

3° D'informer M. Supéry qu'en ce qui concerne l'éclairage, le corps municipal de chacune des communes traversées est exclusivement compétent pour concéder une distribution de lumière ; qu'en conséquence, M. Supéry après avoir obtenu de l'Etat, s'il y a lieu, la concession d'une distribution de force motrice, devra, préalablement à toute utilisation de l'électricité pour l'éclairage des habitants d'une commune traversée, obtenir du corps municipal de cette commune la concession d'une distribution de lumière ;

4° D'inviter M. l'ingénieur en chef Petit à vous transmettre le plus tôt possible, avec les propositions de l'ingénieur ordinaire et les siennes, le projet de cahier des charges et de tarifs qui aura été, après discussion, présenté par M. Supéry, pour régler les conditions de la distribution de force motrice ou des autres modes d'utilisation industrielle de l'électricité.

Lorsque vous m'aurez renvoyé le dossier de l'affaire avec les propositions des ingénieurs et votre avis personnel, j'examinerai la question de savoir s'il y a lieu de prendre le projet de cahier des charges et de tarifs en considération pour le soumettre à une enquête, ou s'il convient au préalable de le modifier. Des instructions vous seront, en tout cas, données par la suite de l'affaire.

Vous voudrez bien, Monsieur le Préfet, transmettre ampliation de la présente dépêche à M. l'ingénieur en chef Petit. Vous en notifierez seulement les conclusions à M. Supéry.

Recevez, etc....

Le Ministre des Travaux Publics,  
VIETTE.

## ÉTUDE SUR LE FREINAGE ÉLECTRIQUE

DES CHEMINS DE FER ET TRAMWAYS (\*)

Les nombreuses applications de l'énergie électrique à la traction amènent tout naturellement à l'étude des freins électromagnétiques. En effet, les freins à air comprimé nécessitent l'emploi de compresseurs actionnés par un servo-moteur électrique ou un essieu du train et, par suite, sont coûteux d'installation et d'entretien; de plus, l'usage de voitures automotrices électriques restreint la place réservée aux appareils de freinage. Enfin, leur fonctionnement absorbe une puissance assez considérable. On a donc cherché à utiliser directement l'énergie électrique et divers systèmes de freins électromagnétiques ont donné d'excellents résultats en pratique. Nous nous proposons d'en faire une étude générale en divisant notre travail en deux parties :

- 1° Freins pour traction à courants continus.
- 2° Freins pour traction à courants alternatifs.

### CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

**Modes d'alimentation des freins.** — Pour actionner les freins on peut se servir : du courant de la ligne; du courant fourni par les moteurs fonctionnant en génératrices ; ou enfin, d'un courant auxiliaire fourni par une source spéciale, piles, accumulateurs ou dynamo. Nous allons examiner successivement ces trois cas.

1° **Alimentation par la ligne.** — Ce mode de freinage est évidemment celui qui se présente le premier à l'idée (fig. 1). Le courant fourni par la ligne L actionne les électroaimants

de freinage E, après avoir passé dans un rhéostat de réglage R. On a ainsi un effet facilement modérable; de plus, il est absolument indépendant de la vitesse de la voiture et peut, par suite, amener à un arrêt complet. Par contre, le fonctionnement d'un pareil système est à la merci d'un déclenchement de l'interrupteur à l'usine ou d'un déraillement du trolley. Enfin, la rupture du circuit devra se faire avec des dispositifs spéciaux, afin d'éviter les étincelles dues à la grande self-induction des bobines. Quand le train comportera plusieurs voitures tous les freins devront être en dérivation sur la ligne et le rhéostat R sera dimensionné de manière à pouvoir supporter l'intensité totale.

