

Essais d'un Câble armé souterrain pour courants triphasés à 27 000 volts

Le développement toujours croissant des distributions d'énergie électrique a conduit à des modifications successives du matériel des lignes de transport. Alors qu'au début le matériel des lignes télégraphiques était à peu près suffisant, bientôt, avec l'accroissement simultané des tensions et des intensités, on dut recourir à l'emploi d'isolateurs spéciaux et de pylônes métalliques de solidité toujours plus grande.

Ces lignes aériennes, qui paraissaient jusqu'ici les seules possibles économiquement pour ces transports, ne sont pas sans présenter de sérieux inconvénients. Elles sont encombrantes, difficiles à établir à la traversée des lieux habités ; en outre, elles sont exposées aux troubles atmosphériques contre lesquels les meilleurs appareils de protection ne sont pas toujours efficaces. Enfin, elles ne sont pas sans présenter des dangers de contact avec les personnes.

A mesure que ces lignes aériennes augmentaient en importance et en coût kilométrique, l'écart de dépense entre elles et les lignes souterraines tendait à se niveler. Il restait à démontrer expérimentalement que ces dernières étaient capables de fonctionner en service normal sous les tensions sanctionnées pour les câbles aériens, sans cependant qu'il fût nécessaire de donner au câble des dimensions incompatibles avec une saine économie.

L'importance de cette démonstration expérimentale était évidente ; aucune Compagnie d'Electricité n'aurait consenti à risquer, de prime abord, l'emploi pour les très hautes tensions de câbles souterrains sans avoir acquis une certitude au sujet du bon fonctionnement d'une canalisation semblable.

La maison Geoffroy et Delore, après une étude approfondie, proposa, à la fin de 1903, à la Compagnie Thomson-Houston, de faire sous son contrôle, et avec son concours, une expérience démonstrative à cet égard, à la première occasion qui se présenterait de transporter l'énergie électrique sous très haute tension par câbles souterrains. La Société Thomson-Houston étudiait, précisément à cette époque, le transport de force d'Entraygues à Toulon, qui devait se faire sous une tension efficace de 28 000 volts (*).

M. Renaud, directeur général, et M. de Marchena, ingénieur en chef de la Compagnie Thomson-Houston, acceptèrent de faire l'essai proposé par la maison Geoffroy et Delore c'est-à-dire mettre en série avec la ligne aérienne, à l'arrivée à Toulon, un câble souterrain armé. Ce câble devait par conséquent subir tous les à-coups inhérents à une installation en marche normale et industrielle : variations brusques de régime, coupure des feeders en charge, surtensions possibles dues aux décharges atmosphériques, etc., toutes causes pouvant produire des surélévations de voltage, sur l'importance desquelles les avis sont partagés, mais qui peuvent certainement atteindre plusieurs fois la tension normale de fonctionnement.

Le programme établi comportait la fourniture de 1 375 mètres de câble à trois conducteurs, isolés et armés, possédant une section utile de cuivre de 25 millimètres carrés par conducteur, et constitués de manière à permettre de fonctionner industriellement sous une tension efficace de

26 000 volts entre conducteurs et de 15 000 à 15 500 volts entre un conducteur et la terre.

Avant l'expédition, ces câbles devaient être soumis en usine à des essais sous les tensions et pendant les durées indiquées ci-dessous :

a) Entre deux conducteurs.....	{	60 000 volts efficaces pendant 1 heure	80 000	—	—	1 minute
b) Entre conducteurs et plomb	{	36 000	—	—	—	1 heure
		50 000	—	—	—	1 minute

(c'est-à-dire, pendant 1 minute, trois fois ou trois fois et demie la tension normale de service).

c) Sur deux échantillons de 2 mètres de longueur il devait être fait, à titre de renseignement, des essais de claquage, jusqu'à la plus haute tension qu'il serait possible d'atteindre entre un conducteur et les deux autres réunis à la chemise en plomb.

