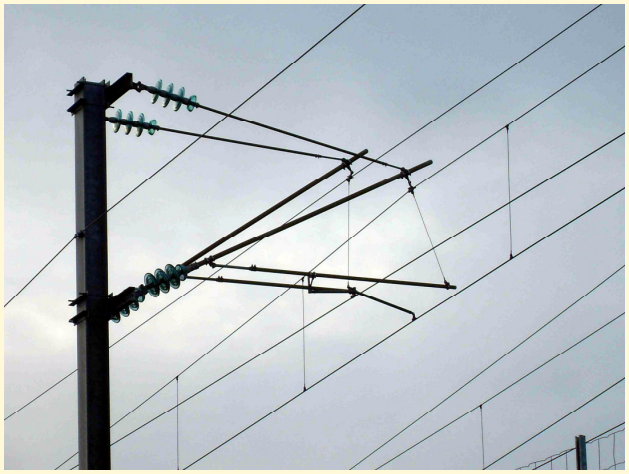
TECHNIQUE

De la ligne de contact à la caténaire

Sur une idée de M Michel Durochat et Gilbert Desplanques, « *docs personnels et avec l'aide de Wikipédia*. »



Ligne de contact 25 kV

Ligne de contact 1,5 kV continu.

Une ligne aérienne de traction électrique est appelée ligne de contact lorsqu'elle ne comporte qu'un ou deux fils de contact (F.C.). La caténaire (du latin *catena*, chaîne) est constituée d'un ou de deux fils de contact suspendus par des pendules à un ou deux câbles porteurs.

Régularité de la distance fil de contact-rail

Le captage du courant aux vitesses élevées nécessite un fil de contact présentant une flèche spécifique entre deux points de suspension consécutifs (portée). Des irrégularités se traduiraient par des discontinuités dans le captage de l'énergie électrique entraînant une dégradation prononcée du matériel (bande d'usure et fil de contact).

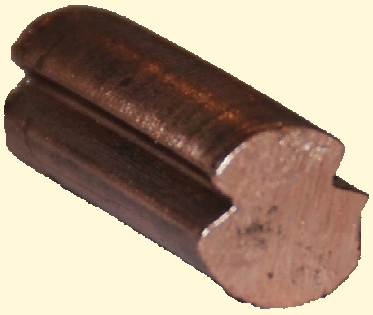
Certaines lignes sont équipées de caténaire simplifiée. Dans les gares de triage et les dépôts où la vitesse est toujours réduite, l'alimentation électrique des trains se fait également par une ligne de contact constituée d'un ou de deux fils.

Câble porteur

Du fait de son poids, un fil tendu entre deux points ne peut pas suivre une ligne droite. Il suit une courbe qu'on appelle une chaînette (en forme de cosinus hyperbolique).

La solution consiste à suspendre le fil de contact, rainuré longitudinalement, à un câble porteur par l'intermédiaire de pendules de longueur variable, suivant le même principe que les ponts suspendus. L'ensemble est tendu par des appareils-tendeurs munis de contrepoids qui exercent une traction équilibrée sur les deux fils et maintiennent une tension mécanique constante pour une plage de température définie (caténaire entièrement régularisée).

Fil de contact avec une griffe et son fil porteur.



Fil de contact

Histoire

Le premier tramway électrique était alimenté par un chariot courant sur deux fils aériens, et relié au tramway par un câble flexible. *(plus loin dans cet article)*

Le mur de la caténaire

Mur de la caténaire.

Le frottement de l'archet sur le fil de contact génère une onde mécanique qui se propage de part et d'autre du point de contact. Pour une tension normale du fil de contact, cette onde se propage à moins de 500 km/h.
Si le **TGV** atteint cette vitesse, le pantographe rattrape l'onde (c'est le phénomène de « Mach », parfois appelé le mur de la caténaire).

