

Quelques aperçus sur l'électrification des chemins de fer en France

Par L. BARBILLION, *Directeur de l'Institut Polytechnique de Grenoble.*

La France a toujours été un pays déficitaire en charbon. Les statistiques publiées en 1913, portant sur la consommation de charbon en 1912, statistiques intéressantes parce qu'elles correspondent à une période d'activité économique stable, accusaient une consommation de 60 millions de tonnes de charbon en France, contre une production de 40 millions. On évaluait à l'époque à 600 ou 800 millions de francs le coût du charbon acquis à l'étranger.

En plus des charges énormes représentées par le service des dettes de toutes natures, par le budget spécial des dépenses recouvrables, notre budget actuel plie encore sous le fardeau des importations. L'importation du charbon coûte des milliards, l'importation des matières premières nécessaires à la fabrication du papier, de 800 à 900 millions, etc. Tout le problème du redressement consiste, en somme, à essayer de nous passer le plus vite et le plus complètement possible de ces importations qui effondrent notre change.

La consommation de charbon des chemins de fer français était de 9 millions de tonnes en 1912. On évaluait à 5 % l'augmentation annuelle du trafic. Par conséquent, en 1932, la consommation de charbon afférant aux chemins de fer aurait été de 18 millions de tonnes. Emus de cette progression croissante, et bien que d'importantes économies puissent être réalisées par ailleurs dans le chauffage domestique, dans les méthodes de la métallurgie industrielle, etc., par la substitution en grande quantité de l'électricité au charbon, l'opinion publique, en même temps que le gouvernement, se préoccupaient, dès 1913, de cette question de l'électrification des voies ferrées. De nombreuses études, mises au point par des Commissions multiples, ont abouti au projet de la transformation, dans un délai d'environ vingt ans, du premier cinquième du réseau français, soit 8.200 kilomètres de voies ferrées, à peu près réparties par tiers entre le P.-L.-M., le P.-O. et le Midi. Cette tâche s'accomplira aussi rapidement que le permet la terrible crise apportée par la guerre. Une partie des lignes sont à électrifier, notamment Paris-Vierzon, du P.-O., parce qu'elles correspondent à une très grosse consommation de charbon, d'autres seront électrifiées parce que leur profil accidenté le nécessite, leur trafic étant d'autre part, suffisant pour justifier une transformation, telles seront les lignes Lyon-Grenoble, Culoz-Modane. C'est cette dernière qui est à électrifier la première sur le P.-L.-M. Quant au Midi, dès 1921, il avait envisagé une électrification progressive de son réseau, mais il a dû modifier son système technique. Ses premiers essais portaient sur un matériel monophasé. Or, aujourd'hui, les pouvoirs publics ont décidé l'adoption uniforme sur le réseau électrifié français du courant continu à 1.500 volts, bien que certaines sections, en réalité peu nombreuses, doivent marcher à 3.000 volts. Cette décision a été prise surtout après l'exemple fourni par l'Amérique.

Le problème était en effet délicat. Si la traction électrique des tramways, et même des métropolitains à faible rayon d'action, est à peu près définie comme type de matériel et comme caractéristiques de courant (courant continu à 500-750 volts pour les tramways, pouvant être porté à 1.200 volts pour certains métropolitains, par exemple le Nord-Sud, à Paris), la transformation des réseaux de chemins de fer suppose l'emploi de locomotives électriques nombreuses et puissantes, les puissances étant souvent de l'ordre de 3.000 chevaux. On voit que le problème de

l'électrification des chemins de fer est tout à fait différent de celui relatif aux tramways et aux métropolitains. Il faut d'abord produire des stocks considérables d'énergie, le plus possible par voie hydraulique pour raison d'économie, en utilisant les stations thermiques comme régulatrices ou comme appoint, transporter ces stocks d'énergie le plus loin possible à la plus haute tension possible, pour en perdre le moins possible, et, enfin, distribuer aux locomotives l'énergie électrique nécessaire.