Après la mise en place des câbles, il devait être effectué sur la totalité de la canalisation un essai prolongé pendant une heure sous une tension de 26 000 volts entre un conducteur et les deux autres réunis au plomb.

Afin que l'expérience fût plus instructive, il fut convenu qu'on essaierait en même temps deux types de câbles avec des épaisseurs différentes de diélectrique. Il importait, en effet, de se rendre compte de l'épaisseur minimum à laquelle on pouvait pratiquement descendre, le câble devant être avant tout industriellement utilisable. A cet effet on prépara : 1° un câble A dans lequel l'épaisseur de la couche isolante correspondrait au minimum jugé admissible, et 2° un câble B dans lequel l'épaisseur était encore plus réduite.

Ces câbles étaient du type dit à trois conducteurs cordelés, réunis sous la même chemise de plomb et la même armature. Chaque conducteur, constitué par du cuivre de haute conductibilité, avait une section de 25 millimètres carrés, et était isolé par une couche de cellulose imprégnée d'une matière isolante spéciale. L'armature comprenait : une gaine de plomb, un matelas de filin goudronné, deux feuillards d'acier enroulés en hélice dans le même sens et formant couvre-joint l'un par rapport à l'autre, et enfin un dernier matelas extérieur de filin goudronné.

Les essais à l'usine donnèrent les résultats suivants :

Essais du	Câble A		Câble B	
		Température		Température
<i>Capacités kilométriques (microfarads par kilomètre) :</i>				
1° Entre deux conducteurs.....	0,087	23°	0,092	26°
2° Entre un conducteur, les deux autres réunis au plomb.....	0,155	»	0,165	»
<i>Isolement kilométrique (en mégohms par kilomètre) :</i>				
Entre un conducteur, les deux autres réunis au plomb.....	1,400	»	950	»
Durée d'électrification.....	2 min.		3 min.	

Le câble A fut essayé (par bobines d'environ 200 mètres) à : 60 000 volts pendant 15', entre conducteur et plomb ; 92 500 volts pendant 15', entre conducteurs.

Le câble B ne fut essayé, dans les mêmes conditions, qu'à 56 000 et 90 000 volts.

Ces essais furent répétés plusieurs fois sur les mêmes bobines et toujours sans incident pour les câbles.

Des échantillons, prélevés sur chaque catégorie de câble

(*) Voir *La Houille Blanche*, janvier 1906.

ont été soumis aux plus hautes tensions (un peu plus élevées que dans les essais sur les bobines, à cause de la très faible capacité des échantillons qui avaient seulement quelques mètres de longueur).

Les plus grandes précautions furent prises pour ces essais de claquage qui ne sont pas encore d'une pratique courante, et la plus haute tension obtenue fut de 97 000 volts.

Pendant ces essais, qui furent renouvelés plusieurs fois et à des températures différentes, on n'a pu obtenir aucune décharge disruptive à travers le diélectrique, même dans le cas du câble le moins isolé (B).

Quand on atteint de telles tensions, il devient très difficile de préparer les expériences qui exigent des bouts très longs pour les échantillons en essai; de fortes aigrettes sont nettement visibles: elles courent de l'âme en cuivre à la chemise de plomb; les surfaces en jeu facilitent la formation de ces effluves, et il est difficile d'éviter de fortes étincelles qui, créant de rapides oscillations et de brusques changements de régime, sont néfastes pour les transformateurs.

Dans un essai à haute tension entre conducteur et plomb, la répartition du potentiel n'est pas linéaire et le diélectrique travaille davantage dans le voisinage du cuivre que sous la gaine de plomb. Il faut aussi remarquer que le petit diamètre d'un conducteur en cuivre de 25 millimètres carrés est une circonstance défavorable pour la bonne résistance du diélectrique.

Dans le cas du câble B, essayé à 60 000 volts entre conducteur et plomb, les formules connues indiquent que le travail maximum du diélectrique est au voisinage du cuivre de 20 000 volts par millimètre en chiffres ronds.

