

BULLETIN DES SCIENCES MATHÉMATIQUES ET ASTRONOMIQUES

J. BERTRAND

Du transport de la force par l'électricité

Bulletin des sciences mathématiques et astronomiques 2^e série,
tome 7, n° 1 (1883), p. 85-96

<http://www.numdam.org/item?id=BSMA_1883_2_7_1_85_1>

© Gauthier-Villars, 1883, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Bulletin des sciences mathématiques et astronomiques » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

DU TRANSPORT DE LA FORCE PAR L'ÉLECTRICITÉ (1);

PAR M. J. BERTRAND.

Léon Foucault, pour démontrer dans une usine la perfection d'un régulateur de vitesse, confia un jour à la machine à vapeur le

(1) *La Lumière électrique, journal universel d'électricité*, directeur scienti-

soin de donner l'heure aux ateliers. Sans pendule, sans échappement, l'horloge fut conduite par la même bielle que les laminoirs; l'aiguille, dont l'aspect n'avait rien d'insolite, aurait pu, sans retarder pour cela d'une minute, transmettre et régler tout le travail; solidaire de la roue principale, elle en partageait la puissance.

Les dimensions, la masse et la vitesse des organes d'une machine ne peuvent rien apprendre sur l'énergie qu'ils recèlent. Quiconque a visité de grandes usines en a pu faire la curieuse remarque et voir, par exemple, une paire de cisailles ouvrir et fermer ses puissantes mâchoires, prête à couper indifféremment une barre de fer ou une baguette d'osier, sans ralentir en rien son mouvement.

Les forces électriques présentent des contrastes analogues, l'intensité d'un courant n'en détermine nullement la puissance; un faible courant peut gouverner un marteau de 100^{kg}, lorsque, à côté de lui, un autre dix fois plus intense restera impuissant à conduire une machine à coudre. L'intensité règle l'effort actuellement disponible, mais elle s'affaiblit par le travail accompli, et la diminution est fort inégale pour des courants d'apparence identique. Un courant, sous ce rapport, ressemble à une roue dont la vitesse ne peut révéler si elle est capable d'un travail de 10 chevaux ou prête à s'arrêter sous la pression d'une main posée sur elle. On peut comparer la pile à un réservoir dont l'eau s'écoule; la vitesse dépend de la hauteur du liquide, mais le ralentissement est réglé par son volume.

Pour définir un courant, plusieurs éléments sont nécessaires; jamais un physicien n'oubliera d'en tenir compte, l'erreur serait trop évidente et trop forte. Mais plus d'une fois, pour abrégé, on a négligé de les mentionner explicitement, et l'on peut, dans des livres également dignes de confiance, rencontrer sans développements des propositions telles que celles-ci :

fique M. du Moncel. — *The Electrician, a weekly Journal of theoretical and applied Electricity and Chemical Physics*, published by James Gray. London. — *Elektrotechnische Zeitschrift*, redigirt von Dr K. Ed. Zedzche, Berlin. — *Le transport électrique de l'énergie*, conférence faite à la Société d'encouragement par M. Maurice Lévy, ingénieur des Ponts et Chaussées. — *Die magnetoelektrischen und dynamoelektrischen Maschinen*, dargestellt von Gustav Glaser de Cerv. Wien, Pest, Leipzig, 1883. — *Electric transmission of power, its present position and advantages*, Paget Higgs, London, 1879. — *Réunion internationale des électriciens*, Comptes rendus sténographiés, Paris, 1882.

L'énergie d'un courant est proportionnelle au carré de son intensité !

L'énergie d'un courant est proportionnelle à son intensité !

L'énergie d'un courant est indépendante de son intensité !

Chacune de ces propositions, en apparence contradictoires, devient exacte quand on complète l'énoncé :

L'énergie d'un courant, *quand la résistance est invariable*, est proportionnelle au carré de son intensité.

L'énergie d'un courant, *quand la force électromotrice est donnée*, est proportionnelle à son intensité.

L'énergie d'un courant, enfin, est indépendante de l'intensité, *en ce sens* qu'avec une intensité donnée, quelle qu'elle soit, on peut, en disposant de la résistance du circuit, le rendre capable de tel travail qu'on voudra.