Il peut entraîner l'arrachement des caténaires et la destruction du pantographe. C'est l'une des causes à la limitation de vitesse des trains de type TGV. Pour éviter ce phénomène, il faut augmenter la tension du fil, ce qui augmente la vitesse de propagation de l'onde. Cela pose le problème de la résistance mécanique de la caténaire. Un compromis doit être trouvé entre la bonne tenue mécanique de la caténaire et sa bonne conductivité électrique (pour limiter les pertes par effet Joule). *(ci-dessous incident caténaire).*

Outre la tension mécanique exercée sur la caténaire, une augmentation de la vitesse de l'onde a été obtenue (en exploitation) par un raidissement des supports caténaires, et un blocage du pantographe à une hauteur constante (*5,08 m sur les LGV Françaises, mais la butée limite le débattement à 5.28m, donc la caténaire peut-être soulevée de 20cm*).

On réduit également l'amplitude de cette onde en réglant les fréquences de vibration des supports de sorte qu'ils absorbent cette onde. Ces modifications ont permis de dépasser la vitesse de 270 km/h et d'exploiter des lignes à très grande vitesse entre 300 et 320 km/h.

Technique

Électrotechnique

Isolateur verre

Isolateur synthétique

L'armement est le plus souvent sous **tension** et constitué par des consoles et haubans isolés des supports caténaires par des isolateurs en verre, céramique ou matière synthétique, dont la taille varie en fonction de la tension

d´alimentation et des conditions atmosphériques auxquelles ils sont exposés (zone maritime, polluée). La structure de la caténaire dépend profondément de la tension d'alimentation.

Caténaire 1 500v continu Sud-Ouest.

Caténaire 25 kV Dreux en direction de Surdon.

Généralités

Le nombre de conducteurs électriques distribués dépend du type d'alimentation traction, et de la méthode de protection de la carcasse du véhicule.

En Continu, le positif est distribué sur la caténaire (ou autre : troisième rail, etc.), et, pour économiser un conducteur sur les longues distances, le "retour de courant" peut être réalisé grâce aux rails de roulement qui ont un potentiel électrique voisin de 0 V. En effet, le conducteur retour de courant est relativement isolé de la terre pour éviter les courants vagabonds dans le sol et les canalisations proches, mais son potentiel par rapport à la terre est compatible avec la protection des personnes. La carcasse du véhicule peut être :

- au potentiel du rail de retour de courant (tramway, ...),
- ou à la terre via un rail de terre spécial (métro de Londres, ...),

ou isolée (trolleybus).

En ferroviaire, en alternatif, la phase est le fil de contact, le neutre est mis au rail et assure le retour du courant (les effets des "courants vagabonds" sont quasi négligeables en alternatif).

- En Monophasé : la phase à la caténaire, le neutre étant le retour de courant et mis au rail et à la terre.
- En Biphasé : idem, mais on transporte en plus la phase opposée (à 180°) sur un feeder dit "négatif". Le retour de courant, mis à la terre, est donc le "point milieu" du transfo traction.
- En Triphasé "triangle" : on distribue 2 phases (à 120°) sur la caténaire, la 3e phase étant le rail mis à la terre. Solution moins efficace que le montage précédent, mais on déséquilibre moins les phases du réseau amont (réseau RTE en France).
-

En Triphasé "étoile" : 3 phases distribuées sur la caténaire, carcasse au rail et à la terre et au neutre du transfo. Jadis, des locomotives à moteur alternatif avaient été équipées de 3 pantographes à captage vertical. Ce montage est plutôt utilisé sur des systèmes sans aiguillage, comme les ponts roulants, en basse tension, avec des frotteurs.

Courant continu

Caténaire 1 500 V, avec *feeder* de ligne.

À droite une nourrice entre le fil de contact et feeder

Le courant continu a été déployé lors du début de l'électrification du réseau ferroviaire. On trouve par exemple des réseaux en 1 500 V CC. Les courants importants qui circulent dans la caténaire nécessitent des conducteurs plus nombreux et de section plus importante, c'est une caténaire plus compliquée à mettre en œuvre et nécessitant des points d'alimentation (sous-stations électriques) distants de 10 à 15 km.

Sous Station de Labouheyre

Sous Station de la Jame.

En France, ce type de caténaire est essentiellement utilisé sur les réseaux sud-est et sud-ouest (à Paris : départ des lignes gare de Lyon, gare d'Austerlitz, gare Montparnasse, RER C).

