

LA HOUILLE BLANCHE

Revue générale des Forces Hydro-Electriques
et de leurs applications

8^e Année. — Mars 1909. — N^o 3.

*La Houille noire a fait l'Industrie moderne;
la Houille blanche la transformera.*

LE RETOUR PAR LA TERRE

Rapport présenté au Congrès de Marseille par M. E. BRYNLINSKY,
directeur de la Société « Le Triphasé ».

1. Cette question est presque aussi vieille que l'électricité, car il y a quelque trois quarts de siècle que la télégraphie fait usage de la terre comme retour du courant, n'ayant ainsi à employer qu'un conducteur par ligne dans le cas général.

Il était naturel que la même solution vint à l'esprit de ceux qui eurent successivement à appliquer d'autres propriétés de l'énergie électrique, mais le résultat fut loin d'être aussi favorable.

Le téléphone vint d'abord, mais sa sensibilité, égale à 10.000 fois environ celle des appareils télégraphiques Morse, rendit promptement insupportables les perturbations provenant du sol terrestre, et presque toutes les lignes téléphoniques sont aujourd'hui à circuit métallique complet.

Puis vinrent les tramways à fil aérien, qui eurent à l'origine la prétention de faire le retour de leur courant par les rails. Mais on ne tarda pas à constater qu'une partie notable de ce courant revenait par la terre, causant en chemin de nombreuses perturbations aux télégraphes, téléphones et conduites de toute nature.

Aussi, lorsque commença à se répandre la distribution de l'électricité pour la lumière, puis pour la force motrice des ateliers, le premier soin de l'Etat, possesseur du monopole de la transmission des signaux, fut de défendre son exploitation en interdisant absolument aux nouvelles distributions d'employer la terre comme portée de circuit.

Cette défense fut pendant longtemps observée sans que nul ne songeât à l'enfreindre. Cependant les distributions étendaient d'année en année leur rayon d'action, et, vers 1902, un industriel osa demander l'autorisation d'exploiter une ligne unifilaire à courant continu de haute tension et de grande longueur avec retour par la terre.

Le problème était posé avec franchise. L'Etat estima qu'il était trop important pour être écarté par la question préalable, et autorisa le Comité d'Electricité à entreprendre avec son appui une série d'essais pour tenter d'éclaircir la question. De leur côté, les électriciens suisses se livraient un peu plus tard à d'intéressantes expériences. C'est le résultat de ces essais que nous allons sommairement rapporter.

2. Mais il convient auparavant d'insister sur l'intérêt que présente ce problème pour les futures grandes lignes de transport d'énergie électrique.

L'économie qui résulte du retour par la terre peut devenir considérable: en effet, à égalité de perte de charge, le poids du cuivre de la ligne est réduit au quart, le prix des isolateurs à moitié; la hauteur, la résistance, et le prix des appuis peuvent être notablement moindres, les difficultés d'isolement sont bien diminuées, et les chances de court circuit presque supprimées.

Pour une ligne de 600 kms, en câbles aériens de 50 mm² à double fil, ou 25 mm² avec retour par la terre, la seule économie de cuivre serait de $\frac{3}{2} \times 600 \times 467,775 = 421\,000$ kgs, soit, à 2 francs le kilogramme, une économie de cuivre de 842 000 francs. L'ensemble des autres réductions corrélatives porterait probablement la somme économisée à plus d'un million de francs.

Si la ligne transporte 50 ampères de courant continu à 60000

volts au départ, la perte de charge sera égale à $1200 \times 16,65 = 20\,000$ volts, et la puissance à l'arrivée ne sera plus que de 2000 kilowatts.

L'économie réalisée sera donc de l'ordre de 500 fr. par kilowatt transporté; elle représente, pour une annuité d'intérêt, amortissement et entretien, égale à 12 pour 100, soit 60 fr., et une utilisation moyenne annuelle de 1500 heures, une économie de quatre centimes par kilowatt-heure à l'arrivée en haute tension, soit, en tenant compte des diverses transformations et pertes inhérentes à la distribution, de 6 à 8 centimes par kilowatt-heure vendu. Si l'on admet, prenant ainsi une hypothèse quelconque pour fixer les idées, que le kilowatt-heure à l'arrivée en haute tension puisse être payé à raison de 11 centimes pour cette utilisation moyenne annuelle, on voit quelle proportion considérable représentera une économie de 4 centimes.

L'économie serait moindre pour une tension plus élevée, qu'il serait cependant difficile d'introduire dans l'intérieur des villes, de sorte qu'il y aurait lieu d'envisager une transformation supplémentaire à l'arrivée, et par conséquent une réduction du prix du kilowatt-heure à l'arrivée. Par contre, on ne pourrait songer à construire une ligne de 600 kms pour transporter 2000 kilowatts, mais seulement pour des puissances *beaucoup* plus importantes. Comme on ne peut charger indéfiniment les appuis, à cause de la tension dans les courbes et de l'effet du vent qui oblige alors à établir des appuis excessivement coûteux, on serait amené à construire plusieurs lignes distinctes; le nombre de ces lignes sera beaucoup réduit par suite de la réduction au quart du poids de cuivre, et l'économie réalisée sera supérieure à celle qui a été chiffrée ci-dessus.