C'est ainsi qu'un géomètre peu soucieux de la précision du langage pourrait dire :

La surface d'un triangle est proportionnelle au produit de ses trois côtés ; sous-entendant que le rayon du cercle circonscrit est donné.

La surface d'un triangle est proportionnelle à son périmètre ; sous-entendant que le rayon du cercle inscrit est donné.

La surface d'un triangle est indépendante de son périmètre ; voulant dire qu'avec un périmètre donné un triangle peut avoir, entre des limites fort écartées, telle surface que l'on voudra.

L'intensité d'un courant n'est pas changée quand on augmente dans la même proportion la force électromotrice et la résistance du circuit, c'est la loi d'Ohm ; mais la dépense d'énergie et le travail disponible deviennent bien différents. Supposons deux courants de même intensité traversant un même laboratoire : le premier est produit par une force électromotrice égale à l'unité, en présence d'une résistance également mesurée par un ; la force électromotrice qui donne naissance au second est mesurée par 100, ainsi que la résistance du circuit. Le galvanomètre, s'il est parfait, leur assignera la même mesure ; le voltamètre n'accusera entre eux aucune différence appréciable ; l'inégalité des énergies est très grande cependant, et toutes les épreuves la mettront en évidence.

Un même accroissement apporté aux résistances des deux cir-

cuits pourra décupler l'une et faire varier l'autre seulement de la dixième partie de sa valeur; le premier courant deviendra donc dix fois plus faible, lorsque l'altération du second sera presque insensible; un fil de platine introduit dans l'un sera chauffé à blanc, fondu peut-être, lorsque, dans l'autre, il s'échaufferait de quelques degrés seulement.

Si, sans changer les résistances, on demande aux courants un travail mécanique, la réaction, en vertu d'une loi qui ne souffre pas d'exception, sera égale à l'action, et les organes mis en mouvement par les rhéophores feront naître une force électromotrice inverse, qui affaiblira les courants et qui, pour un même travail, sera la même dans les deux; la force électromotrice primitive détermine donc pour chacun d'eux le travail dont il est capable, et l'on pourra demander au second, presque sans l'affaiblir, une dépense de force plus que suffisante pour épuiser complètement le premier.

Un mauvais conducteur introduit dans un circuit peut, en s'échauffant, devenir une source de lumière : le courant s'affaiblit alors par l'accroissement de la résistance. Lorsque, séparant les deux électrodes, on fait jaillir entre eux un arc étincelant, une diminution de la force électromotrice accompagne l'accroissement de la résistance; dans un cas comme dans l'autre, l'effet produit dépend de la force électromotrice et de la résistance et n'a aucune relation nécessaire avec leur rapport, qui mesure l'intensité.

Le calcul de l'intensité appliqué à l'éclairage donne un résultat singulier dont l'explication est facile. Au moment où s'allument les lumières produites par des courants divisés partant du courant principal et allant le rejoindre, l'intensité, sous l'influence de ce travail dépensé, reçoit un accroissement subit très sensible au galvanomètre. Le phénomène semble paradoxal, mais tout étonnement doit cesser si l'on examine le rôle des courants dérivés; ils sont adjoints, non substitués au courant principal; en les mettant en jeu, quelle que soit leur résistance, on ouvre à l'électricité des voies nouvelles, sans en supprimer aucune. Le courant total doit donc devenir plus intense; mais chacun des courants partiels sera d'autant plus faible que leur nombre sera plus grand, et, comme la faculté éclairante diminue beaucoup plus rapidement

que l'intensité, non seulement chaque lumière, mais en même temps l'éclat total, doit diminuer lorsqu'on essaye d'en trop accroître le nombre.

Les dangers apportés par les courants électriques sont, aussi bien que leurs effets utiles, indépendants de l'intensité. Une puissante machine peut imiter la foudre et la porter au loin. L'effet dépend ici d'une grandeur nommée *potentiel*, que, pendant longtemps, les physiciens, sans la définir avec précision, ont appelée la *tension*, et qui, même pour un faible courant, peut grandir sans limite et foudroyer l'imprudent qui toucherait au fil. Ce grave danger, dont rien ne révèle l'approche, est pour les constructeurs une difficulté très sérieuse; les plus hardis semblent disposés à passer outre, en isolant les fils de leur mieux; ils dégagent leur responsabilité par des avertissements et des menaces: la précaution n'est pas suffisante. Le premier chemin de fer construit en France, entre Saint-Étienne et Lyon, restait, pour les habitants des villages traversés, la voie principale de communication; on laissait, entre deux trains, les enfants jouer et courir sur les rails. Les accidents se renouvelant chaque semaine, on afficha des règlements sévères: personne n'en tint compte; le maire d'une petite ville eut l'idée ingénieuse de défendre, *sous peine de mort*, le stationnement sur la voie: le nombre des accidents ne diminua pas; une municipalité voisine, en infligeant une amende de 1 franc, obtint un résultat un peu meilleur.