On doit donc partir de la locomotive, fixer la nature du courant qui lui convient le mieux dans l'état actuel de la technique, puis remonter aux sources et fixer sous quelle forme ce courant peut être transporté et même produit. Or, pour des raisons techniques, que nous ne pouvons exposer ici, faute de place, on ne peut retenir que trois systèmes réellement pratiques, le triphasé, le monophasé et le continu.

Les deux premiers, bien qu'ils aient de nombreux partisans et aient fait l'objet d'importantes applications, ne semblent pas appelés à jouer le rôle capital entrevu lors des premières études relatives à l'électrification des chemins de fer. D'abord, ils influencent d'une manière extrêmement fâcheuse les lignes à courant faible voisines.

Certains réseaux suisses, espagnols, suédois, allemands et américains utilisent le monophasé, que les Chemins de fer du Midi ont eux-mêmes expérimenté, mais le système monophasé est lourd, peu puissant, les moteurs sont incomparablement moins robustes que ceux alimentés en triphasé ou même en continu. C'est une solution singulière que toute l'habileté des Suisses semble à peine suffisante pour lui permettre d'effectuer un service normal sur les lignes du Loetschberg et du Gothard, cette dernière tout récemment électrifiée.

Le triphasé est à la fois plus ancien comme application et plus généralisé que le monophasé. Il a été employé en grand pour la première fois sur les lignes de la Valteline, en 1901 (lignes équipées par la C^o Ganz, de Budapest), en même temps qu'une ligne concurrente, très comparable à celle de la Valteline de par son profil, sa longueur et son trafic, la ligne de Milan-Gallarate, était équipée par la Thomson en courant continu, après transformation dans des sous-stations, malheureusement très nombreuses, du courant alternatif triphasé émis par l'usine. A citer également la ligne de Berthoud-Thoune, en Suisse, installée également en triphasé (1892), de même qu'un certain nombre de chemins de fer de montagne, Zermatt-Gornergratt, Yungfrau, etc. Mais, c'est surtout la ligne du Simplon qui a servi d'école aux constructeurs, fournisseurs du réseau italien. Ce réseau est très important. Il comporte actuellement plus de 500 kilomètres électrifiés en triphasé (tout le réseau piémontais, les Giovi et un certain nombre de sections en tunnel).

Le moteur triphasé est très robuste, mais peu maniable en ce qui concerne la vitesse de marche. Grâce à des artifices assez délicats, on arrive à en réaliser deux, quelquefois quatre par des couplages différents de pôles, au rotor ou au stator, mais ces solutions sont infiniment moins simples que celles utilisées en courant continu, où le grand nombre des moteurs permet des couplages série-parallèle particulièrement souples. Le triphasé a été aussi utilisé en Amérique, mais faiblement. Beaucoup penchent pour le courant continu.

Monophasé et triphasé ont encore un défaut commun. C'est

de nécessiter pour leurs moteurs des fréquences d'alimentation de 16 à 18 cycles par seconde, alors que l'accord s'est fait presque partout pour la fréquence 50, en ce qui concerne la transmission de l'énergie. Il est bien évident qu'au fur et à mesure que le problème de l'électrification prendra de l'importance, les usines affectées à la production des énergies de traction devront se souder aux autres usines, par l'intermédiaire de leurs lignes de transport et de postes de couplage. Or, ce couplage est impossible si l'on emploie des courants alternatifs de périodes différentes. Mais si l'on utilise du courant continu pour alimenter les locomotives, courant continu produit dans des sous-stations par la transformation du courant alternatif haute tension de