On peut dire, en résumé, que l'économie résultant du retour par la terre serait considérable pour les transports de grande longueur, et qu'elle peut suffire pour rendre viable financièrement une affaire qui ne le serait pas avec un circuit purement métallique.

Il n'est pas nécessaire, d'ailleurs, pour obtenir ce résultat, de faire de la terre le retour complet permanent du courant. Une application qui vient immédiatement à l'esprit est d'employer le système à trois fils, en remplaçant le fil neutre par la terre. On construira une ligne à $+E$ volts, l'autre à $-E$ volts, en mettant le milieu à la terre, au départ et à l'arrivée. On transportera ainsi une puissance double; le sol ne servira normalement que de conducteur d'équilibre, et on ne l'emploiera comme retour complet qu'en cas d'avarie à l'une des deux lignes.

3. L'intérêt du problème étant dès lors bien établi, nous pouvons entrer plus profondément dans son examen. Les objections principales que soulève le retour par la terre sont au nombre de cinq:

- 1^o Conservation des électrodes;
- 2^o Electrolyses produites par le courant de retour;
- 3^o Induction électrostatique et dérivations;
- 4^o Induction par les terres;
- 5^o Induction électromagnétique.

4. Nous pouvons écarter rapidement les trois premières.

La conservation des électrodes paraît aisée à assurer en installant à chaque extrémité plusieurs prises de terre en parallèle, de façon à pouvoir les entretenir successivement sans interrompre l'exploitation. La meilleure manière d'établir et d'entretenir ces prises de terre se dégagera peu à peu de l'exploitation même.

La seconde question a une existence réelle, comme l'ont montré les corrosions provenant des courants vagabonds de certains

réseaux de tramways, mais il faut remarquer que la situation est bien différente dans notre cas.

Dans les tramways, on a par les rails des prises de terre très longues, qui sont à des distances variables et de la station centrale et du réseau des conduites métalliques, de sorte que les courants de retour suivent des chemins très compliqués.

Au contraire, dans le système proposé, les prises de terre seraient établies dans des terrains choisis, suffisamment conducteurs et éloignés de toute conduite métallique. Dès lors, la diffusion du courant se fait tout autour de l'électrode et à peu près sphériquement. La densité de courant, à la distance R , sera égale à $\frac{1}{2\pi R^2}$, de sorte que, s'il s'agit d'un courant de 628 ampères, la densité de courant, à 100 m. de la prise de terre ne sera que $100 : 10^8 = 1$ microampère par centimètre carré, ce qui est insignifiant, et certainement inférieur aux courants telluriques naturels en certains endroits.

Si ρ est la résistivité moyenne du sol, la différence maxima de potentiel, entre deux points écartés de ρ , sera égale à :

$$\frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R + \epsilon} \right) = \frac{\rho \epsilon I}{2\pi R (R + \epsilon)}$$

Reprenons ce courant considérable de 628 ampères, et une distance ϵ égale à 1 km., soit 10^5 cm (puisque ρ est évalué habituellement en ohms cm) ; nous aurons pour la différence de potentiel l'expression :

$$100 \rho \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R + 10^5} \right)$$

Dès que R dépassera 1 km., cette différence maxima de potentiel sera inférieure à un deux millièmes de ρ , et deviendra très rapidement insensible lorsque la distance augmentera. Elle ne pourra, par conséquent, produire de courants parasites appréciables dans les masses métalliques, et on n'aura aucune électrolyse à craindre si l'on prend les précautions suffisantes pour que le courant se diffuse naturellement dans le sol, et qu'aucun conducteur, tels que rails de tramways, conduites d'eau ou de gaz, ne le transporte en grande quantité dans certaines directions.

Sur l'induction électrostatique et les dérivations, il y a peu de chose à dire. L'induction électrostatique a été invoquée dans certains cas, sans qu'on ait jamais pu prouver bien nettement qu'elle ait un effet appréciable, et la plupart des phénomènes qui lui ont été attribués paraissent pouvoir s'expliquer par de simples dérivations.

Ces dérivations peuvent, par contre, prendre une importance considérable, mais seulement pour les lignes placées sur les mêmes appuis. Il ne nous semble pas que des lignes placées sur des appuis différents, et situées à une certaine distance l'une de l'autre, puissent s'influencer par dérivations. On pourrait craindre qu'à chaque poteau les dérivations ne vissent créer de petites terres ayant une certaine zone d'influence ; mais ce phénomène ne nous paraît pas à redouter avec les isolateurs à haute tension dont l'industrie dispose actuellement.

5. Ces causes de perturbation une fois écartées, il nous reste à examiner deux questions très importantes, l'induction par les terres et l'induction électromagnétique.

L'induction par les terres, phénomène perturbateur qui a été depuis longtemps constaté en télégraphie dans certains sols défavorables, consiste essentiellement en ce fait que la prise de terre électrique porte le sol environnant à un potentiel différent de ce qu'il était antérieurement, et de ce qu'il est encore à une distance suffisante. L'amplitude de cette variation, et la distance à laquelle se manifeste une altération appréciable du potentiel, dépendent de l'intensité du courant qui s'écoule dans le sol, ainsi que de la résistivité et de l'homogénéité de ce sol dans la région environnante.

