

Un anniversaire dans le domaine des lignes de contact

Urs Wili, Furrer+Frey

1. Comment tout a commencé

Il y a cent ans, les CFF connaissaient déjà une crise énergétique. Pendant la Première Guerre mondiale, il était difficile de se procurer suffisamment de charbon pour faire fonctionner les locomotives à vapeur.

La Suisse avait donc lancé un premier programme d'électrification dans le but de réduire le plus rapidement possible sa dépendance vis-à-vis des sources d'énergie étrangères.

Les deux jeunes ingénieurs Emil Furrer et Arnold Frey y ont vu l'opportunité de créer une entreprise qui construirait aussi bien les lignes aériennes de transport nécessaires que les lignes de contact pour les chemins de fer. La construction de lignes de transport était déjà une routine, mais pour les caténaires, il y avait toujours un besoin d'innovation et d'optimisation de certains composants ou de systèmes complets de caténaires.

2. Qu'est-ce qui était différent à l'époque ?

Les isolateurs

Les premières électrifications avaient encore dû tenir compte de la résistance limitée à la traction et au cisaillement de la porcelaine.

On trouve encore aujourd'hui les isolateurs typiques sur les consoles et les jougs ainsi que les bras de rappel avec les isolateurs diabolos. On connaissait toutefois les chaînes d'isolateurs utilisées dans la construction de lignes de transport, auxquelles les conducteurs étaient suspendus aux pylônes. Les jeunes ingénieurs ont également appliqué ce principe aux caténaires (image 1).

Comment suspendre la caténaire ?

De manière générale, les jeunes fondateurs de l'entreprise se sont efforcés de trouver des solutions simples et peu coûteuses. C'est ainsi qu'ils réussirent à construire une console à partir de simples fers en U coudés, qui pouvait être montée sur des mâts en profilés d'acier à l'aide de quatre simples vis à crochet ou sur des mâts en béton ou en bois à l'aide de deux étriers en U. La console désignée par "Type I" dans le catalogue de l'entreprise était née. En 1929, un brevet a été délivré pour cela en Suisse, en 1931 également en Italie et en Belgique. La revendication du brevet y est décrite comme suit :

" La présente invention se rapporte à une console servant de point de suspension aux fils conducteurs des lignes électriques et se compose de deux fers profilés, qui à leurs extrémités libres, se trouvent superposés et assemblés sur une certaine partie de leur longueur, tandis qu'à la partie restante, les fers sont écartés convenablement. "

Ce que cela signifie concrètement ne devient clair qu'en observant le dessin (image 2).

Furrer+Frey a également utilisé ces consoles en 1931 pour la première ligne électrifiée en Belgique. Il ne s'agissait pas d'une ligne de la SNCB, mais de la *Société du Chemin de fer électrique de Bruxelles - Tervueren*. La tension était de 1500 V (image 3). La SNCB n'a commencé à électrifier ses lignes que trois ans plus tard.

Les consoles I sont encore visibles aujourd'hui sur de nombreuses lignes ferroviaires privées et continuent d'être installées. Le câble porteur est suspendu sous les fers profilés et bras de rappel est fixé directement au mât à l'aide d'un isolateur.

Quelle peut être la portée maximale ?

Même si l'électrification a été réalisée pour ne plus dépendre du charbon étranger, les coûts d'investissement ont joué un rôle. L'un des facteurs de coûts est le nombre de structures porteuses nécessaires avec leurs fondations. Plus la portée peut être grande, moins il faut de poteaux.

En 1929, l'entreprise Furrer+Frey a obtenu un brevet pour la caténaire inclinée, dite "oblique". Dans ce type de construction, le câble porteur est fixé directement au poteau situé à l'extérieur de la courbe. Grâce à cette construction économe en matériel, il est devenu rentable ou du moins supportable d'électrifier des lignes avec des rayons de courbure très étroits.

En 1932, Furrer+Frey avait déjà construit 330 km de caténaires inclinées. A la fin de la guerre, cette longueur était passée à 761 km. Durant la même période, l'entreprise a construit environ 980 km de caténaires verticales ; cela peut souligner l'importance du type de construction incliné.

Lors de l'électrification Bâle - Delémont en 1931, Furrer+Frey a pu équiper un champ de pose avec une caténaire inclinée entre Liesberg et Bärschwil, afin que les CFF puissent se convaincre eux-mêmes de ses propriétés. (image 4). L'essai a été concluant et la caténaire inclinée est devenu le type de construction idoine pour diverses électrifications entreprises à titre de mesure de création d'emplois et de réduction de la consommation de charbon.

