
NOTE

SUR LA

Première Étape du Programme d'électrification partielle DU RÉSEAU P. L. M.

Par M. Marcel JAPIOT,

INGÉNIEUR EN CHEF ADJOINT DU MATÉRIEL ET DE LA TRACTION DES CHEMINS DE FER P.L.M.

Le programme d'électrification partielle du réseau P. L. M. vise deux régions bien distinctes :

D'une part, la banlieue parisienne, où l'accroissement rapide de la population nécessitera bientôt un service d'une intensité telle que la traction électrique pourra seule résoudre le problème de façon entièrement satisfaisante ;

D'autre part, la région du réseau comprise entre Lyon et la Méditerranée, et dotée d'énormes ressources en houille blanche, dont l'utilisation permettra de réaliser des économies de combustible considérables.

Dans cette dernière région, le programme d'électrification porte sur environ 3.000 kilomètres de lignes, c'est-à-dire sur toutes les lignes importantes situées au sud de celles de St-Germain des Fossés à Lyon et de Lyon à Genève (ces deux lignes comprises) : pour l'ensemble de ces lignes, l'économie de combustible à escompter du fait de l'utilisation de la houille blanche pour la traction électrique aurait atteint 700.000 tonnes par an pour le trafic d'avant-guerre ; il n'est donc pas exagéré de l'évaluer à un million de tonnes à l'époque où le programme pourra être entièrement réalisé.

L'effort financier que nécessitera l'exécution d'un pareil programme est trop considérable pour qu'on ne soit pas tenu d'échelonner les travaux sur une période de longue durée : le Conseil Supérieur des Travaux Publics avait envisagé, à cet égard, une période de vingt ans, et les conditions économiques actuelles conduisent à considérer ce délai comme un minimum.

Quoi qu'il en soit, la Compagnie P. L. M. a estimé qu'il était indispensable d'entreprendre dès maintenant une première étape, comprenant d'une part la *ligne de Culoz à Modane*, choisie

comme *ligne d'expériences* pour les raisons que nous exposerons plus loin, et d'autre part les lignes de la *région de Nice*, où l'emploi de la traction électrique paraît susceptible de *développer le trafic*, par un service de trains fréquents, accélérés, et confortables, qui augmenterait encore la réputation si méritée de notre merveilleuse Côte d'Azur.

La présente note a pour but d'exposer le programme détaillé de cette première étape d'électrification de notre réseau.

I. — ELECTRIFICATION DE LA LIGNE DE CULOZ à MODANE.

Le choix de la ligne de Culoz à Modane à électrifier en premier lieu, comme *ligne d'expériences*, se justifie par les considérations suivantes.

Tout d'abord, cette ligne présente un *profil très varié* (Voir Fig. 1), se prêtant fort bien à l'examen de tous les aspects que peut offrir le problème de la traction électrique. Au début, de Culoz à St-Pierre d'Albigny, c'est une véritable ligne de plaine, permettant de réaliser des vitesses élevées avec les trains express. Puis viennent des rampes de plus en plus accentuées, atteignant finalement 30 millimètres par mètre sur les 15 derniers kilomètres, et constituant par conséquent le véritable type des lignes de montagne : au retour, ces déclivités décroissantes constitueront un terrain d'expériences tout à fait approprié à l'étude du freinage électrique par récupération, dans les conditions les plus difficiles, et les plus variées.

Mais en outre, parmi les lignes de notre réseau où l'on pouvait rencontrer de pareilles conditions, la ligne de Culoz à Modane était particulièrement désignée pour y expérimenter en grand la traction électrique, à cause de son caractère de *grande ligne internationale*, à trains express de fort tonnage, et à trafic de marchandises important, en raison du transit franco-italien.

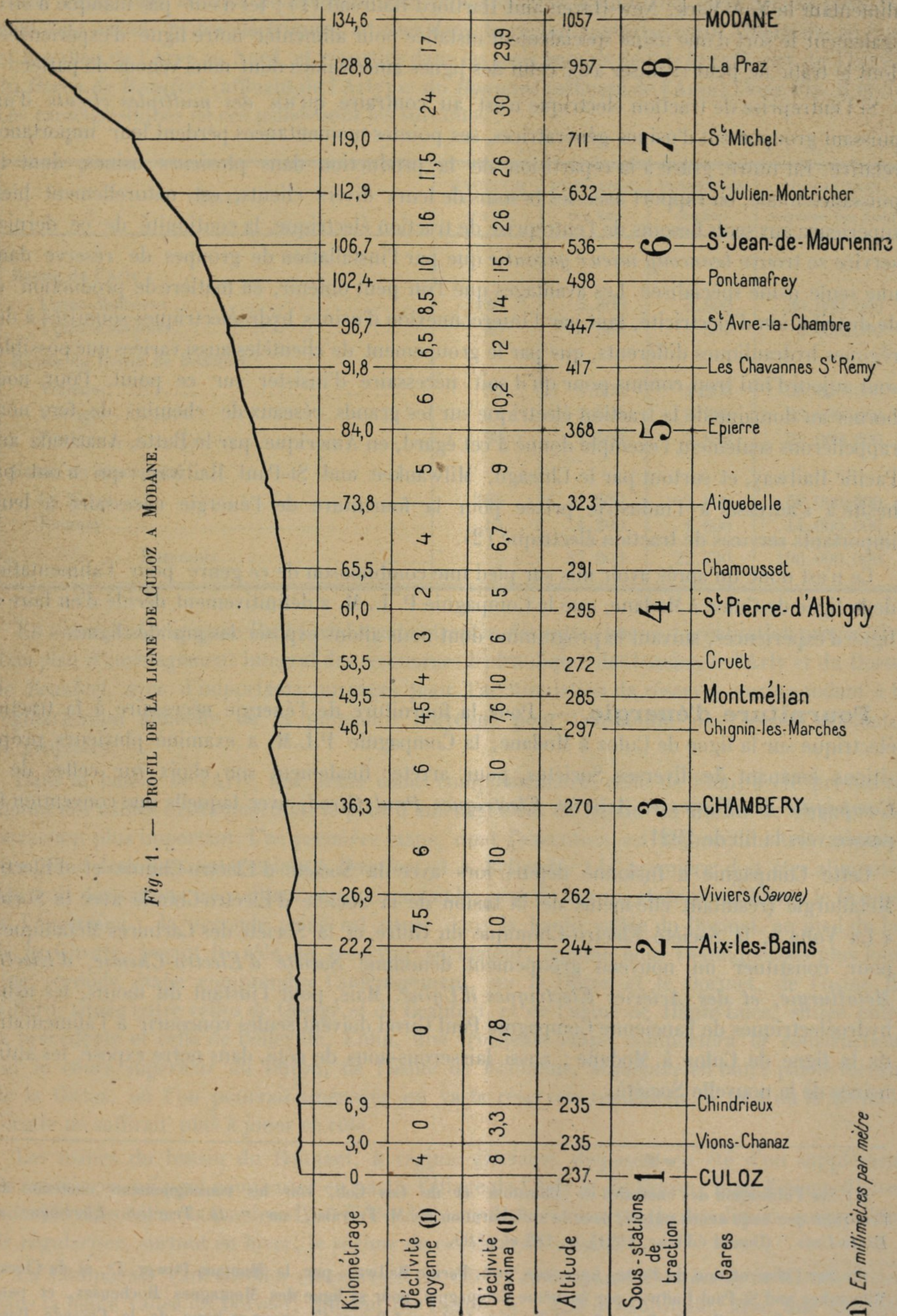
Par ailleurs, la longueur de cette ligne, soit 135 kilomètres, était suffisante pour donner à cette expérience toute l'ampleur voulue.

Enfin, le choix de la ligne d'expériences ne pouvait porter que sur une ligne située à proximité d'importantes ressources d'énergie d'origine hydroélectrique en voie d'aménagement. Le Conseil d'Administration de la Compagnie P. L. M. avait, en effet, décidé que, tout au moins pour la première étape d'électrification, il convenait de chercher à réduire le plus possible le coût des travaux, en évitant notamment d'y comprendre l'installation d'usines génératrices : le programme devait donc comporter la *fourniture de l'énergie par l'industrie privée*.

En dehors de l'avantage que l'on pouvait ainsi trouver à alléger l'effort financier de notre Compagnie, durant des exercices que les conditions économiques d'après-guerre devaient inévitablement rendre fort difficiles, cet appel aux disponibilités d'énergie des usines privées présentait d'ailleurs un intérêt technique incontestable.

L'exploitation d'*usines spécialisées* pour la production d'énergie destinée exclusivement à la traction électrique ne peut être satisfaisante que s'il s'agit de faire face aux besoins d'un ensemble de lignes fort important, — faute de quoi, il existe une telle *disproportion* entre la puissance moyenne nécessaire et les appels temporaires d'énergie au moment des *pointes*, que l'utilisation de la puissance installée dans l'usine risque de devenir très défectueuse. Tel est le cas, par exemple, de la centrale de Bluestone, spécialisée à la fourniture d'énergie pour la traction électrique sur le Norfolk and Western Railway, — ou encore de l'usine de Cos Cob,

Fig. 1. — PROFIL DE LA LIGNE DE CULOZ A MODANE.



(I) En millimètres par mètre

alimentant le New-York, New-Haven and Hartford Railroad (1) ; tel n'eût pas manqué d'être également le sort d'une usine spécialement installée pour alimenter notre ligne d'expériences, dont le trafic ne peut rivaliser avec celui des lignes américaines dont nous venons de parler.

Si l'entreprise de traction électrique n'est au contraire qu'un *des multiples clients* d'un puissant groupement d'usines génératrices, ses pointes momentanées perdent leur importance relative. En outre, grâce à la répartition de la production dans plusieurs usines, dont la puissance totale, en rapport avec les besoins de leurs divers clients, est naturellement bien supérieure aux seuls besoins de l'entreprise de traction électrique, la continuité de ce dernier service se trouve *beaucoup mieux garantie* que par l'installation de groupes de réserve dans une seule usine spécialisée. Les avantages que l'on peut obtenir, en matière de production et de distribution d'électricité, tant par l'interconnexion d'usines hydroélectriques soumises à des régimes hydrauliques différents, que par le groupement de clientèles aussi variées que possible, sont aujourd'hui trop connus pour qu'il soit nécessaire d'insister sur ce point. Pour nous borner au domaine de la traction électrique sur les grands réseaux de chemins de fer, nous rappellerons seulement l'exemple donné à cet égard, en Amérique, par le Butte, Anaconda and Pacific Railway, et surtout par le Chicago, Milwaukee and St-Paul Railway, qui n'ont pas hésité à s'adresser à l'industrie privée pour la fourniture de l'énergie nécessaire à leurs importants services de traction électrique (2).

Ce n'est donc qu'après avoir mis sur pied une combinaison de ce genre pour l'alimentation de la ligne de Culoz à Modane, que la Compagnie P. L. M. a définitivement décidé d'en faire sa ligne d'expériences, suivant le programme dont nous allons exposer les grandes lignes.

Fourniture d'énergie. — Pour la fourniture de l'énergie nécessaire à la traction électrique sur la ligne de Culoz à Modane, la Compagnie P.L.M. a examiné plusieurs propositions émanant de diverses Sociétés, pour arrêter finalement son choix sur celles de la *Compagnie des Forges et Aciéries Electriques Paul Girod*, avec laquelle une convention fut passée vers la fin de 1921.

Cette Compagnie a fusionné depuis lors avec la Société d'Electro-Chimie et d'Electro-Métallurgie (résultant elle-même de la fusion de la Société d'Electro-Chimie avec la Société « La Volta », la Société Electro-Chimique du Giffre, et la Société des Carburés Métalliques), pour constituer un nouveau groupement dénommé *Société d'Electro-Chimie, d'Electro-Métallurgie, et des Aciéries Electriques d'Ugine*. Mais, pour l'instant du moins, les usines hydroélectriques de l'ancienne Compagnie Paul Girod doivent seules concourir à l'alimentation de la ligne de Culoz à Modane ; aussi laisserons-nous de côté, dans notre exposé, les autres usines de la nouvelle Société.

(1) Sur l'utilisation des centrales de Bluestone et de Cos Cob, voir les renseignements contenus dans l'ouvrage que nous avons publié, avec la collaboration de M. Ferrand, sur « *la Traction Electrique aux Etats-Unis* » (Dunod éditeur, 1921), p. 182 et p. 69.

(2) Sur l'alimentation du Butte, Anaconda and Pacific Railway par la Montana Power Co, et du Chicago, Milwaukee and St-Paul Railway par la même Compagnie, pour sa ligne des Montagnes Rocheuses, et par la Washington Power Co et la Puget Sound Traction Light and Power Co, pour sa ligne de la Cascade Range, voir notre ouvrage sur « *la Traction électrique aux Etats-Unis* » p. 261-264, et 299-318.

En 1920, lors de nos pourparlers avec la Compagnie Paul Girod, cette Société possédait déjà sept usines hydro-électriques, situées dans la région comprise entre Albertville au Sud, et la vallée de l'Arve au Nord, et réparties dans les trois bassins de l'Arly (affluent de l'Isère), du *Doron de Beaufort* (affluent de l'Arly) et du *Bonnant* (affluent de l'Arve) (Voir Fig. 2 et 3). Les caractéristiques de ces usines sont les suivantes :

USINES	HAUTEUR de chute (en m)	PUISSANCE installée (en kw)	PUISSANCE moyenne (en kw)	PRODUCTION annuelle moyenne (en kwh)
Bassin de l'Arly :				
Ugine-Mollières	120	5.800	3.500	30.000.000
Ugine-Fontaines.....	20	800	580	5.000.000
Bassin du Doron de Beaufort :				
Venthon.....	93	5.600	4.200	36.000.000
Roënger	72	5.600	3.200	28.000.000
Queige.....	93	4.500	3.850	33.000.000
Bassin du Bonnant :				
Le Fayet.....	165	10.500	5.800	50.000.000
Bionnay.....	45	4.200	1.600	14.000.000
Ensemble.....		37.000	22.730	196.000.000

En outre, la Compagnie Paul Girod avait entrepris, dès cette époque, la réalisation progressive d'un plan d'aménagement intégral des ressources hydrauliques des bassins de l'Arly et du Doron de Beaufort, avec d'importants ouvrages pour l'accumulation de réserves correspondant à la régularisation annuelle de la puissance moyenne pour l'ensemble des usines existantes et projetées.

Dans le bassin de l'Arly, une seule usine complémentaire, celle de Flon, a été prévue en amont des usines existantes. Mais le plan d'aménagement du bassin du Doron de Beaufort est beaucoup plus important. Une première étape, dont l'exécution est aujourd'hui très avancée, comprend deux puissantes usines à *Beaufort* et à *Belleville* ; la première doit être alimentée par trois dérivations, recueillant respectivement les eaux du Doron, et de ses affluents le Dorinet et l'Argentine ; la seconde usine est située dans la haute vallée du Dorinet, au pied du lac de la Girotte, jouant le rôle de réservoir régulateur, comme nous l'expliquerons plus loin. Une seconde étape comprendra l'aménagement, sur le Doron et le Dorinet, de l'usine de Villard, située entre celles de Queige et de Beaufort, et de l'usine de Haute-Luce, située entre la précédente et celle de Belleville. Enfin, une troisième étape comportera la construction, sur le cours supérieur du Doron, de l'usine de Fontanus, alimentée en outre par le torrent de la Gittaz, où l'on pourrait aménager un vaste réservoir régulateur, le jour où le lac de la Girotte ne suffirait plus à jouer ce rôle.

