

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 35 (1909)  
**Heft:** 9

**Artikel:** Choix de la fréquence pour la traction par courant alternatif des chemins de fer suisses  
**Autor:** Kummer, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-27567>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

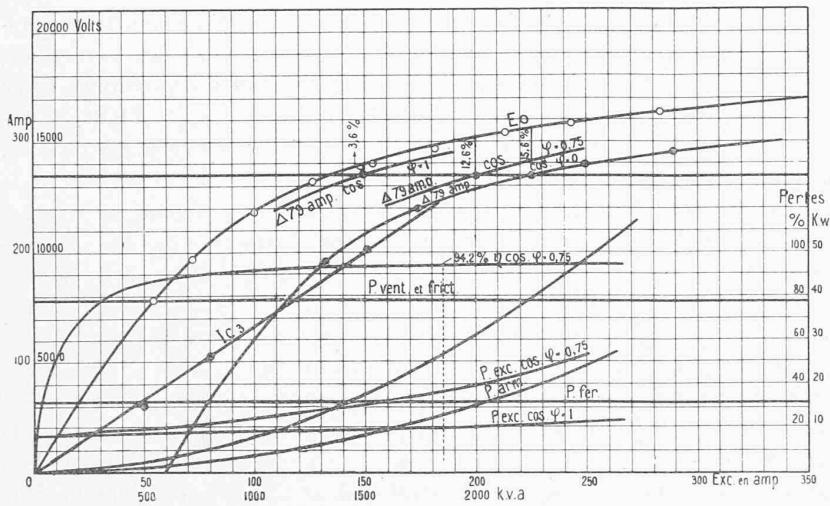
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 19.11.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**



Courbes caractéristiques de l'alternateur en triphasé.

Communications de la Commission suisse d'études pour la traction électrique des chemins de fer.

Rédigées par M. le Secrétaire général Prof.-Dr WYSSLING.

N° 3.

Choix de la fréquence pour la traction par courant alternatif des chemins de fer suisses.

D'après les travaux de plusieurs membres et collaborateurs de la Commission

par M. le Dr W. KUMMER.

Les projets d'installation et d'exploitation que la Commission suisse d'études élabore en vue de la traction électrique future des chemins de fer ont été établis, en ce qui concerne la fréquence, dans le cas de la traction par courant alternatif, en plusieurs variantes, sur les bases suivantes : 15 et 25 périodes pour le courant monophasé ; 15 périodes et 40 à 50 périodes pour le courant triphasé. S'il est très naturel qu'on envisage les chiffres de 40, 42 et 50 périodes par seconde qui sont les fréquences adoptées couramment par les installations suisses pour la distribution générale d'énergie sous forme de courant triphasé, la prise en considération d'une fréquence bien déterminée et en outre très basse ne s'impose pas à première vue et il y a lieu de la justifier. C'est justement afin de pouvoir arrêter définitivement le choix d'une fréquence déterminée que des valeurs différentes et relativement éloignées de la fréquence

ont été prises pour bases des différentes variantes des projets de construction et d'exploitation à élaborer : la comparaison des frais d'installation ressortissant à chaque variante du projet établie en adoptant un nombre déterminé de périodes par seconde constituait un excellent critère pour la fixation de la fréquence la plus favorable.

La préparation de ces projets est actuellement assez avancée pour qu'il soit possible de discuter à fond la question de la fréquence à adopter pour la traction par courant alternatif et, notamment, par courant monophasé.

L'objet de la présente « Communication » est précisément de résumer les principaux faits de cette discussion et d'en présenter les conclusions, d'où résulta l'adoption d'une fréquence déterminée admise comme norme.

