

Captation Et Distribution D'Energie

4. Différents systèmes d'électrifications

Tous au long de l'évolution progressive de la traction ferroviaire électrique et de son expansion à travers le monde, différents types de réseaux d'électrification des chemins de fer ont été développés et exploités.

4.1 Electrifications sous basses tensions continues

-Électrifications sous basses tensions continues (160 à 1200 V) avec ligne de contact au sol (3ème ou 4ème rail).

-Électrifications sous basses tensions continues (500 à 1200 V) avec ligne de contact aérienne.

3-Électrifications sous moyennes tensions continues (1350 à 3000 V) avec ligne de contact aérienne.

-Électrifications sous moyennes tensions alternatives triphasées (725 à 3600 V - 16,7 Hz, 50 Hz) avec double ligne de contact aérienne.

La basse tension à courant continu (600 ou 750V) s'est alors imposée pour les transports urbains ou suburbains (métro, tramway et trolleybus).

Pour la grande traction, deux tendances ont été adoptées, à savoir la basse tension à courant continu de 1.5kV ou 3kV et la haute tension alternative monophasé 15kV à basse fréquence 16 2/3Hz.

a. Avantages

- la simplicité de la conversion d'énergie à bord des trains, ce qui résolvait le problème de l'encombrement et du poids des locomotives,

- des motrices simples et robustes,

- l'isolation des éléments sous tension facile à réaliser,

- la possibilité d'effectuer des opérations de maintenance en maintenant la ligne sous tension.

b. Inconvénients

-Présence nécessaire de nombreuses sous-stations de conversion du courant,

-la complexité des équipements de ligne,

- Grosses installations fixes.

4.2 Électrification sous hautes tensions alternatives.

1. Electrifications sous hautes tensions alternatives monophasées (11 000 à 15 000 V), à fréquence spéciale (16,7 Hz, 25 Hz), avec ligne de contact aérienne.

2. Électrifications sous hautes tensions alternatives monophasées (20 000 à 50 000 V), à fréquence industrielle (50 Hz, 60 Hz), avec ligne de contact aérienne.

La haute tension alternative monophasé 15kV de faible fréquence 16 2/3Hz a été choisie pour des raisons de simplicité et d'économie. La fréquence a été limitée par les moteurs à commutation utilisés. Les réseaux électriques des chemins de fer sont alors gérés par des centrales électriques séparées où on utilise des convertisseurs de fréquence, 1/3 de la fréquence standard 50Hz des réseaux de distribution a été choisie. La percée du courant alternatif à fréquence standard a été confortée par l'évolution faite dans le domaine de l'électronique de puissance. Depuis, la tension alternative de 25kV, 50Hz s'est imposée en Europe pour devenir le standard dans les nouvelles lignes, particulièrement les lignes à grande vitesse (LGV). Avec la multiplication des tensions utilisées dans une même région, des locomotives.

a. Avantage:

-Utiliser le courant industriel distribué à partir du réseau général à haute tension ;

-des sous-stations de traction simples ;

-des sous-stations espacées de 50 à 70 km ;

-d'avoir une caténaire de faible section (145 mm² de cuivre seulement) ;

-enfin, grâce à l'apparition des dispositifs redresseurs de courant légers et peu encombrants, le courant alternatif est converti en courant continu sur l'engin moteur, et l'on retrouve ainsi l'utilisation des moteurs de traction à courant continu.

b. Inconvénients

- Mise en câble des canalisations électriques aériennes proches de la voie en raison de phénomènes d'influence électrique et d'induction électromagnétique ;
- obligation d'effectuer, hors tension, la maintenance des caténaires ;
- difficulté d'isolement dans certaines zones (atmosphère polluée, traction mixte) ;
- le courant doit être converti au niveau des motrices.

Le tableau suivant résume les différentes tensions et fréquences principales utilisées pour la traction dans le monde.

Tension	Fréquence	Application	Pays
600/750V	DC	Réseaux urbains avec 3ème rail pour l'alimentation	Utilisés dans la plupart des pays pour les tramways, trolleys et métros
1.5KV	DC	Réseaux urbains, régionales et interurbains avec caténaire	Généralement utilisés en grande traction, Australie, USA, Europe Japon, Egypte, Inde, Indonésie, Nouvelle Zélande
3KV	DC	Réseaux interurbains	Algérie, Brésil, Chili, Europe, Inde, Maroc, Afrique de sud.
15KV	16.7z	Réseaux interurbains	Allemagne, Autriche, Norvège, suède et Suisse.
20KV	50Hz	Réseaux interurbains	Est du Japon
20KV	60Hz	Réseaux interurbains	Ouest du Japon
25KV	50Hz	Réseaux interurbains	Australie , Chine, Corée, Europe, France, Inde, Iran, ouest du Japon, Turquie.
25KV	60Hz	Réseaux interurbains	USA, Costa Rica, ouest de Japon, Taiwan.

Tab.1. Electrification des réseaux ferroviaires dans le monde.

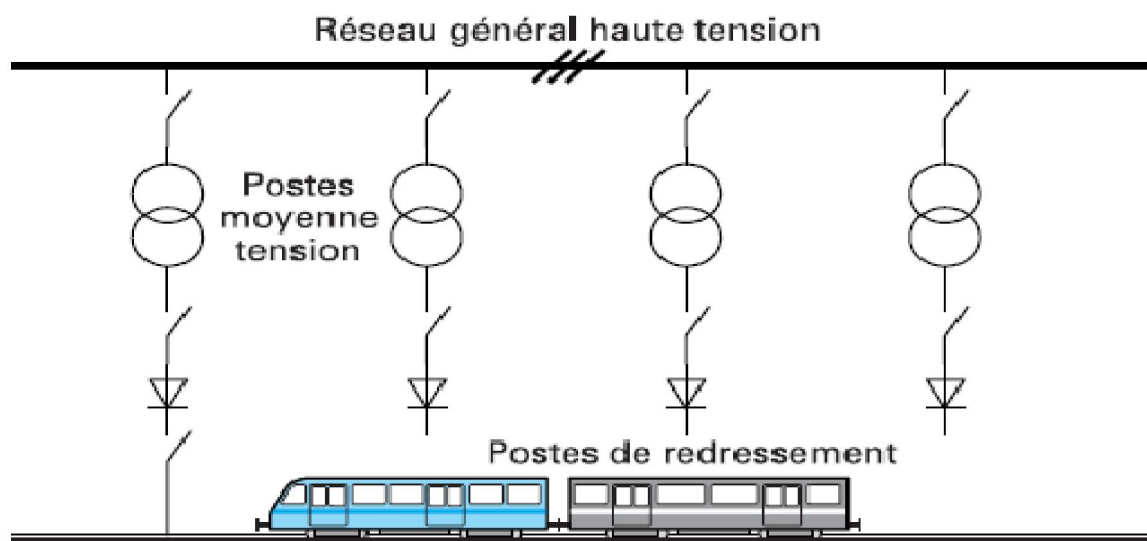


Fig.16. Réseau Métro.

