

TRACTION ÉLECTRIQUE

PAR COURANT ALTERNATIF MONOPHASÉ

TRANSFORMÉ SUR LA LOCOMOTIVE EN COURANT CONTINU



A l'occasion de l'article publié sous ce titre par M. Auvert dans le N^o d'Octobre 1905, le Comité de Rédaction de la *Revue Générale* a reçu une note de M. de Koromzay, ingénieur de la Maison Ganz à Budapest, présentant quelques observations sur les avis émis par M. Auvert. Le Comité a jugé qu'il convenait pour terminer la discussion, de publier en même temps que la note de M. de Koromzay, une courte réponse de M. Auvert.

A. — NOTE DE M. DE KOROMZAY,

INGÉNIEUR DE LA MAISON GANZ A BUDAPEST.

M. Auvert a publié dans le N^o d'Octobre 1905 de la *Revue Générale*, une note intéressante sur le nouveau système de traction électrique, étudié par lui et cette note contenait les données des essais de laboratoire, faits au printemps dernier à Paris.

La question de la traction électrique des chemins de fer, en raison du grand intérêt qu'elle présente occupe depuis une dizaine d'années les électriciens du monde entier, aussi toute tentative nouvelle dans cette branche doit-elle être appréciée et reconnue, mais en même temps soumise à une critique rigoureuse, afin que la pratique puisse profiter des résultats obtenus. C'est pour cette raison que nous nous permettons quelques réflexions sur l'article de M. Auvert, en espérant qu'elles aideront peut-être à éclaircir le problème.

Dans tout ce qui suit, nous considérons exclusivement la traction comme appliquée aux grandes lignes de chemins de fer, desservies actuellement par des locomotives à vapeur, et nous laissons entièrement de côté son application aux tramways, qui a reçu sa solution parfaite dans le système à courant continu.

Dans son article, M. Auvert commence par une critique générale de cinq systèmes existants, appliqués ou essayés sur différents chemins de fer, et conclut qu'aucun d'eux ne saurait répondre aux exigences d'un trafic lourd à cause des défauts inhérents aux divers systèmes, et par conséquent il reconnaît la nécessité d'éliminer les inconvénients de l'un d'eux et d'élaborer un nouveau système.

Je suis parfaitement d'accord avec l'auteur en ce qui concerne sa critique du système à courant continu, soit à troisième rail, soit à un ou deux conducteurs aériens, et je conclus avec lui que ce n'est pas le système appelé à résoudre le problème. Je ne le suis pas cependant, en ce qui

concerne le système triphasé à haute tension, appliqué sur la ligne de la Valteline en Italie avec plein succès, où il se trouve en service régulier depuis plus de trois ans, dans des conditions très difficiles (1).

L'auteur concède l'avantage de l'application de la haute tension au système, mais il lui objecte la nécessité d'établir le long de la ligne de nombreux postes de transformateurs statiques pour maintenir à un taux convenable la tension sur les fils de prise de courant.

Suivant mon avis, si c'était un désavantage, il le serait pour tout autre système aussi, car l'énergie électrique sera dans la plupart des cas produite sous une tension plus élevée que celle de la ligne de contact. Une transformation par des transformateurs statiques sera donc nécessaire partout, car il convient de ne pas multiplier les difficultés de l'isolement de la ligne de contact et surtout des appareils de prise de courant des locomotives, en acceptant une tension exagérée dans la ligne. La tension de 15.000 volts, prévue par l'auteur, ne serait pas suffisante pour desservir la ligne de la Valteline par exemple, où la tension triphasée primaire est de 20.000 volts. En supposant les mêmes conditions, il y faudrait 34.000 volts monophasés. Et encore, sur des lignes plus longues et à trafic plus intense, il faudrait élever cette tension à 40, 50.000 volts. Je ne crois pas que pratiquement les constructeurs admettent cette tension dans le véhicule moteur. Reste donc à considérer le nombre des sous-stations nécessaires.

La tension de 3000 volts du système triphasé a été déterminée au point de vue de la prise de courant sous des conditions données, et non pas pour restreindre le nombre des sous-stations. En effet, sur les grandes lignes européennes, la puissance des locomotives nécessaire dépasse rarement 1500-1600 chevaux et jamais 2000 chevaux. Or, pour produire une pareille puissance sur une locomotive électrique triphasée à 3000 volts, il faudrait approximativement 300 ampères, à peu près la limite supérieure de l'intensité qui puisse être prise par un appareil. Donc, 3000 volts triphasés suffisent pour le trafic le plus lourd à ce point de vue ; il n'est donc pas nécessaire d'appliquer une tension plus élevée et d'augmenter en conséquence le poids des moteurs et les difficultés d'isolement, pour réduire le nombre des sous-stations. — La question de la chute de tension dans la ligne de contact est tout à fait secondaire et n'intervient pas dans le choix de la tension. La chute de cette dernière peut être très facilement tenue entre des limites convenables par le sectionnage des fils de contact et par la distribution des sous-stations. La simplicité de ces sous-stations et la facilité, avec laquelle se fait la distribution de courant à l'aide de celles-ci, est plutôt un avantage qu'un inconvénient du système.

Au point de vue de la légèreté des véhicules-moteurs, c'est un avantage absolu. Car, au lieu de placer la sous-station transformatrice sur la locomotive, et d'en augmenter inutilement le poids, comme on le fait pour les systèmes monophasés, on distribue ces sous-stations convenablement le long de la ligne. D'ailleurs, nous venons de voir que, malgré cette transformation sur la locomotive, le système monophasé a également besoin de sous-stations, qui sont peut-être moins nombreuses, ce qui cependant, exige une tension secondaire plus élevée, et par conséquent, cause de plus grandes difficultés dans l'isolement et une mauvaise utilisation du matériel dans la construction des moteurs.

En ce qui concerne la diminution du couple des moteurs d'induction avec la chute de tension, cela n'est pas dangereux, même pas désavantageux dans la pratique. Le service ininterrompu de plus de trois ans sur la Valteline en est la meilleure preuve. Il n'y avait pas un seul cas où un train ne démarrerait pas à cause de la baisse du voltage, quoique l'installation du transport de

(1) Voir *Revue Générale* Nos de Janvier 1903, page 63, Mars 1905, page 180, Juin 1905, page 444.

l'énergie n'était pas construite au préalable pour les nouvelles locomotives de 1600 chevaux. Les trains démarrent avec facilité sous une tension de 2200-2300 volts. La cause en est que les moteurs, comme tout moteur de traction doit le faire, supportent très facilement des surcharges de 4-5 fois leur charge normale. Si l'on parle donc d'une diminution du couple, c'est évidemment le couple maximum qu'il faut entendre. Or, puisque celui-ci dépasse 4-5 fois le couple normal, les moteurs démarrent très bien, même à un voltage réduit. Ordinairement ce n'est pas la baisse du voltage, mais bien le poids d'adhérence qui limite le couple-effort de la locomotive.

L'auteur reproche ensuite au système triphasé la constance de la vitesse des moteurs asynchrones. Cette constance de la vitesse — si souvent reprochée au système — doit être considérée par rapport au service et par rapport à la station centrale.