Le domaine d'application typique de la caténaire inclinée se situe dans les courbes d'un rayon d'environ deux cents à cinq cents mètres. Comme le montre le graphique de l'image 5, les portées de la caténaire inclinée peuvent être environ deux fois plus grandes que celles de la caténaire verticale.

Le type de construction tordu a fait ses preuves et, pendant la guerre qui a éclaté en 1939, les méthodes de construction économes en matériaux étaient très appréciées. Ainsi, lors des travaux d'électrification de guerre entrepris en 1945, des lignes de contact inclinées ont été systématiquement construites sur des poteaux en bois dans les courbes. En y regardant de plus près, on en trouve encore des traces aujourd'hui, comme entre Eglisau et Koblenz, où des caténaires inclinées avaient été construites à l'origine sur des poteaux en bois. En 1968, les poteaux en bois ont été remplacés par des poteaux en acier, fixés aux socles Hunziker de 1945. Ce n'est qu'une vingtaine d'années plus tard que la caténaire inclinée a été transformée en une caténaire N verticale. Les poteaux en acier ont été conservés sur les socles Hunziker, mais des consoles à tubes « caténaire N » ont été installées. Celles-ci ont toutefois dû être fixées tout en haut des mâts, car l'encombrement de la caténaire verticale est plus élevé que celui de la caténaire inclinée. Des retenues ont été installées à mi-portée sur de nouvelles fondations afin de respecter les valeurs limites du désaxement du fil de contact.

Comment maintenir constante la tension des conducteurs lorsque la température varie ?

Pour un captage de courant « noir », c'est à dire sans étincelles, même à grande vitesse, il est important que le fil de contact soit suspendu à une hauteur aussi constante que possible au-dessus de la voie et que cette hauteur ne varie pas beaucoup, même sous l'influence de l'effort de contact du pantographe. Pour y parvenir, les fils de contact ont été et sont toujours régularisés dans la plupart des chemins de fer et suspendus à des câbles porteurs, qui sont parfois également régularisés.

Parmi les caténaires avec câble porteur, nous distinguons, outre le type de construction incliné déjà mentionné, les caténaires semi-régularisées (HN pour *halb nachgespannt*) et les caténaires entièrement régularisées (VN pour *voll nachgespannt*). Dans le cas de la version HN, le câble porteur est amarré de manière fixe, tandis que le fil de contact est régularisé automatiquement, de sorte qu'il reste toujours sous la même tension, indépendamment de la température. Les CFF appellent ce type de construction le type N (câble porteur Non régularisé). Dans le cas du type VN, aussi le câble porteur est régularisé automatiquement, de

sorte que sa flèche (et donc aussi la hauteur du fil de contact) reste toujours la même, indépendamment de la température. Ce type de construction est appelé type R par les CFF (câble porteur Régularisé). Le tableau 1 compare les caractéristiques des trois types de caténaires. Les longueurs des champs de pose, c'est-à-dire la distance entre les tendeurs aux deux extrémités d'un fil ou d'un câble, sont limitées par la plage de température à couvrir et la plage de régulation d'un tendeur à ressort, respectivement la hauteur libre pour le mouvement des contrepoids et la hauteur des colonnes de poids.

Le tableau 2 décrit les caractéristiques de base de différents dispositifs tendeurs et donne en même temps des indications sur la reproduction dans les modèles réduits à l'exemple de maquette en écartement HO du laboratoire d'exploitation ferroviaire à Dübendorf (www.ebl-schweiz.ch).

Pour les types de caténaires des CFF, une demi-longueur de champ de pose, c'est-à-dire la distance entre le tendeur et le point fixe, doit être de 650 m au maximum [1], pour le BLS de 600 m [2].

Plus de caténaires que de voies ?

Pour que le pantographe puisse passer en douceur d'un fil de contact à l'autre, les deux fils de contact sont parallèles sur une courte distance ; ils se chevauchent. Les Anglais ont pour cela le terme concis d'*overlap*. En Allemagne, on utilise le terme plus lourd de *Parallelführung* ou *Parallelfeld*, en France, on parle de *tendeur* ou *sectionnement mécanique* (à la différence du *sectionnement électrique* ou *sectionnement à lame d'air*, qui désigne la séparation électrique de deux secteurs).