L'impossibilité de demander aux piles voltaïques un travail industriel a été considérée comme un axiome; cela reviendrait, disait-on, à brûler, pour produire la force, un combustible plus coûteux que le charbon, le zinc par exemple, à l'aide d'un comburant plus rare que l'oxygène de l'air.

Le raisonnement serait discutable, et l'avenir peut-être montrera dans les courants secondaires et dans l'accumulateur un éclatant démenti.

Quoi qu'il en soit, le courant aujourd'hui transmet la force et ne la produit pas: c'est l'induction qui transforme utilement la puissance mécanique en électricité. Arago, le premier, a observé un effet de l'induction sans en deviner le principe. Une boussole à laquelle un constructeur illustre avait promis tous ses soins se montrait inférieure en apparence aux instruments les plus gros-

siers. Gambey, cependant, tout en répondant de la mobilité de l'aiguille, constatait avec impatience l'inexplicable lenteur de ses oscillations, sans soupçonner qu'un jour un ingénieux inventeur, à l'aide d'un effet tout semblable, ferait faire au galvanomètre un progrès de grande importance. La cause fut promptement découverte. La résistance, sans aucun doute possible, provenait de la boîte de cuivre. Le cuivre n'agit pas sur l'aiguille aimantée en repos, mais il met obstacle à son mouvement. Cette action, comparable au frottement de deux corps qui ne se touchent pas, paraissait inexplicable; les découvertes de Faraday lui assignèrent dans la Science sa véritable place. Le changement de distance des courants ou des aimants, ou la variation de leur intensité, fait toujours naître entre eux de mutuelles influences. Un aimant immobile, si puissant et si rapproché qu'il soit, ne peut faire naître ni faire varier un courant voltaïque; mais, si on le rapproche ou l'éloigne d'un conducteur, si l'on accroît ou diminue brusquement sa puissance magnétique, on verra tout à coup, dans son voisinage, le courant diminuer, s'accroître ou naître, suivant les conditions de l'expérience. Deux courants se repoussent ou s'attirent sans exercer sur leur intensité une influence qui naît immédiatement si on les rapproche ou les éloigne: et, dans leur voisinage, un fil conducteur sans autre force électromotrice devient le siège d'un courant engendré par induction. L'effet produit n'est dû ni à l'état magnétique ou électrique des corps ni à leur situation mutuelle, mais aux changements qui s'accomplissent et à l'agitation en quelque sorte du milieu électromagnétique. Les physiciens, en se familiarisant avec des phénomènes si étranges, s'étonnèrent bientôt de ne pas les avoir devinés et prévus. Lorsque deux courants, cédant à leur action mutuelle, s'approchent l'un de l'autre, la force vive produite, empruntée à leur énergie primitive, ne peut, disait-on, manquer de la diminuer; il est donc naturel, nécessaire même, que deux courants de même sens qui s'approchent l'un de l'autre diminuent leur intensité; et, avec plus de hardiesse encore, on n'a pas hésité à en conclure que chacun d'eux doit faire naître dans tout fil dont il s'approche un courant qui, s'il s'en éloigne, doit changer le sens.

L'explication n'est ni rigoureuse ni complète. L'évidence invoquée, si elle était incontestable, devrait s'étendre aux actions de

tout genre. Une planète, par exemple, quand elle s'approche du Soleil, devrait en diminuer la puissance attractive et ce que nous nommons sa masse; les raisons à alléguer sont identiquement les mêmes. Sans oser en conclure que l'effet soit certain, ni le présenter même comme vraisemblable, il ne serait pas sans intérêt de rechercher quelles perturbations en résulteraient pour les théories de Mécanique céleste. La perfection acquise par la Science rend périlleuse toute entreprise contre les principes, et l'hypothèse de la variation des masses attirantes, si elle troublait les résultats acquis, serait par là convaincue d'inexactitude. Le calcul, cependant, vaudrait la peine d'être tenté, et l'on peut excuser à l'avance un résultat négatif par la petitesse du coefficient numérique que nos conjectures laissent inconnu.

