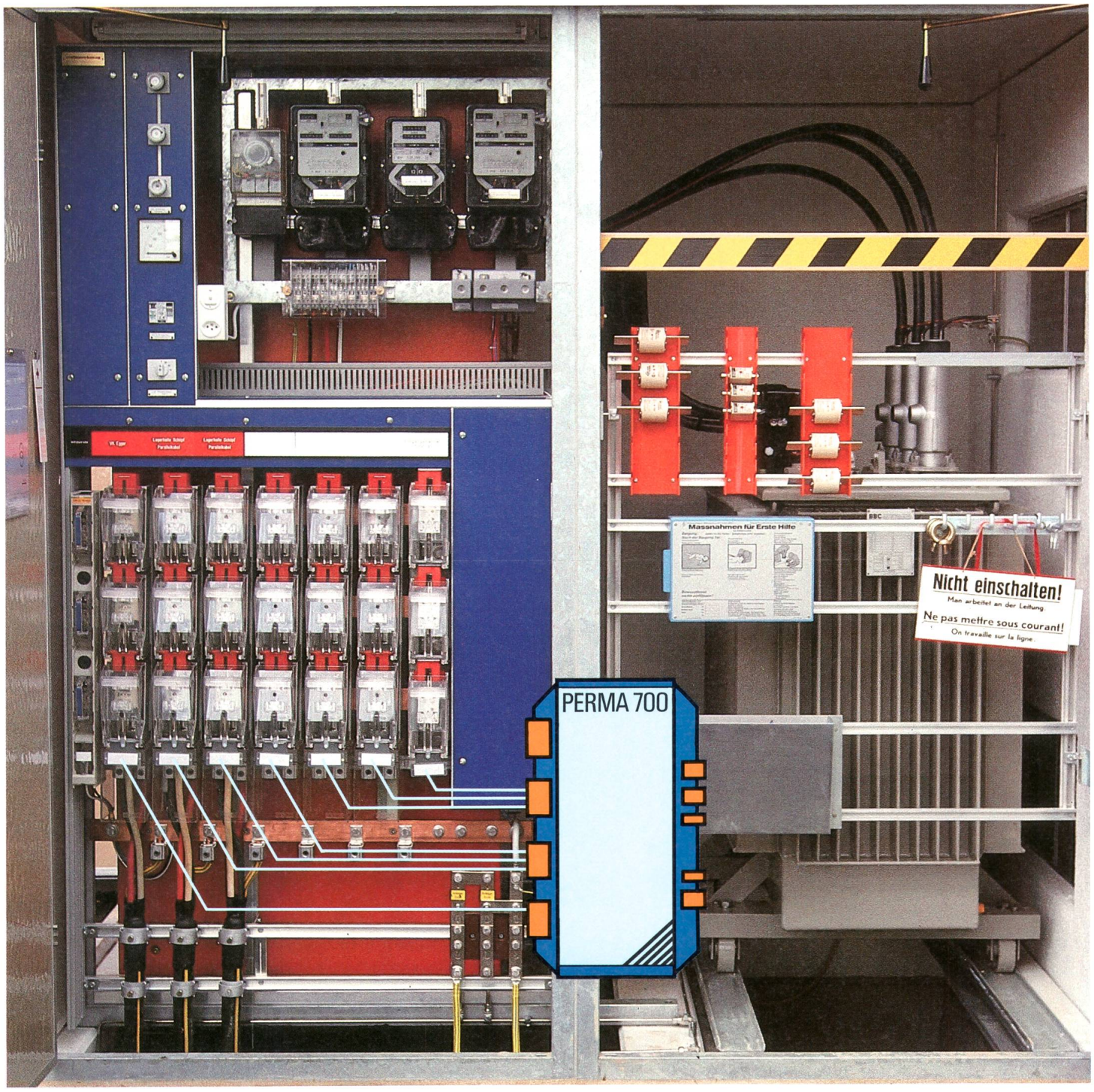


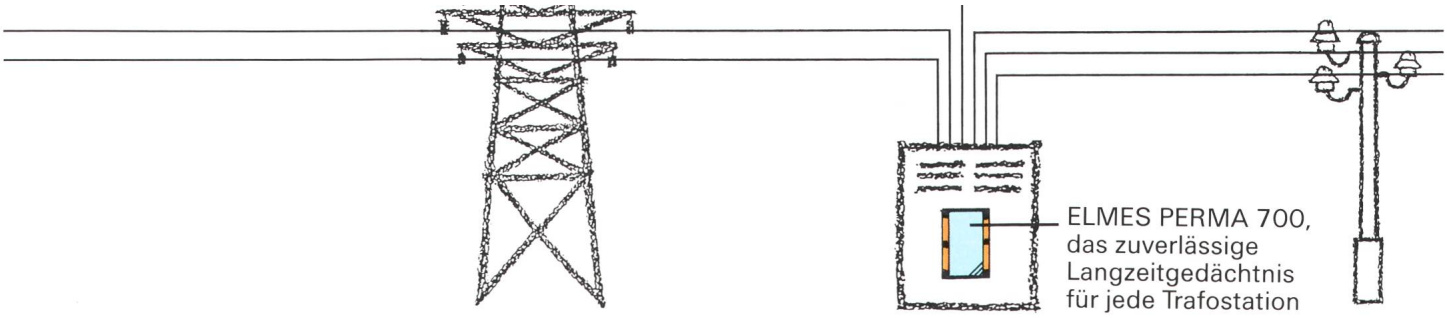
Figure 9
Extrait des enregistrements graphiques
Essais du 21/22 mars 1991 (réseau en antenne)
a intensité de courant I_t consommée par le trolleybus
b tension U_t au niveau du trolleybus
c puissance P_t consommée par le trolleybus
d tops de début et fin de tronçon (*T4* à *T6*), et tops de passage au point de coupure omnipolaire (*)