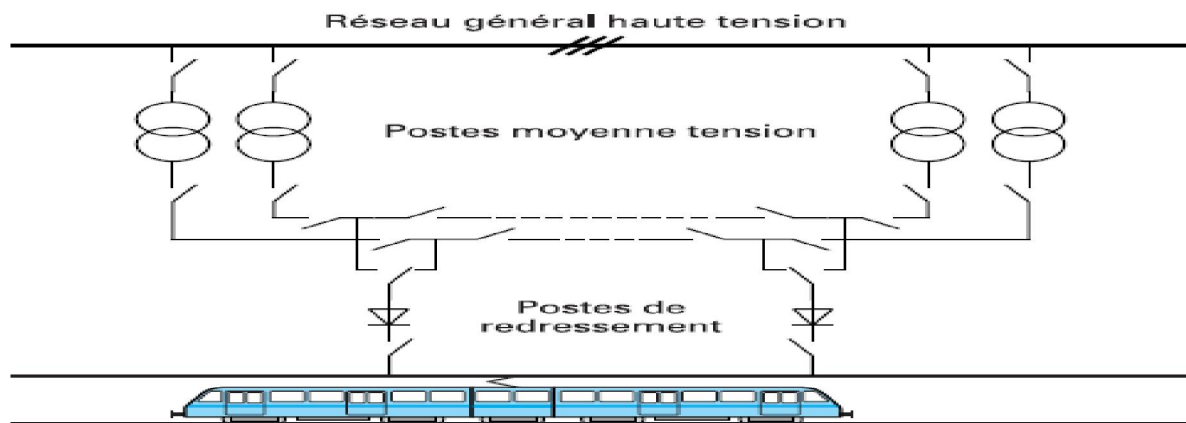


Fig.17. Réseau Tramway

Avec la multiplication des tensions utilisées dans une même région, des locomotives multi-tensions ont vu le jour. La première locomotive européenne bicourant (1500V continu et 25kV 50Hz), la BB 22000 a été livrée par Alstom et MTE à la SNCF à la fin de l'année 1976. Avec l'extension des interconnexions entre les différents réseaux ferroviaires, les nouveaux systèmes de traction électrique ont été amenés à supporter de plus en plus les différentes alimentations.

La tendance actuelle pour les LGV est l'utilisation de l'alimentation $2 \times 25\text{kV}$. Des sous-stations avec transformateur 50kV avec un point milieu alimente la caténaire avec le $+25\text{kV}$, le feeder avec le -25kV , et le point milieu au potentiel du rail qui est mis à la terre. La tension entre la caténaire et le feeder est de 50kV mais l'alimentation du train reste toujours à $+25\text{kV}$. Cela permet d'une part, de réduire les pertes par effet Joule et le nombre de sous-stations en utilisant des autotransformateurs à des intervalles réguliers entre deux sous-stations. D'autre part, cette technique d'alimentation réduit les interférences électromagnétiques grâce à l'opposition de phase entre la caténaire et le feeder.

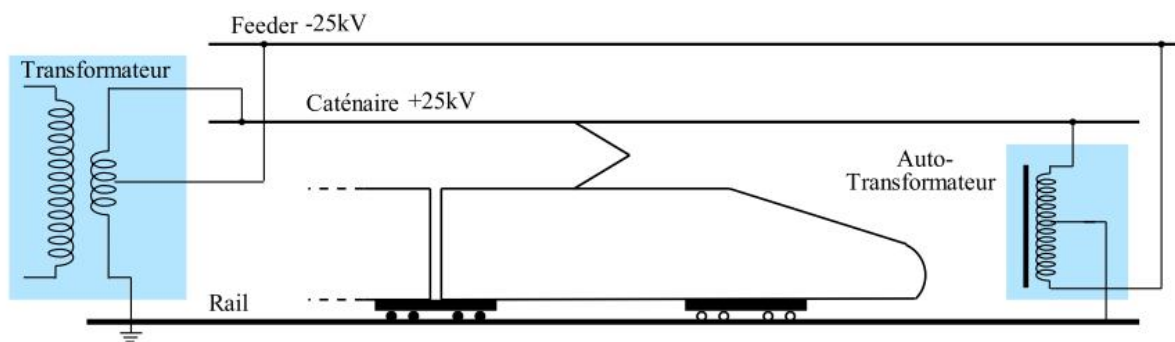


Fig.18. Electrification $2 \times 25\text{kV}$

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.), 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 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.
- *En Triphasé "étoile"* : 3 phases distribuées sur la caténaire, carcasse au rail et à la terre et au neutre du transfo.

5. Présentation des équipements

Le réseau d'alimentation en énergie électrique ainsi que l'ensemble des équipements du matériel roulant constituent le cœur du système électrique ferroviaire.

Une voie ferrée électrifiée peut être représentée par une ligne de transport d'électricité composée de la caténaire et des rails. Un générateur de courant, appelé "sous-station", est connecté à l'extrémité de cette ligne qu'il peut alimenter, soit en courant continu, soit en courant alternatif.

Une locomotive se comporte comme un moteur électrique branché entre la caténaire, par l'intermédiaire du pantographe, et les rails par l'intermédiaire des roues.

Comme les rails sont reliés à la terre, la différence de potentiel entre ces derniers et la terre est nulle. Il est donc impossible de s'électrocuter en touchant les rails.

Par contre, la tension entre la caténaire et les rails, et par voie de conséquence entre la caténaire et la terre, est égale à la tension U délivrée par la sous-station. La caténaire doit donc toujours se trouver à une distance d'isolement suffisante par rapport aux éléments environnants reliés à la terre, notamment les toitures des wagons et les voûtes des ponts et tunnels.

5.1. Sous-stations de traction

Une sous-station de traction est l'interface entre le réseau HTA local (10 kV à 20 kV), et le réseau continu, à 750 V DC par exemple. (HTA : excède 1 000 volts sans dépasser 50 000 volts en courant alternatif ou excède 1 500 volts sans dépasser 75 000 volts en courant continu).



Fig.19. Sous-stations de traction

Elles sont généralement raccordées à un réseau électrique alternatif à haute tension. Leur fonction est d'abaisser cette tension à une valeur utilisable par les engins moteurs et, dans certains cas, de modifier la fréquence de la tension ou de la convertir en tension continue.

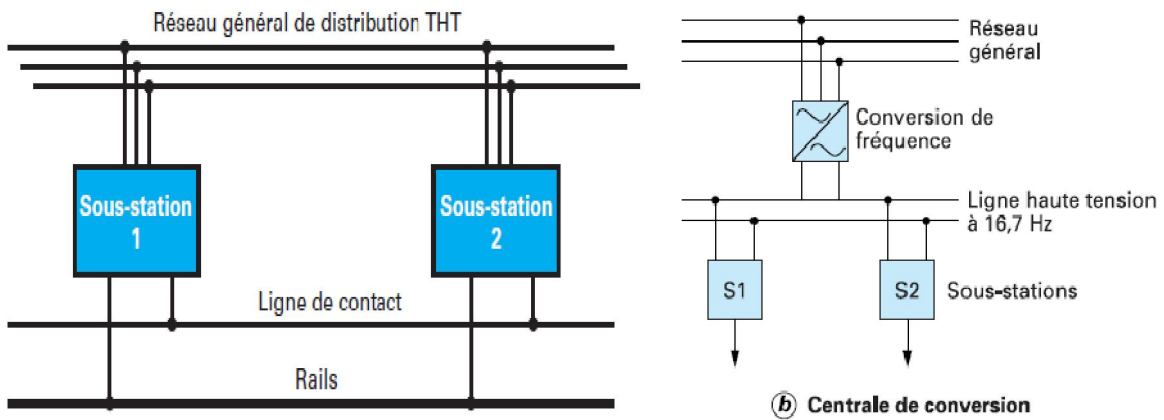


Fig.20. Adaptation de l'alimentation

Le nombre d'arrivées HTA peut varier selon les réseaux de tramway. Au même titre que les réseaux d'alimentation électrique de métros, plusieurs connexions à des réseaux HTA distincts permettent d'assurer un service de fonctionnement minimum, lors d'un défaut majeur sur un des réseaux HTA.