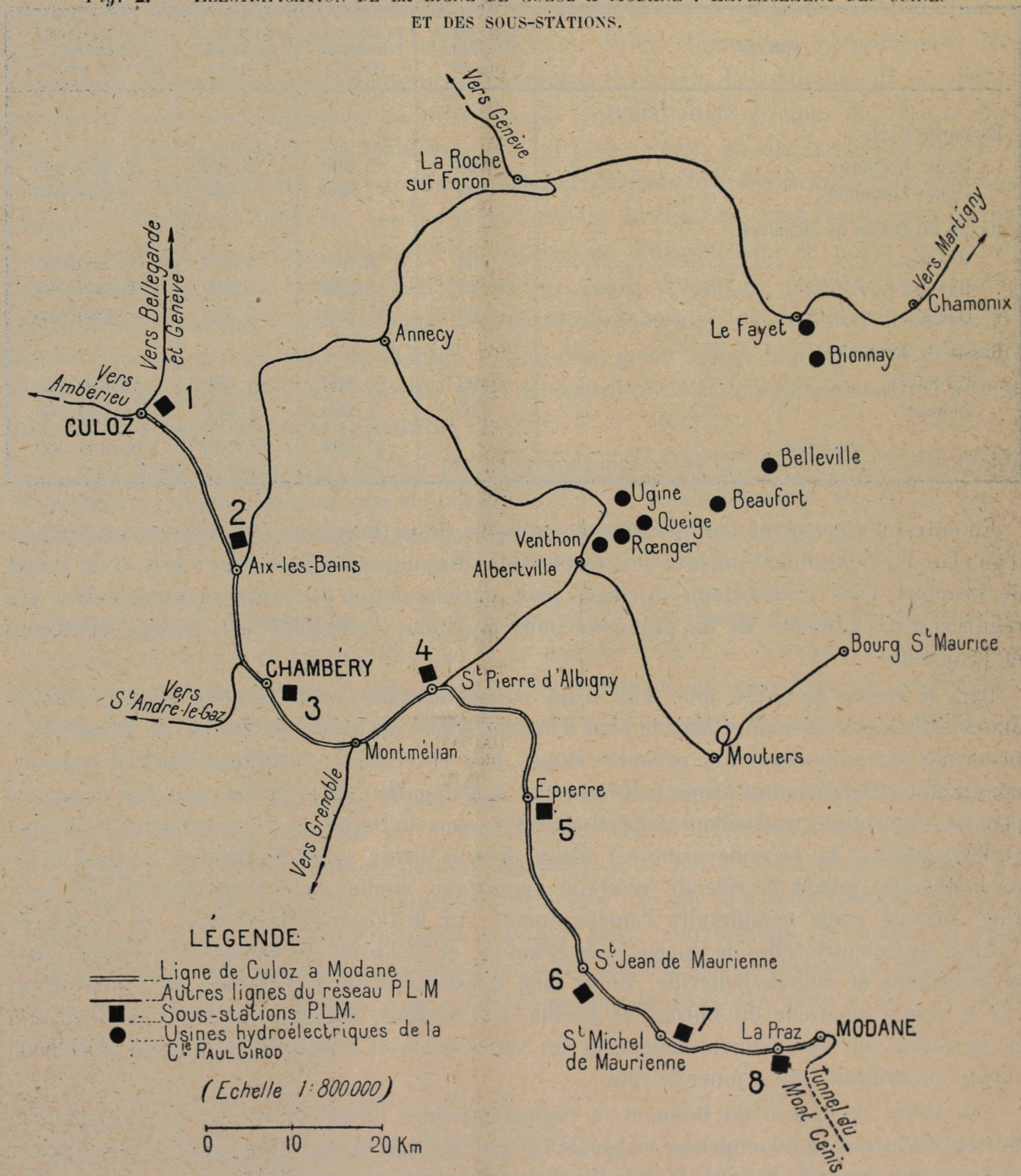
Les usines du bassin du Bonnant, à régime glaciaire, disposent en été d'un supplément de ressources qui peut compenser en partie l'étiage de l'Arly et du Doron ; mais l'étiage d'hiver coïncide dans les trois bassins. D'où l'idée d'accumuler des réserves hydrauliques susceptibles de régulariser, surtout en hiver, le régime de ces diverses usines.

La Compagnie Paul Girod a entrepris, à cet effet, l'aménagement du *lac de la Girotte*, situé dans la haute vallée du Dorinet, affluent du Doron, à 1.720 m d'altitude, avec une capacité de 28 millions de mètres cubes, et une profondeur maxima de 90 m ; une galerie, forée à

80 m au-dessous du plan d'eau, permettra l'écoulement des eaux du lac à travers les usines s'échelonnant sans discontinuité jusqu'au confluent du Doron et de l'Arly, à Venthon, à 350 m d'altitude, soit sur une différence de niveau de 1.370 m.

L'apport naturel des eaux dans le lac de la Girotte n'étant que de 7 millions de mètres cubes

Fig. 2. — ÉLECTRIFICATION DE LA LIGNE DE CULOZ A MODANE : EMPLACEMENT DES USINES ET DES SOUS-STATIONS.



par an, il a fallu prévoir son alimentation artificielle, pour pouvoir profiter, dans la plus large mesure, de la capacité de ce réservoir. Dans ce but, une galerie de 1.500 m, en cours d'exécution, amènera au lac un débit annuel de 6 millions de mètres cubes provenant d'un torrent voisin. En outre, l'usine de Belleville, située à 500 m au-dessous du lac, va être

aménagée en station de pompage : deux génératrices de cette usine pourront être utilisées comme moteurs pour entraîner deux pompes refoulant jusqu'au lac les eaux du Dorinet ; en profitant, pour ce pompage, des disponibilités d'énergie correspondant soit aux périodes de très hautes eaux, soit aux heures creuses de la journée, on compte pouvoir refouler dans le lac environ 8 millions de mètres cubes par an. Enfin, on entreprendra ultérieurement une nouvelle galerie de 4 kilomètres pour amener annuellement dans le lac 6 à 8 millions de mètres cubes pris dans le haut bassin du Bonnant (région du col du Bonhomme) pendant la période des hautes eaux. On arriverait ainsi, par ces divers travaux d'aménagement, à constituer une réserve d'environ 28 millions de mètres cubes par an, qui, utilisée dans les diverses usines s'étageant jusqu'à Venthon, correspondrait, à elle seule, à une production de 60 millions de *kwh* ; en répartissant l'utilisation de cette réserve sur les périodes de basses eaux, on pourrait y trouver un appoint de 30.000 *kw*.

Lorsque cette régularisation risquera de devenir insuffisante, on pourra la compléter par la création, dans la haute vallée de la Gittaz (affluent du Doron), à 1.560 *m* d'altitude, d'un réservoir de 19 millions de mètres cubes ; cette réserve, utilisée dans les usines échelonnées de Fontanus à Venthon, correspondrait, à elle seule, à la production de 50 millions de *kwh* ; en profitant de cette réserve pendant les périodes de basses eaux, on réaliserait un supplément de puissance de 25.000 *kw*.

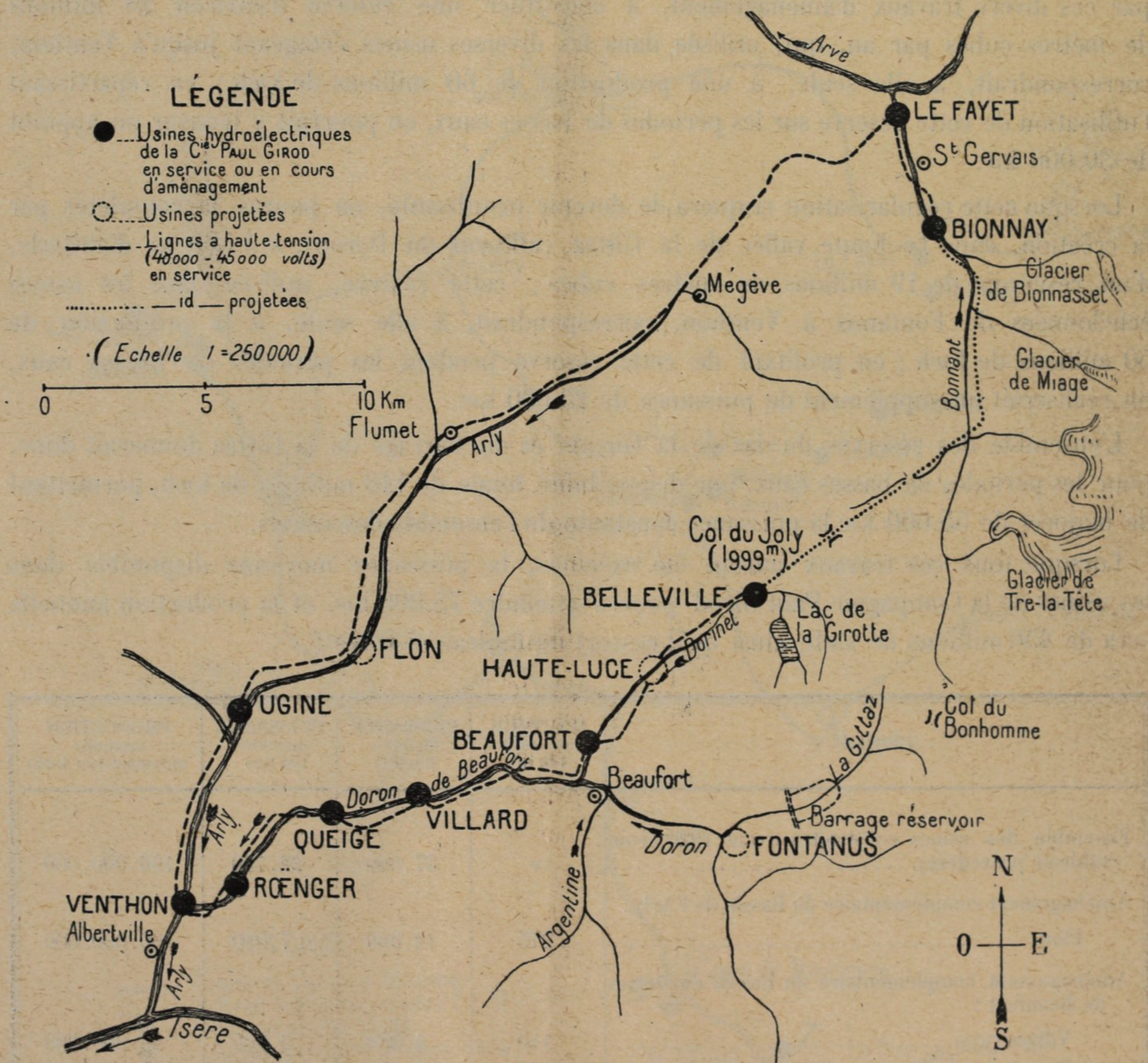
L'ensemble des réserves du lac de la Girotte et du barrage de la Gittaz donnerait donc, pour les périodes de basses eaux, une disponibilité totale de 110 millions de *kwh*, permettant de majorer de 55.000 *kw* la puissance constante de l'ensemble des usines.

Lorsque tous ces travaux auront été exécutés, la puissance moyenne disponible dans les usines de la Compagnie Paul Girod pourra atteindre 75.000 *kw*, et la production annuelle sera de 450 millions de *kwh*, ainsi qu'il ressort du tableau ci-après :

USINES	HAUTEUR de chute (en <i>m</i>)	PUISSANCE installée (en <i>kw</i>)	PUISSANCE moyenne (en <i>kw</i>)	PRODUCTION annuelle moyenne (en <i>kwh</i>)
Ensemble des usines construites avant 1920 (voir tableau précédent).....	»	37.000	22.730	196.000.000
Aménagement complémentaire du Bassin de l'Arly :				
Flon.....	275	12.600	7.000	60.000.000
Aménagement complémentaire du Bassin du Doron de Beaufort :				
Villard.....	110	4.900	3.000	26.000.000
Beaufort.....	260	14.000	6.100	53.000.000
Haute-Luce.....	200	4.900	1.170	10.000.000
Belleville.....	450	11.000	3.000	26.000.000
Fontanus.....	400	5.600	2.700	22.000.000
Amélioration du régime des anciennes usines de Venthon, Roënger et Queige grâce aux réserves du lac de la Girotte.....	»	»	4.200	8.400.000
Utilisation des réserves de la Gittaz.....	»	»	25.000	50.000.000
Total.....		90.000	74.900	451.400.000

Dès maintenant, la Compagnie Paul Girod a mis en service l'usine de Beaufort, au moyen de la dérivation du Dorinet, et l'usine de Belleville, grâce à l'aménagement partiel du lac de la Girotte ; elle poursuit activement l'aménagement complet de ce lac, et compte augmenter aussi, au moyen de la dérivation du Doron, la puissance disponible à l'usine de Beaufort, de façon que ces travaux puissent être terminés avant la mise en route du service de traction électrique sur la ligne de Culoz à Modane. A cette époque, la puissance totale des génératrices installées

Fig. 3. — USINES HYDROÉLECTRIQUES ET LIGNES A HAUTE TENSION DE LA COMPAGNIE PAUL GIROD.



dans les usines hydroélectriques de la Compagnie Paul Girod atteindra 57.000 kw ; la puissance moyenne disponible en permanence sera d'environ 30.000 kw, et la production annuelle pourra atteindre environ 250 millions de kwh.

En regard de ces disponibilités, on peut estimer que les besoins de notre Compagnie pour la ligne de Culoz à Modane ne dépasseront pas, au début, 30 millions de kwh par an, avec des pointes de puissance de 15.000 kw au maximum. On saisit immédiatement, en rapprochant ces chiffres des précédents, combien la sécurité de notre service de traction électrique se trouvera mieux garantie qu'elle n'eût pu l'être par la construction d'une usine exclusivement consacrée à ce service.

Réseau à haute tension. — Les usines hydroélectriques de la Compagnie Paul Girod, en service ou en construction, sont ou seront toutes reliées à un réseau de transport d'énergie à 40.000/45.000 volts.

Actuellement, ce réseau comprend deux artères, qui se réunissent à Venthon : la première relie entre elles les usines du bassin du Doron de Beaufort, de Venthon jusqu'à Belleville ; l'autre artère, suivant le cours de l'Arly, s'étend d'abord de Venthon à Ugine, puis remonte jusqu'à Mégève, pour redescendre ensuite au Fayet, où elle rejoint les usines du bassin du Bonnant.

Ultérieurement, les extrémités Est de ces deux artères seront reliées entre elles par une ligne partant de Belleville pour franchir le col du Joly, à une altitude d'environ 2.000 m, et redescendre dans la vallée du Bonnant : le réseau à haute tension de la Compagnie Paul Girod constituera dès lors une boucle fermée.

La Compagnie P. L. M. établira, de son côté, deux lignes à 40.000/45.000 volts partant du poste central de la Compagnie Paul Girod à Venthon, et se dirigeant vers la sous-station de St-Pierre d'Albigny, située à 25 kilomètres environ de Venthon. Normalement, toutes les usines travailleront en parallèle, les deux artères de la Compagnie Paul Girod étant reliées l'une à l'autre à Venthon, et les deux lignes P. L. M. étant utilisées en parallèle. Mais des jonctions de secours, contournant le poste de Venthon, permettront d'alimenter directement les deux lignes P. L. M. soit au moyen de l'artère venant des usines du Doron, soit au moyen de celle venant des usines du Bonnant et de l'Arly, sans passer par le poste de Venthon : il sera donc facile de rétablir rapidement l'alimentation de nos lignes en cas d'avarie de l'une des artères de la Compagnie Paul Girod ou du poste de Venthon. Le dédoublement des lignes P. L. M. permettra de même, en cas d'avarie de l'une d'elles, d'assurer notre service de traction au moyen de la seconde.

De la sous-station de St-Pierre d'Albigny partiront d'autre part deux lignes à 40.000/45 000 volts, se dirigeant l'une vers Culoz, et l'autre vers La Praz, et desservant les différentes sous-stations de traction échelonnées le long de la voie ferrée. Par mesure de sécurité, ces artères à haute tension seront constituées, comme celle de Venthon à St-Pierre d'Albigny, par deux lignes à trois fils, portées soit par des pylônes complètement indépendants, soit par des pylônes jumelés, mais suffisamment écartés pour qu'il soit possible de travailler sur l'une des lignes sans mettre l'autre hors circuit.

De plus, ces deux lignes pénétreront dans toutes les sous-stations, où un double jeu de barres omnibus à haute tension permettra de réaliser les combinaisons voulues en cas d'avarie sur l'une des lignes : chaque sous-station représentera pour ces lignes un véritable poste de coupure et de couplage.

Les lignes à haute tension seront constituées par des câbles en aluminium ayant une section de 193 mm² entre Venthon et St-Pierre d'Albigny, et de 162 mm² entre Culoz et la Praz ; en certains points, où la configuration du terrain imposera l'adoption de portées exceptionnelles (traversées de rivières par exemple), on pourra être amené à utiliser des câbles en aluminium avec âme d'acier.