Au point de vue du service, une vitesse constante qui ne dépend ni du poids du train, ni des déclivités de la voie, ni du voltage de la ligne, est un avantage absolu, car elle facilite énormément le maintien de l'horaire. Tous les retards désagréables causés par les circonstances mentionnées, sont automatiquement éliminés. Le réglage de la vitesse est facilité par le couplage des moteurs en cascade. L'état actuel du système permet aujourd'hui d'atteindre avec deux moteurs à haute tension, à nombre de pôles différent, trois vitesses économiques. Avec trois moteurs, dont deux à basse tension, on obtient quatre vitesses économiques. Les anciennes locomotives de la Valteline sont construites pour deux vitesses. On peut donc obtenir la même souplesse avec ces locomotives qu'avec les locomotives à courant continu, tout en maintenant l'avantage de la constance de la vitesse pendant le parcours. On dit qu'avec des locomotives triphasées il est impossible de rattraper le temps perdu. Comme nous venons de le voir, le système même élimine une des causes principales des retards. Reste à récupérer le temps des retards accidentels, ce qui se fait très simplement par la variation du couplage et de l'insertion des moteurs. Ainsi, sur le train N° 47, du 22 Octobre 1904, on a pu constater un gain de 9 minutes sur 35 (à peu près 39 %) pendant le parcours de Bellano à Lecco.

A propos de la constance de la vitesse par rapport à la station centrale, on entend souvent l'objection que celle-ci souffre beaucoup et travaille avec une mauvaise économie, à cause des à-coups de la charge, provenant de cette constance. Or, le service de la Valteline ne justifie pas cette crainte. Le rapport entre charge maxima et moyenne de la station centrale à Morbegno ne dépasse pas la valeur de 1.7-1.8, avec 5-6 trains en route simultanément, ce qui n'est vraiment pas exagéré. La cause tient à la constance de la vitesse, car les moteurs, travaillant avec un glissement de 2-2 1/2 %, cessent aussitôt de consommer de l'énergie, si les machines de la station centrale ralentissent leurs vitesses de cette valeur, par suite d'une demande soudaine d'énergie. Et si le ralentissement dans la station centrale est plus grand encore, les moteurs des trains en pleine vitesse se trouvent mis soudainement en hyper-synchronisme et restituent de l'énergie à la ligne, déchargeant ainsi la station centrale. On voit que les trains en marche constituent un volant puissant en connexion électrique avec la station centrale, aidant celle-ci aux moments des surcharges considérables.

L'auteur dit ensuite que les moteurs triphasés démarrent d'une façon pénible et avec une grande perte d'énergie. La première des objections concerne le service, la seconde l'économie.

Si l'auteur eût été une seule fois sur un train démarrant sur la Valteline, il n'affirmerait plus que ce démarrage est pénible. Au contraire, aucun réglage du démarrage n'est aussi doux, aussi parfait que celui avec des rhéostats à liquide, car ceux-ci, diminuant continuellement, ne produisent aucune variation brusque dans le couple des moteurs, comme c'est le cas pour tous

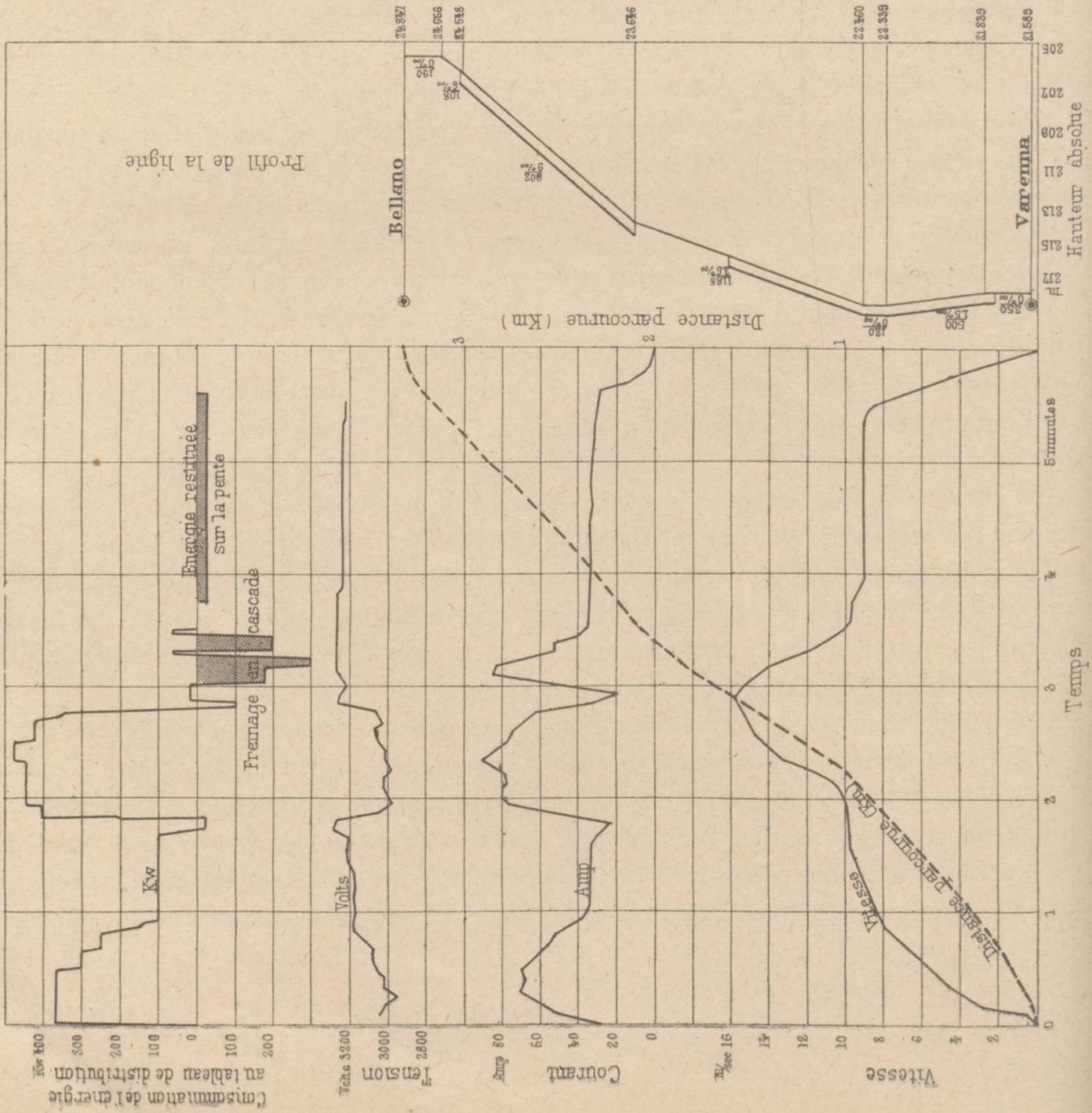
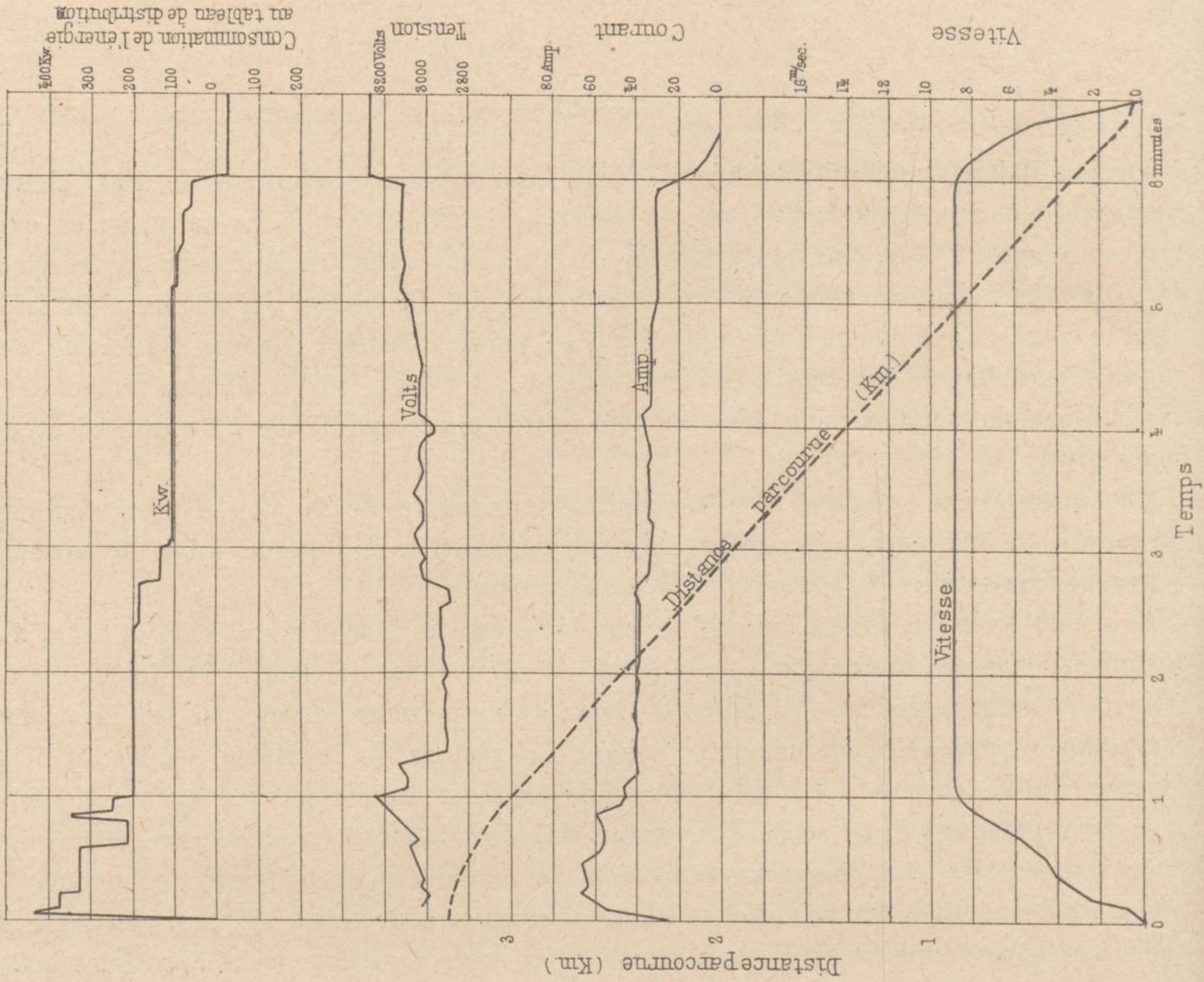


