

LA HOUILLE BLANCHE

Revue générale des Forces Hydro-Electriques
et de leurs applications

8^e Année. — Novembre 1909. — N^o 11.

*La Houille noire a fait l'Industrie moderne;
la Houille blanche la transformera.*

SUR LE PROJET

DE

TRANSPORT D'ÉNERGIE DU RHÔNE A PARIS

DE MM. BLONDEL, HARLE ET MAHL

Communication présentée le 7 août 1908, au Congrès de Clermont-Ferrand, de l'Association Française pour l'Avancement des Sciences par M. A. BLONDEL, professeur à l'École des Ponts et Chaussées, et ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Le projet dressé pendant ces années dernières par MM. Blondel, Harle et Mahl, et qui a été récemment soumis à l'examen d'une Commission de la Ville de Paris, a fait déjà devant l'Association Française l'objet d'une remarquable communication de M. de la Brosse, qui était rapporteur de cette Commission ; il a exposé les dispositions générales du projet, sur lesquelles il est donc inutile de revenir (1).

On se bornera, dans ce qui suit, à donner quelques renseignements complémentaires sur les dispositions électriques du projet, notamment une comparaison entre les solutions à courant continu et à courant triphasé, et une justification de la possibilité de la transmission à une si grande distance et une si haute tension que celles prévues par ce projet.

COMPARAISON ENTRE LES DEUX SOLUTIONS A COURANT CONTINU ET A COURANT TRIPHASÉ

La comparaison à faire se réduit en pratique à mettre en balance le système continu série avec des câbles souterrains à 100 000 volts à l'arrivée, et le système des courants triphasés avec lignes aériennes à 100 000 volts à l'arrivée (2).

La première solution est plus séduisante au point de vue des lignes, parce qu'elle supprime tout entretien, toute surveillance et toute cause d'arrêt par coups de foudre, rupture d'isolateurs, oragans, etc. Elle réduit à la simplicité la plus grande les stations de départ et d'arrivée et permet de supprimer tout l'encombrement et coûteux appareillage qu'exigent les courants triphasés, non seulement dans les stations terminales, mais aussi dans les postes de transformation en route. On ne saurait nier que le système à courant continu série se présente comme de beaucoup le plus simple des deux, même avec la nécessité de transformer à l'arrivée tout ou partie des courants par des machines tournantes.

Mais on ne peut encore invoquer aucun exemple d'installation analogue à une tension aussi élevée ; l'installation de Moutiers à Lyon, qui, après les difficultés du début, paraît donner aujourd'hui un bon fonctionnement, n'utilise qu'une tension au plus moitié moindre, et les câbles souterrains dans Lyon ne sont pas posés depuis assez longtemps pour qu'on puisse établir des pronostics absolument certains au sujet de leur durée.

De même, les machines projetées, bien qu'étudiées par M. Thury, dont la haute compétence est de nature à donner toute confiance dans le succès, n'ont pas encore été réalisées et on n'a pas la sécurité absolue que les collecteurs se comporteront d'une manière parfaite ; cette sécurité absolue ne pourra être donnée

que par des expériences préalables sur un modèle réalisé du même type de machine : ces expériences sont d'ailleurs très possibles.

D'autre part, le système à courants triphasés présente aussi des inconvénients et des avantages. Les inconvénients sont : la complication des stations transformatrices et leur prix très élevé par rapport à celui des stations ordinaires, les difficultés d'entretien des lignes aériennes et les chances d'arrêt par coups de foudre ; les risques de résonance ; les variations de voltage, plus considérables le long des lignes et la perte plus grande dans celles-ci ; les courants de charge à vide, qui occasionnent des pertes à vide d'un ordre comparable à celui des lignes à courant continu série à cause de leur grande intensité, due à la très haute tension choisie.

Mais nous espérons avoir réduit ces inconvénients au minimum par l'adoption de quatre lignes en parallèle, par l'addition ultérieure de deux autres, par les précautions prises pour la mise hors de circuit de toute ligne endommagée, par l'adoption de fils de garde au-dessus des lignes et de parafoudres étages assistés de limiteurs de tension, par la suppression des harmoniques et par la mise hors de circuit de toute ligne non suffisamment chargée.

