

COURS PUBLIC DE L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE
DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

MUSÉE
COMMERCIAL
LILLE

LA
TRANSMISSION ÉLECTRIQUE
DE L'ÉNERGIE

DANS LES

Pays Industriels de Houille Noire

PAR

R. SWYNGEDAUW

PROFESSEUR-ADJOINT A LA FACULTÉ DES SCIENCES

Chargé de l'Enseignement Électrotechnique à l'Université de Lille

Cours de Lille en 1904

LIBRAIRIE CII. DUNOD
49, Quai des Grands Augustins, 49
PARIS

1904

COURS PUBLIC DE L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE
DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE



LA

TRANSMISSION ÉLECTRIQUE DE L'ÉNERGIE

DANS LES

Pays Industriels de Houille Noire

PAR

R. SWYNGEDAUW

PROFESSEUR-ADJOINT A LA FACULTÉ DES SCIENCES

Chargé de l'Enseignement Électrotechnique à l'Université de Lille



N° BIB. 388479 / 165036
Boite 47

LIBRAIRIE CH. DUNOD
49, Quai des Grands Augustins, 49
PARIS

PRÉFACE

Depuis que M. Marcel Desprez l'a réalisée pour la première fois, l'idée de transmettre électriquement l'énergie à distance, est entrée dans une phase d'intensive application.

*De tous côtés, dans la région montagneuse des Alpes, la **houille blanche** est convertie en énergie électrique et transmise souvent aux Industriels à un prix de revient minime, incomparablement plus bas que l'énergie mécanique fournie par la machine à vapeur ou le moteur à gaz.*

Est-il possible de réaliser dans nos pays industriels de houille noire, des transmissions électriques d'énergie dans des conditions économiques comparables à celles des pays de houille blanche ?

Comment et dans quelles conditions peuvent-elles se réaliser ?

L'importance de ces problèmes ne peut échapper à tous ceux qu'intéresse la vie économique et sociale de notre région industrielle. C'est pour vulgariser cette importante question, que j'ai entrepris cette année de faire et de publier ce cours public sur les transmissions électriques de la force dans les pays industriels de houille noire.

On ne trouvera point dans ce livre toutes les théories et les règles minutieuses qui président à un transport d'énergie; certaines questions : la chute de tension notamment, ont été laissées volontairement dans l'ombre

J'ai voulu seulement donner une idée d'ensemble d'une solution du problème électrique à un auditoire d'Industriels et d'Ingénieurs et en

général de personnes qui ne sont pas spécialistes en électricité. J'ai employé les méthodes les plus élémentaires en insistant particulièrement sur les questions d'ordre économique.

J'ai été beaucoup aidé dans la dernière partie de ma tâche par mes devanciers : MM. Blondel⁽¹⁾, Saint-Martin⁽²⁾, de Marchena⁽³⁾, Dusaughey⁽⁴⁾. Le mode d'introduction du courant employé par M. Bernard Brunhes⁽⁵⁾, a simplifié notablement mon exposition.

J'exprime toute ma reconnaissance aux ingénieurs qui m'ont fourni les renseignements économiques inédits contenus dans ce volume.

Je remercie le Directeur de La Revue des Questions Économiques de Lille, d'avoir bien voulu sténographier et publier ces leçons dans sa revue et de faciliter ainsi ma rédaction.

Je prie mes collaborateurs, M. Nègre, chef des travaux, et M. Taufour, préparateur à l'Institut électrotechnique, de recevoir mes remerciements pour l'aide qu'ils m'ont apportée dans la correction des épreuves.

Lille, le 15 Juin 1904.

(1) De l'utilité publique des transmissions électriques d'énergie; — *Annales des Ponts-et-Chaussées*, 1898, 1^{er} trimestre.

(2) Etude sur les distributions d'énergie électrique; *Bulletin technologique de la Société des Anciens Élèves de l'École des Arts et Métiers*; mars et avril 1903.

(3) Etude sur les distributions d'énergie électrique dans les ateliers; *Revue Industrielle*, septembre à novembre 1903.

(4) Etude économique d'un transport d'énergie, chez Grattier, Grenoble.

(5) Leçons élémentaires d'électricité, chez Gauthiers, Villars.

ERRATA

Page 114. — 5^e ligne à partir du bas, lire $\frac{k_1}{100}$ au lieu de $\frac{k_1}{100}$

Page 116. — 9^e ligne, lire $\left(1 - \frac{k_2}{100}\right) \frac{Nr l i e^2}{s}$ au lieu de $\frac{Nr l i e^2}{s}$

Page 116. — 4^e ligne à partir du bas,

$$\text{lire } A = P (n a + T p + \left(\frac{P - k_1 P}{100}\right) n_1 a_1 o$$

$$\text{au lieu de } A P (n a + T p \left(\frac{k_1 P}{100}\right) n_1 a_1$$

Page 116. — 3^e ligne à partir du bas,

$$\text{lire } \left[\frac{P - k_1 + k_2 P + k_1 k_2 P}{100} - \left(1 - \frac{k_2}{100}\right) \frac{Nr l i e^2}{s} \right] n_2 a_2$$

$$\text{au lieu de } \left(\frac{P - k_1 + k_2 + k_1 + k_2 P}{100} - \left(\frac{k_2}{100}\right) \frac{Nr l i e^2}{s} \right) n_2 a_2$$

Page 116. — Avant-dernière ligne, lire l au lieu de l .

Page 117. — 3^e ligne, lire $\frac{k_1 + k_2 P}{100}$ au lieu de $\frac{k_1 + k_2}{100}$

Page 117. — § 91, 7^e ligne, lire *formule du § 71* au lieu de *formule*.

Page 117. — Dernière ligne, lire $\left(1 - \frac{k_2}{100}\right)$ au lieu de $\left(1 - \frac{k_2}{100}\right)$

Page 118. — 3^e ligne, lire $a_2 n_2$ au lieu de $a^2 n^2$

Page 122. — Equation (1), lire $+\frac{k_1 k_2}{100^2}$ au lieu de $-\frac{k_1 k_2}{100^2}$

Le Transport de l'Énergie dans les Pays Houillers

PREMIÈRE LEÇON

Considérations Générales sur l'Énergie

INTRODUCTION ET PROGRAMME

De nos jours, les transports d'énergie se multiplient rapidement dans les pays de montagnes où la *houille blanche* des cascades fournit une énergie hydraulique abondante et gratuite.

Il y a plusieurs années, la plupart des personnes ne concevaient pas les transports d'énergie ailleurs que dans les pays de montagnes et beaucoup, aujourd'hui encore, regardent comme une chimère, au point de vue économique, l'idée de faire dans notre région de houille noire ce qui réussit si bien dans les pays de houille blanche.

Je me propose, dans les cours publics de cette année, d'exposer la question du transport de l'énergie par courants alternatifs dans les régions de houille noire, et je montrerai, en me basant sur des résultats empruntés à des usines existantes, que cette chimère est une réalité économique des plus intéressantes pour toute notre région industrielle.

Nous allons reprendre la question par le principe. Nous nous demanderons d'abord ce que c'est que l'énergie, quelles sont ses formes, quelles sont les lois qui la régissent dans ses transformations. Qu'est-ce qu'un courant, quel est son rôle de véhicule de l'énergie ?

Ce rôle de véhicule de l'énergie est connu depuis la découverte du courant; il s'est longtemps borné à l'éclairage, à la télégraphie et la téléphonie. L'industrie électrique n'a pris réellement son essor que lorsqu'on a

découvert le moteur électrique capable de remplacer la transmission mécanique de la force dans les ateliers et les usines. Ce moteur, pour les courants alternatifs, est le moteur à champ tournant, dont nous exposerons les principes et les qualités dès la troisième leçon.

Mais malgré les avantages nombreux de la commande électrique des métiers et des machines outils, cette substitution n'est possible que si elle est économique.

Nous avons donc à voir dans la quatrième leçon si réellement il y a avantage économique à remplacer la transmission mécanique par l'électricité.

Par des nombres empruntés aux stations existantes, je vous démontrerai que cette transmission est toujours avantageuse si la puissance à transmettre est considérable, de plusieurs dizaines de milliers de chevaux, par exemple ; elle est même souvent économique pour des puissances notablement inférieures.

Mais des puissances aussi formidables ne sont pas concentrées en un même point ; pour former cette somme imposante de 30.000, 40.000 et plus de chevaux, il faudra grouper ensemble un certain nombre d'usines distantes de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres. Si toutes ces usines empruntent l'énergie à la même station centrale, il faudra donc que cette station fasse des transports d'énergie qui, dans notre région, pourront être de 50 à 100 kilomètres.

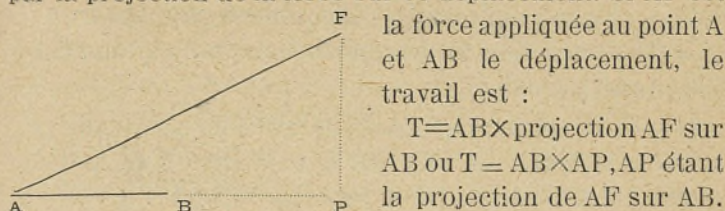
Il restera donc à étudier dans les leçons suivantes, comment on pourra réaliser économiquement ces transports, par quels moyens on pourra en éviter les dangers, par quelles précautions on pourra protéger les lignes contre la foudre et quelle sera la dépense par kilowattheure transporté.

Nous étudierons aujourd'hui l'énergie sous ses diverses formes et les principes qui régissent ses transformations.

ÉNERGIE

1. Travail.— Tout le monde a la notion de travail. Lorsqu'on veut remonter un poids, tout le monde sait que le travail est d'autant plus grand que le poids à remonter est plus lourd et qu'il faut le remonter à une hauteur plus grande. Cette notion vulgaire du travail a été précisée par

les mécaniciens du dix-huitième siècle, qui en ont donné la définition suivante : Le travail d'une force appliquée à un point matériel est le produit du déplacement de ce point par la projection de la force sur ce déplacement. Si AF est



la force appliquée au point A et AB le déplacement, le travail est :

$$T = AB \times \text{projection AF sur AB} \text{ ou } T = AB \times AP, AP \text{ étant la projection de AF sur AB.}$$

Le travail est *moteur* ou *résistant* : Il est moteur si le point se déplace dans la direction même de la force, et résistant si le point se déplace en sens inverse. Dans le cas de la figure, s'il se déplace de A vers B, le travail sera *moteur* ; s'il se déplace de B vers A, le travail sera *résistant*.

Prenons un exemple : lorsqu'un corps tombe, il suit la direction de la force qui l'attire vers le centre de la terre : le travail est moteur ; si on projette un corps de bas en haut, pendant qu'il monte et suit une direction inverse de la direction de la pesanteur, le travail est résistant, et, dans ce cas, on dit que le corps effectue un travail résistant contre la force extérieure qui le sollicite.

Le travail des forces appliquées à un corps est égal à la somme de tous les travaux des forces appliquées à chacun des points de ce corps.

Il faut mesurer ce travail. Si on exprime la force en kilogrammes et l'espace parcouru en mètres, le travail est mesuré en *kilogrammètres* (en abrégé *kgm*). Le *kilogrammètre* est le travail qu'il faut effectuer pour élever le poids d'un kilogramme à une hauteur verticale d'un mètre.

Les électriciens ne se servent pas du *kgm*, ou du moins ils ne s'en servent que d'une façon intermédiaire : l'unité pratique de travail qu'ils emploient s'appelle le *joule* qui vaut $\frac{1}{9,81}$ *kgm*.

9,81 est l'accélération de la pesanteur en mètres par seconde.

2. **Puissance.** — On rapporte souvent le travail d'une machine à l'unité de temps ; on est ainsi naturellement conduit à la notion de puissance ; la *puissance* d'un moteur est le travail qu'il effectue par unité de temps. En pratique, les mécaniciens emploient le *cheval-vapeur* qui est la puissance d'un moteur qui effectuerait un travail de 75 kgm par seconde.

Les électriciens emploient une unité de puissance qui s'appelle le *watt* ; le watt est la puissance d'un moteur qui effectuerait le travail d'un joule par seconde : le cheval-vapeur égale 736 watts.

Le watt, comme vous le voyez, est une puissance très faible que l'on a intérêt à remplacer par une puissance en rapport avec les puissances utilisées, par un multiple du watt : on se sert d'une unité mille fois plus grande que le watt, le *kilowatt*.

On a déduit la puissance de la définition du travail, mais inversement on peut déduire le travail de la définition de la puissance.

En effet, si P est la puissance, c'est-à-dire le travail effectué dans l'unité de temps, le travail effectué pendant un temps t sera P multiplié par t.

$$T = P \times t.$$

Si on évalue la puissance P en chevaux, et le temps t en heures, le produit $P \times t$ représente le travail exprimé en *cheval-heures*.

Si la puissance est exprimée en watts, le temps en secondes, le travail est exprimé en joules ; si on évalue la puissance en watts et le temps en heures, le travail est exprimé en *watt-heures* ; si la puissance est exprimée en kilowatts et le temps en heures, le travail est exprimé en *kilowatt-heures* : ce sont les expressions des électriciens.

Ces définitions préliminaires vont nous permettre de préciser ce que l'on entend par énergie.

3. **Energie.** — Les physiciens ont appelé « énergie d'un corps » sa capacité de produire du travail résistant contre les forces extérieures qui s'exercent sur lui ; et par

force extérieure on entend une force émanée de corps autres que lui-même.

L'énergie se présente sous diverses formes.

5. **Energie cinétique.** — D'abord la forme cinétique :

Un corps pesant projeté de bas en haut possède de l'énergie ; en effet, il est capable de se déplacer en sens inverse de la force de la pesanteur qui le sollicite de haut en bas. La balle qui sort avec vitesse du canon d'un fusil est capable de briser un obstacle, l'eau qui tombe d'un rocher est capable de faire tourner les roues d'une usine, le vent est capable de faire tourner les ailes d'un moulin, malgré les résistances qui s'y opposent.

La balle du fusil, la cascade, le vent sont des sources d'énergie, possèdent de l'énergie. L'énergie existe en tous les corps doués de mouvement, de vitesse : on l'appelle l'énergie *cinétique*, mot qui veut dire « en mouvement ». Elle se manifeste dès qu'une cause quelconque s'oppose à la continuation de ce mouvement.

Les mécaniciens du XVIII^e siècle savaient déjà mesurer cette énergie. Si on désigne par m la masse d'un point matériel, par v sa vitesse, l'énergie du point est $\frac{m v^2}{2}$.

Si on considère un point animé d'une vitesse v dirigée suivant une direction A B $\overset{A}{\text{-----}}\overset{B}{\text{>}}$, si on applique sur ce point une force dirigée en sens inverse B A, ce point sera capable de se déplacer dans le sens A B jusqu'à un point tel que le travail résistant effectué par la force soit précisément égal à $\frac{m v^2}{2}$.

Le produit $m v^2$ s'appelle la force vive du corps. La demi-force vive d'un point est donc par définition l'énergie cinétique de ce point.

L'énergie cinétique totale d'un corps est égale à la somme des énergies cinétiques de chacun de ses points.

Pendant qu'un corps effectue un travail résistant, la vitesse diminue, par suite son énergie cinétique diminue : on dit qu'il *dépense*, *perd* ou *dégage* de l'énergie ; ce sont des expressions qu'il faut retenir ; il dégage de l'énergie en quantité égale au travail résistant qu'il effectue. Si les forces

qui s'exercent sur le corps sont motrices, la vitesse du corps augmente, son énergie cinétique augmente : on dit que le corps *gagne* ou *absorbe* de l'énergie en quantité égale au travail moteur effectué sur lui.

5. **Énergie calorifique.** — La forme cinétique de l'énergie n'est pas la seule que nous connaissions. Denis Papin au xvii^e siècle avait déjà montré la force expansive de la vapeur renfermée dans un vase clos et James Watt à la fin du xviii^e siècle avait créé de toutes pièces la machine à vapeur. Hirn, vers le milieu du xix^e siècle, montra que, lorsque la machine à vapeur travaille, c'est-à-dire lorsque son piston se déplace de façon à faire effectuer un travail résistant contre les forces résistantes qui lui sont appliquées, il y a disparition d'une certaine quantité de chaleur ; c'est-à-dire que la chaleur que l'on communique à l'eau pour la vaporiser ne se retrouve pas entièrement lorsque la vapeur se condense : il y en a une partie de perdue, et pour chaque grande calorie perdue ou disparue, le travail résistant effectué est de 427 kgm (1), ou, ce qui revient au même, chaque petite calorie perdue correspond à un travail résistant effectué de 4.185 joules ; chaque grande calorie qui disparaît dans la machine à vapeur fait naître 427 kgm de travail résistant : perdre une grande calorie revient donc, d'après notre définition, à perdre une énergie mesurée par 427 kgm. La chaleur est donc un mode d'énergie et la lumière qui est une forme de la chaleur, est aussi un mode d'énergie.

Un corps chaud a plus d'énergie, toutes choses égales d'ailleurs, qu'un corps froid. Un corps qui s'échauffe gagne de l'énergie à raison de 427 kgm par calorie absorbée ; lorsqu'il se refroidit, il en perd autant de fois 427 kgm qu'il perd de calories. Par exemple, un kilogramme d'eau dont la température s'élève d'un degré centigrade gagne en énergie 427 kgm ; un kilogr. d'eau dont la température s'abaisse d'un degré, perd une énergie de 427 kgm.

En général, le phénomène calorifique n'est pas le seul

(1) On disait 425 kgm., il y a quelques années, mais des expériences plus précises ont montré depuis qu'il faut adopter le nombre 427.

qui affecte le corps : en même temps que le corps s'échauffe ou se refroidit, sa vitesse augmente ou diminue et, dans ce cas, l'énergie gagnée par ce corps est égale à la somme des énergies calorifique et cinétique gagnées par le corps ; l'énergie perdue par un corps est égale à la somme des énergies cinétique et calorifique perdues par le corps.

6. Energie potentielle et chimique. — Mais toutes ces transformations supposent implicitement que le corps ne change pas de structure intime, qu'il ne subit pas de modification permanente, c'est-à-dire de modification dont l'effet subsiste après que la cause a disparu. Si le corps présente des modifications chimiques, par exemple, outre l'énergie calorifique qu'il peut gagner ou perdre et l'énergie cinétique qu'il peut absorber ou dégager, il faudra, s'il y a modification permanente, tenir compte d'une augmentation ou d'une disparition d'une certaine énergie qui est sous une forme cachée, sous une forme interne, sous la forme *chimique* ou *potentielle*. Donnons quelques exemples : un ressort de montre qu'on a remonté est capable de faire tourner les rouages d'une montre malgré les frottements qui tendent à les arrêter ; le ressort de montre remonté possède de l'énergie sous la forme potentielle.

Une capsule de dynamite, si elle éclate, est capable de briser tous les obstacles : il suffira d'un choc pour faire dégager cette énergie qui était là à l'état potentiel.

Le ressort de montre remonté, la capsule de dynamite et le mélange tonnant possèdent de l'énergie sous la forme potentielle.

Un mélange de gaz d'éclairage et d'oxygène possède de l'énergie : il suffira de mettre un de ses points à une température de 500 degrés pour que tout le mélange fasse explosion et devienne capable de pousser le piston d'un moteur à gaz.

Si on pouvait mettre cette énergie en liberté sans dégagement ni absorption de chaleur et sans changement de force vive, si la capsule de dynamite, par exemple, pouvait éclater sans dégager de chaleur et de façon que la force vive initiale soit la même que la force vive finale, le travail résistant qui serait effectué par cette explosion de

la dynamite, mesurerait, d'après notre définition, l'énergie de cette capsule puisque l'énergie c'est le travail résistant que le corps peut effectuer.

Si donc il n'y avait que ce travail résistant, nous aurions la mesure de l'énergie ; mais, en général, cela ne se passe pas ainsi : en même temps que ce travail résistant se produit, nous constatons des dégagements de chaleur, des changements de forces vives et, dans ce cas, l'énergie est mesurée par la somme des accroissements d'énergie cinétique et calorifique et du travail résistant effectué ; on donne souvent le nom d'énergie *mécanique* à ce travail résistant.

Les corps explosifs absorbent de l'énergie en se formant ils dégagent cette énergie en se décomposant. Les corps exothermiques, comme on dit, qui dégagent de la chaleur en se formant, en absorbant au contraire en se décomposant. Ainsi l'hydrogène et l'oxygène en se combinant pour former de l'eau dégagent de la chaleur : ils perdent de l'énergie ; pour décomposer l'eau, il faut lui ajouter de l'énergie ; l'énergie du mélange hydrogène et oxygène, est supérieure à l'énergie de leur combinaison.

7. Transformations de l'énergie. — En résumé, l'énergie des corps se présente sous trois formes : énergie cinétique, énergie calorifique, énergie potentielle.

Ces diverses sortes d'énergie se transforment l'une dans l'autre dans les phénomènes qui frappent nos sens. Ainsi, dans un coup de fusil, l'énergie potentielle de la poudre se dégage et se communique sous forme calorifique au canon du fusil et sous la forme cinétique à la balle qu'elle chasse du canon ; cette balle, au moment où elle frappe l'obstacle, si ce dernier est parfaitement résistant, dégage de la chaleur jusqu'à se fondre elle-même par son choc ; ou bien, si l'obstacle n'est pas résistant, l'énergie cinétique de la balle se convertit en énergie calorifique et en énergie interne qui modifie la structure du corps frappé et sa propre structure à elle-même.

Dans la machine à vapeur, le mélange de charbon et d'oxygène possède de l'énergie ; dans la combustion, cette

énergie se dégage sous la forme calorifique, se communique à la chaudière et à la vapeur, de la vapeur au piston et aux machines actionnées par lui, et là elle se transforme en énergie cinétique interne et calorifique.

8. Conservation de l'énergie. — Toutes ces transformations de l'énergie sont dominées par un principe général déduit de l'expérience et qui jusqu'ici n'a jamais reçu de contradiction de la part des faits : le principe de la conservation de l'énergie ; on peut l'énoncer ainsi : *Considérons une surface fermée S et l'espace qu'elle renferme ; l'augmentation d'énergie des corps contenus dans cette surface S est égale à la diminution de la somme de toutes les énergies contenues dans le reste de l'Univers.*

Si l'énergie des corps contenus dans la surface S diminue celle des corps du reste de l'univers extérieurs à cette surface augmente de la même quantité. L'énergie perdue par un corps est gagnée ou absorbée par les corps ambiants.

Dans le coup de fusil dont je vous citais l'exemple tout à l'heure, l'énergie potentielle de la poudre s'est convertie en énergie calorifique et cinétique dont la somme est précisément égale à l'énergie potentielle de l'explosif : au moment du choc, l'énergie cinétique de la balle s'est convertie en énergies calorifique et interne qui échauffent et modifient les corps environnants et la somme de ces énergies est précisément égale à l'énergie cinétique de la balle.

Le principe de la conservation de l'énergie a une analogie frappante avec le principe de la « conservation de la masse » de Lavoisier. Quand deux corps réagissent chimiquement, la masse des corps combinés après la combinaison est égale à la somme des masses des corps composants avant la combinaison ; les réactions chimiques ne changent pas la masse des corps, ce sont les masses qui ont changé de place dans la structure intime des corps. Il en est de même pour l'énergie, dans la transformation des corps : l'énergie d'une partie des corps passe sous forme calorifique, cinétique et chimique sur l'autre en modifiant la nature physique ou chimique de ce dernier.

L'énergie ne se perd pas plus qu'elle ne se crée : l'énergie totale de l'Univers reste constante.

On envisage l'énergie comme une cause ayant une existence réelle, comme une entité physique analogue à la masse ; de même que la masse ne peut passer d'un endroit dans un autre sans parcourir tous les espaces intermédiaires, de même l'énergie ne peut passer d'un corps sur un autre sans passer sur tous les corps et tous les milieux interposés.

Le principe de la conservation de l'énergie s'applique à chaque instant de la transformation et en particulier pour une durée égale à l'unité. Si nous appelons *puissance* dégagée ou absorbée par un corps l'énergie qu'il dégage par unité de temps, la puissance dégagée par les corps contenus dans la région limitée par la surface S est égale à la puissance absorbée par tous les autres corps de l'Univers.

9. Dégradation de l'Énergie. — Mais si la somme totale des énergies de l'Univers est constante, il n'en est pas de même de la somme des énergies transformables.

La vie, au point de vue biologique, industriel ou matériel, est une série de phénomènes dans lesquels il se produit des transformations de l'énergie d'une forme dans une autre en général plus utile : nous nous nourrissons d'aliments pour convertir l'énergie de ces aliments en une énergie plus utile pour notre organisme ; dans la machine, nous transformons l'énergie du charbon et de l'oxygène en une énergie plus utile qui se retrouve dans les objets fabriqués, les tissus ou les outils. On appellera *rendement* de la transformation ou de la machine le quotient de l'énergie utile W_u recueillie par l'énergie totale W_t fournie à la machine :

$$\text{Rendement} : \frac{W_u}{W_t}$$

Ce rendement n'est jamais supérieur à l'unité, car l'énergie utile obtenue serait supérieure à l'énergie totale qui a servi à l'obtenir, ce qui serait contraire au principe de la conservation de l'énergie.

Ce rendement est égal à l'unité lorsque l'énergie utile est sous la forme calorifique.

Ce rendement est plus petit que l'unité si l'énergie utile que l'on désire n'est pas sous la forme calorifique, si c'est une énergie cinétique ou chimique.

Et cela n'a rien de contradictoire avec le principe de la conservation de l'énergie. Voici pourquoi : c'est que, en même temps que l'on produit l'énergie que l'on désire, l'énergie que l'on veut obtenir, on produit toujours de l'énergie calorifique, spontanément, sans qu'on le veuille : ainsi dans l'exemple déjà cité du coup de fusil l'énergie potentielle de la poudre se convertit partiellement en énergie cinétique communiquée à la balle (qui est l'énergie utile que l'on veut produire), mais elle produit aussi de l'énergie calorifique qui chauffe le canon du fusil.

Le dégagement de chaleur est dans l'essence même des phénomènes de la nature.

Cette énergie calorifique apparaît comme un déchet de fabrication. En effet, elle présente cette propriété qu'elle n'est plus transformable complètement en une autre énergie. Carnot a démontré que, pour que l'énergie calorifique puisse se transformer en travail, il est nécessaire qu'il existe une différence de température entre les deux corps agissants ; dans la machine à vapeur, il faut une différence de température entre la chaudière et le condenseur ; il n'existe pas de machine à feu à vapeur ou à gaz sans qu'il existe des différences de température. Carnot a démontré d'autre part que le rendement d'une machine à vapeur, quelque parfaite qu'elle soit, est toujours inférieur au quotient de la différence de température entre la chaudière et le condenseur par la température de la chaudière comptée à partir de 273 degrés au dessous de zéro.

Par exemple, si nous prenons une machine dont la chaudière a une température de 200 degrés et le condenseur 0 degré, le rendement sera toujours inférieur à $\frac{200}{473}$.

Dans la pratique, il est beaucoup plus petit.

Ainsi donc, les énergies chimique et cinétique des corps se transforment en énergie quelconque en donnant de la chaleur, en fournissant de l'énergie calorifique. Et cette

énergie calorifique ne peut pas se convertir entièrement en énergie cinétique et potentielle. Bien plus, une fois produite sur un corps, cette énergie calorifique tend spontanément à passer sur tous les corps plus froids environnants. Le passage de l'énergie calorifique d'un corps sur un autre ne cesse que lorsque la température de ces corps est la même. Spontanément donc, l'énergie calorifique créée en un endroit déterminé se distribue sur tous les corps de l'Univers, de façon à empêcher toute transformation future de cette énergie, en énergie chimique ou cinétique, puisque l'énergie calorifique, pour se transformer, exige une différence de température entre les corps agissants.

Puisque dans la plupart des transformations qui nous intéressent ou qui nous sont utiles, nous créons constamment de l'énergie calorifique, nous épuisons par cela même le stock d'énergie transformable de l'Univers.

Par la transformation incessante de son énergie chimique, mécanique en chaleur, l'Univers tend vers un état de repos absolu, vers l'absence complète de vie et de mouvement, vers la mort.

Mais cette mort de l'Univers par épuisement de son énergie transformable peut être retardée par l'emploi de machines à rendement élevé; s'il est exagéré de pousser la prévoyance pour nos générations futures au point de se préoccuper de leur existence dans quelques millions d'années, cette préoccupation aurait du moins cet avantage de profiter avant tout à la génération présente.

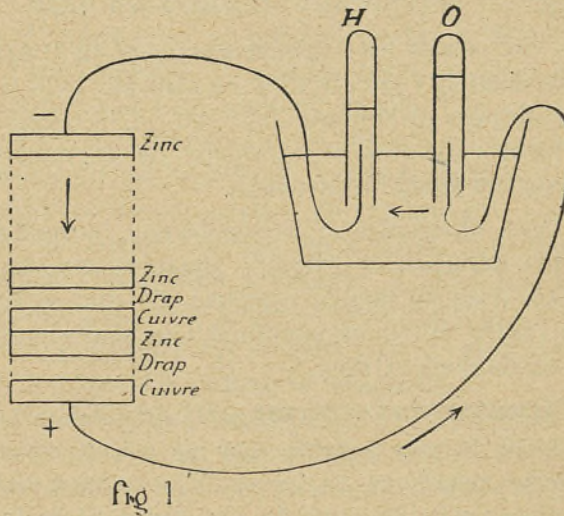
Les transports d'énergie par le courant électrique offrent ce moyen.

Nous commencerons leur étude dans la prochaine leçon.

Le Courant Electrique

SON ROLE DE VÉHICULE DE L'ÉNERGIE

10. **Pile de Volta.** — Il y a un peu plus de cent ans, en 1800, Volta fut amené par l'expérience et le raisonnement à faire l'empilement suivant (*fig. 1*) : Sur un disque de cuivre, il plaça une rondelle de drap mouillée par de l'acide



sulfurique étendu d'eau, puis un disque de zinc, un disque de cuivre, une rondelle de drap, et ainsi de suite.

Il termina cette colonne par un disque de zinc et il lui donna le nom de *pile*.

On découvrit bientôt que cette pile produisait des phénomènes nouveaux qui caractérisent ce que l'on appelle le *courant électrique*.

11. Phénomènes fondamentaux du courant.— Si l'on réunit les extrémités ou *pôles* de la pile de Volta par un fil métallique, ce fil présente les propriétés suivantes :

1° Il s'échauffe et peut devenir incandescent dans ses parties les plus minces

2° Il dévie une boussole, c'est-à-dire une aiguille aimantée mobile sur un pivot, placée dans son voisinage ;

3° Si l'on coupe le fil en un point, une étincelle jaillit entre les portions coupées que l'on écarte et les deux phénomènes précédents cessent.

Ces trois caractères définissent le courant dans un fil. Toutes les fois qu'un fil s'échauffe et devient *en même temps* capable de dévier une boussole, on dit que le fil est parcouru par un *courant* et, dans ce cas, sa rupture en un point provoque une étincelle inévitable : *l'étincelle de rupture*.

4° Si l'on plonge les extrémités coupées du fil dans un vase contenant de l'eau acidulée, on constate, si le liquide est parcouru par un courant, que l'eau est décomposée en ses éléments : oxygène et hydrogène (*fig. 1*) ; il en est de même pour un liquide quelconque.

Ces trois phénomènes : décomposition, échauffement du liquide, déviation de l'aiguille aimantée, caractérisent le courant dans un liquide composé, ils sont corrélatifs l'un de l'autre. Si l'un est supprimé, tous sont supprimés ; si l'un existe, tous existent.

12. Circuit ouvert et fermé.— Si l'on peut passer d'une extrémité de la pile à l'autre par un circuit *extérieur* entièrement métallique ou formé d'une solution acide ou d'un composé métallique, on dit que *le circuit de la pile est fermé* ; on constate les phénomènes décrits plus haut : *le courant passe*.

Les métaux et les solutions métalliques ou acides sont dits *conducteurs* de l'électricité.

Si le circuit conducteur extérieur de la pile est coupé, de façon à présenter un intervalle d'air entre ses extrémités, *le circuit est dit ouvert* ; on ne constate pas les phénomènes décrits : *le courant ne passe pas*.

Un intervalle de mica, d'ébonite, de porcelaine, de verre, d'huile ou de paraffine produit le même effet ; l'air, le mica, l'ébonite, l'huile, la paraffine sont des *isolants* électriques.

13. Interrupteur. — On peut fermer et ouvrir à volonté le circuit de la pile à l'aide d'un *interrupteur*. Cet appareil est composé de deux masses métalliques dont l'une *mobile* autour d'un axe peut à volonté s'éloigner ou se mettre au contact de l'autre *fixe*.