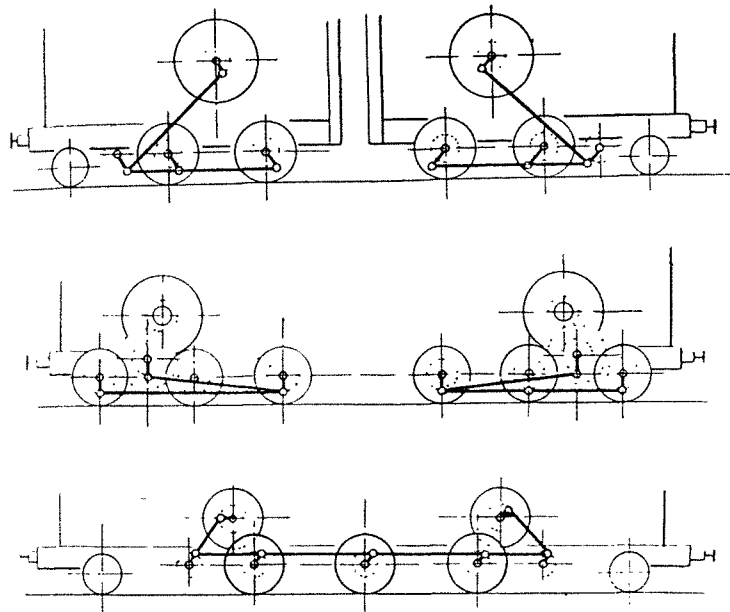


Fig. 1. — Trucs de locomotives monophasées modernes.

1. Locomotives Loetschberg A. E. G. et Oerlikon premier type.
3. Locomotive A. E. G. du Midi.

transport à 50 périodes, rien n'est plus simple que de coupler l'alternatif haute tension. Par contre, si l'on adopte la traction triphasée, comme le font nos amis italiens, c'est un supplice de Tantale que d'avoir des lignes de transport de traction à haute tension et à faible périodicité, côtoyant sans s'y relier les autres lignes de transport, toujours à haute tension, mais fonctionnant à la fréquence 50. C'est ce qui explique les efforts faits depuis longtemps pour alimenter les locomotives triphasées avec du courant de périodicité 50.

Qu'on nous permette, ici, d'ouvrir une parenthèse.

Cette insuffisance d'entente entre les divers réseaux, qui s'est traduite, notamment pendant la période de sécheresse extrême de l'année 1921, par un véritable désastre industriel, constitue dès lors, une source de gêne et de difficultés dont on conçoit l'importance. Dès lors, peut-on concevoir que, en dépit des efforts de tous les techniciens, une situation très grave, qu'un groupe d'ingénieurs-électriciens a signalée à plusieurs reprises à l'autorité militaire, existe dans la région parisienne du fait de l'adoption, depuis vingt ans, dans les secteurs, d'un mode d'utilisation de l'énergie tout à fait désuet, le diphasé à 42 périodes, alors que dans tout le reste de la France (à l'exception près du triphasé à 25 périodes, qui dessert une partie du réseau de l'Énergie du Littoral Méditerranéen), toutes les transmissions d'énergie fonctionnent en triphasé à 50 périodes?

Cette situation anormale, pour ne pas dire plus, dans laquelle

se débat la région parisienne, a failli provoquer, lors de la dernière guerre, un désastre national. Tout le matériel à commande électrique des usines de Paris, s'il avait dû être transporté effectivement en province, serait resté inutilisable !

On aurait pu supposer qu'un pareil danger, qui a fait frémir tous ceux, mêlés de près ou de loin aux organisations de la défense nationale, aurait fait l'objet, dès le lendemain de la guerre, d'études pressantes en vue d'y mettre fin. Rien n'en a été. C'est à peine, comme nous le disions tout à l'heure, si les milieux officiels et administratifs, sous la pression des techniciens, et aussi aujourd'hui, de l'autorité militaire, heureusement avertie, commencent à se préoccuper de la question.

Revenons aux applications du triphasé. Dès 1901-1902, sur la ligne militaire allemande de Berlin-Mariensfeld-Zossen, sous l'impulsion de l'empereur Guillaume, dont les intentions déjà

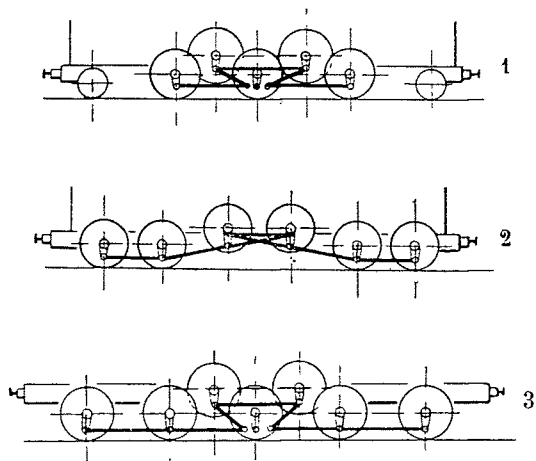


Fig. 2. — Trucs de locomotives triphasées modernes.