Au point de vue des dépenses d'établissement, les lignes triphasées reviennent sensiblement moins cher que les lignes à courant continu souterraines et un peu plus cher que si ces dernières sont rendues aériennes ; l'énergie perdue dans les lignes est peu différente aussi dans les deux solutions parce que la perte, plus faible en valeur absolue dans le système courant continu, s'étend à un plus grand nombre d'heures annuellement.

Les frais d'établissement et d'exploitation des usines sont aussi à peu près du même ordre, bien que l'on trouve un certain avantage en faveur de la solution triphasée.

Le courant triphasé présente un avantage très important au point de vue du succès d'une entreprise comme celle-ci ; c'est son élasticité et les ressources qu'il présente pour l'avenir. En cas d'un insuccès (qui n'est, d'ailleurs, pas à prévoir, étant donné les résultats des nouvelles installations américaines à 80 000 volts en ce moment), on a toujours la ressource très facile d'abaisser la tension sur la ligne, au moins pendant les premières années d'exploitation, sans risquer de ne pouvoir utiliser le matériel ; avec le courant continu, un échec dans la construction des câbles, dans la construction ou dans l'isolement des machines, paraît moins facilement réparable.

Un autre avantage important des courants triphasés, c'est que l'usine génératrice peut être équipée avec un seul matériel, tous les groupes générateurs étant interchangeables et pouvant, à l'aide de transformateurs variés, permettre d'employer l'énergie des générateurs à volonté pour le transport sur Paris, pour les distributions locales ou pour l'électrochimie ; notre courant basse tension à 12 000 volts pouvant servir lui-même directement à la fabrication des nitrates artificiels. On n'obtient pas toute la même élasticité avec le système à courant continu série, parce que les groupes générateurs à courant continu ne peuvent être utilisés pour les usages locaux ; on serait obligé d'y adjoindre une seconde usine formée de groupes triphasés analogues à ceux de la solution triphasée ; les machines des deux systèmes ne peuvent être interchangeables, ni se servir mutuellement de réserve pour réaliser la même utilisation totale de la force motrice du Rhône. On serait donc amené probablement à installer un plus grand nombre de groupes supplémentaires triphasés qu'il n'est strictement nécessaire, et on aurait ainsi à prévoir un supplément de dépenses considérable et un encombrement peut-être inacceptable.

Quant à la distribution en cours de route, elle présente des conditions difficilement comparables dans les deux systèmes. Dans

(1) Voir *La Houille Blanche* de mai 1909

(2) Les tensions utiles correspondantes, entre fil et point neutre, sont $\frac{100000}{2} = 65000$ volts et $\frac{100000}{\sqrt{3}} = 57800$ volts, c'est-à-dire peu différentes.

le système courant continu, les transformations exigent des machines tournantes et entraînent une perte d'énergie plus grande qu'avec les simples transformateurs statiques (1) ; mais les stations sont beaucoup plus simples comme appareillage et l'alternateur commandé par le moteur à courant continu se prête à un réglage de tension parfait ; tandis, que dans le système triphasé, le réseau secondaire local de distribution sera soumis aux variations de la tension sur la ligne qui peuvent atteindre, suivant les heures du jour, jusqu'à 20 et 25 %, le courant distribué peut être cependant réglé soit par addition d'une self fixe dans le circuit local, soit par l'emploi de régulateurs automatiques sur le secondaire des transformateurs. Il pourra donc être utilisé directement à la production de la force motrice ; mais, pour l'éclairage, il faudra peut-être recourir à des moteurs générateurs pour avoir une régularité parfaite (2). Ces difficultés de réglage sont moindres avec le courant continu, qui se prête aussi mieux à la distribution de petites forces motrices en cours de route. Mais cette question de la distribution en ligne doit être considérée comme secondaire dans un transport qui a pour caractéristique principale l'alimentation de Paris.