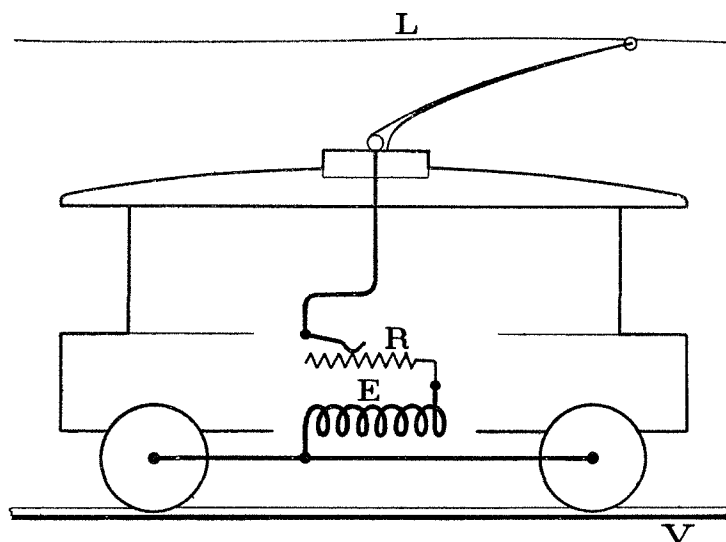


Fig. 1

Il résulte de ce montage que les dernières voitures du convoi seront moins freinées que les premières. On pourra remédier à cet effet en saturant les électroaimants et en admettant une faible chute de tension dans la canalisation. Ceci sera en général, facile, car les freins, montés en dérivation sur haute tension, n'exigeront qu'un courant assez faible. Dans le cas précédent, le montage des freins en série ne peut pas être utilisé; en effet, pour un train de  $n$  voitures, le courant de freinage maximum serait  $n$  fois plus faible que dans le cas d'une seule voiture.

On doit, cependant, l'employer dans le système suivant : au moment du démarrage le courant passe dans les électroaimants mis en série avec les moteurs et le frein est desserré en même temps qu'un fort ressort est tendu. Aux crans suivants du combinateur, le courant ne passe plus, mais le ressort reste armé. Lorsque l'on veut freiner, on déclenche le ressort, soit par une tringle, soit à distance par un électroaimant de servage; il entraîne alors la timonerie et le serrage s'opère. Il est facile de rendre ce système automatique dans le cas de rupture d'attelage; les électros peuvent même, dans une certaine mesure, servir de résistances au démarrage et ne demandent aucune énergie supplémentaire à la ligne. Par contre, les freins de ce genre sont plus compliqués et moins modérables que ceux étudiés en premier lieu.

Nous rangerons dans la même catégorie le freinage obtenu par le renversement de marche des moteurs. Il n'agit naturellement que sur les roues motrices, et comme nous le verrons dans la suite, il n'a pour lui que la simplicité; ce n'est, d'ailleurs, qu'un frein de secours.

(\*) Je tiens à remercier ici M. J. DEBAUGE, ingénieur des Arts et Manufactures, de la « Compagnie des Omnibus et Tramways de Lyon », qui m'a prêté dans cette étude l'aide de ses conseils techniques et de son expérience.

2° Alimentation par les moteurs marchant en génératrices. — Ce procédé est fort ancien; il fut, croyons-nous, préconisé par Siemens et Halske dès les débuts de la traction électrique. Le moteur  $M$  (fig. 2) travaille en génératrice sur une résistance réglable  $R$ . On peut aussi se servir du courant produit pour alimenter des électroaimants de freinage  $E$  (fig. 3). On soulage ainsi les moteurs; de plus, ces freins peuvent être appliqués à toutes les voitures comme dans le cas de l'alimentation par la ligne. Moyennant certaines conditions d'accouplement des moteurs, il est impossible de faire patiner les roues motrices, car alors tout courant cesse; c'est là une précieuse qualité, mais, par suite, on ne peut, sauf en palier, arrêter complètement le train. Il faut donc prévoir un autre frein suffisamment puissant pour terminer le freinage.

Les électros seront en gros fil, car on doit pouvoir, par la manœuvre du rhéostat  $R$ , abaisser suffisamment la résistance du circuit pour que le moteur  $M$  s'amorce (cas le plus général du moteur-série); de plus, comme on va le voir, les freins doivent être tous en série dans le cas de plusieurs voitures et de l'action par moteurs-série.

Supposons, en effet, que le rhéostat  $R$  soit à un plot déterminé et que le train soit lancé sur une pente avec une vitesse  $V$ .