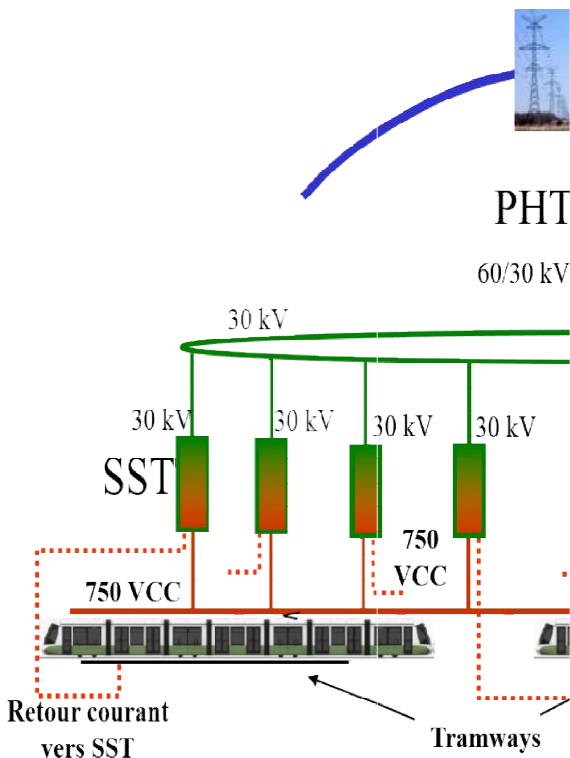


Fig.21. Connexions à un réseaux HTA

Les sous-stations sont réparties le long des lignes en fonction des exigences de l'exploitant. Ces exigences sont dictées par les performances souhaitées pour la gestion de son exploitation (adéquation entre les grilles horaires et les puissances à installer), mais aussi par les

contraintes d'implantation dans la ville. En effet, les emplacements susceptibles d'accueillir les sous-stations dans une ville sont assez restreints. La distance entre les sous-stations se révèle être un facteur à mettre en adéquation avec la structure utilisée pour le transport et la distribution du courant continu. Les tensions de lignes minimales acceptables en fonctionnement normal et dégradé (disjonction d'une sous-station par exemple) sont primordiales. En exploitation normale, par exemple, la tension minimale généralement acceptable sur une ligne de tramway est de 500 V *DC*. Les sous-stations peuvent toutefois être relativement éloignées les unes des autres (2 km par exemple) si des moyens de maintien de la tension sont installés. Pour ce faire, les solutions les plus couramment employées consistent à utiliser des Feeders 2 (généralement des conducteurs en aluminium de section importante) en parallèle des voies.

La puissance d'une sous-station monogroupe redresseur est généralement de 900 kW, débitant ainsi 1200 A sous 750 V. Un transformateur Dy 20 kV / 590 V se situe en amont du groupe redresseur. Sa puissance apparente est de 1000 kVA. Un disjoncteur *DC* ultrarapide (durée d'ouverture inférieure à 20 ms) se positionne en sortie du groupe redresseur. Les sous-stations de traction peuvent également être dotées de deux groupes redresseurs connectés en parallèle ou en série, si les besoins en puissance du réseau ou les contraintes d'implantation le nécessitent. Dans ce cas, les deux groupes sont usuellement raccordés au réseau *AC* amont via un transformateur Ddy 20 kV / 2*590 V. La gestion des sous-stations est assurée par un automate programmable (central sous-station) qui transmet les données à un Poste de commandes centralisées (*PCC*). Ce dernier opère en temps réel aux manœuvres sur les diverses sous-stations.

5.1.1 Une centrale sous-station est une commande centralisée qui :

- télécommande les appareils d'interruption des caténaires : disjoncteurs, interrupteurs et certains sectionneurs,
- contrôle la position effective de chaque appareil d'interruption télécommandé,
- localise les défauts en ligne (incident caténaire, disjonction provoquée par une machine électrique, ..),
- exécute les coupures d'urgence et gère les demandes de consignation des caténaires primaires,
- assure en liaison avec le fournisseur d'énergie électrique l'alimentation des sous-stations en courant à haute tension.



Fig.22. Central sous-stations

5.2. Caténaire

La caténaire est un assemblage de câbles acheminant le courant électrique jusqu'aux trains. Bien que les composants qui la constituent soient simples (câbles, poulies, etc.), le dimensionnement de chacun requiert des calculs relativement complexes pour obtenir une

géométrie très précise. Par ailleurs, les procédures de montage et de réglage d'une caténaire sont le résultat de plusieurs décennies d'expérience.