- 1 et 2. Simplon (Brown-Boveri).
3. Glovi (Westinghouse).

peu pacifiques à cette époque, s'accommodaient fort de tentatives destinées à intensifier les transports stratégiques, les deux grandes firmes allemandes Allgemeine-Elektrizitäts-Gesellschaft et Siemens-Halske établissaient des voitures automotrices et une locomotive d'essais destinées à fonctionner sous 10.000 volts triphasés à 50 périodes. Les difficultés rencontrées furent énormes. Néanmoins, le résultat fut atteint, puisque la locomotive Siemens, avec moteurs sans transformateurs, développa une vitesse de 217 kilomètres à l'heure sur une voie ferrée des plus médiocres.

Depuis ces expériences, à citer, les esprits se détachèrent de ce genre de préoccupation, mais tout récemment, les Italiens, sur un secteur de 40 kilomètres environ, entre Rome et Tivoli, ont exécuté des essais de traction triphasé à la tension de 10.000 volts et périodicité 50. Il y a là une solution très intéressante, qui sera peut-être de nature, si l'expérience des faits la confirme, à diminuer quelque peu la portée des décisions de l'administration française, accordant la palme au courant continu.

La General Electric Company, dont on connaît les liens avec la Société Française pour le développement des procédés Thomson-Houston, après de nombreuses tentatives, a réussi entièrement l'électrification à 3.000 volts d'un premier tronçon allant de Harlowton à Avery (710 kilomètres), du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul Railway, en Amérique, tronçon particulièrement dur, puisque sur une moitié à peu près de ce parcours, il correspond à la traversée des Montagnes Rocheuses. Ce tronçon appartient au grand réseau de 3.600 kilomètres qui s'étend de Chicago au Pacifique. Un deuxième tronçon vient d'être électri-

fié, d'environ 310 kilomètres ; c'est le plus voisin du Pacifique. Il s'étend entre les villes de Seattle, Tacoma et Columbia Othello, mais sur ce tronçon, non seulement la General Electric, mais aussi la Société Westinghouse, ont été appelées en concurrence pour la fourniture du matériel locomoteur. C'est un matériel très spécial, très intéressant, d'une puissance considérable, puisque les locomotives électriques dépassent 3.000 chevaux et que les locomotives thermiques, que ces dernières étaient appelées à remplacer, développaient des puissances de plus de 3.600.