Les considérations déterminantes pour le choix de la fréquence peuvent être divisées en trois groupes : considé-

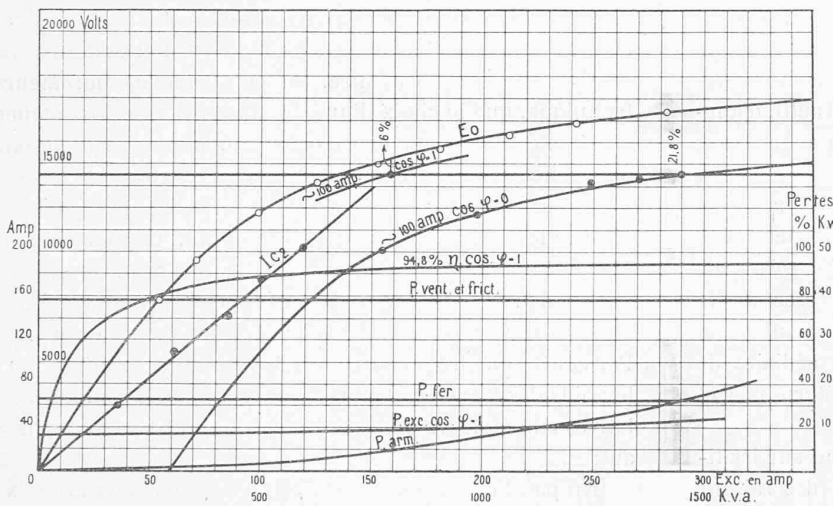


Fig. 36. — Courbes caractéristiques de l'alternateur en monophasé.

LÉGENDE : E<sub>0</sub> = Caractéristiques pour marche à vide. — I<sub>c1</sub> et I<sub>c2</sub> = Courbes de court-circuit. — η = Rendements industriels. — P. vent. et frict. = Pertes par ventilation et friction. — P. Fer = Pertes par hystérésis et courants de Foucault. — P. exc. = Pertes pour l'excitation. — P. arm. = Pertes dans l'armature par effet Joule.

mètre de 61,2 mm. et portant chacun 510 spires de fil de cuivre isolé de 3,8 mm. de diamètre. L'induit a une longueur de 250 mm. et un diamètre de 600 mm., l'entrefer étant ainsi de 6 mm. L'enroulement est composé de 264 fils de 12 × 3,2 mm., logés dans 66 rainures à raison de quatre par rainure. Quant au collecteur, il comprend 132 lamelles. Le courant est récolté au moyen de six séries de balais avec un total de 72 blocs de charbon.

Une seule de ces excitatrices peut suffire à l'excitation de trois alternateurs de 2000 HP. marchant simultanément en pleine charge, et cela pendant 24 heures consécutives, sans échauffement anormal.

D'autre part, le circuit d'excitation dessert les relais de tous les déclencheurs automatiques et peut, en cas de réparation des alternateurs, alimenter une partie du réseau d'éclairage de l'usine.

Le rendement des excitatrices est de 92 % à pleine charge. (A suivre).

rations purement techniques, considérations purement financières et considérations d'ordre général et notamment d'ordre économique.

Parmi les considérations d'ordre *purement technique* la principale est relative au fonctionnement et au dimensionnement des moteurs de traction. A ce sujet, nous dirons tout d'abord qu'une basse fréquence est nécessaire pour les *moteurs de traction à courant monophasé* afin qu'ils puissent être construits d'une façon aussi semblable que possible aux moteurs à courant continu, c'est-à-dire comme moteurs à collecteur pour courant monophasé. Au point de vue des exigences de la traction, la fréquence a une influence identique : d'une part, pour tous les types de moteurs monophasés à collecteur — en particulier pour les moteurs-série ordinaires et pour les moteurs à collecteur avec compensation — le couple maximum au démarrage est limité par la difficulté de la commutation qui s'accroît à mesure que le nombre de périodes par seconde augmente ; d'autre part, pour tous les types de moteurs considérés, la nécessité de maintenir aux différentes vitesses désirables un couple moteur suffisant, contribue à faire adopter une faible fréquence qui permet de diminuer le poids constructif, d'augmenter le rendement et, pour les moteurs non compensés, d'élever le facteur de puissance.