Sous-stations. — Le courant triphasé à 40.000/45.000 volts sera transformé en courant continu à 1.500 volts dans huit sous-stations installées le long de la voie ferrée, à proximité des gares de Culoz, Aix-les-Bains, Chambéry, St-Pierre d'Albigny, Epierre,

St-Jean-de-Maurienne, St-Michel, et la Praz (Voir Fig. 1 et 2). D'après les études exécutées sur le terrain, l'implantation des sous-stations paraît devoir être approximativement la suivante :

SOUS-STATIONS	Kilométrage à partir de la gare de Culoz	Distance entre sous-stations voisines
	<i>km</i>	<i>km</i>
N° 1 Culoz	0,3	
N° 2 Aix-les-Bains.....	21,1	20,8
N° 3 Chambéry.....	38,3	17,2
N° 4 St-Pierre d'Albigny.....	62,9	24,6
N° 5 Epierre	85,5	22,6
N° 6 St-Jean de Maurienne	108,3	22,8
N° 7 St-Michel.....	120,1	11,8
N° 8 La Praz (1).....	131,6	11,5

Les sous-stations n° 2, 3, 5, 6 et 7 seront identiques : chacune d'elles pourra recevoir trois groupes de 2.000 kw de puissance nominale, constitués chacun par un transformateur et deux commutatrices disposées en série ; mais on n'installera au début que deux de ces groupes, l'installation du troisième étant réservée jusqu'au jour où le développement du trafic rendrait nécessaire cette augmentation de puissance de l'une quelconque des sous-stations. La disposition générale des ces sous-stations est indiquée sur la Fig. 4.

Les transformateurs, à refroidissement naturel, auront une puissance nominale de 2.240 kilovoltampères : leur poids, huile comprise, sera d'environ 17 t 5. Les commutatrices, produisant du courant continu à 750 volts (deux commutatrices en série pour 1.500 volts), auront une puissance nominale de 1.000 kw, et pèseront environ 13 t 5. Chaque groupe de 2.000 kw pourra supporter une surcharge de 50 % pendant deux heures, et de 200 % pendant cinq minutes ; d'autre part, les commutatrices seront établies pour fonctionner en récupération jusqu'à une puissance équivalente à leur puissance nominale.

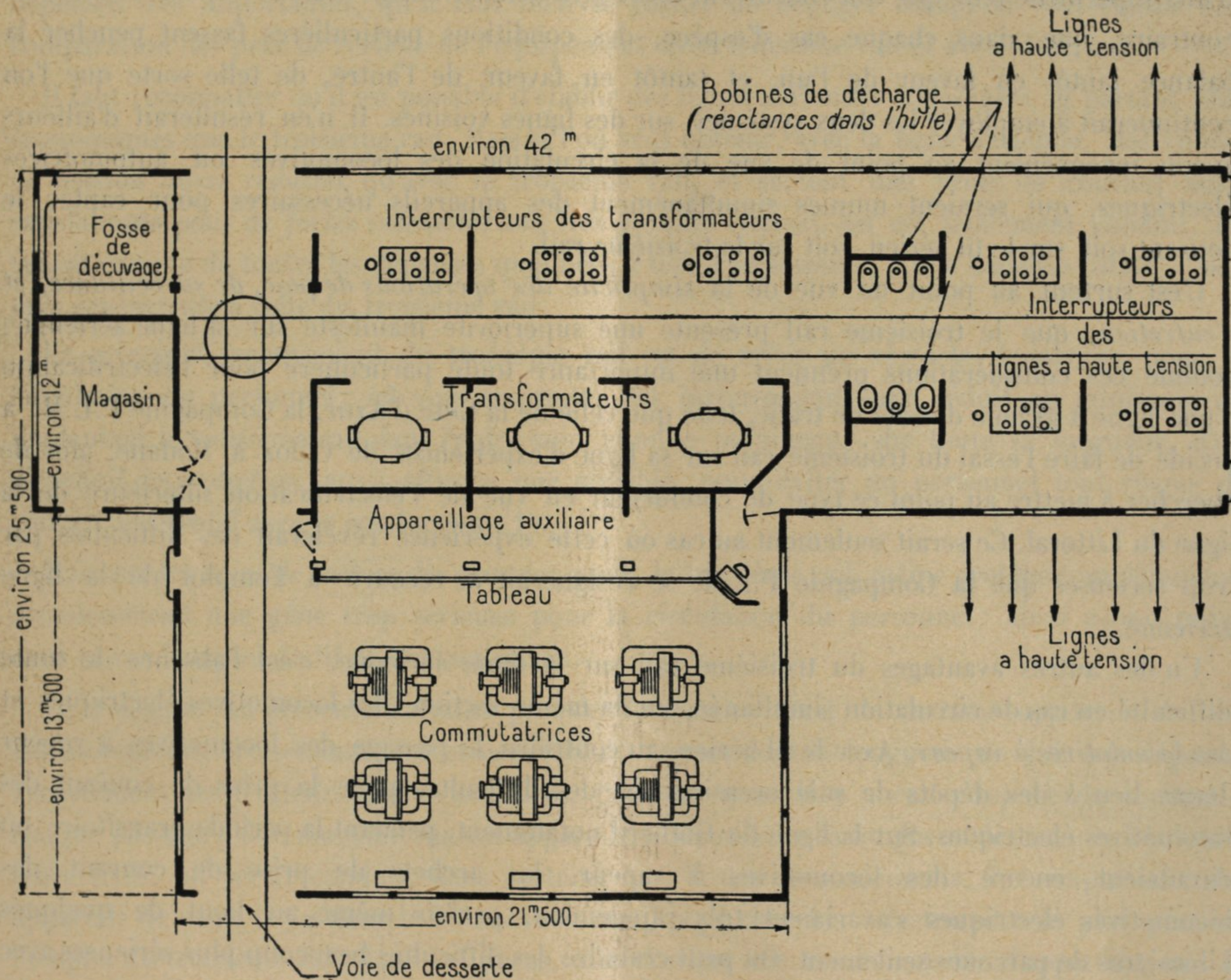
La sous-station n° 1 (Culoz) sera presque identique aux précédentes ; la sous-station n° 8 (La Praz) ne présentera que de légères différences dans la disposition des appareils à haute tension : en outre, les trois groupes de 2.000 kw y seront installés dès le début.

Quant à la sous-station n° 4 (St-Pierre d'Albigny), elle différera nettement des autres, parce qu'elle sera disposée pour régulariser le facteur de puissance de l'ensemble des installations, dans les conditions de fonctionnement les plus variées, et notamment à faible charge. Dans ce but, les commutatrices y seront remplacées par des groupes composés d'un moteur triphasé synchrone entraînant deux génératrices à courant continu à 750 volts, connectées en série : les moteurs synchrones seront calculés de façon à pouvoir fournir l'énergie réactive nécessaire au fonctionnement des autres sous-stations travaillant à faible charge ; de la sorte, le facteur de puissance mesuré sur les arrivées à haute tension, côté Venthon, pourra être maintenu en permanence à une valeur très élevée (0,9 au minimum). La sous-station renfermera

(1) A cet emplacement, la sous-station n° 8 se trouvera à proximité du village de Freney, à 2 km 8 de la gare de la Praz et à 3 km de celle de Modane.

trois groupes identiques : chacun d'eux sera alimenté par un transformateur triphasé de 3.450 kilovoltampères, à refroidissement artificiel par circulation d'eau, et dont le poids (huile comprise) sera d'environ 17 t 5. Les moteurs synchrones seront établis pour fournir jusqu'à 2.500 kilovoltampères de puissance réactive, avec déphasage en avant, en même temps que la puissance mécanique nécessaire pour l'entraînement des deux génératrices à courant

Fig 4. — PLAN D'UNE SOUS-STATION (Échelle 1/300).



continu calées sur leur arbre : quant à la puissance de ces génératrices, elle sera la même que celle des commutatrices des autres sous-stations. Les groupes seront établis pour fonctionner en récupération, le cas échéant. L'ensemble d'un moteur synchrone et de ses deux génératrices pèsera environ 57 tonnes.

L'entreprise générale de ces sous-stations a été confiée à la *Compagnie Thomson-Houston*, avec la participation des *Etablissements Schneider* pour la fourniture d'une partie des commutatrices.

Prise de courant. — L'adoption de la tension de 1.500 volts comme standard, pour l'électrification des chemins de fer français en courant continu, permet d'utiliser, comme conducteur de prise de courant, soit la *ligne aérienne*, qui se prête aisément à l'emploi de

tensions beaucoup plus élevées, soit le *troisième rail*, pour lequel cette tension de 1.500 volts semble au contraire constituer en pratique un maximum, dans les conditions présentes de la technique (1).

Chacun de ces types de conducteur de prise de courant présente naturellement des mérites et des inconvénients, entre lesquels un essai d'envergure suffisante permettra seul de faire une balance équitable, afin de déterminer la meilleure solution à adopter selon les caractéristiques de chaque ligne à électrifier. Il n'est pas certain, en effet, que l'un des types puisse faire preuve d'une supériorité telle que son concurrent doive être définitivement écarté : il peut arriver, au contraire, que, dans chaque cas d'espèce, des conditions particulières fassent pencher la balance tantôt en faveur de l'un, et tantôt en faveur de l'autre, de telle sorte que l'on continuerait à employer les deux systèmes, sur des lignes voisines. Il n'en résulterait d'ailleurs aucun inconvénient au point de vue de la circulation des locomotives ou automotrices électriques, qui seraient munies simultanément des appareils nécessaires pour capter le courant soit sur le fil aérien, soit sur le troisième rail.

C'est surtout au point de vue de la *simplicité des opérations de pose, de surveillance, et d'entretien*, que le troisième rail présente une supériorité manifeste sur la ligne aérienne : comme ces considérations prennent une importance toute particulière pour l'électrification d'une ligne à grande densité de trafic, telle que celle de la Côte d'Azur, la Compagnie P.L.M. a décidé de faire l'essai du troisième rail sur sa ligne d'expériences de Culoz à Modane, afin de chercher à mettre au point ce type de conducteur en vue de l'électrification ultérieure de la ligne du Littoral. Ce serait seulement au cas où cette expérience révélerait des difficultés par trop sérieuses que la Compagnie P.L.M. se résignerait à recourir à l'emploi de la ligne aérienne.

Un des autres avantages du troisième rail sur la ligne aérienne, c'est l'absence de toute difficulté en cas de circulation simultanée, sur la même section, des locomotives électriques et des *locomotives à vapeur*. Avec le fil aérien, au contraire, le passage des locomotives à vapeur donne lieu à des dépôts de suie occasionnant des difficultés pour la prise de courant des locomotives électriques. Sur la ligne du Gothard notamment, pendant la période transitoire où circulaient encore des locomotives à vapeur, les archets de prise de courant des locomotives électriques s'avaient très rapidement, parfois même au bout de quelques kilomètres de parcours seulement. On peut craindre des difficultés beaucoup plus sérieuses avec une ligne aérienne à 1.500 volts, en raison de la plus grande intensité des courants à capter (sur la ligne du Gothard, la tension était de 7.500 volts pendant la période transitoire en question). Or la circulation des locomotives à vapeur sur les lignes électrifiées n'aura pas seulement lieu à titre temporaire pendant la période d'électrification, ou à titre exceptionnel, en cas de secours par exemple, mais bien, sur certaines sections, à titre permanent : c'est ainsi que sur la ligne de Culoz à Modane, après électrification, les trains en provenance ou à destination de Grenoble et de Bourg St-Maurice n'en continueront pas moins à circuler avec leurs locomotives à vapeur, les uns entre Chambéry et Montmélian, les autres entre Chambéry et St-Pierre d'Albigny.

(1) Sur les motifs pour lesquels le courant continu à 1.500 volts a été choisi comme standard pour l'électrification des chemins de fer français, voir notre ouvrage sur « *la Traction électrique aux Etats-Unis* », p. 551 à 574. On sait que l'on est arrivé aux mêmes conclusions en Angleterre, en Belgique et en Hollande.

Il faut d'ailleurs noter que, sur certaines voies ferrées pourvues de lignes de contact aériennes, les gaz émis par les locomotives à vapeur ont également produit de graves *corrosions* sur les dites lignes et sur leurs câbles de support.

Un autre inconvénient de l'emploi du fil aérien pour l'électrification des lignes en exploitation réside dans la nécessité où l'on se trouvera généralement de *déplacer les lignes téléphoniques et télégraphiques* situées le long de la voie ferrée, à une distance trop faible pour permettre l'implantation des poteaux de support des lignes de traction. Il y a là une source de dépenses très importantes, qu'il faut bien se garder de négliger lorsqu'on veut établir une comparaison des *prix de revient* de l'équipement avec troisième rail et avec fil aérien.

Il faut reconnaître qu'il est possible d'établir des lignes aériennes *simplifiées*, et partant plus économiques que le troisième rail. Mais si l'on veut obtenir, avec la ligne aérienne, des *chutes de tension aussi réduites* qu'avec le troisième rail, et surtout une prise de courant aussi satisfaisante pour de *fortes intensités aux très grandes vitesses*, on est fatalement conduit, en tenant compte de toutes les dépenses qualifiées à tort d'accessoires, à une dépense totale à *peu près équivalente* à celle du troisième rail.

Le principal inconvénient du troisième rail est de créer un *obstacle dangereux* pour la circulation du personnel : en voie courante, cet inconvénient sera réduit au minimum en implantant le troisième rail dans l'entre-voie, et en le munissant, sur toute sa longueur, d'un dispositif de *protection*, aussi efficace que possible, pour éviter au personnel tout risque de contact accidentel avec le conducteur (1).

Mais sur les *voies de service des grandes gares*, le troisième rail, même protégé complètement, occasionnerait une gêne trop sérieuse pour la circulation du personnel : aussi a-t-on prévu dans ce cas l'emploi du fil de contact aérien.

Le troisième rail présentera d'autre part des *lacunes* au droit de certains *appareils de voie* (branchements, croisements, traversées, etc...), lacunes dont la longueur ne doit pas dépasser l'écartement des frotteurs des locomotives, faute de quoi il y aurait coupure de courant à chaque passage d'une machine sur ces appareils. Pour réduire la longueur des lacunes à la limite ainsi fixée, on serait conduit, dans certains cas, à des remaniements fort importants des appareils de voie : il y a donc là un nouveau motif pour chercher à restreindre le plus possible l'emploi du troisième rail dans les gares, afin d'éviter ces remaniements d'appareils, qui se heurteraient d'ailleurs, dans certaines grandes gares, à des difficultés à peu près insurmontables.