Un sectionnement peut avoir une longueur de plusieurs portées. Sur les lignes à grande vitesse allemandes, il s'étend sur cinq portées. En Suisse, on utilise souvent des jougs d'amarrage, ce qui permet de réduire le chevauchement à une seule portée.

A retenir : la longueur réelle de la caténaire est toujours plus grande que la longueur des voies électrifiées. Pour un champ de pose de 1 200 m, la longueur de voie électrifiée n'est que de 1 140 m si l'on utilise des sectionnements à une seule portée avec des jougs d'amarrage. La ligne de contact est donc 5,3% plus longue que la voie électrifiée. Les sectionnements à cinq portées des caténaires Re250 ou Re330 de la DB peuvent atteindre 300 m de long. Le plus long champ de pose y est de 1 200 m. La caténaire est donc 33% plus longue que la voie électrifiée ; en d'autres termes, un tiers de la longueur de la caténaire est "gaspillé". Si l'on veut construire à moindre coût, il faut donc que les champs de pose soient aussi grandes que possible et que les chevauchements soient aussi courts que possible. L'image 6 illustre la structure de base de ces trois types d'équipements tendeurs.

La variation de longueur du conducteur en fonction de la température se calcule comme le produit de la distance par rapport au point fixe (CFF : ≤ 650 m), avec le coefficient de variation de longueur du matériau du conducteur (Cu : 0,000017 par Kelvin) et la variation de température (exemple Suisse : température maximale du conducteur avec réchauffement par le courant 70°C, température ambiante la plus basse -20°C, variation de température 90 K). Avec les chiffres indiqués, on obtient une élongation totale du conducteur à l'endroit du tendeur de 0,99 m.

Avec le rapport habituel de 1:2 pour les palans, les poids font une course de 2 m, avec le rapport de 1:3 des roues à rochet, une course de 3 m, mais, en revanche, la colonne de poids est plus courte.

N'y a-t-il pas de meilleures idées ?

Au fil du temps, plusieurs efforts ont été faits pour réduire les coûts. Deux exemples peuvent être cités ici :

- *Bi-tendeur*. Le fil de contact et le câble porteur d'un sectionnement d'une portée sont fixés des deux côtés du *overlap* à des jougs d'amarrage. Ceux-ci ainsi que les haubans

des mâts doivent être dimensionnées pour la force de traction totale des conducteurs amarrés. Le *bi-tendeur* (image 7) regroupe les jougs d'amarrages des deux côtés en un seul. Les forces de traction des conducteurs des deux côtés de ce joug unique se compensent et il ne doit être dimensionné que pour la traction unilatérale d'un conducteur qui peut se produire pendant le montage. Toutefois, les frotteurs doivent passer sous les amarrages mobiles à une distance suffisante. Ceci est assuré par un fil de contact auxiliaire qui est fixé au câble porteur dans la portée avant le joug, passe sous le joug d'amarrage et est à nouveau fixé au câble porteur dans la portée suivante. L'effort de traction dans ce fil de contact auxiliaire varie avec la température, et, par conséquent, la trajectoire du pantographe est aussi affectée.

- Sectionnement en 1 point. Le sectionnement le plus court, sans chevauchement, est obtenue lorsque le fil de contact qui se termine et le fil de contact qui le remplace se rencontrent uniquement sur une seule structure porteuse commune. Il est particulièrement élégant si à cet endroit l'emplacement des poteaux change de côté. Les fils de contact ne doivent alors pas se croiser. L'image 8 montre une telle application à l'ancienne SZB (aujourd'hui RBS) à Worblaufen datant de 1924. A cet endroit, on passe en même temps de la caténaire de tram sans câble porteur de la gare à la caténaire de la pleine voie avec son câble porteur fixe.

3. Dans le tunnel, l'espace disponible pour la cheminée de la locomotive à vapeur est-il suffisant pour la ligne de contact et le pantographe ?

L'électrification des tunnels existants est particulièrement coûteuse. En règle générale, les voûtes des tunnels sont trop étroites pour les pantographes et trop basses pour les types de caténaires habituels.

Afin de libérer de l'espace lors de l'électrification, la voie a été abaissée autant que possible, la distance d'isolation a été réduite au minimum et l'encombrement de la caténaire a été réduite au détriment de la portée.