La pose du câble a été faite par les soins des constructeurs MM. Geoffroy et Delore.

Il a été ouvert une tranchée de 0m90 de profondeur et de 1m15 de largeur; le fond de la tranchée a été recouvert d'une couche uniforme de 0m10 d'épaisseur de sable de carrière sur laquelle les câbles ont été déroulés; ils ont été ensuite renfermés dans un cloisonnage en briques, afin d'éviter les détériorations accidentelles. Les parois verticales ont été constituées par une rangée de briques creuses de 4,5 X 11 X 21 placées bout à bout. On a rempli de sable; puis la couverture de cette espèce de caniveau a été faite avec des briques creuses de 3 X 14 X 21, posées à plat sur les premières; ensuite les tranchées ont été remblayées.

Les plus faibles rayons de courbure se trouvaient à l'entrée du poste du Brunet et à la boucle d'extrémité; ils étaient au minimum de 2 mètres.

La tranchée renfermait encore un autre câble en parallèle avec lui. La tranchée contenait en outre le câble pour 3 500 volts alimentant l'usine des tramways.

Les câbles armés partaient du tableau du poste du Brunet et y revenaient après avoir formé une boucle. Une simple manœuvre de couteaux à double effet permettait d'introduire les câbles armés en série avec la ligne aérienne ou de faire arriver directement le courant sur les barres omnibus.

L'installation devait être faite, dans l'esprit du projet primitif, de telle sorte que les bobines de self et les parafoudres puissent protéger les câbles armés contre les surtensions possibles sur la ligne aérienne (ces conditions de protection sont des plus courantes, même dans les transports de force à plus faible voltage).

Cependant, les selfs étaient mises hors circuit quand on branchait les câbles. Les expériences n'en sont que plus concluantes, les câbles n'ayant été aucunement protégés contre les surtensions qui se sont certainement produites pendant toute la durée de la mise en service, notamment en raison des nombreux coups de foudre que l'installation a eu à supporter.

L'interrupteur à cornes placé sur le circuit des câbles n'a jamais servi; il fonctionnait très mal, et son usage était plutôt dangereux.

Pour enlever les câbles du circuit, on coupait d'abord les interrupteurs à huile sur 28 000 volts; les couteaux ordinaires suffisaient à couper le courant de capacité.

Les essais d'isolement effectués après la pose, et successivement entre chacun des trois conducteurs et la terre ont donné les résultats suivants exprimés mégohms par kilomètre.

CABLES	LONGUEURS — Mètres	TEMPS D'ÉLECTRIFICATION						
		15 secondes	30 secondes	1 minute	2 minutes	3 minutes	5 minutes	10 minutes
A	800	420	560	740	1.200	1.600	»	»
A + B	1.400	»	»	534	1.000	1.600	2.360	3.400

On a ensuite procédé, avant la mise en service régulière du câble, à deux essais de haute tension.

Les essais eurent lieu dans la nuit du 27 au 28 janvier de l'année dernière.

Dans le premier essai, le point neutre du transformateur était à la terre, les trois conducteurs du câble étant branchés seuls sur les trois phases de l'installation. Le courant nécessaire était produit par un des moteurs synchrones de l'usine des tramways tournant en génératrice; de ce fait, le voltage à la sortie du transformateur a pu être porté progressivement jusqu'à 30 000 volts. Ce voltage qui n'a pu être dépassé, le rhéostat de la génératrice étant à bloc, a été maintenu pendant une demi-heure environ.

Dans le deuxième essai, le point neutre du transformateur était isolé, une des phases de l'installation étant mise à la terre. Le voltage a été monté graduellement jusqu'à 28 000 volts, et a été maintenu pendant une demi-heure environ. Cette tension de 28 000 volts s'est donc exercée entre l'un des conducteurs du câble et l'armature.