La pièce fixe de l'interrupteur est attachée par un fil métallique à l'une des extrémités de la pile, la pièce mobile est réunie par un fil métallique à l'autre extrémité.

Suivant que l'on met les deux pièces métalliques de l'interrupteur en contact ou qu'on les sépare, on *ferme* ou on *ouvre* le circuit de la pile, on fait passer ou on supprime le courant.

14. Sens du courant. Electrolyse. — Le phénomène du courant est un phénomène dirigé. Si l'on plonge dans l'eau ordinaire ou acidulée les bouts libres de deux fils attachés aux extrémités de la pile, l'un se recouvre uniquement d'hydrogène, l'autre uniquement d'oxygène qui se dégage s'il est inoxydable comme le platine.

Dans l'une des éprouvettes qui entourent les extrémités des fils, nous trouverons de l'hydrogène, dans l'autre de l'oxygène. L'hydrogène se dégage toujours sur le fil en communication avec la même extrémité de la pile, l'oxygène toujours sur l'autre ; et si nous renversons la communication, le phénomène s'inverse également.

Ces deux fils ne présentent pas exactement les mêmes propriétés et l'on dit que le phénomène est dirigé. On appelle *sens du courant*, la *direction dans laquelle le métal est entraîné de la solution vers le fil sur lequel il se dépose*. On appelle *voltamètre* le vase dans lequel s'effectue la décomposition.

Les anciens physiciens imaginaient que les phénomènes du courant électrique étaient produits par l'écoulement d'un fluide électrique à travers les conducteurs, le liquide se décomposait par l'effet de l'écoulement de ce fluide, les atomes ou les *ions* métalliques en étaient entraînés dans le sens de ce courant ; le groupe métalloïdique uni au

métal dans la combinaison remontait le courant en sens inverse de l'écoulement de ce fluide. Ils appelaient *pôle positif*, l'extrémité de la pile de laquelle semblait venir le courant et *pôle négatif* l'extrémité vers laquelle semblait se diriger le courant. Avec ces définitions que nous conserverons, nous pourrions dire : *A l'extérieur de la pile, le courant va du pôle positif au pôle négatif.*

Mais si on observe ce qui se passe à l'intérieur de la pile, on constate que la pile s'échauffe et que si l'on place au voisinage de cette pile une aiguille aimantée, on constate que celle-ci est déviée, que l'eau acidulée des rondelles de drap est décomposée en ses éléments et qu'en particulier l'hydrogène est entraîné sur les rondelles de cuivre, l'oxygène sur les rondelles de zinc.

L'intérieur de la pile présente donc tous les caractères du courant ; et l'hydrogène étant entraîné sur le cuivre, on voit, d'après nos définitions, qu'*à l'intérieur de la pile, le courant va du pôle négatif au pôle positif* (fig. 1) ; de sorte que le circuit fermé d'une pile serait assimilable à un tuyau fermé sur lui-même en forme de la lettre O (fig 2) dans lequel se trouverait une pompe faisant constamment circuler la même eau dans un sens déterminé. Nous verrons §23 que l'énergie chimique joue le rôle de la pompe dans le circuit électrique.

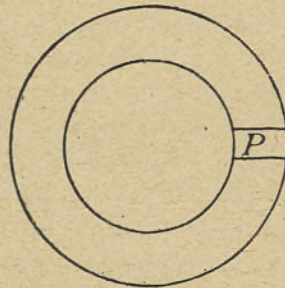


fig. 2

Tous les phénomènes présentés par le courant ne sont pas dirigés, tous ne dépendent pas du sens du courant ; ainsi, le dégagement de chaleur ne dépend pas du sens du courant ; que l'on fasse communiquer l'extrémité A d'un fil avec le pôle positif et son extrémité B avec le pôle négatif ou inversement il y a toujours dégagement de chaleur.

Le phénomène de déviation de l'aiguille aimantée est

un phénomène dirigé. Suivant que le courant parcourra un fil A B dans le sens A B

(fig. 3) ou dans l'autre B A,

l'aiguille aimantée mobile placée parallèlement au fil quand le courant ne le traverse pas tend à se mettre en croix avec lui quand le courant passe, mais la déviation change de sens avec le sens du courant.

A ————— B

fig. 3

On se sert de cette propriété pour connaître le sens d'un courant sans avoir recours à la décomposition des liquides. Ampère a donné la règle suivante :

Si on considère un observateur nageant dans un segment de courant de façon que le courant lui entre par les pieds et sorte par la tête et regardant l'extrémité de l'aiguille qui se dirige vers le Nord, qu'on appelle son pôle Nord, cet observateur voit le pôle Nord se diriger toujours vers sa gauche. Cette règle est absolument générale, il est facile de le constater par l'expérience.

15. **Galvanomètre.** — Pour augmenter l'action d'un courant sur l'aiguille aimantée, enroulons sur une bobine rectangulaire un fil traversé par un courant de façon à former un rectangle (fig. 4), soit ABCDE le sens du courant,

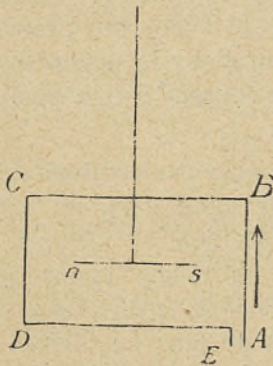


fig. 4

l'aiguille aimantée étant placée dans le plan du rectangle et mobile dans un plan perpendiculaire, on constate que le côté AB de ce fil tend à amener le pôle Nord n de l'aiguille ns en avant du tableau; les trois autres côtés contribuent à faire dévier l'aiguille dans le même sens. En enroulant plusieurs fois le fil sur le rectangle, nous augmenterons la force qui produit la déviation. Ces observations ont conduit à la construction du galvanomètre pour déceler la présence des courants les plus petits. Cet appareil se compose tout simplement d'une

aiguille aimantée, mobile, suspendue à un fil de cocon à l'intérieur d'une bobine de fil de cuivre recouvert d'isolant que l'on fait traverser par un courant.

16. **Intensité du courant. Ampèremètre.** — Les courants ne sont pas seulement différenciés l'un de l'autre par leur sens, mais encore par leur intensité. Deux courants traversant des liquides de même nature sont capables de décomposer des quantités différentes de liquide dans le même temps : on dit qu'ils ont une intensité différente; lorsqu'ils décomposent la même quantité de liquide dans le même temps, ils ont la même intensité. Un courant a une intensité double, triple d'un autre, s'il décompose deux, trois fois plus de liquide que l'autre.

On a pris comme unité de courant l'ampère. *Un ampère est le courant qui, dans la décomposition de l'eau acidulée, est capable de faire dégager $\frac{1}{96600}$ gramme d'hydrogène par seconde.* C'est-à-dire qu'il faudrait un courant de 96600 ampères pour dégager un gramme d'hydrogène par seconde, par conséquent pour décomposer 9 grammes d'eau.

Les courants sont donc différenciés par leur intensité et il est souvent très important de connaître cette intensité. Elle peut se mesurer par la décomposition de l'eau, mais plus commodément par le galvanomètre; en effet, plus le courant est intense, plus il a d'effet sur l'aiguille aimantée: on peut encore la mesurer par le dégagement de chaleur dans un fil, car plus le courant est intense et plus il dégage de chaleur.

Nous le montrerons par l'expérience; intercalons dans le même circuit qui réunit les pôles d'une pile, un fil fin horizontal et un vase à décomposition et plaçons au voisinage du fil une boussole; en même temps que l'hydrogène se dégage plus rapidement, le fil dégage de plus en plus de chaleur, il rougit de plus en plus et la déviation de l'aiguille augmente.

Les appareils qui mesurent les courants s'appellent des *ampèremètres* quand ils sont gradués de façon à donner immédiatement en ampères la valeur du courant.

qui les traverse ; on construit des ampèremètres basés sur l'action d'un courant sur l'aiguille aimantée ou sur leurs effets calorifiques.

17. Uniformité du courant dans chaque section du circuit. — L'analogie que nous avons constatée entre l'écoulement d'un liquide et le courant électrique dans la pile va nous conduire à d'autres analogies qui seront également vérifiées.

Si nous supposons que le tube fermé auquel nous avons assimilé le circuit électrique a des parois rigides, dans chaque section du tube, il passera la même quantité d'eau à chaque instant. Nous pourrions dire, si nous transportons l'analogie du tube à écoulement d'eau au circuit électrique, que chaque section du conducteur est traversée par le

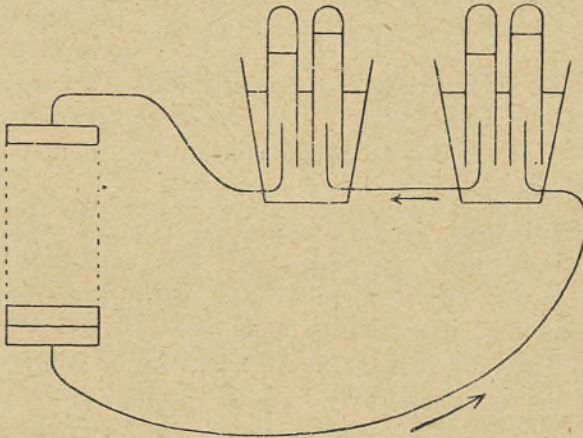


fig. 5

même courant ; en effet, si nous plaçons deux voltamètres §14 en deux points différents du circuit (*fig. 5*), nous constatons qu'il y a exactement la même quantité d'hydrogène qui apparaît sur les deux fils, la même quantité d'eau est décomposée, quelle que soit la différence entre les voltamètres, qu'ils soient petits ou grands, que le liquide soit très dilué dans l'un ou très concentré dans l'autre.

D'après notre définition, nous devons donc dire qu'à chaque instant chaque section du circuit électrique est

traversée par le même courant ; l'intensité du courant est la même en chaque section du circuit.

18. **Courants dérivés.** — Une autre analogie. Supposons que nous bifurquions le tuyau en deux dérivation et que nous fassions mouvoir la pompe. Il est bien évident que l'eau circulera dans les deux dérivation, et la quantité d'eau qui arrivera au point de bifurcation sera égale à la somme des quantités d'eau qui s'écouleront dans les dérivation. Eh bien, si, entre les deux points d'un conducteur qui réunit les deux pôles de la pile, nous plaçons un autre conducteur, nous créons une bifurcation qui produit deux dérivation conductrices : les deux conducteurs dérivés sont traversés chacun par un courant i et i' (fig. 6).

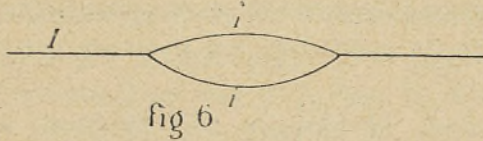


fig 6

conducteurs dérivés sont traversés chacun par un courant i et i' (fig. 6).

La somme des courants qui s'approchent d'un point de bifurcation est égale à la somme des courants dérivés qui s'en éloignent. Si un courant I se dédouble en deux courants dérivés i et i' , on a $I = i + i'$.

19. **Isolateur.** — Le courant se partage entre les deux conducteurs, et ceci est très important, car il faut savoir que la terre, le sol, est un conducteur électrique ; or, le sol étant conducteur du courant, si le fil métallique qui est parcouru par un courant est en communication métallique avec le sol, en deux points différents, une partie du courant amené dans le conducteur passera dans le sol. Si vous voulez éviter cette déperdition

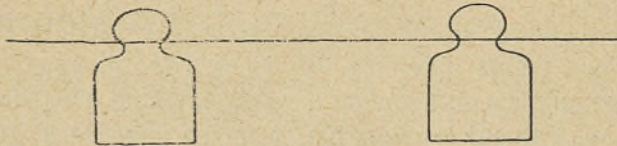


fig 7

de courant, il faudra isoler le conducteur c'est-à-dire suspendre le conducteur par un corps isolant (fig. 7), par

de la porcelaine, par exemple; ce corps isolant portera le nom d'*isolateur*.

20. **Générateurs électriques.**—L'appareil qui nous a servi jusqu'ici à produire le courant électrique a été la pile de Volta. On donne le nom de générateur électrique à tout appareil capable de créer un courant. Les générateurs électriques sont de plusieurs sortes.

21. **Générateurs chimiques et calorifiques.**—

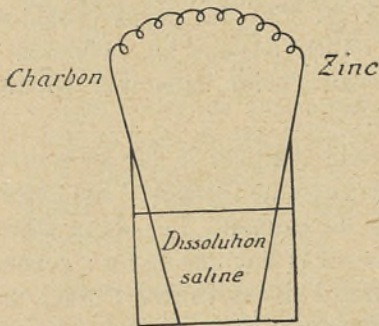


fig. 8

On obtient un générateur chimique en plongeant deux conducteurs métalliques de nature différente—quelconques d'ailleurs—par exemple du zinc et du charbon, dans un liquide qui peut les attaquer (*fig. 8*).

Il suffit de réunir ces deux conducteurs par un fil métallique pour observer les phénomènes du

courant. Une tige de fer et une tige de cuivre plongeant dans l'eau salée constituent une pile. Si je ferme le circuit à travers un galvanomètre, on observe une déviation de l'aiguille aimantée.

On obtient un générateur thermique de la façon suivante :

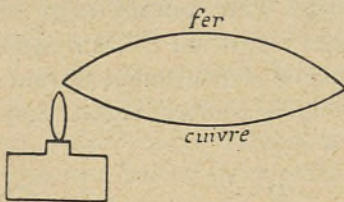


fig. 9.

on prend deux fils métalliques quelconques de nature différente que l'on soude ensemble de façon à former un circuit fermé (*fig. 9*). Si l'on chauffe l'une des soudures, on constate que

le circuit ainsi formé est parcouru par un courant : ces métaux sont ici le fer et le cuivre.

Aussi longtemps que ces diverses piles hydroélectriques et thermoélectriques étaient les seuls générateurs

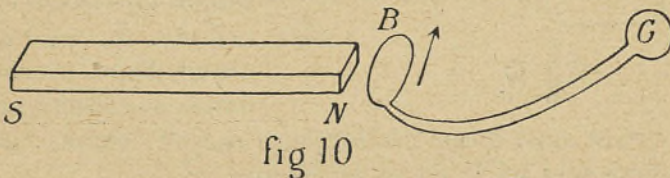
connus du courant, l'électricité est restée dans le domaine des laboratoires, ou des choses curieuses ou intéressantes comme la télégraphie. Il a fallu découvrir un moyen plus simple et plus économique de produire du courant électrique pour en faire un agent industriel.

22. **Générateurs mécaniques.** — Ce moyen fut découvert en 1836. On connaissait depuis longtemps les aimants, on en trouvait dans la nature.

Les aimants, vous le savez, sont des corps capables d'attirer le fer doux. On les obtient aujourd'hui facilement : il suffit de placer un morceau d'acier dans une bobine parcourue par un courant.

On constate que la propriété d'attirer le fer se trouve surtout concentrée aux extrémités de l'aimant ; ces extrémités s'appellent les pôles de l'aimant. Les deux pôles produisent les mêmes effets sur la limaille de fer ; cependant, on peut les distinguer l'un de l'autre : voici un aimant ; c'est une aiguille aimantée. Si je la place sur un pivot, elle s'oriente et la direction prise par l'aiguille est sensiblement la direction sud - nord géographique ; c'est toujours la même extrémité qui se dirige vers le nord ; on l'appelle le pôle nord ou austral de l'aimant ; c'est la même extrémité qui se dirige vers le sud, on l'appelle le pôle sud ou boréal de l'aimant.

Faraday a découvert en 1836 que si, devant un pôle d'aimant, on déplace un circuit conducteur fermé, ce circuit conducteur devient le siège d'un courant aussi longtemps que dure le déplacement : c'est un courant *induit*. Suivant qu'on effectue un même déplacement devant un pôle nord ou devant un pôle sud, le courant induit change de sens :



on peut le montrer en faisant passer le courant induit dans la bobine du galvanomètre (*fig. 10*).

On peut augmenter beaucoup l'intensité du courant induit ; il suffit pour cela de placer un noyau de fer doux dans le circuit induit. Si on répète l'expérience précédente quand la bobine induite est munie de fer doux, le galvanomètre dévie beaucoup plus.

Vous voyez que le rôle du fer doux dans une bobine est d'augmenter l'intensité du courant induit. Le nickel, le cobalt l'augmenteraient également, mais moins que le fer doux, et tous les autres corps ne l'augmentent pas. On dit que le fer, le nickel et le cobalt sont magnétiques, tous les autres corps ne le sont pas.

Les courants eux aussi sont capables d'induire un courant, sont capables d'être des *inducteurs*. Si on déplace la bobine induite de tout à l'heure devant l'extrémité d'une bobine parcourue par un courant, la première devient le siège d'un courant induit.

Nous augmentons l'induction si nous plaçons du fer doux dans la bobine induite ; nous l'augmentons aussi si nous plaçons le fer doux dans la bobine inductrice et si nous mettons du fer doux à la fois dans la bobine induite et dans la bobine inductrice, le courant induit en sera encore considérablement augmenté. Le rôle du fer doux est donc d'augmenter considérablement le courant induit que l'on obtient par le déplacement du conducteur devant un circuit.

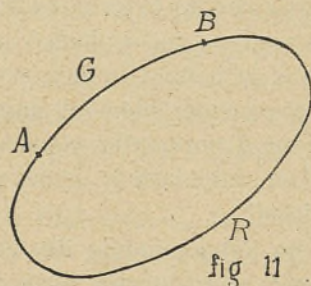
Une bobine munie du fer doux s'appelle un *électro-aimant* ; vous pourrez remarquer que cette bobine produit des courants inducteurs beaucoup plus intenses que l'aimant permanent de même volume, les électro-aimants étant beaucoup plus puissants que les aimants permanents, on emploiera toujours des électro-aimants plutôt que des aimants d'acier pour créer des courants industriels puissants.

En résumé, nous pouvons créer du courant par des moyens chimiques, ce sont les piles ou générateurs chimiques ; par l'échauffement, ce sont les générateurs calorifiques ; ou par déplacement d'un conducteur devant un aimant ou devant des courants : ce sont les générateurs mécaniques.

23. Rôle du courant dans le transport de l'énergie — Générateurs et récepteurs.

Mais que devient dans tous ces phénomènes le principe de la conservation de l'énergie § 8 : nous avons vu que lorsqu'un circuit est parcouru par un courant il s'échauffe, et échauffe les corps ambiants ; il décompose l'eau acidulée et, d'après ce que nous avons vu § 6, il augmente son énergie ; il dévie une aiguille aimantée et déplace le poids qui lui est attaché en sens inverse de sa direction et effectue un travail résistant : nous voyons donc par l'effet du courant, de l'énergie se créer sous la forme calorifique, chimique, mécanique, dans le conducteur parcouru par le courant et dans le milieu qui l'entoure ; mais d'après le principe de la conservation de l'énergie, cette création d'énergie n'est qu'une apparence, car si l'énergie augmente dans le conducteur qui réunit les pôles de la pile et dans le milieu qui l'entoure, il faut qu'elle diminue de la même quantité en d'autres régions de l'espace.

Si nous considérons un circuit fermé A G B R A, (fig. 11), parcouru par un courant, si l'énergie augmente dans le segment A R B et dans le milieu ambiant qu'il influence, le segment est un *récepteur d'énergie* ; et dans ce cas, l'énergie diminue dans le conducteur A G B et dans le milieu ambiant qu'il influence, le segment A G B est un *générateur d'énergie*.



Dans le générateur chimique, c'est l'énergie chimique du générateur qui diminue et se transforme pour se retrouver sous forme calorifique, chimique ou mécanique dans le reste du circuit.

Dans la pile thermo-électrique, c'est l'énergie calorifique qui disparaît et se transforme sur le reste du circuit sous forme d'énergie calorifique, mécanique ou chimique.

Dans un générateur mécanique, c'est l'énergie mécanique qui disparaît et se transforme en énergie mécanique, chimique ou calorifique.

24. **Propriétés de l'énergie électrique.**— En définitive, l'énergie a été transportée du générateur sur le récepteur et le véhicule invisible de ce transport, c'est le courant électrique : c'est cet agent mystérieux dont nous ne connaissons pas la nature, mais dont les faits affirment l'existence, qui a absorbé l'énergie dans le générateur sous la forme intermédiaire et passagère *d'énergie électrique* et l'a transmise instantanément, pour ainsi dire, au reste du circuit récepteur, quelque étendu qu'il soit sous forme utilisable : calorifique, mécanique ou chimique avec cette particularité merveilleuse : c'est que l'énergie se dégage au point où on le désire, où on le détermine d'avance. La chaleur et la lumière, se produisent dans les portions appropriées les plus minces du circuit, dans le filament de charbon de la lampe à incandescence ou entre les charbons de la lampe à arc. L'énergie chimique apparaît dans le voltamètre placé en un endroit quelconque du circuit ; l'aimant est dévié de sa position d'équilibre par chaque segment de courant et permet par l'amplification de ce mouvement de soulever des fardeaux et de produire de l'énergie mécanique.

Le courant électrique transporte l'énergie aux endroits les plus propices avec la plus grande facilité.

25. **Tension-Voltage.** — De plus, cette énergie électrique sera mesurée avec une facilité que ne connaissent pas les mécaniciens : si on désigne par P la puissance qui est mise en liberté dans un récepteur par un courant dont l'intensité est I , on peut écrire

$$P = VI$$

Le facteur V par lequel il faut multiplier l'intensité pour avoir la puissance, s'appelle la *tension aux bornes* du récepteur.

Si la puissance est évaluée en watts et l'intensité en ampères, la tension est évaluée en *volts* ; on l'appelle le *voltage*.

Lorsqu'un courant parcourt un circuit avec une intensité de 10 ampères, si la tension aux bornes du circuit est de 110 volts, la puissance est de 1100 watts.

Il suffira d'un appareil pour mesurer l'intensité, un *ampèremètre* analogue au galvanomètre, et d'un appareil pour mesurer la tension : le *voltmètre* analogue au précédent ; on lira le nombre d'ampères indiqué par l'ampèremètre et le nombre de volts indiqué par le voltmètre, on multipliera l'un par l'autre et on obtiendra la puissance dégagée ou absorbée en watts.

En résumé, le courant électrique est capable de transporter l'énergie d'un endroit à un autre après l'avoir transformée en telle énergie que nous voulons et dans tel endroit que nous marquons. C'est donc un des moyens les plus simples et les plus souples de transformation, aussi bien que du transport de l'énergie.

Jusqu'ici, vous avez pu voir qu'il y a une lacune dans ces qualités merveilleuses. Nous n'avons constaté, en somme, que des mouvement de va et vient ; mais en mécanique, il s'agit, en général, de produire un mouvement de rotation continu ; on a mis plus de cinquante ans pour découvrir la solution de ce problème ; il n'y a pour ainsi dire qu'une dizaine d'années qu'on l'a trouvée pour les courants alternatifs : nous verrons comment dans la prochaine leçon.

Les Moteurs à champ tournant

Nous allons nous occuper aujourd'hui des moteurs électriques, c'est-à-dire des appareils qui, sous l'influence du courant électrique, sont susceptibles de prendre un mouvement de rotation continu. Le moteur électrique le plus simple que l'on connaisse est le moteur à champ tournant.

26. **Expérience d'Arago.** — Depuis fort longtemps, on connaît une expérience très curieuse d'Arago, inexplicquée de son temps.

Arago faisait tourner un disque de cuivre rouge autour d'un axe vertical; il entourait ce disque d'une boîte au-dessus de laquelle un aimant pouvait tourner sur une

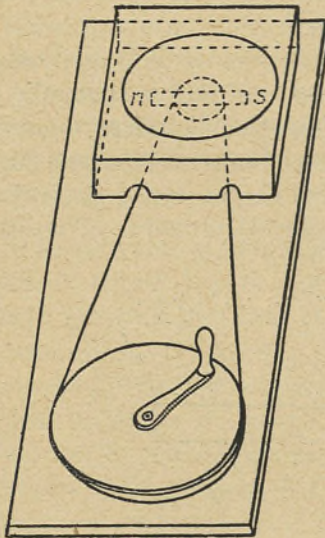


Fig. 12

pointe qui se trouvait sur le prolongement de l'axe du disque; la boîte servait d'écran pour éviter que le mouvement ne produise des courants d'air. Lorsqu'on met le disque intérieur en mouvement par l'intermédiaire d'une poulie, on constate que le petit aimant se met à tourner; il est pour ainsi dire entraîné par le disque de cuivre.

Inversement, si un aimant est mobile à l'intérieur de la boîte autour d'un axe vertical et si on place au-dessus de lui, sur le couvercle de la

boîte, un disque de cuivre qui peut tourner sur une pointe dans un plan horizontal, lorsqu'on fait tourner l'aimant, le disque tourne dans le même sens que lui (*fig. 12*).

Cette expérience d'Arago contient déjà en germe le principe des moteurs à champ tournant. Elle fut longtemps inexplicquée et inexplicable. Pour l'interpréter, nous allons rappeler quelques propriétés des aimants.

27. **Lignes de Force.** — Un aimant crée autour de lui ce que l'on appelle un *champ magnétique*, c'est-à-dire que si, au voisinage de cet aimant et à un endroit déterminé, on place une petite aiguille aimantée, celle-ci oriente sa ligne des pôles *Sud-Nord* § 22 autrement dit son axe magnétique dans une position d'équilibre bien déterminée, appelée la direction du champ magnétique; en un autre endroit, son orientation sera généralement différente. Si les aiguilles aimantées sont petites et très voisines, le pôle nord de l'une attirera le pôle sud de l'autre, de sorte que ces petits aimants s'accoleront l'un à l'autre par leurs pôles de nom contraire. Chacun d'eux dirigera son axe magnétique suivant la direction du champ magnétique. Cette série de très petites aiguilles aimantées formera une série de lignes qu'on appelle *lignes de force de l'aimant*.

Si, sur une feuille de papier au-dessous de laquelle nous avons placé un aimant, nous saupoudrons de la limaille de fer, ces grains de limaille constitueront autant de petits aimants, orientant leur axe magnétique suivant une direction bien déterminée. En donnant à cet écran de légères secousses, on permet à la limaille de prendre sa position

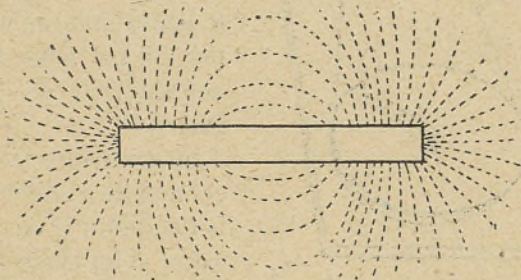


Fig. 13

d'équilibre malgré les frottements des grains sur le papier; et les grains dessinent des lignes qui sont les lignes de

force du champ (*fig. 13*) : c'est l'expérience du spectre magnétique.

Si je déplace cet aimant, les lignes de force gardent la même disposition autour de lui ; l'aimant emporte avec lui ses lignes de force.

Les lignes de force font pour ainsi dire corps avec l'aimant comme les branches font corps avec l'arbre ; on les a rendues visibles par la limaille, mais elles existent indépendamment d'elles. C'est la première expérience sur laquelle je veux retenir votre attention.

28. Loi de Lenz. — La deuxième loi que je veux vous rappeler est une loi de l'induction connue sous le nom de loi de Lenz § 22. Lenz a énoncé la loi suivante : *Lorsqu'on déplace un aimant par rapport à un conducteur quelconque, ce dernier est parcouru par des courants induits ; les forces électromagnétiques qui s'exercent entre cet aimant et le courant induit ont un sens tel qu'elles s'opposent au mouvement qui a donné naissance au courant.* Si le mouvement qui a donné naissance au courant induit est un mouvement d'éloignement du conducteur de l'aimant, les actions électromagnétiques tendent à rapprocher le conducteur de l'aimant, et inversement.

Si les courants induits sont produits par la rotation d'un disque de cuivre dans le champ magnétique, les courants induits gênent le mouvement qui leur a donné naissance et tendent à ralentir le mouvement du conducteur. Entre les deux pôles d'un électro-aimant (*fig. 14*), nous plaçons un disque de cuivre mobile autour d'un axe horizontal que mettra en mouvement un poids attaché à une ficelle enroulée sur l'axe du disque ; ce poids étant remonté, laissons-le descendre ; il fera tourner le disque d'un mouvement rapide. Dès que nous faisons passer le courant dans l'électro-aimant, immédiatement le disque ralentit considérablement aussi longtemps que le courant passe, et le disque reprend son mouvement rapide quand le courant est supprimé. Il se produit dans ce disque tournant dans le

champ magnétique des courants induits qui l'échauffent et qui, d'après la loi de Lenz, s'opposent au mouvement qui

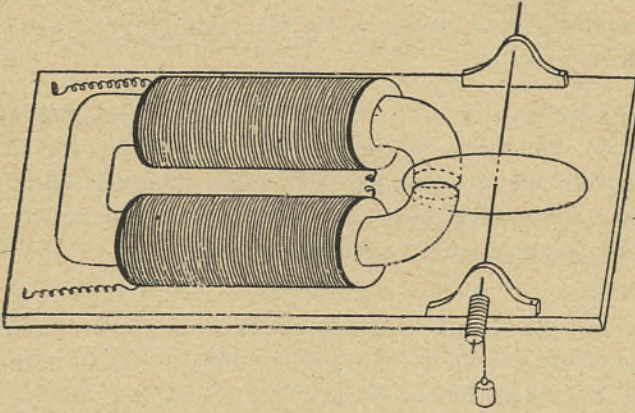


Fig. 14

leur donne naissance. Tout se passe comme si les lignes de force à fixées l'électro-aimant, pénétraient la matière et frottaient contre elle lorsqu'elle est traversée par un courant.

La loi de Lenz va nous expliquer l'expérience d'Arago.

Dans l'expérience inverse d'Arago, lorsque l'aimant tourne, il crée des courants induits dans le disque qui se trouve au-dessus de lui et le mouvement relatif en est gêné. Entre le disque et l'aimant tournant s'exercent des forces qui tendent à entraîner le disque dans le sens de l'aimant; s'il est mobile il est en effet, entraîné dans le même sens que l'aimant; dans l'expérience directe c'est le disque qui tourne et entraîne l'aimant pour les mêmes raisons. Les lignes de force que nous avons mises en évidence par le spectre magnétique se comportent comme des cordons élastiques réels qui iraient de l'aimant au courant; ces cordons élastiques fixés à l'aimant traversent les corps extérieurs sans difficulté s'ils ne sont parcourus par aucun courant, mais les traversent en les entraînant partiellement si les conducteurs sont le siège de courants.

Lorsque l'aimant tourne, les lignes de force, créant un courant dans le conducteur, entraînent ce dernier dans le sens de leur déplacement.

Pour concevoir l'idée d'un moteur à champ tournant, un troisième principe est nécessaire.

29. Identité des actions électromagnétiques exercées par les aimants et les courants. —

Lorsqu'un courant et un aimant créent les mêmes lignes de force, ils induisent dans les conducteurs avoisinants les mêmes courants induits et sont soumis aux mêmes forces extérieures.

En faisant tourner un aimant, nous faisons tourner ses lignes de force et nous faisons naître un courant induit dans un conducteur qui les coupe; en faisant tourner une bobine parcourue par un courant, autour d'un axe perpendiculaire au sien, nous faisons tourner les lignes de force qu'elle crée et tout conducteur placé dans le champ magnétique tournant ainsi créé, sera entraîné par ces lignes de force. L'induction par mouvement relatif d'un aimant ou d'un courant par rapport à un conducteur, dépend uniquement du mouvement des lignes de forces créées par l'aimant ou le courant.

Si donc, par un système de courants à circuits *fixes*, on pouvait réaliser un champ magnétique tournant, formé de lignes de forces tournant autour d'un axe, tout conducteur placé dans ce champ tournant serait entraîné par elles dans le sens de leur mouvement; et ainsi nous aurions réalisé le moteur à champ tournant.

Ce problème a été résolu par Ferraris à l'aide des courants alternatifs polyphasés.

Qu'est-ce qu'un courant alternatif ?

30. Courant alternatif. — De même que la pile produit un courant *continu* toujours dirigé dans le même sens, de même les phénomènes d'induction produisent naturellement un courant *alternatif*.

Considérons une série de pôles alternativement de noms contraires, également espacés les uns des autres sur une même couronne; et, sur une couronne parallèle à la première, distribuons des bobines en nombre égal aux pôles inducteurs (*fig. 15*).