Fig. 1.

les contrôleurs qui font diminuer graduellement les résistances de démarrage. Les rhéostats à liquide du système triphasé maintiennent le courant et par suite le couple-moteur automatiquement constant pendant toute la durée du démarrage. Ce réglage excellent, en plus de l'absence de destruction et de la grande capacité calorifique qu'ils possèdent, fait que les rhéostats à liquide sont tout indiqués pour la traction.

Revenons sur la question de la mauvaise économie. Il est d'usage d'exprimer la consommation en énergie des trains électriques en watt-heures par tonnes kilométriques. Ce chiffre doit comprendre l'énergie nécessaire à l'accélération, à la propulsion et à l'élévation des trains sur les déclivités, ainsi que toutes les pertes depuis la station centrale jusqu'à la jante des roues. Donc, pour pouvoir juger de l'économie d'un système, il nous faut connaître le profil de la ligne, l'écartement des stations, et la vitesse des trains. Or, pour déterminer cette consommation spécifique, on procéda sur la ligne Lecco-Belano et retour, à une série d'essais, le 20 Avril 1904. Il est à remarquer que cette ligne, qui a presque 25 kilomètres de longueur, contient 6 stations, des rampes atteignant 10 ‰, des courbes de 300 mètres et de nombreux tunnels. La vitesse maxima était de 64 kilomètres à l'heure. Le parcours Varenna-Bellano et retour est représenté sur la Fig. 1. On y voit toutes les données caractéristiques de la marche.

- Les résultats de ces essais sont contenus dans le tableau suivant :

CONSOMMATION EN ÉNERGIE D'UN TRAIN DE 116 TONNES.

STATION	DISTANCE EN KILOMÈTRES		NOMBRE des TONNES- KILOMÉTRIQUES.	KILOWATTS-SECONDES aux bornes du Tableau de Distribution.	
	entre deux stations voisines.	de Lecco.		Consommés. +	Récupérés. -
Lecco.....		— 0,020			
Abbadia.....	7,008	6,988	812	124.800	2.800
Mandello.....	2,453	9,441	285	52.200	3.100
Lierna.....	5,680	15,121	659	94.500	1.670
Varenna.....	6,468	21,589	750	79.600	6.210
Bellano.....	3,261	24,850	377	47.000	8.480
Bellano.....			—	—	—
Varenna.....			377	58.300	—
Lierna.....			750	90.500	3.100
Mandello.....			659	74.500	4.020
Abbadia.....			285	43.600	3.620
Lecco.....			812	99.300	4.760
		Somme....	5.766	764.300	37.660

Consommé par tonne kilométrique $\frac{764.300}{3,6 \times 5.766} = 36,7$ Watts-heure.

Récupéré par tonne kilométrique $\frac{37.760}{3,6 \times 5.766} = 1,8$ » »

Consommation effective par tonne kilométrique :

34,9 Watts-heure.

D'après ces résultats, la consommation spécifique monte, aux bornes de la station centrale, à 34,9 watts-heures par tonne kilométrique, chiffre qui réfute lui-même toute objection contre la mauvaise économie du système. Pendant ces essais, qui avaient lieu durant la nuit, on déterminait la consommation pour la traction seule. D'après les données relevées à Lecco pendant le service de 1904, la consommation globale montait sur la Valteline à 44,5 watts-heures par tonne kilométrique, mesurée dans la station centrale. Dans cette valeur, cependant, est comprise — outre les pertes dans la transmission — toute l'énergie pour l'éclairage des trains et des gares, pour les manœuvres dans les gares, pour la marche de l'usine de réparation à Lecco, et enfin pour tous les essais de traction.