Il est cependant nécessaire de maintenir le troisième rail sur les voies principales des gares franchies en vitesse par les trains express. Mais dans certaines des gares dites « *d'arrêt général* », on supprimera le troisième rail même sur les voies principales, où les appareils de voie (branchements, croisements, etc...) se succèdent presque sans interruption : les voies principales, comme les voies de service, seront alors équipées exclusivement avec le fil aérien ; le passage du troisième rail de la voie courante au fil aérien de la gare, ou vice versa, ne paraît pas devoir

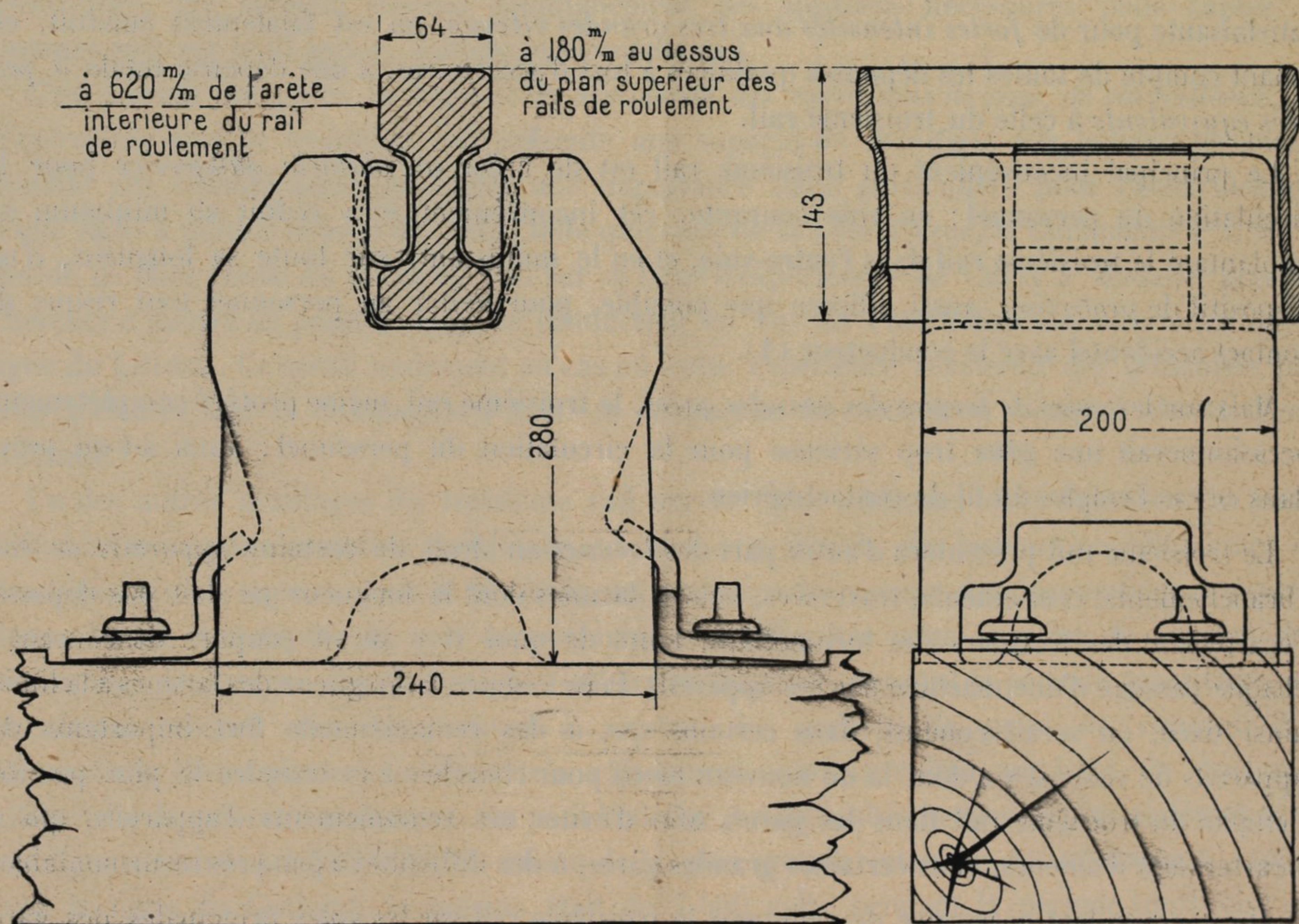
(1) On sait que, sur les lignes à traction électrique par troisième rail à 600 volts environ, ce dispositif de protection n'existe que dans les gares, le conducteur restant nu en pleine voie : la Compagnie P.L.M. a estimé que, pour un premier essai à 1.500 volts, il était prudent d'installer la protection sur toute la longueur des rails de prise de courant, même en pleine voie.

présenter de difficultés spéciales, en raison des faibles allures auxquelles les locomotives franchiront les zones de transition pourvues des deux types de conducteurs.

Avant de procéder à l'équipement en grand de la ligne de Culoz à Modane, la Compagnie P.L.M. compte effectuer un premier essai sur la section d'environ 25 kilomètres qui s'étend de Chambéry à St-Pierre d'Albigny.

Pour ces essais, on utilisera un rail à double champignon, en acier spécial à haute conductibilité, et pesant 50 kg au mètre courant. Ce rail sera placé sur de robustes isolateurs, reposant directement sur les traverses allongées en conséquence (Voir Fig. 5) : pour la

Fig. 5. — RAIL CONDUCTEUR, ET SON ISOLATEUR (Échelle 1/5).



constitution de ces isolateurs, on essaiera diverses matières, notamment le grès, le basalte fondu, etc... Le rail sera maintenu transversalement dans l'évidement de l'isolateur au moyen de cales élastiques en tôle d'acier de 2 mm.

Le dispositif de *protection* du rail conducteur a été étudié de manière à faciliter le plus possible les opérations de pose et d'entretien. Il sera constitué par une gaine en planches (une planche horizontale au-dessus du rail, et deux planches verticales sur les côtés), supportée par le rail lui-même au moyen de cales isolantes et de ferrures d'assemblage (Voir Fig. 6).

Pour l'*éclissage* du rail conducteur, on s'est également attaché à faciliter les opérations de pose et d'entretien, tout en cherchant à réduire au minimum la longueur des connexions en

cuivre pour éviter tout risque de vol (1). Les études poursuivies dans cet ordre d'idées, de concert avec l'Office Central d'Etudes de Matériel de Chemins de fer (O.C.E.M.), ont conduit à adopter, pour les essais sur la section de Chambéry à St-Pierre d'Albigny, le type d'éclisse représenté par la Fig. 7 : la même pièce jouera simultanément le rôle d'éclisse mécanique et d'éclisse électrique. Dans ce but, de courtes connexions en cuivre seront d'une part soudées aux

Fig. 6. — DISPOSITIF DE PROTECTION DU RAIL CONDUCTEUR (Échelle 1/5).

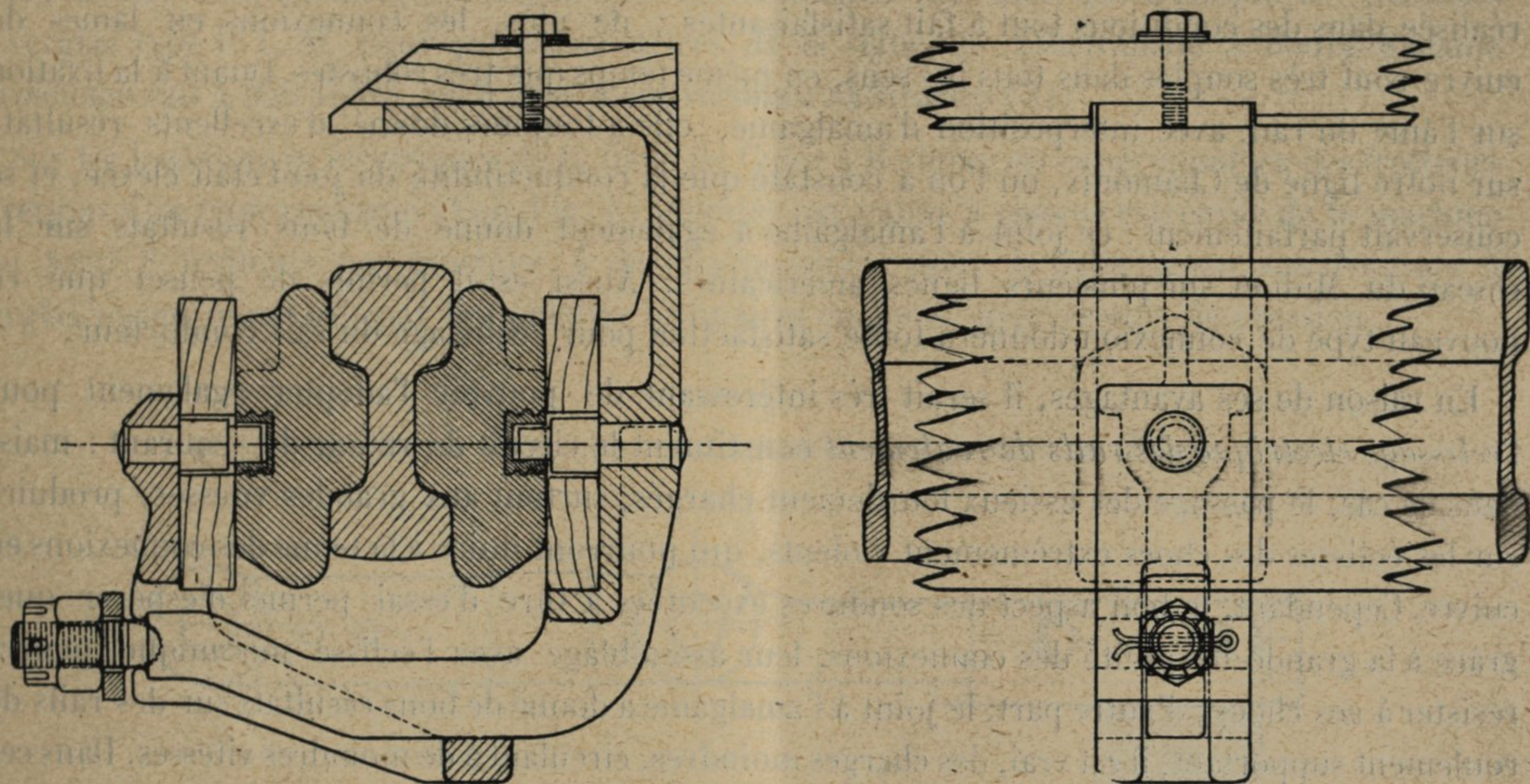
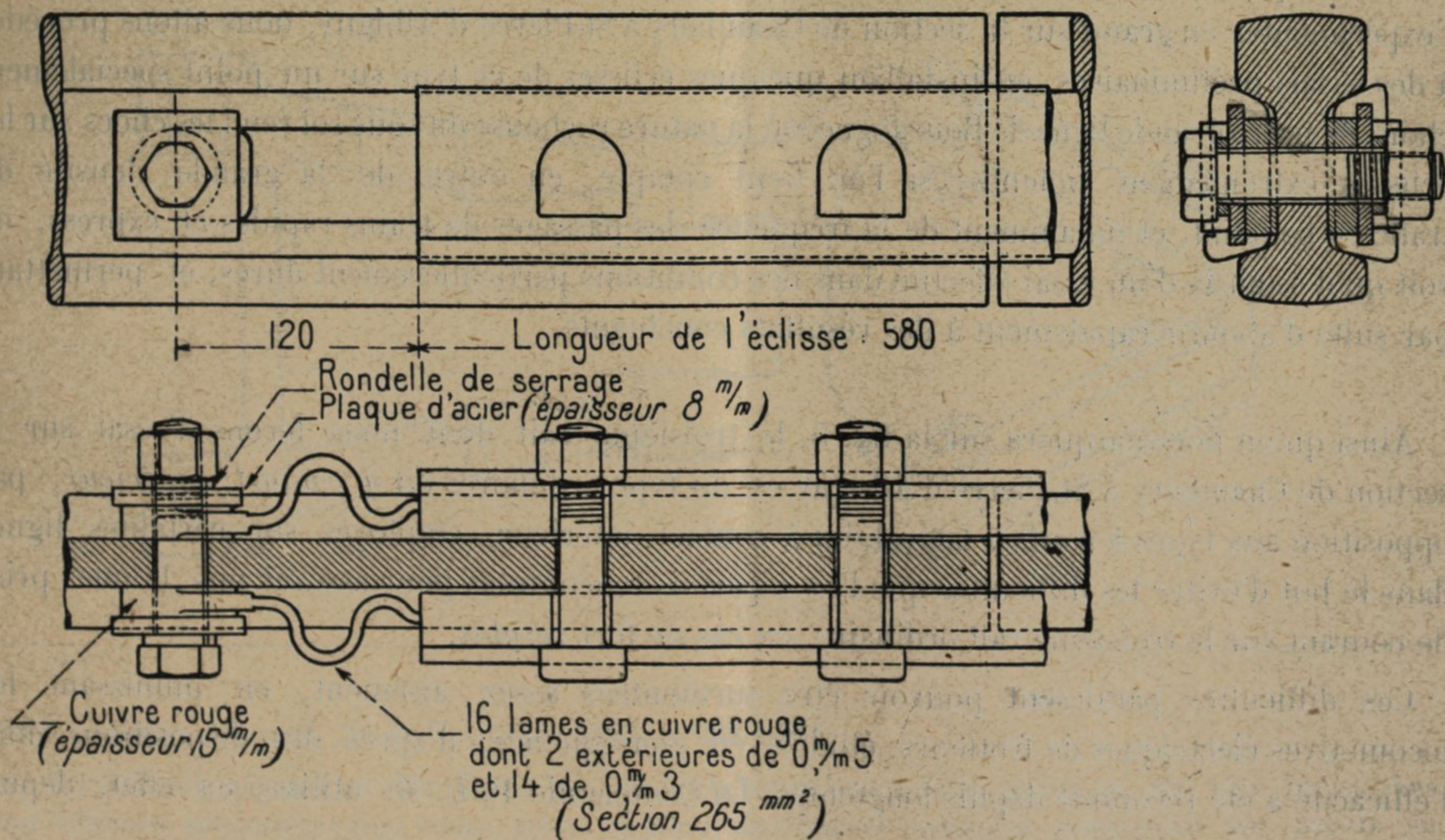


Fig. 7. — ÉCLISSAGE DU RAIL CONDUCTEUR (Échelle 1/5).



(1) Ces considérations s'appliquent également à l'éclissage électrique des rails de roulement formant le circuit de retour.

deux extrémités de l'éclisse en acier, et d'autre part fixées sur l'âme du rail au moyen de boulons, avec interposition d'amalgame assurant un excellent contact. De la sorte, la pose des éclisses (soit au moment de l'électrification de la ligne, soit au cours de l'entretien) ne nécessitera aucun appareillage spécial (1), en même temps que tout danger de vol se trouvera écarté.

Plusieurs échantillons d'éclisses de ce genre, exécutés à titre d'essai, ont permis de constater que la soudure de la connexion en cuivre sur l'extrémité de l'éclisse en acier pouvait être réalisée dans des conditions tout à fait satisfaisantes ; de plus, les connexions en lames de cuivre sont très souples dans tous les sens, en même temps que très robustes. Quant à la fixation sur l'âme du rail, avec interposition d'amalgame, elle a toujours donné d'excellents résultats sur notre ligne de Chamonix, où l'on a constaté que la conductibilité du joint était élevée, et se conservait parfaitement : ce joint à l'amalgame a également donné de bons résultats sur le réseau du Midi et sur plusieurs lignes américaines. Aussi est-il permis de penser que ce nouveau type de connexion donnera toute satisfaction pour l'éclissage du rail conducteur.

En raison de ses avantages, il serait très intéressant de pouvoir l'adopter également pour l'éclissage électrique des rails de roulement constituant le circuit de retour du courant : mais, dans ce cas, le passage des essieux lourdement chargés, surtout aux grandes vitesses, produira sur les éclisses des chocs extrêmement violents, qui pourront nuire à la tenue des connexions en cuivre. Cependant, le bon aspect des soudures exécutées à titre d'essai permet d'espérer que, grâce à la grande flexibilité des connexions, leur assemblage avec l'éclisse mécanique pourra résister à ces chocs ; d'autre part, le joint à l'amalgame a donné de bons résultats sur des rails de roulement supportant, il est vrai, des charges moindres, circulant à de moindres vitesses. Dans ces conditions, nous avons estimé qu'il fallait chercher à mettre au point ce type d'éclissage non seulement pour le rail conducteur, mais même pour les rails de roulement. Toutefois, avant de l'expérimenter en grand sur la section de Chambéry à St-Pierre d'Albigny, nous allons procéder à des essais préliminaires, en installant quelques éclisses de ce type sur un point spécialement choisi de notre grande ligne de Bourgogne, où la nature rocheuse du sous-sol rend les chocs sur les éclisses extrêmement violents : si l'on tient compte, en outre, de la grande densité du trafic en ce point, et notamment de la fréquence des passages de trains rapides et express, on voit qu'il s'agit là d'un essai effectué dans des conditions particulièrement dures, et permettant par suite d'aboutir rapidement à des résultats concluants.

Ainsi qu'on le remarquera sur la fig. 5, le troisième rail dont nous ferons l'essai sur la section de Chambéry à St-Pierre d'Albigny est du type ordinaire, dit à *contact supérieur*, par opposition aux types à contact latéral, ou à contact inférieur, employés sur certaines lignes dans le but d'éviter les difficultés que l'on a parfois rencontrées pour assurer une bonne prise de courant sur le troisième rail ordinaire, en cas de fort *verglas*.