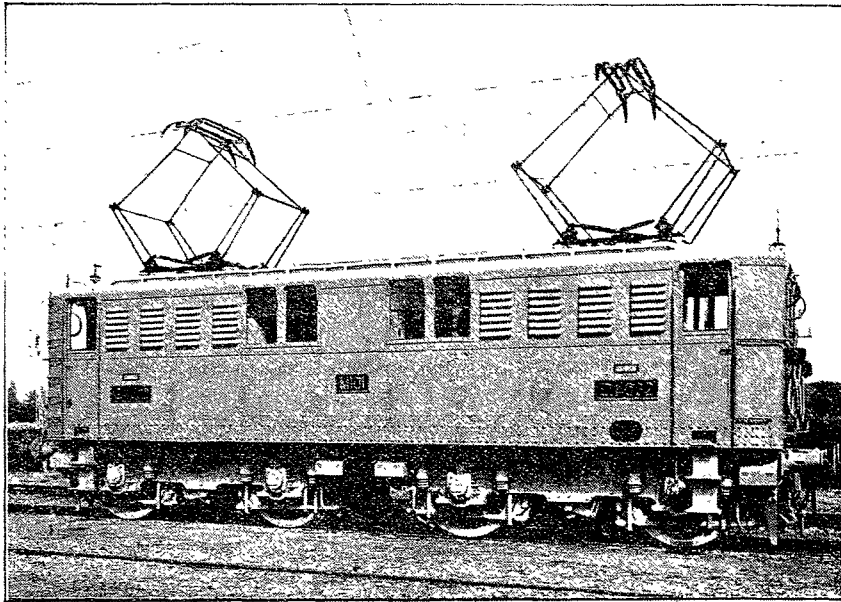


Fig. 3. — La première locomotive électrique française à courant continu des Chemins de fer du Midi.

Pour arriver à localiser de telles puissances motrices, il faut multiplier le nombre des essieux moteurs en les commandant chacun par un moteur dont l'induit est calé sur l'essieu, le système inducteur étant relié d'une manière plus ou moins élastique au truck. C'est là un caractère propre aux courants continus. La subdivision de la puissance entre de multiples moteurs présente de nombreux avantages. D'abord, chacun d'eux marche sous une puissance relativement faible, ce qui ménage le collecteur, puis l'installation sous le truck de moteurs de dimensions relativement réduites est aisée, enfin, la possibilité de couplage des divers moteurs, les uns avec les autres, entraîne la multiplication des régimes de vitesses économiques.

Le premier tronçon fut électrifié en 1915, le second en 1919, le troisième, intermédiaire entre les deux premiers, est en voie d'exécution. Quand l'électrification sera complète, un réseau filiforme de 1.410 kilomètres environ, le plus grand réseau du monde, fonctionnera à courant continu 3.000 volts.

Examinons rapidement, en nous inspirant de cet exemple, si les conditions d'exploitation américaine sont suffisamment comparables à l'exploitation française, pour qu'on puisse transférer presque sans précaution le système d'électrification des Montagnes Rocheuses aux réseaux français.

Le grand réseau qui a servi de modèle aux études du Comité français ne laisse circuler que trois à quatre trains de marchandises par jour, très lourds du reste, plusieurs milliers de tonnes, et un très petit nombre également de trains de voyageurs de grande capacité. Le parcours est très long, l'horaire élastique,

ce qui permet éventuellement de ne pas trop souffrir de chutes de tension ou même d'accidents temporaires de lignes ou de sous-stations. On voit mal, plutôt on conçoit trop bien, ce qui arriverait en France en cas de telles perturbations, par exemple sur le secteur de Lyon-Arles, où le parcours des trains doit être réglé avec une précision quasi chronométrique. C'est sans doute ces considérations qui, sans qu'il y ait été fait allusion d'une manière explicite dans les rapports officiels, ont motivé l'adoption pres-

que générale du 1.500 volts pour les réseaux français, avec quelques sections, peu nombreuses, équipées à 3.000 volts, mais, naturellement, possibilité de parcours et d'intercirculation de matériel des sections à 3.000 volts sur les sections à 1.500.

En ce qui concerne plus particulièrement notre région du Sud-Est, la ligne de Culoz-Modane sera électrifiée, comme nous le disions tout à l'heure, dans un délai relativement bref. Elle servira, en particulier, de ligne d'expériences à la Compagnie P.-L.-M., qui va y mettre en service un certain nombre de locomoteurs répondant naturellement dans leurs grandes lignes aux prescriptions d'unification des pouvoirs publics, mais dans lesquels des modifications de détail, destinées à permettre d'arriver au type standard, seront étudiées systématiquement. Il sera, en particulier, très curieux et très intéressant de comparer la nouvelle exploitation française à courant continu avec l'exploitation italienne voisine du Mont-Cenis, qui lui fait suite, à courant triphasé.

Il nous reste maintenant à examiner, pour terminer, deux points : d'abord, la question financière, au moins dans ses grandes lignes, et, ensuite, la répercussion que peut avoir l'électrification de nos chemins de fer sur la défense nationale.