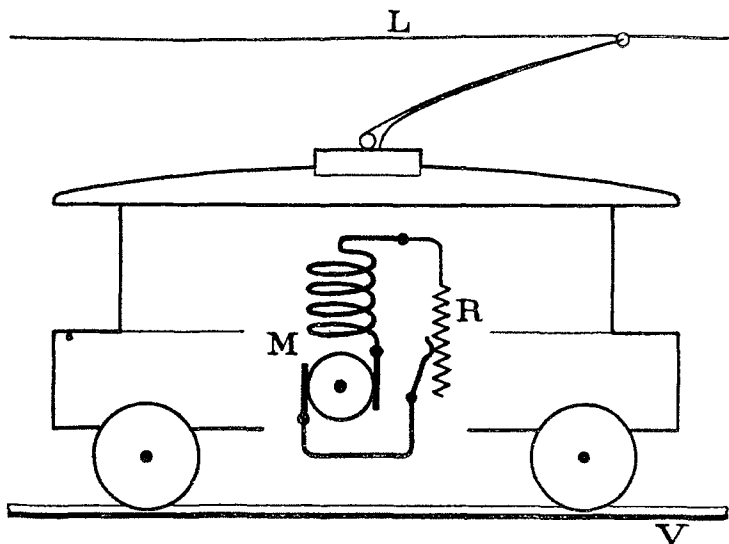


Fig. 2

Désignons par :  $P$ , le poids du train;  $M$ , sa masse fictive;  $f$ , le coefficient de traction;  $i$ , la pente de la voie;  $I$ , l'intensité du courant;  $\varphi = f(V)$ , la résistance de l'air.

L'effort résistant, dû aux moteurs, ne dépend sensiblement que du courant, d'après une propriété caractéristique du moteur-série; celui dû aux freins électromagnétiques est fonction du courant et de la vitesse (courants de Foucault). On peut donc représenter leur somme par une expression de la forme:

$$R = F_1(I) + F_2(I, V) \quad (1)$$

Or, on a: 
$$M \frac{dV}{dt} = (i-f) P - R - \varphi$$

ou, en remplaçant  $\varphi$  et  $R$  par leurs valeurs,

$$M \frac{dV}{dt} = (i-f) P - F_1(I) - F_2(I, V) - f(V)$$

Si  $i$  est plus grand que  $f$  on peut admettre qu'après un certain temps la vitesse sera uniforme.

Négligeons, de plus, l'effet de la résistance de l'air et des courants de Foucault; on a alors:

$$(i-f) P = F_1(I) + F_2(I, 0) \quad (2)$$

$F_2(I, 0)$  étant l'effort dû aux freins électromagnétiques dans ce cas.

On voit immédiatement que  $I$  est déterminé par l'équation (2) et qu'il est indépendant de la vitesse  $V$  et de la résistance du circuit électrique.

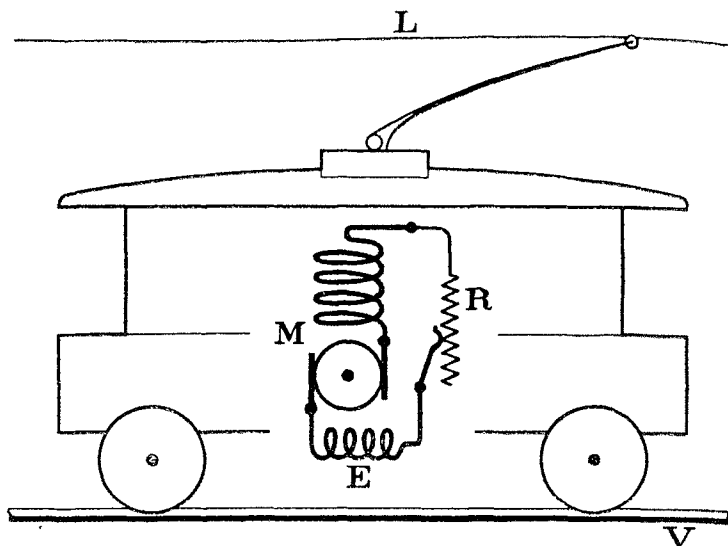


Fig. 3

Par suite, si le moteur considéré alimentait  $n$  freins en dérivation, le courant, dans chaque bobine, serait le  $n^{\text{ième}}$  de celui qui passerait dans le cas d'une seule bobine mise en circuit; le montage serait donc fort désavantageux.

Le même raisonnement pourrait s'appliquer dans le cas d'un moteur à excitation séparée. C'est, d'ailleurs, sous cette forme, que l'on appliquera le moteur en dérivation à ce mode de freinage pour des motifs étudiés plus loin.

Enfin, il est évident que ces conclusions subsistent dans le cas général où les résistances dépendent de la vitesse et du courant et qu'il sera toujours préférable d'employer le montage en série. Celui-ci, cependant, présente une difficulté résolue très élégamment par M. Guénée: dans le cas d'une rupture d'attelage, par exemple, tous les freins électriques sont immobilisés. Pour remédier à cela, M. Guénée construit des prises de courant mettant automatiquement la ligne en court-circuit lorsque, pour une cause quelconque, la fiche de contact est enlevée.