Il est bien évident que toute ligne unifilaire, ayant une de ces terres dans cette région troublée et l'autre en dehors, sera parcourue par un courant parasite qui prendra dans certains cas une intensité suffisante pour troubler, ou même pour arrêter complètement le service, pour faire fonctionner à faux les appareils récepteurs de tout ordre, et, par exemple, pour faire donner voie libre à des électrosémaphores, alors qu'une section de block est occupée, et provoquer ainsi de très graves accidents de trains de chemins de fer. L'étude de cette induction par les terres est donc de toute première importance.

Elle a fait l'objet d'une série d'expériences effectuées à Lancey (Isère), en octobre 1903, sous la direction de M. E. HARLÉ, par MM. PIONCHON, alors directeur, et BARBILLON, sous-directeur de l'Institut électrotechnique de l'Université de Grenoble, avec le

concours actif de l'Administration des Postes et Télégraphes, et des chemins de fer P.-L.-M.

Une terre avait été installée dans le marais de Lancey, en un sol relativement homogène à assez grande distance (plusieurs kilomètres), et très conducteur, au moyen d'une série de tuyaux de fonte. Une dynamo de tramways y fit passer un courant continu de 210 ampères, au moyen duquel on procéda à plusieurs séries d'essais. Quelques intéressantes qu'aient été ces expériences, précieuses par le soin extrême avec lequel elles ont été faites, leur description ne rentrerait pas dans le cadre de ce travail, et nous nous bornerons à en résumer brièvement les résultats essentiels.

La résistance de la terre produisait une chute de tension de 360 volts environ, qui s'est trouvée réalisée :

Au.....	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{9}{10}$
Dans un intervalle de	5	20	40	100 m.

On peut préciser davantage, car de l'étude des différents résultats recueillis, il résulte que le potentiel du sol, à la distance R de la prise de terre par rapport au sol vierge, sera présente parfaitement par la formule empirique suivante, où R est exprimé en m.

$$U = \frac{2200}{R}$$

Si l'on rapproche cette formule de l'expression théorique obtenue au paragraphe 4, on voit qu'elles concordent, et qu'elles permettent d'obtenir la résistivité moyenne du sol, puisqu'on en déduit, en faisant croître indéfiniment ϵ , et exprimant R en centimètres,

$$\frac{\rho I}{2\pi R} = \frac{220000}{R}$$

par suite : $\rho = \frac{2\pi}{I} \times 220000 = 2\pi \times 1050 = 6600$ ohms-cm.

La chute maxima de tension par km., à la distance R de la prise de terre sera, par suite, en reprenant le mètre comme unité,

$$\frac{220000}{R(R+1000)}$$

et pour que cette chute de tension ne dépasse pas 1 volt (ce qui est actuellement la règle pour les retours de courant de tramways par les rails), il suffit que

$$\frac{220000}{R(R+1000)} < 1$$

ce qui exige que $R > 1065$

Ainsi, dès qu'on sera, dans le marais de Lancey, sorti d'un cercle de 1065 m. de rayon autour de la prise de terre, les chutes de tension dues à un courant de 210 ampères continus deviendront inférieures à 1 volt par kilomètre, et iront ensuite en décroissant rapidement.

On peut déduire de là un moyen de surveillance de l'altération éventuelle de la résistivité du sol, qu'il importe de maintenir tant au point de vue de l'induction par les terres que des électrolyses possibles. Il suffit d'installer à demeure, selon les droites passant par la prise de terre principale, deux ou trois groupes de deux prises de terre auxiliaires et de mesurer de temps à autre la différence de potentiel entre les deux prises de terre de chaque groupe. On se rendra compte ainsi de toutes les variations de résistivité du sol.

7. Des essais du même genre ont été repris par les Suisses en septembre 1906, mais sur une distance beaucoup plus grande.

L'usine génératrice était celle de Saint-Maurice, dans la vallée du Rhône, et la ligne employée un des fils de la ligne Saint-Maurice-Lausanne, avec terres à Bex et à Lausanne. Les potentiels étaient pris par rapport au potentiel du sol de Saint-Légier, village situé non loin de Vevey.

Le courant était de 150 ampères continus ; les résistances constatées par les chutes de tensions étaient de 7,8 ohms pour le conducteur métallique, 0,83 pour la terre de Bex, et 0,70 pour la terre de Lausanne.

Ces essais ont confirmé d'une façon générale, dans la région homogène de 700 m. à 800 m. de rayon où ont été faites les mesures, les résultats obtenus à Lancey, en 1903.

Les potentiels du sol sont les mêmes, aux erreurs d'expériences près, suivant deux lignes droites divergeant de la prise de terre

sous un angle de 60° environ, et peuvent, entre 70 m. et 600 m. se représenter par la formule empirique suivante qui est, à la constante près, de même forme que celle obtenue à Lancey.

$$U = 29 + \frac{1059}{R}$$

8. Mais l'introduction de la constante est un résultat nouveau qui demande une étude sérieuse, car on ne voit pas au premier abord à quel phénomène physique il correspond.