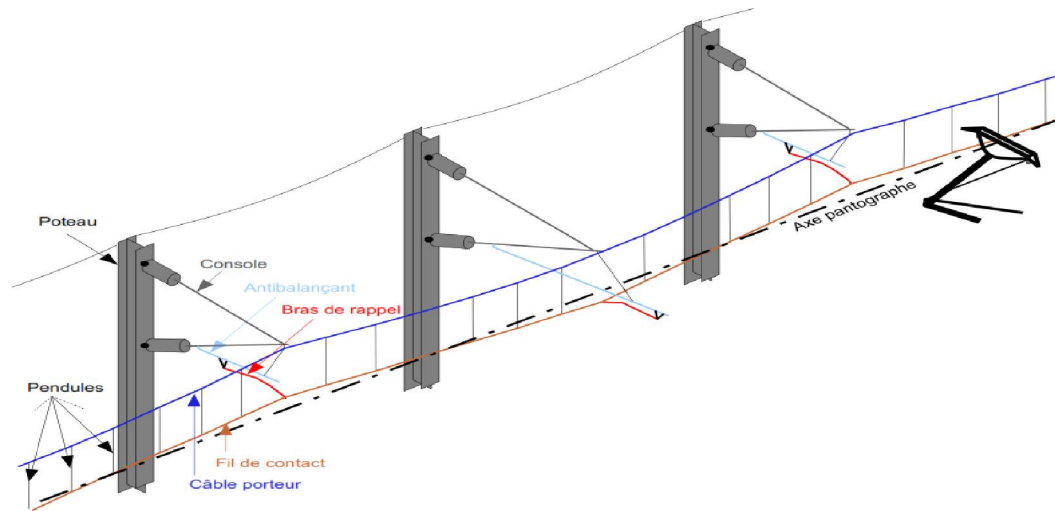


Fig.23. Représentation de la caténaire type 25KV

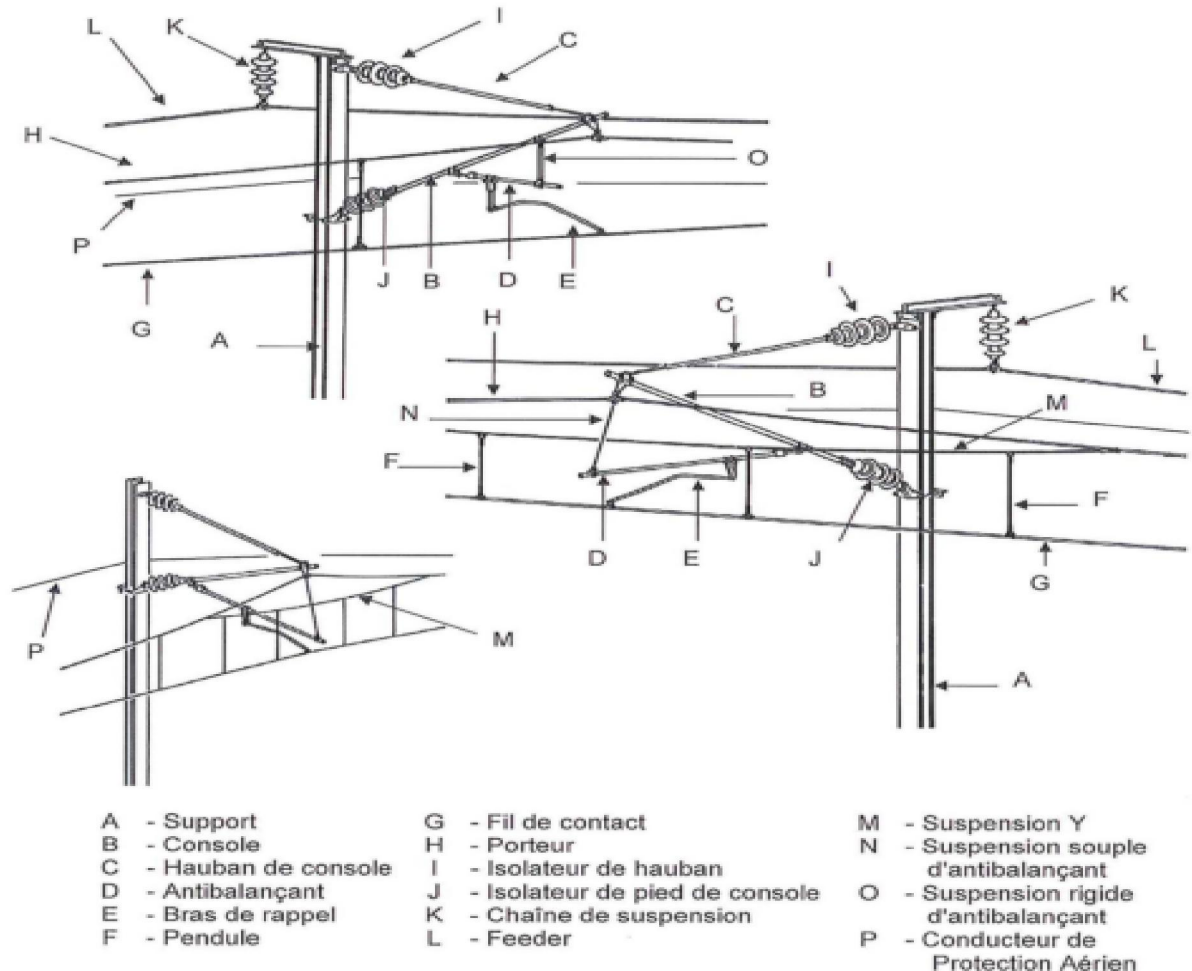


Fig.24. Représentation de la caténaire type 25KV

Les supports de caténaire

Les poteaux soutiennent la caténaire et ses fixations. Une portée définit la distance entre deux poteaux. Sa longueur varie entre 27 m et 63 m, suivant la topologie et l'exposition aux vents de travers. En effet, pour les zones fréquemment exposées à des vents latéraux violents, la

longueur des portées est réduite pour éviter que le fil de contact ne sorte du gabarit du pantographe ce qui entraînerait une destruction de la caténaire et un arrachement du pantographe

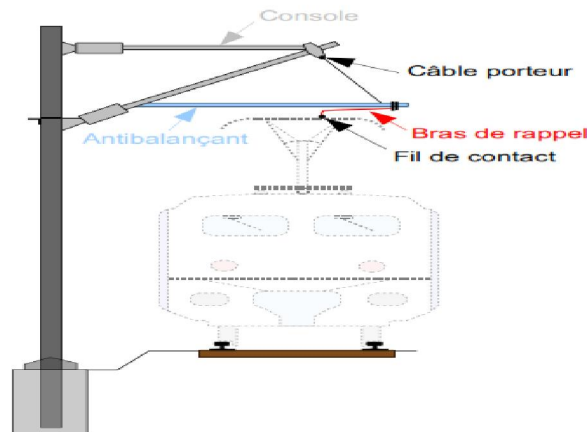


Fig.25. Schéma d'une ligne aérienne de traction électrique.

Sur le poteau, aussi appelé "support", nous trouvons les différents éléments suivants:

La console : qui sert à y accrocher la caténaire, elle regroupe l'ensemble des tubes et isolateurs reliant la caténaire au poteau. Cet assemblage de tubes, souvent en aluminium, est libre en rotation par rapport au poteau, de telle sorte qu'il puisse pivoter lorsque la longueur des conducteurs change en fonction de la température.

Hauban de console : sert principalement à régler la hauteur de la caténaire.

Anti balançant : L'anti-balançant, fixé rigidement à la console, supporte le bras de rappel et empêche la caténaire de s'incliner. L'antibalançant et bras de rappel sont reliés entre eux par des liaisons rotulées. Toujours dans le souci d'assurer une régularité maximum, le guidage du fil de contact est assuré par une pièce très légère (inertie faible). L'antibalançant travaille alors soit en tension, soit en compression. Deux types de montage d'antibalançants sont donc réalisés suivant l'alternance du désaxement à réaliser : le montage tension et le montage compression;

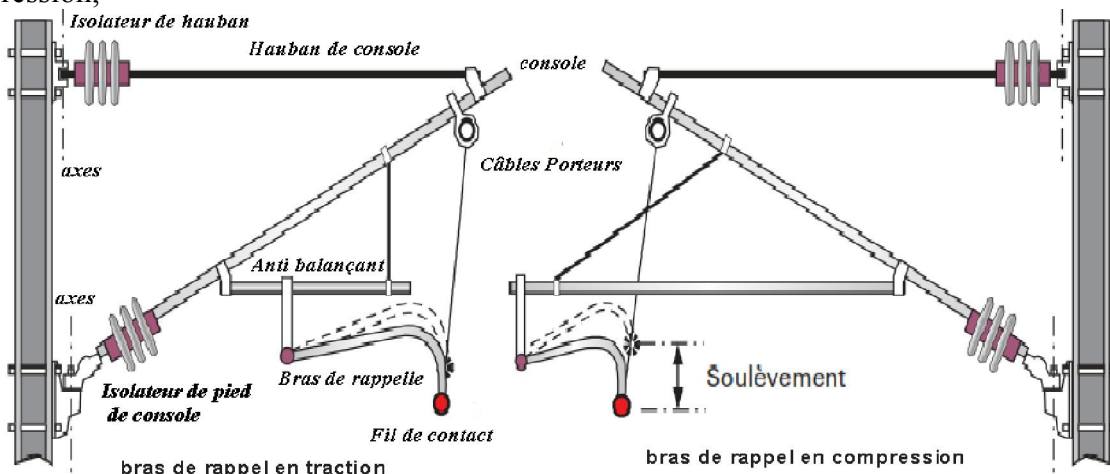


Fig.26. Armement du support

Bras de rappel : le rôle du bras de rappel est justement de tendre la caténaire en lui appliquant une force de résistance opposée à celle appliquée à la caténaire sur la console, afin de maintenir la caténaire en place. Pour éviter les points durs sur les fils de contact, les bras de rappel doivent toujours travailler mécaniquement en tension.

Pendule : Un ensemble de câbles verticaux tressés de faible section reliant le fil de contact et le câble porteur.

Fil de contact : C'est un câble accroché parallèlement à la voie de faible section par rapport à sa longueur qui est construit à partir d'un matériau alliant une bonne conduction électrique et une bonne résistance mécanique.

La section circulaire du fil de contact comprend deux rainures pour la prise des griffes de suspension. Selon la tension d'alimentation et des puissances demandées, la section varie de 107 mm² à 150 mm². Obtenue par tréfilage à froid, la section peut être cylindrique ou comporter un méplat pour augmenter la dimension du contact avec la semelle de frottement de l'appareil de prise de courant.