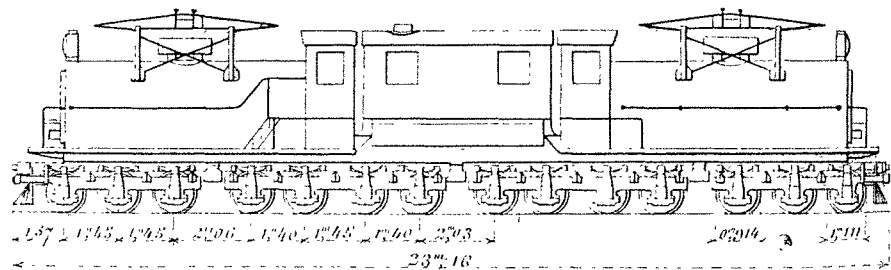


Fig. 4. — Locomotive G. E. Co à courant continu, dernier modèle du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul-Rwy. Tronçon Columbia-Othello à Seattle et Tacoma.

En ce qui concerne le point de vue financier, signalons que les études d'électrification, d'aménagement des usines, d'achat de locomotives, etc., ont été faites en prenant les prix de 1913, et en les majorant dans le rapport 1,6. C'est évidemment un coefficient très faible par rapport au coût actuel des matériaux et de la construction électromécanique. Néanmoins, comme le programme doit se développer sur vingt ans, non à partir de 1912, comme on l'escomptait au début, mais à partir de 1918, il est permis d'espérer, sans trop y compter, que les prix s'abaisseront et que, si le coefficient de majoration est supérieur à 1,6 dans les premières années, il lui sera manifestement inférieur dans les dernières.

Les dépenses à engager, aux prix de 1912, sont rassemblées dans le tableau ci-après :

Midi.....	Fr.	465.000.000
P.-L.-M.....		742.500.000
P.-O.....		473.000.000
Total.....		<u>1.680.500.000</u>

La Commission d'études ayant cru devoir majorer ces chiffres de 1,6 pour tenir compte des suppléments de prix à prévoir, pour les travaux, pendant la période de réalisation, les totaux ressortiront ainsi à :

Midi.....	710.000.000
P.-L.-M.....	1.190.000.000
P.-O.....	760.000.000
Soit environ.....	<u>2.700.000.000</u>

On remarquera, en consultant le détail, qu'une grande partie de ces dépenses n'est pas relative à l'électrification elle-même, par exemple celles correspondant à la construction des usines génératrices de certains réseaux, usines dont l'ampleur dépasse beaucoup les besoins de la traction. De même, un certain nombre de travaux d'améliorations hydrauliques, d'irrigation, de canalisations électriques à haute tension, d'intérêt général, qui figurent dans le total, n'intéressent que partiellement, ou même n'intéressent pas l'électrification proprement dite.

Si l'on tient compte du coefficient de majoration 1,6, on trouve ainsi un total de dépenses à investir égal à 2,7 milliards. Hâtons-nous d'ajouter que tous les techniciens estiment ces chiffres beaucoup trop faibles et le coût minimum de l'électrification des 8.200 kilomètres intéressés au moins égal à 4 milliards.

Au point de vue rémunération des capitaux, l'opération de l'électrification, sans être une opération brillante, se justifierait par suite des économies réalisées sur le personnel, le charbon, l'entretien du matériel, les heures d'immobilisation, la réduction des ateliers et des dépôts, etc., tant que le coût du kilowatt-heure resterait inférieur à fr. 0,04, et que le coût de la tonne de charbon resterait supérieur à 30 francs.

Si l'on adopte, non pas 2,7 milliards, mais 4 milliards, les conclusions se modifient, mais pas autant qu'on pourrait le croire, en raison de l'importance des dépenses mortes, en quelque sorte (dépenses indépendantes de la traction proprement dite), que l'on relève avec les machines à vapeur.

En toute conscience, on peut admettre que, si l'état actuel de nos finances rend difficile la mise en jeu de capitaux importants, des milliards, pour l'aménagement du Rhône ou pour l'électrification des chemins de fer, au point de vue financier, la solution semble viable. C'est donc une question d'opportunité et de choix du moment pour la mobilisation des capitaux.