Caténaire 1 500 V entre Bois-le-Roi et Fontainebleau.

TGV Duplex sous 1500 v à Montferrand.

La caténaire 3 000 V continu se retrouve en Belgique, au Luxembourg (ligne de Luxembourg à Bruxelles), en Italie, en Espagne ou dans certains pays de l'Est comme la Pologne. Le doublement de la tension limite les pertes d'énergie en ligne à puissance fournie égale, car le courant nécessaire est divisé par deux, et la perte par effet Joule dans les câbles est divisée par quatre.

On trouve aussi des tensions de 600 V à 750 V, par exemple dans des réseaux de tramway, métro et trolleybus.

Caténaire tramway 750 V

Tram à Bordeaux

Courant alternatif industriel

Le 25 kV alternatif monophasé 50 Hz est dorénavant utilisée sur le réseau ferré français et dans d'autres pays comme l'Espagne, la Grande-Bretagne, la Chine, la Russie, l'Italie…. On trouve aussi des variantes: 20 kV et 25 kV 60 Hz au Japon, 25 kv 60 Hz aux États-Unis... On trouve même du 50 kV sur une ligne affectée au transport du charbon aux USA.

Elle est plus simple à mettre en œuvre, ne nécessite des sous-stations électriques espacées que de 50 à 70 km, voire plus avec le 2 x 25 000 V (les pertes d'énergie électrique étant inférieures à celles de caténaires alimentées sous courant continu) et celles-ci sont plus simples (pas besoin de redresser le courant ni de le lisser). Il s'ensuit un coût kilométrique largement inférieur à celui de la caténaire 1 500 V.

En revanche, au droit ou à proximité de certaines sous-stations, une section de séparation de sources d'alimentation est réalisée. Cette section de séparation, non alimentée, a pour but d'éviter le pontage de deux caténaires successives dont les alimentations présentent entre elles des différences de phases (dues au courant alternatif envoyé aux caténaires) par un ou plusieurs pantographes d'une circulation électrique.

En France, les réseaux 25 kV au départ de Paris se trouvent gare du Nord, gare de l'Est et gare Saint-Lazare. Toutes les lignes nouvelles en France sont désormais alimentées sous cette tension également.

La tension plus élevée augmente les contraintes de sécurité électrique, notamment lors des opérations de maintenance.

Courant alternatif basse fréquence

Caténaire 3 000 V courant continu.

Certains pays d'Europe comme la Suisse, l'Allemagne, l'Autriche, la Norvège, la Suède et certaines lignes de la République tchèque, ont adopté une tension de 15 kV alternatif monophasé 16 Hz 2/3.

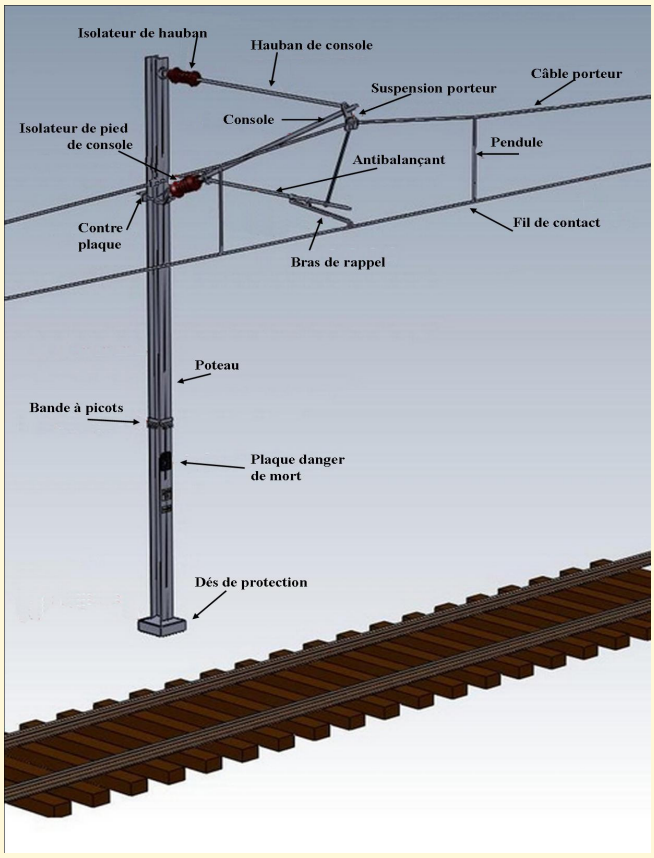
La fréquence plus basse d'alternance (divisée par trois par rapport au réseau électrique national français) permet de limiter les écarts de phase entre le câble d'alimentation et le câble de contact, et simplifie donc leur raccordement sur la caténaire. Elle permet aussi de disposer plus facilement plusieurs pantographes sur les rames de traction sans écart de phase significatif entre les contacts, et de disposer d'une meilleure continuité de l'alimentation de la rame.