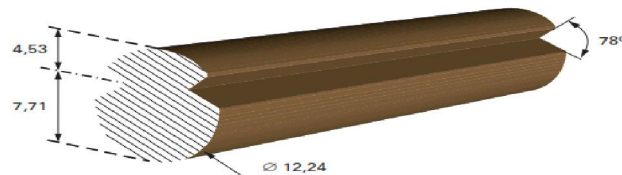


Fig.26. Exemple d'un fil de contact

Le fil de contact est suspendu au câble porteur par des pendules reliant d'une part, un cavalier sur le câble porteur, d'autre part une « griffe » en deux parties sur le fil de contact

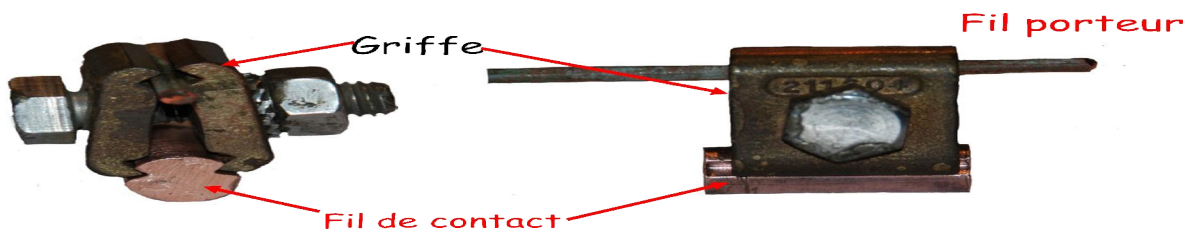


Fig.26. Principe de la caténaire souple

Câbles Porteurs : Les fils de contact distribuant le courant aux locomotives sont suspendus à un ou plusieurs autres fils appelés « porteurs » fixés à la console.

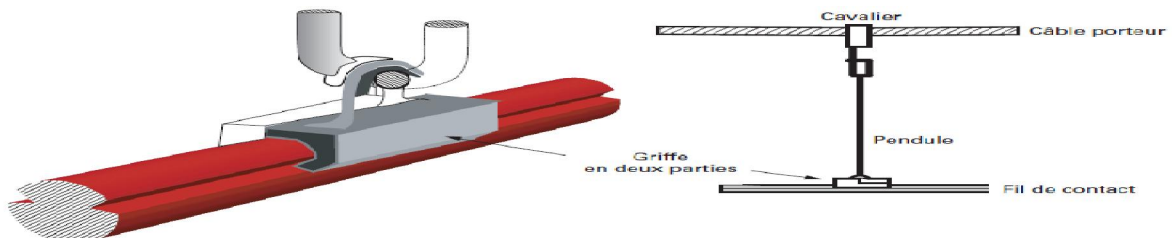


Fig.27cable porteurs

Isolateur de pied de console : est un composant constitué de matériau isolant assure l'isolation électrique entre le conducteur et le poteau.

Isolateur de hauban : assure l'isolation électrique entre le conducteur et le poteau. par des isolateurs en verre, céramique ou matière synthétique, dont la taille varie en fonction de la tension

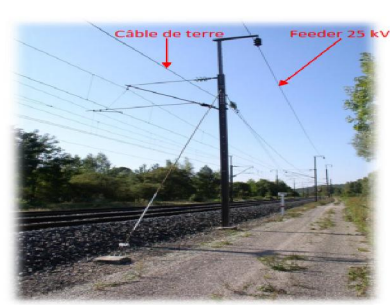


Fig.28.a. Isolateur synthétique

Fig.28.b. Isolateur en verre

Fig.28.b. Câble de terre et feeder

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.

Conducteur de protection aérienne : c'est un câble de terre ; Les poteaux de caténaire sont également reliés entre eux par une ligne de mise à la terre.

Pour que la caténaire soit la plus régulière possible, à la fois géométriquement et mécaniquement (rigidité constante), le passage des poteaux ne doit pas constituer un « point dur ». Pour cela, le système de fixation (console, antibalançant et bras de rappel) reliant la caténaire au poteau autorise un maximum de déplacements tout en permettant un réglage précis de la géométrie.

Équipement tendeur

Sous l'effet de la gravité, un fil tendu entre deux supports décrit une courbe appelée chaînette dont la flèche varie en fonction de la masse linéique et de la longueur séparant les deux supports ; ce qui limite la vitesse des véhicules (50 à 60 km/h). 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).

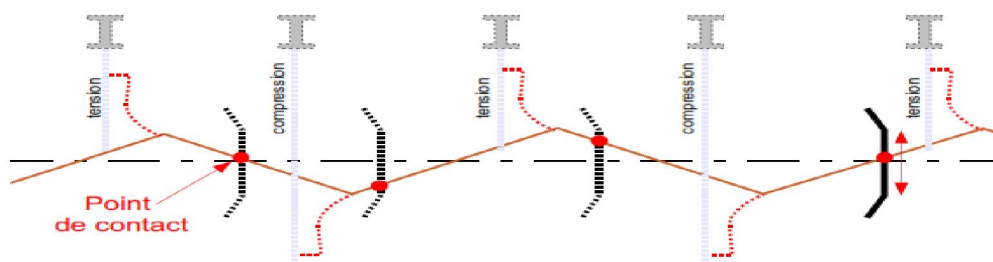


Fig.29. Balayage du point de contact sur le pantographe

Une tension mécanique est appliquée sur les conducteurs pour réduire la flèche du fil de contact et pour augmenter la vitesse de propagation des ondes dans le fil de contact. Elle peut varier en fonction de la dilatation thermique des câbles, c'est pourquoi, sur les grandes lignes, un système de poulie, appelé appareil tendeur, régule la tension pour assurer une vitesse de propagation des ondes constante.

Le fait de faire un zig zag à la caténaire va 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 consoles 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.

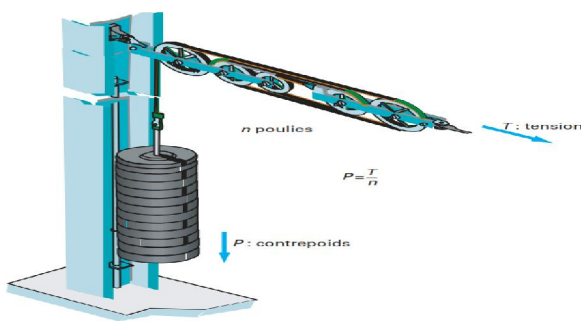


Fig.30.a. Appareil tendeur



Fig.30.b Appareil tendeur à moufles avec poulies à axes parallèles

Les propriétés du matériau ne permettent pas de compenser la flèche par la seule application d'une tension mécanique aux extrémités du fil. Par conséquent, la caténaire est segmentée en tronçons appelés cantons de pose. Un appareil tendeur est placé à chaque extrémité du canton. Autrement dit, les cantons régulés en tension par un appareil tendeur.