En face de ces données, obtenues dans la pratique, le reproche de la mauvaise économie du système triphasé, suivant notre avis, n'est pas motivé.

Le seul désavantage du système triphasé est la nécessité d'une double ligne de contact. C'est un désavantage incontestable en face des autres systèmes à fil unique. Mais une bonne construction peut surmonter les difficultés, comme le démontre l'exemple de la Valteline.

Dans la suite de sa critique, l'auteur arrive au système monophasé, dont les moteurs sont directement alimentés par du courant monophasé. Depuis 2-3 ans, on observe une tentative générale de construire de bons moteurs monophasés, qui pourraient conquérir le vaste champ de la traction électrique. On est arrivé à construire de bons moteurs jusqu'à 30-50 chevaux ; ceux-ci occuperont à notre avis, bientôt la traction légère à des distances plus grandes, entre des villes voisines, etc., dont le trafic consiste en unités légères et fréquentes. Mais dès qu'il s'agit de la traction de trains lourds, les qualités des moteurs monophasés, le plus grand poids, la mauvaise utilisation du poids adhérent, la plus grande consommation en énergie, le prix élevé des moteurs, etc., etc., diminuent considérablement les chances de ce système. M. Auvert a très clairement démontré par des comparaisons convaincantes que les lourdes locomotives de ce système ne sauraient entrer en concurrence avec des locomotives à courant continu par exemple. Je partage entièrement l'opinion de M. Auvert en ce qui concerne sa critique de ce système.

Il passe ensuite au procédé de la Maison Oerlikon, qui transforme le courant monophasé sur la locomotive en courant continu.

Dans ce dernier système, l'auteur critique, en dehors du grand poids du moteur générateur, surtout son encombrement, tout en approuvant le principe de la transformation de l'énergie sur le véhicule-moteur. A notre avis, la construction d'une puissante locomotive électrique ne permet même pas de charger cette locomotive d'un transformateur statique, car il faut garder la charge admissible par essieu entièrement pour le matériel actif-moteurs, et pour l'installation électrique indispensable. Aussitôt que nous y ajoutons des poids additionnels sous forme de transformateurs statiques ou rotatifs, ou tous les deux, on diminue le poids actif ou la puissance de la locomotive, ou on est conduit à augmenter le nombre des essieux, car la superstructure des chemins de fer limite la charge par essieu.

Il est évident qu'une locomotive électrique qui porte, outre ses moteurs, une station transformatrice complète, doit avoir un poids considérablement plus grand qu'une locomotive de pareille puissance, dont les moteurs sont directement alimentés par du courant de la ligne.

Cela posé, j'arrive au système de traction de M. Auvert, dont il publie une description détaillée.

La construction de son redresseur-régulateur est très intéressante et pourrait rendre de bons services dans certaines installations de transport de force.

Les essais dont il publie les résultats semblent justifier le bon fonctionnement de l'appareil, et si la commutation de l'appareil se fait sans étincelles pendant toute la course des balais mobiles, l'auteur a réussi à construire un bon appareil pour la transformation de l'énergie. J'accepte entièrement les résultats publiés des essais et je ne m'occupe pas de la construction de l'appareil.

Je me borne à critiquer l'adoption de celui-ci pour la traction.

Les motifs qui ont déterminé l'auteur à étudier ce nouveau système, sont, d'après sa critique des systèmes existants, les suivants :

- 1° La possibilité de garder le moteur-série à courant continu pour le service des grandes lignes ;
- 2° De pouvoir régler le démarrage des trains par la variation de la tension, et sans résistance additionnelle.
- 3° Ligne de contact à fil unique ;
- 4° Récupération électrique de l'énergie potentielle des trains.

Avant d'entrer dans l'analyse de ces motifs, voyons quels sont les sacrifices nécessaires quant au poids des locomotives de ce système.

Établissons, d'après les données de M. Auvert, le poids complet d'une locomotive électrique, équipée suivant son système, en admettant les poids réduits du redresseur-régulateur, cité par l'auteur comme pouvant être atteint certainement dans la pratique.

Poids du redresseur-régulateur de 400 kwatts, complet, avec moteur synchrone et accessoires	7,7 tonnes.
Un transformateur monophasé à 25 périodes de 400 kw. pour réduire la tension primaire au minimum 17,5 kg. par kwatt.....	7,0 »
2 moteurs à courant continu du type « Union » à 243 chevaux chacun, 370 tours par minute, inclusivement l'engrenage d'un rapport de transmission de 1 : 4,1, pour des roues de 1.000 mm. de diamètre à 4,0 tonnes, suivant une publication : « Die Bahnmotoren für Gleichstrom » de MM. A. Müller et W. Mattersdorf, Berlin, 1903, page 401.....	8,0 »
Appareillage électrique complet, sans résistances	2,50 »
Partie mécanique d'une locomotive à 2 essieux, pouvant exercer 500 chevaux et pouvant supporter l'équipement électrique de 25 tonnes au minimum.....	13,0 »
Total.....	38,2 tonnes.

soit par essieu 19 tonnes. Or, aucun chemin de fer en Europe n'admet une telle charge par essieu, car la superstructure de la voie, les ponts, etc., ne supportent pas de telles charges. On est donc forcé de multiplier les essieux. Il serait possible de garder l'équipement de deux moteurs et d'ajouter deux essieux-porteurs à la locomotive, mais cette solution a le désavantage de n'utiliser qu'une partie du poids pour l'adhérence. Un constructeur en pratique, diviserait cette puissance entre 4 moteurs et adopterait une locomotive à 4 essieux moteurs. Voyons quel poids il en résulte :

Redresseur-régulateur comme avant.....	7,7 tonnes.
Transformateur comme avant.....	7,0 »

4 moteurs à courant continu type 78 de la Compagnie Westinghouse à 565 tours par minute, avec engrenage de 16/68 d'une puissance normale de 100 chevaux chacun, à 2,08.....	8,32	»
Appareillage électrique.....	2,50	»
Partie mécanique d'une locomotive à 4 essieux, diamètre des roues de 1.000 mm. pouvant supporter l'équipement électrique de 25 tonnes.....	18,0	»
<hr/>		
Total.....	43,52	tonnes.

ou approximativement 44 tonnes.

Comparons à ce résultat le poids d'une locomotive électrique triphasée d'une même puissance.

A première vue il est clair qu'une telle locomotive peut être construite à deux essieux-moteurs.

Nous pouvons même admettre des moteurs à nombre de tours beaucoup moindre qui actionnent les essieux soit directement, soit par l'intermédiaire des bielles et des manivelles, comme c'était décrit dans la publication sur les nouvelles locomotives électriques de la Valteline (*Revue Générale*, N° de mars 1905). Admettons une solution semblable, avec un seul moteur double, capable d'exercer 400/500 chevaux à deux vitesses économiques, logé dans le châssis de la locomotive, et actionnant les deux essieux par l'intermédiaire d'une manivelle, et des bielles.