La découverte de l'induction donna naissance presque immédiatement, il y a aujourd'hui plus d'un demi-siècle, à la machine de Pixii. La rotation d'un aimant, dans cet ingénieux appareil, fait naître un courant dont le sens varierait sans cesse si l'action d'une pièce nommée *commutateur* ne le redressait à chaque inversion; cet appareil, destiné aux cabinets de Physique et simplifié peu de temps après par Clarke, est fondé sur le même principe que les puissantes machines employées aujourd'hui.

Les perfectionnements cependant sont nombreux. Parmi ceux que le succès a consacrés, deux particulièrement doivent être signalés.

M. Siemens, d'abord, puis Wheatstone, indépendamment l'un de l'autre, eurent l'idée, jugée tout d'abord très heureuse, d'utiliser, sans recourir aux aimants, la puissante induction d'un champ magnétique. Il suffit, on le sait, de l'influence terrestre pour rendre toute masse de fer sensiblement magnétique et capable de faire naître un faible courant dans un fil rapidement entraîné près d'elle. Ce courant, à son tour, excite la puissance magnétique, qui réagit sur lui, et les deux effets, s'accroissant l'un par l'autre, effacent bientôt toute différence entre la masse de fer donnée et le plus puissant des aimants.

L'autre progrès, dû au physicien italien Paccinotti, a fourni au célèbre constructeur et inventeur Gramme la pièce caractéristique de ses ingénieuses machines. M. Paccinotti a résolu le problème, déclaré souvent insoluble, d'obtenir un courant continu sans faire usage du commutateur.

L'explication de l'expérience d'Arago, donnée par Faraday, est fondée cependant sur la production d'un courant continu; mais, en dépit de l'expérience, obscurcie peut-être par l'état des découvertes qui l'accompagnaient, les physiciens enseignaient comme une vérité évidente l'inversion des courants d'induction, selon que l'aimant s'approchait ou s'éloignait des positions d'équilibre.

Le principe ingénieux de Gramme est fort éloigné de l'évidence. Un anneau de fer doux tourne en présence des pôles d'un puissant aimant; sa rotation y détermine un état magnétique variable, qui tend à engendrer, sur les diverses parties d'un fil continu enroulé autour de lui, des courants de direction contraire qui, purement et simplement, le détruiraient si l'on bornait là l'expérience. Mais les forces électromotrices excitées dans ce fil continu, variables pour une même portion du fil, restent constantes en chacun des points où, par suite de la rotation, chaque portion se présente successivement. Il en résulte que deux positions fixes, occupées par des éléments qui changent sans cesse, peuvent être assimilées aux deux pôles d'une pile, à l'aide de deux collecteurs, dont la disposition est elle-même une ingénieuse invention; ils produisent un courant continu. Les machines de Gramme sont réversibles: un courant devient une force motrice capable de faire tourner l'anneau.

L'électricité se transporte sans frais; un fil suffit, quelle que soit la distance; la perte est grande malheureusement, et il faut l'atténuer.

Le courant produit par une machine peut en faire tourner une autre, mais celle-ci l'affaiblit par sa réaction et diminue le travail consommé par la machine qui le fait naître.

L'influence exercée par le travail d'un courant sur sa propre intensité est un principe de grande importance. Une expérience très élégante de M. Marcel Deprez le démontre et l'explique. Le courant produit par une machine de Gramme peut croître et diminuer, sous l'influence d'une machine à vapeur, dans les limites les plus étendues. Ce courant est mis en communication avec une seconde machine, entravée à dessein par une résistance qu'il faut surmonter pour la mettre en mouvement. Le courant, très faible d'abord, augmente graduellement; l'aiguille du galvanomètre qui mesure l'intensité s'avance sur son cadran jusqu'au moment où la machine

réceptrice commence à tourner; quel que soit ensuite le travail développé par la machine motrice, qu'il devienne deux fois, dix fois, cinquante fois plus considérable, l'intensité du courant ne change plus: l'énergie dépensée, en accroissant la vitesse de la machine réceptrice, fait naître une puissance inverse qui modère le courant et le rend invariable.