Une discussion approfondie amène tout d'abord à remplacer la formule simple trouvée ci-dessus par une formule développée en $\frac{1}{R}, \frac{1}{R^2}, \frac{1}{R^3}, \dots$, en raison des dimensions considérables de la

terre de Bex, composée de tuyaux enfoncés aux sommets de trois hexagones réguliers de grand diamètre. Mais la constante ne disparaît pas, et se trouve simplement ramenée de 19 à 14 volts.

Le sol de la vallée serait donc, dans la région de Bex, à un potentiel supérieur de 14 volts à celui du sol de Saint-Légier. Il y aurait là un phénomène des plus remarquables, et inattendu au premier abord. Il importe tout d'abord de le confirmer.

Pendant que les essais de précision étaient faits autour de Bex, des relevés étaient faits également au moyen d'instruments moins sensibles aux diverses gares de chemin de fer avoisinantes. On déduit de ces relevés que la région entourant la terre de Bex se serait trouvée pendant les essais à un potentiel supérieur d'environ 11 volts à celui d'une ligne à peu près équipotentielle passant en aval, par Villeneuve et Le Bouveret (bord oriental du lac), et en amont près de Saint-Maurice. Il semble qu'on puisse conclure de là que la constante trouvée ait bien un caractère réel.

Cette constante est d'ailleurs assez facile à expliquer. La terre de Bex se trouve dans une vallée large de 5 km environ, bordée sur 18 km. par deux rangées parallèles de hautes montagnes. Au delà, le lac Léman reste bordé au Sud par des montagnes élevées, tandis que la chaîne du Nord va à la fois en remontant dans le Nord et en s'abaissant, de telle sorte que la distance entre Saint-Légier et Saint-Gingolph, qui lui correspond à peu près sur la côte du sud, est d'environ 10 kilomètres.

Or, le sol de toutes les vallées alpestres est, d'une façon générale, constitué par des débris alluvionnaires, le plus souvent mouillé et par conséquent assez conducteurs, tandis que la montagne qui les enserme est par elle-même complètement isolante (marbre, ardoise, etc.) ou tout au moins très peu conductrice.

Si S est la section moyenne de cette vallée sur la longueur l , ρ sa résistivité moyenne et I l'intensité du courant qui y circule, la chute de tension sera, en supposant les montagnes complètement isolantes :

$$\Delta U = \frac{\rho l}{S} I.$$

La vallée du Rhône, à bords parallèles jusqu'à Villeneuve, s'évase subitement comme nous l'avons vu, de sorte qu'en admettant une profondeur uniforme, la chute de tension $\Delta U'$ de Bex à Villeneuve, et la chute de tension $\Delta U''$ de Villeneuve à Saint-Légier, seront dans le rapport :

$$\frac{\Delta U'}{\Delta U''} = \frac{18}{\frac{5}{7,5}} = 2,7,$$

et si $\Delta U = \Delta U' + \Delta U'' = 14$ volts,

on devra avoir $\Delta U' = \frac{2,7}{3,7} \times 14 = 10,3$ volts, alors que l'expérience a donné 11 volts environ. La concordance est très satisfaisante.

Nous avons, d'autre part, trouvé à Lancey : $\rho = 6600$ ohms-cm.

Nous en déduisons : $5 = \frac{6600 \times 18 \cdot 10^5 \times 150}{S}$,

et, par conséquent : $S = 162 \cdot 10^9$ cm².

La largeur étant de 5 km., la profondeur moyenne de la vallée serait, d'après cela, en supposant la même résistivité moyenne :

$$h = \frac{162 \cdot 10^9}{5 \cdot 10^5} 324 \cdot 10^3 \text{ cm} = 3240 \text{ m.}$$

Nous ne pensons pas, étant donné la hauteur des sommets voisins, que la profondeur moyenne de la vallée soit aussi considérable. Il y a lieu d'en conclure que les montagnes ne sont pas complètement isolantes, et qu'une partie seulement du courant passe par la vallée, la fraction la plus importante s'épanouissant au loin.

9. La chute de tension ainsi produite est d'ailleurs loin d'être négligeable; elle correspond à 0,6 volt par kilomètre. Si l'on consi-

dère un poste Morse de 500 ohms, desservi par une ligne de longueur l , et de résistance $10 l$, le courant parasite produit par cette chute de tension aura pour valeur $\frac{0,6 l}{10 l + 500}$, et pour qu'il ne dépasse pas 2 milliampères, par exemple, il faut que :

$$\frac{0,6 l}{10 l + 500} \leq \frac{2}{1000}$$

et par conséquent que $l \leq 1720$ m.

Cet effet, pourra donc gêner considérablement les lignes télégraphiques de la vallée qui ne seront pas très courtes, et il faudra s'en préoccuper tout d'abord dans l'étude d'un projet de retour par la terre. Il y a d'ailleurs divers moyens de parer à ces inconvénients lorsqu'on les a reconnus.

10. Il ne nous reste plus dès lors à envisager que l'induction électromagnétique.

Les renseignements existants avant 1906 sur cette question étaient extrêmement peu nombreux et peu précis.