Pour les motifs précédents, dans l'état actuel de la technique, le projet à courants triphasés paraît être celui qui offre provisoirement, sinon la plus grande élégance, du moins le minimum d'aléas ; il a l'avantage aussi que nous pourrions bénéficier très prochainement, pour le mettre au point, des résultats d'expérience des lignes de Stanislaus, de la Great Western Co, et autres, à 100 000 volts, qui se construisent actuellement aux Etats-Unis, et de celle de Muskegon-Grands Rapids, qui est en fonctionnement effectif sous cette tension depuis quelques mois.

Mais nous nous réservons de profiter aussi, avant l'exécution de l'installation électrique, de tous les progrès ultérieurs qui s'opéreront dans le système concurrent.

Il ne faut pas oublier que les travaux hydrauliques doivent être exécutés avant la commande du matériel électrique ; au moment où aura lieu cette commande, nous posséderons d'autres éléments d'appréciation plus récents qui permettront, soit de confirmer notre choix actuel provisoire, soit, au contraire, de le modifier en faveur du courant continu ; il suffirait pour cela qu'une démonstration expérimentale pût être faite sur une petite échelle, au moyen de la nouvelle machine projetée par M. Thury et des câbles proposés par la Société Française des Câbles électriques.

L'étude plus prolongée du fonctionnement du transport de Moutiers à Lyon permettra aussi de juger, dans un an ou deux, d'une manière plus certaine, la valeur pratique du système.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA PRATICABILITÉ DE L'ENTREPRISE

On a pu être surpris et impressionné de nous voir présenter un projet de transport de transmission électrique à une distance aussi considérable ; car 450 kilomètres séparent Génissiat (près de Bellegarde) de Paris, et les lignes auront plutôt 500 kilomètres, si l'on tient compte de l'allongement du tracé par quelques détours, et par la flèche des câbles conducteurs ; toutes circonstances qui ont été prises, d'ailleurs, en considération dans nos calculs.

Cette distance dépasse de beaucoup ce que l'on est habitué à considérer en France comme une limite pratique de transmission électrique (soit environ 100 à 150 kilomètres), et même notablement la plus longue transmission connue aux Etats-Unis, qui est celle de Colgate à San-Francisco (360 kilomètres).

On est donc en droit de se demander quels sont les procédés nouveaux ou les circonstances exceptionnelles qui nous permettent d'être si audacieux dans nos propositions et qui ont autorisé la Commission technique de la Ville de Paris à leur donner sa haute approbation.

Il est facile de donner la réponse à cette question :

Notre entreprise est rendue possible, d'une part, par les perfectionnements récents de la technique des hautes tensions, et d'autre part, par les conditions spéciales particulièrement favorables que nous rencontrons pour l'installation d'une chute sur le cours du Rhône et pour la vente de l'énergie produite. Examinons ces deux points de vue en détail.

(1) Un poste transformateur statique d'énergie donnerait un rendement d'environ 95 pour 100, tandis que le poste à moteurs générateurs ne donnera pas plus de 90 pour 100 pour les grandes puissances, et 85 pour 100, pour les distributions en route que nous prévoyons.

(2) En effet le réglage de la tension sur la ligne triphasée sera fait en vue d'assurer une tension constante à l'arrivée à Paris et toutes les variations de voltage se font sentir sur la ligne en amont ; elles croissent progressivement, et atteignent leur maximum à la station génératrice.

I. — PROGRÈS TECHNIQUES. — Sans qu'il y ait d'inventions nouvelles à proprement parler, les moyens techniques se sont beaucoup perfectionnés dans ces dernières années et avec une rapidité supérieure à ce qu'on avait constaté jusqu'ici. Bien plus, ces progrès, dans les possibilités d'emploi de la haute tension, se sont produits, à peu près simultanément, aussi bien pour courant continu que pour courant triphasé.

Matériel électrique. — D'une part, M. Thury, dont on connaît les remarquables travaux sur le système série à courant continu, a résolu le problème, depuis longtemps posé, de construire des unités à courant continu, haute tension, beaucoup plus puissantes que celles qu'on connaissait jusqu'alors, et il peut mettre aujourd'hui à notre disposition des machines fournissant individuellement, par deux collecteurs, 750 ampères sous 3.000 volts (au lieu de 75 ampères seulement au transport de Moutiers à Lyon) ; il a pu perfectionner l'isolement de ces machines par rapport au sol, de telle manière qu'il n'y ait pour ainsi dire plus de limite à la tension utilisable.