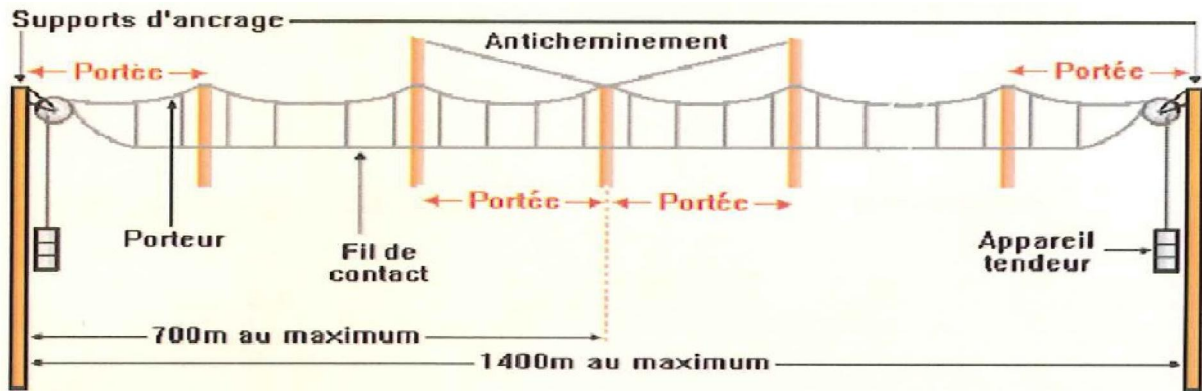


Fig.31. Canton de pose 25000V

Le contact du pantographe devant s'effectuer sans discontinuité d'un canton de pose à l'autre, les extrémités de ces cantons se chevauchent sur une certaine longueur appelée « zone commune ». Autrement dit, le pantographe doit passer d'un fil de contact au suivant sans que la géométrie ne varie trop.

La première caténaire est posée normalement puis est déviée vers le côté de la voie et accrochée à un contrepoids qui aura pour but de tendre la caténaire. Ensuite, on applique le même principe avec le second tronçon de caténaire mais dans l'autre sens et décalé par rapport à la fin de la première caténaire. Ainsi, sur une longueur située entre 2 poteaux, les 2 caténaires sont posées côte à côte et du coup, le pantographe pourra passer tranquillement d'un tronçon de caténaire à un autre sans perte de contact. Cependant, comme il n'est possible d'accrocher qu'une seule caténaire, il va falloir mettre 2 consoles sur les poteaux où il faut accrocher les 2 tronçons de caténaires.

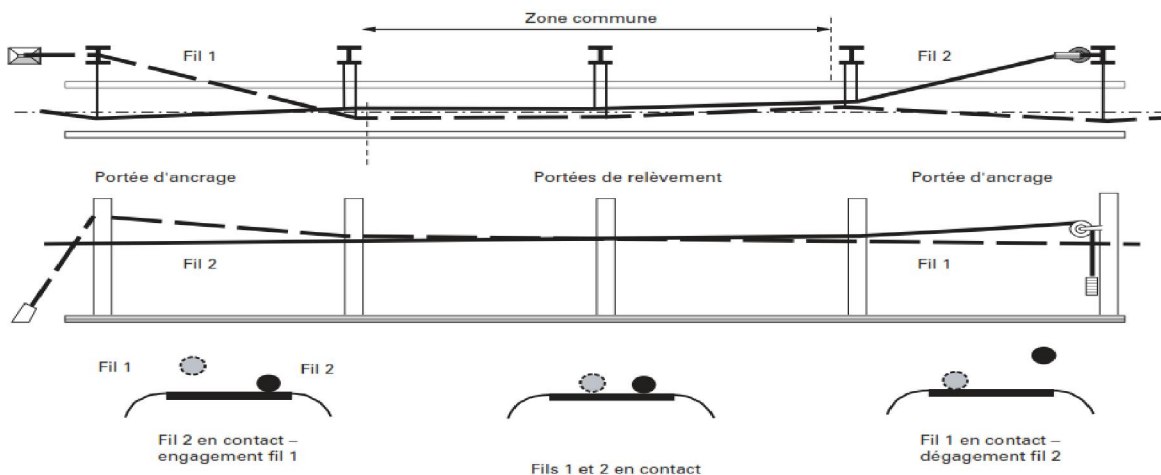


Fig.32. Succession des cantons de pose

Pour éviter que l'ensemble du canton ne se déroule d'un côté ou de l'autre du canton, la console située au milieu du canton est fixée par un câble anti-cheminement qui interdit les translations du câble suivant l'axe de la voie.

5.3. Sectionnements

On distingue plusieurs types de sectionnements ayant des rôles différents :

5.3.1. 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.

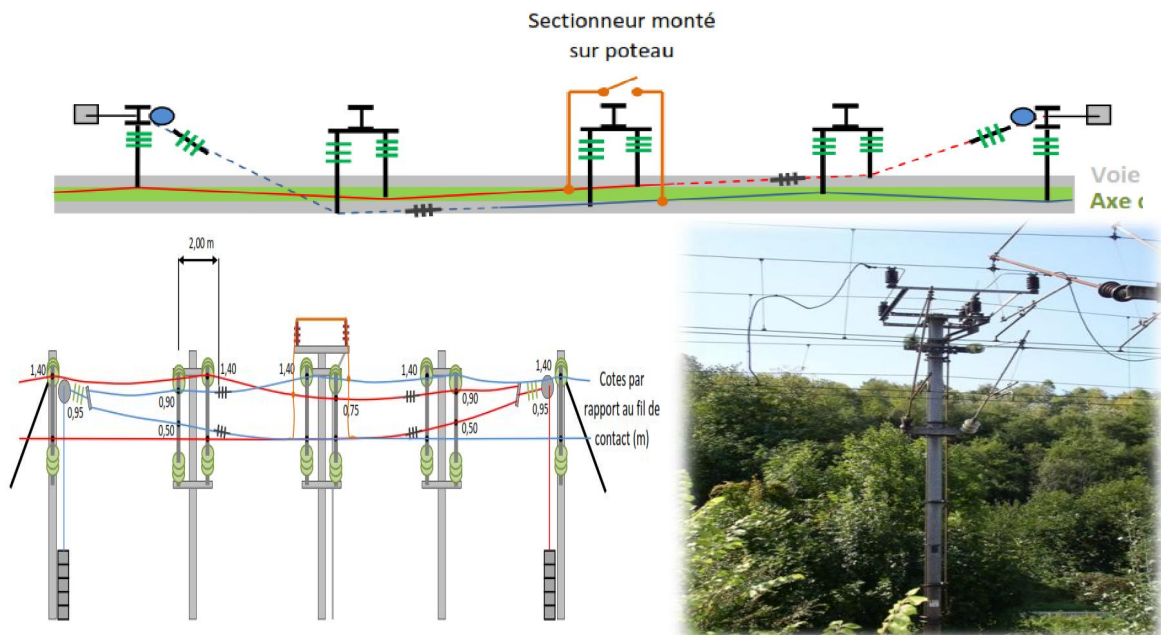


Fig.33. Schéma de principe d'un sectionnement à lame d'air

5.3.2. 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).

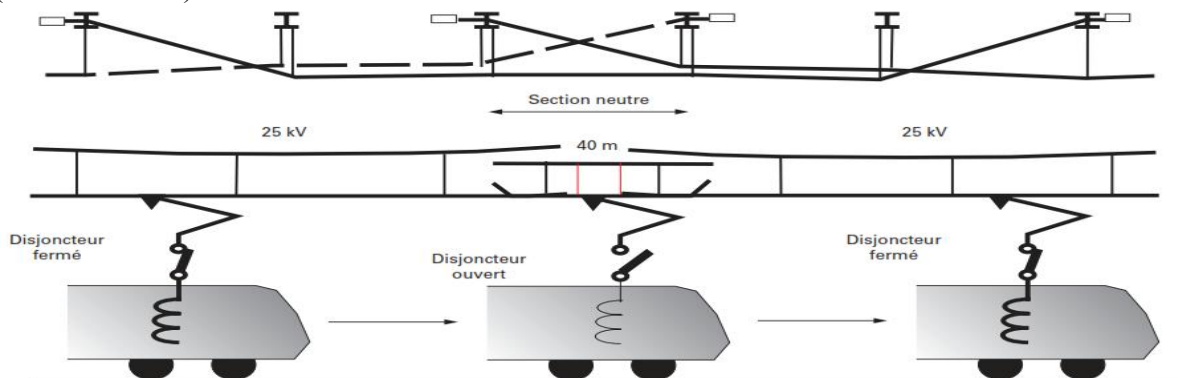


Fig.34. Franchissement d'un sectionnement

5.4. Le pantographe

Un pantographe est un système de bras articulés fixé sur le toit de la locomotive au moyen d'isolateurs. Il se déploie et s'allonge sur un axe vertical pour assurer un contact permanent quelque soit la hauteur du fil de contact.