3° Emploi d'une source auxiliaire d'électricité. — On peut aussi se servir du courant fourni par une source spéciale: piles (fig. 4), accumulateurs, ou dynamo, soit pour actionner les freins directement, soit pour obtenir simplement le déclenchement de certains organes assurant le freinage. Le prototype de cette classe est le frein Achard; il peut être regardé comme la première application de l'électricité au freinage des trains.

Aujourd'hui on préfère généralement une commande directe; cependant nous étudierons plusieurs freins très ingénieux de cette catégorie. Ils peuvent être rendus facilement automatiques et s'appliquent à tous les genres de traction.

Enfin, on emploie une source auxiliaire pour le freinage

de certains moteurs, tels que les moteurs en dérivation et les alterno-moteurs monophasés et polyphasés.

**Conclusions.** — En résumé, on voit que l'alimentation par le réseau assure une grande modérabilité jusqu'à l'arrêt complet. Par contre, l'alimentation par les moteurs est très économique puisqu'elle se fait aux dépens de la force vive du train ; elle offre aussi plus de sécurité, étant indépendante de la ligne.

Il serait donc à souhaiter que l'on pût combiner les deux méthodes. D'après ce que nous avons vu on ne peut pas se servir du même enroulement, à cause des caractéristiques tout-à-fait différentes des deux procédés, mais, pour éviter une trop grande complication, on pourrait alimenter tous les freins du train par le courant des moteurs en munissant les automotrices de deux enroulements distincts permettant les deux cas d'alimentation. Enfin, certains modes de traction à courants polyphasés, en particulier, n'admettent guère que le troisième genre d'alimentation sous ses deux formes.

**Récupération.** — Bien que n'étant pas un procédé de freinage à proprement parler, elle peut être employée avec succès pour le réglage de la vitesse sur les lignes à fortes déclivités. Comme nous le verrons dans la suite, elle n'est possible qu'avec les moteurs à excitation en dérivation, ou indépendante, et avec les alterno-moteurs à champ tournant, à moins d'employer un artifice ingénieux de M. Blondel permettant la récupération avec des moteurs-série. On a dû renoncer à son emploi dans certains cas où il produisait une décharge momentanée trop considérable des génératrices. Quand on emploie du courant continu l'usage d'une batterie-tampon nous semble alors indiqué.

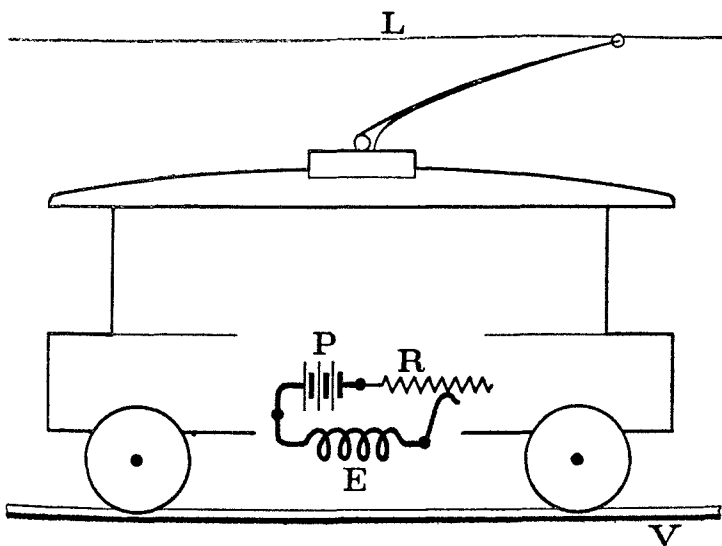


Fig. 4

On peut se servir de la récupération, soit pour modérer la vitesse dans les pentes, soit même pour obtenir un ralentissement considérable en palier, comme on le fait avec le freinage par les moteurs en court-circuit ; il est certain que, dans ce dernier cas, son emploi serait très avantageux sur une ligne dont les arrêts sont fréquents, un métropolitain par exemple.

Elle peut enfin rendre de grands services dans une exploitation par accumulateurs et c'est ainsi que M. Sarcia l'a employée avec succès sur la ligne de Paris-Saint-Denis.

Il est évident que, dans tous les cas, elle ne dispensera pas d'avoir des freins puissants pour provoquer l'arrêt complet.