On savait depuis longtemps, à la suite de perturbations causées à des lignes téléphoniques unifilaires par de simples lignes télégraphiques desservies au Morse, que ces inductions pouvaient devenir très gênantes.

D'autre part, les expériences célèbres de télégraphie à distance par induction, conçues et exécutées par Sir H. Preece, avaient prouvé que cette induction était assez forte pour permettre un service régulier. Mais les renseignements publiés sur ces expériences étaient insuffisants pour permettre de prévoir ce qui se serait passé sur d'autres circuits.

Il fallait donc procéder à de nouvelles expériences qui ont eu lieu, sous l'impulsion du Comité d'Electricité, en août-septembre 1906 entre Grenoble et Lancey, et ont été complétées en 1907. Il convient cependant, avant d'en rendre compte très sommairement, de préciser le problème.

11. Il y a lieu de faire une distinction très nette entre les lignes télégraphiques et téléphoniques, en raison de la sensibilité très différente des récepteurs en jeu.

En ce qui concerne le téléphone, l'induction a été supprimée dans bien des cas, et en tout cas notablement réduite par l'emploi de circuits purement métalliques à double fil. Ces mesures n'ont pas toujours suffi à faire disparaître du premier coup l'induction électromagnétique, qui n'a été supprimée parfois qu'après d'assez longs tâtonnements, en équilibrant très exactement les circuits d'aller et de retour, et en les croisant avec soin. Mais si cette suppression de l'induction n'a été qu'assez péniblement obtenue, on peut considérer le résultat comme définitivement acquis pour le téléphone.

Resterait à envisager, si l'on voulait aller jusqu'au bout des problèmes, les cas des circuits téléphoniques placés sur les mêmes appuis que la ligne d'énergie, mais c'est un cas très spécial, et nous considérons que, dès qu'il y aura la largeur d'une route entre les deux lignes, le problème ne présente plus de difficulté.

La situation n'est pas la même pour le télégraphe, car, si les récepteurs télégraphiques sont beaucoup moins sensibles que les récepteurs téléphoniques, cette absence même de sensibilité leur a permis d'échapper jusqu'à présent, au moins dans la grande généralité des cas, aux perturbations étrangères, et a eu pour résultat que toutes les lignes télégraphiques sont encore unifilaires avec retour par la terre.

De pareilles lignes sont particulièrement soumises aux influences d'un transport d'énergie à retour par le sol; mais le problème, considéré intégralement, est excessivement complexe, puisqu'on se trouve dans le sol en présence d'une infinité de filets de courant inducteur, et d'une infinité de filets de courant induit, se pénétrant réciproquement. Il est donc indispensable d'envisager, non pas la solution rigoureuse du problème, mais simplement une solution suffisamment approchée pour les besoins réels, basée sur des hypothèses simplificatives certainement inexactes, qui donneraient des résultats erronés pour des extrapolations de grande envergure, mais suffisantes pour le but pratique à atteindre.

12. Tout d'abord, il convient de bien s'entendre sur la nature du courant inducteur.

S'il s'agit d'un courant alternatif, rien de plus simple. Il peut se développer en série de Fourier sous la forme.

$$I = \sum_1^{\infty} I_n \sin(n \omega t - \tau_n),$$

où ω est la pulsation fondamentale, avec :

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum I_n^2}$$

et les termes proportionnels au courant dans la formule de l'induction se calculent sans peine.

S'il s'agit de courant continu, il importe de se rappeler que le courant réellement continu, celui de la décharge de piles ou d'accumulateurs, ou de certaines machines homopolaires, n'existe pratiquement pas en dehors de ces cas exceptionnels, et que les génératrices dites à *courant continu* donnent en réalité un courant ondulatoire, dont la partie ondulatoire est plus ou moins faible par rapport à la partie constante.

Un pareil courant peut s'écrire sous la forme

$$I = I_0 + \sum_1^{\infty} I_n \sin(n\omega t - \varphi_n),$$

où I_0 est une constante, généralement égale à plusieurs centaines de fois les I_n , et où ω est beaucoup plus grand (10 à 20 ou 30 fois) que dans le cas du courant alternatif ordinaire.

Le courant I_0 n'est susceptible de produire aucune induction électromagnétique, au moins dans les transports à intensité constante, car le flux d'induction qu'il crée est constant, et par conséquent sa variation nulle; le courant I n'agit donc électromagnétiquement que par sa partie variable, qui est forcément périodique (en faisant abstraction des phénomènes perturbateurs d'ordre généralement secondaire que sont les crachements aux balais) et par conséquent de forme analogue à celle d'un courant dit *alternatif*.

En résumé, nous n'avons jamais à envisager, au point de vue de l'induction électromagnétique, que les courants alternatifs. Dans les uns, les I_n seront considérables et les ω faibles, dans les autres les I_n seront faibles et les ω considérables; les forces électromotrices F induites étant, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelles à $n\omega I_n$, il s'établira une compensation partielle, de telle sorte que la force électromotrice d'induction produite par les uns et les autres arrivera à être à peu près de même ordre.

13. D'autre part, la faible sensibilité même des appareils télégraphiques nous permet de restreindre beaucoup le problème.