Poids d'un moteur triphasé double à 400/500 chevaux, 3.000 volts, 15 périodes, approximativement.....	9,0	tonnes.
Appareillage électrique avec résistances.....	3,0	»
Partie mécanique d'une locomotive électrique à deux essieux, pouvant exercer 500 chevaux, construite pour supporter un équipement électrique de 12 tonnes....	10,5	»
<hr/>		
Total.....	22,5	tonnes.

ou approximativement la moitié de la locomotive du système Auvert.

Cette comparaison devient encore plus favorable pour le système triphasé, si nous considérons une locomotive mue par des moteurs à grande vitesse, par l'intermédiaire d'engrenages, comme nous l'avons calculé dans l'autre cas. Ainsi, la Maison Ganz a projeté une locomotive triphasée à deux essieux, pour deux vitesses différentes à 3.000 volts, 42 périodes, pouvant exercer 4.000 kg. de force tractive à la jante des roues à 30 km. de vitesse, ce qui correspond à une puissance effective de 435 chevaux. Or, cette locomotive ne pesait plus que 20 tonnes. On voit donc qu'une locomotive du système Auvert de 4-500 chevaux est déjà deux fois plus lourde qu'une autre du système triphasé, à égalité de puissance. Une locomotive de 1.600 chevaux (à peu près la capacité des nouvelles locomotives de la Valteline, qui pèsent 62 tonnes) serait presque impossible à construire d'après le système Auvert.

Mais ce n'est pas le seul désavantage de ce système. Au point de vue du maintien de l'équipement électrique il serait très désagréable d'avoir doublé dans le cas de 4 moteurs le nombre des collecteurs. On sait que le collecteur est la partie la plus délicate d'un moteur à courant continu ou monophasé qui demande le plus de réparations et occasionne de fréquentes avaries. Si nous multiplions le nombre des collecteurs par ceux du redresseur-régulateur, nous n'élevons certainement pas la sécurité du service.

La traction électrique exige des machines, des appareils et des moteurs qui supportent très facilement des surcharges temporaires de 4-5 fois leur capacité normale. Les moteurs de la locomotive Auvert satisfont à cette condition, mais avec le redresseur-régulateur il serait très difficile de commuter sans étincelles considérables une puissance de 800-1000 kilowatts, même pour des courtes durées. Il est dommage que les essais de laboratoire n'aient pas été poursuivis dans cette voie.

Un défaut du système consiste encore dans la mauvaise économie des tracteurs, bien que M. Auvert l'estime assez bonne. Suivant ses données le rendement du transformateur statique sera de 0,94, du redresseur-régulateur 0,88 et des moteurs 0,90. Le rendement total de la locomotive, du fil de contact jusqu'à la jante sera donc 0,745 en pleine charge. Supposant que la locomotive exerce 400 chevaux, elle en consomme 536. Ces 136 chevaux sont transformés en chaleur dans la locomotive même. Or, je crois que l'échauffement de l'installation électrique serait excessif, même si cette charge ne dure pas longtemps, malgré une ventilation excellente. Une locomotive triphasée travaille avec un rendement de 0,90. Pour comparer le rendement des systèmes, et non pas des locomotives seules, prenons la valeur du rendement global du système Auvert, compté de la station centrale jusqu'à la jante des roues, qui est, de 0,69. Par contre, le rendement du système triphasé sur la Valteline, déterminé au cours des essais le 20 avril 1904, atteint 87 %.

Après ce qui précède, nous croyons pouvoir affirmer que le premier des 4 motifs énumérés plus haut, c'est-à-dire l'application des moteurs à courant continu pour la lourde traction en présence d'un tel prix n'est pas justifié.

Le second motif, le réglage du démarrage sans résistance additionnelle est entièrement une question d'économie. Or, nous venons de voir que le système triphasé travaille beaucoup plus économiquement dans la pratique que ne permettaient de l'espérer, avec le système Auvert, les meilleurs résultats des essais de laboratoire.

La ligne de contact à fil unique est certainement un avantage de ce système sur celui à courants triphasés; mais cet avantage est partagé par tout autre système monophasé.

Pour terminer nos réflexions, nous traiterons la question de la récupération de l'énergie électrique.

M. Auvert a très clairement reconnu la grande importance de la restitution de l'énergie, pour laquelle, suivant lui, son système se prête avec facilité. Le redresseur-régulateur est un appareil entièrement réversible, et si on l'alimente par du courant continu, on peut recueillir du courant monophasé à l'autre côté. C'est absolument exact. Plus difficile sera cependant la production du courant continu. On sait que les moteurs excités en série ne sont pas réversibles sans changement de la polarité des aimants. M. Auvert prévoit donc une excitation séparée, produite par une batterie d'accumulateurs sans doute, mais alors il sacrifie les moteurs-série à la récupération. Il est donc difficile de satisfaire en même temps au premier et au dernier des 4 points énumérés, car avec des moteurs excités en série la récupération est impossible.

Par contre, avec le système triphasé la récupération a lieu tout à fait automatiquement, aussitôt que la locomotive atteint une vitesse de 2-3 % plus grande que celle du synchronisme. Et alors elle maintient cette vitesse, quelle que soit la pente. Ces moteurs travaillent comme générateurs et restituent de l'énergie à la ligne. Le même fait se produit pendant le freinage, si nous appliquons le couplage en cascade. Au moment où les moteurs d'un train sont connectés en cascade, ils retournent l'énergie vive correspondant à la différence des deux vitesses à la ligne, abstraction faite des pertes dans les moteurs et dans les rhéostats.

Sur la Fig. 1 on voit cette récupération, bien que ce diagramme soit relevé dans la station centrale, et que toutes les pertes de la ligne y soient comprises. Le rapport entre l'énergie perdue dans les rhéostats et l'énergie restituée pendant le freinage, ou bien entre l'énergie nécessaire à l'accélération pendant le démarrage, décroît encore considérablement, si nous adoptons le couplage en double cascade avec 3 moteurs. Si nous choisissons convenablement le nombre des pôles des 3 moteurs, nous pouvons obtenir 4 vitesses économiques. Cette solution conviendrait pour des lignes comportant des stations peu éloignées, telles que les Métropolitains des grandes villes. Des calculs faits au cours de l'élaboration d'un pareil projet démontrent que l'énergie récupérée pendant le freinage et sur les pentes dépasse de 80 - 100 % celle dissipée dans les rhéostats pendant les démarrages. Il est donc clair que la récupération vaut mieux que toute élimination des pertes de démarrage.

Pour démontrer par un exemple la grande importance de la récupération, voici les résultats d'une mesure faite sur la Valteline au cours des essais du 21 avril 1904.

Un train de 113,6 tonnes, remorqué par une voiture automotrice parcourait la ligne montant vers Chiavenna, sur une longueur de 5,45 km. La différence de hauteur entre les deux extrémités de la course était 101,45 m. La rampe moyenne était donc $\frac{101,45}{5450} = 18,6 \text{ ‰}$. La rampe maxima était de 20 ‰. Le train passait cette ligne sans démarrage et freinage avec moteurs couplés en cascade. La vitesse était en montant de 31 km., en descendant 33 km.-heure. La voiture motrice était munie d'un compteur Thomson, étalonné avant l'essai. Le compteur indiquait une consommation en montant de..... 43.740 watts-heures. et une récupération pendant la descente de 18.000 » »

La différence de 25.740 watts-heures est donc la consommation nette pour $2 \times 5,45 \text{ km.} \times 113,6 \text{ ton.} = 1.240$ tonnes kilométriques.