Avec le temps, cela s'est avéré insuffisant : des charges par essieu plus élevées appelaient des profils de rail plus grands, des rails soudés nécessitaient des traverses lourdes avec une résistance élevée au déplacement latéral, des vitesses plus élevées exigeaient un ballast plus épais et, si possible, une caténaire à élasticité constante, c'est-à-dire avec un câble en Y.

En réponse, Furrer+Frey a repris une idée française dans les années 1980 et a développé le profil aérien de contact (PAC) jusqu'à ce qu'il soit prêt à être utilisé. Le fil de contact est coincé dans un profilé en aluminium ouvert en bas. Grâce à la grande section, il est possible de renoncer à des feeders supplémentaires et les pertes par effet Joule sont plus faibles. Le PAC étant rigide, le fil de contact n'est pas soulevé par le pantographe, mais reste à une hauteur constante. La position de repos du fil de contact peut donc être inférieure de quelques centimètres à celle d'une ligne de contact élastique et il n'est pas nécessaire de tenir compte d'un soulèvement supplémentaire du fil de contact pour le passage du pantographe. L'image 9 montre un exemple d'un tel tunnel trop petit qui a pu être mis en conformité à l'aide d'un PAC. Les doutes initiaux concernant la vitesse pouvant être atteinte sur une ligne équipée d'un PAC ont pu être rapidement levés. Sur l'installation pilote de Zurich-Opfikon, 105 km/h ont été atteints en 1984, en 2003 l'OFT a accordé l'homologation de type pour 140 km/h et en 2005 pour 160 km/h. Sur la base des résultats des essais réalisés dans le tunnel autrichien de Sittenberg, la même année, le système du PAC, encore amélioré, a obtenu le certificat d'examen UE de la conception du Eisenbahn-Cert allemand pour une vitesse de 250 km/h. Le système du PAC de Furrer+Frey couvre aujourd'hui plus de 6 000 kilomètres de voies dans le monde entier et il a également fait ses preuves dans les dépôts et les ateliers ainsi que sur les ponts élévateurs et tournants.

4. Et qu'en est-il des caténaires ?

L'augmentation constante de la puissance requise par les trains exige des sections de conducteurs plus importantes, même à l'extérieur, et pas seulement dans les tunnels. Cela a été particulièrement marqué lors de l'aménagement de la double voie de la ligne du Lötschberg. Ici, à la fin des années 1970, une grande puissance de transport de courant de la caténaire était requise. Un fil de contact en cuivre de 150 mm² et un câble porteur cuivre-acier de 92 mm² de section avaient été installés sur les rampes du Gothard.

Sur la double voie BLS, non seulement le fil de contact devait avoir une section de 150 mm², mais aussi le câble porteur. Furrer+Frey a développé à cet effet le système VN 78 avec ce que l'on appelle la « console à cadre vélo » qui, d'une part, présente la rigidité nécessaire et, d'autre part, rend le réglage de la position latérale du fil de contact particulièrement simple (image10).

Depuis 1967, les CFF avaient entrepris des essais avec des caténaires entièrement compensées et, à la fin des années 1970, la caténaire R s'était imposée. Là aussi, après des essais initiaux avec des consoles triangulaires sur le modèle de la SNCF, un tube porteur horizontal a été introduit, grâce auquel le réglage du désaxement du fil de contact est possible sans modifier la géométrie de la console. La suspension de l'antibalançant au câble en Y avait certes montré des propriétés de captage marginalement meilleures qu'une fixation rigide, mais représentait un défi pour le réglage de la force de traction dans le câble en Y. Furrer+Frey a modifié la construction de manière que l'antibalançant soit solidement fixé au tube de support par une petite entretoise. En outre, des tubes en acier inoxydable sont utilisés au lieu de tubes galvanisés à chaud, ce qui prolonge la durée de vie.

L'image 11 montre quelques formes de construction typiques de consoles avec différents types de bras de rappel.

5. Conclusion

Les caténaires sont devenues une partie intégrante des chemins de fer performants. Depuis plus d'un siècle, elles ont fait l'objet d'un développement constant. Il en sera de même à l'avenir. La force d'innovation et l'art de l'ingénieur permettent également aux entreprises de taille moyenne de faire leurs preuves dans cet environnement et de trouver des solutions avancées.

Sources :

[1] CFF 0161.1010.0002 Types de lignes de contact pour les nouvelles constructions et les rénovations complètes,

[2] Bases de projet BLS, chapitre 3.10 équipement tendeur.