Il est à remarquer que pendant ces deux essais le câble n'était protégé ni par les parafoudres ni par les selfs; il se trouvait donc dans des conditions défavorables. Pourtant ce câble s'est parfaitement bien comporté et a pu être mis en service immédiatement, c'est-à-dire en série avec la ligne aérienne du transport de force d'Entraygues.

La deuxième expérience constituait une véritable épreuve. L'une des expériences fut particulièrement intéressante, et même impressionnante à cause des phénomènes secondaires qui furent constatés pendant l'essai. Il s'agissait de mettre une des phases du transformateur à la terre, c'est-à-dire de la réunir à l'enveloppe en plomb du câble armé, et de pousser dans ces conditions au maximum de voltage qu'il était donné d'atteindre, ce qui évidemment, était une expérience audacieuse. Aussitôt que les appareils indiquèrent 20 000 volts, toutes les masses métalliques du poste prirent une charge statique et de tous côtés apparurent de fortes effluves nettement visibles dans l'obscurité; elles étaient accompagnées de bruissements très caractéris-

tiques. Ces phénomènes allèrent en s'accroissant jusqu'à 28 000 volts, tension à laquelle les crépitements furent nettement perçus malgré le ronflement du transformateur. L'expérience dura une demi-heure, pendant laquelle les opérateurs furent fortement impressionnés par les phénomènes qui se manifestèrent.

Du 28 janvier au 3 août 1905, les câbles sont restés en service pendant environ 130 jours.

Pendant tout ce temps, les parafoudres sont restés tels qu'on les avait montés, c'est-à-dire avec 56 intervalles d'air par parafoudre, ayant chacun une valeur de $1\text{m}^2\text{25}$, soit au total une distance explosive de 70 millimètres entre chaque fil et la terre.

Le 3 août, l'expérience jugée suffisamment concluante prenait fin, et le câble, après ouverture de la tranchée, était relevé sur tourets.

En résumé, l'expérience qui a été réalisée pendant une durée de six mois, sous le contrôle de la Compagnie Thomson-Houston et de la Société l'Energie électrique du Littoral, s'est poursuivie dans des conditions absolument industrielles, sur un réseau en activité de service ; le câble n'était, pour ainsi dire, pas protégé ; il a eu à subir de nombreux à-coups, provenant des incidents du service, qui ont certainement donné lieu à de fortes surélévations de voltage. Il n'était revêtu que d'une épaisseur de diélectrique réduite au strict minimum, afin de rendre l'expérience plus instructive en établissant, d'une part, l'excellente résistance du diélectrique, en démontrant, en outre, la possibilité d'obtenir un prix de revient très pratique. Malgré cela, le câble a toujours bien fonctionné et n'a donné lieu à aucun incident, même le plus léger.

Nous pensons donc, et c'est notre conclusion, qu'il est permis d'employer les câbles isolés enfouis directement dans le sol pour la transmission de l'énergie électrique, même aux tensions les plus élevées employées jusqu'à ce jour. Il est toutefois indispensable de se servir de câbles construits avec le plus grand soin et très soigneusement essayés.

De plus, nous sommes convaincus que l'on parviendra à remplacer les lignes aériennes de transport d'énergie à haute tension par des canalisations souterraines supportant les mêmes voltages, présentant plus de sécurité et ne coûtant pas davantage si ce n'est même moins. En effet, nous avons assisté, il y a quelque temps, en compagnie d'un certain nombre d'électriciens, à des essais très intéressants de canalisations souterraines, poussés pendant plus d'une heure jusqu'à 56 000 volts en courants alternatifs, tension correspondant à la résistance minimum du rhéostat de réglage du transformateur dont on disposait, lequel était branché sur une distribution d'énergie à potentiel constant.

Cette canalisation avait été fabriquée de toutes pièces en plein champ sur l'emplacement même où elle a été essayée. Nous nous proposons, d'ailleurs, de revenir ultérieurement sur ce sujet.