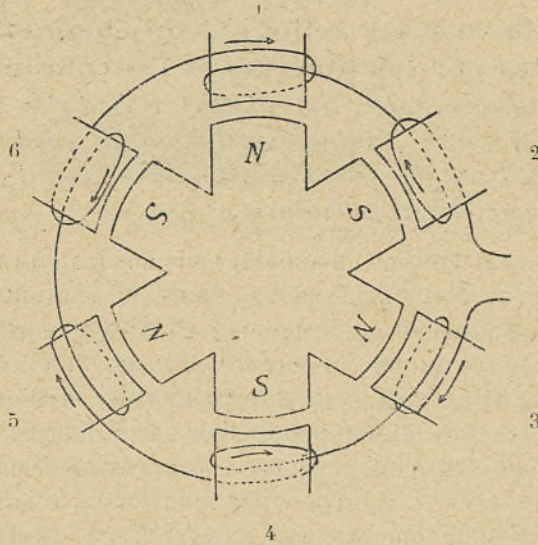


Fig. 15

Si nous faisons tourner la première couronne en laissant la seconde immobile ou inversement, nous créons des courants dans chaque bobine induite; si le courant induit a un sens déterminé quand un pôle nord passe devant la bobine § 22, il a le sens inverse quand le pôle nord est remplacé par un pôle sud; le courant qui traverse une même bobine induite change de sens autant de fois par tour qu'il y a de pôles sur la couronne, le courant est dit *alternatif*; si la couronne inductrice tourne régulièrement et si les pôles sont identiques, le courant reprend identiquement la même valeur au bout de la durée nécessaire pour qu'un pôle nord vienne se substituer au pôle nord voisin, c'est-à-dire au bout d'une *période*.

La *période* d'un courant alternatif est le temps le plus petit au bout duquel le courant reprend identiquement les

mêmes propriétés ; la *fréquence* est le nombre de périodes par seconde.

31. **Courbe d'un courant alternatif.** — Nous savons de plus que les courants ne changent pas brusquement d'intensité, qu'ils ne passent pas brusquement d'une valeur à une autre sans avoir passé par toutes les valeurs intermédiaires. Construisons deux axes rectangulaires $O t$ et $O i$, et portons sur l'axe horizontal, à partir du point O , autant d'unités de longueur qu'il s'est écoulé d'unités de temps depuis l'instant où l'on a commencé à compter les temps, instant qu'on appelle l' " origine des temps ". Soit P_1 le point obtenu. En P_1 , élevons une perpendiculaire à $O P_1$ et portons sur cette perpendiculaire une longueur qui contient autant d'unités de longueur que l'intensité du courant contient d'ampères § 16; nous obtenons ainsi le point M_1 . Si nous faisons cette opération pour chaque instant de la durée, le point M_1 décrit une courbe qu'on appelle la *courbe du courant alternatif* (fig. 16).

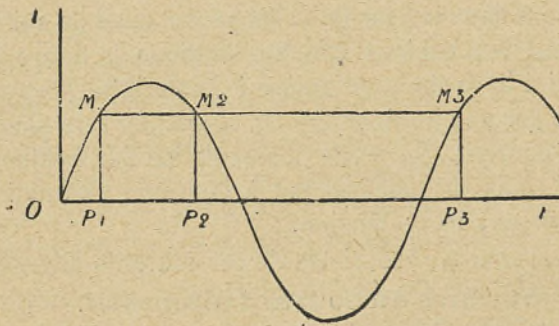


Fig. 16

Vous voyez qu'aux instants représentés par OP_1 et OP_2 , les ordonnées ont des longueurs égales $P_1 M_1$, le courant a exactement la même intensité ; cependant, il n'a pas les mêmes propriétés en tous ces points ; en M_1 il va en croissant ; en M_2 en décroissant ; en M_3 il va en croissant. En M_1 et M_3 , les deux valeurs du courant sont non

seulement égales, mais identiques. $P_1 P_3$ représente une période.

32. Alternateur. — Nous avons étudié ce qui se passe dans une bobine. Examinons ce qui se passe pour toutes les bobines. Considérons les bobines numérotées à partir de l'une d'elles dans le sens des aiguilles d'une montre (*fig. 15*); mais supposons d'abord contrairement à la figure que chaque bobine forme un circuit fermé séparé des autres.

Lorsque l'une d'elles est vis-à-vis d'un pôle, chacune des autres est vis-à-vis d'un autre pôle. A chaque instant, toutes ces bobines sont traversées par le même courant; il n'y a qu'une différence, c'est que le courant d'une bobine est en sens inverse du courant de la suivante. Nous pouvons associer ces bobines entre elles de façon que le courant de l'une passe dans l'autre exactement dans le même sens que celui qui y est engendré. Supposons une couronne inductrice à 6 pôles et 6 bobines induites. Si dans la bobine 1, le courant engendré a le sens de la flèche 1; dans la bobine 2, il aura le sens de la flèche 2; on associera les bobines de façon que le courant qui traverse la bobine 1, traversera la bobine 2 dans le sens de la flèche 2, la bobine 3 dans le sens de la flèche 3 et ainsi de suite; en réunissant les bobines comme l'indique la figure 15, et l'extrémité libre de la première à l'extrémité libre de la dernière par un circuit extérieur, ce dernier sera parcouru par un courant. Ce mode d'association des bobines est employé dans les générateurs à courants alternatifs ou *alternateurs* à haute tension.

Quelles sont les propriétés de ces courants alternatifs ?

33. Propriétés du courant alternatif. — Un courant qui passe dans un circuit dans un sens déterminé est capable de dévier une aiguille aimantée dans un sens donné; un courant continu fait dévier l'aiguille dans un certain sens; un courant de sens contraire la fait dévier en sens inverse.

Le courant alternatif industriel changeant de sens 50 à 100 fois par seconde ne dévie pas l'aiguille aimantée, car avant qu'elle n'ait eu le temps de se déplacer dans un sens, le courant inverse tend à la faire dévier en sens inverse, de

sorte qu'en fait elle reste immobile, et cependant, le courant échauffe le fil. Pour déceler cette action électromagnétique, il faudrait une aiguille d'une sensibilité excessive permettant de suivre les oscillations du courant; c'est ce qui est réalisé dans l'oscillographe de M. Blondel.

34. Courants polyphasés. — Certains phénomènes de l'optique physique amenèrent Ferraris à produire des champs tournants par des courants alternatifs polyphasés.

Reprenons la couronne de pôles inducteurs de tout à l'heure et prenons un nombre de bobines induites régulièrement espacées à raison de trois par paire de pôles, supposons la couronne rectifiée (fig. 17); si d est la distance comptée sur la périphérie des

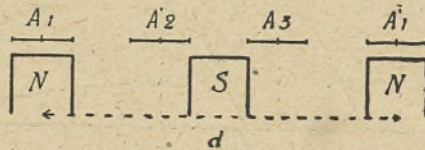


Fig. 17

axes de deux pôles nord consécutifs, $\frac{d}{3}$ est la distance des centres de deux bobines consécutives. Supposons que les 3 bobines se déplacent avec une vitesse uniforme devant les pôles inducteurs, la distance d est parcourue en une période T , la distance $\frac{d}{3}$ est parcourue en $\frac{1}{3}$ de période. A l'instant t les courants dans les bobines A_1 , A_2 , A_3 sont i_1 , i_2 , i_3 , et ne dépendent pour une même vitesse que de la position relative par rapport aux pôles inducteurs. Au bout d'un tiers de période, c'est-à-dire à l'instant $t + \frac{T}{3}$, la bobine A_1 aura pris la position qu'occupait A_2 à l'instant t ; elle est donc traversée par i_2 ; la bobine A_2 a pris la position qu'occupait A_3 à l'instant t , elle est donc traversée par i_3 , et la bobine A_3 a pris la position A_4 qui occupe par rapport au pôle nord N' la même position que la bobine A_1 par rapport au pôle nord identique N , elle est traversée par le courant i_1 ; il est facile de voir qu'au bout du temps $2 \frac{T}{3}$ la bobine A_1 est traversée par le courant i_3 , la bobine A_2 par i_1 , la bobine A_3 par i_2 ; au bout du temps

$3 \frac{T}{3}$, les courants qui traversent les bobines A_1, A_2, A_3 , sont redevenus i_1, i_2, i_3 . Ces trois courants i_1, i_2, i_3 , sont des courants périodiques de même période T tels que, si l'on connaît l'un d'entre eux, on connaît les autres à un instant quelconque du temps : les deux autres ont au même instant l'un, l'intensité qu'aura le premier $1/3$ de période plus tard, et l'autre l'intensité du premier $2/3$ de période plus tard.

Si la courbe du courant du premier est représentée par la courbe i_1 (fig. 18), la courbe du second s'obtiendra en

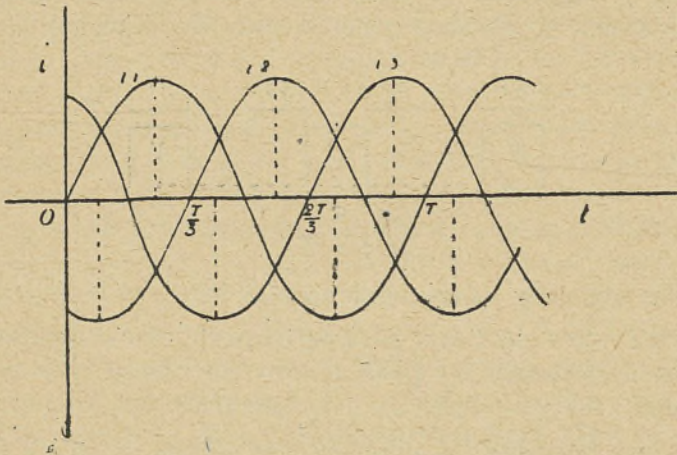


Fig. 18

faisant glisser la première dans son plan vers l'axe des temps croissants d'une durée égale à $\frac{T}{3}$ et la courbe du troisième d'une durée égale à $\frac{2T}{3}$

On dit que les trois courants i_1, i_2, i_3 sont décalés de $1/3$ de période l'un par rapport à l'autre. On les appelle des *courants triphasés*.

On obtient des courants tétraphasés en prenant un nombre de bobines double du nombre de pôles, on voit alors aisément que le courant qui traverse une bobine à un instant donné est le même que le courant qui traversait la précédente un temps $\frac{T}{4}$ auparavant : on appelle souvent les courants tétraphasés, des *courants diphasés*.

Un système de n courants décalés l'un par rapport à l'autre de $\frac{1}{n}$ de période est un système de courants polyphasés d'ordre n .

35. **Champ tournant.** — Il nous reste à montrer comment on peut produire un champ tournant avec des courants polyphasés parcourant des circuits immobiles. Supposons qu'il s'agisse de courants triphasés ; plaçons trois bobines de façon que leurs axes soient à 120° l'un de l'autre et fassent un angle de 120° ; numérotons les bobines

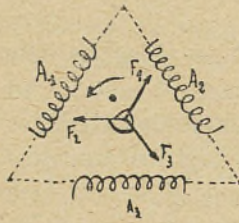


Fig. 19

A_1, A_2, A_3 dans le sens des aiguilles d'une montre (fig. 19). et faisons-les traverser par des courants triphasés i_1, i_2, i_3 , décalés d'un tiers de période l'un par rapport à l'autre. A un instant donné t , les courants créent un champ F_1 ; au bout du temps $\frac{T}{3}$

la bobine A_1 est traversée par le cou-

rant i_2 , la bobine A_2 par le courant i_3 , la bobine A_3 par le courant i_1 , les bobines A_1, A_2, A_3 , étant identiques et les axes faisant entre eux un angle de 120° , le champ F_2 et les lignes de force créées sont évidemment les mêmes que si les courants étaient restés les mêmes qu'à l'instant t et si le système des trois bobines avait tourné solidairement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre d'un angle de 120° ; or, il est clair que, dans ce dernier cas, tout le système de lignes de force aurait tourné d'un bloc d'un angle de 120° autour du centre du triangle équilatéral.

Le système des lignes de force créées par 3 courants triphasés traversant 3 bobines d'axes décalés d'un tiers de circonférence, l'un par rapport à l'autre, tourne donc de $1/3$ de tour par tiers de période, c'est-à-dire d'un tour par période.

Au lieu de placer trois bobines de façon que leurs axes dessinent un triangle équilatéral, plaçons en six dont les axes dessinent un hexagone régulier ; faisons parcourir ces bobines par des courants triphasés, de façon que si on fait le tour de l'hexagone, le courant d'une bobine soit décalé de $1/3$ de période sur le courant de la suivante. On

voit sans peine que le champ tournera de $1/6$ de tour en $1/3$ de période, c'est-à-dire un tour par deux périodes.

Avec 9 bobines, on le fera tourner 3 fois moins vite qu'avec 3.

Avec des courants tétraphasés, on dispose 4 bobines de façon que leurs centres dessinent un carré et que leurs axes soient à 90° l'un de l'autre ; si ces bobines sont traversées par des courants tétraphasés, c'est-à-dire décalés de $1/4$ de période, l'un par rapport au suivant, il se produit à l'intérieur du carré un champ tournant qui fait $1/4$ de tour par $1/4$ de période, c'est-à-dire un tour par période.

36. Moteur à champ tournant. — Plaçons une aiguille aimantée dans ce champ tournant et mettons en mouvement l'alternateur triphasé qui alimente les 3 bobines qui produisent le champ tournant, l'aiguille aimantée tourne avec la même vitesse que le champ ; si on remplace l'aiguille aimantée par un conducteur quelconque mobile, celui-ci se met à tourner dans le sens du mouvement du champ, d'après la loi de Lenz que nous avons rappelée tout à l'heure § 28 à propos de l'expérience d'Arago.

On augmente beaucoup l'effet des courants induits en munissant les bobines fixes d'un noyau de fer doux § 22 et en noyant les conducteurs induits dans un autre noyau de fer doux. Le système de bobines inductrices qui reçoivent les courants polyphasés et de leur noyau de fer doux, s'appelle le *stator* parce qu'il est en général immobile ; l'appareil qui tourne grâce aux réactions électromagnétiques exercées entre le champ tournant et les courants induits s'appelle le *rotor*.

Le stator est un cylindre creux, de fer doux feuilleté, formé par l'empilement les unes sur les autres, de tôles de fer doux, présentant des dents et des trous régulièrement poinçonnés sur le contour intérieur de chacune d'elles. Ces tôles isolées entre elles sont ensuite empilées les unes sur les autres de façon que les trous se correspondent pour former des rainures suivant une même génératrice du cylindre. C'est dans ces rainures que l'on introduit les fils qui doivent être parcourus par les courants polyphasés.

Le rotor est un cylindre de fer doux feuilleté, formé par l'empilement les unes sur les autres de tôles isolées présentant des dents et des trous régulièrement distribués sur leur contour extérieur.

Ces trous se correspondent pour former une rainure suivant une génératrice d'un cylindre dont l'axe passe par le centre des tôles.

C'est dans ces rainures qu'on loge les conducteurs induits.

L'une des formes les plus solides du rotor est la forme dite en cage d'écureuil; on plante dans la rainure du rotor de grosses barres de cuivre isolées, qu'on rive à leurs deux extrémités par des anneaux de cuivre, de façon à former

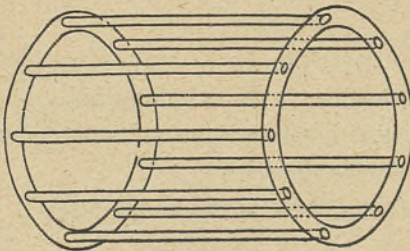


Fig. 20

une cage remplie de fer doux. La *fig. 20* reproduit la cage sans fer doux. La *figure 21* reproduit le rotor en cage d'écureuil munie de son fer doux. En définitive, on voit

que la partie mobile d'un pareil moteur est d'une solidité et d'une simplicité idéales. Le rotor est presque réduit à la simplicité d'une poulie mue par des cordons invisibles, les lignes de force

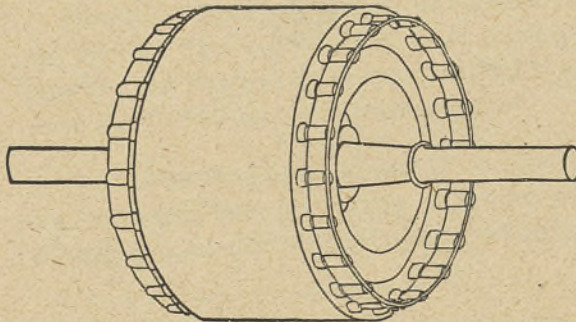


Fig. 21

du champ tournant. Le rendement d'un pareil moteur

atteint parfois 91 0/0 et sa vitesse varie à peine de 2 à 3 0/0 quand on passe de la marche à vide à la pleine charge.

Le moteur à champ tournant n'est d'ailleurs pas le seul moteur électrique ; les alternateurs peuvent être convertis en moteurs, s'ils sont traversés par un courant alternatif de même fréquence que celui qu'ils engendreraient s'ils tournaient en génératrice à la même vitesse et ils tournent ainsi en moteurs synchrones, avec une vitesse *absolument indépendante* de la charge (1). Il existe en outre des moteurs à courant continu qui possèdent la plupart des propriétés des moteurs à champ tournant ; ce que nous dirons pour les moteurs et générateurs à courant triphasé sera vrai en général pour les moteurs et générateurs à courant continu.

En résumé le moteur électrique de machines-outils répondra donc bien à nos desiderata, si la substitution de la transmission électrique à la transmission mécanique est possible au point de vue économique.

C'est ce que nous verrons dans la prochaine leçon.



(1) Pour plus de détails, voir : R. SWYNGEDAUX : *Phénomènes fondamentaux et principales applications du courant alternatif*. — imprimerie Le Bigot, 25, rue Nicolas-Leblanc, Lille et V. Dunod, Paris.

QUATRIÈME LEÇON

AVANTAGES GÉNÉRAUX ET ÉCONOMIQUES

DE LA

Distribution électrique de l'Énergie dans les Ateliers

ET

*Prix de Revient de l'Énergie dans une grande Usine Centrale***37. Distribution mécanique de la force. —**

Tout le monde connaît le principe de la distribution mécanique de la force dans les usines.

Un moteur à vapeur ou à gaz fait tourner un arbre d'acier par l'intermédiaire de courroies ou de câbles passant sur le volant du moteur et sur des poulies fixées sur l'arbre de transmission.

La force est transmise aux métiers par l'intermédiaire d'un autre système de poulies et de courroies.

Quand le métier est arrêté, la transmission principale fait tourner une poulie folle. Pour mettre le métier en marche, on fait passer la courroie sur la poulie motrice fixée sur l'arbre qui commande le métier.

38. Distribution électrique de la force. —

On peut actionner les métiers et les machines-outils par le moteur à champ tournant (1) que nous avons appris à

(1) Le moteur à champ tournant peut être remplacé par le moteur à courant continu, l'alternateur par la dynamo à courant continu.

connaître dans la dernière leçon. Dans ce cas, un alternateur triphasé § 34 est placé en un endroit quelconque de l'usine ; il est commandé par une machine à vapeur ou à gaz ou une turbine. Chaque machine-outil ou chaque groupe de métiers est actionné par un moteur à champ tournant § 36 fixé sur le sol ou au plafond et qui fait tourner la machine directement ou par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse. On réunit les circuits du stator du moteur aux circuits induits correspondants de l'alternateur par des fils conducteurs en cuivre. En fermant ou en ouvrant le circuit par un interrupteur, le moteur tournera ou s'arrêtera. La manœuvre de commande du métier est donc au moins aussi simple dans la commande électrique.

Nous examinerons aujourd'hui quelques avantages de la distribution électrique sur la distribution mécanique.

39. Souplesse de l'installation électrique. —

Un premier avantage de la distribution électrique est la souplesse de l'installation.

D'abord, l'alternateur et les moteurs électriques peuvent se placer en des endroits quelconques les mieux appropriés pour les machines : cette souplesse de la commande électrique se fera particulièrement apprécier en cas d'agrandissement de l'usine ; dans la transmission mécanique, au contraire, la transmission est maîtresse de la disposition des machines-outils, tous les métiers doivent se grouper autour d'elle.

40. Suppression des courroies. —

Un deuxième avantage réside dans la suppression des courroies, de leurs inconvénients et de leurs dangers.

Les courroies sont la cause de nombreux accidents ; elles nuisent à la clarté de l'usine, à sa bonne surveillance. Par leur mouvement incessant, les courroies sont de véritables brasseurs de poussières nocives chargées de microbes pathogènes engendrant les maladies. Leur suppression apporte du même coup plus de sécurité, d'hygiène et de clarté dans les ateliers.

41. Qualité et quantité du travail. —

La qualité du travail est meilleure, car le moteur électrique tourne à

une vitesse plus régulière ; ceci est vrai, notamment en filature et tissage, et même à cause de la facilité des arrêts ou des démarrages, la quantité du produit est souvent accrue.

42. Contrôle de l'énergie. — Le contrôle de l'énergie prise par le métier est d'une facilité extrême dans la commande électrique. Il se fait par la simple lecture d'un ampèremètre.

Dans la commande mécanique, ce contrôle est beaucoup plus difficile et nécessite des mesures spéciales qui le rendent pratiquement impossible.

Ce contrôle facile n'est pas à dédaigner, car un excès de courant indiqué par l'ampèremètre mettra l'industriel en garde contre un fonctionnement anormal et l'avertira d'un accident possible que la commande mécanique n'aurait révélé que trop tard.

43. Rendement. — Le rendement est souvent meilleur. Il peut paraître surprenant aux mécaniciens de prétendre que la transmission électrique est supérieure en rendement à la transmission mécanique, car il faut commencer par convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, transporter celle-ci jusqu'au métier, puis la convertir à nouveau par l'intermédiaire d'un moteur en énergie mécanique.

Mais, si on remarque qu'un alternateur a un rendement de 93 0/0 à 95 0/0, que la transmission peut se faire avec un rendement de 98 0/0, que les moteurs triphasés ont un rendement de 70 0/0 à 90 0/0 indiqué dans le tableau I.

TABLEAU I
Rendement de moteurs triphasés.

PUISSANCE	Surcharge de 50 0/0	Charge normale	75 0/0 décharge normale	50 0/0 décharge normale
1/4 de cheval.	70 0/0	74 0/0	73 0/0	70 0/0
1 id.	73 0/0	76 0/0	76 0/0	73 0/0
2 chevaux	76 0/0	78 0/0	77 0/0	74 0/0
5 id.	83 0/0	86 0/0	83 0/0	80 0/0
10 id.	85 0/0	87 0/0	87 0/0	85 0/0
20 id.	88 0/0	90 0/0	90 0/0	89 0/0

vous voyez qu'en réalité le rendement global de la transmission électrique de la force varie de 60 0/0 à 80 0/0 suivant que l'on emploie des moteurs de puissance de 1/4 de cheval ou d'une vingtaine de chevaux. Depuis la machine à vapeur, jusqu'au métier, les pertes d'énergie varient de 36 à 20 0/0, suivant que l'on se sert de petits ou de gros moteurs.

En ce qui concerne les pertes dans les transmissions mécaniques, le XVII^e Congrès de l'Association des Propriétaires d'appareils à vapeur nous donne des renseignements complets. Nous avons consigné ces pertes dans le tableau II.

TABLEAU II

INDUSTRIES	Valeurs extrêmes de la proportion des pertes	Valeur moyenne
Filatures	18 à 39 0/0	30 0/0
Tissages	22 à 50 0/0	36 0/0
Ateliers de constructions.	30 à 70 0/0	50 0/0
Minoteries	10 à 50 0/0	27 0/0
Scieries.	22 à 50 0/0	33 0/0

D'après les expériences faites dans les chantiers de Richardson à Hartlepool (Angleterre), les pertes ont été les suivantes dans ses huit ateliers (voir tableau III).

TABLEAU III

Ateliers	Largeur des Transmissions principales en mètres	Puissance transmise en chevaux	Proportion des pertes
1	113	48	36 0/0
2	238	94	25 0/0
3	157	44	46 0/0
4	174	29	52 0/0
5	211	56	36 0/0
6	116	76	30 0/0
7	36	10	70 0/0
8	74	16	50 0/0

La perte moyenne est de 34 0/0 pour 373 chevaux de puissance.

En général, le rendement de la transmission électrique sera donc au moins égal au rendement de la transmission mécanique, et cela sera surtout accentué si les usines ont subi des agrandissements successifs. Si on a été entraîné à faire renvois de courroies sur renvois de courroies, le rendement peut baisser au-dessous du chiffre dérisoire de 40 et 30 0/0.

Cependant il faut remarquer que les pertes dans les filatures et tissages à transmissions mécaniques bien installées ne sont que de 18 à 22 0/0, de sorte que la transmission mécanique semble l'emporter sur la transmission électrique. Mais remarquez que ces chiffres n'ont qu'une apparence de supériorité. En effet, les nombres de ce tableau se rapportent à la puissance normale transmise ; or, en général, la machine ne travaille pas en puissance normale et d'ailleurs, dans un atelier, toutes les machines ne marchent pas à la fois, il y en a qui sont arrêtées. Tandis que, dans la transmission électrique, le moteur électrique s'arrête et ne consomme pas d'énergie, dans la transmission mécanique les poulies folles continuent à tourner et à consommer inutilement de l'énergie. Cette considération est à méditer si on songe que, dans des filatures ou tissages notamment, il y a en moyenne et en marche normale 25 à 30 0/0 des métiers arrêtés. En résumé, il résulte de ces considérations que les rendements indiqués sur ce tableau ne manifestent qu'une supériorité apparente sur la transmission électrique : d'ailleurs, rien n'est plus éloquent que des chiffres, et je vais vous en citer :

D'après Sylvanus Thomson (*Courants polyphasés*, p. 412), l'installation de M. Richardson comprenait avant la transformation 31 machines à vapeur de 94 chevaux ; on les a remplacées par deux générateurs triphasés de 300 kilowatts chacun, commandés par deux machines à vapeur compound alimentant une quinzaine de moteurs de 10 à 30 chevaux et cinq de 65 chevaux. L'économie de charbon réalisée est de 100 tonnes par semaine.

D'après M. Selby Bigge (*Electrical Review*) 17 Septembre 1902, la Compagnie des freins Westinghouse a remplacé dans ses ateliers 30 machines à vapeur de 1.375 chevaux de puissance totale par une turbine Parsons attelée à des alternateurs commandant 57 moteurs électriques développant 1.065 chevaux; on a constaté une économie de 40 0/0 en vapeur et 32 0 0 en charbon.

Aux ateliers Vickers et Maxim, la commande mécanique demandait 476 tonnes de charbon pendant trois mois d'hiver. Après la transformation, la consommation était de 230 tonnes quoique l'on ait augmenté le nombre et la puissance des machines et doublé l'éclairage.

W. Tapley a communiqué à l'Institut Franklin des Etats-Unis (1902) les résultats obtenus par la commande électrique des machines dans l'imprimerie du Gouvernement.

Cette substitution a fait ressortir une économie considérable de combustible.

En 1894, avant la transformation, on avait brûlé pour 139.050 francs de charbon et de gaz. En 1899, après la transformation, on n'en a consommé que pour 28,130 fr.

On réalisait donc plus de 110.000 francs d'économie par an, et cependant, l'éclairage comporte, en 1899, 5.000 lampes de 16 bougies au lieu de 2.000 en 1894, et la production en 1899 était de 25 0'0 supérieure à celle de 1894.

Ces économies réalisées peuvent paraître surprenantes, aussi je veux y insister; nous avons vu en effet que le moteur ne marche pas toujours, qu'il y a des arrêts; par conséquent, la machine à vapeur travaille tantôt en pleine charge, tantôt à demi, ou même à quart de charge. Dans ces conditions, non seulement les poulies folles des métiers arrêtés et les transmissions tournant à vide absorbent inutilement de l'énergie, mais la machine à vapeur travaillant avec des écarts notables de sa charge normale a un mauvais rendement; au lieu de consommer le nombre de kilogrammes de charbon indiqué par le

constructeur dans son meilleur fonctionnement à charge normale, la machine consomme en demi-charge et quart de charge, plus de charbon, parfois la moitié en plus de la consommation indiquée et davantage ; il faut donc se garder de prendre comme consommation moyenne la consommation indiquée par le constructeur pour la charge normale. Ce régime très variable des machines a pour effet de produire un écart considérable entre la puissance nominale du moteur installé et la puissance moyenne utile qu'il développe. Je citerai à ce sujet des chiffres typiques fournis par M. S. Martin, ancien directeur de station centrale.

1° Dans une fabrique de lingerie, une machine de dix chevaux commandait par transmission une dynamo d'éclairage, une scie à rogner les draps et 39 machines à coudre. Le secteur électrique remplace la machine à vapeur et actionne la même transmission par un moteur électrique et il éclaire en outre l'atelier ; on constate que la puissance utile totale absorbée n'est que de 4 chevaux effectifs au lieu de 10 nominaux.

2° Dans une imprimerie et lithographie, deux moteurs à gaz de 25 chevaux de puissance totale marchaient dix heures par jour actionnant par transmission les diverses machines de quatre ateliers de typographie, lithographie, phototypie et papeterie, où se trouvaient vingt machines travaillant de deux à six heures par jour en détalquant les arrêts. On met sur chacune des machines un moteur électrique. La puissance totale de ces moteurs était de 16 chevaux et la consommation d'énergie n'était que de 30 kilowatts-heure par jour ; la puissance moyenne utilisée était de 4,1 chevaux au lieu de 25 chevaux nominaux. La dépense journalière de gaz était de 20 francs ; en achetant l'énergie à 0.30 c. le kilowatt-heure, la dépense n'était que de 9 francs par jour, près de la moitié (1).

(1) Etude sur les distributions d'énergie électrique : *Bulletin technologique* de la Société des Anciens Elèves des Ecoles d'Arts et Métiers. Mars et avril 1903.

44. **Frais d'entretien.** — Les frais d'entretien ne sont pas supérieurs dans la commande électrique à ceux de la commande mécanique ; au contraire. Les moteurs électriques tournant plus régulièrement que les transmissions mécaniques, fatiguent moins les machines. On a d'ailleurs à ce sujet un exemple absolument frappant qui nous est fourni par M. Marshall Osborne (1). En 1897, MM. Smith Waley et C^{ie} construisirent à Colombia deux flatures de coton de 12.000 broches chacune, l'une à commande mécanique par moteurs à vapeur, l'autre par moteurs électriques, le coût des réparations était de 50 0/0 inférieur pour la commande électrique.

45. **Eclairage électrique.** — En général, on cherche à faire dans les usines l'éclairage électrique. Si la commande électrique n'existe pas, il faut une installation spéciale qui, dans ces conditions, coûte assez cher ; si la transmission électrique existe, il suffit d'augmenter un peu la consommation de charbon, d'augmenter un peu les dépenses d'huile et d'entretien et l'éclairage électrique est alors fourni presque gratuitement.

46. **Comparaison des dépenses de première installation.** — Mais il y a un point sur lequel vous trouverez intéressant que je m'explique. C'est celui de la dépense de la première installation. On se figure en effet que, puisqu'il faut acheter des générateurs, des moteurs électriques bien compliqués, le coût de l'installation première sera bien supérieur au coût de première installation mécanique.

Mais lorsqu'on construit une usine nouvelle ou lorsqu'on agrandit une usine existante, la commande électrique n'employant que des transmissions légères, il ne sera pas nécessaire de renforcer les murs à certains endroits pour recevoir les lourdes transmissions mécaniques et la simplification du bâtiment se traduira par une réduction de la dépense.

(1) *Journal of the institution of electrical Engineers.* t. 31 p. 1273-1282.

Avec la commande électrique, il n'y a ni lourdes transmissions, ni longues courroies; on fera encore de notables économies de ce fait. Je vous montrerai par des exemples, que les économies réalisées de ce côté sont en général suffisantes pour couvrir la dépense supplémentaire de l'installation électrique.

M. Marshall Osborne, déjà cité § 44, donne un exemple caractéristique qui nous est fourni par la Compagnie Smith Waley, à Colombia.

Ces industriels décidèrent la création d'une nouvelle usine de 100.000 broches et demandèrent deux devis, l'un à transmission mécanique, l'autre à transmission électrique. La comparaison de ces deux devis montra que la commande électrique était moins chère que la commande mécanique. Elle comportait en effet une réduction de 10 0/0 sur le bâtiment, 61 0/0 sur les transmissions par arbres, 66 0/0 sur les courroies; ces économies compensaient largement le supplément de dépense de l'installation électrique.

Voici un deuxième exemple emprunté à l'« Eclairage électrique » (7 février 1903). La Société cotonnière de Mirecourt décida la création d'une usine de 500 chevaux environ. On présenta deux projets, l'un à commande mécanique, l'autre à commande électrique.