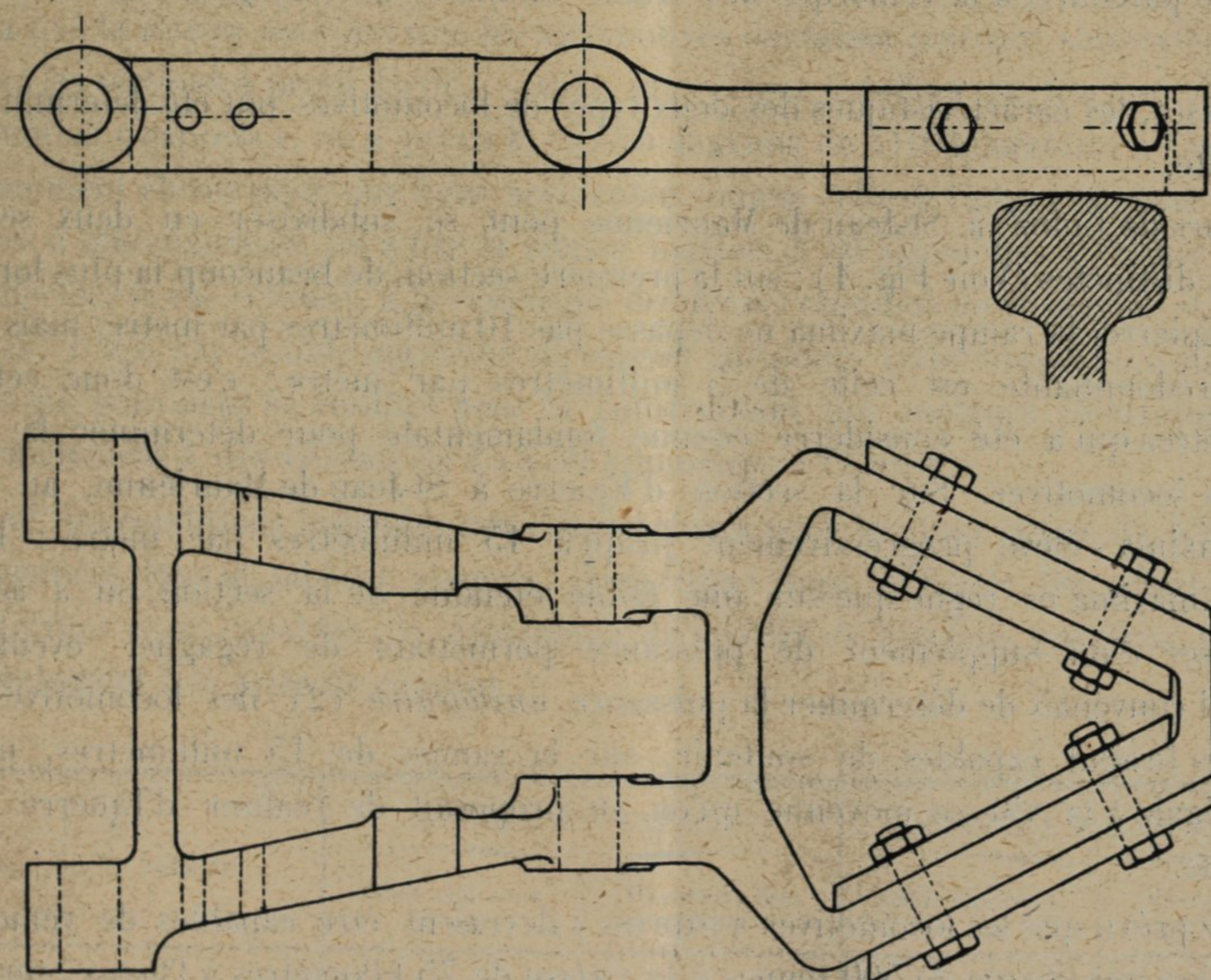
Ces difficultés paraissent pouvoir être surmontées assez aisément, en munissant les locomotives électriques de frotteurs étudiés en conséquence, d'après des dispositions dont l'efficacité a été reconnue depuis longtemps. La Compagnie P. L. M. utilise, en effet, depuis

(1) C'est un des principaux reproches que l'on peut faire aux connexions soudées ou à têtes rivées : cet inconvénient est encore plus grave pour les opérations d'entretien courant que pour la pose initiale.

1902, sur la ligne de Chamonix, des frotteurs spéciaux, dits *frotteurs à verglas*, qui ont toujours donné satisfaction, malgré la rigueur du climat dans cette région. Ces frotteurs portent des lames en acier dur, disposées verticalement, et à 30° environ par rapport à l'axe du rail conducteur (1); au moyen d'un piston à air comprimé, on peut régler la pression des frotteurs sur le rail, et la porter au besoin jusqu'à 200 kg par frotteur. On conçoit qu'avec de pareilles pressions, les lames d'acier, appuyant sur le troisième rail par leur tranche, le débarrassent complètement du verglas (2). La Compagnie du Midi, qui a adopté les frotteurs à verglas type P. L. M. pour ses automotrices de la ligne de Villefranche à Bourg-Madame (troisième rail à 850 volts), en a également reconnu l'efficacité (3).

Sur les locomotives électriques de la ligne de Culoz à Modane, on expérimentera des frotteurs à verglas d'un type analogue (Voir Fig. 8), montés par paires à chaque extrémité de la machine (au total 8 frotteurs par machine, 4 de chaque côté); pour la belle saison, ces frotteurs à verglas seront remplacés par des palettes ordinaires en fonte, avec ressort de pression.

Fig. 8. — FROTTEUR A VERGLAS POUR LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES (Échelle 1/4).



(1) Voir *Revue Générale*, N° de Novembre 1908, p. 338 à 340.

(2) Ces frotteurs spéciaux ne sont montés que sur les fourgons automoteurs placés en tête des trains. Les autres véhicules automoteurs sont munis, même en hiver, de frotteurs ordinaires comportant une palette en fonte aciéreuse, qui repose sur le troisième rail par le seul effet de son propre poids : les ressorts qui avaient été installés au début, pour augmenter la pression de la palette sur le rail, ont été reconnus inutiles, et on les a supprimés.

(3) Voir *Revue Générale*, N° d'Avril 1912, p. 305.

Locomotives électriques. — Le programme d'exploitation de la ligne de Culoz à Modane, après électrification, prévoit des charges maxima de 500 tonnes pour les express, de 450 tonnes pour les trains omnibus de voyageurs et pour les trains de messageries, et de 800 tonnes pour les trains de marchandises.

En raison du profil de la ligne (Voir Fig. 1), on a été conduit à admettre que les locomotives électriques devraient être capables de remorquer ces charges maxima en simple traction de Culoz à St-Jean de Maurienne, et en double traction au delà jusqu'à Modane (1).

Dans ces conditions, il suffirait de *deux types de locomotives* pour assurer tout le service, les locomotives du premier type devant être capables de remorquer un express de 500 tonnes en simple traction de Culoz à St-Jean de Maurienne, et celles du second type devant être capables de remorquer en simple traction, sur ce même parcours, un train de marchandises de 800 tonnes : les mêmes charges pourront être remorquées en double traction de St-Jean de Maurienne à Modane, en utilisant des locomotives du second type comme machine de renfort pour les trains de toute nature, quel que soit le type de la machine titulaire (type "express" ou type "marchandises"). Enfin, pour pouvoir obtenir des locomotives électriques un rendement kilométrique journalier très élevé, les deux types devront pouvoir être utilisés indifféremment, et sur tout le parcours, à la remorque des trains omnibus de voyageurs et des trains de messageries.

Sur ces bases, les caractéristiques des deux types de locomotives ont été déterminées de la façon suivante.

Le parcours de Culoz à St-Jean de Maurienne peut se subdiviser en deux sections de natures bien distinctes (Voir Fig. 1) : sur la première section, de beaucoup la plus longue, celle de Culoz à Epierre, la rampe maxima ne dépasse pas 10 millimètres par mètre, mais la rampe moyenne prédominante est celle de 5 millimètres par mètre ; c'est donc cette rampe de 5 millimètres qui a été considérée comme fondamentale pour déterminer la puissance *continue* des locomotives. Sur la section d'Epierre à St-Jean de Maurienne, au contraire, la rampe maxima s'élève progressivement jusqu'à 15 millimètres par mètre : bien que cette rampe maxima ne règne que sur une faible étendue de la section, on a admis que, pour disposer d'un supplément de puissance permettant de regagner éventuellement du retard, il convenait de déterminer la puissance *unihoraire* (2) des locomotives de telle sorte qu'elles fussent capables de soutenir, sur la rampe de 15 millimètres, une vitesse à peu près égale à la vitesse moyenne qu'on se proposait de réaliser d'Epierre à St-Jean de Maurienne.

On a donc prévu que les locomotives « express » devraient être capables de remorquer en simple traction une charge de 500 tonnes à la vitesse de 75 kilomètres à l'heure, sur rampe de 5 millimètres par mètre, en régime continu, — et à la vitesse de 50 kilomètres à l'heure, sur rampe de 15 millimètres par mètre, en régime unihoraire. Quant aux locomotives à marchandises, elles devront pouvoir remorquer, en simple traction, une charge de 800 tonnes à la vitesse de 45 kilomètres à l'heure, sur rampe de 5 millimètres par mètre, en régime continu,

(1) C'est d'ailleurs ainsi que le service est organisé actuellement avec la traction à vapeur.

(2) Les régimes « continu » et « unihoraire », dont il est question ici, sont définis par les degrés d'échauffement des moteurs électriques d'après les règles américaines.

— et à la vitesse de 30 kilomètres à l'heure, sur rampe de 15 millimètres par mètre, en régime unihoraire. De plus, et toujours dans le but de permettre de regagner aisément des retards, on a prévu que ces conditions devraient être réalisées pour une tension de 1.350 volts seulement à la prise de courant, afin de tenir compte des pertes en ligne entre les sous-stations : **comme** le conducteur de prise de courant sera alimenté à 1.500 volts au droit des sous-stations, on disposera donc, le plus souvent, d'un supplément de puissance fort appréciable. En outre, les efforts de traction fixés aux constructeurs, pour les différents cas envisagés, ont été calculés en prenant, pour la résistance du train au roulement, des coefficients assez élevés, afin de se réserver également une marge de ce côté.

On s'est assuré, par ailleurs, que les locomotives électriques, pourvues de moteurs répondant aux conditions indiquées ci-dessus, possèderaient des caractéristiques telles que la remorque des charges maxima en double traction sur les fortes rampes de la section de St-Jean de Maurienne à Modane pourrait s'effectuer à des vitesses convenables. On a toutefois précisé la valeur de l'effort de traction qu'elles devraient pouvoir développer pour permettre le démarrage et l'accélération d'un train correspondant à la charge maxima, et supposé arrêté accidentellement dans la rampe de 30 millimètres par mètre.

Enfin, on a fixé la *vitesse maxima* que les locomotives devraient pouvoir supporter de façon prolongée, sur les sections à profil facile, — mais sans exiger un effort de traction déterminé. Pour la locomotive « express », on a prévu la vitesse maxima de 110 kilomètres à l'heure, qui a paru suffisamment élevée pour une ligne accidentée comme celle de Culoz à Modane (1). Pour les locomotives à marchandises, on a fixé la vitesse maxima à 80 kilomètres à l'heure, afin de pouvoir les affecter, le cas échéant, à la remorque des trains omnibus de voyageurs et des trains de messageries : il n'a pas semblé opportun de relever davantage cette vitesse maxima, à cause des difficultés qui pouvaient en résulter pour la construction des moteurs électriques devant travailler normalement à des vitesses de 25 à 50 kilomètres à l'heure.

En définitive, les conditions imposées aux constructeurs pour les deux types de locomotives sont celles résumées dans le tableau ci-après, dans lequel sont indiqués les efforts que les locomotives doivent être capables de développer *au crochet de traction*, pour une tension de 1.350 volts seulement à la prise de courant.

RAMPE en millimètres par mètre	RÉGIME	LOCOMOTIVE " EXPRESS "		LOCOMOTIVE A MARCHANDISES	
		Effort minimum en kg.	Vitesse en km. à l'heure	Effort minimum en kg.	Vitesse en km. à l'heure
30	5 minutes.....	15.000	30 à 35	20.000	20 à 25
15	Unihoraire.....	10.000	50	16.000	30
5	Continu.....	5.000	75	8.000	45
Palier	Continu.....	3.250	85	5.000	50
		Vitesse maxima 110		Vitesse maxima 80	

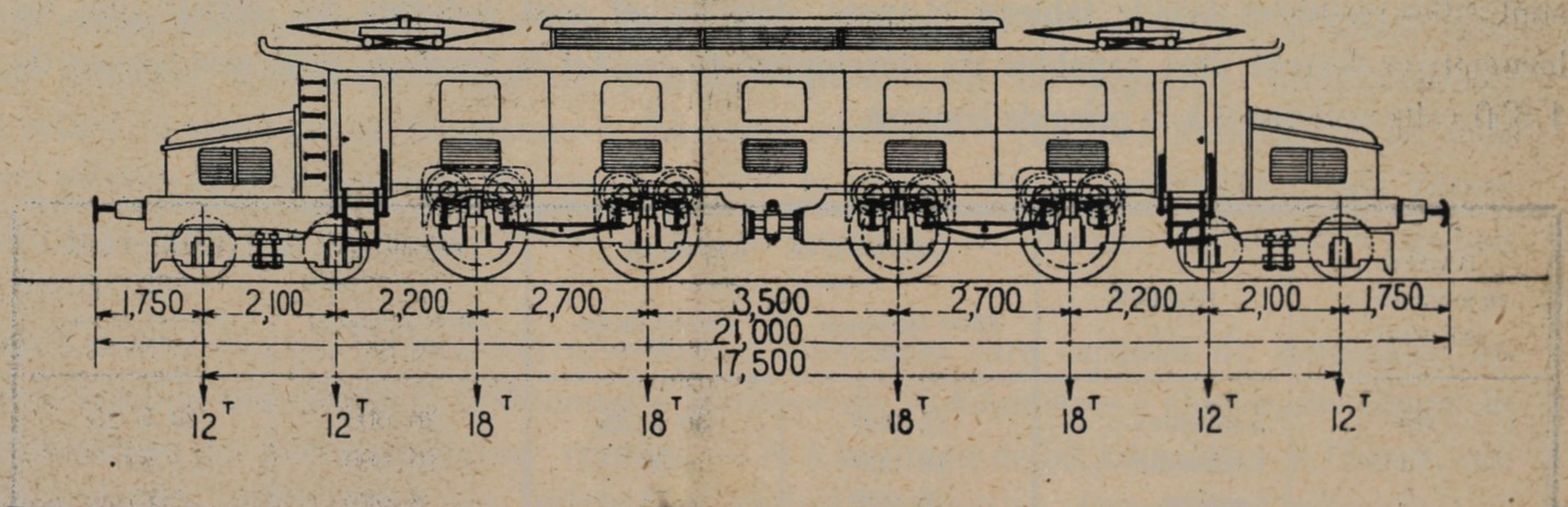
(1) La vitesse maxima des locomotives à vapeur, type Mikado, qui remorquent actuellement les express sur cette ligne, est de 95 kilomètres à l'heure. Les vitesses maxima autorisées par le Service de la Voie entre Culoz et St-Jean de Maurienne, ou vice-versa, varient généralement de 95 à 105 kilomètres à l'heure, sauf sur de très courtes sections où elles s'élèvent à 110 ou 115 kilomètres à l'heure, tandis que sur d'autres elles sont réduites à 80 ou 85 kilomètres à l'heure.

En raison des longues pentes qui règnent de Modane à St-Pierre d'Albigny (Voir fig. 1), on a prévu que toutes les locomotives seraient munies du *freinage électrique par récupération* : on a précisé qu'à la descente des pentes de 30 millimètres par mètre les locomotives devraient pouvoir retenir, par le seul freinage électrique (à l'exclusion de tout autre mode de freinage réservé comme secours), un train d'un poids déterminé (au moins 300 tonnes pour une locomotive « express », machine non comprise, et 400 tonnes pour une locomotive à marchandises) (1), descendant à une vitesse comprise entre des limites assez étroites (35 à 45 kilomètres à l'heure pour la locomotive « express », 20 à 25 kilomètres à l'heure pour la locomotive à marchandises). En outre, pour pouvoir profiter de la récupération dans les meilleures conditions possibles, en raison de la valeur très variable des déclivités, les locomotives devront pouvoir fonctionner en récupération dans une gamme de vitesse très étendue, depuis un minimum fixé à 20 kilomètres à l'heure pour les locomotives « express », et à 12 kilomètres à l'heure pour les locomotives à marchandises, jusqu'à un maximum aussi élevé que possible.

L'expérience actuellement acquise, tant en Europe qu'en Amérique, dans la construction des *locomotives électriques à grande vitesse*, nous a paru trop limitée pour qu'il fût possible de commander d'emblée tout le lot de machines « express » nécessaires pour l'électrification de la ligne de Culoz à Modane, sans recourir à des *essais préalables* (2). La Compagnie P. L. M. a donc décidé de faire construire tout d'abord un certain nombre de *locomotives d'essai* répondant au programme défini plus haut pour le type « express ».

Les deux locomotives d'essai commandées d'une part à la *Société Alsacienne de Constructions mécaniques* (Voir Fig. 9), et d'autre part à un groupement constitué par la *Société de Construction des Batignolles*, la *Compagnie générale de Construction de locomotives*, et la *Société Oerlikon* (Voir Fig. 10), présenteront un certain nombre de dispositions communes.