D'autre part, les grands constructeurs américains, qui avaient déjà montré, il y a quelques années, à l'Exposition de Saint-Louis et dans d'autres circonstances, des transformateurs pouvant fournir des tensions de 100 000 à 200 000 volts, grâce à une construction soignée et à l'isolement par l'huile en cuve fermée, paraissent avoir résolu maintenant un second problème encore plus difficile, celui de la rupture brusque de courants très puissants sous de très hautes tensions, condition indispensable pour l'exploitation d'une transmission comme celle que nous envisageons ; ils sont arrivés aujourd'hui à construire des appareils robustes qui peuvent couper, dans trois cuves séparées, correspondant aux trois phases, une puissance totale de 20 000 kilowatts sous 100 000 à 120 000 volts.

Isolateurs. — Enfin, les lignes de transmission ont elles-mêmes subi des progrès intéressants, non pas tant au point de vue qualitatif qu'au point de vue quantitatif ; c'est-à-dire qu'on a augmenté peu à peu la qualité et la dimension des cloches de porcelaine des lignes aériennes de telle sorte qu'on peut aujourd'hui envisager avec confiance le problème de la construction d'un isolateur pour ligne de 120 000 volts triphasés. Bien plus, nous disposons, pour l'isolement de ces lignes, de quelques moyens nouveaux intéressants :

L'isolateur à chapeau métallique, qui a été imaginé à peu près à la même époque par plusieurs ingénieurs, notamment en France par M. Vulcanesco, et en Allemagne par la Société de Hermsdorf ; celle-ci a étudié pour nous un type rationnel en même temps qu'économique, formé de deux ou trois cloches en porcelaine, surmontées d'un grand parasol métallique, qui les protège contre la pluie et auquel nous avons fait donner un bord toroidal pour empêcher l'ionisation de l'air. Les essais ont montré qu'un pareil isolateur avec deux cloches seulement peut être essayé sous la pluie à une tension de plus de 200 000 volts, et l'isolateur à trois cloches de porcelaine, plus un chapeau de métal, supporterait sans doute 300 000 volts. L'efficacité du dispositif provient surtout de ce que, sous l'effet du champ électrique puissant produit par la cloche, les gouttes d'eau qui tombent sur le chapeau, et qui se trouvent électrisées, sont projetées à distance sans tomber sur les cloches de porcelaine ; la principale cause de production des arcs se trouve ainsi évitée.

L'isolateur suspendu récemment imaginé et qui jouit en ce moment aux Etats-Unis d'une certaine vogue, formé d'un certain nombre de cloches réunies les unes aux autres, à joints croisés, par des connexions en câble métallique isolées les unes des autres par une certaine épaisseur de porcelaine, suivant le principe déjà anciennement réalisé dans les boules isolantes de tramways, dont ce système ne se distingue que par la matière et la forme des isolants.

Chaque élément peut résister à environ 25 000 volts et il suffit d'en grouper 5 en série pour résister à 125 000 volts. Ce dispositif a l'avantage que le bris accidentel d'une cloche n'entraîne pas la chute des câbles ni la rupture des autres isolateurs ; il a, par contre, l'inconvénient que les câbles peuvent osciller sous l'action du vent, et qu'il faut par conséquent les suspendre à des bras présentant un porte à faux considérable et exigeant des pylônes de hauteur beaucoup plus grande que pour les lignes portées.

Supports. — Cela nous conduit à ajouter en passant que des lignes du genre des nôtres ne peuvent être construites que sur des pylônes extrêmement solides, soit en métal, soit en béton

armé ; les progrès réalisés dans la construction des pylônes métalliques aux Etats-Unis, notamment par l'emploi de systèmes à grandes mailles et à large base de sustentation, nous ont permis de proposer des types à la fois solides et rationnels, tout en maintenant entre des conducteurs un écartement considérable (3 mètres) pour réduire au minimum les risques d'ionisation de l'air.