Les devis sont résumés dans le tableau IV.

TABLEAU IV

	1. Commande mécanique	2. Commande électrique
Machine à vapeur de 500 chevaux effectifs 75 t. avec volant à câbles dans le premier cas, sans volant dans le second cas.	65.000 fr.	60.000 fr.
Transmissions, arbres, poulies.	50.000	20.000
Mur principal, piles en maçonnerie.	15.000	0
Câbles de la machine à vapeur et du couloir à câbles	6.000	0
Couloir des câbles (250 mètres)	10 000	0
Dynamo pour lumière et sa transmission d'attaque	7.000	0
Alternateur, moteurs triphasés, canalisation, tableau et montage	0	83.000
Accumulateurs	2.440	2.440
	<u>155.440</u>	<u>152.440</u>

L'avantage était donc à la commande électrique. Si l'on ajoute à cela les autres avantages que nous avons énumérés, il est inutile de dire que la commande électrique a été préférée.

Pour les usines nouvelles, il y a donc intérêt et de nombreux avantages, à employer la commande électrique. Il y a également très grand intérêt à l'employer dans les agrandissements d'usines à raison de la souplesse de la commande électrique.

Mais, pour une usine où la transmission mécanique existe, y a-t-il avantage à la transformer en transmission électrique ? Dans le cas où les machines installées travaillent par intermittence, dans celui où les rendements sont mauvais par suite de renvois multiples, en particulier dans les usines agrandies successivement, dans le cas où la commande électrique améliorerait la qualité ou la quantité du travail de façon notable, oui, il y a en général avantage à la transformation.

C'est ainsi que dans la transformation faite par l'imprimerie du Gouvernement des Etats-Unis (1) la dépense entraînée par ce changement qui avait coûté 750.000 francs, a pu être récupérée en cinq ans par suite de l'économie sur le charbon et de l'augmentation du travail.

En résumé, il y a un réel intérêt économique et de nombreux avantages à faire la commande électrique plutôt que la commande mécanique.

Mais ces résultats que nous avons rappelés et qui sont tous en faveur de la transmission électrique se rapportent tous indistinctement à des usines de plusieurs centaines de chevaux ; il serait absolument erroné de croire que l'installation d'une petite usine centrale électrique pour transmission de force motrice dans une usine de faible puissance soit toujours plus économique que la transmission mécanique. Les industriels qui n'ont besoin que d'une faible puissance ont, en général, intérêt à emprunter leur énergie

(1) § 43.

à une usine centrale d'électricité comme le montrent les exemples cités tout à l'heure.

Il y a une loi capitale qui domine les considérations de prix de revient de l'énergie dans une usine, c'est que ce prix de revient de l'énergie est d'autant plus petit que la puissance de l'usine est plus considérable. Et cette loi garde toute sa force quand la puissance dépasse de beaucoup quelques centaines de chevaux, de sorte que la dernière partie de ma leçon sera consacrée à démontrer cette thèse que *les grands aussi bien que les petits industriels ont intérêt à emprunter leur énergie à une grande usine centrale de très grande puissance*, de quelques dizaines de mille chevaux.

47. — **Examen des Dépenses d'une usine électrique.** — Essayons, en effet, de nous rendre compte de ce qu'est une usine centrale d'électricité et de ses dépenses.

Pour produire le courant, il faut d'abord un capital de *premier établissement*. Il faut :

1° Des moteurs mécaniques à vapeur, ou à gaz, des chaudières ou des gazogènes.

2° Des alternateurs et leurs dynamos excitatrices ;

3° Un tableau de distribution qui porte les appareils de contrôle, ampèremètres, voltmètres ;

4° Il faut un bâtiment.

Outre cela, si l'usine fonctionne, elle fait des dépenses d'*exploitation* : 1° en combustibles ; 2° en huile et graissage ; 3° en salaire pour le personnel qui entretient et surveille les machines, enfin 4° en réparations des bâtiments et machines.

48. — **Variation des dépenses de premier établissement.** — Si toutes ces dépenses étaient proportionnelles à la puissance de l'usine, il est bien évident qu'il n'y aurait aucun intérêt à faire une grande usine plutôt qu'une petite ; mais il n'en est pas ainsi : la dépense par cheval installé dans une usine va en diminuant au

fur et à mesure que la puissance des machines va en croissant.

Dans ces conditions, nous aurons intérêt à augmenter considérablement la puissance des usines de façon à pouvoir augmenter notablement la puissance des machines.

Examinons plus en détail comment varie la dépense de premier établissement de cette usine centrale d'électricité.

Chacun sait qu'une machine à vapeur double d'une autre ne coûte pas deux fois plus que cette autre : la main-d'œuvre n'est pas deux fois plus grande, les matériaux utilisés ne sont pas en quantité deux fois plus considérables.

D'après le tableau XVIII, si l'installation complète d'une machine à vapeur de 50 chevaux coûte 36.000 francs, celle d'une machine de 500 chevaux ne coûte pas 10 fois plus ou 360.000 fr, mais 200.000 fr.

D'autre part, M. Blondel (1) estime de la façon suivante le prix du premier établissement d'un moteur à vapeur, bâtiments et accessoires.

PUISSANCE	PRIX DE PREMIER ÉTABLISSEMENT PAR CHEVAL
1	2000
5	1500
10	1000
50	800
100	600
500	400
1000	300
10.000	250

Il en est de même des générateurs électriques et des appareils du tableau de distribution (ampèremètres, volt-

(1) *Annales des Ponts et Chaussées*, p. 134, 1893, 1er trimestre.

mètres, interrupteurs, etc.) D'après M. Saint-Martin qui a fait une enquête extrêmement complète auprès de plus de cent usines centrales de production d'électricité, les dépenses de première installation par kilo-watt installé à l'usine, sont les suivantes (1) (tableau V).

TABLEAU V

*Dépenses de première installation
par kilo-watt à l'usine.*

Usines de 10.000 k.-w. et au-dessus.	600 à 800 fr. (2)
Usines de 10.000 k.-w. à 500 k.-w.	800 à 1.000 »
Usines de 5.000 k.-w. à 500 k.-w.	1.000 à 1.500 »
Usines de 500 k.-w. à 50 k.-w.	1.500 à 2 500 »

Si l'on passe d'une usine de 500 k.-w. à une usine de 10.000 k.-w. et au-dessus, on voit que, par kilo-watt installé, la dépense est deux à trois fois plus grande pour l'usine de 500 kilo-watts.

Les usines d'une puissance de 10.000 kilowatts et au dessus installées aujourd'hui reviennent à 500 fr. environ le kilowatt installé. Ces dépenses grèveront l'usine de frais d'amortissement du capital que nous étudierons plus loin.

49. Variation des dépenses d'exploitation. —

Voyons comment varient les dépenses d'exploitation ; elles varient sans doute avec le taux des salaires, le prix du charbon, mais ce qui nous intéresse surtout c'est la relativité de la dépense en un même lieu pour des usines de puissance différente.

COMBUSTIBLES. — Examinons d'abord la dépense en charbon, c'est-à-dire la question du rendement du groupe des chaudières et machines. Les génératrices électriques de 100 kw. ont déjà un rendement de 90 0/0. Les génératrices de plusieurs milliers de kilowatts ont un rendement de 93 0/0 à 95 0/0. La différence de rendement entre ces

(1) Loc. cit.

(2) Le chiffre inférieur se rapporte à la puissance la plus élevée.

deux machines n'est pas très grande et ce n'est pas de ce côté que nous aurons une réelle économie.

La consommation en vapeur des machines à vapeur et des turbines de diverses puissances est indiquée dans les tableaux VI et VII.

10 kilog. de vapeur correspondent à 1 kg. 200 de charbon.

TABLEAU VI
Consommation de vapeur saturée des machines à vapeur

NATURE DU MOTEUR A VAPEUR	PUISSANCE		Consommation de vapeur saturée en kg. par kilowatt-heure produit
	en chevaux	en kilowatts	
Machine à condensation	50	36,8	18,3
Machine Compound	500	368	10,4
Machine Compound sans surchauffe Marseille	1500	1104	10 à 12 en moyenne allumage compris
Machine à riple expansion Glasgow	3437	2500	8 à 8,5 à pleine charge 9,5 à demi-charge

D'autre part M. Witz (2), estime ainsi la consommation de vapeur saturée des diverses machines à vapeur à pleine charge.

PUISSANCE en CHEVAUX	TYPE	PRESSION de la vapeur en Kg	CONSOMMATION par cheval-heure indiqué
20 à 50	Monocylindrique	6	8
50 à 100	id.	id.	8 à 7
100 à 100	id.	id.	7
200 à 500	Compound	8	7 à 6
500 à 1000	Compound ou Triplex	9	6 à 5,5

(1) D'après M. Sauvage, *Encyclopédie Léauté, les divers types de machines à vapeurs* p 106 et 109 marche industrielle allumage non compris.

(2) *Eclairage électrique*, janvier 1902.

TABLEAU VII
*Consommation des Turbines à vapeur genre PARSONS
 en vapeur saturée*

LOCALITÉS	PUISSANCE EN KILOWATTS	Kil. de vapeur par kw.-heure produit				
(1) Exposition de Paris	50. . .	Pleine charge . . . 19				
		Demi-charge . . . 23,32				
(2) Bois du Luc	300. . .	Pleine charge . . . 11				
		Demi-charge . . . 14,3				
(1) Elberfeld	. 1.000 kw.	Pleine charge . . . 9,2				
		Demi-charge . . . 11,4				
		Quart de charge . . . 15,2				
Hartford	. 1.100 kw.	Pleine charge . . . 8,5				
		Demi-charge . . . 11,5				
Francfort	. 3.750 kw.	Pleine charge . . . 7				
Essen . . .	5.000 kw.	Garantie pour une consommation en vapeur surchauffée à 250°				
		<table border="0" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td style="font-size: 2em;">{</td> <td>Pleine charge</td> <td>5,6</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 2em;">{</td> <td>75 0/10 charge normale</td> <td>7,6</td> </tr> </table>	{	Pleine charge	5,6	{
{	Pleine charge	5,6				
{	75 0/10 charge normale	7,6				

Les consommations en vapeur surchauffée à 250° sont inférieures d'un dixième aux consommations en vapeur saturée et les rendements ne varient pas sensiblement avec la charge jusqu'à la demi-charge (3).

La consommation en vapeur et en charbon des machines à vapeur ou des turbines diminue de plus de la moitié lorsqu'on passe d'une machine de 50 chevaux à une machine de 3.000 chevaux, et on fait aujourd'hui des

(1) *Power*, décembre 1903, p. 677.

(2) *Le Génie civil*, 28 novembre 1903, p. 64.

(3) Witz, *Bulletin de la Société Industrielle du Nord de la France*; 2^e trimestre 1903, p. 335.

machines plus économiques ; celle des turbines varie dans le rapport de 3 à 1, quand on passe de 50 kilowatts à 5.000 kilowatts.

Sans entrer dans les détails, nous remarquerons qu'à égale puissance, les turbines ont un rendement plus faible que les machines à vapeur, mais les turbines ont un encombrement beaucoup moindre et le prix de première installation est environ les deux tiers de l'installation d'une machine à vapeur de même puissance.

GRAISSAGE — La consommation d'huile par kilowatt-heure va aussi notablement en décroissant à mesure que la puissance des machines va en croissant (voir tableau VIII). Cette consommation est toutefois notablement inférieure pour les turbines.

L'entretien et les réparations ne sont pas davantage proportionnels à la puissance.

Nous donnons ces dépenses dans le tableau XV pour les machines de 50 à 500 chevaux.

Elles sont consignées dans le tableau VIII pour les machines des stations de tramways de Marseille et de Glasgow.

TABLEAU VIII

*Dépenses par an pour nettoyage, graissage,
entretien et réparation*

	Kilowatt-heures produits par an	Nettoyage et Graissage	Entretien et Réparation
Marseille . . .	13.000.000	12 000 à 15.000 fr.	25.000 francs
Glasgow . . .	27.600.000	20 000 à 25 000 »	70.000 » (y compris main d'œuvre)

La dépense en frais généraux et entretien par kilowatt-heure est de 2⁹⁷ pour une machine de 50 chevaux, de 1 36 pour une machine de 500 chevaux, et de 0³⁶ pour une machine de 3.000 chevaux.

SALAIRES. — Il est aussi facile de conduire une turbine de 5.000 kilowatts qu'une machine à vapeur de 50 chevaux.

De ce côté, il y aura une économie relativement considérable de réalisée sur le prix du kilowatt - heure. En résumé, *toutes les dépenses par kilowatt - heure produit sont d'autant plus petites que l'on emploie des unités plus grandes.* On a une idée de cette variation par le tableau IX qui indique les dépenses totales d'exploitation par kilowatt-heure produit dans une usine de tramways, d'après le rapport de M. Thonet, présenté au Congrès de l'Union internationale des tramways en 1902. Les prix sont calculés pour du charbon de 15 fr. à 20 fr. la tonne.

TABLEAU IX

Prix de revient du kilowatt-heure à l'usine dans les usines de tramways.

		Prix de revient du kilowatt-heure :	
Unités de 1.000 chevaux . . .		4 à 6 centimes.	
id. 600 à 300 chevaux .		6 à 8 id.	
id. 200 à 150 chevaux .		8 à 10 id.	

Ainsi donc, suivant que l'on emploie des unités de 1.000 ou de 200 chevaux, le prix de revient varie du simple au double.

50. — **Durée moyenne d'utilisation.** — Le prix de revient de l'énergie dépend encore de la durée moyenne d'utilisation. Qu'entend-on par là ?

Si on évalue le nombre total de kilowatt-heures produit en une année et qu'on divise ce nombre par la puissance totale installée à l'usine évaluée en kilo-watts, on obtient la durée moyenne d'utilisation. Par exemple, une usine produit 1.500.000 kilowatt-heures par an ; cette usine a une puissance installée de 1.500 kw. : on divise 1.500.000 par 1 500 et on obtient la durée moyenne d'utilisation : 1.000 heures.

La durée moyenne d'utilisation est donc la durée en heures pendant laquelle il faudrait faire fonctionner toutes les génératrices de l'usine à leur *puissance normale* pour obtenir le nombre de kilowatt-heures produits.

Au lieu d'employer la durée d'utilisation, on se sert parfois du *coefficient d'utilisation*, c'est le rapport de la durée moyenne d'utilisation au nombre total des 8760 heures d'une année, une durée d'utilisation de 876 heures correspond à un coefficient d'utilisation de 0,1.

51. Influence du coefficient d'utilisation sur le prix de l'énergie. — Pour se rendre compte de l'influence du coefficient d'utilisation sur le prix de revient, remarquons que l'usine centrale a coûté comme premier établissement un capital qui aurait rapporté un certain intérêt si on l'avait placé ailleurs. D'autre part, ce capital, converti en machines et bâtiments qui s'usent et nécessitent de l'entretien finira au bout de quelques années par s'annihiler. Du fait que l'on a dépensé ce capital tout se passe donc comme si on en dépensait tous les ans une certaine fraction ; on compte souvent que les *intérêts et l'amortissement de la dépense de première installation reviennent à dépenser chaque année le dixième du capital de premier établissement.*

Si on ne produit qu'un kilowatt-heure à l'usine, ce kilowatt-heure coûtera les frais de production à l'usine, plus la dépense d'amortissement du capital : en un mot, toutes les dépenses que l'on a dû faire pour obtenir ce kilowatt-heure. Il reviendrait donc fort cher, mais si on produit deux kilowatt-heures, les frais généraux se répartiront entre les deux et ainsi de suite, mais cette influence ne se fait pas seulement pas sentir sur les frais généraux et amortissement de l'usine, mais encore sur la consommation de charbon et par suite sur les dépenses d'exploitation, car si l'usine ne fonctionne que quelques heures de la journée, la consommation de charbon au moment des allumages et l'entretien du foyer pendant les arrêts feront sentir leur effet sur le prix du kilowatt-heure produit d'autant plus que le nombre de kilowatt-heures est moins élevé.

Cette consommation de charbon est loin d'être négligeable, M. Otto Marr (1) compte qu'il faut majorer la

(1) *Kosten of Betriebskräfte* (Berlin et Munich 1901).

consommation normale de 16,5 0/0 pour en tenir compte dans les calculs de prix de revient. En résumé, le prix de revient du kilowatt-heure est d'autant plus petit que l'on produit plus de kilowatt-heures et par conséquent que la durée d'utilisation de l'usine est plus grande, ou, ce qui revient au même, que le coefficient d'utilisation est plus élevé.

Le tableau X, dressé par M. Philippe Dawson, nous rend compte de cette influence. Il a été établi à la requête de la corporation de Northampton et reproduit par l'« Electricien » du 20 Décembre 1902.

TABLEAU X

Variation des dépenses par kilowatt-heure avec le coefficient d'utilisation, pour une usine d'une puissance de 2.000 kilowatts.

Coefficient d'utilisation	Durée d'utilisation en heures	Dépenses en charbon à 12 50 la tonne	Dépenses totales à l'usine (1)
10 %	876	6 centimes	10 centimes
15 »	—	5	7,8
20 »	1752	4	5,6
25 »	—	3,5	4,5
30 »	2628	3,2	4
35 »	—	3	3,5
40 »	3504	2,6	3,3
45 »	—	2,5	3
50 »	4380	2,4	2,8
60 »	—	2,2	2,5
70 »	6132	1,9	2,4
90 »	7884	1,6	2,3

Lorsque le coefficient d'utilisation passe de 10 0/0 à 35 0/0, la dépense en charbon diminue de moitié et les dépenses totales d'exploitation à l'usine sont environ 3 fois plus petites. Les usines d'éclairage qui n'ont qu'un

(1) Les dépenses totales comprennent les réparations et l'entretien du bâtiment mais non l'intérêt et l'amortissement du capital de premier établissement.

coefficient d'utilisation de 10 à 11 0/0 ont des dépenses d'exploitation plus élevées que les usines de production de force motrice pour traction qui ont jusqu'à 35 0/0 de coefficient d'utilisation.

D'après M. Blondel (1), les dépenses de production de l'énergie dans les usines de traction américaines varie de 2 c. 7 à 5 centimes par kilowatt-heure, tandis qu'il atteint le double dans les usines d'éclairage avec du charbon de 5 fr. à 15 fr. la tonne.

52. Durée d'utilisation probable d'une usine centrale pour force motrice. — Sur quelle durée d'utilisation peut-on compter dans une usine pour force motrice?

Si les usines à desservir travaillent en même temps 10 heures par jour et 300 jours par an, la durée réelle d'utilisation est de 3 000 heures, mais il faudrait bien se garder de confondre cette durée avec la durée moyenne d'utilisation.

En effet, les génératrices de l'usine doivent avoir une puissance suffisante pour faire face à la plus forte demande d'énergie, ne durât-elle que quelques moments par jour ou quelques heures par an.

Cette puissance maximum qu'il faut *installer* à l'usine est souvent notablement plus grande que la puissance moyenne; elle atteint notamment jusqu'à 2 fois la puissance moyenne dans les usines de traction (2) à tramways urbains à départs fréquents, jusqu'à 4 à 6 fois pour les tramways interurbains à départs beaucoup moins fréquents et jusqu'à 10 pour les chemins de fer à marche rapides et arrêts très espacés (3).

Cet écart entre la puissance moyenne et la puissance installée provient de ce qu'au moment des démarrages, les voitures de tramways absorbent beaucoup plus de puis-

(1) De l'utilité publique des transmissions d'énergie par M. Blondel, Dunod, Paris 1899.

(1) Blondel et Dubois, *la Traction Electrique*, t. II, p. 693.

(2) Barbillion et Griffisch, *la Traction Electrique*, t. I, p. 202.

sance qu'en vitesse. Cet écart diminue en tendant vers zéro quand le nombre de voitures et de démarrages augmente de plus en plus ; la multiplicité des démarrages et la longue durée de fonctionnement, 16 à 18 heures par jour améliorent le coefficient d'utilisation.

De même dans les usines qui font uniquement l'éclairage, la puissance maximum installée à l'usine dépasse notablement la puissance moyenne, car les génératrices doivent avoir une puissance suffisante pour pourvoir à la plus forte demande d'énergie des premières heures des soirées d'hiver ; ces génératrices restent inutilisées pendant le jour et ne le sont que très faiblement en été.

Les considérations faites sur les usines de traction et d'éclairage nous permettent de conclure que dans l'usine pour force motrice seule, le rapport entre la puissance maximum et la puissance moyenne sera assez voisin de l'unité, car 1° les usines qui utilisent l'énergie commencent et finissent leur travail en même temps ; 2° à cause du très grand nombre de métiers ou de machines actionnées, le nombre de métiers en marche oscille faiblement autour d'une valeur moyenne ; la durée d'utilisation semble ainsi de 3.000 heures, mais la nécessité d'installer une puissance de réserve que nous supposons égale au cinquième de la puissance moyenne et l'obligation d'éclairer les usines en hiver réduit la durée d'utilisation probablement à 2.200 et peut-être à 2.000 heures. Si l'usine fait en même temps la traction et l'éclairage public, elle améliorera sa durée d'utilisation. Une usine fournissant à la fois de l'énergie pour force motrice, éclairage et traction atteint, d'après les praticiens compétents, une durée d'utilisation de 3.000 heures.

53. Avantages économiques des grandes stations centrales. — En résumé, une usine centrale pour force motrice peut compter au minimum sur une durée d'utilisation de 2.000 heures si elle se borne uniquement à distribuer la force et l'éclairage à ses usines ; elle peut compter sur une durée d'utilisation de 3.000 heures si elle fait en outre l'éclairage public et la traction.

1° Si cette station centrale a une puissance totale considérable de 20, 30 et 40.000 chevaux, elle pourra se munir de machines de grande puissance relativement beaucoup plus économiques que les machines des usines ordinaires.

2° Le fractionnement de la puissance en un certain nombre de fortes unités fera en outre sentir ses heureux effets sur le régime des machines.

En effet, dans une usine ordinaire de quelques centaines de chevaux et surtout dans certaines industries, le fonctionnement de la machine varie dans de très grandes limites, la machine prend tous les régimes depuis le quart de charge ou la marche à vide jusqu'à 25 0/0 de surcharge et son rendement moyen en est réduit notablement.

Au contraire, dans une très grande station centrale fournissant l'énergie à un très grand nombre d'usines diverses, la charge moyenne varie beaucoup moins; par suite, l'usine centrale comptant plusieurs machines, on peut répartir sa charge entre plusieurs génératrices de façon qu'elles fonctionnent toutes au voisinage de leur régime normal et améliorer ainsi le rendement.

3° Enfin, les stations centrales électriques possèdent le moyen d'emmagasiner dans des accumulateurs l'énergie qu'elles ont en excès à un moment donné et ces accumulateurs cèdent ensuite cette énergie aux récepteurs, dans un moment de demande exagérée; ils soulagent ainsi la station génératrice et améliorent notablement le coefficient d'utilisation de l'usine.

54. Prix de revient de l'énergie électrique dans les grandes usines centrales. — Ces diverses raisons conduisent à des prix de revient de l'énergie très minimes, dans les usines pour traction et force motrice et rendent compte des prix de revient considérables dans certaines usines d'éclairage de faible puissance. Nous avons déjà donné quelques prix. En voici d'autres :

Tandis que, d'après l'*Industrie électrique* (10 mai 1900), les dépenses de production à l'usine atteignent les chiffres

suivants (tableau XI) dans les usines centrales parisiennes qui fournissent presque uniquement de l'énergie pour éclairage.

TABLEAU XI

	Puissance de l'usine	Dépense de production par Kw-heure
Usine des Halles	(825 kilow.)	37 centimes
Usine de l'Hôtel-de-Ville	(255 kw.)	38,5
Usine des Buttes-Chaumont. . . .	(83 kw.)	55,5
Usine Parc-Monceau.	(30 kw.)	46,5

D'après M. Gérard (1), la station centrale du chemin de fer électrique d'Indiana (Etats-Unis), a une puissance de 3.900 chevaux en 3 unités et elle donne les dépenses de production à l'usine ci-après par kwh.

TABLEAU XII

	Charbon à 7 fr. 50 la tonne	Charbon à 15 fr. la tonne
	c.	
Combustibles	1,275	2,55
Huiles et chiffons	0,185	0,186
Salaires	0,56	0,56
Réparations.	0,10	0,18
	2,18	3,475

Mais admettons que ce soit là un cas particulier correspondant à un coefficient d'utilisation particulièrement bon et ne tirons pas de conclusions générales.

Il existe déjà en Haute-Silésie dans les régions industrielles et houillères à Chorzow et à Zaborze, des usines centrales distribuant l'éclairage aux particuliers, la force motrice aux tramways et certaines usines, notamment à 7 grandes fabriques de la région de 500 chevaux chacune et à d'autres industriels moins importants.

(1) Conférence faite à la Société des Ingénieurs civils de France le 7 février 1902.

La puissance totale de l'usine est de 7.400 chevaux effectifs répartie sur 11 unités à vapeur et 11 alternateurs. En octobre 1902, les dépenses par kw.-h. à l'usine étaient de 3 c. 75 avec du charbon à 7 fr. la tonne.

Si vous remarquez que les conditions de fonctionnement de l'usine sont loin d'être parfaites, que les machines à vapeur n'ont qu'une puissance de 600 chevaux environ, il est facile de prévoir qu'avec des usines de quelques dizaines de mille chevaux et des unités plus grandes, malgré un prix de charbon double et des salaires plus élevés on produirait dans notre région le kilowatt-heure avec une dépense de production à l'année de 3 centimes environ.

Il y a intérêt à se rendre compte de ce que pourrait être le prix de revient du kilowatt-heure dans nos pays houilliers avec du charbon coûtant 15 fr. la tonne.

Nous allons donner deux exemples.

DEVIS A

Usine de puissance 25.000 kilowatts, c'est-à-dire de 34.000 chevaux en construction ; elle fournira l'énergie aux tramways, la force motrice aux usines et l'éclairage aux particuliers ; la durée moyenne d'utilisation sera de 3.000 heures, elle produira donc 75.000.000 de kilowatt-heures ; le coût de premier établissement est détaillé dans le Tableau XIII.

TABLEAU XIII

*Dépenses de premier établissement pour une usine
de 25.000 kilowatts*

Bâtiments	3.000 000 francs
Partie Mécanique (turbines et générateurs) .	7.500.000 »
Partie Électrique	7.500.000 »
Divers	<u>3.000.000 »</u>
Total	15.000.000 francs

Pour les dépenses d'exploitation à l'usine, les dépenses en huiles, nettoyage, entretien et réparation sont calculées d'après ce qu'elles seraient pour les usines un peu plus

petites, consignées dans le Tableau VIII c'est-à-dire 60.000 francs pour nettoyage et graissage et 112.000 francs pour entretien et réparations.

Pour la dépense du charbon, on compte qu'il se consomme 1 kilog. 2 de charbon par kilowatt-heure. Cette évaluation est plutôt pessimiste ; les turbines sont comptées comme si elles prenaient 10 kilog. de vapeur par kilowatt-heure : elles n'en prennent que 7 au maximum ; le surplus sert à tenir compte des allumages et arrêts.

Les dépenses pour le personnel sont consignées dans le Tableau XIV.

TABLEAU XIV

*Dépenses journalières pour le personnel de l'usine
de 25.000 kilowatts*

	1 Ingénieur chef de service.	20 fr.
	2 Chefs de quart (1 de jour, 1 de nuit)	28 »
GROUPES ÉLECTROGÈNES	10 Conducteurs de groupe (à 9 fr. l'un).	90 »
	10 Graisseurs ou manœuvres (à 5 fr. l'un).	50 »
TABLEAU de DISTRIBUTION	2 Hommes ou condenseurs (à 6 fr. l'un).	12 »
	2 Chefs électriciens.	20 »
	4 Électriciens (à 8 fr. l'un).	32 »
CHAUFFERIE	2 Manœuvres (à 5 fr. l'un).	10 »
	2 Chefs de feux (1 de jour 1 de nuit, à 10 f.)	20 »
	32 Chauffeurs (à 8 fr. l'un en moyenne).	256 »
	8 Escarbilleurs et manœuvres (à 5 fr.)	40 »
	Nettoyage et entretien de 8 chaudières en repos (16 hommes)	96 »
SERVICE EXTÉRIEUR	Service de l'épurateur, du parc à charbon et des escarbilles (16 hommes).	90 »
	Réparations : 1 Chef d'atelier	
	» 10 Ouvriers	
	» 2 Manœuvres	
	» 1 Dessinateur	100 »
	Concierge, garde de nuit, magasinier, comptable, garçon de courses.	36 »
		<hr/> 900 fr.

Soit en nombres ronds 328.000 fr. par an.

Les dépenses totales d'exploitation sont résumées dans le tableau XV.

TABLEAU XV

Dépenses totales d'exploitation d'une usine de 25.000 kw.

	DÉPENSES D'EXPLOITATION	
	Total	par kw.-heure
Charbon 75.000.000 × 1 kg 2 × 0,015 (à 15 fr. la tonne).	1.302.000 fr.	1,8 centimes
Matières pour nettoyage et graissage	60.000	0,08
Matières pour entretien, réparations et divers	112.000	0,15
Personnel de l'usine	328.000	0,44
Frais généraux d'Administration et Direction.	250.000	0,33
Totaux	1.835.000 fr.	2,8 centimes

La dépense de production à l'usine par kilowatt-heure est donc de 2 c. 8.

Si on y ajoute l'amortissement du capital de premier établissement par dixièmes et tous les frais de Direction et d'Administration, on obtient le prix de revient par kilowatt-heure conformément au tableau XVI.

TABLEAU XVI

Prix de revient du kilowatt-heure à l'usine

Dépenses d'exploitation par kilowatt-heure	2,5 centimes
Amortissement du capital	2
Divers.	0,2
Total.	5 centimes

Le prix de revient du kilowatt-heure est donc de 5 centimes, ce qui amène le prix du cheval-vapeur à 3,68 centimes.

DEVIS B

Usine pour traction et distribution d'énergie électrique
pour force et lumière.

TABLEAU XVI

Devis approximatif des dépenses de premier établissement.		r. c.
Chaudières. — 27 chaudières semi-tubulaires de 250 ^{m²} de surface de chauffe, timbrées à 11 kil. avec surchauffeurs et accessoires.		675.000 »
6 réchauffeurs Green avec mouvements de raclettes et registres d'isolement.		130.000 »
3 pompes électriques d'alimentation à vitesse variable pouvant débiter 40 ^{m³} à l'heure chacune		30.000 »
3 pompes à vapeur 40 ^{m³} à l'heure chacune . . .		14.000 »
Tuyauterie et robinetterie pour chaudières et machines.		285.000 »
1 appareil à chaîne sans fin à commande électrique pour la manutention des 9.000 kil. de charbon nécessaires par heure.		75.000 »
1 grue électrique pour déchargement de bateaux, faisant environ 40 manœuvres à l'heure et soulevant une benne de 1.500 kilog., avec appareil de chargement de la chaîne. . . .		11.000 »
1 épurateur épurant 50 ^{m³} à l'heure, avec pompes et tuyauterie		25.000 »
Machines. — 5 groupes électrogènes de 3.000 à 3.500 chevaux, dont 2 pour l'alimentation du réseau de tramways, 1 pour le transport de force, 1 pour la distribution d'éclairage et 1 de réserve. — Chaque groupe comprendra : machine à vapeur type vertical compound, volant de 7 ^m 50 de diamètre. et alternateur à induit fixe et volant inducteur calé directement sur l'arbre moteur de la machine à vapeur, avec tous accessoires.		2 100.000 »
1 groupe électrogène de 700 chevaux, destiné à marcher la nuit au moment de très faible charge		90.000 »
A reporter.		3.435.000 »

Report	3.435.000 »
1 pont roulant de 30 tonnes à commande électrique avec chemin de roulement pour la salle des machines	20.000 »
1 tableau de distribution, à deux étages et passerelle de manœuvre, avec appareils à haute et basse tension montés sur panneaux en marbre	60.000 »
Câblage à haute et basse tension dans l'intérieur de l'usine	45.000 »
Installation de l'éclairage de l'usine et de ses abords	10.000 »
Bâtiments. — Fondations, cheminées, passerelles, soutes à charbon, réservoirs,	700.000 »
Bâtiments, charpentes métalliques	500.000 »
Atelier de réparations avec machines-outils, magasins à huiles, etc.	120.000 »
Transformateurs. — Convertisseurs d'excitation avec batterie; transformateurs réducteurs pour éclairage (3.000/120 volts);	110.000 »
Prix de revient de l'usine (non compris le terrain)	5.000.000 »

TABLEAU XVII

Dépenses d'exploitation de l'usine.