Fig. 9. — LOCOMOTIVE EXPRESS DE LA SOCIÉTÉ ALSACIENNE DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES.

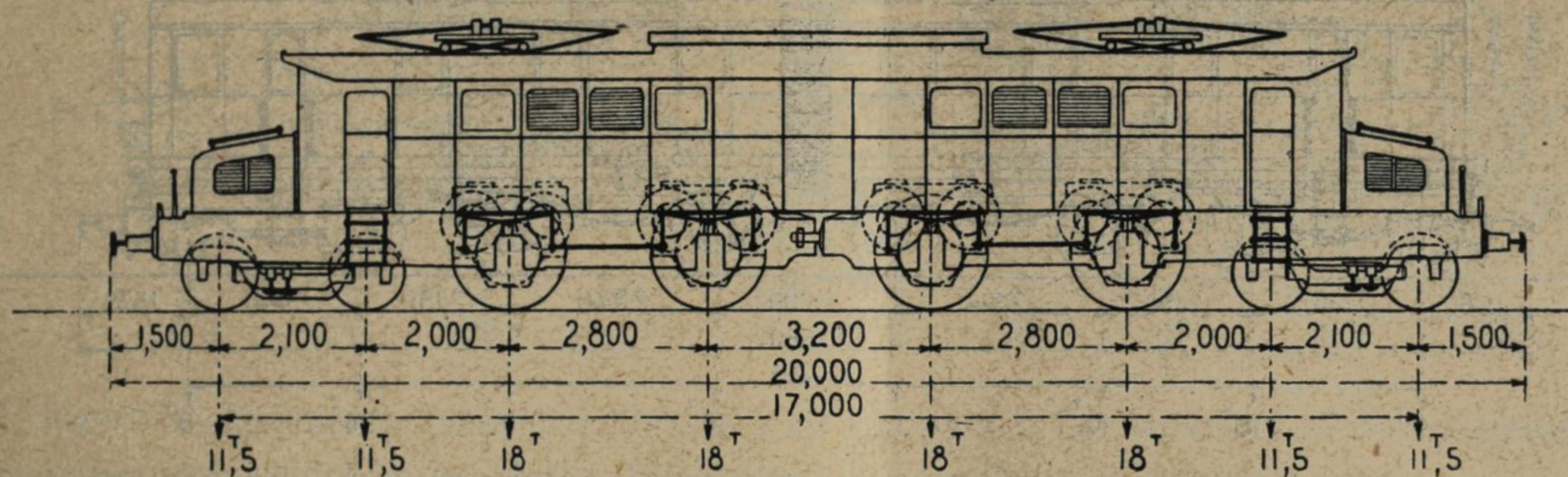


(1) Ces conditions s'entendent pour une seule machine, mais les charges pourront atteindre à la descente les mêmes limites qu'à la montée, à la condition d'employer la double traction (renfort en tête), les deux machines fonctionnant en récupération.

(2) C'est d'ailleurs bien ainsi que l'ont compris également les Compagnies du Midi et du P. O., qui font construire, de leur côté, à titre d'essai, quelques exemplaires de locomotives à grande vitesse de types divers. On s'est attaché, pour rendre ces essais plus concluants, à choisir, sur le P. L. M., des types différents de ceux qui doivent être expérimentés sur les deux autres réseaux. De la sorte, on pourra rapprocher les résultats obtenus avec un grand nombre de locomotives présentant les dispositions les plus variées.

Elles comporteront une seule caisse, reposant sur deux trucks accouplés par l'arrière au moyen d'un attelage à rotule. Chaque truck sera muni de deux essieux moteurs et d'un bogie porteur à deux essieux. Au-dessus de chaque essieu moteur seront installés, sur le châssis du truck, deux moteurs électriques jumelés, attaquant, par engrenages, un arbre creux concentrique à l'essieu, et relié aux roues par un dispositif d'entraînement élastique (1). Par contre, ces deux locomotives différeront notamment, au point de vue mécanique, par le dispositif d'entraînement élastique des roues motrices, et au point de vue électrique, par le système de contrôle, l'appareillage, et le système de récupération. Bien que ces deux locomotives

Fig. 10. — LOCOMOTIVE EXPRESS DU GROUPEMENT BATIGNOLLES-ÉRLIKON.



aient été étudiées spécialement en vue du service des express sur la ligne de Culoz à Modane, leur mode de construction paraît susceptible d'être adapté ultérieurement à un service à très grande vitesse sur des lignes à profil facile, comme notre ligne du Littoral (2).

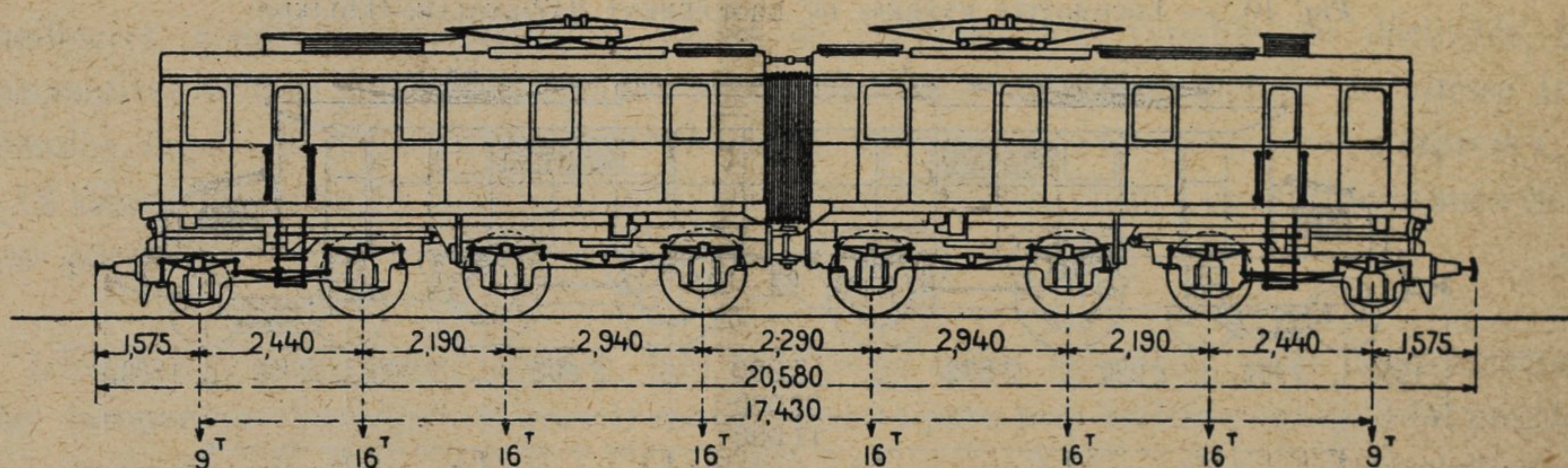
Tel n'est pas le cas, au contraire, de la locomotive d'essai commandée à la *Société d'Etudes pour l'électrification des Chemins de fer français* (Société en participation groupant la *Compagnie Thomson-Houston*, MM. *Schneider et Cie*, et la *Compagnie des Forges et Ateliers de Constructions électriques de Jeumont*) ; les plans de cette machine, établis par la *General Electric Co*, ont été étudiés de façon à pouvoir s'adapter indifféremment au programme de la locomotive "express", et à celui de la locomotive à marchandises, aux engrenages près. Cette locomotive se composera de deux "unités", ou demi-locomotives, à peu près identiques, et

(1) Rappelons que cette disposition a été employée par la Compagnie Westinghouse sur un grand nombre de locomotives électriques, notamment celles du New-York, New-Haven and Hartford Railroad et du Chicago, Milwaukee and St-Paul Railway (voir notre ouvrage sur "la Traction électrique aux Etats-Unis", p. 88 à 103, 480 à 483, 577 à 580, et planches III et XI). Cette disposition a été reproduite sur la locomotive électrique à grande vitesse construite à titre d'essai par le North-Eastern Railway (courant continu à 1.500 volts), et sur diverses locomotives monophasées construites par les Ateliers de Sécheron pour les Chemins de fer fédéraux suisses.

(2) Ainsi qu'on a pu s'en rendre compte par le programme défini plus haut pour la locomotive "express" de la ligne de Culoz à Modane, cette machine ne représentera pas, à proprement parler, le type de la locomotive à très grande vitesse ; au contraire, les machines d'essai commandées par la Compagnie du Midi et celle du P. O. sont destinées à remorquer, sur profil facile, des trains tracés aux vitesses les plus élevées. Mais le domaine de la locomotive "express" répondant au programme de la ligne de Culoz à Modane ne sera pas limité à cette seule ligne ; elle conviendra parfaitement pour le service des express sur d'autres lignes moyennement accidentées, et comprises dans le programme général d'électrification de la Compagnie P. L. M., comme celles de Lyon à Genève, de Lyon à Grenoble, de Lyon à St-Germain des Fossés, etc...

accouplées par l'arrière au moyen d'un attelage à rotule (Voir Fig. 11). Chaque unité comportera trois essieux moteurs à roues de faible diamètre, et un essieu porteur à l'avant : deux des essieux moteurs seront montés sous le châssis principal de la demi-locomotive, tandis que le troisième essieu moteur et l'essieu porteur seront montés sous un châssis auxiliaire, articulé à l'arrière avec le châssis principal au moyen d'une rotule, et présentant à l'avant deux plans inclinés sur lesquels s'appuieront des rouleaux fixés sous le châssis principal (1). Comme la locomotive "express" de la ligne de Culoz à Modane n'aura pas à développer sa

Fig. 11. — LOCOMOTIVE DU GROUPEMENT THOMSON-HOUSTON, SCHNEIDER, JEUMONT.



pleine puissance à des vitesses très élevées, et ne circulera qu'accidentellement à des vitesses supérieures à 100 km à l'heure, la General Electric C^o a estimé qu'on pouvait conserver, pour ce problème bien défini, le *moteur ordinaire à suspension "par le nez"*, qu'elle n'eût pas proposé pour une locomotive à très grande vitesse. Mais, pour atténuer les chocs sur les engrenages au passage des dénivellations de la voie, des ressorts seront intercalés entre la jante de la roue dentée et son centre calé sur l'essieu moteur (il n'y aura d'ailleurs qu'un seul jeu d'engrenages par moteur).

On sait quelle incertitude règne encore sur le meilleur *mode de transmission* à adopter pour les locomotives électriques à grande vitesse : les *transmissions par engrenages*, les *transmissions par bielles*, et l'*"attaque directe"* ont leurs avantages et leurs inconvénients (2). Aussi la Compagnie P. L. M. n'a-t-elle pas voulu borner ses essais aux trois locomotives décrites ci-dessus, comportant toutes des transmissions par engrenages. Par ailleurs, la locomotive à attaque directe paraît destinée surtout aux très grandes vitesses (3) ; il était donc indiqué d'essayer une *locomotive à bielles*. En conséquence, la Compagnie P. L. M. a consulté ses constructeurs habituels de locomotives à vapeur, ainsi que les principaux constructeurs de gros matériel électrique, pour la fourniture d'une locomotive à bielles, avec transmission élastique

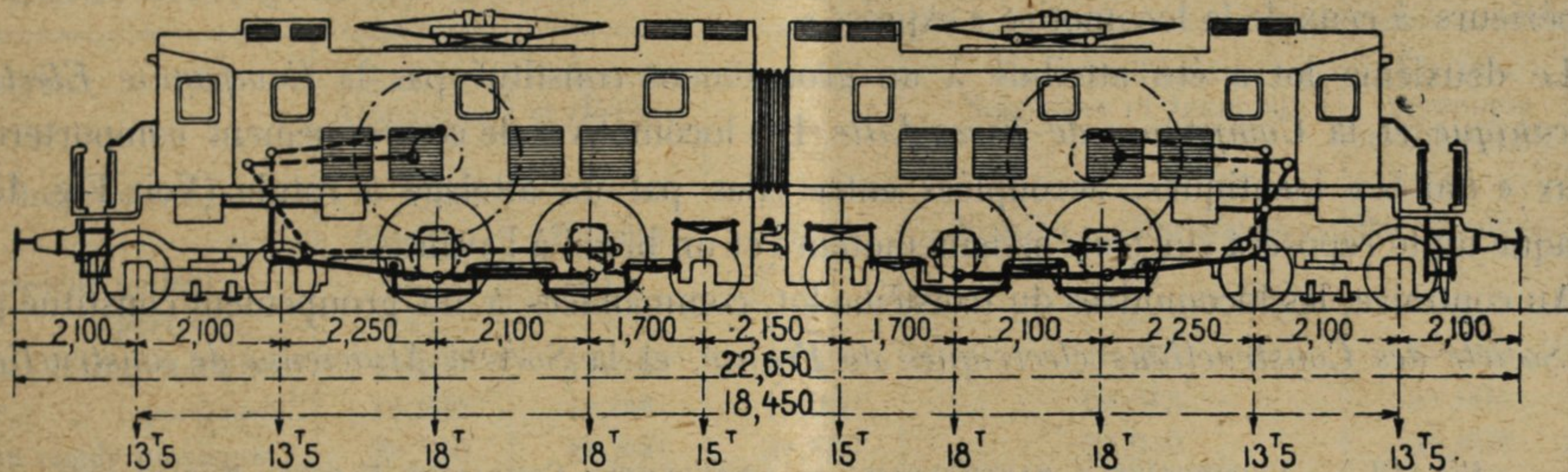
(1) Cette disposition des caisses et des châssis est inspirée de celle qui a déjà été réalisée par la General Electric C^o sur les locomotives "gearless" du Chicago, Milwaukee and St-Paul Railway (voir notre ouvrage sur "la Traction électrique aux Etats-Unis", p. 460 à 467 et planche X).

(2) Sur la comparaison des divers modes de transmission pour locomotives électriques, tant aux Etats-Unis qu'en Europe, voir notre ouvrage sur "la Traction électrique aux Etats-Unis", p. 574 à 602.

(3) C'est pourquoi la Compagnie P. O. a décidé d'en faire l'essai, en même temps que celui de divers types de locomotives à transmissions par bielles.

du système imaginé par M. Auvert, Ingénieur principal du Matériel de notre Compagnie (1) ; cette commande a été attribuée à la *Compagnie de Fives-Lille*. La locomotive comportera deux "unités" à peu près identiques, accouplées par l'arrière au moyen d'un attelage à rotule (Voir Fig 12). Sur le châssis de chaque unité sera monté, à l'intérieur de la caisse, un gros moteur électrique, actionnant les roues motrices par l'intermédiaire de bielles et balanciers ; les axes d'oscillation des balanciers seront montés élastiquement, sur des pistons susceptibles

Fig. 12. — LOCOMOTIVE EXPRESS DE LA COMPAGNIE DE FIVES-LILLE.



de légers déplacements dans des cylindres à air comprimé. Les moteurs seront pourvus d'une excitation compound, et la tension d'alimentation sera réglée au moyen de groupes survolteurs-dévolteurs. Cette locomotive présentera donc un ensemble de dispositions très originales, tant au point de vue mécanique qu'au point de vue électrique, dont l'essai ne peut manquer de fournir des indications fort intéressantes.

Ces quatre locomotives d'essai ont été commandées en Mai-Juin 1922, et la livraison en était prévue pour la fin de l'été 1923 : malheureusement, les retards inévitables en pareille matière ne permettent guère d'espérer que les essais puissent commencer avant le printemps de 1924. C'est seulement d'après les résultats de ces essais que la Compagnie P.L.M. lancera sa commande définitive pour le lot de locomotives « express » de la ligne de Culoz à Modane.

Pour les *locomotives à marchandises*, au contraire ; la Compagnie P.L.M. a jugé possible de commander d'emblée les trente machines nécessaires, en trois lots de dix, en spécifiant seulement que, dans chaque lot, les neuf dernières locomotives ne seraient construites qu'après mise au point de la première. Pour ce type de machines, en effet, les aléas de la construction sont bien moindres que pour la locomotive à grande vitesse : en particulier, le type usuel de *transmission par engrenages ordinaires, avec moteurs suspendus par le nez*, présente des garanties suffisantes pour qu'il soit inutile de recourir à un mode de construction plus compliqué ; c'est donc uniquement ce type de transmission qui sera utilisé sur les trois lots de locomotives à marchandises. Un autre caractère commun à toutes ces locomotives sera de posséder six essieux moteurs et deux essieux porteurs. Enfin, sur toutes ces machines, les modes de couplage électrique des moteurs seront les mêmes, savoir :

- 6 moteurs en série sur un seul circuit ;
- 3 moteurs en série sur deux circuits en parallèle ;
- 2 moteurs en série sur trois circuits en parallèle.