E. C.

ASSOCIATION FRANÇAISE POUR L'AVANCEMENT DES SCIENCES

Le Congrès de 1906 se tiendra à Lyon dans les premiers jours du mois d'août. Nous croyons savoir qu'un grand nombre de communications intéresseront nos lecteurs ; nous en donneront ultérieurement le programme.

Sur la quantité d'eau qu'on utilise dans un ruisseau

J'ai cherché précédemment (1) à montrer quel intérêt pouvait exister dans l'emploi simultané de deux chutes d'eau dans une même usine ou sur un même réseau de distribution d'énergie, l'une des deux ayant le caractère de haute chute. J'ai indiqué des exemples et je puis citer encore l'installation du lac Tanay, faite en Suisse par M. Boucher. Cette chute, la plus haute du monde comme le savent les lecteurs de *La Houille Blanche*, a eu principalement pour but de venir en aide à la Société des forces motrices de la Grande-Eau, qui a son usine à 10 kilomètres de Vouvry, point où aboutit l'eau du lac Tanay. La Société était arrivée à l'extrême limite de l'utilisation de la Grande-Eau, dont le débit baisse beaucoup en hiver.

On créa donc l'usine de Vouvry, en y plaçant des alternateurs de même voltage et de même fréquence que ceux de la Grande-Eau, de manière qu'on puisse les mettre en phase sur le réseau.

L'usine de la Grande-Eau est actionnée par une chute déjà élevée, 200 m, mais celle-ci est cependant relativement basse si on la compare à la chute de Tanay-Vouvry, qui atteint 950 m. de différence de niveau et 920 m. de pression effective.

Il résulta de l'accouplement des deux courants sur le même réseau une utilisation meilleure du débit variable de la Grande-Eau ; c'est ce que M. Boucher montre dans sa brochure : « Forces motrices du lac Tanay » et il nous permettra de le citer textuellement.

Voici ce qu'il dit en parlant des simples ruisseaux des Alpes et de ceux qui sont l'émissaire d'un lac :

« Lorsqu'il s'agit d'eaux courantes, ruisseaux ou rivières, on ne peut utiliser pour des services publics, force et lumière, qu'un volume d'eau correspondant aux débits en basses eaux. Ces débits, dans les Alpes, sont à peine le quart du débit moyen. De plus, la consommation varie beaucoup d'une heure à l'autre, la moyenne est le plus souvent inférieure au quarante pour cent du maximum. On n'utilise donc que moins du quarante pour cent du quart de l'eau. soit moins d'un dixième. »

« Au contraire, lorsque les eaux peuvent être emmagasinées totalement dans un lac, l'utilisation peut devenir intégrale, c'est-à-dire au moins dix fois meilleure. »

Il ajoute plus loin, parlant des usines de Vouvry et de la Grande-Eau qui peuvent travailler ensemble sur le même réseau :

« Cet accouplement des usines donne non seulement une très grande sécurité au service, mais crée une puissance beaucoup plus considérable que la somme des puissances des usines isolées. »

« En effet, l'usine de la Grande-Eau seule ne peut pas utiliser plus que le dixième de l'eau de la rivière, comme nous l'avons vu plus haut. Reliée à l'autre elle peut, pendant la plus grande partie de l'année, utiliser un volume d'eau beaucoup plus grand que celui de l'étiage, parce que dès qu'elle en manque, les puissantes réserves du lac Tanay viennent à son secours. »

Si une haute chute n'a pas de lac pour l'alimenter et permettre l'emploi judicieux de l'eau, on pourra cependant, d'une manière générale, créer un réservoir qui, ne fût-il que journalier, améliorera singulièrement sa puissance pratique et son pouvoir de régularisation, lui permettant de venir en aide à quelque basse chute et d'utiliser, sur les deux cours d'eau, une quantité de leur énergie totale disponible qui soit supérieure au dixième que M. Boucher montre si bien être le résultat ordinaire dans les installations de réseaux électriques.

BRAVET,
Ingénieur E.-C.-P.

(1) Voir *La Houille Blanche*, novembre 1905.