Si, en effet, on constate que les récepteurs télégraphiques les plus sensibles, situés dans la région, qui pourrait être influencée, ne peuvent en aucun cas être troublés par un courant d'un milliampère, il sera tout à fait inutile de rechercher une précision plus grande.

Peu importera que la formule empirique approchée que nous cherchons donne des résultats très erronés pour des courants induits de 100 milliampères, ou de $\frac{1}{100}$ milliampère, pourvu

qu'elle nous donne des résultats approchés entre, par exemple, $\frac{1}{3}$ et 3 milliampères. Quand il y aura moins de $\frac{1}{3}$ de milliampères, nous serons tranquilles; quand il y aura plus de 3 milliampères, nous saurons qu'il y a des mesures à prendre, et dans l'intervalle entre $\frac{1}{3}$ et 3 milliampères, nous considérerons qu'il y a doute, et prendrons quelques précautions.

D'autre part, il s'agit de courants alternatifs, et les récepteurs télégraphiques ont généralement une forte impédance. Ceci simplifie le problème pour l'induction par courant continu, car, à ces fréquences élevées, la résistance devient faible devant la réactance $n\omega L$, de sorte que l'intensité du courant induit est proportionnelle, pour des lignes courtes, en négligeant les données de la ligne, à

$$\sum_1^{\infty} \frac{I_n}{L} \cos(n\omega t - \varphi_n),$$

et sa valeur efficace est proportionnelle à : $\frac{l}{L} \sqrt{\frac{1}{2} \sum I_n^2}$.

Pour des courants alternatifs ordinaires, cette simplification ne peut se faire en général, mais la réactance est généralement bien supérieure à la résistance. Si l'appareil envisagé plus haut a, par exemple, 1 000 ohms d'indépendance pour la fréquence d'un courant inducteur sinusoïdal, il suffira de rechercher les forces électromotrices induites de l'ordre du volt.

14. Le problème est ainsi restreint au point de vue des limites entre lesquelles il y a lieu de rechercher l'exactitude de la force électromotrice induite. Il l'est également au point de vue de l'espace dans lequel doit être valable la formule empirique cherchée.

En effet, il est certain, *a priori*, que les lignes induites très rapprochées de la ligne inductrice seront fortement influencées, et qu'il sera nécessaire de les protéger. Il est également certain que les lignes très éloignées ne subiront que des effets d'induction non gênants, et qu'il n'y a pas lieu de s'en préoccuper. Il ne sera utile d'étudier l'induction que dans une zone de largeur res-

treinte, ce qui facilitera l'établissement d'une formule empirique.

Enfin, en profondeur, le problème se trouve limité par ce phénomène que le courant alternatif se trouve pratiquement confiné dans une zone assez peu profonde de la surface du sol, c'est ce phénomène qu'on désigne parfois sous le nom de *skin effect*. Dans le sol de Lancey, par exemple, supposé homogène et indéfini dans tous les sens, avec la surface du sol comme seule limite, un courant de fréquence 42 serait pratiquement compris dans une tranche de 500 m. à partir de la surface.

15. Les filets de courant se trouvant ainsi limités en profondeur, et possédant d'autre part une certaine symétrie, puisqu'ils vont, dans l'ensemble, en s'affaiblissant à mesure qu'ils s'écartent de la ligne, il est naturel de chercher à les remplacer, pour l'étude du problème spécial qui nous est posé, par un retour fictif linéaire situé à une certaine profondeur dans le sol.

Dans ces conditions, l'étude de l'induction se ramène à celle d'une série de cadres rectangulaires inducteurs adjacents deux à deux, sur une pareille série de cadres induits. Le but des expériences est de déterminer la position de ce retour fictif, et l'une des précautions à prendre est de réduire au minimum le nombre des cadres.

Le problème se résume dès lors dans des formules relativement simples, mais qu'il serait trop long d'établir ici. Nous devrions d'ailleurs, pour des motifs qu'il n'est pas utile d'exposer, nous borner à résumer sommairement les résultats obtenus à ce jour.

16. L'étude expérimentale du problème ainsi posé a fait l'objet des expériences de Lancey-Grenoble en août-septembre 1906, complétées en septembre 1907. Ces expériences ont été élaborées comme programme sous la direction de M. E. HARLÉ, puis préparées et conduites sur le terrain par M. BARBILLION, avec une science et un dévouement au-dessus de tout éloge; elles ont donné des résultats très intéressants (*).

La ligne inductrice, longue de 14 km., allait de Lancey à la Croix-Rouge, près Grenoble. Elle transportait du courant alternatif simple à 11 000 volts et 42 périodes par seconde. L'intensité était le plus souvent réglée aux environs de 30 ampères (si la fréquence avait été de 630 périodes par seconde au lieu de 42, la force électromotrice induite aurait été la même pour une intensité efficace de 2 ampères; mais il n'en aurait pas été de même de l'intensité induite, l'impédance des circuits télégraphiques variant fortement avec la fréquence, comme nous l'avons vu plus haut).