De ce fait, les rames de traction ne nécessitent pas leur propre centrale de production d'énergie pour réguler le fonctionnement des moteurs, et les lignes peuvent être empruntées par des rames plus légères. Cependant, cela nécessite des centrales de conversion d'énergie le long de la voie, d'autant plus nombreuses que les pertes en ligne sont plus importantes qu'avec la fréquence normale, même si elles sont limitées par l'utilisation d'une tension élevée.

Alimentation

Pour des raisons d'exploitation et de maintenance, la caténaire est découpée en cantons électriques isolés par des dispositifs de coupure particuliers franchissables par les pantographes.

Le *feeder* est une ligne d'alimentation, fixée sur les poteaux, en opposition de phase avec la caténaire. Il permet de réduire les chutes de tension en ligne et d'espacer les points de connexion de la caténaire au réseau de distribution d'électricité (les sous-stations). Des autotransformateurs permettent de remettre en phase la tension du feeder et celle de la caténaire (technique dite du «2 x 25 000»). La puissance électrique est alors transportée de la sous-station à l'autotransformateur en 50 000V (entre le feeder et la caténaire), tandis que l'autotransformateur délivre la puissance au train en 25 000 V (entre la caténaire et le rail)
Les poteaux de caténaire sont également reliés entre eux par une ligne de mise à la terre.



Reportez-vous sur le site de l'ACTGV. Rubrique : « Technique : Electrique : installation électrique pour un schéma explicatif »

Mécaniques

Régularisation

La régularisation est le maintien de la tension mécanique du conducteur.
La présence de contrepoids, destinés à maintenir une tension mécanique constante dans la caténaire (généralement, pour une plage de régulation de 70°C, s'étendant de –20°C à +50°C), n'est pas systématique.

En effet, en 1 500 V continu notamment, les tirs des caténaires simples (CS), légères (CL) ou de type « fil tram » (un seul ou deux fils de contact, sans porteur ; on parle alors de «LAC» pour Ligne Aérienne de Contact) sont directement ancrés aux supports, sans contrepoids, car la vitesse peu élevée des véhicules permet de compenser au sein du pantographe les différences de hauteur du câble, sans entraîner de chocs sur le câble;

ci-contre caténaire 1 500 v entre Bordeaux et Dax

Tendeur sur poteau 1 500 v CC avec ses contre-poids : Pierroton Sud-Ouest

Positionnement latéral

Vu de dessus, le fil de contact d'une caténaire ne forme pas une ligne droite, mais un zigzag. Cette disposition est destinée à éviter l'usure ponctuelle de l'archet du pantographe. Schéma ci-dessous lors d'un sectionnement disjoncteur (s) ouvert (s).

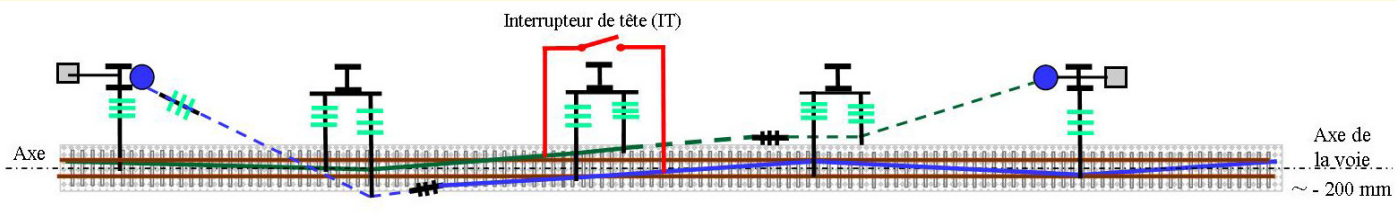
Sectionnements

On distingue plusieurs types de sectionnements ayant des rôles différents :