En accroissant, en effet, l'intensité du courant, on augmenterait la vitesse et avec elle la force électromotrice inverse qui le ramènerait à sa valeur primitive sans diminuer toutefois la vitesse acquise, car l'égalité de la puissance à la résistance assure, quelle que soit la vitesse, l'uniformité de mouvement.

Si, en s'accroissant, le travail dépensé ne peut faire varier l'intensité du courant produit, on ne verra pas moins augmenter le travail communiqué à la machine réceptrice. La force déterminée par l'intensité du courant est constante comme lui; mais l'autre facteur du travail, le chemin parcouru, est proportionnel à la vitesse. Chaque tour de la machine représente le même travail, mais le nombre des tours accomplis par minute peut grandir sans limite.

La théorie, d'accord avec l'expérience précédente, n'assigne aucun maximum au travail qu'une machine d'induction peut absorber et transmettre.

Une machine donnée peut engendrer tel courant et produire telle quantité de travail qu'on voudra; la vitesse de rotation, la force électromotrice qui en résulte et le travail à dépenser seront réglés en conséquence. Au delà de certaines limites malheureusement, on rencontre des difficultés et des dangers. Une machine qui tourne trop rapidement est bientôt hors de service, et une tension trop forte, quelles que soient les précautions prescrites, peut foudroyer l'imprudent qui les brave. On doit donc, pour chaque machine, imposer des limites rigoureuses à la vitesse et à la force électromotrice qui en dépend.

L'affaiblissement du travail moteur, quand on accroît l'effet obtenu, est la conséquence nécessaire de cette limitation obligatoire; il n'a rien de paradoxal.

Il en serait de même pour une machine à vapeur, si l'on imposait une limite à la tension de la vapeur. Supposons qu'une telle machine mette en mouvement les organes d'une pompe dont

le réservoir est à sec ; le travail utile est nul, et le travail dépensé, proportionnel à la tension de la vapeur et à la vitesse du piston, est employé tout entier à vaincre les résistances passives en échauffant les pièces du mécanisme. Si la pompe mise en communication avec le réservoir élève 100^{lit} d'eau par minute, on verra tout à coup les mouvements se ralentir et, s'il est interdit d'accroître la tension de la vapeur, la machine absorber et offrir moins de travail, par cela même qu'on lui en demande davantage.

Supposons, pour entrer au détail, qu'une machine électrodynamique, en dépensant un travail de quatre chevaux, produise un courant qu'on laisse sans emploi ; si, mis en suite en communication avec une machine réceptrice, ce courant produit un travail d'un cheval, il ne faut pas dire : « la machine motrice dépense quatre chevaux, on en utilise un, le rendement est de 25 pour 100. » Ce serait une erreur : la machine motrice qui, travaillant à vide, dépensait quatre chevaux, n'en absorbera plus que deux seulement quand on utilisera son effet. Le rendement sera donc $\frac{1}{2}$, quoique l'effet produit soit le $\frac{1}{4}$ seulement de la dépense mesurée d'abord.

La diminution produite dans le travail de la machine motrice dépend, bien entendu, de l'effort demandé au courant, et il y a lieu de chercher la disposition la plus avantageuse.

Pour obtenir le plus grand rendement possible, il conviendrait d'accélérer la vitesse de la machine réceptrice en lui donnant toutefois pour limite celle de la machine motrice, sans quoi toutes deux s'arrêteraient, et le courant serait réduit à zéro. Mais, en accroissant ainsi le travail relatif, on diminue le travail absolu, et, lorsqu'à la limite on ne perd rien, c'est à la condition de ne rien produire.

Cette solution est donc à rejeter, et il arrivera bien rarement qu'on trouve profit à en approcher.