Appareils de protection. — Les procédés de protection des lignes aériennes se sont également peu à peu précisés et perfectionnés, et nous pouvons disposer aujourd'hui, pour la protection d'une ligne à 120 000 volts en courant alternatif (et *a fortiori* pour une ligne à courant continu), des dispositions protectrices suivantes :

a) Des parafoudres à cornes placés en dérivation au nombre de 2 ou 3, présentant des écartements variables et munis de résistance en série d'autant plus fortes que l'écartement est plus faible, de telle sorte que la décharge atmosphérique trouve un chemin d'écoulement d'autant plus facile qu'elle jaillit à plus haute tension et que le courant de court-circuit s'éloigne rapidement et progressivement ; pour le plus ouvert des parafoudres, la résistance sera remplacée par un fusible ;

b) Des batteries de soupapes électrolytiques à aluminium, qui peuvent être mises en série avec les parafoudres à cornes et aider ainsi à interrompre les courants de court-circuit dès que la tension est redevenue normale ;

c) Des déchargeurs continus à rouleaux de métal anti-arc, dont le seul défaut est de devenir fort encombrants pour les hautes tensions et qui pourront être remplacés peut-être par des résistances en sable mouillé ;

d) Des self-inductions protectrices qui empêchent les courants oscillants de pénétrer jusqu'aux transformateurs ;

e) Enfin, des batteries de condensateurs industriels qui, sans être trop encombrantes, peuvent être ajoutées en dérivation aux entrées des usines lorsqu'il s'agit des courants continus et laisser passer librement les décharges oscillantes. On ne saurait, pour les courants triphasés, leur donner qu'une capacité limitée, parce que nous avons déjà à craindre un courant à vide trop fort par le simple effet de la capacité de notre ligne qui est considérable.

On peut, en outre, ajouter des limiteurs de tension en dérivation sur les selfs et les condensateurs.

Ceci nous amène à remarquer que nos lignes elles-mêmes jouent le rôle d'appareils de sécurité par suite de cette capacité et aussi par l'ionisation de l'air ; celle-ci dissipera une grande quantité d'énergie dans le diélectrique environnant toutes les fois que la tension s'élèvera trop au-dessus de la tension normale que nous avons choisie et en vue de laquelle nous avons dimensionné le diamètre de nos câbles, de façon qu'il n'y ait pas d'ionisation sensible à cette tension.

Câbles. — Enfin, des progrès tout à fait remarquables réalisés au cours des quatre dernières années dans la fabrication des câbles électriques, notamment par l'emploi de meilleurs procédés d'imprégnation, ont permis à des constructeurs audacieux et compétents, comme MM. Berthoud-Borel et C^o, de Lyon, guidés par leur expérience du transport de Moutiers, de réaliser des câbles armés souterrains à courant continu, qui, sous une faible épaisseur de 5 à 7 millimètres d'isolant, peuvent supporter d'une manière prolongée une tension de plus de 200 000 volts entre âme et terre, soit 33 % de plus qu'il ne nous serait nécessaire pour un transport par conduite souterraine à 150 000 volts. Ces câbles sont exposés à Marseille, ils sont soumis à des démonstrations publiques très intéressantes.

Nous avons donc trouvé, du côté des constructeurs, un appui précieux au point de vue technique pour la réalisation de la tension dont nous avons besoin et nous avons pu mettre en comparaison la solution par courant continu avec conducteurs aériens, ou mieux avec câbles souterrains, et la solution par courants triphasés à conducteurs aériens ; les effets de capacité à courant alternatif sont, en effet, tellement énormes, à ces tensions, qu'on ne saurait songer un instant à un transport triphasé souterrain.

2° CIRCONSTANCES SPÉCIALES FAVORABLES. — Tous les progrès techniques que nous venons de signaler auraient été inefficaces si notre problème ne présentait par ailleurs les circonstances favorables suivantes :

Puissance. — Tout d'abord, la grande puissance à transporter, qui variera de 60 000 kilowatts au minimum à 150 000 kilowatts, suivant les saisons, les heures de la journée, etc., nous permet d'employer des câbles de grosse section (150 millimètres carrés par câble), présentant un diamètre de 20 millimètres environ

(que nous obtenons naturellement dans le cas de l'aluminium ou artificiellement par l'emploi d'âmes en chanvre dans le cas du cuivre) ; grâce à ce diamètre nous pouvons nous contenter d'un écartement de 3 mètres entre fils sans risque d'ionisation, espacer nos pylônes de 150 à 200 mètres sans risquer de rupture de câble, et réduire ainsi les difficultés d'installation de la ligne, et les points faibles que constituent les isolateurs ; toutes choses qui seraient impossibles avec des fils plus fins.