Le sectionnement à lame d'air:

dont le rôle est de permettre d'isoler électriquement une section de caténaire des sections encadrantes. En effet, pour des raisons d'entretien, il peut être nécessaire de ne plus alimenter une portion de caténaire. Ce dispositif est plus ou moins analogue à un équipement tendeur (il assure donc, en plus de la séparation électrique, la fonction de tension mécanique) avec les adaptations nécessaires à l'isolement.

(le sectionnement électrique à lame d'air se reconnaissant par la zone commune où deux fils de contact séparés de 0,50 m en 25 000V-50Hz (0,20 m en 1 500 continu) cohabitent sur une certaine distance, l'écartement entre les conducteurs constituant alors la lame d'air assurant l'isolement électrique quand l'appareil d'interruption est ouvert)



L'isolateur de section:

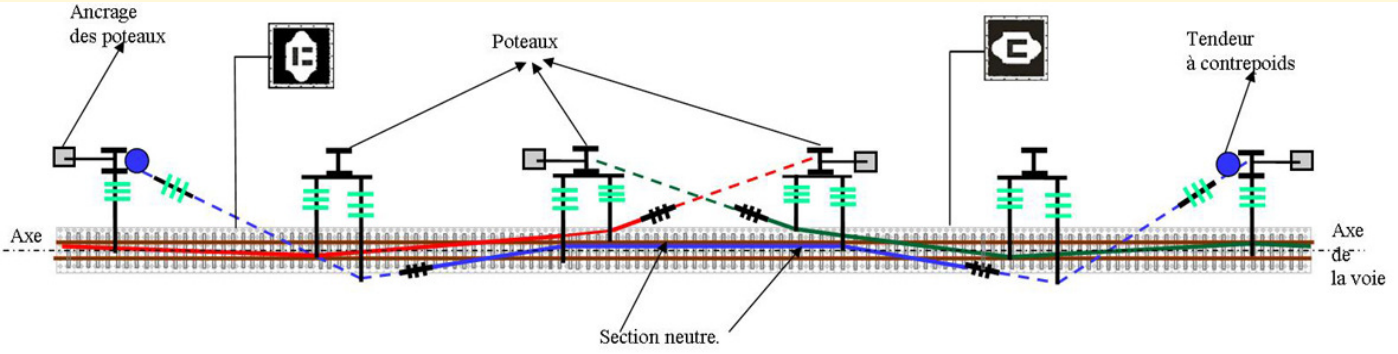
qui a rigoureusement la même fonction que le sectionnement à lame d'air mais a un encombrement bien moindre (et n'assure pas la fonction de tension mécanique). Il est utilisé soit sur les voies parcourues à faible vitesse (voies de service et de circulation), soit lorsqu'il n'est pas possible (pour des questions d'encombrement) d'installer un sectionnement à lame d'air (cas d'une communication entre deux voies parallèles par exemple).

Il existe plusieurs types d'isolateurs de section dont la forme dépend essentiellement de la vitesse à laquelle ils peuvent être franchis. Celui de gauche pour une vitesse moyenne de 100km/h et celui de droite pour une vitesse plus élevée., il comporte également des cornes de soufflage.

La section de séparation:

qui permet d'isoler électriquement deux portions de caténaire alimentées par des courants différents (transition entre 1500 V continu et 25000 V / 50 Hz par exemple) ou des sous-stations différentes en 25000 V / 50 Hz. Dans ce dernier cas, la nécessité d'isolement est liée au fait que deux sous-stations successives ne sont pas forcément en phase (bien que le type de courant soit le même).

Ces sections de séparation doivent être franchies disjoncteur (s) ouvert (s) dans le cas d'un changement de source d'alimentation en 25 kV ou bien pantographe (s) abaissé(s) dans le cas d'un changement de type de courant. La section de séparation est constituée de deux sectionnements à lame d'air successifs entre lesquels la courte section de caténaire est neutre (non alimentée).