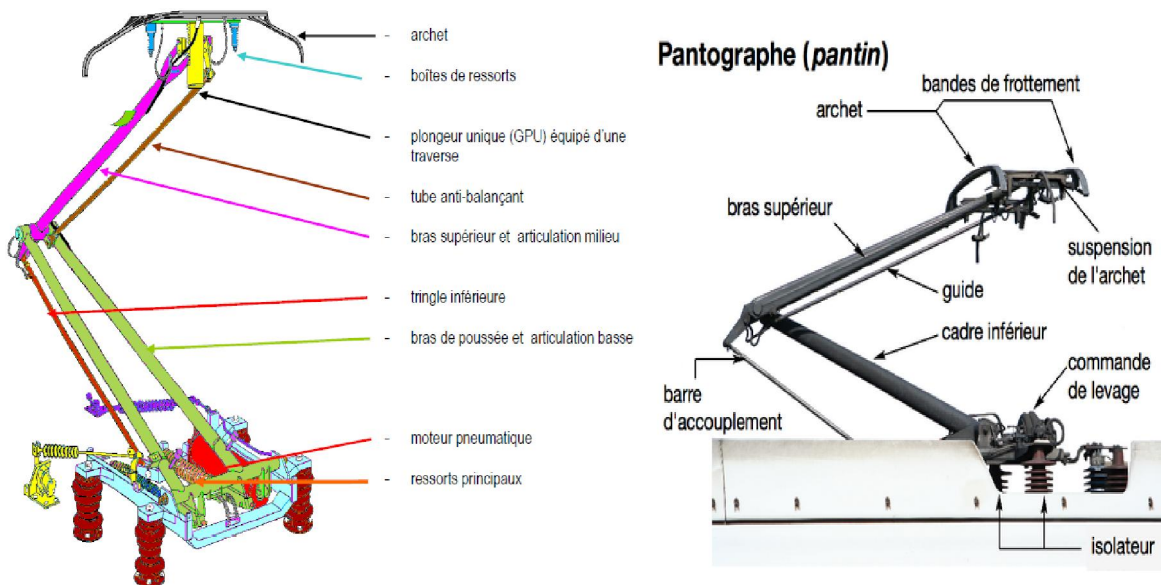


Fig.35. Pantographe

Il est composé d'un grand cadre : un bras articulé composé d'un bras supérieur et d'un bras inférieur. L'archet est une pièce horizontale assurant le contact avec la caténaire. Il est relié au grand cadre par des suspensions appelées boîtes à ressort. Elles permettent à l'archet de pivoter en fonction de la position du point de contact qui change avec le désaxement du fil de contact. Il est équipé d'un dispositif de détection d'usure anormale ou d'anomalie sur les bandes de raccordements.

Les bandes de frottement, en carbone ou en cuivre, sont des pièces d'usure placées sur l'archet. Elles frottent sur le fil de contact et permettent ainsi de capter l'énergie. Leur nombre et leur type dépendent du type et de l'intensité du courant à transmettre, mais aussi de l'état de la caténaire.

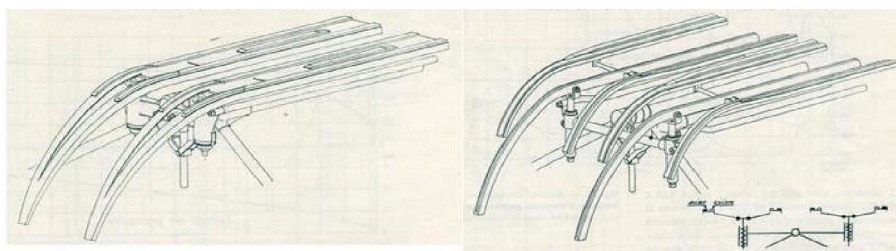


Fig.35. Bandes de frottement

Elles doivent être capables de fonctionner de manière fiable à des vitesses élevées et dans des conditions souvent difficiles (froids, hautes densités de courant...).

Afin de maintenir une pression la plus constante possible des bandes de carbone sur la caténaire, un système d'amortissement est implanté sur le pantographe. Cet amortissement utilise généralement des ressorts mécaniques, un moteur électrique ou des systèmes pneumatiques de type vérins.

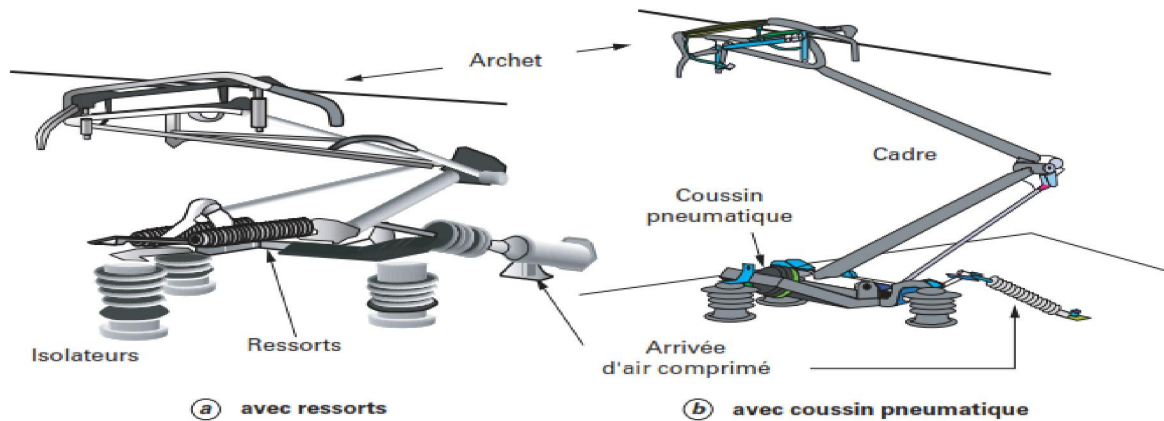


Fig.36. Exemples de pantographes

Dans le cadre d'un pantographe pneumatique, le déploiement du bras est assuré par un coussin pneumatique. La montée du ou des pantographes s'effectue par l'action du conducteur en cabine, qui commande par l'ouverture d'un circuit pneumatique. L'admission d'air dans le coussin engendre un couple sur l'articulation du bras inférieur ce qui provoque le déploiement du pantographe et assure le maintien de la tête de captage en contact avec la caténaire.

La descente du pantographe s'effectue en fonctionnement normal par l'action du conducteur. Il coupe le circuit pneumatique, ce qui provoque la chute de la pression dans le moteur du pantographe, et par le jeu des ressorts et des articulations, amène le pantographe en position repos.

Dans le cadre d'un pantographe électrique, les mouvements de montée et de descente sont assurés par un moteur électrique annexe.

Avec l'augmentation de la vitesse des trains, les modèles de pantographes ont été améliorés ; le nombre de pantographes par train a été augmenté alors que l'intervalle entre pantographes de train a été réduit, tout en recherchant une réduction de l'usure et des frais d'entretien.