Débouché. — En second lieu, la concentration de cette grande puissance sur un seul transport d'énergie nous permet d'établir des lignes relativement économiques, et pouvant cependant supporter des frais de vérification et d'entretien sur ce long parcours sans augmentation notable du prix du kilowatt-heure. Cette grande puissance permet aussi de répartir les conducteurs en un grand nombre de lignes distinctes (jusqu'à six lignes triphasées, portées sur trois rangs de supports différents) ; ceci réduit à peu près à rien les chances d'interruption de la transmission par accident, car le calcul des probabilités montre que la probabilité d'un accident sur une ligne étant elle-même déjà très faible quand la ligne est bien installée, la probabilité d'un accident simultané sur les six lignes est sensiblement nulle.

L'énergie annuelle utilement transportable à distance sera de 500 à 600 millions de kilowatt-heures.

L'existence, à l'extrémité des lignes, d'un centre de consommation aussi considérable que Paris et sa banlieue, dont les besoins ne font qu'aller en croissant et dépasseront très vraisemblablement un milliard de kilowatt-heures avant dix ans, assure à notre entreprise un débouché immédiat et presque indéfini, et pourrait la dispenser de chercher de la clientèle sur son parcours.

Frais d'établissement. — Toutes ces conditions réunies permettent seules l'emploi de la tension considérable que nous avons en vue, et les dépenses très élevées qu'entraîne cette tension au point de vue de l'établissement des stations génératrices et transformatrices ; une entreprise de plus petite envergure ne pourrait pas les accepter, et c'est pourquoi l'on ne voit que rarement les tensions des transports d'énergie ordinaires dépasser 20 000 à 30 000 volts ; il faut déjà de grosses puissances pour oser atteindre d'une manière économique les tensions de 50 000 volts, comme dans les récentes installations de l'Énergie électrique du Littoral méditerranéen, de la Société Grenobloise de Force et Lumière, et de la Société Pyrénéenne d'Électricité.

Grâce à cette haute tension, et à la construction mécanique des lignes, les frais d'établissement de la canalisation de transmission proprement dite ne sont pas notablement plus élevés que ceux de beaucoup de réseaux à tension de 20 000 à 25 000 volts, obligés de s'étendre sur de grands espaces et avec de nombreuses dérivations pour chercher la clientèle. Nos calculs font ressortir en effet notre prix de ligne à 300 francs par kilowatt, transport en charge normale, tandis que dans les entreprises dont nous parlons, on trouve des prix variant de 200 à 300 francs par kilowatt.

Enfin, toutes ces conditions favorables ne suffiraient pas s'il ne s'en trouvait une autre capitale, à savoir la possibilité de concentrer toute la puissance motrice disponible du Haut-Rhône sur un parcours de 28 kilomètres en une seule chute et en une seule usine génératrice puissante ; d'où résultent : un minimum de dépense pour l'établissement du barrage et des ouvrages hydrauliques, la possibilité d'emploi d'unités très puissantes (10 000 à 15 000 kilowatts), la centralisation du matériel de haute tension très coûteux, et la centralisation de l'exploitation, la possibilité de réaliser une grande retenue permettant d'emmagasiner une partie des eaux disponibles pendant la journée et même de compenser dans une certaine limite les réductions du débit au moment de l'étiage, et enfin la possibilité d'établir à proximité de la station génératrice des usines électro-chimiques pour absorber les excédents variables de puissance de l'installation, notamment pendant les heures de nuit et pendant les saisons des hautes eaux.