Comme pour les moteurs de traction monophasés, la fréquence influe aussi sur les dimensions et le fonctionnement des moteurs de traction *à courant triphasé* ; mais cette influence est d'ordre secondaire et n'intéresse que la construction des moteurs à marche lente actionnant les essieux des voitures directement ou par l'intermédiaire de bielles et pour lesquels une fréquence bien déterminée et aussi basse que possible est indiquée.

Au point de vue de la distribution du courant sur les lignes des chemins de fer à courant alternatif, des raisons d'ordre technique rendent désirable l'obtention d'une faible fréquence, eu égard à l'augmentation de la chute de tension dans les lignes de contact et dans les rails et à la perte d'énergie dans ces derniers. Ici encore, l'avantage d'une faible fréquence est moins considérable pour le courant triphasé que pour le courant monophasé parce que, en supposant des quantités égales d'énergie transportées et des tensions efficaces égales entre les lignes de contact et les rails, c'est pour le courant triphasé que les plus faibles intensités circulent dans les rails.

Quant au fonctionnement des transformateurs et des machines pour la production et la transformation de l'énergie, y compris, cela va sans dire, les transformateurs des voitures, on ne peut attribuer une influence à la fréquence, étant donné qu'il est possible, abstraction faite de détails insignifiants, de construire, pour n'importe quelle fréquence adoptée, des transformateurs et des machines qui répondent aux conditions techniques qu'on impose habituellement au fonctionnement de ces appareils. Par contre, les dimensions des transformateurs et des machines pour la production et la transformation de l'énergie, y compris les transformateurs des voitures, varient considérablement suivant la fréquence adoptée : une diminu-

tion de la fréquence entraîne un accroissement très appréciable des dimensions des transformateurs en particulier, mais aussi des générateurs et des moteurs synchrones. En ce qui concerne les générateurs électriques, il ne faut pas oublier que, en choisissant une fréquence déterminée on aura, par ce fait même, fixé le produit : nombre de pôles  $\times$  nombre de tours ; par ce fait le choix de la vitesse de rotation des moteurs hydrauliques ou thermiques des stations centrales est influencé, et, dans certains cas, cette vitesse pourrait être préjudiciable à une construction économique des dits moteurs. De plus, le choix d'une fréquence déterminée pour la traction par courant alternatif implique le nombre de tours des moteurs-générateurs dans le cas où il faut avoir recours à une transformation de l'énergie fournie par des centrales équipées pour la distribution générale de la force. Ces deux dernières considérations ne sont pas de nature à faire rejeter le choix d'une basse fréquence mais elles s'opposent toutefois à ce qu'on adopte une fréquence aussi basse qu'on aurait été tenté de le faire en envisageant exclusivement les moteurs de traction.

En résumé, on peut dire, au point de vue purement technique, que le choix d'une fréquence aussi basse que possible est très avantageux pour le fonctionnement et en particulier pour la commutation et le facteur de puissance des moteurs monophasés à collecteur et permet d'en réduire le poids constructif au minimum. On aura aussi intérêt à adopter une fréquence aussi basse que possible en vue de réduire la perte de tension dans les conducteurs et dans les rails et la perte d'énergie dans ces derniers. Par contre une fréquence plus élevée permet de diminuer le poids des transformateurs ; mais les considérations relatives aux moteurs de traction doivent primer toutes les autres.