D'après les calculs, l'usine produirait 100.000 kilowatt heure par jour.

Pour cette production, les dépenses seraient les suivantes :

Charbon. — Pour 100.000 kilowatt-heures, la dépense sera de 1 k. 2 par kilowatt-heure, soit 120 tonnes par jour, à 14 fr. = 1.680 fr. par jour et par an.

fr. c.
612.000 »

A reporter. 612.000 »

Report	612.000 »
Entretien, réparations. — 1 1/2 0/0 environ de la valeur du matériel mécanique et élec- trique	45.000 »
Huiles et chiffons. — Huiles pour cylindres 80 »	
Huile pour mouvements.	40 »
Chiffons	15 »
135 fr., soit par an	49.200 »
Personnel. — Chaufferie	159 50 par jour
Charbon (manœuvres).	18 »
Machines.	150 »
Magasins.	15 »
Ateliers	37 50
Direction.	50 »
Total par jour	430 » soit par
k.-w.-h. 0 fr. 0043, et par an	157.000 »
Total des dépenses annuelles à l'usine.	<u>863 200 »</u>

Le prix de revient du kilowatt-heure, sans compter l'intérêt et l'amortissement du capital, serait de 0 fr. 0237.

Si les chaudières étaient chauffées par les gaz perdus des fours à coke, les dépenses annuelles seraient, d'après le tableau XVII, de 251.200 fr., et la dépense d'exploitation par kilowatt-heure 0 fr. 007 ; d'après le tableau XV, il serait de 1 centime ; en tenant compte des amortissements du capital conformément au devis du tableau XVI, le prix du kilowatt-heure obtenu ainsi serait de 3^e, 2 ou 3^e 5 par kilowatt-heure suivant que l'on adopte les dépenses d'exploitation 0^e 7 ou 1^e et le prix de revient du cheval-heure se réduit à 2^e ou 2^e 57.

55. — **Prix de revient de l'énergie mécanique dans les usines.** — Comparons ce prix de revient du cheval-heure obtenu dans les devis A et B et dans des conditions plutôt pessimistes, avec le prix de revient du

cheval-heure dans une usine à vapeur de 50, 100 ou 500 chevaux, en supposant la machine fonctionnant en pleine charge et en prenant par conséquent les conditions optimistes consignées dans le tableau XVIII, emprunté à M. St-Martin (*loc. cit.*)

TABLEAU XVIII

Prix de revient de la force motrice avec moteur à vapeur calculé pour la marche industrielle.

	MACHINE A CONDENSATION		
	Horizontale monocylindrique de 50 chevaux	Horizontale monocylindrique de 100 chevaux	Horizontale Compound de 500 chevaux
Bases du prix de revient :			
Dépenses totales d'installation.	36.000 fr.	60.000 fr.	200.000 f.
Consommation de charbon par cheval-heure indiqué (1). . . (allumage compris)	2 kg. 2	1 kg. 9	1 kg. 25
Dépenses annuelles (3000 heures de marche)			
Combustibles (charbon à 15 fr. la tonne).	4.950 fr.	8.550 fr.	28.025 fr.
Frais généraux, entretien . . .	3.200	5.000	15.000
Salaires	3.000	3.600	6.000
Intérêts et amortissement . . .	2.880	4.800	16.000
Totaux par an . . .	14.030 fr.	21.950 fr.	65.025 fr.
Nombre annuel de chevaux- heure indiqués			
	150.000	300.000	1.500 000
Prix de revient du cheval heure effectif (rendement organique 88 %)			
	10 c. 6	8 c. 3	5 c. 7

D'autre part, M. Sauvage (2) estime que les dépenses par cheval-heure effectif avec du charbon à 20 francs la tonne, sont de 5 centimes pour une machine de 500 chevaux,

(1) Cette consommation est une consommation moyenne et tient compte non seulement de l'allumage, mais des heures d'arrêt pour le repos de midi.

(2) Traité des machines à vapeur.

7 centimes pour une machine de 100 chevaux et 9 centimes pour une machine de 50 chevaux.

D'un autre côté, M. Witz estime que le cheval-heure produit par une machine à vapeur de 100 chevaux revient à 6 c. 71 et à 5 c. 56 s'il est produit par un moteur à gaz pauvre.

Pour une puissance de 500 chevaux, la machine à vapeur avec surchauffe l'emporte en rendement sur le moteur à gaz pauvre (1).

Par conséquent, avec des moteurs à vapeur ou à gaz pauvre de notre région, fonctionnant toujours à pleine charge dans les meilleures conditions possibles, on peut produire le cheval-heure à 5 c., 7 c. et 9 centimes, ces prix sont considérablement plus élevés que le prix de revient du cheval-heure dans l'usine électrique.

CONCLUSION. - Des conclusions générales s'imposent dès maintenant. Les industries minières ont dans les gaz perdus des fours à coke et des hauts-fourneaux une source d'énergie comparable à la houille blanche des pays montagneux. L'idée de se servir de cette énergie a amené logiquement ces compagnies à installer dans leur concession, au voisinage des fours à coke, des usines centrales électriques distribuant l'éclairage et la force aux moteurs disséminés dans l'exploitation.

A Anzin notamment, on convertit en coke tout le poussier de charbon disponible en des tours à récupération, et les gaz disponibles brûlés sous les chaudières, alimentent la station centrale qui peut fournir de 1.400 chevaux, environ le 1/8^e de la puissance totale moyenne utilisée dans la concession (2).

Il serait à souhaiter pour la prospérité de notre région que l'industrie des fours à coke devienne assez prospère pour que la houille blanche de nos pays miniers soit suffi-

(1) Witz, moteurs à gaz, t. II, p. 1052.

(2) Ce renseignement m'a été fourni par M. François, l'éminent directeur de la Compagnie d'Anzin. Je l'en remercie bien vivement.

samment abondante, non seulement pour fournir la totalité de l'énergie mécanique nécessaire à la mine, mais encore pour alimenter les multiples usines de notre région industrielle.

Mais une production économique de l'énergie n'est pas subordonnée à la prospérité de l'industrie des fours à coke et des hauts-fourneaux, car dans les usines alimentées au charbon d'après les devis et les renseignements nombreux que je vous ai cités, le prix de revient du cheval-heure emprunté aux bornes des génératrices d'une grande usine de plusieurs dizaines de mille chevaux est environ deux à trois fois plus faible que dans une usine de 500 à 50 chevaux, à vapeur ou à gaz pauvre.

Mais il y a une objection, c'est que les usines d'une puissance de 10.000 ou 25.000 kws ne se trouvent pas concentrées en un même point d'une ville. Pour réunir cette puissance imposante de 25.000 kws, il faudra grouper un très grand nombre d'industries de 50, 100, 500 chevaux. Mais si toutes ces usines convenaient de prendre leur énergie à cette formidable station centrale, et si on pouvait transporter l'énergie de cette station centrale à chacune de ces usines avec un prix de revient de l'ordre d'un centime par kw.-heure, rendu à l'usine, tous les industriels trouveraient une économie notable et de multiples avantages dans la commande électrique.

La création d'usines centrales de grande puissance, rationnellement installées serait un bienfait public. L'énergie électrique ne serait plus un objet de luxe comme il l'est encore malheureusement, mais un agent *industriel* à la portée de tous.

Il nous reste à voir dans les prochaines leçons comment s'effectuera ce transport économique de l'énergie.

CINQUIÈME LEÇON

Les Pertes d'Énergie

dans les Lignes de Transmission de l'Énergie

56. **Canalisations aériennes et souterraines.**

— Pour transmettre l'énergie d'une station G où se trouve

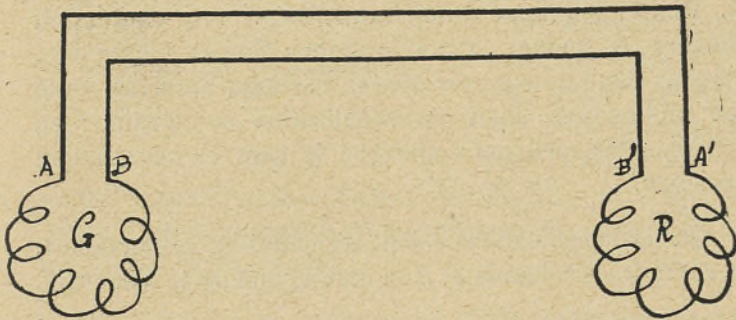


Fig. 22

un générateur à une station réceptrice où se trouve un récepteur R, on réunit les bornes A B du générateur aux bornes A' B' du récepteur R par deux conducteurs canalisations ou *lignes* (fig. 22).

Si ces lignes sont dans l'air, soutenues par des isolateurs que supportent des poteaux, les canalisations sont *aériennes*; si elles sont placées dans le sol, les canalisations sont *souterraines* et dans ce cas, chaque fil est entouré d'une gaine isolante en caoutchouc ou en papier

et le tout enfermé dans un tube en plomb. Ces conducteurs armés de la sorte sont placés dans une tranchée, isolés au béton et protégés contre la pioche ou les ravages de l'eau par des couvertures de béton et quelquefois par des plaques de fer.

Pour connaître les conditions les plus économiques de ce transport, nous nous demanderons d'abord quelles sont les pertes d'énergie.

Il est facile de se rendre compte que les canalisations souterraines sont les plus chères, par les travaux considérables de pose et l'augmentation considérable du prix des câbles isolés et plombés qu'il faut employer.

Il nous suffira de dire que, toutes conditions égales, d'ailleurs, pour transmettre la même énergie, les canalisations souterraines coûtent environ trois fois plus cher que les canalisations aériennes. C'est ainsi que, d'après G. White, les lignes de transmission des chutes du Niagara à Buffalo, d'une longueur de 43 kilomètres, établies pour transporter 20.000 chevaux, auraient coûté six millions et demi en canalisation souterraine; en réalité, elles n'en ont coûté que le tiers en canalisation aérienne.

Que les canalisations soient aériennes ou souterraines, le courant les chauffe et il en résulte une perte d'énergie.

Nous étudierons d'abord les pertes d'énergie par le passage du courant constant; nous étendrons ensuite les résultats au cas d'un courant alternatif et pour terminer nous prendrons le cas de courant ω polyphasés.

57. Pertes de puissance en courant constant. — Un courant électrique ne peut transporter l'énergie d'un endroit à un autre sans en laisser une partie en chemin. Pour rendre ces pertes aussi faibles que possible, il faut commencer par étudier comment elles varient.

Cette étude a été faite par Joule dans le milieu du XIX^e siècle.

58. **Lois de Joule.** — Joule a mesuré la quantité de chaleur dégagée par un courant constant passant dans un fil conducteur. Pour cela, le fil conducteur était enroulé en spirale et plongé dans un calorimètre, c'est-à-dire dans un vase en laiton contenant de l'eau dans laquelle plonge un thermomètre. Le courant d'une pile traverse le conducteur et, en même temps, un ampèremètre qui mesure le courant (*fig. 23*) on a pesé la masse d'eau du calorimètre, soit par exemple 1.000 grammes ; on note le temps

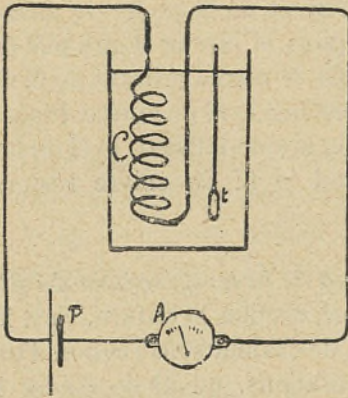


Fig. 23

pendant lequel passe le courant, soit 10 minutes et l'élévation de température accusée par le thermomètre soit 2 degrés centigrade. Ces données suffisent pour mesurer la quantité de chaleur dégagée : chaque gramme d'eau en s'échauffant d'un degré absorbant une petite calorie, les 1.000 grammes d'eau pour s'échauffer de deux degrés ont absorbé $1.000 \times 2 = 2.000$ calories ; ces calories sont dégagées par le courant en dix minutes ou 600 secondes.

Les expériences ont permis à Joule d'énoncer les lois suivantes :

1° La *chaleur dégagée* par un courant constant dans un conducteur donné est proportionnelle au *temps* pendant lequel passe le courant.

2° La quantité de chaleur dégagée pendant un temps donné dans un *fil conducteur homogène* est *proportionnelle au carré de l'intensité du courant*, ce qui veut dire que, si un courant d'un ampère est capable d'élever la température du calorimètre de 2 degrés, un courant de deux ampères élèvera la température du même calorimètre d'un nombre quatre fois plus grand de degrés, soit 8 degrés.

3° *La chaleur dégagée dans un fil pendant un temps donné et par un courant donné dépend de la nature du fil et de sa température; elle est proportionnelle à sa longueur et varie en raison inverse de sa section.*

La chaleur dégagée dépend de la *nature du fil*, c'est-à-dire que, dans deux fils de nature différente, de même longueur, de même section, à la même température, traversé par le même courant, nous constatons des dégagements de chaleur différents. Plaçons dans deux calorimètres différents un fil de cuivre et un fil de fer de même section et longueur insérés dans le circuit d'une pile de façon qu'ils soient traversés par le même courant, le fil de fer échauffera six fois plus d'eau que le fil de cuivre. Placés dans l'air, et traversés par un courant suffisant, le fil de fer deviendra incandescent quand le fil de cuivre restera sombre.

La chaleur dégagée dépend de la température du fil. De deux fils de même longueur, section et nature, c'est le plus chaud qui dégage le plus de chaleur sous l'action d'un même courant; dans ces conditions, un fil de cuivre à 100° dégage, 1,4 fois plus de chaleur qu'à 0°. Cette loi n'est pas évidente *a priori*; car c'est le contraire qui arrive lorsqu'au lieu de conducteurs métalliques on emploie des conducteurs liquides, des colonnes d'acide sulfurique, par exemple. Si deux colonnes ont la même longueur, la même section, la même concentration mais des températures différentes, c'est dans la plus chaude que le courant dégage le *moins* de chaleur.

Le dégagement de chaleur est *proportionnel à la longueur du fil*. Ceci est évident, puisque chaque élément du fil est traversé par le même courant; un fil de deux mètres dégage sous le même courant deux fois plus de chaleur qu'un fil d'un mètre.

Le dégagement de chaleur est *inversement proportionnel à la section*. De deux fils de même nature et de même longueur, AB, BC, c'est le fil le plus fin AB qui

s'échauffe davantage (*fig. 24*). Si l'un a une section moitié

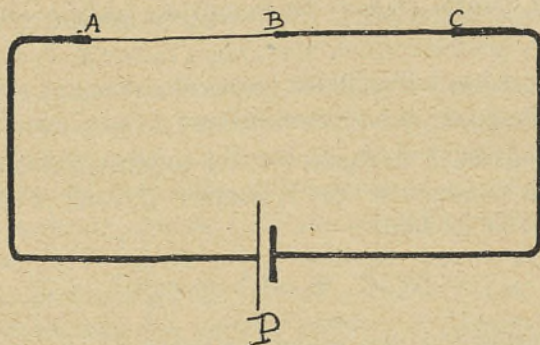


Fig. 24

de l'autre, la quantité de chaleur qui s'y dégage est deux fois plus grande que dans le fil fin.

Pour les fils de section circulaire, si le diamètre du premier est deux fois plus grand que le diamètre du second, la chaleur dégagée dans le premier est quatre fois plus petite que dans le second.

59. **Résistance.** — En résumé, lorsqu'un courant traverse un fil conducteur, ce conducteur dégage de l'énergie sous la forme calorifique. De même qu'un corps qui glisse sur un autre dégage de la chaleur par l'effet de certaines résistances de frottement, de même cet agent spécial, le courant électrique, en traversant les conducteurs semble rencontrer une *résistance* à son passage et dégage de l'énergie calorifique.

Si on désigne par r la puissance calorifique dégagée par un courant égal à l'unité dans un fil de longueur égale à l'unité et de section égale à l'unité, la puissance que dégagera le courant unité dans un conducteur de longueur l unités et dont la section de s unités a une surface sera, d'après la 3^e loi de Joule :

$$(1) R = r \frac{l}{s}$$

La grandeur R qui exprime la puissance calorifique dégagée dans un fil conducteur par l'unité de courant s'appelle la *résistance* du fil.

On donne le nom de *résistance spécifique* ou *résistivité* à la résistance d'un conducteur dont la longueur est égale à l'unité et dont la section est égale à l'unité de surface.

La résistance d'un fil est proportionnelle à sa résistivité et à sa longueur et en raison inverse de sa section.

La puissance dégagée par un courant égal à i unités dans un conducteur de résistance R sera, d'après la première loi de Joule :

$$(2) P = Ri^2 = r \frac{l}{s} i^2$$

L'énergie dégagée pendant ce temps est :

$$(3) W = Ri^2 t = r \frac{l}{s} i^2 t$$

60. Unités de résistance. — Si on considère les formules (2) ou (3), la valeur numérique de la résistance d'un conducteur dépend des unités choisies pour le courant, le temps et la puissance.

Si on prend comme unité de temps la seconde, comme unité de courant l'ampère et comme unité de puissance le watt, la résistance est mesurée en ohms. *L'ohm est la résistance d'un conducteur homogène dans lequel un ampère dégage une puissance d'un watt, c'est-à-dire une énergie d'un joule par seconde.* Un courant d'un ampère dégage dans un conducteur de résistance R ohms une puissance de R watts et un courant de i ampères, une puissance $R i^2$ watts. En T heures, l'énergie dégagée par ce courant sera $W = R i^2 T$ watt-heures. Dans un conducteur dont la résistance est de 10 ohms, traversé par un courant de 10 ampères, la puissance dégagée sera $10 \times 10^2 = 1.000$ watts ; l'énergie dégagée en deux heures sera $W = 10 \times 10^2 \times 2 = 2.000$ watt-heures.

Il est bon d'avoir une idée de l'ordre de grandeur d'un ohm. Un ohm est la résistance d'une colonne de mercure de $106^{\text{cm}},3$ de longueur et d'un millimètre carré de section, à la température 0° . Un fil de cuivre est environ 80 fois moins résistant qu'une colonne de mercure de mêmes dimensions. La résistance d'un fil de cuivre de 80 mètres

de longueur et d'un millimètre carré de section est approximativement d'un ohm.

61. Unités de résistivité. — Si on considère la formule (1), § 59, la valeur numérique de la résistivité dépend du choix de l'unité de résistance, de longueur et de surface, si les unités sont respectivement l'ohm, le centimètre et le centimètre carré. La résistivité est la résistance d'un fil qui aurait un centimètre de longueur et un centimètre carré de section ; comme c'est une grandeur très petite par rapport à l'ohm, on prend souvent comme unité de résistance le microhm, millionième partie de l'ohm.

Les résistivités des métaux usuels à 0° exprimées en microhms-centimètres sont consignées dans le tableau suivant (1) :

MÉTAUX ET ALLIAGES	RÉSISTIVITÉ EN MICROHMS-CENTIMÈTRE
Cuivre électrolytique Grammont	1.538
— — Swan.	1.561
Cuivre étalon (Matthiessen).	1.593
Bronze phosphoreux (h ¹ conduct ¹).	1.6
— — (fils télégr.)	1.6
— — (filstéléphon)	5.6
Bronze siliceux télégraphique. 6 types de A. à F.	1.67 à 5.76
Bronze chromé télégraphique.	1.641
— — téléphonique.	4.71
— — longue portée.	7.8
Fer pur.	9.065
Acier.	15.8
Fer ordinaire.	13.9
Acier au manganèse.	75
Aluminium (94). Cuivre (6).	3.2
Maillechort.	30
Ferro-Nickel, type 4 X.	78.3
Cuivre à 30 0/0 de Manganèse.	100.6

Au lieu de considérer la résistivité rapportée au conducteur qui a un centimètre de longueur et un centimètre carré de section, on la rapporte souvent au conducteur de

(1) Formulaire de M. HOSPITALIER.

section circulaire qui a un kilomètre de longueur et un millimètre de diamètre. Il est aisé de déduire ces nouvelles résistivités des résultats précédents en microhms-centimètre. Les nombres obtenus ainsi pour les principaux métaux usuels sont les suivants :

Cuivre électrolytique.	20 ohms 37
Fer ordinaire	177
Acier.	201
Aluminium.	36.99
Bronze phosphoreux	20 37

La résistance d'un fil dont le diamètre a d millimètres sera en raison inverse du carré de d . Un kilomètre de fil de 2 millimètres de diamètre aura une résistance quatre fois moindre que 20 ohms 37, soit : 5 ohms 09.

Nous avons dit que la résistivité dépend de la température. Pour le cuivre par exemple, elle augmente de 4 millièmes par degré, de sorte qu'à 100° la résistance d'un fil de cuivre de même longueur et de même section est 1,4 fois sa résistance à 0°.

C'est un résultat dont il faut tenir compte en pratique. Le courant échauffant le fil qu'il traverse, il ne faut pas supposer le fil à la température ordinaire lorsqu'on le fera traverser par un courant capable de l'échauffer d'une façon sensible.

Parmi les métaux usuels, c'est le cuivre qui dégage le moins de chaleur ; l'aluminium vient ensuite. Un fil de cuivre d'un kilomètre de longueur et d'un millimètre de diamètre traversé par 10 ampères dégage 20×10^2 ou 2000 joules par seconde ou 2000 wattheures par heure ; un fil d'aluminium de mêmes dimensions en dégage 3700.

62. Comparaison des lignes en cuivre, aluminium et fer. — On peut se demander quelle devrait être la section d'un fil de fer ou d'aluminium pour que la perte d'énergie y soit la même que dans un fil de cuivre de *même longueur* sous l'influence du même courant. Il faut pour cela que la résistance soit la même et par conséquent il faut augmenter la section du fil dont la résistivité est la plus grande. On voit que le poids de la ligne sera considé-

ablement plus grand pour une ligne de fer, car le poids de cette ligne est proportionnel à la densité du métal, à la section et à la longueur du fil. Une ligne de fer qui dégagerait la même énergie qu'une ligne de cuivre, offrant la même résistance, pèsera 5,5 fois plus que la ligne de cuivre. Une ligne d'aluminium sera beaucoup plus légère, quoique sa résistivité soit plus grande ; grâce à la faible densité de ce métal, elle pèsera deux fois moins que la ligne de cuivre. Si donc l'aluminium ne coûtait pas deux fois plus cher par kilogramme que le cuivre, on pourrait à ce point de vue remplacer le cuivre par l'aluminium. Nous aurons à examiner cette question à l'occasion de la pose d'une ligne. Si le cuivre coûte moins cher, toutes proportions gardées, on aura intérêt à employer ce métal et inversement.

Mais on peut aussi se demander pourquoi l'on ne préférerait pas le fer au cuivre. Quoique plus lourde, une ligne en fer coûterait bien meilleur marché qu'une ligne en cuivre.

Le fer présente de graves inconvénients ; d'abord, il s'oxyde, se détériore même galvanisé ; il suffit d'un point mis à nu pour que la rouille pénètre dans le fer et le détériore en très peu de temps.

Certaines lignes télégraphiques sont détériorées très rapidement au voisinage des usines qui dégagent, en général, des produits facilitant l'oxydation du fer. Dans des essais faits par la Baltimore Ohio and Telegraph C', un fil de bronze placé en juin 1884 était très bien conservé en 1887, alors qu'un fil d'acier de même diamètre placé à côté fut complètement rongé en un an ; ces deux fils se trouvaient dans une région industrielle.

Il y aurait un autre inconvénient, lors même que le fer serait bien protégé contre cette altération. Le fil de fer, pour le transport d'un courant continu, doit être beaucoup plus gros qu'un fil de cuivre ; sa section devant être dix fois celle du cuivre, son diamètre sera trois fois plus grand. Il en résulte qu'en temps de givre, par exemple, un fil de fer se chargera bien plus que le fil de moindre diamètre.

Le même inconvénient se présente en temps d'ouragan.

Un câble de 1 centimètre de diamètre a une surface de 100 centimètres carrés par mètre et par conséquent d'un mètre carré par 100 mètres. Or, le vent soufflant en tempête à 30 mètres par seconde exerce une pression de 72 kilogrammes par mètre carré de surface cylindrique dont l'axe est perpendiculaire au vent. Un fil de fer de même résistance ayant un diamètre trois fois plus grand subirait donc en tempête une force de 216 kilogrammes par mètre carré ; l'aluminium, une force de 100 kilogrammes. Cette particularité est très importante à considérer ; elle amène à rejeter la ligne en fer et entre en ligne de compte pour le choix de l'aluminium.

A Trieste, pendant des tempêtes, des fils de fer ont été brisés ; les fils de bronze silicieux ont résisté.

A Reims, sur le réseau téléphonique de l'Etat, un fil de bronze silicieux de 11/10 de millimètre, d'une portée de 250 à 300 mètres, a résisté à un vent violent qui soufflait perpendiculairement à sa direction.

63. Pertes de puissance en courant alternatif.

— Nous avons supposé jusqu'ici que le courant était constant ; lorsque le courant est alternatif, la loi de Joule est vérifiée à chaque instant, mais de nouveaux phénomènes se greffent sur les précédents et l'étude des pertes d'énergie est rendue plus compliquée.

Le courant alternatif change d'intensité d'un instant à l'autre, mais à chaque instant la puissance calorifique dégagée par le courant suit la loi de Joule. Nous aurons donc une idée exacte de la chaleur que dégage un courant alternatif dans un conducteur de résistance donnée si nous connaissons l'intensité du courant constant qui y dégagerait la même puissance.

64. **Intensité efficace.** — L'intensité du courant constant qui dégagerait la même puissance que le courant alternatif s'appelle l'*intensité efficace* du courant alternatif. La connaissance de l'intensité efficace d'un courant alternatif permet donc de connaître la puissance calorifique dégagée dans une résistance donnée. Cette intensité

efficace nous est donnée par un ampèremètre calorifique (2^{me} leçon, § 16).

65. **Résistance pour courant alternatif.** — Non seulement le courant varie d'un instant à l'autre, mais à un même instant le courant n'est pas distribué uniformément dans la section du fil conducteur. Supposons que l'on coupe un conducteur ; soit S la section, considérons une unité de surface très petite autour d'un point M ; le courant qui traverse cette unité de surface s'appelle la *densité* du courant autour du point M. Selon que l'unité de surface considérée se trouve en M à la périphérie du



Fig. 25.

conducteur ou en M₀ dans la région centrale (fig. 25), le courant qui la traverse est différent ; la densité du courant est plus grande à la périphérie qu'au centre. Cette différence de densité du courant dans les couches internes ou périphériques produit un accroissement de résistance qui est d'autant plus marqué que le conducteur est traversé par un courant de fréquence plus élevée et que le conducteur est plus gros et plus magnétique. Dans le tableau suivant nous avons consigné les rapports de la résistance R_a d'un même conducteur en cuivre pour les courants alternatifs, à la résistance R_c de ce conducteur pour les courants continus.

DIAMÈTRE	VALEURS DU RAPPORT $\frac{R_a}{R_c}$	
	Fréquence 40	Fréquence 50
1 cm.	1	1.0001
2 —	1.027	1.0805
3 —	1.1	1.318
4 —	1.265	1.6778
5 —	1.5	2.043

Si le diamètre ne dépasse pas 1 centimètre, la résistance pour courant alternatif est sensiblement la même que pour courant continu — mais dans le cas d'un câble de 5 centimètres de diamètre, la résistance pour courant

alternatif devient deux fois plus grande que pour courant continu ; en confondant les deux résistances pour courant alternatif et courant continu, on se tromperait, dans ce cas, de la moitié.

Dans les gros conducteurs, l'intérieur n'est pour ainsi dire pas traversé par le courant ; un conducteur creux à la même résistance qu'un conducteur plein, de même diamètre, pour le courant alternatif, le courant restant dans la périphérie. Cette économie du métal a tenté certains constructeurs et il existe des conducteurs en forme de tube pour courant alternatif. La résistance d'un conducteur fer pour le même courant alternatif varierait beaucoup plus que pour le conducteur en cuivre.

66. **Hystérésis et courants de Foucault.** —

Lorsqu'un courant alternatif parcourt un circuit au voisinage de conducteurs en fer, le fer s'aimante et son aimantation change d'un instant à l'autre ; il décrit ce que l'on appelle un *cycle d'hystérésis* et par cela même il dégage de la chaleur ; de plus toute pièce métallique voisine du conducteur parcouru par le courant alternatif devient le siège de courants induits dits courant de Foucault qui l'échauffent.

M. Rodet (1) cite le fait suivant : Dans une installation, trois câbles de cuivre devaient arriver au tableau ; l'un d'eux étant trop court, on prit pour l'allonger un câble de cuivre armé, c'est-à-dire entouré d'une armature ou gaine en fer. On constata bientôt que l'isolement de ce câble fondait tandis que les autres sous plomb restaient intacts : c'était la chaleur dégagée par hystérésis et courants induits dans cette armature en fer qui avait augmenté considérablement la température de l'isolant et l'avait fondu.

Le fer en tant que conducteur de courants alternatifs est donc absolument condamné, et on ne peut hésiter qu'entre le cuivre et l'aluminium ; suivant les prix relatifs des deux métaux, la longueur des lignes et les pays, on

(1) *Distributions à courants polyphasés à la Librairie Gauthier-Villars.*

préfèrera l'un ou l'autre. Il faut dire toutefois que, lorsque la différence de prix est faible, c'est en général le cuivre qui sera préféré.

67. Pertes dans les isolateurs. — Aux pertes dans les conducteurs il faut ajouter les pertes dans les isolateurs.

Les isolateurs, § 19, ne sont pas des isolants parfaits. Si on intercale un isolant de porcelaine ou de verre dans un circuit dont les extrémités présentent entre elles une tension suffisamment élevée, on constate que cet isolateur se laisse traverser par un courant.

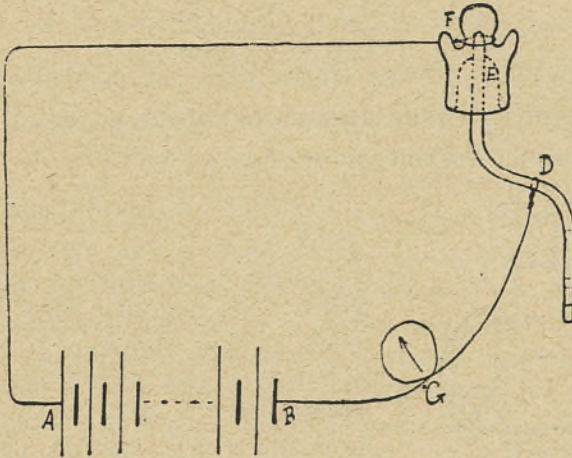


Fig. 26

Un isolateur est monté sur une tige de fer (*fig. 26*). Les pôles A et B d'un générateur électrique sont réunis par des fils métalliques, l'un A, à la tête de l'isolateur F, l'autre B à la tige D E par un fil qui comprend la bobine d'un galvanomètre très sensible; un interrupteur I permet de faire passer le courant dans le galvanomètre G. Aussitôt que l'on applique la tension entre les bornes A et B, on constate que le galvanomètre intercalé dans le circuit dévie; l'isolateur ne supprime donc pas tout courant comme nous l'avions supposé. Le verre laisse passer un courant plus fort que la porcelaine.

Le verre et la porcelaine ne doivent pas être considérés comme des isolants parfaits, mais comme des corps à résistance considérable. Dans l'expérience précédente, lorsqu'entre *A* et *B* la tension est de 110 volts, la déviation du galvanomètre correspond à 10 micro-ampères ou $\frac{10}{10^6}$ ampère. Or, si l'on désigne par *V* la tension, par *R* la résistance et par *i* le courant, la puissance dégagée est *Vi*, d'après la définition de la tension; elle est Ri^2 , d'après la loi de Joule; on en déduit

$$Vi = Ri^2 \text{ d'où } V = ri$$

$$\text{ou } r = \frac{V}{i}$$

La résistance du circuit est donc : $\frac{110}{\frac{1}{10^5}} = 11 \times 10^6$ ohms
 $= 11$ mégohms. Chaque isolant perd une puissance de $110 \times \frac{1}{10^5} = \frac{1,1}{10^3}$ watts. Cette perte croît avec la tension, mais beaucoup plus vite que la tension.