Mais pourquoi se compliquer à mettre la caténaire en zig zag au lieu de tirer les fils de contact tout droit ?
Tout simplement pour éviter une usure prématurée des pantographes. En effet, si la caténaire était simplement droite, le point de frottement du pantographe sur la caténaire serait toujours le même. De ce fait, le pantographe s'userait très vite au niveau au point de frottement ce qui produirait le sciage de l'archet du pantographe.

Le fait de faire un zig zag à la caténaire va permettre de ce fait permettre de modifier continuellement le point de contact du pantographe sur la caténaire et donc de limiter son usure.

L'inconvénient, c'est que comme la caténaire est très tendue, elle va avoir tendance à tirer sur les console pour essayer de se remettre en ligne droite, et la force qu'elle va exercer sur les consoles des poteaux sera différente en fonction de l'endroit où est accrochée la caténaire par rapport à l'axe de la voie.

Le positionnement latéral du fil de contact est généralement assuré par des bras de rappel montés sur des armements caténaires.

Support rigide.

Portique souple

Quelques photos de mauvais captage entre les fils de contact et la bande d'usure sur le pantographe., pouvant créer de graves dommages sur les pantographes ou installations électriques

Captage du courant

Sur le matériel roulant, le captage du courant s'effectue par un pantographe muni d'un archet. Les trains à grande vitesse, d'autre part, sont équipés de pantographes à double suspension. *(voir caractéristique des pantographes sur le site)*

Pantographe du type GPU TGVA et TGVR

Pantographe TGV Duplex du type CX

Les autres systèmes de captage sont le collecteur à arc et la perche de trolleybus. Dans ce dernier cas, le captage s'effectue avec une paire de perches, qui permettent par ailleurs au véhicule une liberté latérale de circulation de plusieurs mètres, afin de s'insérer dans le trafic urbain sans difficulté.

Alimentation par perche sur les premiers trams Nice et banlieue de Paris

Collecteur à arc

Un tramway ancien avec un collecteur à arc, construit en 1907
, circulant encore à Oberbozen, en Italie

Le **collecteur à arc** ou lyre, est une des trois solutions de captage du courant couramment utilisées sur les véhicules ferroviaires urbains, servant de contact entre la caténaire et le véhicule. Après avoir été très courant en Europe le siècle dernier, le collecteur à arc est maintenant largement remplacé par les pantographes.

Origines

Quand le collecteur à arc a été conçu par l'inventeur allemand Ernst Werner von Siemens, au début des années 1880, l'inventeur Américain Frank J. Sprague venait de breveter son système d'alimentation par perche. Afin d'éviter un procès, Siemens fut obligé de revoir son système, basé sur la flexion d'une tige venant en contact avec le fil caténaire. Les premières utilisations de la perche par Siemens se firent sur les premiers tramways électriques à alimentation aérienne, au début des années 1890. La compagnie de tramways électriques Hobart - la première de ce genre dans l'hémisphère sud, ouverte en 1893 - utilisait des véhicules Siemens comprenant des collecteurs à arc primitifs. Bien d'autres compagnies continentales et quelques réseaux de tram anglais utilisèrent ce système.

Construction

Le collecteur à arc est l'un des systèmes de captage du courant les plus simples et les plus fiables, utilisé sur les véhicules ferroviaires, les tramways en particulier. Les versions les plus primitives sont constituées d'un simple fil de forte section ou de barres d'acier pliées en forme de rectangle et montée sur le toit du tramway pour constituer un support au collecteur à arc en lui-même. Celui-ci est fait pour aller "gratter" la caténaire au-dessus du tram. Il s'agit d'un tube d'environ 2cm de section, en acier, usiné pour former un arc, d'où le nom. Cette partie peut avoir une dizaine de centimètres de large. À l'inverse de la roulette trolley, le collecteur n'a pas de socle rotatif mais est simplement fixé sur le toit du tram.