### I. — FREINS POUR COURANTS CONTINUS.

D'après ce que l'on vient de voir, il résulte qu'une classification des freins basée sur leur mode d'alimentation ne présenterait pas toute la netteté désirable, puisqu'un grand nombre de systèmes peuvent recevoir une alimentation quelconque. Nous préférons donc, dans ce qui va suivre, les classer d'après l'organe sur lequel ils agissent. Nous distinguerons ainsi :

1° *Freinage par le moteur :*

a) Renversement de marche. — b) Freinage des moteurs marchant en génératrices sur résistances. — c) Récupération.

2° *Freinage sur les roues :*

a) Freins à plateaux. — b) Freins à sabots.

3° *Freinage sur les rails.*

4° *Freinage mixte agissant à la fois sur les roues et sur les rails.*

**Freinage par le moteur.** — **Méthode du renversement de marche.** — Elle est imitée de la marche à contre-vapeur des locomotives, mais, quoique pouvant se réaliser très simplement avec les moteurs électriques, elle est loin, en général, d'en offrir les avantages.

Appelons en effet :  $E$  la différence de potentiel du réseau ;  $e$  la force électromotrice d'induction du moteur ;  $R$  sa résistance ;  $r$ , la résistance variable du rhéostat ;  $I$ , l'intensité du courant. Supposons d'abord qu'il n'y ait aucun patinage, la voiture marchant à sa vitesse normale ; la force électromotrice du moteur s'ajoute à celle du réseau et

$$\text{l'on a : } I = \frac{E + e}{R + r}$$

L'intensité sera donc exagérée et il sera prudent de donner à  $r$  la valeur la plus grande dont on dispose, c'est-à-dire celle du démarrage  $\rho$ . De plus, comme le courant est intense et que nous supposons qu'il y a adhérence parfaite  $e$  est très voisin de  $E$  et l'on aura sensiblement :  $I = \frac{2E}{R + \rho}$

Désignons par  $I_0$  le courant de démarrage :

$$I_0 = \frac{E}{R + \rho}$$

On voit que, au début du freinage :  $I = 2I_0$

La prolongation du courant risquera donc d'endommager le moteur tout en causant une perte d'énergie considérable.

A l'arrêt, le courant sera  $I_0$  ; on aura l'énergie  $W$  dépensée pendant la durée du freinage par l'expression suivante :

$$W = E \int_{2I_0}^{I_0} I dt$$

Elle pourra atteindre une valeur élevée puisque  $I$  varie d'une manière décroissante et continue de  $2I_0$  à  $I_0$ . L'arrêt est très brusque et risque d'endommager le matériel et même de blesser les voyageurs.

Dans le cas de moteurs-série on peut admettre qu'il y a saturation du circuit magnétique pour toutes valeurs de  $I$  supérieures ou égales à  $I_0$ . Le couple résistant est alors

le double du couple de démarrage. Il y aura donc souvent patinage car l'effort obtenu dépassera en général l'adhérence. Les roues se mettront à tourner en sens inverse et la voiture glissera sur les rails, un patinage même momentané diminuant considérablement l'adhérence. Dans ce cas le freinage ne présentera aucune sécurité.

Enfin dans le cas, le plus fréquent, d'un montage de deux moteurs en série, le patinage d'un seul essieu, provenant par exemple d'une inégalité de charge, suffit à rendre inefficace ce mode d'arrêt. En effet, la force contre-électromotrice  $e_1$  de celui qui patine est élevée et l'on a :

$$I = \frac{E - e_1 + e_2}{2R + \rho}$$

Comme d'ailleurs  $e_2$  est peu élevé,  $I$  sera peu intense et le moteur n° 2 ne donnera aussi qu'un faible couple de freinage.

Pour toutes ces raisons l'usage de cette méthode n'est pas à recommander et ne peut guère être justifié que pour un arrêt de secours, la voiture n'ayant aucun autre frein électrique. Nous l'avons vu cependant employer d'une manière courante par certains mécaniciens de tramways qui s'en servaient même en mettant les moteurs sur la ligne sans intercaler de résistances. Aussi, toutes les fois que l'on pourra le faire, nous conseillons avec MM. Blondel et Dubois (1), de supprimer l'inversion de marche sur les tramways où la manœuvre peut se faire des deux plate-formes, tout en mettant à la disposition du mécanicien un freinage électrique d'un emploi plus sûr, la mise en court-circuit des moteurs par exemple.

Dans le cas où il est nécessaire que le mécanicien puisse se servir facilement de la marche arrière, par exemple sur les lignes mixtes à caniveau et à trolley, afin d'arrêter la voiture juste sur la trappe des points terminus du caniveau, il serait désirable que l'on ne pût, tout au moins, dépasser la position de démarrage pour la marche arrière comme on peut en général le faire avec le matériel américain qui permet la marche arrière à toutes les vitesses.