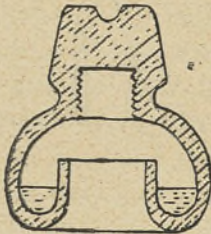


Fig. 27

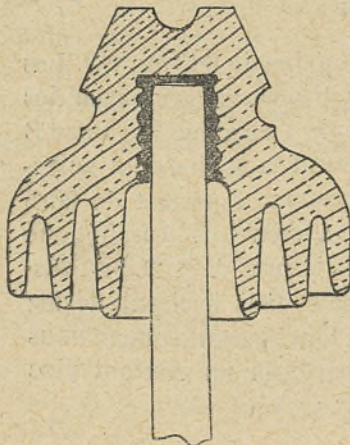


Fig. 28

Cette perte est surtout notable quand les isolateurs sont salis, recouverts de poussières conductrices. C'est pourquoi, dans certaines stations, on emploie des isolateurs en porcelaine avec bain d'huile (*fig. 27*); mais ce liquide se souille; des insectes pénètrent dans la cavité et l'huile perd ses propriétés isolantes. A ces appareils d'un entretien incommode, on préfère maintenant des isolateurs à triple cloche (*fig. 28*); on augmente ainsi notablement la surface intérieure de l'isolant et par suite la résistance.

La résistance d'un isolateur varie avec l'état hygrométrique de l'atmosphère.

Le résistance d'un isolateur varie avec l'état hygrométrique de l'atmosphère.

La résistance entre la terre et l'un quelconque des fils de la ligne de transmission Niagara-Falls-Buffalo est de 0,25 à 0,30 mégohm en temps de pluie et de 1 mégohm en temps sec. La ligne a 42 kilomètres de longueur et la tension est de 11 000 volts. L'isolement est compris entre 10,5 et 42 mégohms par kilomètre. Le courant qui passe entre la ligne et le sol est de

$$\frac{11.000}{300.000} = \frac{1}{30} \text{ ampère environ.}$$

La perte de puissance de $\frac{1}{30} \times 11.000 = 4.000$ watts, soit 1 ou 2 watts par isolateur.

Les pertes par isolateur sont, en général, négligeables par rapport aux pertes en ligne.

68. Pertes de puissance en courants polyphasés. —

Nombre des fils de transmission pour courants triphasés. — Nous avons obtenu le moteur triphasé à champ tournant, § 35 et 36, en faisant parcourir convenablement trois circuits par trois courants triphasés provenant des trois circuits d'un générateur de courants triphasés. Il semble que pour transmettre l'énergie de la station génératrice à la station réceptrice, il soit nécessaire de réunir les bornes de chacun des 3 circuits récepteurs respectivement aux bornes de chacun des trois circuits générateurs par deux fils conducteurs, de sorte que la transmission de l'énergie des courants triphasés demanderait deux fils par circuit, c'est-à-dire six fils de ligne. Il est facile de voir qu'on peut réduire ce nombre à trois.

69. Distribution en triangle. — Soient $A_1 A_2 A_3$ les bobines génératrices. Réunissons leurs extrémités voisines à trois bornes communes $a b c$. Joignons de même deux à deux les extrémités voisines des 3 circuits triphasés du stator d'un moteur à champ tournant aux 3 bornes $a' b' c'$ et réunissons ces trois bornes communes du stator $a' b' c'$ aux trois bornes $a b c$ du générateur. Il est facile de voir que les 3 circuits $a b b' a'$, $b c c' b'$, $c a a' c'$ sont identiques et que les phénomènes qui se passent dans le circuit

$a b b' a'$, se produiront dans le circuit $b c c' b'$ un tiers de période plus tard et dans le circuit $c a a' c'$ après un second tiers de période. Le courant qui traverse le circuit $a' b'$, traversera le circuit $b' c'$ un tiers de période plus tard et le circuit $c' a'$ après un nouveau tiers de période. Les trois circuits $a' b'$, $b' c'$, $c' a'$ seront donc traversés

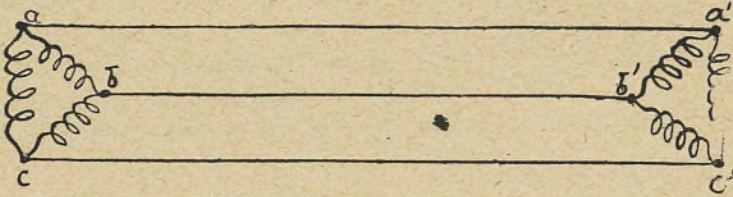


Fig. 29

par des courants triphasés. Trois fils suffisent donc pour transmettre des courants triphasés d'une station génératrice où ils sont produits dans trois circuits, à une station réceptrice où on les recueille dans trois circuits identiques ayant deux à deux une extrémité commune et formant un circuit fermé.

Ce système de distribution de l'énergie s'appelle distribution en *triangle*. Il est schématisé par la figure 29.

70. Distribution en étoile.— Au lieu de réunir deux à deux les extrémités voisines des bobines génératrices, on peut réunir entre elles les extrémités antérieures (par rapport à un sens de parcours donné) des trois bobines et réunir ensuite les extrémités postérieures libres de chaque circuit respectivement à chacune des trois bagues du générateur (fig. 30). Cette disposition de circuits s'appelle

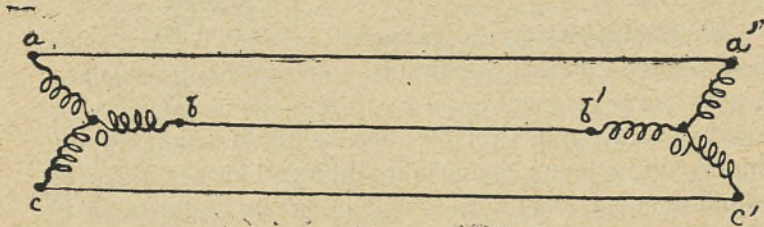


Fig. 30

disposition en *étoile*. Une disposition analogue peut s'appliquer au récepteur.

On peut adopter sans inconvénient une association mixte, en étoile pour le générateur, en triangle pour le récepteur ou inversement. On aurait alors la disposition schématique de la figure 31.

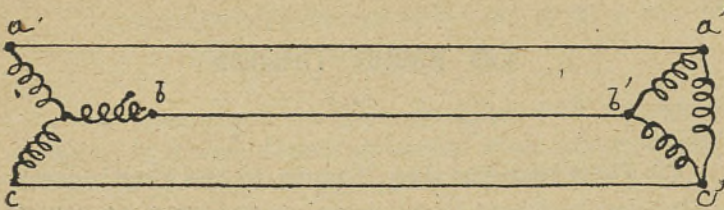


Fig. 31

On voit aisément que le courant qui traverse les divers segments du circuit $o a a' c' c o$ traversera les segments correspondants du circuit $o b b' a' a o$ un tiers de période plus tard, et les segments correspondants du circuit $o c c' b' b o$ deux tiers de période plus tard.

71. Puissance des courants triphasés. — La puissance transmise par une distribution triphasée est

$$P = V_0 I_0 g$$

V_0 est la tension efficace entre deux lignes, c'est-à-dire la racine carrée du carré moyen de la tension variable d'un instant à l'autre; I_0 est l'intensité efficace et g un facteur qui dépend des récepteurs.

La puissance perdue en ligne est $3 r I_0^2$; r désignant la résistance d'un fil.

Si l'on employait les courants tétraphasés pour transmettre la même puissance avec la même perte et la même tension entre lignes, il faudrait des fils de même grosseur que pour les courants triphasés. On réalise donc, en employant les courants triphasés une économie de 25 0/0 de cuivre. Si, au contraire, on exige la même tension entre chaque ligne et le sol, il n'y a pas d'économie à employer les courants triphasés, mais c'est le premier cas qui est le plus souvent réalisé et il y a un réel avantage à transmettre l'énergie par courants triphasés.

SIXIÈME LEÇON

Les Hautes Tensions

72. Rendement des lignes de transmission.

— Dans un transport d'énergie du générateur au récepteur, toute l'énergie calorifique dégagée dans la ligne est perdue; il importe de la réduire au minimum. Soit A la station génératrice produisant l'énergie électrique à bon compte et soit B la station d'utilisation de cette énergie, soit R la résistance des lignes qui joignent les bornes du générateur aux deux bornes du récepteur.

Si P_g est la puissance produite à l'usine génératrice et disponible entre les bornes de l'alternateur, P_u la puissance utilisée à la station réceptrice, i le courant qui circule dans la ligne

$$P_u = P_g - Ri^2$$

On appelle rendement de la ligne, le rapport

$$\frac{P_u}{P_g} = \frac{P_g - Ri^2}{P_g} = 1 - \frac{Ri^2}{P_g}$$

Le rendement sera aussi voisin de l'unité que l'on voudra en rendant $\frac{Ri^2}{P_g}$ aussi petit que possible.

Pour diminuer Ri^2 , il faut diminuer R ou i ou les deux simultanément. Diminuer la résistance de la ligne revient d'abord à la faire en métal de résistivité la plus faible, c'est-à-dire en cuivre, et de lui donner la section la plus forte possible, mais on augmente aussi considérablement le prix de la ligne. Diminuer i si la tension reste constante revient à diminuer la puissance à transmettre puisqu'on a $P_g = Vi$ (deuxième leçon, § 25).

Cette seconde solution devient donc encore mauvaise si on conserve une tension constante et peu élevée mais

elle devient bonne si, en même temps qu'on réduit le courant, on augmente la tension de manière que la puissance à transmettre reste constante et que l'on ait par conséquent

$$Vi = V'i'$$

Le transport de l'énergie doit donc se faire sous haute tension et sous faible intensité.

73. Comment peut-on réaliser ces hautes tensions ? Force électromotrice d'un alternateur. —

Lorsqu'une spire fermée sur elle-même se déplace dans un champ magnétique quelconque, la puissance mécanique qu'elle transforme en puissance utile est proportionnelle au courant qui la parcourt ; la puissance mécanique absorbée par unité de courant et convertie en puissance électrique dans le circuit s'appelle la *force électromotrice* du circuit.

Si on évalue le courant en ampères et la puissance en watts, la force électromotrice est évaluée en volts.

Par exemple, si pour déplacer une spire dans un champ magnétique, il faut dépenser une puissance mécanique de $P = 100$ watts, quand le courant qui la traverse est de $i = 20$ ampères, la force électromotrice induite dans la spire est de e volts, telle que $P = e i$.

$$\text{Ce qui donne } e = \frac{P}{i} = \frac{100}{20} = 5 \text{ volts.}$$

Inversement, si la force électromotrice induite dans un circuit est de $e = 5$ volts, si le circuit est traversé par 10 ampères, la puissance mécanique absorbée est de $P = e i = 5 \times 10 = 50$ watts.

Si le courant engendré dans une première spire parcourt une seconde spire dans le même sens que celui que celle-ci engendrerait si elle était fermée sur elle-même — et, dans ce cas, on dit que les spires sont associées en *série* ou en *tension* — la puissance mécanique totale absorbée dans les deux spires est égale à la somme des puissances absorbées par chacune d'elles ; si $P_1 = e_1 i$ est la puissance absorbée par la première et $P_2 = e_2 i$ la puissance absorbée par la seconde.

$P = P_1 + P_2 = (e_1 + e_2) i$ est la puissance totale absorbée par les deux spires.

$$\begin{aligned} \text{Si on pose} \quad e &= e_1 + e_2 \\ P &= e i \end{aligned}$$

e est appelée la force électromotrice totale de l'ensemble des deux spires, elle est égale à la somme des forces électromotrices de chacune des spires qui forment le circuit total des deux spires.

Si on veut augmenter la force électromotrice d'un générateur, il faudra associer entre eux les divers circuits générateurs, de façon que chacun d'eux soit traversé par un courant de même sens que celui qui le traverserait s'il était fermé sur lui-même; on augmentera en outre la force électromotrice en multipliant le nombre de spires des bobines induites du générateur.

74. Comment varie la tension entre les bornes de l'alternateur. — La puissance électrique disponible dans le circuit extérieur qui relie les bornes du générateur est égale à la puissance électrique totale du générateur diminuée de celle qui se perd sous forme d'effet Joule dans le circuit intérieur du générateur

$$P = ei - ri^2$$

r est la résistance du circuit induit.

Si V' est la tension aux bornes du circuit récepteur on a donc

$$\begin{aligned} V' i &= ei - ri^2 \\ (1) \quad V' &= e - ri \end{aligned}$$

L'expérience montre que, dans le générateur, on peut négliger ri devant e .

La tension aux bornes du circuit extérieur varie donc comme la force électromotrice du générateur qui l'alimente. Celle-ci est d'autant plus élevée que le générateur comprend un plus grand nombre de spires en série.

On fait ainsi couramment des générateurs de grande puissance, de 3.000 à 5.000 volts efficaces; on fait même des générateurs volants de 30.000 volts.

75. **Transformateurs de tension.** — On peut augmenter théoriquement la tension de transmission de l'énergie autant que l'on veut par les transformateurs.

Si sur une bobine traversée par un courant on enroule une autre bobine de fil métallique fermée sur elle-même, celle-ci est le siège de courants induits quand le courant de la première varie; pour un même courant variable dans la bobine inductrice, on augmente considérablement l'intensité du courant induit en enroulant les bobines inductrice et induite sur un noyau de fer doux; on obtient le maximum d'effet lorsqu'on enroule les bobines inductrice et induite sur un même cadre rectangulaire en fer feuilleté formé par l'empilement des unes sur les autres, de tôles de fer recouvertes d'un enduit ou d'un papier isolant et empilées de façon à former un O gothique (fig. 32) : sur chacun des bras du cadre, on enroule une bobine inductrice et une bobine induite; la bobine inductrice s'appelle le *primaire*, la bobine induite, le *secondaire* du transformateur.

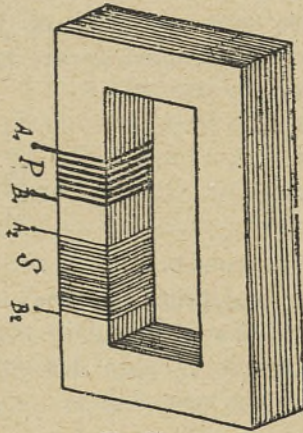


Fig. 32

La première étant traversée par le courant alternatif, on voit par un raisonnement analogue à celui que nous avons fait pour l'alternateur, que la tension aux bornes du primaire sera exprimée à chaque instant par la relation (1)

$$V = E - ri$$

E étant la force électromotrice d'induction dans la bobine primaire; mais l'expérience montre que le terme ri est absolument négligeable devant E et on a $V = E$; or, si une spire enroulée sur la carcasse de fer en un endroit quelconque est le siège d'une force électromotrice e_1 , les n_1 spires enroulées sur la carcasse seront le siège d'une

force électromotrice n_1 fois plus grande, c'est-à-dire $n_1 e_1$, et on a

$$V_1 = n_1 e_1$$

de même chaque spire du secondaire sera le siège d'une force électromotrice e_2 par suite les n_2 spires du secondaire seront le siège d'une tension $V_2 = n_2 e_2$ aux bornes du secondaire et le rapport de la tension entre les bornes du secondaire à la tension entre les bornes du primaire est

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2 e_2}{n_1 e_1}$$

mais en général les lignes de force qui traversent les spires du primaire sont les mêmes que celles qui traversent le secondaire; la force électromotrice d'induction créée dans une spire du primaire est donc égale à la force électromotrice créée dans une spire du secondaire; on a donc

$$e_2 = e_1$$

et

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

Un transformateur recevant de l'énergie électrique dans son primaire sous une tension V_1 transmet cette énergie à son secondaire sous une tension V_2 qui est à V_1 comme le nombre des spires primaires est au nombre des spires secondaires.

Le rapport $\frac{V_2}{V_1}$ de la tension secondaire transformée à la tension primaire est égal au rapport $\frac{n_2}{n_1}$ du nombre de spires secondaires au nombre de spires primaires. Le rapport $\frac{n_2}{n_1}$ s'appelle le *rapport de transformation*. On réalisera donc toutes les tensions que l'on voudra en faisant varier le nombre de spires du secondaire,

Si $n_2 > n_1$ la tension secondaire est plus élevée que la tension primaire. Si $n_2 < n_1$, la tension secondaire est moins élevée que la tension primaire. Suivant que l'on fait passer le courant inducteur dans l'une ou l'autre des bobines du transformateur, on recueille aux bornes de la bobine induite, c'est-à-dire du secondaire, un courant à

tension plus élevée ou plus faible que la tension du primaire.

Le rendement du transformateur peut atteindre 97 0/0 et 98 0/0 ; si on le considère comme égal à l'unité à chaque instant, sans tenir compte de la forme magnétique intermédiaire de l'énergie, on voit que le rôle du transformateur consiste transformer la puissance $V_1 i_1$ communiquée à son primaire en une puissance $V_2 i_2$ communiquée à son secondaire telle que

$$\begin{aligned} V_1 i_1 &= V_2 i_2 \\ \text{Or, si } \frac{V_2}{V_1} &= \frac{n_2}{n_1} \\ \frac{i_2}{i_1} &= \frac{n_1}{n_2} \end{aligned}$$

les intensités dans le primaire et le secondaire sont en raison inverse de leurs nombres de spires ; si nous voulons élever la tension, le courant du secondaire étant beaucoup plus petit que le courant du primaire, les spires du secondaires pourront être à fil beaucoup plus fin que les spires du primaire.

Si un transformateur comprend 100 spires primaires et 20.000 spires secondaires, lorsque le primaire sera traversé par un courant de 1.000 ampères sous une tension de 100 volts, le rapport de transformation étant de 200, on recueille dans le circuit secondaire un courant de 5 ampères sous une tension de 20.000 volts.

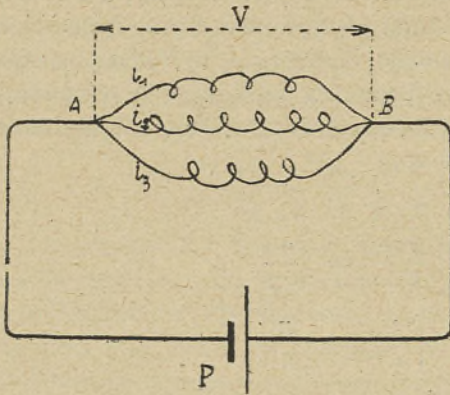
En résumé, le transformateur permet de créer toutes les tensions que l'on veut avec la plus grande facilité. Puisque le rendement des lignes est d'autant meilleur que le courant est plus faible et par suite que la tension est plus élevée, quelles raisons physiques a-t-on pour limiter les tensions de transmission ?

Pour nous rendre compte de ces raisons, nous nous demanderons d'abord : par quels caractères physiques la tension aux bornes d'un circuit est caractérisée.

76. Caractères physiques de la tension. — Si un conducteur est parcouru par un courant, la puis-

sance que ce courant dégage dépend de la tension entre les extrémités de ce conducteur.

Si un conducteur se bifurque en plusieurs dérives



(Fig. 33)

ayant mêmes extrémités (fig. 33), chacune d'elles est traversée par un courant et la puissance qu'elle dégage est représentée par le produit du courant qui la traverse par la tension entre ses bornes.

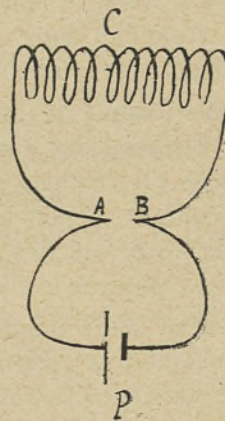
L'expérience

montre que la tension est la même pour chaque dérivation. Puisque ces dérives n'ont que leurs extrémités communes, on est amené à penser que la tension ne dépend que de l'état électrique de ces extrémités.

Cet état électrique peut se manifester par l'expérience.

Si on rapproche l'une de l'autre deux extrémités d'un segment de conducteur parcouru par un courant (fig. 34) présentant entr'elles une tension suffisamment élevée, une étincelle, dite étincelle disruptive, jaillit entre elles lorsque la distance qui les sépare a diminué jusqu'à une valeur déterminée appelée *distance explosive* pour la tension considérée.

L'étincelle disruptive ne doit pas être confondue avec l'étincelle de rupture d'un circuit parcouru par un courant. Cette distance explosive est d'autant plus grande que la tension est plus élevée et dépend de la forme des surfaces entre lesquelles jaillit l'étincelle et de la nature de l'isolant qui les sépare.



(Fig. 34)

Les isolants solides ou liquides se laissent percer par cette étincelle, mais plus difficilement que l'air ; à une même distance explosive, la tension qui fait éclater l'étincelle dans le verre ou l'ébonite est de l'ordre de 10 à 15 fois plus grande que celle qui est nécessaire pour faire jaillir la décharge dans l'air.

On appelle *rigidité électrostatique*, le quotient de la tension qui fait éclater l'étincelle par l'épaisseur à laquelle elle jaillit.

On l'exprime en général en évaluant la tension en kilovolts et la distance explosive en centimètres.

Voici les rigidités déterminées par Th. Gray, Macfarlane et J. White.

	Kilovolts par cm
Porcelaine ordinaire	8
Air sous 1 ^{me} de distance explosive entre plateaux	27
Huile de graissage	48
Pétrole	50
Paraffine fondue	56
Air sous 2 ^{me} de distance explosive entre plateaux	57
Huile d'olive	82
Huile de lin	83
Huile de paraffine	87
Huile de térébenthine	94
Porcelaine vitrifiée	120
Paraffine solide	139
Papier buvard paraffiné	150
Verre	285
Papiers paraffinés	300 à 450
Caoutchouc	476
Ebonite	538
Mica	600 à 2.000
Micanite	400

L'état particulier des extrémités d'un conducteur parcouru par un courant se communique à tout conducteur en communication métallique avec elles.

Si l'on rapproche l'une de l'autre deux sphères métalliques de 1 cm. de diamètre placées dans l'air et réunies par des fils métalliques aux extrémités d'un conducteur parcouru par le courant (fig. 35) une étincelle éclate entre elles à une distance explosive de 1^{mm} si la tension entre les extrémités du conducteur est de 4.765 volts. à une distance 10^{mm} si la tension de est de 25.000 volts à une distance de 20^{mm}, si la tension est de 30.000 volts.

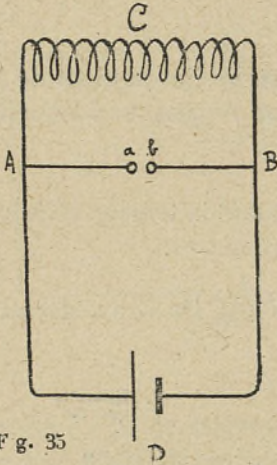


Fig. 35

Lorsque la tension d'un conducteur par rapport au sol devient très élevée, ce conducteur devient lumineux, il se recouvre d'effluves violacées ou émet des aigrettes violacées, s'il présente des angles trop vifs; une partie très faible et de l'énergie transmise par le courant pénètre dans l'air sous une forme particulière et cet air présente lui-même la propriété de faire varier la tension par rapport au sol des conducteurs qu'il touche.

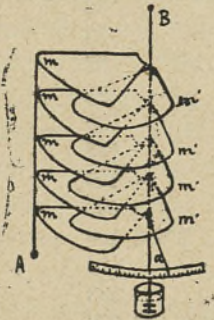


Fig. 36

Les pertes d'énergie qui en résultent, sont en général négligeables par rapport à l'effet Joule aux tensions inférieures à 50.000 volts et pour des fils de 1 cm de diamètre.

Les deux conducteurs en communication avec les extrémités d'un segment de circuit exercent en outre l'un sur l'autre des forces attractives, très faibles, il est vrai, mais qui sont proportionnelles au carré de la tension. On peut mettre en évidence cette attraction en suspendant des feuilles d'étain au secondaire à haute tension d'un transformateur.

C'est sur cette action que sont basés les appareils qui mesurent la tension, les voltmètres (*fig. 36*).

77. Limites physiques des hautes tensions. — Les phénomènes d'étincelle disruptive et d'effluve limitent la tension que l'on peut pratiquement utiliser dans les transports d'énergie. Au fur et à mesure que la tension s'élève, il est de plus en plus difficile d'isoler les conducteurs, de les protéger en particulier contre les effluves ou contre les étincelles disruptives; néanmoins, on est arrivé en ces derniers temps à construire des transformateurs pouvant convertir les tensions de 5.000 volts obtenues directement aux bornes des générateurs en tensions de 40.000 et 80.000 volts.

Mais les isolateurs employés sur les lignes doivent résister à ces tensions. Lorsque la tension est trop élevée des étincelles éclateraient entre la ligne et leurs supports en fer reliés aux poteaux humides. La forme des isolateurs a été modifiée afin d'éviter que ces arcs ne jaillissent entre la ligne et les supports des isolateurs.

Il ne suffit pas d'empêcher les étincelles d'éclater entre la ligne et le support métallique de l'isolateur, en contournant la surface extérieure de l'isolateur, il faut encore que l'étincelle disruptive ne perce pas l'isolateur lui-même, autrement dit, il faut que l'isolateur ait une rigidité électrostatique assez grande pour que la tension de plusieurs milliers de volts qui se produit entre le fil et le goujon de fer qui supporte l'isolateur n'arrive pas à percer l'isolateur, il faudra en outre que la solidité mécanique de l'isolateur soit suffisante pour résister aux efforts de traction auxquels il sera soumis de la part des fils pendant la pose et au moment des tempêtes.

La porcelaine offre une résistance mécanique et un isolement supérieurs au verre, mais sa rigidité électrostatique est inférieure. Cette rigidité est très variable avec la cuisson et la vitrification (voir le tableau p. 97). Il est important que la porcelaine soit bien vitrifiée. On s'en assure en cassant un isolateur; si en écrivant à l'encre rouge sur la cassure,

l'encre est bue par la porcelaine, c'est que la porcelaine est mauvaise. Le verre a une rigidité électrostatique meilleure, mais offre une résistance mécanique et un isolement moins bons.

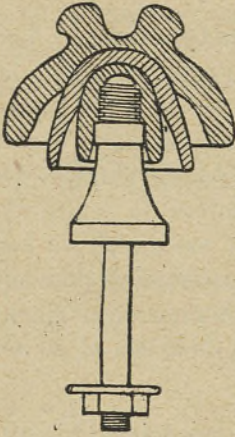


Fig. 37

On a cherché à allier ensemble ces deux qualités fondamentales, en faisant des isolateurs mixtes en porcelaine et en verre (*fig. 37*) ; les deux cloches extérieures sont en porcelaine et sont adaptées sur une cloche intérieure en verre. Les étincelles et les pertes par effluves sont limitées par l'emploi des fils de diamètre d'au moins 1 cm. et un éloignement suffisant des fils de ligne.

SEPTIÈME LEÇON

Les accidents et les dangers des lignes de haute tension
Appareils de Protection

Les accidents des lignes à haute tension sont de deux sortes : accidents sur les personnes, accidents sur les appareils.

78. **Accidents sur les personnes.** — Parlons d'abord des premiers. Le corps humain est conducteur du courant électrique. Si une personne tient deux conducteurs à la main, sa résistance est, d'après une expérience faite à l'Usine des Halles, à Paris, par M. Monmerqué, de 3.000 ohms à 7.500 ohms en courant continu et de 1.500 à 5.000 ohms pour le courant alternatif. Le courant qui traverse le corps humain d'une main à l'autre, est donc variable avec la tension qui lui est appliquée. Ce courant décompose et brûle les tissus ou arrête la respiration dès qu'il atteint quelques centièmes d'ampère. Il est prudent de considérer le courant continu comme dangereux à partir de 400 volts et le courant alternatif à partir de 120 à 150 volts. Les courants continus provoquent des effets destructifs des cellules amenant fatalement la mort. Les courants alternatifs provoquent surtout l'arrêt de la respiration, la syncope et la mort, si la syncope persiste ; mais on peut ranimer les électrocutés en leur pratiquant la respiration artificielle et des injections sous-cutanées d'alcool ou d'éther.

D'après le docteur Battelli (1) les courants alternatifs d'une tension supérieure à 12.000 volts seraient moins

(1) *Electrical Review New-York*, t. 42, p. 520, 12 août 1902.

dangereux qu'à une tension inférieure parce qu'on peut plus facilement rappeler les électrocutés à la vie aux tensions supérieures. D'après certains auteurs, les brûlures diminuent la gravité du danger. On cite ce fait d'un ouvrier ayant reçu une décharge par étincelle par un transformateur à 19.000 volts, il fut grièvement brûlé à la tête, mais sans danger mortel.

Les dangers des hautes tensions dépendent d'ailleurs de la fréquence et disparaissent totalement si elle est de plusieurs milliers de périodes par seconde, mais ce n'est pas le cas dans l'industrie, et les hautes tensions sont d'autant plus dangereuses que la tension est plus élevée, en ce sens qu'il n'est point nécessaire de toucher les conducteurs à haute tension pour en éprouver les dangers, il suffit de les approcher, car une étincelle de rupture peut jaillir et foudroyer l'imprudent; aussi, est-il d'abord indispensable d'entourer tout appareil et tout conducteur d'un filet métallique protecteur, filet que l'on mettra soigneusement en communication avec le sol.

Sous les lignes aériennes à haute tension, on disposera, au moins dans tous les endroits fréquentés, un filet métallique en communication avec la terre à chacun des poteaux de la ligne; de sorte que si un fil se rompt par une cause quelconque, il ne tombe pas à terre et n'expose pas les passants

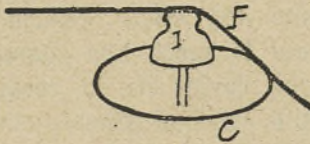


Fig. 38.

par un contact imprudent, à un danger mortel. Dans les endroits moins fréquentés, on se contente souvent de placer immédiatement au-dessous de chaque fil, un cercle de terre (*fig. 38*); c'est un cercle métallique réuni métalliquement au sol, disposé au-dessous de chaque isolateur et suffisamment près de lui pour que le fil conducteur, en tombant par terre, repose en particulier sur le cercle, de sorte qu'il soit en bon contact avec le sol.

Les accidents des lignes à haute tension sont de même

nature que ceux des lignes à basse tension mais présentent plus de gravité et de difficulté à parer.

79. Courts circuits. — Dans les circuits ordinaires, il peut se présenter des courts circuits, c'est-à-dire que deux fils de lignes, ou deux bornes d'un appareil peuvent être mis en contact par un fil métallique. Dans ce cas, la tension baisse et se réduit à zéro aux bornes du récepteur qui cesse de fonctionner ; le courant du générateur passe par le court circuit et la résistance du circuit extérieur de l'alternateur ou du transformateur étant très faible, le débit augmente considérablement et il est possible que les fils induits de l'alternateur ne supportent pas ce courant sans brûler. Dans les circuits à basse tension, on est conduit à placer sur le circuit de la ligne un fil fusible appelé coupe circuit qui fond avant que le courant n'ait atteint une valeur dangereuse ; on fait de même dans le cas de hautes tensions, mais au moment où le fusible fond, un arc jaillit entre les points que l'on coupe et l'étincelle de rupture continue de laisser passer le courant, si le fusible n'est pas suffisamment long. Des arcs de 1 mètre de long peuvent se maintenir entre les branches d'un conducteur que l'on écarte dans l'air et présentant une tension de 10.000 volts. On a pu constater, paraît-il, des arcs de 9 mètres de long entre les extrémités d'un interrupteur que l'on écarte entre lesquelles existait une tension de 40.000 volts (1). Pour diminuer la longueur du coupe-circuit, on a placé les fils dans l'huile et on leur a donné une longueur d'un centimètre par 500 volts ; les coupe-circuits d'une ligne à 50.000 volts seront donc des fils de 1 mètre de long dans l'huile. Pour éviter tout danger d'étincelle, au moment de leur fusion, les coupe-circuits de chaque fil de ligne sont placés dans un compartiment cloisonné, mais il est dangereux de couper brusquement les courants trop intenses.

80. Surtension. — En effet si on coupe brusquement le courant dans une bobine d'un très grand nombre de

(1) Tolomazo. Trans. of amér. Institut, of El. Eng., t. XVIII.

spires avec noyau de fer doux, on constate une surélévation considérable de tension entre les bornes du circuit. Nous avons disposé l'expérience de la façon suivante :

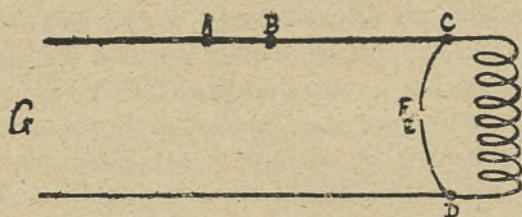


Fig. 39

les deux bornes C. D. d'un circuit de transformateur sont en relation métallique avec deux

fils métalliques se terminant en pointe fine E F, en face et le plus près possible l'une de l'autre ; les extrémités de la bobine sont en outre réunies aux bornes d'une pile G à courant constant à 110 volts, (*fig. 39*) par des fils métalliques dont l'un comprend un interrupteur ou un coupe-circuit AB ; au moment où le courant s'interrompt par l'interrupteur ou par la fusion du fusible, on observe souvent des étincelles entre les pointes ; or, une étincelle pour se produire en E F nécessite une tension de plus de mille volts et la tension qui existe normalement sous le courant étant de 110 volts, la tension produite à la rupture est donc de 10 à 20 fois plus grande que la tension normale ; si donc un transformateur est fait pour une tension de 50.000 volts, si on interrompt brusquement le courant, on pourra produire une tension de 500.000 volts ; c'est ce que l'expérience montre. MM. Cowan et Andrews (1) ont constaté que l'isolant du transformateur avait été percé par la rupture brusque d'un circuit et dans certains cas la surélévation de tension avait été de 10.000 à 250.000 volts. Le procédé logique de couper un circuit serait donc de le couper par une diminution graduelle d'intensité.