Au point de vue financier c'est la relation entre le choix d'une fréquence déterminée et les frais d'installation qui est la plus importante à étudier. Si l'on examine séparément les prix afférents aux postes principaux des projets on trouve pour le matériel roulant des prix unitaires d'autant moins élevés que la fréquence est plus basse car, dans l'établissement du prix total de l'équipement moteur, la part ressortissant au prix des moteurs proprement dits, dont le prix unitaire diminue quand la fréquence baisse, est plus considérable que celle qui ressortit aux prix des transformateurs, dont le prix unitaire diminue au contraire quand la fréquence s'élève. Comme nous l'avons déjà dit, les projets à courant monophasé élaborés par la Commission d'études ont permis d'établir cette comparaison entre les prix résultant des différentes fréquences, notamment pour 15 et 20 périodes par seconde. D'autre part en supposant la traction assurée par du courant triphasé, les prix unitaires les plus élevés du matériel roulant correspondent à une fréquence de 15 périodes par seconde et les prix les plus bas à une fréquence de 50 périodes et cela en conséquence du mode particulier de l'entraînement des véhicules par les moteurs de traction, admis pour ces projets.

Au point de vue des installations pour la distribution de l'énergie on a reconnu, théoriquement, l'avantage des

basses fréquences qui permettent de diminuer la chute de tension et la perte d'énergie; toutefois la considération pratique de la résistance mécanique des conduites, des particularités de la ligne à équiper et de la chute de tension maximum prescrite compliquera souvent la détermination de l'influence des différentes fréquences sur les dépenses d'installation. Quant aux installations pour la production et la transformation de l'énergie, on a vu que c'est pour les fréquences plus élevées que le poids des générateurs et des transformateurs est plus petit, et cela aussi bien pour le courant monophasé que pour le courant triphasé; on en déduit immédiatement que le prix unitaire de ces machines diminuera à mesure que la fréquence augmentera.

De l'étude des projets complets pour installations totales par courant monophasé on conclut que, pour tous les réseaux ou lignes à trafic assez intense pour en justifier l'électrification, la diminution des frais d'établissement du matériel roulant obtenue en adoptant 15 périodes au lieu de 25 par seconde n'est pas compensée par l'augmentation — résultant du choix de cette basse fréquence — du prix de revient des générateurs et des transformateurs des installations pour la production et la transformation de l'énergie. Cette fréquence de 15 périodes est donc la plus avantageuse dans ce cas. D'autre part, l'examen des projets complets d'une installation à courant triphasé n'a pas permis de conclure à un avantage marqué des fréquences particulièrement basses et il n'est guère présumable qu'une fois un tel avantage puisse être observé.

En résumé, on peut conclure de la comparaison des dépenses d'installation, en ce qui concerne le choix de la fréquence pour courant monophasé, que le prix de revient très bas du matériel roulant correspondant à une fréquence voisine de 15 périodes compensera largement, dans tous les cas de trafic quelque peu intense, et même souvent surpassera l'augmentation du prix de revient — résultant du choix de cette basse fréquence — des générateurs, des transformateurs et éventuellement de la distribution d'énergie.

Parmi les considérations *d'ordre général et notamment d'ordre économique* qu'il y a lieu d'étudier, à côté des considérations purement techniques et purement financières, pour arrêter le choix d'une fréquence déterminée, nous examinerons en premier lieu les fréquences préconisées jusqu'à ce jour pour la traction par courant alternatif. A ce sujet, les statistiques des installations existantes montrent que, jusqu'à présent, c'est surtout la fréquence de 25 périodes pour le courant monophasé et celle de 15 périodes pour le courant triphasé, qui ont été adoptées pour les chemins de fer de quelque importance; or, les considérations précédentes ont permis d'établir que ces fréquences, qu'il s'agisse de courant monophasé ou de courant triphasé, ne sont pas précisément les plus avantageuses au point de vue exclusivement technique et financier. On peut expliquer ce fait en remarquant que, d'une part, la majorité des chemins de fer actuels à courant monophasé ont été établis sur le modèle des chemins