Terminons par un coup d'œil sur la répercussion que peut avoir l'électrification sur la défense nationale.

Dans une étude, fort documentée, parue dans le numéro d'avril 1922 de la *Revue Militaire Française*, sous la signature de M. le colonel Le Henaff, sur l'utilisation des chemins de fer français durant la dernière guerre, article auquel nous renverrons ceux que préoccupe cette si importante question des trans-

ports par voie ferrée, envisagée sous une forme réellement rationnelle, l'auteur signale l'incoordination du début, les difficultés de toutes sortes qui ont présidé aux rapports des autorités militaires avec les directions de réseaux, etc. Il n'a pas fallu moins de toute la guerre pour remettre un peu d'ordre et assurer le plein rendement de cet organisme de nos voies ferrées, aujourd'hui bien au point. Si l'on fait abstraction, en effet, de la vingtaine de jours du début, qui correspondait à la mobilisation proprement dite, on constate avec le colonel Le Henaff que presque rien n'avait été prévu pour la suite en matière de transports ; or, partant de cette considération capitale, que nous avons en mains un outil qu'on peut supposer aujourd'hui de premier ordre, semble-t-il désirable, au point de vue de notre sécurité, que l'on pousse l'électrification avec fièvre, au moins sur les parties de réseaux avoisinant nos frontières ? On nous objectera que les Italiens, nos alliés, que les Suisses, neutres bienveillants, avaient déjà électrifié une partie de leurs chemins de fer avant la guerre, mais tout n'a pas été pour le mieux, qu'on le sache, en Italie et en Suisse, du fait de cette électrification, et tout aurait été, peut-être, beaucoup plus mal chez eux, si les Français avaient été leurs adversaires et avaient voulu détériorer leurs installations. Imaginons que sur les huit ou dix usines à peine desservant les 3 à 4.000 kilomètres électrifiés d'un réseau comme le P.-L.-M., un raid d'avions ou de dirigeables, bien conduits, vienne en annihiler la moitié. Ce n'est pas du tout improbable, c'est même extrêmement facile, affirmeront tous ceux qui, de près ou de loin, se sont occupés d'aviation pendant la guerre ou depuis la guerre. Voilà donc notre réseau électrifié immobilisé beaucoup plus gravement que si quelques lignes de transmission d'énergie avaient été seules visées (les réparations de lignes s'effectuent bien vite, et, du reste, grâce aux interconnexions de réseaux, le dommage peut être très faible). Quant à la destruction des voies mécaniques, c'est un jeu pour des unités exercées de sapeurs de chemin de fer de les remettre en état en quelques heures ; le danger, c'est donc la destruction d'un nombre relativement important d'usines génératrices.

Le remède est simple : il consiste, en électrifiant avec prudence à conserver toujours un parc de locomotives thermiques, nombreuses, disponibles, en réserve à la première alerte, avec un personnel non moins entraîné de mécaniciens et de chauffeurs, de manière à pouvoir substituer au plus vite la traction à vapeur à la traction électrique sur les portions de réseaux que ne pourraient plus alimenter les usines génératrices.

Gagner du temps, tout est là. Peut-être, dans quelques années, les craintes de nouveaux conflits que nous pouvons avoir encore seront-elles tout à fait écartées. Jusque-là, c'est notre devoir de Français de ne pas vouloir sacrifier notre sécurité trop vite aux exigences du progrès scientifique.

Conservons à notre usage la maxime antique :

« Primum vivere, deinde philosophari ».

Sachons, pour vivre, conserver la Force, dont l'exercice, suivant la sagesse grecque, n'est pas exclusif, de l'emploi de cette arme intellectuelle qu'est la Science, et de cette autre arme morale, la Justice.

NOTE DE LA RÉDACTION

La *Houille Blanche* publiera, dans les prochains numéros, une étude sur le Barrage italien du Gleno, et la catastrophe que causa la rupture de ce barrage à la fin de l'année 1923.

Une première étude, purement descriptive, sera suivie, aussitôt paru le rapport officiel des experts, d'un article critique sur les causes de l'accident.