81. Pertes à la terre. — Un troisième danger qui se ramène aux précédents est la communication métallique d'une ligne avec un point du sol (*fig. 40*).

(1) MM. Cowan et Andrews (*Journal of the institution of american Engineers*, juin 1903).

En effet, si un point d'une deuxième ligne com-

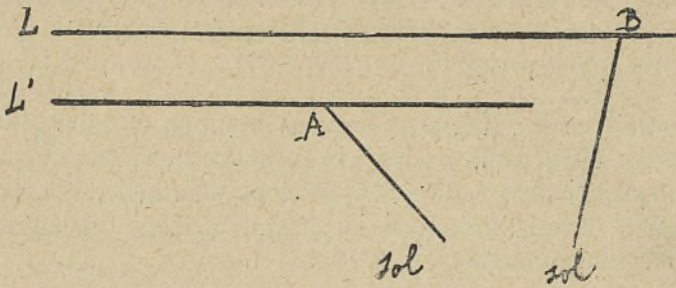


Fig. 40.

muniqué également avec le sol par un fil de faible résistance, le sol ne présentant qu'une résistance très petite, pour ainsi dire nulle, les deux lignes communiquent entre elles par une résistance très faible et sont mises en court circuit par la terre.

Le court circuit et la rupture de circuit étant dangereux, il faudra donc éviter autant que possible l'un et l'autre par une pose convenable de la ligne.

82. Précautions à prendre pour la pose des lignes.

— Dans les canalisations aériennes, les fils sont suffisamment tendus sur les isolateurs et éloignés l'un de l'autre pour que le vent ne les amène point au contact ; il faut en outre que les fils ne se rompent pas sous l'influence des agents atmosphériques ou climatiques.

Les poteaux qui supportent la ligne doivent être calculés de façon que les vents les plus violents qui dévastent parfois le pays soient impuissants à renverser la ligne ; on supposera donc que le vent souffle en tempête et exerce une pression de 180 kg. par mètre carré de surface exposée au vent normalement à sa direction.

Les fils seront tendus avec une force qui dépendra des circonstances de la pose ; on se rendra compte de cette tension par la flèche C D (fig. 41) de la courbe dessinée

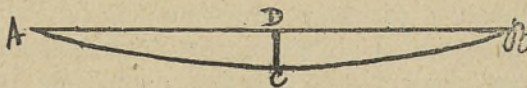


Fig. 41.

par le fil, flèche d'autant plus petite que le fil est plus tendu et moins lourd ; cette tension doit toujours être telle qu'en aucun cas la tension n'atteigne le cinquième de la charge de rupture.

Or vous savez que si on tend un fil en été entre deux points fixes, ce fil tendra à se raccourcir en hiver et cette contraction fera naître des tensions énormes qui le rompraient inévitablement si on n'avait ménagé une flèche suffisante au moment de la pose.

De plus, la ligne peut se couvrir de neige et sa tension augmente de ce fait ; on en tiendra compte quoiqu'un courant dans la ligne puisse faire fondre celle-ci ; on choisira une tension de pose telle que par les plus grands froids qui règnent dans la région, la tension maximum soit toujours inférieure au cinquième de la charge de rupture.

On aura en particulier intérêt à choisir pour la ligne un métal aussi léger et d'aussi faible résistivité que possible, dont la charge de rupture par unité de section soit la plus grande possible c'est-à-dire des fils de la meilleure ténacité, le moins sensibles aux variations de température, c'est-à-dire celui dont le coefficient de dilatation est le plus petit.

Le cuivre pur ne convient pas à la construction des lignes aériennes, sa charge de rupture est trop faible. Les bronzes silicieux et phosphoreux sont meilleurs et on les préfère. Un fil de cuivre de 1^{mmq} de section se rompt sous une charge de 27 Kg environ ; un fil de bronze silicieux ou phosphoreux sous une charge de 45 Kg à 56 Kg et sa conductibilité est encore les 97 0/0 de celle du cuivre pur ; le coefficient de dilatation du cuivre est 0,00001678.

Un fil d'aluminium de 1^{mmq} de section se casse sous un poids de 28 Kg., son coefficient de dilatation linéaire est 0,00002313 et sa résistivité est deux fois plus grande.

À longueur et résistance électrique de lignes égales, le poids de la ligne d'aluminium est deux fois plus petit, mais l'aluminium a une section double de celle du cuivre ; le fil d'aluminium aura donc une charge de rupture

sensiblement égale à celle du fil en bronze phosphoreux, son diamètre sera 1,414 fois plus grand et offrira donc plus de prise au vent que le fil de cuivre ; si on préfère l'aluminium au cuivre, il faudra par conséquent renforcer les poteaux. Le coefficient de dilatation étant plus élevé, la ligne en aluminium sera plus sensible aux variations de température que la ligne en cuivre. C'est après l'examen de ces divers points que l'on se décidera entre le cuivre et l'aluminium, disons tout de suite qu'à prix égal le cuivre sera toujours préféré.

83. Accidents provoqués par la foudre. —

Les lignes électriques peuvent être frappées par la foudre et les orages. Les accidents de la foudre sur la ligne peuvent être de deux sortes : ou bien l'étincelle jaillit entre le nuage et la ligne, la foudre tombe sur la ligne, cela arrive très rarement ; ou bien l'étincelle jaillit en un point terrestre, voisin de la ligne de quelques centaines de mètres, et ceci arrive très fréquemment.

Examinons d'abord ce dernier cas. Le courant très intense et très rapidement variable qui constitue l'étincelle de la foudre induit dans les conducteurs qui constituent la ligne des courants induits. Une surélévation de tension se produit entre deux points de ligne et entre la terre et la ligne, et cette surtension est telle que des étincelles jaillissent entre la terre et la ligne ou entre deux lignes, ou encore entre les spires des appareils des usines génératrice et réceptrice. Les étincelles qui éclatent à travers les spires des alternateurs ou des transformateurs mettent ces derniers hors d'usage, et d'un autre côté, les arcs qui s'allument entre les lignes mettent les générateurs et transformateurs en court circuit et risquent de les brûler,

On pourra éviter ces conséquences fâcheuses des orages sur les lignes de transport de l'énergie par l'installation de parafoudres.

84. Principe des parafoudres. —

On évitera les étincelles disruptives qui résultent des surtensions produites par les orages en limitant la tension entre chaque

ligne et le sol par une sorte de soupape de sûreté appelée parafoudre.

Soient L une ligne et A un conducteur voisin réuni métalliquement au sol. Soit V la tension qui existe normalement entre chaque ligne et le sol et qui provoquerait, par exemple, une étincelle entre A et la ligne, lorsque la distance de A et de L est de d millimètres.

Le système du conducteur A réuni métalliquement au sol T (fig. 42) par un fil de terre constitue un parafoudre, si

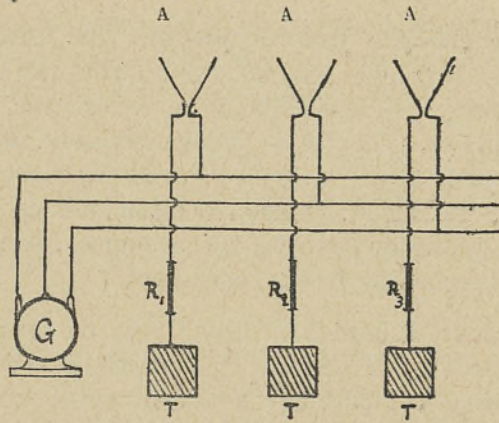


Fig. 42

la distance explosive entre le conducteur A et la ligne est supérieure à cette distance d d'un ou deux millimètres. En effet, dans ce cas aucune étincelle n'éclatera entre le point A et la ligne dans le fonctionnement normal, mais si une surtension se produit sur la ligne, une étincelle jaillit entre le conducteur A du parafoudre et la ligne; et cette étincelle empêchera la tension de s'élever à des valeurs dangereuses.

Mais en général les parafoudres, placés en divers points de la ligne, fonctionnent simultanément et par conséquent, les lignes communiquent entre elles par la terre et les étincelles des parafoudres § 81.

Nous avons évité la surélévation de la tension, mais créé un court-circuit entre lignes; il s'agit maintenant de rendre ce court-circuit sans danger.

85. **Suppression du court-circuit.** — Pour cela, on réunit le parafoudre au sol par un fil métallique dans lequel on intercale une colonne liquide ou des charbons de résistance R (*fig. 42*) suffisante pour que le courant de court-circuit fourni par les génératrices ne fasse baisser que faiblement la tension aux bornes du réseau, et ne produise aucune surélévation dangereuse de tension lorsqu'on supprimera l'étincelle. Quel que soit le courant de court-circuit par la terre, il faut le supprimer ; on se sert, à cet effet, de pare-étincelles ou extincteurs d'arcs.

86. **Pare-Étincelles.** — Le plus simple est celui du parafoudre à cornes. Ce parafoudre est constitué par deux conducteurs formant un V légèrement ouvert en bas (*fig. 42*).

L'un est réuni métalliquement à un point de la ligne ; l'autre distant du premier d'un espace explosif convenable est uni métalliquement au sol par un fil métallique et une résistance.

Lorsque les parafoudres fonctionnent, le courant du court-circuit de la ligne traverse l'espace explosif en forme d'arc lumineux ; sous l'influence de la chaleur produite par l'étincelle, l'arc monte entre les tiges et s'allonge au point de s'éteindre.

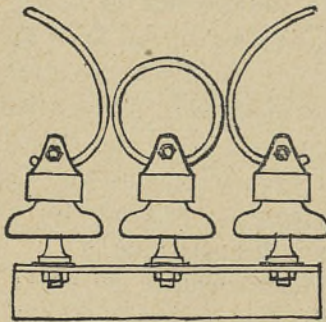


Fig 43.

Dans l'expérience mise sous vos yeux (*fig. 43*), nous faisons jaillir un arc entre les cornes du parafoudre ; pour une intensité suffisante du courant l'arc monte, s'allonge et s'éteint ; avec des parafoudres montés en série qui divisent l'étincelle en plusieurs fragments plus petits, ces arcs partiels se refroidissent plus facilement

et s'éteignent par conséquent plus rapidement.

Ces conducteurs espacés sont tantôt en cuivre, tantôt en charbon, tantôt à base d'antimoine et de zinc qui ont la

propriété d'éteindre les arcs, tantôt on ajoute un électro-aimant traversé par le courant de court-circuit qui agit sur le parafoudre pour augmenter l'écart des deux cornes et éteindre l'arc par allongement, tantôt cet écart est produit par l'échauffement brusque de l'air.

87. Protection préventive contre la foudre. — Paratonnerre de lignes. — Quels sont les accidents à craindre de la chute de la foudre sur la ligne ? Peut-on préserver la ligne ?

Pour protéger la ligne, il faudrait empêcher la foudre de frapper un point quelconque de la ligne ; pour cela, il faut rendre la décharge plus facile entre le nuage et un conducteur voisin en communication avec le sol ; on y arriverait efficacement, je pense, en tendant au-dessus des lignes un fil métallique, en ronce de fer par exemple, en communication avec la terre d'une façon très soignée par une plaque métallique dans une terre humide et en isolant les transformateurs et alternateurs à l'usine. Dans ces conditions, il existe entre les appareils et la ligne par suite de l'influence électrostatique des nuages orageux sur la ligne, une tension moins élevée que si la ligne était à la terre et il y a beaucoup de chances pour que la foudre frappe le fil de protection plutôt que la ligne.

88. — Cas d'un coup de foudre sur la ligne. — Mais dans le cas où la foudre tombe sur un fil de ligne, quels seront les dommages à craindre ? La foudre étant un courant alternatif très rapidement variable, élève notablement et brusquement la tension de la ligne, des étincelles éclatent simultanément à plusieurs parafoudres de ligne, les alternateurs sont mis en court circuit par les arcs qui jaillissent entre les cornes des parafoudres.

On peut reproduire expérimentalement cet effet ; on installe artificiellement une ligne et ses parafoudres, en reliant un récepteur quelconque à une pile. Un transformateur dont l'une des bornes de son secondaire à haute tension est réunie au sol, a son autre borne isolée et se prolonge par un fil métallique ou antenne qui se termine à un centimètre de la ligne.

Si on fait fonctionner le transformateur, une étincelle éclate entre la ligne et l'antenne ; cette étincelle représente le coup de foudre. Une surtension se produit sur la ligne et fait éclater une étincelle au parafoudre ; les parafoudres s'amorcent et des arcs jaillissent entre leurs cornes.

Dès que les parafoudres de ligne ont fonctionné, non seulement le courant des générateurs les traverse, mais le courant rapidement variable et décroissant qui constitue la foudre, traverse le fil de terre du parafoudre. A cause de la tension énorme qui existe entre les nuages orageux et le sol, tension qui dépasse sans doute plusieurs centaines de mille volts, la tension entre la terre et un fil de ligne tend à s'élever sous le passage du courant.

Or l'expérience montre que pour un courant déterminé, la tension entre la ligne et le sol est d'autant plus petite que le fil de terre est plus court et moins résistant.

On réalise la première condition en prenant un fil de terre rectiligne, mais il faut remarquer que la seconde est contradictoire avec les conditions les plus favorables pour qu'un fil de terre de parafoudre protège efficacement la ligne contre les conséquences des courts-circuits des générateurs, qui suivront les premiers.

Pour parer aux surtensions qui accompagnent un coup de foudre sur une ligne, il faudrait donc que le fil de terre du parafoudre ait une résistance aussi faible que possible comme celle d'un fil de paratonnerre ; d'autre part pour rendre les courts-circuits anodins, il faudrait une résistance suffisamment élevée ; le même fil de terre servant simultanément aux deux usages, il faut choisir un juste milieu et j'estime que la règle suivante donnerait de bons résultats, que chaque fil de terre ait une résistance égale au quotient de la tension normale qui existe entre un fil de ligne et le sol par cinq à dix fois le courant normal fourni par les génératrices.

Dans la pose du fil de terre, on se souviendra qu'entre la terre et le fil existe une résistance de contact variable avec les terrains et leur état d'humidité et qu'il importe autant que possible de réduire au minimum, en faisant aboutir le fil de terre à une plaque métallique enterrée

dans un sol humide et d'une surface d'un mètre carré environ.

Les parafoudres à cornes seront placés sur chaque fil à la sortie de l'usine génératrice (*fig. 43*), et à l'entrée d'un poste quelconque de transformateurs ou de récepteurs ; enfin sur la ligne à des distances de 5 à 10 kilomètres.

Les conditions physiques de pose et de fonctionnement de la ligne nous étant connues, nous étudierons dans notre prochaine leçon les conditions économiques.

HUITIÈME LEÇON

**La densité de courant et la tension les plus favorables
pour la transmission de l'énergie**

89. **Le problème économique des transports d'énergie.** — La question économique qui se pose à l'ingénieur qui veut installer un transport d'énergie semble être la suivante :

La puissance utile que l'on veut produire étant donnée d'avance, quelle puissance doit-on installer à l'usine génératrice située à une distance D de l'usine réceptrice et quelle est la section des canalisations à adopter pour que la dépense d'installation et le prix de revient de l'énergie à la station réceptrice soit minimum? La résolution de ce problème conduit à la règle de Lord Kelvin sur la densité la plus économique rappelée plus loin.

Le problème économique réel me paraît légèrement différent du précédent. Dans les transports d'énergie, la puissance utile n'est pas absolument déterminée; elle est appelée à grandir mais ce qui est toujours donné c'est la puissance installée à l'usine.

En effet, après avoir jeté un coup d'œil sur la puissance totale qui sera un jour installée à l'usine, sur la vitesse de développement de cette installation, l'ingénieur aura d'abord à choisir les types et la puissance des machines génératrices, etc. A un stade quelconque du développement de l'usine, il y aura à la station génératrice une installation de machines d'une puissance *déterminée* dont il faut tirer le meilleur parti et le problème économique posé sera le suivant.

Etant donnée une usine génératrice de puissance installée donnée P, dans quelles conditions faut-il établir le transport de l'énergie à la station réceptrice pour retirer de l'entreprise le plus grand bénéfice.

90. **Mise en équation du problème.** — Nous savons que, pour augmenter le rendement, il faut élever la tension de transmission et pour obtenir le maximum de sécurité relativement aux accidents dûs aux étincelles disruptives qui éclateraient aux appareils de l'usine, avec le minimum de dépenses, il faut employer les courants triphasés.

Nous produirons l'énergie à une tension moyenne commode, 3.000 volts par exemple, entre deux bornes des génératrices ; nous élèverons cette tension à l'aide de transformateurs installés à la station génératrice, nous réunirons les bornes communes de leurs secondaires à haute tension aux bornes du primaire à haute tension d'autres transformateurs installés à la station réceptrice, par trois lignes ou fils conducteurs suspendus à des poteaux ; nous recueillerons aux bornes des secondaires de la station réceptrice, un courant à tension moyenne, 3.000 volts par exemple, directement utilisable pour les moteurs à champ tournant ou un courant à basse tension, 110 volts, maniable sans danger pour les personnes.

Il s'agit de rendre maximum le bénéfice de l'entreprise. Calculons d'abord la puissance utilisable à la station réceptrice.

La puissance disponible aux bornes des génératrices étant P, la puissance disponible aux bornes du secondaire des transformateurs de départ, à l'origine des lignes, sera

$$P_1 = P - \frac{k_1}{100} P$$

en désignant par $\frac{k_1}{100} P$ la puissance perdue dans les transformateurs.

La puissance perdue en ligne est $N \frac{r l i^2}{s}$

N désignant le nombre de lignes installées, r la résis-

tivité, l la longueur, s la section d'une ligne, i le courant qui la parcourt.

L'énergie perdue pendant le temps dt est $N \frac{r l i^2}{s} dt$

L'énergie perdue pendant un temps dt' où le courant a la valeur i' sera

$$N \frac{r l i'^2}{s} dt'$$

de sorte que l'énergie perdue annuellement sera

$$W = N \frac{r l (i^2 dt + i'^2 dt' + \dots)}{s}$$

dt, dt' etc. désignant les diverses durées élémentaires en lesquelles on peut décomposer une année. Si cette énergie était perdue par un courant constant passant pendant la durée moyenne d'utilisation T , l'intensité efficace i_e de ce courant eût été i_e telle que

$$W = N \frac{r l i_e^2 T}{s}$$

et elle est exprimée en wattheures, si T est évaluée en heures, i_e en ampères et r en ohms ; en outre la puissance perdue P' est exprimée en watts.

$$P' = N \frac{r l i_e^2}{s}$$

La puissance disponible aux bornes du primaire des transformateurs d'arrivée sera

$$P - \frac{k_1}{100} P = N \frac{r l i_e^2}{s}$$

Les pertes dans le transformateur d'arrivée étant aussi de $\frac{k_2}{100}$ de la puissance amenée aux bornes du primaire,

les pertes dans le transformateur d'arrivée seront

$$\frac{k_2}{100} P - \frac{k_1 k_2}{100^2} P = \frac{k_2}{100} N \frac{r l i_e^2}{s}$$

et la puissance utilisable disponible aux bornes du secondaire sera la puissance génératrice diminuée des pertes successives, c'est-à-dire

$$P - \frac{k_1 + k_2}{100} P + \frac{k_1 k_2}{100^2} P = \left(1 - \frac{k_2}{100}\right) N \frac{r l i_e^2}{s}$$

Calculons maintenant les dépenses.

Si n est la dépense d'installation par watt et a le taux d'amortissement des bâtiments, des appareils et machi-

nes de l'usine, $P \pi a$ représente la dépense annuelle due à l'amortissement de l'usine.

Si π_1 représente le prix d'installation par watt des transformateurs de l'usine génératrice, et a_1 leur taux d'amortissement $\left(P - \frac{k_1 P}{100}\right) \pi_1 a_1$ représente la dépense annuelle d'amortissement des transformateurs de départ.

Si π_2 représente le prix d'installation par watt d'un transformateur de la station réceptrice et a_2 le taux d'amortissement $\left(P - \frac{k_1 + k_2}{100} + \frac{k_1 k_2}{100^2} P - \frac{Nr l i e^{-2}}{s}\right) \pi_2 a_2$ représente la dépense annuelle d'amortissement des transformateurs d'arrivée.

La dépense de la ligne se compose de deux parties, l'une comprenant en particulier les poteaux et isolateurs, et qui ne dépend pas de la section de la ligne, l'autre comprenant la ligne elle-même proportionnelle à la section ; chacune d'elles est proportionnelle à la longueur en adoptant pour taux d'amortissement et d'entretien la valeur b .

Nous écrivons le premier $m l b + m' l$; le second sera $N n l s b$; $m' l$ étant la dépense d'entretien et de surveillance, $m l$ étant la dépense d'installation des poteaux, n le prix de l'unité de volume du cuivre à pied d'œuvre.

Soit p la dépense d'exploitation par wattheure produit à l'usine ; en évaluant la puissance en watts et le temps en heures, PTp représente la dépense de production de l'énergie annuelle à l'usine ; soient G les frais généraux de l'exploitation.

La dépense annuelle est représentée par

$$\begin{aligned} & A P (\pi a + T p) + \left(- \frac{k_1}{100} P \right) \pi_1 a_1 \\ & + \left(P - \frac{k_1 + k_2}{100} + \frac{k_1 k_2}{100^2} P - \left(\frac{k_2}{100} \right) N r \frac{l}{s} i e^{-2} \right) \pi_2 a_2 \\ & + m l b + m' l + N n l s b + G \end{aligned}$$

La recette annuelle provient uniquement de l'énergie

vendue, soit p_1 le prix de vente du wattheure. La vente de l'énergie produira une somme

$$\left(P - \frac{k_1+k_2}{100} + \frac{k_1 k_2}{100^2} P - \left(1 - \frac{k_2}{100} \right) N r \frac{l}{s} i e^2 \right) T p_1$$

Le bénéfice de l'entreprise sera donc de

$$B = \left(P - \frac{k_1+k_2}{100} P + \frac{k_1 k_2}{100^2} P - \left(1 - \frac{k_2}{100} \right) N r \frac{l}{s} i e^2 \right) T p_1$$

$$(1) \quad - P (n a + T p) - \left(P - \frac{k_1}{100} P \right) n_1 a_1$$

$$- \left(P - \frac{k_1+k_2}{100} P + \frac{k_1 k_2}{100^2} P - \left(1 - \frac{k_2}{100} \right) N r \frac{l}{s} i e^2 \right) n_2 a_2$$

$$- m l b - m' l - N n l s b - G$$

91. **Densité la plus favorable.** — Dans une usine qui fonctionne, la puissance génératrice P est donnée ainsi que la tension de transmission, l'on connaît également les lignes et les appareils qui utilisent le courant fourni par le secondaire du transformateur d'arrivée, par suite, le facteur de puissance g ; le courant i_e qui passe dans les lignes est donc déterminée par la formule

$$P = V e i_e g$$

Remarquons que, d'autre part, le prix de vente de l'énergie, le prix d'installation des machines et des transformateurs, les dépenses d'exploitation, la durée moyenne d'utilisation, la résistivité de la ligne, sa longueur, le taux d'amortissement, les prix de pose et d'entretien sont connus ou fixés pratiquement; la seule variable dans cette équation est la section s .

Le bénéfice de l'entreprise dépendra donc uniquement du choix de la section de la ligne, si on se donne la tension; il s'agit de rendre minima la somme A des termes soustractifs qui dépendent de la section s , c'est-à-dire :

$$A = \left(1 - \frac{k_2}{100} \right) N r \frac{l}{s} i e^2 \left(T p_1 - n_2 a_2 \right) + N n l s b$$

Les deux termes de cette somme ont un produit constant, par suite la somme est minimum quand les termes sont égaux c'est-à-dire lorsque l'on a

$$(2) \left(1 - \frac{k_2}{100} \right) N r \frac{l}{s} i e^2 (T p_1 - n_2 a_2) = N n l b$$

on en déduit la section la plus profitable pour le transport de l'énergie

$$(3) \quad s = i_e \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{k_2}{100}\right) r (T p_1 - a^2 n^2)}{n b}}$$

si nous remarquons que $\frac{i_e}{s}$ est le courant moyen qui passe par unité de section, c'est-à-dire la densité moyenne du courant $d = \frac{i_e}{s}$.

$$(4) \quad d = \sqrt{\frac{n b}{\left(1 - \frac{k_2}{100}\right) r (T p_1 - n_2 a_2)}}$$

Remarquons que $\frac{k_2}{100}$ variant de $\frac{2}{100}$, à $\frac{4}{100}$, est négligeable devant l'unité, qu'en outre $n_2 a_2$, amortissement et entretien des transformateurs d'arrivée par watt, est négligeable devant le prix de vente $T p_1$ de l'énergie produite par watt installé en une année, c'est-à-dire devant le prix du watt-an engendré et la condition la plus favorable pour le transport de l'énergie devient

$$(5) \quad N n l s b = N r l \frac{i_e^2}{s} T p_1$$

la densité la plus profitable de transmission de l'énergie est

$$(6) \quad d = \sqrt{\frac{n b}{r T p_1}}$$

L'équation (5) nous amène à énoncer les conditions optima de transmission de l'énergie sous la forme suivante.

Lorsqu'on se donne la tension de transmission de l'énergie au départ des lignes et la puissance installée à l'usine, la *section la plus profitable à donner aux lignes de transmission est telle que le prix de vente d'une quantité d'énergie égale à l'énergie perdue en ligne est égale à l'amortissement des câbles qui la constituent.*

Pour une ligne en cuivre qui coûterait $n = 22,50$ francs le kilomètre de fil de ligne aérienne d'un millimètre carré de section amortie au taux $b = 0,08$, r étant pris égal à

20 ohms par kilomètre et par millimètre carré de section, les densités les plus profitables seraient :

0,948	avec un prix	Tp_1	du kilowatt-an engendré de	100 fr.
0,774	»	»	»	150
0,67	»	»	»	200
0,54	»	»	»	300
0,424	»	»	»	500

Dans le cas de câbles isolés pour canalisations souterraines dont le coût est double, on voit que les densités sont $\sqrt{2}$ fois plus grandes, c'est-à-dire 1,34 pour une usine qui vendrait l'énergie à 100 francs le kilowatt-an, 1,094 avec un prix de vente de 150 fr., 0,94 avec un prix de vente de 200 fr., 0,77 avec un prix de vente de 300 fr. le kilowatt-an, etc.

On choisit en général pour densité de courant de transmission de l'énergie, la densité la plus économique, de Lord Kelvin, celle qui conduit au minimum de dépenses annuelles ; cette densité

$$d' = \sqrt{\frac{n b}{r (Tp + n a + n_1 a_1)}}$$

Tp est la dépense d'exploitation par watt-an produit à l'usine.

$n a + n_1 a_1$ est la dépense annuelle d'amortissement de l'usine (générateurs et transformateurs de départ).

$Tp + n a + n_1 a_1$ est donc la dépense totale de production du watt-an à l'usine.

On voit que la densité la plus favorable est plus petite que la densité la plus économique ; celle-ci est indépendante de la longueur de la ligne et de tous les frais généraux et divers, autres que ceux de l'usine génératrice ; la densité la plus favorable dépendant du prix de vente par suite implicitement de la longueur de la ligne, des frais généraux, etc.

Remarquons qu'une usine qui se développe installera de nouvelles unités génératrices et de nouvelles lignes au fur et à mesure de ses besoins.

Si avant l'installation d'une nouvelle unité à l'usine génératrice, la durée d'utilisation est T , immédiatement après l'installation de cette unité, la durée moyenne d'uti-

lisation devient plus petite T_1 , car l'énergie à fournir n'ayant pas changé, la durée moyenne d'utilisation est telle que la puissance P devenant P_1

$$P T = P_1 T_1$$

la densité la plus favorable croitra donc avec le développement de l'usine.

Il faut remarquer que c'est avant l'introduction de la nouvelle unité génératrice que la densité doit être la plus faible et après l'introduction que la densité doit être la plus forte ; cette conséquence est conforme à ce qui se passera en pratique ; à mesure que la puissance installée devient plus grande, la puissance transportée le devient aussi et par suite la densité du courant augmente avec la puissance installée. Cette densité étant variable au fur et à mesure du développement de l'usine, on aura intérêt à installer un nombre de plus en plus grand de lignes au fur et à mesure des besoins et on choisira judicieusement la densité la plus économique pour un stade déterminé du développement de l'usine.

Les densités que nous avons trouvées sont des densités moyennes annuelles ; à certains moments et à certaines saisons, en hiver, par exemple, dans les premières heures de la soirée, la puissance demandée sera notablement plus grande qu'en été et par suite la densité du courant à ces moments sera notablement plus grande que la densité moyenne, il faut que ces densités instantanées ne soient pas supérieures à celles que le conducteur peut supporter sans danger pour ses qualités mécaniques. Les densités les plus favorables qui conviennent aux transports d'énergie sont très inférieures à ces densités dangereuses et il n'y a donc que de bonnes raisons pour installer les transmissions d'énergie conformément aux indications fournies par les considérations économiques précédentes.

Il n'est pas inutile de se rendre compte de l'importance du choix de la densité du courant de transmission de l'énergie.

La somme des termes variables avec la section qu'il faut défalquer des recettes se compose de deux termes qui sont égaux quand cette somme est minimum, c'est-à-dire

quand on adopte la densité de courant la plus profitable. L'intensité du courant étant donnée, la section du cuivre est inversement proportionnelle à la densité de courant puisqu'on a

$$i_e = d s$$

Le déficit des recettes étant d'autre part une somme de deux termes dont l'un est proportionnel, l'autre inversement proportionnel à cette section, on voit tout de suite que les deux termes étant égaux pour la densité la plus profitable et la somme égale au double de l'un d'entre eux, l'un des termes devient double et l'autre moitié lorsque la densité devient deux fois plus grande ou plus petite que la densité la plus profitable. Les charges annuelles augmentent de ce fait de la moitié de l'amortissement du cuivre employé avec la densité la plus profitable.

Si la densité usitée ne diffère que du tiers de la densité la plus profitable, le transport de l'énergie ne coûte en plus qu'un $\frac{1}{24}$ de l'amortissement du cuivre nécessaire avec la densité la plus profitable, pour des densités de plus en plus voisines de la densité la plus favorable, l'écart tend à s'évanouir.

On aura donc une certaine latitude dans le choix de la densité de transmission et on pourra la choisir de façon qu'elle soit sensiblement voisine de la densité la plus profitable pendant la phase de développement de l'usine.

92. Tension la plus favorable. — Lorsqu'on considère les divers facteurs qui interviennent dans la formule de la densité la plus profitable (91), on remarque que l'amortissement des transformateurs n'influe que très faiblement sur la valeur de la densité la plus profitable. Si on vend l'énergie au prix très minime de 6 c. le kilowatt-heure, le kilowatt-an de 2.000 heures revient à 120 fr. pris à l'usine même au prix moyen de 100 fr. le kilowatt installé, l'amortissement des transformateurs par dixième ne peut donc modifier notablement la densité la plus profitable. Cette densité étant choisie, on peut se poser cette question : quelle est pour un transport d'énergie à une distance donnée la tension la plus profitable de transmission ?

Lorsqu'on transmet l'énergie par transformateurs au départ et à l'arrivée, les génératrices étant choisies, on sait que le rendement de la ligne est d'autant meilleur que la tension de transmission est plus élevée, mais le prix des transformateurs au départ et à l'arrivée croît avec la tension choisie, on conçoit donc qu'il existe une tension optima pour le transport. Avec les notations précédentes (1), l'amortissement du coût des transformateurs peut se mettre sous la forme :

$$P n_1 a_1 + A$$

A étant l'augmentation de dépenses annuelles provenant de l'accroissement de prix dû au voltage, elle peut s'écrire

$$A = P n_1 a_1 f V$$

où V est la tension de transmission, f un facteur de proportionnalité qui dépend de la construction et du constructeur de transformateurs.