Soit donc par tonne kilométrique $\frac{25.740}{1.240} = 20,7$ watts-heures.

Un autre système, travaillant sans récupération, avec des trains freinés mécaniquement sur la pente, aurait une consommation spécifique de $\frac{43.740}{1.240} = 35,2$ watts-heures, mêmes conditions supposées, ou approximativement 70 % de plus. Je crois donc pouvoir affirmer que le système triphasé est dans l'état actuel de la traction électrique le seul système appelé à satisfaire aux exigences de la traction des trains lourds.

B. — NOTE DE M. AUVERT

En exposant dans le Numéro d'Octobre 1905 de la *Revue Générale* les essais du Redresseur-Régulateur que j'ai étudié avec M. Ferrand, pour la traction électrique par courant alternatif monophasé, transformé sur la locomotive en courant continu, j'avais dû rappeler sommairement les inconvénients reprochés aux autres systèmes de traction électrique, ce qui expliquait nos recherches.

Les critiques formulées plus haut par M. de Koromzay, Ingénieur à Budapest, contre le système de traction que j'avais présenté et la défense qu'il prend du système de traction par

courants triphasés m'amènent à entrer dans quelques détails complémentaires pour faire ressortir les avantages de notre système par rapport au système triphasé.

M. de Koromzay s'attache à démontrer :

1^o Que la plupart de mes assertions concernant les imperfections du système triphasé sont erronées.

2^o Que le système triphasé a un rendement excellent qu'il évalue à 87 %, très supérieur par conséquent au rendement de 69 % que j'avais indiqué comme étant celui du système à redresseur-régulateur.

3^o Qu'il serait difficile, sinon impossible, de construire de puissantes locomotives du nouveau système, à cause du poids excessif auquel on serait conduit, de la quantité exagérée de chaleur qui serait produite sur la locomotive en raison des pertes diverses résultant du mauvais rendement de l'ensemble, etc., etc.

4^o Que le système triphasé est en définitive le seul qui puisse être avantageusement appliqué à la traction des trains lourds.

Je vais examiner successivement et séparément ces diverses questions :

I.

Principaux inconvénients du système de traction par courants triphasés.

Nécessité d'avoir un grand nombre de postes de transformateurs. — Le système de traction par courants triphasés nécessite l'établissement de nombreux postes de transformateurs statiques parce que la tension dans les fils de prise de courant doit être maintenue aussi constante que possible si on veut avoir un bon fonctionnement des moteurs d'induction montés sur les essieux des locomotives, et que, d'autre part, il est impossible (du moins dans le système triphasé tel qu'il est appliqué par la Société Ganz sur le chemin de fer de la Valteline) de dépasser dans les fils de prise de courant, une tension relativement basse, 3000 volts environ.

Comme le dit fort bien M. de Koromzay, une tension notablement plus élevée donnerait lieu à des difficultés d'isolement très sérieuses pour les appareils aériens de changements et de croisements, pour les appareils de prise de courant et enfin, pour les moteurs eux-mêmes.

Il y a lieu de remarquer toutefois, que ces difficultés d'isolement sont spéciales au système triphasé et qu'elles disparaissent complètement avec les systèmes monophasés.

Dans ces derniers systèmes en effet, la ligne de contact étant unique, n'est pas plus difficile à isoler, même au droit des croisements et changements, qu'une ligne aérienne ordinaire servant au transport de l'énergie et d'autre part, l'appareil de prise de courant est constitué par un simple archet, dont la base peut être isolée avec la plus grande facilité au moyen d'isolateurs ordinaires en porcelaine.

En ce qui concerne les moteurs, les systèmes monophasés ne présentent aucune difficulté d'isolement, puisque la haute tension du fil aérien est réduite sur la locomotive au moyen de transformateurs statiques.

M. de Koromzay est d'avis que la nécessité de maintenir dans des limites très étroites la tension sur les lignes de contact est un inconvénient tout à fait secondaire, parce que la chute de tension peut être rendue aussi faible que possible en sectionnant les fils de contact et en distribuant convenablement les sous-stations.

Il est bien évident qu'on peut réduire autant qu'on le veut la chute de tension en augmentant suffisamment le nombre des sous-stations, mais bien qu'elles ne contiennent pas d'appareils tournants, les sous-stations sont des installations coûteuses et leur multiplication à outrance paraît fâcheuse, d'autant plus qu'ainsi que nous le verrons plus loin, elle contribue à diminuer très sensiblement le rendement.

Nécessité d'employer une double ligne aérienne de fils de prise de courant. — Le système de traction par courants triphasés nécessite l'emploi d'une double ligne aérienne de contact, ce qui complique considérablement les appareils de changement, et de croisements et les rend d'ailleurs incapables, comme le reconnaît lui-même M. de Koromzay, de supporter une tension élevée.

Mais sans revenir sur ce dernier inconvénient, qui est cependant très sérieux, il est évident que l'établissement du réseau aérien de prise de courant dans les gares, devient difficile et compliqué dès que le nombre des aiguilles est tant soit peu élevé.

L'exemple du chemin de fer de la Valteline, montre qu'une petite ligne où les gares sont peu développées peut, à la rigueur, s'accommoder d'un double réseau de fils aériens, mais son examen suffit pour faire comprendre que la complication du réseau aérien deviendrait invraisemblable dans une grande gare.

Constance de la vitesse. — La vitesse de rotation des moteurs d'induction triphasés est pratiquement déterminée par le nombre d'alternances par seconde, des courants triphasés qui les alimentent et elle est, à 2 % près environ, indépendante de l'intensité du courant qui les traverse lorsque les rhéostats de démarrage sont hors circuit.

Il en résulte que les locomotives triphasées ont une vitesse constante malgré les variations du profil, contrairement à ce qui a lieu dans tous les autres systèmes de traction électrique, et comme conséquence, doivent avoir une puissance très supérieure à la puissance moyenne.

C'est un grave inconvénient, car la station centrale qui alimente le chemin de fer subit de ce chef, des à-coups considérables et doit de temps à autre, fournir une puissance beaucoup plus grande que la puissance moyenne.

Le prix de premier établissement d'une telle station est forcément élevé, et si la force motrice est produite par la vapeur, le rendement moyen est nécessairement assez médiocre.

M. de Koromzay affirme que, grâce à l'effet de volant de l'ensemble des trains circulant sur la ligne, les à-coups à la station centrale sont évités ou du moins très atténués, parce que dès que, par suite d'une surcharge, la vitesse des génératrices de cette station diminue tant soit peu, la consommation d'énergie électrique par les moteurs des locomotives diminue aussitôt, ce qui tend à rétablir l'équilibre.

Cette explication n'est admissible que lorsqu'il s'agit d'à-coups *d'une durée excessivement courte*, mais elle est absolument sans valeur dès qu'il faut fournir un surcroît de puissance important pendant un temps appréciable, lorsqu'il faut par exemple, gravir une forte rampe.