Un cas cependant où ce procédé pourrait être employé utilement est celui de certains chemins de fer à crémaillère à courant continu. Lorsque l'usine génératrice est hydraulique, on préférera, en général, ne pas utiliser la récupération qui, comme nous l'avons déjà dit, peut occasionner des décharges momentanées trop grandes des génératrices, surtout si le trafic est peu intense. Dans ce cas, le moteur-série est bien préférable au moteur en dérivation et l'on réalisera le freinage à la descente en inversant la marche. Le courant sera maintenu à une intensité convenable par un rhéostat convenablement dimensionné, à liquide de préférence. On pourra ainsi absorber une énergie sensiblement constante, soit à la montée, soit à la descente, et prévenir tout emballement des turbines.

Pour obtenir le même couple à la même vitesse qu'à la montée, le rhéostat  $r$  devra satisfaire à la relation :

$$\frac{E - e}{R} = \frac{E + e}{R + r}; \quad (E - e)(R + r) = (E + e)R$$

(1) *La traction électrique sur voies ferrées*. — A. Blondel et F. P. Dubois. Tome second, page 205. Baudry.

d'où :  $r = \frac{2eR}{(E - e)}$  qui exprime que le courant est le même dans les deux cas.

Ce rhéostat sera donc assez volumineux, et c'est pour cela que nous préférons un rhéostat liquide. Il sera d'ailleurs facile à loger sur une locomotive de chemin de fer à crémaillère.

(A suivre)

J. BETHENOD,  
Ingénieur E. C. L.

## TRAITEMENT DES MINERAIS DE CUIVRE AU FOUR ÉLECTRIQUE

*Nous pensons être agréables à nos lecteurs en reproduisant ici la conférence suivante, faite à la Société des Ingénieurs civils, le 19 juin dernier, par M. Ch. VATTIER, sur les expériences de traitement des minerais de cuivre au Four Keller en fonctionnement aux usines de Livet (Société Electrochimique de La Romanche), dont une partie de l'énergie est, comme on le sait, utilisée aux opérations de la COMPAGNIE ELECTRO-THERMIQUE KELLER, LELEUX ET C<sup>ie</sup>.*

Il y aura bientôt deux ans, j'avais l'honneur, dans cette même salle, de vous parler des remarquables expériences réalisées sur des minerais de fer dans des fours électriques. Je vous décrivais également les usines électro-métallurgiques que j'avais eu l'occasion de visiter aux Etats-Unis et en Europe et vous manifestais alors, prévision qui a été réalisée, mon espoir que bientôt ces nouveaux procédés, rendus si économiques et si pratiques par les ressources de la houille blanche, quitteraient les domaines du laboratoire et des petites usines expérimentales, pour entrer franchement dans la grande voie industrielle.

Vous connaissez tous l'histoire, encore récente, de l'électro-métallurgie : s'appuyant sur les savantes observations des Moissant, Siemens, Acheson, Minet et autres notabilités de la science, nous avons vu lutter avec acharnement des hommes de science et d'industrie, comme : Stassano, Héroult, Laval, Keller et tant d'autres qu'il serait trop long de mentionner ici, pour créer une nouvelle métallurgie électrique qui est la métallurgie de l'avenir.

Chargé, deux fois en l'espace de trois ans, d'une mission du gouvernement Chilien en Europe et aux Etats-Unis, pour y étudier les nouveaux procédés électro-métallurgiques, je crus utile, en août dernier, d'apporter avec moi du Chili environ 200 t de minerais de cuivre, de fer et de manganèse, pour exécuter en France des expériences industrielles de fonte de ces minerais dans des fours électriques ; ce sont les résultats de ces expériences qui constituent le but principal de cette conférence, qui sera des plus brèves, en vue de la nécessité de laisser aujourd'hui la parole à plusieurs éminents conférenciers.

Après quelques expériences préliminaires, je fus autorisé à faire de nouvelles études sur le même sujet, dans l'usine de MM. Keller et Leleux, sous la direction de M. Keller, à l'usine de Kerrouse, en Bretagne.

C'est là que nous avons arrêté, d'accord avec M. Keller, les forme et marche définitives des fours et appareils accessoires qui, dernièrement et à plusieurs reprises, ont fonctionné, d'une façon parfaite, à la grande usine électro-métallurgique de MM. Keller et Leleux, à Livet, près Grenoble.