Un tram historique, alimenté par collecteur à Plauen, Allemagne

Au début des années 1900, le système de cadre mentionné ci-dessus a commencé à être remplacé par d'autres dispositifs plus complexes et sophistiqués, mais le principe restera le même. Les changements de conception les plus remarquables furent ceux mis au point sur les réseaux utilisant des tramways à un et deux étages. Ceux à simple étage devaient avoir un collecteur haut et léger, tout en restant suffisamment solide pour supporter l'arc, alors que ceux à deux étages avaient des systèmes plus simples.

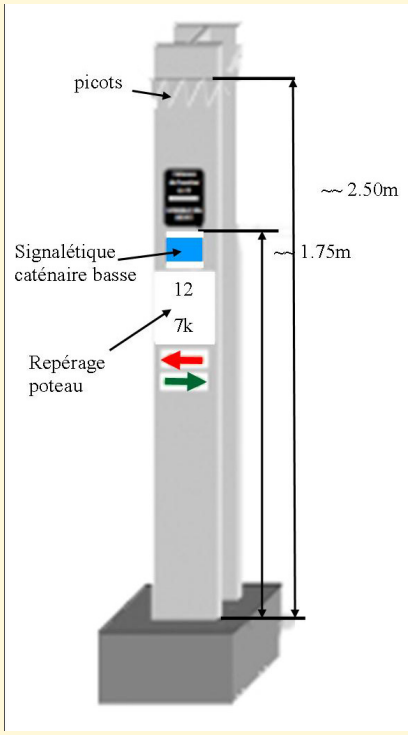
Pour maintenir un bon contact électrique, le collecteur à arc doit exercer une pression assez forte sur le fil qui le surplombe, ce qui fait que des systèmes de ressorts et contrepoids ont été mis en œuvre pour assurer le contact et limiter les cas d'arrêt inopiné du tram suite à une perte de captage.
Le retour du courant était assuré par les rails de roulement, en acier.

Le gabarit électrique

Sur le réseau français, la hauteur d'une ligne aérienne de traction électrique doit répondre aux conditions suivantes :

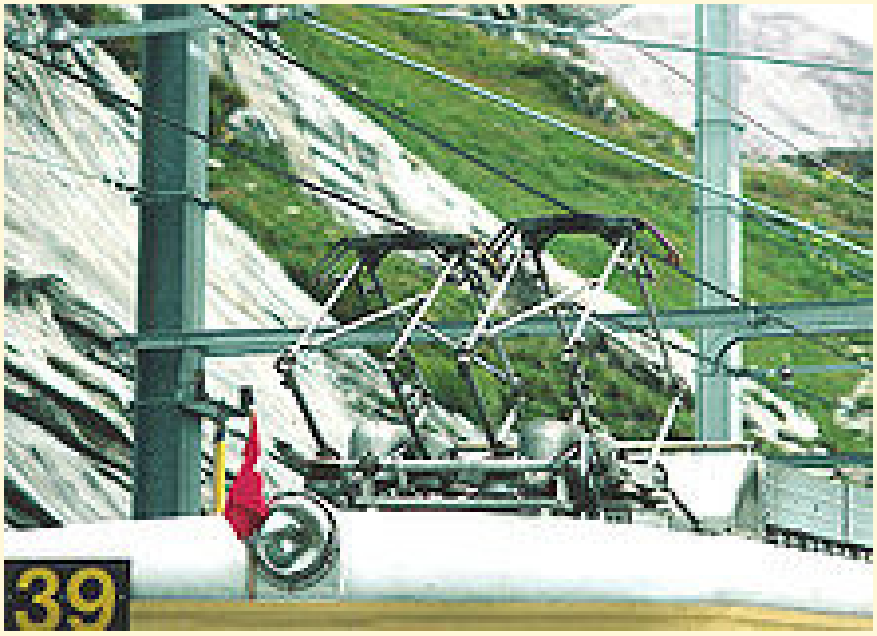
- être inférieure ou égale à 6,20 m à –20°C pour respecter le débattement maximal des pantographes ;
- être supérieure à 6m à 50 C à la traversée des voies ouvertes à la circulation publique ;
- sous les ouvrages d'art, être égale ou supérieure à 4,55 m à +50°C en 1 500 V ou 4,64 m à 50 C en 25 kV;

en voie courante, au droit des supports, les valeurs sont, sauf cas particulier, de 5,08 m sur ligne à grande vitesse (LGV) et 5,50 m sur les autres voies ; si, pour des raisons techniques, la ligne de traction électrique doit se trouver à une hauteur inférieure ou égale à 5 m, un dispositif spécial d'attention est apposé au droit du support une signalétique d'attention constituée par une bande bleue avec liseret blanc opposée au droit du support..