Pour atténuer l'inconvénient résultant de la constance de la vitesse, on a imaginé le dispositif suivant :

Les locomotives sont munies de moteurs de deux types différents :

Les moteurs du premier type reçoivent toujours l'énergie électrique directement des fils de prise de courant ; *ces moteurs sont seuls en action pour la marche à la vitesse normale.*

Lorsqu'on veut marcher à une vitesse de régime moindre, on actionne les moteurs du

deuxième type, au moyen des courants triphasés produits par les rotors des moteurs du premier type et, ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte, *si les deux types de moteurs ont le même nombre de pôles*, l'ensemble tourne à une vitesse moitié moindre que dans le premier cas. On dit alors que les moteurs sont montés en tandem ou en cascade.

Lorsqu'on marche avec les moteurs montés en cascade, la vitesse est sensiblement moitié moindre que la vitesse normale et l'effort développé est à peu près double, mais ainsi que je le montrerai plus loin, le rendement est fort diminué.

Avec ce procédé, on est loin d'avoir obtenu la souplesse nécessaire, car pour toutes les vitesses intermédiaires, entre la vitesse maxima et la demi-vitesse et entre celle-ci et la vitesse nulle, *on est obligé de faire usage des rhéostats de réglage*.

II.

Comparaison des rendements du système à courants triphasés et du système à redresseur-régulateur.

Sur les voitures automotrices et les locomotives des chemins de fer de la Valteline, le démarrage se fait en intercalant dans les circuits des rotors des moteurs un rhéostat à liquide manœuvré à l'air comprimé.

En Octobre 1902, j'ai suivi, étant placé dans la cabine d'une voiture motrice, un certain nombre de démarrages et j'ai constaté qu'ils se faisaient bien plus lentement que dans le cas de la traction par courant continu, malgré la grande intensité du courant absorbé.

On s'en rend d'ailleurs facilement compte en examinant les courbes de la Fig. 1, jointe à la note de M. de Koromzay, qui montrent que le train d'essai de 116 tonnes du 20 Avril 1904, dont la marche est figurée sur cette planche, a mis 2 minutes pour atteindre la vitesse de 10 mètres par seconde (36 kilomètres à l'heure) et qu'il a fallu encore près de 1 minute pour atteindre la vitesse de 15^m 5 par seconde (55 km. 800 à l'heure).

M. de Koromzay dit qu'aucun réglage du démarrage n'est aussi doux ni aussi parfait que celui avec des rhéostats à liquide lesquels, ajoute-t-il, en raison de leur indestructibilité et de leur grande capacité calorifique conviennent parfaitement à un service de traction.

Je suis loin de nier les qualités que possèdent les rhéostats à liquide à manœuvre par l'air comprimé du type de ceux qui sont employés sur le chemin de fer de la Valteline, car c'est moi qui ai imaginé ce genre de rhéostat et qui en ai fait faire la première et la plus grande application (Voir le numéro de Novembre 1898 de la *Revue Générale*). — Locomotive électrique à grande vitesse de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée).

Cependant, quelles que soient ses qualités au point de vue de la douceur, de la solidité et de la facilité d'emploi, un rhéostat, lorsqu'il est intercalé dans le circuit principal d'une locomotive électrique, doit être considéré comme un instrument barbare, car il ne règle l'intensité du courant qu'en transformant inutilement en chaleur une quantité d'énergie électrique égale au produit de cette intensité par la chute de tension qu'il détermine.

La perte qui résulte de cette transformation est très importante et diminue d'autant plus le

rendement moyen d'une installation de traction que le nombre des démarrages est plus considérable.

M. de Koromzay estime cependant que, malgré l'emploi d'un rhéostat pour les démarrages, le rendement obtenu sur le chemin de fer de la Valteline est très satisfaisant ; il dit que, lors des essais du 20 Avril 1904, ce rendement atteignait 87 %, mais il ne montre pas comment ce chiffre de rendement ressort des résultats qu'il cite.

Au contraire, ces résultats indiquent un rendement beaucoup moindre :

De Lecco à Bellano *aller et retour*, la consommation par tonne kilomètre a été égale à 36,7 watts-heure. La récupération a permis de retrouver 1,8 watt-heure, de sorte que la consommation effective a été égale à 34,9 watts-heure. Si on calcule le travail à effectuer pour remorquer un train de Lecco à Bellano aller et retour, avec 5 arrêts dans chacun des parcours on trouve :

1° Que le travail de frottement de roulement est égal *par tonne* à $49.700 \times 5 = 248.500$ kilogrammètres. 49.700 mètres étant le chemin total parcouru, et 5 kilog, la résistance moyenne par tonne à la vitesse considérée :

2° Que la perte de force vive à chaque arrêt a été, *par tonne*, égale à :

$$\frac{1.000}{9,8} \times \frac{12^2}{2} = 7.344 \text{ kilogrammètres.}$$

soit pour les 10 arrêts : 73.440 kilogrammètres.

(... Ceci suppose qu'on fasse agir les freins à sabots pour arrêter le train lorsque la vitesse est réduite à 12 mètres par seconde, soit environ 43 kil. 2 à l'heure).

Le travail par tonne est donc égal à :

$$248.500 + 73.440 \text{ soit } 321.940 \text{ kilogrammètres (1).}$$

Les 321.940 kilogrammètres ci-dessus sont équivalents à 3.155.012 W.S., de sorte que le travail effectué par *tonne-kilomètre* est égal à :

$$\frac{3.155.012}{49,7} \text{ soit } 63.481 \text{ watt-seconde, soit enfin } \frac{63.481}{3.600} \text{ ou } 17,6 \text{ watt-heure.}$$

La consommation effectuée ayant été égale à 34,9 watt-heure par tonne-kilomètre, il en résulte sans contestation possible, que le rendement total de l'installation depuis la station centrale jusqu'à la jante des roues motrices est égal à :

$$\frac{17,6}{34,9} \text{ soit } 50,7 \%, \text{ soit presque exactement } 50 \%.$$

Ce rendement de 50 % est très inférieur au rendement annoncé par M. de Koromzay, 87 %, d'où il faut conclure que ce dernier rendement ne s'applique pas à l'ensemble de l'installation de traction et ne doit pas être comparé, comme l'a cependant fait M. de Koromzay, au rendement de 69 % que j'ai donné dans le numéro d'Octobre 1905 de la *Revue Générale* comme étant celui d'une installation de traction à redresseur-régulateur.

(1) NOTA. — Il n'y a pas lieu de compter de travail pour l'élévation sur les rampes, parce que le train circulant aller et retour de Lecco à Bellano revient finalement au même point et que, grâce à la récupération, le train peut être retenu sur les pentes sans qu'il soit nécessaire de serrer les freins à sabot.

Lors des essais faits le 20 Avril 1904, entre Lecco et Bellano, on a trouvé une consommation de 34,9 watt-heure par tonne kilomètre, mais la consommation moyenne réelle est en réalité notablement plus grande et atteint 44,5 watts-heure par tonne-kilomètre.