Pour obtenir, sans se préoccuper du rendement, le plus grand travail possible, il faut demander à la machine réceptrice le quart du travail que la machine motrice pourrait absorber sans produire l'effet utile. Le rendement, dans ce cas, ainsi que nous l'avons indiqué par un exemple, est égal à $\frac{1}{2}$, et la machine motrice absorbe la moitié seulement du travail primitif pour en utiliser le quart. Tous ces résultats, il est utile de le répéter, sont liés aux

conditions imposées par la prudence; si, disposant d'une force illimitée, on osait faire grandir indéfiniment la force électromotrice, le travail dépensé, le travail produit et le rendement pourraient croître en même temps sans limite; mais, en bravant de grands dangers, on rencontrerait bientôt des impossibilités absolues. Quelque soigné que soit l'isolement, un fil, sur de grandes longueurs, présente toujours quelques points faibles; une trop grande tension, lors même qu'elle ne procurerait ni mort ni incendie, amènerait la perte de l'électricité sous forme d'étincelles et d'aigrettes lumineuses.

La résistance du fil qui réunit deux machines augmente avec sa longueur, l'intensité du courant est diminuée et avec elle, dans la même proportion, le travail dépensé et le travail produit; deux machines, par exemple, qui, placées à 100^m de distance, pourraient transmettre un travail d'un cheval, transportées à 1000^{km} l'une de l'autre et reliées par un fil de même section, ne pourraient plus fournir que des effets insignifiants, suffisants pour les besoins d'un télégraphe, mais sans aucune valeur industrielle.

Pour transmettre à de grandes distances un travail mécanique, il importe donc de modifier la construction et le mode d'action des machines. La distance, par elle-même, est sans influence; elle intervient seulement pour accroître la résistance du fil qui, proportionnelle à sa longueur, varie en même temps en raison inverse du carré du diamètre; elle dépend aussi de la nature du métal et, pour le cuivre à section égale, est cinq fois moindre que pour le fer. On pourrait donc aisément, soit par l'accroissement du diamètre, soit par le choix d'un métal plus conducteur, atténuer ou supprimer les effets de la distance.

Le travail transmis resterait invariable, malgré l'accroissement de résistance, si le carré de la force électromotrice grandissait dans la même proportion. Si, par exemple, la résistance devient cent fois et la force électromotrice dix fois plus grande, aussi bien sur la machine motrice que sur la machine réceptrice, l'intensité du courant, d'après la loi d'Ohm, sera dix fois moindre; mais, les machines tournant dix fois plus vite, il y aura compensation.

Cette solution, indiquée par les formules théoriques, ne tient pas compte malheureusement des bornes imposées par la prudence à la vitesse de rotation et à la force électromotrice.

La substitution du cuivre au fer, en procurant, à poids égal, une conductibilité cinq fois plus grande, accroîtrait beaucoup la dépense. La solution imposée par les conditions du problème paraît être l'emploi des machines de grandes dimensions. Si l'on accroît dans un même rapport toutes les dimensions d'une machine, la force électromotrice, à vitesse angulaire égale, croît proportionnellement au carré du rapport de similitude, et c'est sur ce principe, démontré par M. Marcel Deprez et voisin d'ailleurs de l'évidence, que doit reposer sans doute la solution si importante du grand problème.

M. Marcel Deprez, qui, le premier, a obtenu déjà, pour le transport à grande distance, des résultats pratiques importants, accepte l'accroissement de tension, espérant en atténuer les dangers par l'isolement des appareils. Mais, au lieu de demander à l'accroissement de vitesse la production de la force électromotrice, il l'obtient très ingénieusement en diminuant le diamètre du fil enroulé sur la bobine, dont il accroît en même temps la longueur, de manière à lui conserver le même volume et à la machine le même aspect.

La transmission du travail à de grandes distances devient ainsi possible avec les machines mêmes et les fils de transmission des machines ordinaires, sans qu'il soit nécessaire d'accroître de façon inquiétante la vitesse de rotation des machines.

Cette solution, réalisée à Munich, pendant la dernière exposition, a donné de grandes et légitimes espérances. Elle n'autorise pas cependant à affirmer que la transmission de la force à grande distance soit aussi facile qu'à un kilomètre.

Une locomotive parcourt en un quart d'heure la distance de Paris à Saint-Cloud; est-il possible, avec la même machine, d'aller dans le même temps de Paris à Versailles? Rien de plus facile, peut-on dire : chauffez plus fort et doublez la vitesse.

C'est de la même manière à peu près que la force peut se transmettre à 100^{km} aussi aisément qu'à 1000^{m} . Il suffit de décupler la force électromotrice.