de fer de l'Amérique du Nord pour lesquels le choix d'une fréquence de 25 périodes était tout indiqué; en effet, d'une part cette fréquence étant généralement adoptée dans les installations américaines pour la distribution générale de l'énergie et agréée par les industriels, la construction d'appareils fonctionnant sous cette fréquence était très familière aux constructeurs du pays; de plus, le choix de cette fréquence permettait d'envisager certaines combinaisons avec les installations pour la distribution générale d'énergie; d'autre part, la construction de la majorité des chemins de fer à courant triphasé, qui sont presque tous sur le territoire italien, a été entreprise sur le modèle du chemin de fer de la Valteline pour lequel la fréquence était imposée par l'adoption de moteurs de traction actionnant directement les essieux moteurs. Actuellement, la fréquence de 25 périodes pour la traction par courant monophasé est considérée, même en Amérique, comme trop élevée et on tend de plus en plus à préconiser une fréquence de 15 périodes environ. En Europe, par exemple, les chemins de fer de l'Etat badois ont adopté une fréquence de 15 périodes et les chemins de fer de l'Etat suédois, une fréquence de 25 périodes pour la traction par courant monophasé.

Si l'on veut déduire des différentes fréquences en usage à l'étranger un critère pour le choix de la fréquence à adopter pour les Chemins de fer suisses, c'est la fréquence de 15 périodes environ utilisée par les Chemins de fer italiens et badois qui sera la plus recommandable au point de vue de la remise du matériel roulant, à la frontière, et de l'installation des gares communes. Les véhicules équipés pour la traction par courant monophasé possèdent le grand avantage de pouvoir être alimentés par du courant dont la fréquence diffère de  $\pm 10\%$  de celle pour laquelle ils ont été construits sans qu'il en résulte une perturbation notable dans leur fonctionnement ni des différences sensibles dans la vitesse qu'ils peuvent fournir.

La possibilité d'obtenir, pour la traction, du courant d'une fréquence déterminée, par la transformation de l'énergie livrée sous forme de courant triphasé à 40 ou 50 périodes par les usines pour la distribution générale de la force, est sans grande importance pour la traction sur les C. F. F. ou la ligne du Gothard; mais ce n'est pas le cas de plusieurs chemins de fer secondaires de la Suisse pour lesquels il y a suffisamment de raisons d'adopter la fréquence fixée comme normale, mais pour lesquels la possibilité d'emprunter l'énergie électrique aux installations existantes sera peut être une question d'existence. Tout en tenant compte de cette situation pour ces chemins de fer secondaires, la fréquence, reconnue très avantageuse, de 15 périodes par seconde pour la traction par courant monophasé peut être adoptée comme norme, en tolérant également les fréquences obtenues par la transformation du courant de 40 à 50 périodes, livré par les centrales, en courant de  $\frac{50}{3} = 16 \frac{2}{3}$  à  $\frac{40}{3} = 13 \frac{1}{3}$  périodes, car on a vu plus haut que des écarts de  $\pm 10\%$  de la fréquence nor-

male n'ont aucune influence fâcheuse sur le fonctionnement des équipements moteurs.

Il faut encore noter, en ce qui concerne les dépenses d'exploitation, que l'entretien des collecteurs des moteurs de traction est moins coûteux pour les basses fréquences. D'autre part, les basses fréquences préconisées plus haut pour la traction par courant monophasé ne conviennent pas, même au delà de 25 périodes, pour l'alimentation directe des lampes à arc servant à l'éclairage des gares ; mais par contre, ces fréquences sont parfaitement admissibles pour l'éclairage à incandescence, si l'on emploie à cet effet des lampes brûlant sous une assez faible tension tout en fournissant une intensité lumineuse relativement élevée. On a donc là le moyen de résoudre pratiquement et judicieusement la question de l'éclairage, car les stations importantes pourvues de lampes à arc en assureront l'alimentation indépendamment du courant de traction, au moyen de générateurs ou de transformateurs installés spécialement dans ce but. Quant aux trains, ils auront, tout au moins ceux des lignes principales, une installation d'éclairage indépendante aménagée dans chaque voiture, comme c'est déjà le cas aujourd'hui, en partie même au moyen de l'électricité, de telle sorte que la question de l'éclairage des gares, de la voie et des trains n'est que secondaire.