M. de la Brosse, dans sa remarquable étude, a donné des renseignements circonstanciés sur les avantages de la grande retenue, au point de vue du régime hydraulique disponible et des puissances réalisables. Les avantages de la concentration de la puissance motrice en une seule usine ne sont pas moins considérables, si l'on veut bien remarquer les dépenses énormes qu'entraîne la construction d'une usine dans ces conditions, surtout si l'on emploie le courant triphasé qui oblige à créer deux usines, l'une pour la production de l'énergie, l'autre pour la transformation du courant produit en courant de haute tension ; les

appareils de manœuvre de la station transformatrice présentent eux-mêmes une telle complexité, vu la nécessité de tout commander à distance par des servo-moteurs et de remettre toute l'exploitation entre les mains d'un seul électricien en chef chargé de faire toutes les connexions variables suivant les heures du jour et suivant les accidents qui peuvent se produire sur les lignes, qu'il serait pratiquement impossible de subdiviser un pareil matériel entre plusieurs usines fonctionnant en parallèle.

D'ailleurs, au point de vue économique, la concentration peut seule permettre d'obtenir l'énergie à un prix suffisamment bas pour justifier la transmission à Paris ; de même, et réciproquement, seul, le transport à Paris peut gager au point de vue financier une telle entreprise, qui n'exige pas moins de 85 millions de capital d'après nos calculs, (et même 100 millions si l'on ajoute différents éléments de dépense, comme le juge opportun la Commission de la Ville de Paris).

Nos calculs nous ont conduits à installer une puissance totale de 240 000 kilowatts dont la moitié sont destinés normalement au transport sur Paris et moitié à la distribution locale et à l'électrochimie. Dans ces conditions, la dépense totale d'installation de l'usine peut être considérée comme formée de deux parties ; les 120 000 kilowatts destinés à Paris (réserve comprise) reviennent à environ 330 ou 350 francs par kilowatt installé, les 120 000 autres kilowatts, destinés à des emplois intermittents pour l'électrochimie, reviennent à 100 francs le kilowatt. Ces deux prix se présentent comme parfaitement normaux pour des installations hydro-électriques économiques, et franchement inférieurs à ceux de beaucoup d'entreprises de ce genre qui donnent actuellement de bons résultats financiers. D'ailleurs, le prix du kilowatt utile transporté à Paris, en y comprenant une perte en ligne de 10 à 15 % et les frais d'installation de la ligne, ne ressort pas à plus de 800 francs, prix qui permet, comme on le sait, à l'énergie hydro-électrique de lutter avec avantage contre la vapeur, grâce à l'absence de toute dépense de combustible.

Telles sont, en définitive, les causes très complexes, comme on le voit, qui permettent de considérer comme parfaitement rationnelle, au point de vue technique et économique, une entreprise qui a pu paraître, au premier abord, plus ou moins hasardeuse, et de fonder sur elle les meilleures espérances de succès.

LES NOUVELLES LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES DU TUNNEL DU SIMPLON

Depuis l'ouverture de l'exploitation du tunnel du Simplon, en 1906, la traction dans ce tunnel se fait au moyen de locomotives électriques à courant triphasé, ainsi que nos lecteurs le savent déjà, les premières locomotives ayant été décrites dans *La Houille Blanche* de juin 1909, en même

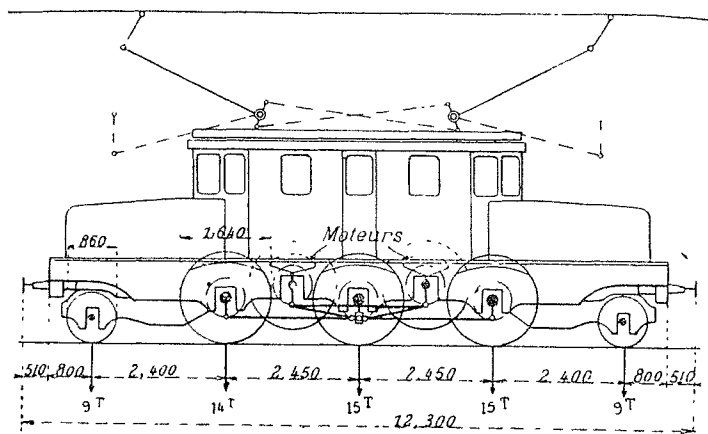


FIG. 1. — Schéma d'une ancienne locomotive.

temps que les installations génératrices hydro-électriques de Brigue et d'Iselle. Depuis 1908, le nombre des locomotives ayant été augmenté de deux unités d'un type légèrement différent, nous allons décrire ces nouvelles locomotives, qui, comme les anciennes, sortent des ateliers Brown-Boveri, de Baden (Suisse) ; mais, au paravant, nous allons rappeler

les principales caractéristiques du tunnel du Simplon, ainsi que celles des anciennes locomotives.