(1) Voir *Revue Générale*, N° d'Août 1921, p. 88.

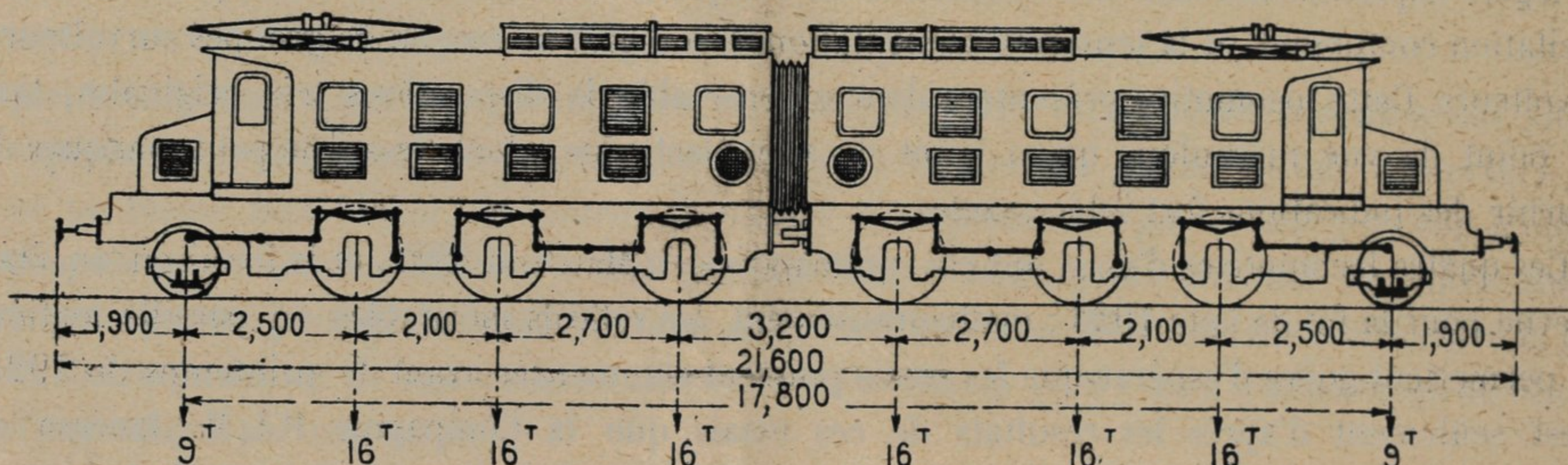
De la sorte, les moteurs, bien qu'isolés pour la tension totale de 4.500 volts, ne fonctionneront que sous une différence de tension ne dépassant pas 750 volts.

Le premier lot a été commandé à la *Société d'Etudes pour l'électrification des Chemins de fer français*, sur un type identique, aux engrenages près, à celui de la locomotive « express » commandée à titre d'essai (Voir Fig. 11), et étudiée précisément, comme nous l'avons dit plus haut, dans le but d'unification des types. On s'est borné à prévoir le remplacement des engrenages élastiques par de simples engrenages rigides du type ordinaire, avec un rapport d'engrenage différent en raison des vitesses moins élevées à réaliser avec des efforts de traction supérieurs à ceux de la locomotive « express ».

Le deuxième lot a été attribué à un groupement constitué par la *Compagnie Electro-Mécanique* et la *Compagnie de Fives-Lille*. Les locomotives de ce groupement comporteront deux « unités » identiques, accouplées entre elles par un attelage à rotule (Voir Fig. 13). Chaque unité reposera sur trois essieux moteurs et un bissel à l'avant.

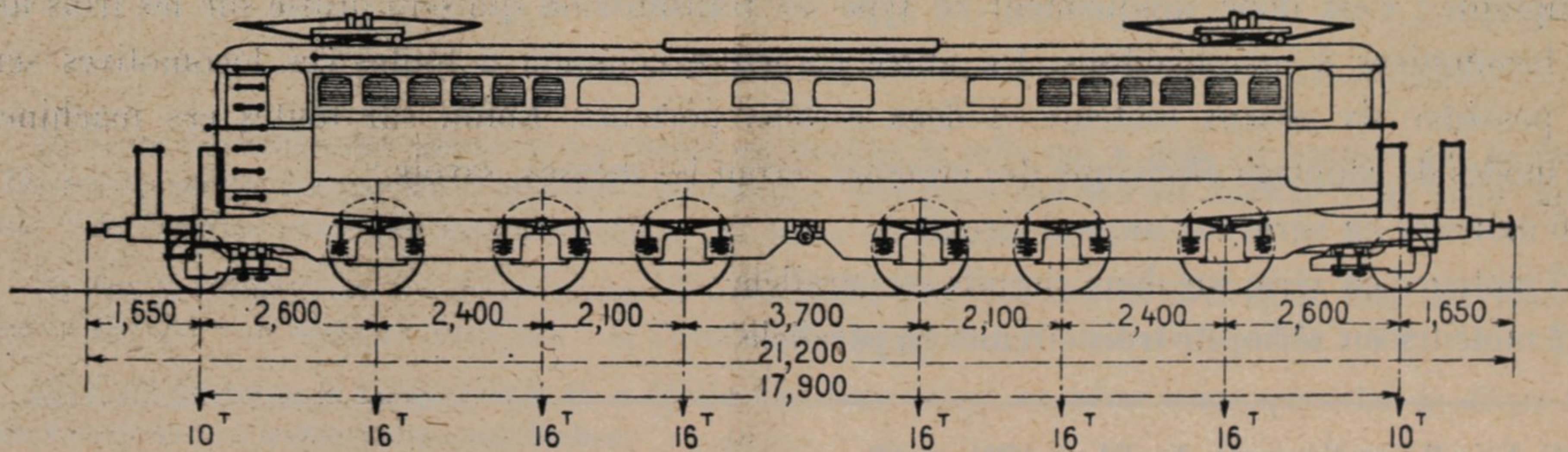
Au contraire, les locomotives du troisième lot, commandées à un groupement constitué par la *Société des Constructions électriques de France*, et la *Société Alsacienne de constructions*

Fig. 13. — LOCOMOTIVE A MARCHANDISES DU GROUPEMENT COMPAGNIE ÉLECTRO-MÉCANIQUE ET COMPAGNIE DE FIVES-LILLE.



mécaniques, ne comporteront qu'une seule caisse, reposant sur deux trucks, munis chacun de trois essieux moteurs et d'un bissel (Voir Fig. 14). Pour la suspension de la caisse sur les trucks, et pour l'attelage de ces derniers entre eux, on s'inspirera des dispositions adoptées pour les locomotives du Midi : il en sera de même pour l'appareillage de contrôle.

Fig. 14. — LOCOMOTIVE A MARCHANDISES DU GROUPEMENT CONSTRUCTIONS ÉLECTRIQUES DE FRANCE ET SOCIÉTÉ ALSACIENNE.



La comparaison de ces trois types de locomotives en service courant permettra d'obtenir des données intéressantes pour les commandes ultérieures de locomotives à marchandises en vue du service sur la ligne du Littoral.

Le tableau ci-après permet de rapprocher les principales caractéristiques des quatre locomotives d'essai du type « express », et des trois séries de locomotives à marchandises commandées pour la ligne de Culoz à Modane.

Caractéristiques des locomotives électriques de la ligne de Culoz à Modane.

CONSTRUCTEURS.....	Société Alsacienne	Batignolles et Érlikon	Fives-Lille	Thomson-Houston, Schneider et Jeumont		Électro- mécanique et Fives-Lille	Cons électques de France et Sté Alsacienne
Nombre de locomotives.....	4	4	4	1	10	10	10
Catégorie.....	Express	Express	Express	Express	Marchandises	Marchandises	Marchandises
Nombre d'essieux moteurs....	4	4	4	6	6	6	6
d° porteurs.....	4	4	6	2	2	2	2
Diamètre des roues motrices..	1 ^m ,600	1 ^m ,600	1 ^m ,650	1 ^m ,250	1 ^m ,400	1 ^m ,400	1 ^m ,400
d° porteuses..	1 ^m ,000	1 ^m ,000	1 ^m ,000	0 ^m ,915	1 ^m ,000	1 ^m ,000	0 ^m ,900
Empatement rigide maximum..	2 ^m ,700	2 ^m ,800	3 ^m ,800	2 ^m ,940	4 ^m ,800	4 ^m ,800	4 ^m ,500
Empatement total.....	17 ^m ,500	17 ^m ,000	18 ^m ,450	17 ^m ,430	17 ^m ,800	17 ^m ,800	17 ^m ,900
Longueur hors tampons.....	21 ^m ,000	20 ^m ,000	22 ^m ,650	20 ^m ,580	21 ^m ,600	21 ^m ,600	21 ^m ,200
Poids adhérent.....	72 t	72 t	72 t	96 t	96 t	96 t	96 t
Poids total.....	120 t	118 t	156 t	114 t	114 t	114 t	116 t
Nombre de moteurs.....	4 doubles	4 doubles	2	6	6	6	6
Rapport d'engrenage.....	93/24	82/21	»	61/25	68/18	87/20	76/17
Puissance unihoraire (1).....	2.200	2.300	3.000	2.000	2.000	2.200	2.000
d° continue (1).....	1.850	1.900	3.000	1.750	1.750	1.750	1.700

(1) Puissance utile à la jante en chevaux-vapeur, pour une tension de 1.500 volts à la prise de courant, dans les conditions et avec les degrés d'échauffement prévus par les règles américaines.

II. — ÉLECTRIFICATION DES LIGNES DE LA RÉGION DE NICE.

La Compagnie P.L.M. avait songé à exécuter, dans la région de Nice, une première étape d'électrification limitée à une sorte de *service de banlieue entre Cannes et Menton*, au moyen de trains fréquents, comportant des automotrices et des remorques, suivant la pratique généralement adoptée pour l'organisation des services de ce genre. Il est permis d'espérer, en effet, qu'un pareil service procurerait à notre Compagnie, surtout en hiver, un supplément de recettes fort appréciable, en raison du nombre croissant de voyageurs qui, durant leur séjour sur la Côte d'Azur, se déplacent presque quotidiennement entre Cannes, Antibes, Nice, Villefranche, Beaulieu, Monaco, Monte-Carlo et Menton. On avait d'ailleurs admis que, pour la même raison, ce service de trains automoteurs serait étendu à *l'embranchement de Cannes à Grasse*. Dans ces conditions, la traction à vapeur eût été conservée sur le Littoral, à titre provisoire, pour les trains de grand parcours (voyageurs et marchandises), jusqu'au jour où l'électrification aurait été étendue à une nouvelle section à l'Ouest de Cannes.

Mais depuis lors les idées ont évolué assez rapidement. On a reconnu tout d'abord l'intérêt qu'il y aurait à profiter, dans la plus large mesure possible, des dépenses considérables qui devraient être engagées pour les *installations fixes* nécessaires à l'organisation de ce service de banlieue (lignes à haute tension, sous-stations, lignes de prise de courant) : les dépenses

de ces divers chapitres restent, en effet, sensiblement les mêmes au cas où la traction électrique, au lieu d'être limitée aux trains de banlieue, est étendue aux *trains de toute nature* circulant sur la section électrifiée.

La suppression complète de la traction à vapeur entre Cannes et Menton semblait donc la seule méthode à suivre pour tirer le meilleur parti possible des énormes dépenses à engager pour les installations fixes.

La première conséquence de ce changement de programme était une légère extension de l'électrification vers l'Est jusqu'à *Vintimille* au lieu de Menton, afin d'amener les trains de grand parcours jusqu'à la gare d'échange avec les chemins de fer italiens.

Mais une extension beaucoup plus importante allait s'imposer vers l'Ouest. La suppression de la traction à vapeur pour les trains de grand parcours entraînait, en effet, l'acquisition d'un lot important de locomotives électriques pour les trains rapides et express (très nombreux sur le Littoral, surtout en hiver), les trains de messageries, les trains de marchandises, et certains trains omnibus de voyageurs dont le parcours n'était pas limité à la section de Cannes à Vintimille, et qu'il était par suite impossible de transformer en trains automoteurs. Il fallait dès lors se préoccuper d'obtenir un rendement kilométrique journalier aussi élevé que possible pour ces nombreuses locomotives électriques, aussi bien que pour les locomotives à vapeur assurant le service en dehors de la zone électrifiée.

Or, le parcours de Cannes à Vintimille (66 kilomètres seulement) était manifestement trop réduit pour permettre une bonne utilisation des locomotives électriques. D'autre part, la traction à vapeur des trains rapides et express du Littoral, entre Marseille et Vintimille, est actuellement organisée avec un relais de machines à Nice : la mise en service des locomotives électriques entre Cannes et Vintimille eût évidemment libéré les locomotives à vapeur qui assurent ce service entre Nice et Vintimille ; par contre, aucune réduction n'eût été possible sur l'effectif des locomotives à vapeur remorquant actuellement les grands trains entre Marseille et Nice, du fait que leur parcours eût été désormais limité à Cannes. La substitution des locomotives électriques aux locomotives à vapeur entre Cannes et Vintimille eût donc été une opération fort onéreuse, et il était indispensable, pour pouvoir organiser le service de traction de façon économique, de reporter vers l'Ouest l'origine de la zone électrifiée, en plaçant cette origine en un point suffisamment éloigné de Cannes pour obtenir une bonne utilisation des locomotives électriques entre ce point et Vintimille, aussi bien que des locomotives à vapeur entre le même point et Marseille.

Pour le choix de la nouvelle origine de la zone électrifiée, une autre considération devait également intervenir, celle de l'organisation des échanges de locomotives électriques et à vapeur, nécessitant un dépôt de relais assez important en raison du grand nombre des trains à assurer. Il eût été facile de créer à proximité de Cannes, près de la gare de triage voisine, dite Cannes-la-Bocca, le dépôt de relais nécessaire. Mais la gare de Cannes elle-même est tellement enserrée dans la ville, et pratiquement inextensible, qu'on eût été dans l'impossibilité d'y organiser l'échange des machines : il eût donc fallu reporter également cet échange à Cannes-la-Bocca, et la sujétion de cet arrêt supplémentaire a paru inacceptable pour les grands trains de la Côte d'Azur. Cette considération des échanges de locomotives à l'origine de la zone électrifiée eût donc suffi, à elle seule, à justifier l'extension de cette zone à l'Ouest de Cannes, si cette extension n'avait déjà été nécessitée par l'amélioration du service de traction.

La première solution envisagée pour répondre aux conditions que nous venons d'exposer

consistait à étendre l'électrification jusqu'à la gare *des Arcs*, où la plupart des trains rapides et express possèdent déjà un arrêt de courte durée. L'aménagement des voies pour l'échange des machines dans cette gare eût été facile. Sa position sur la ligne du Littoral, à 135 kilomètres de Marseille, et à 89 kilomètres de Nice (soit à 124 kilomètres de Vintimille), eût permis d'organiser le service dans des conditions acceptables, au point de vue du rendement kilométrique journalier des locomotives électriques et à vapeur. Par contre, nous ne disposons aux Arcs que d'un très petit dépôt, de sorte qu'il eût fallu engager des dépenses considérables pour créer de toutes pièces le dépôt de relais pour les locomotives à vapeur et les locomotives électriques : cette coûteuse installation fût devenue sans objet, le jour où une nouvelle étape d'électrification aurait conduit à reporter en un autre point l'échange des machines à vapeur et électriques.

Or, il se trouvait précisément qu'à 34 kilomètres de là, nous possédions à *Carnoules* un dépôt important, dont les moyens de remisage avaient été considérablement augmentés pendant la guerre, et qui pouvait par suite se prêter, sans grandes dépenses, à l'aménagement du dépôt de relais nécessaire à l'origine de la section électrifiée. En outre, une étude approfondie a permis de constater que, grâce à la position de ce dépôt à 101 kilomètres de Marseille et à 123 kilomètres de Nice, le service des locomotives à vapeur entre Marseille et Carnoules, et des locomotives électriques entre Carnoules et Nice, pourrait être organisé avec des rendements kilométriques bien supérieurs (tant pour les machines que pour les équipes de conduite) à ceux qu'on eût obtenus avec le relais des Arcs.