En résumé, on peut dire, en se plaçant surtout au point de vue économique, que 1<sup>o</sup> eu égard aux conditions de l'électrification des chemins de fer dans les pays voisins, le choix d'une fréquence d'environ 15 périodes est le plus judicieux, 2<sup>o</sup> les fréquences de  $16 \frac{2}{3}$  et  $13 \frac{1}{3}$  périodes qu'on peut obtenir par simple transformation du courant des usines, à 40 et 50 périodes, sont parfaitement admissibles, étant donné qu'elles ne sont pas nuisibles au fonctionnement des moteurs et appareils construits pour une fréquence normale de 15 périodes.

L'examen minutieux des différentes considérations présentées plus haut a conduit la Commission suisse pour l'étude de la traction électrique à formuler la conclusion suivante, concernant le choix de la fréquence pour la traction au moyen de courant alternatif monophasé.

« La fréquence de 15 périodes par seconde est adoptée comme norme. Une fréquence minimum de  $13 \frac{1}{3}$  et une fréquence maximum de  $16 \frac{2}{3}$  périodes par seconde sont admissibles pour les chemins de fer qui devront emprunter l'énergie à des centrales fournissant du courant dont la fréquence est comprise entre 40 et 50 périodes par seconde. »

## SOCIÉTÉS

### Société vaudoise des ingénieurs et des architectes.

*Assemblée générale, le samedi 3 avril 1909, à 6 1/2 heures du soir, au local de la société.*

Présidence : M. G. Epitoux, architecte, président.

Le procès-verbal de la dernière séance est lu et adopté.

M. Jean de Blonay, ingénieur, est présenté par MM. Aymon de Blonay et Pierre de Blonay, ingénieurs.

Les candidats présentés dans la dernière séance sont proclamés membres de la société.

Le rapport annuel, constatant la marche satisfaisante de la société, est approuvé ; la finance d'entrée reste maintenue à Fr. 5 et la cotisation annuelle à Fr. 10.

Les comptes pour l'exercice écoulé et le projet de budget de 1909-1910, présentés par M. Gorgerat, caissier, sont adoptés sur rapport de MM. Meyer, ingénieur, et P. de Blonay, ingénieur, vérificateurs ; décharge en est donnée au caissier, avec remerciements pour sa bonne gestion.

*Nominations statutaires :* M. Henri Develey, ingénieur en chef, est élu à l'unanimité président de la société pour l'exercice 1909-1910.

MM. Robert Piot, ingénieur, Charles-F. Bonjour, architecte, et Jean Taillens, architecte, sont nommés membres du Comité en remplacement de MM. Edouard Chastellain, ingénieur, A. Laverrière, architecte, et G. Epitoux, architecte, sortant de charge.

M. Louis Gorgerat, dont le mandat expire à ce jour, est renommé caissier de la société.

Le nouveau Comité est donc composé comme suit :

Président :	MM. Henri Develey, ingénieur, à Lausanne.
Vice-président :	Edmond Quillet, architecte, à Vevey.
Secrétaire :	Charles Petitat, ingénieur, à Lausanne.
Caissier :	Louis Gorgerat, » »
Membre :	Robert Piot, » »
»	Charles-F. Bonjour, architecte, »
»	Jean Taillens, » »

Comme le prévoyait le programme, l'assemblée a été précédée d'une intéressante visite des travaux du pont Charles Besières, sous la conduite de MM. Chavannes, ingénieur, Vautier, ingénieur, et Bellorini, entrepreneur.

Le présent procès-verbal est lu et adopté à la dite assemblée.

La séance est levée à 7 1/2 heures. Etaient présents 16 membres.

### RAPPORT

*du Comité de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes, à l'assemblée générale du 3 avril 1909.*

Messieurs et chers collègues,

Tout en nous référant pour de plus amples détails aux procès-verbaux adoptés et publiés, nous avons l'avantage de résumer ici les phases de l'activité de notre société pendant l'exercice 1908-1909.