Ce surcroît de consommation de 9,6 watt-heure est dû, d'après M. de Koromzay, à la dépense d'énergie électrique nécessitée par l'éclairage des gares et des trains, par les manœuvres dans les gares, par l'actionnement de l'usine de réparation à Lecco et par tous les essais de traction ; mais elle est due aussi pour une grande part à une autre cause : Les transformateurs statiques des divers postes répartis le long de la ligne consomment de l'énergie, non seulement quand ils alimentent des trains circulant dans les sections correspondantes, mais aussi quand ils fonctionnent à vide, ce qui a naturellement lieu la plus grande partie du temps. Cette perte d'énergie n'est nullement négligeable, car elle atteint à peu près dans chaque poste 2 % de la puissance nominale des transformateurs de ce poste, et se produit pendant 15 à 20 heures. Le rendement moyen de l'ensemble de l'installation est sensiblement réduit de ce chef.

L'un des principaux inconvénients de la multiplication excessive du nombre des postes de transformation saute ici aux yeux.

Enfin, M. de Koromzay cite comme un des grands avantages du système de traction par courants triphasés, la possibilité de récupérer une certaine quantité d'énergie lors des arrêts et de la descente des pentes, par suite de la propriété que possèdent les moteurs d'induction de se transformer automatiquement en générateurs d'énergie électrique lorsqu'ils dépassent la vitesse du synchronisme. La quantité d'énergie qu'on peut récupérer ainsi, dans le système de traction par courants triphasés, est en réalité assez faible parce que, pendant les ralentissements, lorsque les moteurs sont montés en cascade, on est obligé de laisser une partie du temps la résistance de réglage dans le circuit.

Lors des essais faits le 20 Avril 1904, avec le train de 116 tonnes, on n'a pu récupérer que 1,8 watt-heure sur 36,7 watt-heure dépensés par tonne-kilomètre.

Quoiqu'il en soit, M. de Koromzay est d'avis qu'en combinant des moteurs avec couplage en *double cascade*, on pourrait arriver à récupérer une quantité d'énergie qui dépasse de 80 à 100 % celle dissipée par les rhéostats pendant les démarrages et il ajoute :

« Il est donc clair que la récupération vaut mieux que toute élimination des pertes au démarrage. »

J'ajouterai à mon tour, qu'un système qui permet de faire de la récupération depuis la pleine vitesse jusqu'à une vitesse presque nulle et qui, d'autre part, élimine les pertes au démarrage, l'emporte sur tous les autres, car aucun autre ne permet actuellement d'obtenir ce résultat.

Le système de traction par courant alternatif monophasé transformé sur la locomotive en courant continu, jouit des deux propriétés précédentes et c'est pour ce motif que son rendement global pourra atteindre 69 % et sera par suite très supérieur à celui du système de traction par courants triphasés, qui, du moins sur le chemin de fer de la Valterine, ne dépasse pas sensiblement 50 %.

III.

Prétendues difficultés de construction des locomotives à redresseur-régulateur de grande puissance.

M. de Koromzay cherche à démontrer qu'il serait à peu près impossible de construire de puissantes locomotives à redresseur-régulateur à cause :

1^o Du poids excessif auquel on serait conduit.

2° Des étincelles considérables qui se produiraient sur les collecteurs des redresseurs.

3° De la quantité de chaleur exagérée développée sur les locomotives mêmes.

En ce qui concerne le 1°, M. de Koromzay est arrivé à un poids excessif dans l'étude très sommaire qu'il a faite d'une locomotive électrique à redresseur-régulateur, parce qu'il manquait pour mener à bien cette étude, des renseignements indispensables sur les formes et dimensions ainsi que sur le poids des appareils électriques divers à installer sur ladite locomotive.

J'ai étudié en vue d'une application déterminée, une locomotive électrique à redresseur-régulateur d'une puissance *normale* de 1200 chevaux effectifs mesurés à la jante des roues motrices et de 1600 chevaux effectifs pendant une demi-heure au moins, qui pèserait tout compris 85 tonnes environ (poids sur chacun des 4 essieux moteurs, 15 tonnes ; poids sur chacun des essieux porteurs, 12 tonnes 5).

En ce qui concerne le 2°, les étincelles considérables dont parle M. de Koromzay, ne sont nullement à craindre, car une locomotive électrique devant être munie de deux groupes redresseurs-régulateurs, on sait d'ores et déjà qu'en employant deux appareils semblables à ceux qui ont servi aux essais, et qui sont les premiers construits, on pourrait commuter d'une façon permanente 800 K. W.

Comme, d'autre part, lors des essais, on a poussé momentanément, sans inconvénient, le débit jusqu'à 2400 ampères, on voit qu'on peut dès maintenant, atteindre une puissance de 2400×500 soit 1200 K. W.

En ce qui concerne le 3°, il est bien évident qu'il n'y a absolument aucune crainte à avoir :

L'expérience a prouvé qu'après un fonctionnement de 1 heure à pleine charge, le redresseur-régulateur d'essai avait une température très inférieure à celle qu'on admet d'ordinaire dans les installations de traction (37° au-dessus de la température ambiante. — Température réelle 50°).

D'autre part, tout le monde sait que des transformateurs statiques bien ventilés peuvent fonctionner indéfiniment à pleine charge sans que la température s'élève à plus de 45° au-dessus de la température ambiante.

Enfin, les moteurs prévus sont par construction extrêmement bien ventilés et comme ils sont dépourvus d'engrenages, leur rendement total à la jante des roues motrices dépasse 90 %. La température de tels moteurs, après une heure de marche à pleine charge ne dépassera pas de plus de 45° à 50°, la température ambiante.

On ne conçoit pas que la température de l'ensemble de l'installation électrique, transformateurs statiques, redresseurs-régulateurs et moteurs, puisse s'élever d'une façon excessive, dès lors que les parties constituantes situées d'ailleurs à une assez grande distance les unes des autres, resteront à des températures relativement basses.

IV.

Conclusion.

Le système de traction par courants triphasés a, ainsi que je l'ai démontré, un rendement global très médiocre et en tous cas bien inférieur à celui du système monophasé à redresseur-régulateur.

Il a au point de vue de l'établissement des lignes de prise de courant, l'inconvénient très grave d'exiger 2 fils aériens tandis que le système monophasé à redresseur-régulateur, comme d'ailleurs tous les systèmes monophasés, ne nécessite qu'une seule ligne aérienne.

La tension sur les fils de prise de courant est limitée à 3.000 volts environ, tandis qu'elle peut être très élevée sur le fil aérien unique des systèmes monophasés. Le poids d'une locomotive à redresseur-régulateur n'est pas sensiblement supérieur à celui d'une locomotive triphasée de même puissance.

Enfin le système triphasé ne permet qu'une récupération très limitée, tandis que le système à redresseur-régulateur, tout en admettant la récupération dans les plus larges limites, permet en outre, d'éliminer les pertes d'énergie au démarrage.

Pour toutes ces raisons, il n'est pas exact d'affirmer, comme le fait M. de Koromzay, que le système triphasé est le seul qui dans l'état actuel de la question permette d'opérer convenablement la traction des trains lourds.