Lors de l'électrification de lignes existantes il faut tenir compte du gabarit des ouvrages d'arts (tunnels et ponts) et traiter les passages à niveaux.

Variantes:
Ligne bi-filaire



Chemin de fer de la Jungfrau

En général le retour du courant se fait par les rails de chemin de fer. Les rails doivent alors impérativement être reliés à une prise de terre parfaite, au potentiel zéro volt. En effet, la carcasse entière du train (ou métro, ou tramway) étant métallique et entièrement reliée également au sol, si un défaut de terre existait un utilisateur pourrait s'électrocuter en touchant cette carcasse. Dans les sols très rocailleux (comme dans le massif des Maures par exemple) les prises de terre sont très profondes (4 mètres minimum).

Les trolleybus utilisent une seconde ligne pour le retour du courant, le retour par le sol étant impossible. On a utilisé également une double ligne de contact sur certaines voies de chemin de fer, par exemple le chemin de fer de la Mure en France lors de son électrification début 1900.

L'utilisation d'un courant triphasé, nécessite d'employer plusieurs fil de contact. Par exemple le chemin de fer de la Jungfrau utilise des fils de contact aériens pour deux phases et les rails pour la troisième phase.

Caténaire inclinée

Caténaire inclinée typique de la Compagnie du Midi, à Loubaresse.

La caténaire inclinée est un cas à part. Les bras de rappel n'existent pas : seuls la tension du fil de contact ainsi qu'un positionnement judicieux des points de fixation du fil porteur permettent au fil de contact de suivre l'axe de la voie. C'est dans les courbes que cette caténaire prend son aspect le plus insolite, car son axe est alors proche de l'horizontale, tandis que les autres caténaires restent verticales.

Elle est aussi connue sous le nom de caténaire Westinghouse, du nom de la firme qui a développé la technique aux États-Unis. En France elle est le plus souvent appelée caténaire « midi » car elle a été utilisée sur le réseau de la compagnie des Chemins de fer du Midi pour l'alimentation en 1 500 V continu. On la trouve également sur la ligne du Médoc, reliant Ravezies à Soulac sur Mer, Le Verdon et La Pointe de Grave.

Caténaire compound

Suivant la tension d´alimentation et l´importance de l´énergie de traction à fournir, des caténaires peuvent comporter un système à quatre câbles dont la géométrie est d'autant plus complexe à réaliser et à entretenir. Ce type de caténaire est généralement constitué par deux fils de contact suspendus à distance égale à un câble porteur auxiliaire, lequel est suspendu par des pendules à longueur variable à un câble porteur principal. Sur ce type de caténaire, seuls les fils de contact sont maintenus à une tension mécanique constante (régularisés). Ce type de caténaire est appelé « caténaire composée », ou *compound*. Ce type de caténaire est utilisé pour la majorité des électrifications en 1 500 V en France, ainsi qu'en Belgique en 3 000 V.

Profilé aérien de contact

Caténaire rigide sur le RER C.

Profilé de contact

Photos Gilles Bruna

Un type de caténaire particulier commence à se répandre en France : il s'agit du PAC (Profil aérien de contact), constitué par un profilé en aluminium de 11 cm de haut (qui seul supporte la charge de tension mécanique), à la base duquel on introduit un fil de contact. Le fil de contact est maintenu par un pincement exercé par le profilé.

Ce système, principalement destiné aux tunnels, peut être observé sur la ligne C du RER entre les stations d'Austerlitz et de Champ de Mars - Tour Eiffel, où il est en service depuis 1997. Du fait de son fonctionnement, le fil de contact ne nécessite pas d'être mis sous tension mécanique, ce qui en facilite les opérations de maintenance et réduit le risque ainsi que la gravité des incidents.