La longueur du tunnel du Simplon est de 19770 m., dont 19322 en alignement droit. L'entrée du côté suisse se fait à Brigue, avec une courbe de 350 mètres de rayon, à la cote 685^m33, et la sortie du côté italien à Iselle, avec une courbe de 400 mètres de rayon, à la cote 633^m60. La rampe du côté suisse est de 2 pour 1000 sur 9,6 km., et la pente du côté italien de 7 pour 1000 sur 10,2 kilomètres.

Les anciennes locomotives, dont la figure 1 donne le schéma comparé à celui des nouvelles machines (fig. 2), sont à 3 essieux moteurs, et sont actionnées par deux moteurs triphasés, alimentés sous la tension de 3000 volts, à la fréquence de 16 périodes par seconde. Les manivelles calées sur les arbres des moteurs sont accouplées entre elles au moyen d'une bielle dont le milieu est relié avec l'essieu moteur central, puis avec chacun des autres essieux porteurs au moyen d'une seconde bielle. Un essieu indépendant à l'avant, et un autre à l'arrière, complètent le système roulant. Les moteurs électriques sont connectés de manière à avoir 8 ou 16 pôles, ce qui, avec des roues de 1^m64, correspond à des vitesses de 70 ou de 35 km. à l'heure. La puissance normale est de 900 chevaux, et la puissance maxima de 1200 chevaux.

Nouvelles locomotives. — Ces machines possèdent quatre régimes de marche au lieu de deux, ce qui améliore notablement le système de traction électrique par courant électrique, au point de vue de la variabilité de la vitesse. (Cette innovation remarquable est due à M. Aichele, ingénieur en chef des ateliers Brown-Boveri). En outre, les essieux sont réduits au nombre de quatre, et sont tous porteurs, de manière à réaliser le maximum d'adhérence.

Les moteurs sont fixés sur le châssis de la locomotive d'une manière rigide, et actionnent les essieux par un double système de biellettes et de manivelles. On remarquera que la bielle triple, qui relie les manivelles des deux moteurs, se déplace parallèlement à elle-même (comme dans les anciennes locomotives d'ailleurs), ce qui supprime l'inconvénient de l'obliquité de la bielle et des trépidations qu'elle entraîne.

Les deux essieux médians sont dépourvus de jeu dans le sens horizontal, mais, par contre, les essieux extrêmes com-

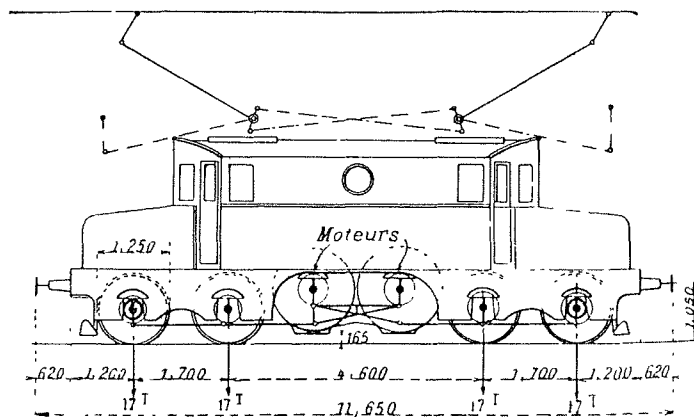


FIG. 2. — Schéma d'une nouvelle locomotive.

portent un jeu à la fois latéral et radial pour le passage dans les courbes, le rayon de celles-ci tombant à 150 m. aux changements de voie dans les gares. A cet effet, les roues sont calées sur un arbre creux, qui est normalement concentrique à l'axe de l'essieu, et qui supporte le poids de la locomotive par l'intermédiaire d'un truck qui peut tourner légèrement