ELMES PERMA 700

liefert jederzeit aktuelle Messdaten und die lückenlose Jahresstatistik zum Schutz Ihrer Investitionen

- **im Störungsfall**
- **bei der Netzplanung und -erweiterung**
- **für die Netzwartung**





Schluss mit aufwendigen Messkampagnen

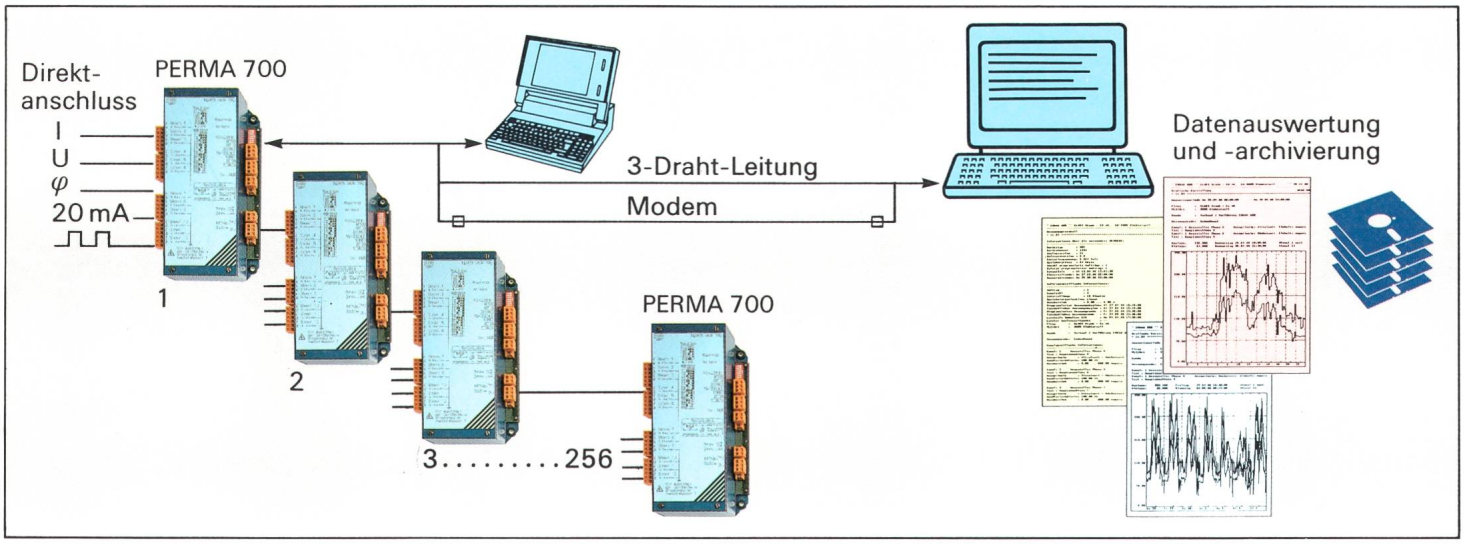
ELMES PERMA wird in Trafostationen fix installiert (bestehende Stationen können einfach nachgerüstet werden). Es erfasst und speichert jahrein, jahraus alle von Ihnen gewünschten Daten.

Die dazu passende Software CODAM 770 erlaubt eine einfache Geräteprogrammierung und Datenauswertung:
- Momentanwertanzeige
- Grafische Darstellung
- Übertragungsmöglichkeit über Modem
- Messwert-Export in ASCII-File und in CODAM-Software.

Die Lösung: ELMES PERMA 700

Direktanschluss:	Keine Messumformer nötig. Einfacher und günstiger.
Netzwerkfähigkeit:	Beliebige Anzahl elektrische Eingänge.
Speichergrösse bis 1 MByte:	Mehr als ein Jahr Speicherkapazität für lückenlose Messung und Archivierung.
Übertragung durch RS 232:	Messdatenübertragung via Modem oder 3-Draht-Leitung, aber auch vor Ort mit Laptop.
Ansprechzeit 10 ms:	Dank schneller Ansprechzeit verfügen Sie bei Reklamationen über fundierte, beweiskräftige Unterlagen.
Auftragskonzept:	Sie bestimmen, was, wie, wann, wieviel gemessen werden soll. ELMES PERMA 700 akzeptiert bis zu 16 verschiedene, umfangreiche Messaufträge.

Ihr Nutzen: jederzeit aktuelle Messdaten



Nicht frankieren
Ne pas affranchir
Non affrancare

Geschäftsantwortsendung Invio commerciale-risposta
Correspondance commerciale-réponse

Ja, ELMES PERMA 700 interessiert uns.
Senden Sie uns weitere Unterlagen.

Firma _____

Name _____

Abteilung _____

Strasse _____

PLZ/Ort _____

Telefon - intern _____

ELMES STAUB + CO AG
Systeme für die Messtechnik
Postfach

8805 Richterswil

ELMES STAUB + CO AG
Systeme für die Messtechnik
Bergstrasse 43
CH-8805 **Richterswil**/Sch
Telefon 01-784 22 22
Tx 875 525, Fax 01-784 64

ELMES VERKAUFS GMBI
Mess- und Regeltechnik
Homburger Landstrasse 471
D-6000 **Frankfurt/Main** 5
Telefon 069-548 60 60
Fax 069-54 24 77

Vertriebs- und Servicestellen
in über 40 Ländern.