Trois lignes induites avaient été réalisées;

L'une, ayant 2 500 m. de longueur commune avec la ligne inductrice, se trouvait à une distance moyenne de 8^m,30 de cette ligne;

La seconde, ayant 7 612 m. de longueur commune, se trouvait à une distance moyenne de 480 m. de la ligne inductrice;

La troisième, ayant 10 500 m. de longueur commune, se trouvait à une distance moyenne de 4 857 m. de la ligne inductrice.

17. Les tensions induites ont pu être mesurées avec une grande précision, sauf pour la dernière ligne où ils étaient très faibles; mais, même pour cette ligne, elles ont pu être déterminées avec une approximation évaluée à ± 10 pour 100, qui est plus que suffisante. Sans entrer dans le détail, nous pouvons dire qu'un grand transport à courant continu serait sans influence électromagnétique appréciable sur une ligne télégraphique parallèle située à cette distance, même si la longueur commune de ces deux lignes dépassait 1 000 kilomètres.

Ce résultat est très important, car il limite à une valeur sensiblement inférieure à 5 km. de part et d'autre la zone d'influence électromagnétique d'un transport à courant continu de grande longueur et de puissance ordinaire. S'il s'agissait de transporter une centaine de mille kilowatts, la question demanderait à être étudiée de plus près, mais il nous paraît probable que la zone limite ne serait guère plus large. Ceci restreint très étroitement le nombre des lignes télégraphiques pouvant être influencées, lorsqu'on aura choisi un tracé convenable pour la ligne inductrice.

Ce résultat montre encore que les trois distances qui ont été choisies pour les essais encadrent complètement le problème.

Les données obtenues ont permis d'établir une formule empirique, à l'aide de laquelle on peut prévoir, avec une approximation admise comme suffisante dans les conditions énoncées au paragraphe 13, l'induction sur les lignes placées dans la zone dangereuse; elles correspondent à un retour fictif situé à 400 m. environ de profondeur. Des essais d'induction ont été également faits sur des lignes à circuits métalliques complets, sans aucune terre.

(*) Voir dans ce même numéro, pages 57 et suivantes.

Ces essais ont permis de vérifier l'exactitude des formules théoriques et de constater qu'on pouvait, d'un côté à l'autre d'une route, protéger complètement un circuit téléphonique sans terre par un nombre restreint de croisements judicieusement établis.

18 Nous ne considérons pas cependant les formules empiriques établies comme constituant le point final du problème et nous estimons qu'il y a lieu de les vérifier.

Nous pensons qu'il serait avantageux de s'en servir pour voir si le retour par la terre pourrait être essayé sans inconvénients sur un grand transport existant. Dans ce cas, il y aurait un intérêt évident à faire cet essai, et à vérifier si, malgré la diversité des terrains et la grande longueur, les différents phénomènes qu'on peut prévoir à l'aide des données ci-dessus sont bien de l'ordre de grandeur qu'on peut prévoir à l'avance.

On arriverait ainsi à rectifier et à compléter ces premiers résultats, et l'on aurait sans doute entre les mains tous les éléments nécessaires pour étudier l'influence d'un transport quelconque à retour par la terre.

En résumé, la question a fait un pas considérable en avant, et l'on peut espérer voir le retour par la terre des grands transports industriels entrer prochainement dans le domaine de la pratique.

Le retour par la terre des courants industriels

EXPÉRIENCES EFFECTUÉES EN 1906-1907

Communication faite au Congrès de Marseille par M. BARBILLON, Directeur de l'Institut électro-technique de Grenoble.

Le cadre étroit de cette note-ci nous interdit de décrire en détail les dispositifs expérimentaux employés, ainsi que de faire autre chose que de consigner, dans leur extrême généralité, les résultats obtenus.

Nous croyons cependant devoir insister sur quelques points relatifs à la production des courants inducteurs et à l'observation des courants induits dans les lignes à courants, faibles pseudo-parallèles aux premières, dussent ces quelques détails servir seulement à mettre en évidence l'importance des moyens matériels dont nous disposions, et l'ampleur expérimentale que nous avons pu donner à notre étude.

But des expériences. — Comme on le sait, un transport de puissance électrique utilisant le sol comme portion du circuit de retour, suivant l'expression consacrée par l'usage, comporte essentiellement un groupe de générateurs d'énergie, une ligne de transmission et un groupe de récepteurs plus ou moins complexes, l'un des pôles du groupe de récepteurs et l'un des pôles du groupe de générateurs étant connectés avec le sol.

Les terres ainsi constituées aux deux bouts présentent une résistance plus ou moins forte, dépendant de la perfection relative avec laquelle elles ont été établies. Elles donnent naissance à une chute de tension ohmique, donc à une perte de puissance pour l'exploitant. D'autre part, le passage inévitable d'un courant dans le sol, courant dû aux différences de potentiel existant entre les deux terres, et la constitution d'une sorte de cadre fermé par les lignes de transmission (conducteur d'aller) et le sol (conducteur de retour) déterminent des effets d'induction dans les lignes à faibles courants (télégraphiques, téléphoniques, circuits de signaux, etc.), se trouvant dans une certaine zone d'influence. C'est à la détermination des conditions matérielles dans lesquelles s'exercent ces effets perturbateurs qu'est consacrée la présente étude, à l'exclusion de toute recherche relative à l'influence de la constitution des terres, dans les diverses questions soulevées par l'emploi du sol comme portion intégrante d'un circuit de transmission d'énergie. Dans une étude précédente, mon éminent prédécesseur, M. Pionchon, a magistralement résumé les conclusions des expériences de 1903, entreprises comme celles-ci sur l'Initiative du Comité d'électricité (1), et plus particulièrement consacrées à l'étude de la forme de la décroissance de la différence de potentiel depuis la prise de terre

proprement dite, et à l'influence sur cette décroissance du choix de terres constituées de façons différentes.