5.4.1. Le captage

Le captage du courant s'effectue grâce au frottement entre la caténaire et le pantographe. L'énergie nécessaire au train doit transiter par une surface de contact de quelques mm².

La qualité du captage dépend :

- de la vitesse de circulation,
- du point et de la force d'appui du pantographe sur la caténaire,
- du nombre et de la distance entre les pantographes,
- des conditions météo, en fonction de la force du vent, de la pluie, ou de la présence de givre.
- de l'état des caténaires et des pantographes.

La qualité du captage dépend également de l'état et du réglage de la caténaire. Si la caténaire ou le pantographe comporte un défaut, le captage du courant sera fortement dégradé.

5.4.2. Interaction pantographe-caténaire

Pour assurer un captage correct de l'énergie, le pantographe exerce sur la caténaire une pression, appelée « effort statique », fournie par un mécanisme pneumatique. Lorsque le train se déplace, l'effort augmente grâce à la composante aérodynamique. A savoir le contact archet-caténaire doit être permanent et de qualité satisfaisante quelles que soient les vitesses de circulation, les conditions d'utilisation et les conditions atmosphériques.

Une **force de contact archet-caténaire trop importante** conduira à des soulèvements trop importants du fil de contact pouvant entraîner des risques "d'accrochage" de la caténaire, des détériorations des supports, des usures des pièces mobiles.

Une **force de contact trop faible** contribuera à une production exagérée d'arcs électriques engendrant une dégradation des performances de l'engin moteur, des altérations du fil de contact qui accélèrent son usure, voire une détérioration telle qu'une rupture de la caténaire par exemple.

Compte tenu des caractéristiques de la caténaire, il est donc nécessaire de trouver les meilleurs réglages du pantographe afin d'obtenir :

- Un bon comportement dynamique de tous les éléments constitutifs du pantographe,
- Une usure très faible des bandes de frottement de l'archet,
- Des soulèvements optimaux du fil de contact afin d'assurer un bon contact avec l'archet et sans risquer de détériorer les équipements au sol,
- Une grande longévité du (ou des) fil(s) de contact de la caténaire.

D'un point de vue général, un bon comportement du couple pantographe- caténaire (ou bon captage), contribue à réduire les coûts.

5.4.3 Qualification de l'interaction pantographe-caténaire

Les critères d'admission pour la qualification de l'interaction pantographe- caténaire, sont définis dans les différentes normes européennes appropriées.

5.4.3.1 Critères de qualification

L'interaction pantographe-caténaire (ou qualité du captage) est définie par :

- Le facteur de non-qualité du captage (NQ),
- L'effort moyen de contact archet-caténaire (F_m) et son écart-type (δ),
- Le soulèvement du fil de contact de la caténaire (S).

5.4.3.2 Méthode de qualification

La qualification de l'interaction pantographe-caténaire consiste à réaliser des mesures et de comparer les résultats avec les critères fournis par les spécificateurs des sous-systèmes « matériel » et « infrastructure ».

Les mesures à réaliser sont :

- une détection des **arcs** émis, une mesure de la **force de contact** pour déterminer, en circulation, la force verticale de contact exercée par l'archet sur le fil de contact, ou
- Une mesure du **soulèvement du fil de contact** de la caténaire au passage du pantographe.
- Une **observation du comportement dynamique** du couple pantographe-caténaire complète ces mesures.

Cette méthode de mesure s'applique à :

- tous les matériels moteurs équipés d'un ou plusieurs pantographes circulant en unité simple (US) ou en unité multiple (UM),
- tous les types d'installation fixe à traction électrique à base de lignes aériennes de contact.

La qualification du captage fait également intervenir les :

- configurations d'utilisation du matériel roulant (nombre, position et orientation des pantographes...)
- vitesse de circulation du mobile,
- conditions météorologiques,
- caractéristiques particulières du site et de la caténaire

Les systèmes de mesure utilisés doivent respecter les exigences de la norme EN 50317 : « Prescriptions et validation des mesures de l'interaction dynamique entre le pantographe et la caténaire ».

5.4.4. Principe de la détection des arcs

Un détecteur d'arc visant la zone d'interruption de contact pantographe-caténaire transforme la lumière émise par l'arc détecté en un signal électrique à partir duquel est quantifié l'arc en durée.

La mesure des arcs consiste donc à l'aide d'une chaîne d'acquisition évoluée à effectuer un comptage des arcs à partir duquel divers traitements sont effectués.

La chaîne de mesure se compose :

- de deux détecteurs d'arcs précisément positionnés de part et d'autre du pantographe,
- d'un système d'acquisition-traitement qui permet de conditionner les détecteurs, une centrale tachymétrique et des capteurs de courant,

- d'un PC qui dialogue avec ce système et affiche les paramètres durant l'essai et sauvegarde les acquisitions et les informations liées à l'essai.

5.4.4.1. Illustration de la chaîne de mesure comprenant :



Fig. 37. Chaîne de mesure

Fig. 38. Capteur de mesure de soulèvement

détecteur d'arcs, caméra (et projecteur si besoin) système d'acquisition- traitement embarqué
Les paramètres affichés en temps réel sur l'écran d'acquisition sont les suivants :

- la vitesse de circulation, le repérage et la distance parcourue,
- le nombre d'arcs : NA,
- la somme des durées d'arcs : t arc,
- la durée de l'arc le plus long,
- le temps de captage vrai Tcv : c'est le temps pendant lequel le courant de captage est supérieur à 30 % de l'intensité maximale traversant le pantographe à la puissance nominale,
- le critère de non-qualité du captage NQ ou pourcentage d'arcs définie par le rapport :

$$NQ(\%) = \frac{\sum t_{arc}(ms)}{T_{cv}(ms)} * 100$$

Le seuil minimal de durée de prise en compte des arcs peut être réglé de 500µ s à 5 ms.

Le traitement des données enregistrées (sur des zones parcourues à vitesse stabilisée) est réalisé à la fin des circulations et permet de présenter les résultats suivant les référentiels utilisés et selon les spécifications des experts du client final.

5.4.4.2. Principe de la mesure de la force de contact

Pour réaliser la mesure dynamique de la force verticale de contact archet-caténaire, une instrumentation spécifique doit être étudiée et implantée sur le pantographe de série (mesures au potentiel).

Suivant le type de pantographe essayé, la force de contact peut être le résultat :

- d'une mesure directe avec des capteurs insérés dans les bandes de frottement,
- d'une mesure de forces verticales élémentaires dont les points d'application sont situés entre le point de contact et l'étage de suspension de l'archet.

5.4.4.3. Principe de la mesure des soulèvements du fil de contact

La mesure du soulèvement du fil de contact est réalisée à poste fixe.

A cet effet, un bungalow comprenant l'appareillage de mesure est mis en place sur une zone particulière choisie en fonction des paramètres constructifs (portée, alignement,...) et des capteurs de mesures sont installés sur la ligne pour mesurer le soulèvement du fil de contact au support et au passage du pantographe.

5.4.4.3.1. Capteurs de soulèvements : les capteurs de soulèvements sont constitués de :

- un bras de mesure isolant, en fibre de verre, reliant le fil de contact à l'axe d'entraînement du capteur par l'intermédiaire d'une bielle,
- un capteur de soulèvement.
- une console, support de capteur, fixée sur le support caténaire et reliée à la masse.

5.4.4.3.2. Acquisition des données : l'acquisition des données est réalisée à l'aide d'un micro-ordinateur de type PC comportant des logiciels spécifiques d'acquisition, de calcul des soulèvements du FC, de calcul de la vitesse des circulations et de sauvegarde des résultats sur un support magnétique de grande capacité.