L'adoption de Carnoules comme point de relais présentait, il est vrai, deux inconvénients, d'une part l'obligation d'imposer un arrêt en ce point aux trains rapides (les express s'y arrêtent déjà), et d'autre part l'augmentation considérable des dépenses à engager en première étape, puisque la longueur de la section à électrifier s'élevait à 158 kilomètres.

Mais cette solution paraissait la seule qui permit d'éviter toute fausse dépense, et d'organiser le service de traction dans les conditions les plus avantageuses : aussi a-t-elle prévalu en définitive. En y joignant les 16 kilomètres de l'embranchement de Cannes à Grasse (à partir de la bifurcation de Cannes-la-Bocca), la première étape d'électrification des lignes du Littoral portera donc sur 174 kilomètres au total.

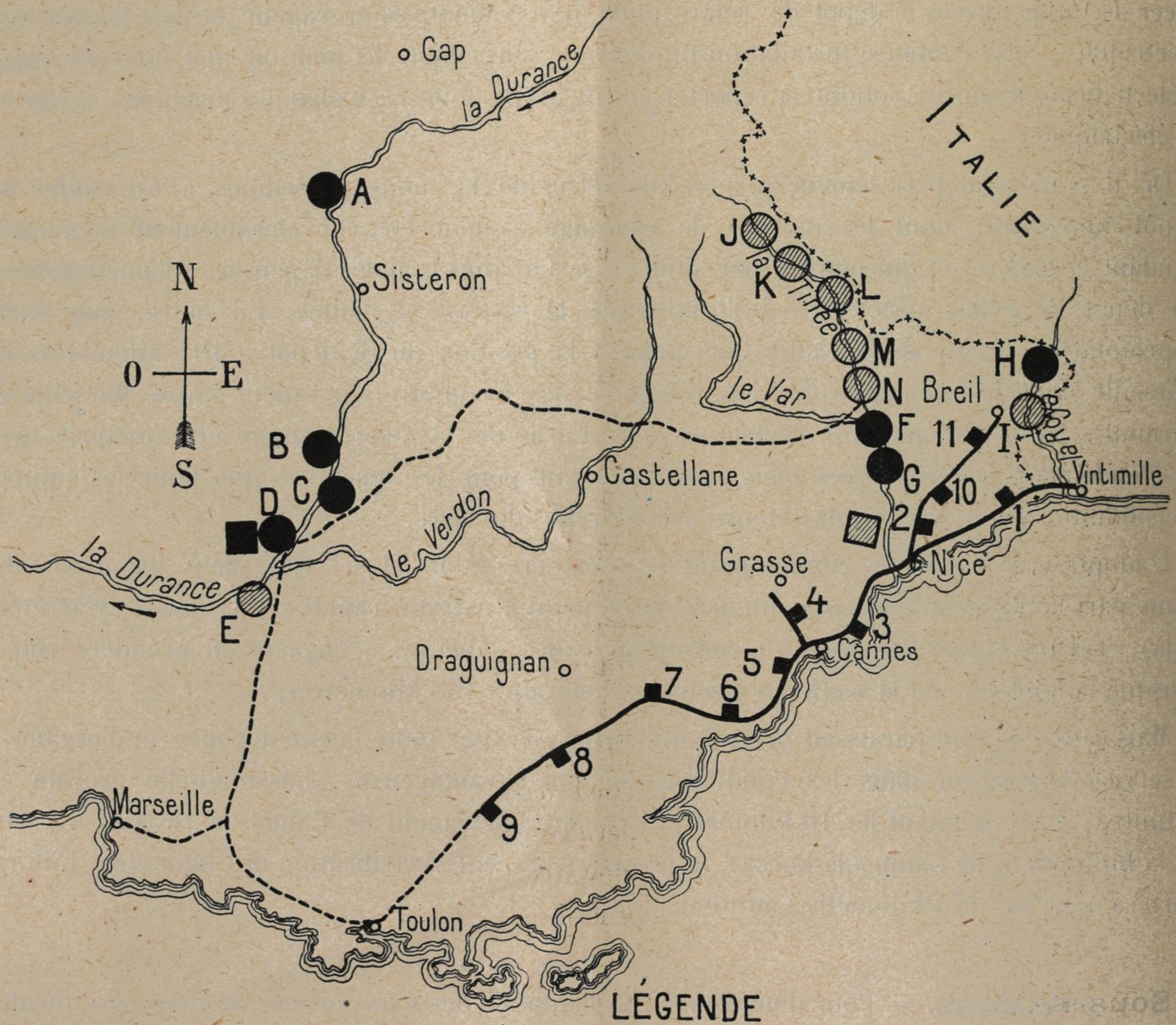
Sous-stations. — Pour déterminer l'implantation des *sous-stations* destinées à alimenter en courant continu à 1.500 volts les conducteurs de prise de courant des lignes de Carnoules à Vintimille et de Cannes à Grasse, on a dû tenir compte de l'électrification éventuelle de la section de *Nice à Breil*, sur la nouvelle ligne franco-italienne en construction entre Nice et Coni. Les chemins de fer italiens comptent utiliser au début la traction à vapeur sur la section de Breil à Coni, ainsi que sur la ligne de Breil à Vintimille, mais il est vraisemblable qu'ils seront amenés à les électrifier rapidement. De notre côté, nous aurons intérêt, pour faciliter le service, à électrifier la section de Nice à Breil, lorsque la ligne du Littoral aura été elle-même électrifiée, afin de supprimer complètement les locomotives à vapeur au dépôt de Nice.

L'une des sous-stations destinées à l'alimentation de la ligne du Littoral a été en conséquence prévue à Nice-St-Roch, afin de pouvoir la faire concourir ultérieurement à l'alimentation de la ligne de Nice à Breil : il eût d'ailleurs été difficile de trouver un autre emplacement à proximité de Nice.

Une sous-station sera installée sur l'embranchement de Cannes à Grasse, à faible distance de Cannes, pour alimenter aussi bien la ligne principale que l'embranchement.

Enfin, sept autres sous-stations seront réparties entre Carnoules et Menton, de sorte que le nombre total des sous-stations alimentant les lignes de Carnoules à Vintimille et de Cannes à Grasse, sera finalement de neuf (Voir Fig. 15).

Fig. 15. — ÉLECTRIFICATION DES LIGNES DE LA RÉGION DE NICE.



LÉGENDE

- Lignes P.L.M. de { Carnoules à Vintimille
Cannes à Grasse
Nice à Breil
- Sous-stations P.L.M. :

1. Menton	5. Mandelieu	9. Carnoules
2. Nice St Roch	6. St Raphaël	10. Peille
3. Antibes	7. le Muy	11. Sospel
4. Mouans-Sartoux	8. le Luc	
- Principales usines hydroélectriques de l'E.E.L.M. en fonctionnement
- ◐ id. projetées
- 1° sur la Durance :

A. Ventavon	2° sur le Var :	4° sur la Tinée :
B. la Brillanne	F. la Mescla	J. St Etienne de Tinée
C. le Larque	G. Plan du Var	K. la Cérizole
D. S ^{te} Tulle	3° sur la Roya :	L. la Sorbière
E. Mirabeau	H. Fontan	M. le Bancairon
	I. la Giandola	N. la Courbaisse
- Centrale thermique de S^{te} Tulle (en fonctionnement)
- ◐ Centrale thermique de Lingostière (projetée)
- Lignes de jonction à 120000 ou 150000 volts entre S^{te} Tulle, Marseille, Carnoules et la Tinée

Lorsque la ligne de Nice à Breil devra être électrifiée à son tour, on y construira deux nouvelles sous-stations, et on renforcera au besoin celle de Nice-St-Roch, s'il était constaté que la puissance des groupes installés dans cette dernière sous-station pour l'alimentation de la ligne du Littoral risque de devenir insuffisante.

Fourniture d'énergie. — Pour les raisons que nous avons déjà exposées à propos de l'électrification de la ligne de Culoz à Modane, la Compagnie P.L.M. a décidé de s'adresser à l'industrie privée pour la fourniture de l'énergie nécessaire à la traction électrique sur les lignes de Carnoules à Vintimille, de Cannes à Grasse, et éventuellement de Nice à Breil.

Nous avons donc été naturellement conduits à entrer en pourparlers dans ce but avec la Société *Energie Electrique du Littoral Méditerranéen* (E.E.L.M.), qui constitue la plus importante entreprise de production et de distribution d'électricité dans la région du Sud-Est.

Cette Société possède et exploite de nombreuses usines hydrauliques et thermiques qui représentent, au total, une puissance disponible d'environ 200.000 chevaux. Ces usines alimentent de vastes réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique s'étendant du Rhône à la frontière d'Italie, et desservant notamment les villes d'Arles, Aix, Marseille, Toulon, Cannes et Nice.

Les principales usines hydro électriques en exploitation sont échelonnées sur la *Durance* (Voir Fig. 15), à Ventavon, la Brillanne-Villeneuve, le Largue, et surtout Sainte-Tulle. D'autres sont situées sur la Roya, le Var, le Loup, la Siagne et l'Argens.

En outre, la Société E.E.L.M. va entreprendre l'aménagement progressif des *chutes de la Tinée*, au nord de Nice, avec d'importants réservoirs de régularisation constitués par les lacs de la haute région du Mont Ténibre, à des altitudes de 2.300 à 2.500 mètres : lorsque ce programme aura été complètement réalisé, l'ensemble des usines de la Tinée représentera une puissance de 100.000 chevaux.

Pour assurer la continuité de la production d'énergie pendant les périodes de grande sécheresse, la Société E.E.L.M. a construit dernièrement, près de son usine hydraulique de Ste-Tulle, une usine thermique de 60.000 kilowatts (avec extension prévue pour porter la puissance totale à 80.000 kilowatts), utilisant les lignites extraits d'un gisement voisin. De plus, et parallèlement à l'aménagement de la Tinée, la Société E.E.L.M. installera près de Nice une nouvelle usine thermique de 20.000 kilowatts extensible suivant les besoins.

En raison, d'une part, de la grande puissance des usines hydrauliques de la Société E.E.L.M., réparties dans des bassins différents, — d'autre part, de l'aménagement de grands réservoirs de régularisation pour celles de la Tinée, — enfin, de la présence d'importants secours thermiques, — on comprend aisément que cette Société peut assurer l'alimentation de nos lignes électrifiées avec des *garanties de sécurité* bien supérieures à celles qu'eût présentées la construction d'usines spécialisées à ce service. Il suffit, pour s'en rendre compte, de rapprocher des puissances indiquées plus haut la puissance nécessaire pour la traction électrique sur les lignes de Carnoules à Vintimille et de Cannes à Grasse : d'après nos évaluations, les pointes de puissance instantanées ne dépasseront pas 20.000 kilowatts ; quant à l'énergie nécessaire, elle paraît devoir être de l'ordre de 60 millions de kilowattheures par an, au début de l'électrification, alors que la production annuelle de la Société E.E.L.M. atteint, dès maintenant, près de 500 millions de kilowattheures, et que l'aménagement progressif des usines projetées sur la Tinée et sur la Durance (à Mirabeau) permettra de doubler cette production dans l'avenir.

Lignes à haute tension. — La Société E.E.L.M. possède actuellement un millier de kilomètres de lignes à 55.000 et 30.000 volts constituant deux réseaux à haute tension distincts ; le premier relie les usines de la Durance aux réseaux de distribution à 13.000 volts des régions de Marseille et d'Arles, tandis que le second relie les usines de la Siagne, du Loup et de la Roya aux réseaux de distribution à 10.000 volts des régions de Toulon (1) et de Nice. Enfin, les usines du Var alimentent directement le réseau à 10.000 volts de la région de Nice (2). Comme les réseaux à 55.000 et à 30.000 volts sont, d'autre part, reliés entre eux par un poste de transformation situé à Entraigues (dans la vallée de l'Argens), on voit que toutes les usines de la Société E.E.L.M. peuvent se prêter secours pour l'alimentation des réseaux de distribution.

Pour alimenter les sous-stations de traction de la Compagnie P.L.M., on a donc tout d'abord eu l'idée de les relier au réseau à 30.000 volts de la région de Nice, dans lequel on aurait déversé l'énergie qui devait provenir des usines de la Tinée. Mais, en dehors des lignes à haute tension desservant nos sous-stations, la Société E.E.L.M. aurait dû établir, de son côté, d'autres artères à haute tension destinées à parer à l'insuffisance de son réseau actuel pour le transport, jusqu'aux réseaux de distribution, de l'énergie provenant de la Tinée. Elle devait se préoccuper, d'autre part, d'assurer d'importants échanges d'énergie entre les usines de la Tinée et celles de la Durance, de façon à tirer le meilleur parti possible des réservoirs constitués par les lacs de la Tinée : l'utilisation de ces réserves pendant les périodes d'étiage de la Durance devra permettre de réduire (sinon même de supprimer) les appoints d'origine thermique prévus pour parer à ce déficit ; par contre, l'utilisation des hautes eaux de la Durance facilitera la reconstitution des réserves sur la Tinée.

La Compagnie P.-L.-M. et la Société E.E.L.M. ont donc reconnu, d'un commun accord, qu'il serait irrationnel de construire deux réseaux distincts pour répondre à leurs besoins respectifs, alors que des lignes communes pouvaient résoudre le problème d'ensemble, dans des conditions bien meilleures au point de vue de l'utilisation des lignes ; la construction d'un réseau unique permettra de réaliser, au bénéfice des deux parties, des économies considérables au double point de vue des dépenses d'installation et des frais d'exploitation.

Il a été décidé, en conséquence, de construire de toutes pièces un nouveau réseau à très haute tension (120.000 ou 150.000 volts), installé et exploité par la Société E.E.L.M., et jouant un triple rôle : — alimentation des sous-stations P.L.M., — amélioration des transports d'énergie entre les usines de la Société E.E.L.M. et ses réseaux de distribution, — échanges d'énergie entre les usines de la Durance et celles de la Tinée.

Toutes les artères de ce réseau seront constituées par des lignes doubles. Une première artère recueillera l'énergie des usines de la Tinée, pour aboutir à un poste situé près de Nice. Une seconde artère, partant de ce poste, desservira toutes les sous-stations de la Compagnie P. L. M., aménagées en poste de coupure sur la dite artère. Une troisième artère reliera la précédente à Ste-Tulle, et par suite à toutes les usines de la Durance. Enfin, une dernière artère formera

(1) La région Ouest de Toulon est, en outre, alimentée par une ligne à 55.000 volts du réseau à haute tension venant des usines de la Durance.

(2) La longueur totale des réseaux à 13.000 et à 10.000 volts atteint près de 1.400 kilomètres ; la Société E.E.L.M. possède, en outre, environ 400 kilomètres de lignes à basse tension.

jonction directe entre les usines de la Durance et celles de la Tinée. On constituera ainsi une *immense bouclé* de lignes à 120.000 ou 150.000 volts, pouvant transporter dans d'excellentes conditions l'énergie provenant de toutes les usines de la Société E. E. L. M., et donnant, en particulier, *les meilleures garanties de sécurité pour l'alimentation de nos sous-stations* (Voir Fig. 15).

Si l'on s'était borné à envisager la desserte des sous-stations de la section de Carnoules à Vintimille, on aurait pu réduire l'étendue de cette boucle à haute tension, en prolongeant directement sur Ste-Tulle l'artère Nice-Carnoules. Mais, d'une part, cette jonction eût été mal placée, le jour où l'électrification de la ligne du Littoral eût été poussée au delà de Carnoules jusqu'à Marseille, — et, d'autre part, une jonction Ste-Tulle-Marseille pouvait seule intéresser la Société E. E. L. M. au point de vue de l'alimentation de ses réseaux de distribution. Aussi l'accord s'est-il facilement établi sur ce dernier tracé, à des conditions financièrement avantageuses pour les deux parties.

La solution adoptée par la Compagnie P.L.M., pour l'alimentation des sous-stations de sa ligne du Littoral, représente donc un nouveau pas en avant dans la voie de la *coopération avec l'industrie privée pour l'électrification des chemins de fer*, puisque la Compagnie P.L.M. a non seulement laissé à l'industrie privée le soin de *produire l'énergie*, comme elle l'avait déjà fait pour la ligne de Culoz à Modane, mais lui en a encore *confié le transport* jusqu'à ses sous-stations de traction. Il n'est pas douteux que les deux parties, chemin de fer et industrie, doivent trouver dans cette coopération les plus grands avantages.