L'étude des influences perturbatrices apportées aux lignes à faibles courants par les lignes utilisant le retour par le sol est, comme on sait, d'une importance capitale pour l'industrie des transports d'énergie.

D'une manière générale, le but poursuivi au cours de cette dernière série d'expériences (1) a été de déterminer l'ordre de grandeur le plus exact possible de ces effets inducteurs, par la mesure directe des courants induits dans les lignes d'expérience, en faisant varier, dans les plus larges limites possibles, les conditions du problème.

Dispositions générales. — L'on s'est efforcé de réaliser les expériences précitées dans des conditions se rapprochant le plus possible de la pratique industrielle. A cet effet, on a expérimenté principalement les effets inductifs produits sur des lignes induites déterminées, au moyen d'une transmission d'énergie électrique alternative à haute tension (11.000 volts en moyenne, 42 périodes), prenant terre à ses deux extrémités : la consommation de la majeure partie de l'énergie produite s'effectuant dans une résistance liquide située à l'extrémité de la ligne inductrice opposée à celle terminée à l'usine.

Des lignes induites l , réparties en trois groupes a, b, c , situés à des distances différentes de la ligne inductrice et prenant terre en des points t et t' , étaient soumises aux effets inductifs provenant du passage du courant dans cette ligne inductrice. On mesurait, au moyen d'appareils appropriés, les courants induits dans les lignes d'expérience, et, par la connaissance plus ou moins exacte de la résistance et de la réactance du circuit induit, on passait de là à la connaissance de la tension induite.

Des essais analogues ont été effectués, mais en moins grand nombre et dans des limites plus restreintes, avec un courant inducteur continu.

En outre de ces séries principales d'expérience, tendant en fait à la détermination d'un certain nombre de coefficients intéressants dans l'étude du fonctionnement des lignes aériennes à retour de courant par la terre, on a aussi procédé à divers essais connexes et, en particulier, à la recherche expérimentale des influences exercées par le même courant inducteur sur les lignes télégraphiques, téléphoniques et de signaux en service normal, c'est-à-dire pourvues de leurs appareils et en activité.

Pour ne contrarier en rien le fonctionnement des services publics, les expériences ont été faites uniformément de midi à deux heures, temps pendant lequel les terres des bureaux affectés aux expériences pouvaient être mises à la disposition des expérimentateurs.

Avant de donner une description générale de l'installation, il convient de préciser les principes de la méthode employée sous la forme la plus simple et en éliminant le plus possible les calculs auxiliaires qui n'ont été introduits qu'à titre correctif dans cette étude.

Théorie simplifiée de la méthode employée. — Appelons I_{eff} la valeur efficace du courant inducteur alternatif supposé provisoirement sinusoïdal. Ce courant inducteur induit dans une des lignes l une force électromotrice I_{eff} proportionnelle, théoriquement, à la valeur efficace de I_{eff} et de même périodicité que ce courant. On peut donc définir un coefficient d'induction mutuelle M des deux circuits et le déduire de la relation simple.

$$MI_{\text{eff}}\Omega = e_{\text{eff}} \quad (1)$$

relation dans laquelle Ω représente la pulsation du courant inducteur ($\Omega = 2\pi F$, F étant la fréquence) e_{eff} la tension induite et I_{eff} le courant inducteur. I_{eff} peut être mesuré directement, ainsi que Ω . Au contraire, si théoriquement e_{eff} peut aussi être mesurée par insertion d'un électromètre ou d'un voltmètre suffisamment sensible et exact, il a semblé plus logique d'opérer autrement. Toujours dans le but de se rapprocher le plus possible des conditions de la pratique, et étant donnée, dans certains cas, l'extrême faiblesse des effets à mesurer, il a paru préférable de disposer sur les lignes l un électrodynamomètre très sensible, avec adjonction, suivant les besoins, de résistances supplémentaires, et de déduire, par un calcul simple, de la connaissance des courants induits, celle des forces électromotrices d'induction qui leur ont donné naissance.

(1) *Etude du retour par la terre des courants industriels* (expériences de Lancey, octobre 1903, effectuées sous la direction de M. HARLÉ, président de la Commission du retour par la terre), Grenoble, Joseph Baratier, éditeur.

(1) *Etude du retour par la terre des courants industriels* (expériences de Lancey, 1906-1907, deuxième série), effectuées sous la direction de M. HARLÉ; contenant les rapports de MM. BARBILLON et BRYLINSKI, avec introduction de MM. E. HARLÉ; Allier frères, éditeurs à Grenoble.