Si n_1 représente le prix d'installation du watt de transformateur pour un rapport de transformation égal à l'unité et si V est exprimé en volts, f représente l'accroissement relatif de prix par watt et par volt. $P n_1 f V$ est l'augmentation de prix du transformateur de puissance P , si le voltage augmente de V .

Le bénéfice de l'entreprise devient alors en remplaçant $\frac{i_e}{s}$ par d la densité la plus profitable

$$(1) \left\{ \begin{aligned} & \left[P - \frac{k_1 + k_2}{100} P - \frac{k_1 k_2}{100^2} P - \left(1 - \frac{k_2}{100} \right) N r l s d^2 \right] T p_1 \\ & - P (n_1 a_1 + T p) - \left(P - \frac{k_1}{100} P \right) n_1 a_1 (1 + f V_1) \\ & - \left[P - \frac{k_1 + k_2}{100} P + \frac{k_1 k_2}{100^2} P - \left(1 - \frac{k_2}{100} \right) N r l s d^2 \right] n_2 a_2 (1 + f V_2) \\ & - m l b - m^1 l - N n l s b - G \end{aligned} \right.$$

avec la relation du § 71

$$(2) \quad \left(P - \frac{k_1}{100} P \right) = V_1 s d g$$

Il s'agit en définitive de déterminer une valeur approchée de la tension optima. Nous simplifierons donc légèrement le problème de la façon suivante :

Dans les relations (1) et (2) V_1 , et V_2 sont des variables différentes. Nous confondrons V_1 et V_2 avec une tension

moyenne V . Le problème se ramène alors au suivant : rendre minimum la somme des termes soustractifs B de la somme (1) contenant les variables s ou V , car nous avons vu à propos de la densité la plus favorable que toutes les autres grandeurs sont données, c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} B &= \left(1 - \frac{k_2}{100}\right) N r l s d^2 (T p_1 - n_2 a_2) \\ &+ \left(P - \frac{k_1}{100} P\right) n_1 a_1 f V \\ &+ \left(P - \frac{k_1 + k_2}{100} P + \frac{k_1 k_2}{100^2} P\right) n_2 a_2 f V \\ &+ N n l s b \end{aligned}$$

Nous ne faisons pas figurer le terme $\left(1 - \frac{k_1}{100}\right) N r l s d^2 n_2 a_2 f V$, car il contient le produit des variables s V qui est constant d'après (2).

Si on transmet l'énergie à la densité la plus favorable d , on a la relation (1)

$$\left(1 - \frac{k_2}{100}\right) r d^2 (T p_1 - n_2 a_2) = n b.$$

de sorte qu'il s'agit de rendre minimum

$$2 N n l s b + \left[P \left(1 - \frac{k_2}{100}\right) n_1 a_1 + P \left(1 - \frac{k_1 + k_2}{100} + \frac{k_1 k_2}{100^2}\right) n_2 a_2 \right] f V$$

Cette somme se composant de deux termes dont le produit est constant, est minimum quand les deux termes sont égaux, c'est-à-dire, en négligeant $\frac{k_1}{100}$ et $\frac{k_2}{100}$ devant l'unité, quand on a :

$$(3) \quad 2 N n l s b = P (n_1 a_1 + n_2 a_2) f V$$

Si on remplace P en fonction de sa valeur $P = V s d g$ on voit que la tension la plus profitable pour la transmission de l'énergie devient

$$(4) \quad \left\{ \begin{aligned} V &= \sqrt{\frac{2 N n l b}{(n_1 a_1 + n_2 a_2) f d g}} \end{aligned} \right.$$

La tension la plus profitable est en particulier proportionnelle à la racine carrée de la distance et indépendante de la puissance, si elle ne fait pas varier le prix des transformateurs.

La condition (3) peut s'énoncer ainsi : si on se donne la densité du courant à transmettre, *la tension la plus favorable de transmission de l'énergie est telle que l'amortissement de l'augmentation de prix des transformateurs*

de départ et d'arrivée dû à l'accroissement de la tension est égal au double de l'amortissement des câbles qui transmettent le courant.

Lorsqu'on consulte les catalogues des constructeurs ou ces derniers eux-mêmes, on constate que le facteur f varie suivant les circonstances de 2×10^{-5} à 1.6×10^{-6} .

Nous supposons que l'on transmette l'énergie par courants triphasés avec un facteur de puissance 0,75 de sorte que $g = 0,75 \times \sqrt{3} = 1,3$, avec $N = 3$ fils de ligne en cuivre à 2.500 fr. la tonne à pied d'œuvre, c'est-à-dire 22 fr. 50 le kilomètre de fil d'un millimètre carré de section amorti au taux $b = 0,08$.

Dans le premier cas, c'est-à-dire pour $f = 2 \times 10^{-5}$ et pour une distance de 1 kilomètre, avec la densité 1, la tension de transmission entre fils d'un système triphasé est de 7.800 volts, avec des transformateurs au départ et à l'arrivée amortis au taux $a_1 = a_2 = 0,1$ revenant à un prix moyen de $\frac{n_1 + n_2}{2} = 30$ francs le kilowatt installé. Elle est de 4.262 volts avec des transformateurs à 100 francs le kilowatt moyen et de 3.011 volts avec des transformateurs à 200 francs le kilowatt moyen installé. On voit donc qu'avec des transformateurs de cette construction, la tension la plus profitable est, dans la grande majorité des cas, bien au dessous de la plus haute tension physiquement et pratiquement réalisable ; pour les derniers transformateurs, notamment, la tension la plus profitable ne serait que de 20.000 volts à 50 kilomètres. *Ce ne sont pas les conditions physiques qui limitent la tension, mais les conditions économiques.*

Au contraire, si l'on adopte des transformateurs de la seconde construction où $f = 1.6 \times 10^{-6}$ avec la densité 1, la tension de transmission à 1 kilomètre est de 27.000 volts, avec des transformateurs au prix moyen de 30 francs le kilowatt. Elle est de 15.000 volts avec des transformateurs au prix moyen de 100 francs et de 10.630 volts avec des transformateurs au prix moyen de 200 francs le kilowatt. Dans ces conditions, *il est rationnel, pour une distance de quelques dizaines de kilomètres, d'employer une tension de transmission aussi élevée que possible limitée uniquement par les conditions physiques.*

NEUVIÈME LEÇON

Etude économique d'un transport d'énergie

93. Projet d'un transport d'énergie de Carvin à Lille. - Nous traiterons ici un cas très simple. Supposons qu'il s'agisse d'obtenir l'énergie pour force motrice et que l'on veuille recueillir une puissance de 25.000 kilowatts aux bornes des secondaires d'une station de transformateurs installés aux portes de Lille. Nous plaçons l'usine génératrice aux mines de Carvin, distante de 17 kilom. 6 de Lille, et nous disposons les canalisations aériennes le long de la route nationale de Carvin à Lille.

Nous nous demanderons d'abord qu'elle puissance il faudra installer à l'usine génératrice à Carvin pour obtenir à Lille la puissance utilisable de 25.000 kilowatts sous 3.000 volts.

Pour compenser les pertes en lignes, il faut installer une puissance supplémentaire à l'usine.

Nous estimerons approximativement les pertes et nous commencerons notre projet de transport en supposant installée cette puissance supplémentaire. Si cette puissance est un peu inférieure à celle que le calcul fournit à posteriori, on installe cette puissance ; si elle est de beaucoup inférieure ou supérieure, on recommence le projet avec une puissance supplémentaire convenable.

Nous supposons que, pour compenser les pertes dans les transformateurs et dans les lignes, nous installions une puissance supplémentaire de 2.000 kilowatts, de sorte qu'il y aura une puissance totale à l'usine de 27.000 kilowatts.

Le prix de premier établissement de l'usine génératrice à 500 francs le kilowatt installé sera de :
 $500 \times 27.000 = 12.000.000$ francs.

Cette dépense amortie par dixième donne une charge annuelle de *1.200.000 francs*.

Avec une durée d'utilisation de 2.000 heures pour l'usine génératrice (voir 4^e leçon, § 52), l'usine produira annuellement : $27.000 \times 2.000 = 54.000.000$ kilowatts-heures.

Si la dépense d'exploitation par kilowatt-heure est de 0 fr. 025 (§ 54), la production de l'énergie à l'usine coûtera : $0,025 \times 54.000.000 = 1.350.000$ francs ; la dépense totale de production de l'énergie coûterait donc : $1.200.000 + 1.350.000 = 2.550.000$ francs, c'est-à-dire 0,0472 par kilowatt-heure.

Si on compte vendre l'énergie sensiblement au prix de revient, avec un léger bénéfice, c'est-à-dire à 0 fr. 06, le kilowatt-heure produit à l'heure, la durée d'utilisation étant de 2.000 heures, le kilowatt pris à l'usine revient à $0,06 \times 2000 = 120$ francs, c'est-à-dire 0 fr. 12 le watt-an, la résistivité du cuivre étant prise égale à 19 ohms par kilomètre de fil d'un millimètre carré de section et le prix du cuivre étant de 2.500 francs la tonne à pied d'œuvre, la densité la plus profitable (§ 90) sera 0,84.

Nous choisirons, n'ayant pas de raisons suffisantes pour préférer les autres, des transformateurs à coefficient $f = 10^{-5}$ avec une densité de courant 0,84 et d'un prix moyen de 26 fr. le kilowatt de transformateur, la tension la plus profitable (§ 91) est de 50.000 volts.

La puissance installée en transformateurs dépend aussi de la perte en ligne qui est variable ; nous installerons à l'usine génératrice une puissance égale à la puissance totale de l'usine et à la station réceptrice, une puissance égale à la puissance utile. Supposons que ces transformateurs aient une puissance de l'ordre de 2.500 kw. Ces appareils reviennent à 12 francs le kilowatt installé, d'après une installation récente, à l'usine génératrice et coûteront :

$$12 \times 27.000 = 324.000 \text{ francs}$$

Les transformateurs réducteurs de tension auront en général une puissance très inférieure, nous admettrons que, surveillance comprise, ils coûtent installés 40 francs par kilowatt ; les 2.500 kw de transformateurs de la station réceptrice coûteront donc :

$$40 \times 25.000 = 1.000.000$$

Les 52.000 kw coûteront donc :

$$1.000.000 + 324.000 = 1.324.000 \text{ francs}$$

La dépense annuelle d'amortissement et d'entretien étant de $\frac{1}{10}$ du prix d'installation, est donc de 132.400 francs.

Nous calculerons l'énergie perdue dans les transformateurs en supposant qu'ils fonctionnent avec un rendement de 97 0/0, qu'il y ait par conséquent 3 0/0 de pertes. La puissance perdue est alors :

$$52.000 \times \frac{3}{100} = 1.560 \text{ kw.}$$

et l'énergie perdue dans un an est :

$$1.560 \times 2.000 = 3.120.000 \text{ kw. h.}$$

La dépense en énergie perdue est donc de :

$$0,025 \times 3.120.000 = 78.000 \text{ francs}$$

La puissance totale étant de 27.000×10^3 watts g étant égal à 1,30, V à 50.000 volts et d à 0,84, on tire :

$$S = \frac{27.000 \times 10^3}{50.000 \times 1,3 \times 0,84} = 494^{mm^2},5$$

Nous supposerons que l'on prenne 4 groupes de 3 lignes triphasées, chaque ligne de chaque groupe aura donc une section de

$$\frac{494,5}{4} = 123^{mm^2},82$$

et sera traversée par

$$123,82 \times 0,84 = 104 \text{ ampères}$$

L'emploi de 4 groupes de 3 fils aura les multiples avantages de pouvoir être installés au fur et à mesure des besoins et la section ne dépassant guère 1 centimètre carré, la résistance pour courant alternatif sera la même que pour courant continu.

Le câble de $123^{mm^2},82$ de section n'existe peut-être pas dans le commerce, nous consultons un catalogue de câbles nus et nous choisissons celui dont la section est la plus voisine et la plus petite, si nous espérons améliorer le facteur de puissance. Dans le cas présent, ce câble a une section de $122^{mm^2},64$. Il est formé de 61 fils de $1^{mm},6$, il a un diamètre de $14^{mm},4$, pèse 1168 kgr. par kilomètre et a une résistance kilométrique de $0^{hm},13$ à 0° et de $0^{hm},145$ à 15° .

Nous suivrons la route nationale de Carvin à Lille. La longueur sera 17 k. 6.

Nous emploierons 3 lignes de poteaux portant chacun les lignes aboutissant à la même borne de transformateur.

Nous planterons les poteaux tous les 40 mètres, nous mettrons un poteau contre-fiche de renfort à tous les tournants du chemin, nous aurons à traverser deux fois le chemin de fer et établirons deux ponts pour protéger la voie; nous mettrons de la ronce artificielle sur chaque poteau pour éviter un accident par gaminerie.

Nous placerons des plaques indicatrices avec inscription : « danger de mort » sur chaque poteau; nous placerons des parafoudres au départ, à l'arrivée et deux au milieu; nous surmonterons chaque ligne de poteaux d'une ligne en ronce de fer unie à la terre, servant de parafoudre préventif; nous mettrons en outre des interrupteurs permettant de rompre le service sur une des lignes pour la réparation. (Les dépenses sont consignées dans le tableau ci-dessous).

Enfin, il faut surveiller la ligne, remplacer les isolateurs qui deviennent mauvais et faire les réparations; il faut un personnel et un équipement spécial (chariot, outils); il faut des fournitures spéciales.

Détail du prix des lignes, cables non compris, c'est-à-dire valeur de ml⁽¹⁾ :

Canalisation de 17 k. 6, Carvin à Lille :	
1350 poteaux à 75 fr.	101.250 fr.
65 contrefiches à 40 fr.	2.600
2 traversées de voie ferrée à 4.500 fr.	9.000
1350 × 4 isolateurs à 4 fr. 50	24.300
Ronce artificielle à 0 fr. 50 par poteau 0.50 × 1350	675
	<hr/>
A reporter.	137.825

(1) Ce devis est établi d'après l'intéressant travail de M. Dusaughey. *Etude économique d'un transport d'énergie à grande distance*, E. Gratier-Grenoble.

Report.	137.825 fr.
Plaque indicatrice à 0,70 par poteau $0,70 \times 1350$	945
Parafoudres (1 sur chaque ligne au départ, 1 à l'arrivée, 2 au milieu) $12 \times 4 = 148$ à 120 120×48	5.760
Pose d'un fil en ronce de fer comme paraton- nerre préventif, 17.600 mètres à 0,70 le mètre	5280
8 interrupteurs (2 par ligne) à 600. 600×8 .	4.800
Total	<u>154.610</u>
Majoration de 20 0/0 pour imprévus (dépla- cement de lignes ordonné par l'adminis- tration des télégraphes, etc.)	30.922
Main-d'œuvre à 0 fr. 05 le mètre de conducteur simple. $0,05 \times 1.000 \times 17,6 \times 12$	10.560
Ligatures à 4 fr. 60 par câble et par km. $4,60 \times 17,6 \times 12$	<u>971,50</u>
Total	197.063,50

Le poids de la ligne étant de 1.168 kg. par km., le cuivre de la ligne pèse :

$$1.168 \times 17,6 \times 4 \times 3 = 246.681 \text{ kg. } 6$$

A 2.500 francs la tonne, il coûte :

$$2.500 \times 246.681,6 = 616.704 \text{ francs}$$

La ligne coûte donc en tout :

$$616.704 + 197.063,50 = 813.767 \text{ fr. } 50.$$

La surveillance de la ligne coûte annuellement	8.000
La partie fixe de la ligne, amortie par 0,08 du capital, coûte annuellement	15.765,08
Le cuivre amorti par 0,08 du capital, coûte annuellement	<u>49.336,32</u>
La ligne totale coûte donc annuellement. . .	73.101,40

La puissance perdue en ligne est égale à Ri^2 par ligne, R étant la résistance de la ligne. Or, la résistance par kilomètre étant de $0^{\text{ohm}} 145$ (à 20°), la résistance de chaque ligne est :

$$0,145 \times 17,6 = 2^{\text{ohms}} 552$$

Le courant étant de 104 ampères, la puissance perdue

par ligne est $2,552 \times 104^2 = 27.602$ watts 4 et dans les 12 lignes, elle est de $27.602,4 \times 12 = 331.228$ watts 8.

La puissance totale perdue est donc de

$$1.560.000 + 331.228,8 = 1.891.228 \text{ watts } 8$$

La puissance supplémentaire installée à l'usine est donc largement suffisante et la puissance, à un moment donné, pourra surpasser environ 1/10 de la puissance supplémentaire calculée.

Le rendement de la ligne est $\frac{27.000 - 331.228}{27.000} = \frac{98,85}{100}$

L'énergie perdue annuellement en ligne est de

$$331.228,8 \times 2\ 000 = 662.457.600 \text{ watt heures}$$

La dépense annuelle en énergie perdue en ligne est donc

$$0,025 \times 662.457,6 = 16.561 \text{ fr. } 44$$

94. Coût du kilowatt-heure transporté. — Les 50.000.000 kilowatt-heures coûteront annuellement aux bornes du secondaire des transformateurs de Lille :

En puissance installée	1.200.000 fr.
En dépense d'exploitation à l'usine	1.350.000 »
En transformateurs de départ.	32.000 »
En transformateurs d'arrivée.	100.000 »
En partie fixe de la ligne (amortissement et surveillance)	23.765, 08
En cuivre.	49.336, 32
	<hr/>
	2.755.101, 40

Le kilowatt heure revient à $\frac{2.755.101,40}{50.000.000} = 0^{\text{fr}} 0551$

Le transport a donc coûté $0^{\text{fr}} 0551 - 0^{\text{fr}} 0472 = 0^{\text{fr}} 0079$.

On peut détailler le transport d'une façon plus précise, de la façon suivante :

Le transport de 50.000 k.w.h. de Carvin à Lille, coûte annuellement :

En puissance supplémentaire.	100.000 fr.
En transformateurs	} au départ 32.000 » à l'arrivée 100.000 »
A reporter.	232.000 »

Report.	232.000 fr.
En énergie perdue dans les transformateurs	78.000 »
En partie fixe de la ligne (amortissement et surveillance.	23.765,08
En cuivre.	49.336,32
En énergie perdue en ligne	<u>16.561,44</u>
C'est-à-dire.	399.662,84

$$\text{ou } \frac{399.662,84}{50 \times 10^6} = 0 \text{ fr. } 00799 \text{ par k.w.h.}$$

Si on fait le calcul pour une durée d'utilisation de 3.000 heures le coût du transport par kilowatt-heure utilisé s'abaisse à 0 fr.0059.

Le pourcentage des diverses dépenses occasionnées par le transport d'énergie à 2.000 heures d'utilisation, serait le suivant :

	0/0
Amortissement du supplément de puissance à l'usine.	25.03
Amortissement des transformateurs de départ.	8.02
Amortissement des transformateurs d'arrivée.	25.02
Prix de l'énergie perdue dans les transformateurs.	19.51
Amortissement de la partie fixe de la ligne.	5.96
Amortissement du cuivre de la ligne.	12.57
Prix de l'énergie perdue en ligne.	<u>3.89</u>
Total.	100.00

Les dépenses imputables à la ligne entrent explicitement pour 22,45 0/0, les dépenses occasionnées par les transformateurs pour 52,55 0/0, enfin la puissance supplémentaire à installer à l'usine due aux pertes en ligne et dans les transformateurs figurent pour 25,03 0/0.

95. Coût de la ligne. — Si on ne tient pas compte de la puissance supplémentaire, les dépenses occasionnées par la ligne coûtent 88 662 fr. 84.

Si on tient compte de l'effet des pertes en lignes sur la puissance supplémentaire, la puissance perdue étant de 331.228,8 watts, intervient dans l'installation de la puissance supplémentaire à raison de 500 fr. par kilowatt (1)

(1) Rigoureusement, il faudrait rapporter la puissance supplémentaire aux 2.000 kilowatts supplémentaires que nous avons installés.

pour $500 \times 331,288.8$	=	16.564 ^{fr} 44
La partie fixe de la ligne coûte par an		23.765,08
Le cuivre coûte annuellement en entretien et amortissement.		49.336,32
L'énergie perdue en ligne coûte par an.		15 561,44
Total.		<u>105.227,28</u>

Le transport de l'énergie coûte donc annuellement, uniquement pour la ligne, la somme de 105.227 fr. 28; cette dépense entre donc pour $\frac{105.227.28}{399.662.84} = \frac{26}{100}$ et les transformateurs entrent pour 74 0/0 dans la dépense totale du transport.

96. Transport de l'énergie et transport de charbon — On peut se demander devant ce chiffre important représenté par les dépenses de la ligne, s'il ne vaut pas mieux installer l'usine centrale sur le lieu d'utilisation ou dans son voisinage et y transporter le charbon plutôt que de placer l'usine à la mine et de transporter l'énergie sous forme électrique à la station réceptrice.

Il s'agit, dans les deux alternatives, d'obtenir une puissance utilisable à Lille de 25.000 kilowatts et de produire annuellement 50.000.000 kilowattheures.

Remarquons qu'à Lille aussi bien qu'à Carvin, il sera en général prudent d'avoir des transformateurs au départ et à l'arrivée dans les usines. En installant la station génératrice à Lille, on économisera donc uniquement les dépenses qu'entraîne la ligne de Carvin à Lille et la majoration de prix des transformateurs due à la différence des voltages de transmission à Carvin et à Lille, mais il faudra acquitter le prix du transport, par voie de fer ou voie d'eau, du charbon nécessaire pour alimenter l'usine.

Il sera nécessaire, en tenant compte des pertes dans les transformateurs, qui sont de 3.120.000 kilowattheures, de produire 53.120.000 kilowattheures à raison de 1 kg 2 de charbon par kilowattheure; il faudra donc transporter de Carvin à Lille

$$1^k 2 \times 53.120.000 = 63.744.000 \text{ kg}$$

Le transport d'une tonne de charbon rendue en soute de Carvin à Lille coûte 1 fr. 40; le transport de Carvin à Lille du charbon nécessaire à l'alimentation de l'usine de Lille coûtera donc 89.241 fr. 60.

La ligne du transport électrique de l'énergie de Carvin à Lille entraîne à elle seule une dépense annuelle équivalente au transport du charbon.

Le coût de la puissance supplémentaire et de la majoration des prix des transformateurs compensera largement l'accroissement de charges dû à l'augmentation du prix de terrain au voisinage des villes industrielles et ce résultat restera vrai *a fortiori* quand la distance de transport croitra au-delà d'une vingtaine de kilomètres, car la tension la plus favorable de transmission atteindra avec les distances croissantes des valeurs supérieures aux tensions réalisables pratiquement et le transport de l'énergie ne correspondra plus aux conditions les plus profitables.

On peut donc dire d'une manière générale que dans un transport d'énergie, aux conditions actuelles du prix du charbon et du cuivre, il est préférable ou au moins équivalent de placer l'usine génératrice centrale sur le centre d'utilisation plutôt qu'au voisinage d'une mine de houille; *il est plus économique de transporter le charbon que l'énergie électrique*. L'économie réalisée par les distributions d'énergie par grandes usines électriques centrales ne provient pas du transport mais de la production de l'énergie.

L'usine centrale sera placée sur les lieux d'utilisation, au voisinage d'un canal autant que possible pour la facilité de l'alimentation des chaudières et des déchargements du charbon.

97. Emploi des alternateurs volants à haute tension. — Lorsqu'on examine le pourcentage des diverses dépenses afférentes au transport de l'énergie par double transformation de la tension au départ et à l'arrivée, on est frappé de la part importante qui revient à l'emploi

des transformateurs qui s'élève à 74 o/o des dépenses totales dans le cas étudié.

Aussi a-t-on songé à supprimer au moins les transformateurs de départ et à produire directement le courant à haute tension par des alternateurs volants mûs par des machines à vapeur ; dans ce but, on a construit des alternateurs volants jusqu'à 30.000 volts ; si, au point de vue économique, il peut être avantageux pour des distances suffisamment petites, de supprimer la double transformation, il faut se rappeler que le transformateur de départ joue un double rôle dans les stations génératrices : il élève la tension du courant qui transmet l'énergie et sert en même temps d'écran protecteur pour la génératrice contre les surtensions et les courts-circuits des lignes et il semble donc prudent de n'utiliser les alternateurs volants que dans le cas où ils peuvent supporter accidentellement une surtension instantanée 4 ou 5 fois égale à la tension normale.

Lorsque les centres d'utilisation sont très condensés comme dans les villes industrielles, Lille, Roubaix, Tourcoing, par exemple, l'installation de l'usine génératrice à proximité des centres d'utilisation et l'emploi des alternateurs à haute tension avec un grand coefficient de sécurité contre les surtensions semble tout indiqué ; l'économie réalisée d'une part sur la longueur de la canalisation et sur les transformateurs de départ compensera le surcroît des dépenses occasionnées par la nécessité de faire les canalisations souterraines à l'intérieur des agglomérations, et amènera le prix du kilowattheure sensiblement à la valeur calculée § 94.

98. Comparaison du prix de revient de l'énergie des usines hydroélectriques et des usines à vapeur.

— En résumé, pour une usine qui ne brûle que du charbon, que l'usine génératrice soit à Lille ou à Carvin, le prix de revient du kilowattheure rendu à la station réceptrice est de 5.5 centimes environ.

En admettant que le kilowattheure soit vendu 6 cent., une usine qui travaillerait en moyenne à $\frac{2}{3}$ de sa charge nominale pendant 3.000 heures consommerait 2.000 kilo-

wattheures par kilowatt nominal installé et payerait son kilowatt à 120 fr. Le cheval-an reviendrait au prix de 88 fr. 30. Ces prix sont comparables aux prix de vente concédés par les meilleures entreprises hydroélectriques de la région suisse ou dauphinoise.

Et cela n'a rien d'étonnant, l'usine hydroélectrique emploie des turbines, des alternateurs, des transformateurs et des lignes comme les installations à vapeur; l'usine étant établie dans la montagne inhabitée et difficilement accessible, coûte plus cher que l'usine construite en plaine; si elle ne dépense rien en charbon ni en chaudières, en revanche, elle est parfois obligée de construire des canaux et des réservoirs d'eau dont l'amortissement représente une charge considérablement plus élevée que l'amortissement des chaudières et les dépenses en charbon; en outre, l'usine est plus éloignée des lieux d'utilisation et la ligne coûte plus cher parce qu'elle est plus longue. Si on remarque que dans une usine à vapeur les dépenses d'exploitation par kilowatt-heure sont sensiblement les mêmes que les dépenses d'amortissement et d'entretien de l'usine, en supposant que l'usine hydroélectrique n'ait aucun frais d'exploitation, on peut affirmer qu'une grande usine à vapeur qui revient à 500 francs le kilowatt installé est aussi économique qu'une usine hydroélectrique dont le kilowatt installé revient à 1.000 fr. Celle-ci lui sera même souvent inférieure; aussi n'est-il pas rare de voir s'adjoindre à une station hydroélectrique, une usine à vapeur qui améliore notablement le prix de revient de l'énergie, comme à Zurich notamment.

DIXIÈME LEÇON

Conséquences Economiques et Sociales des Transports d'Énergie par l'Électricité

Je veux terminer ces leçons en appelant votre attention sur les conséquences économiques et sociales des transmissions électriques d'énergie.

Admettons pour le moment que toutes les machines à vapeur et à gaz soient remplacées sur place par des moteurs électriques et que l'énergie soit fournie par de grandes usines centrales électriques, véritables coopératives de production.

99 Conséquences économiques. — Ce changement aurait des conséquences multiples.

1° L'industriel y trouvera d'abord les *nombreux avantages* que nous avons signalés dans notre quatrième leçon : augmentation de l'hygiène et de la sécurité du travail à l'usine, augmentation de la qualité et de la quantité de travail, meilleur rendement général, frais moindres d'entretien, etc.

2° *Bénéfice notable dans la production de la force motrice.*

Le prix de revient du cheval-heure produit par une grande usine à vapeur ou à gaz pauvre avec un moteur de 500 chevaux, aux conditions actuelles du prix du charbon, dépenses générales et amortissement compris, est de 5 centimes; pour une machine de 100 chevaux, il est de 7 c. et pour une machine de 50 chevaux de 9 à 10 c.

Le prix de revient du cheval-heure électrique transporté est de 4 centimes.

Or, le Nord et le Pas-de-Calais comptent ensemble plus de 500.000 chevaux installés; admettons qu'ils produisent journallement 4.000.000 cheval-heures.

Admettons que cette puissance soit produite par des moteurs d'une puissance moyenne de 100 chevaux, à 7 centimes le cheval-heure. On gagne donc 3 cent. par cheval-heure, ce qui fait une économie de 120.000 francs par jour, soit 36 millions par an.

Mais cette économie est certainement très inférieure à la réalité. En effet, d'après les exemples que j'ai cités dans ma quatrième leçon, la puissance effective utilisée sur l'arbre des machines-outils ou des métiers est notablement inférieure à la puissance normale. Les 4 millions de chevaux-heures produits par des machines disséminées dans la région se réduiront sûrement à moins de 3.200.000, car les pertes sont, en général, *très supérieures* à 20 o/o. (Voir la question *rendement* traitée dans la quatrième leçon). On ferait donc du même coup, à raison de 7 cent. le cheval-heure, un bénéfice de 56.000 fr. par jour, soit $56.000 \times 300 = 16.800.000$ francs par an.

Sur les 3.200.000 chevaux-heures effectifs, on économiserait journallement $0,03 \times 3.200.000 = 96.000$ fr. et, en 300 jours, 28.800.000.

Le bénéfice total annuel serait donc pour la région du Nord de 45.600.000 francs, mais il est certain qu'il serait notablement supérieur, car nous avons supposé les conditions les plus défavorables.

QUELQUES EXEMPLES : Au lieu de rester dans les généralités, précisons quelques exemples particuliers.

a Quelle serait l'économie réalisée par un industriel, qui a une usine de 500 chevaux *bien installée* mécaniquement, travaillant 10 heures par jour à pleine charge, et qui transformerait sa commande mécanique en commande électrique. Cet industriel produirait 5.000 chevaux-heures par jour. Par cheval-heure, le bénéfice brut serait au minimum de 1 centime ; cet industriel gagnerait donc 50 fr. par jour, c'est-à-dire 15.000 fr. par an.

La transformation de la commande mécanique en commande électrique n'excéderait certainement pas 50.000 fr., pour une filature ou un tissage de 500 chevaux, si l'on se rapporte au devis de la Société cotonnière de Mirecourt, que j'ai donné dans ma quatrième leçon. En amortissant cette dépense par dixième, comme nous l'avons

fait jusqu'ici, la dépense annuelle serait donc de 5.000 fr. Il résulte de là que, malgré le changement de la commande mécanique en commande électrique, l'industriel ferait encore annuellement un bénéfice minimum de 10.000 fr.

b. Un industriel qui n'a qu'une usine de 100 chevaux très bien installée au point de vue mécanique, et dont le travail est conditionné de façon que la machine marche sensiblement en pleine charge 10 heures par jour, gagnerait 3 c. par cheval-heure produit, c'est-à-dire 30 fr. par jour, 9.000 francs par an ; il resterait à déduire les moteurs électriques.

c. Une installation fonctionnant avec une machine de 50 chevaux à 10 heures par jour gagnerait 5 c. par cheval-heure, c'est-à-dire 25 fr. par jour ou 7.500 fr. par an.

Si on compte que le plus souvent les installations laissent à désirer surtout pour les usines qui se sont agrandies successivement, le bénéfice serait beaucoup plus considérable. (Voir la question *rendement* de ma quatrième leçon.)

L'industriel qui possède des machines de 50, 100 et 1000 chevaux bénéficierait des avantages pécuniers relatifs à chaque machine.

d. Un autre cas intéressant est celui où les machines travaillent souvent à des régimes très variables. Dans ce cas, l'économie serait beaucoup plus importante ; et les Compagnies de mines qui sont obligées de disséminer et de fractionner leur puissance, seraient certainement celles qui gagneraient le plus à ce changement. Le bénéfice est difficile à calculer sans chiffres précis, mais la consommation énorme des machines d'extraction et le fractionnement nécessaire de la puissance me font penser qu'un bénéfice de 6 centimes par cheval-heure ne serait pas exagéré.

Une grande Compagnie minière qui produirait 100.000 chevaux-heures par jour, gagnerait donc 6.000 fr. par jour, soit 1.000.000 fr. par an et nous supposons qu'on consomme du charbon. Cette économie serait considérablement majorée par l'emploi des gaz pauvres des fours à coke et des hauts-fourneaux. Il faudrait évidemment déduire de ce chiffre les dépenses d'amortissement et d'entretien des moteurs électriques.

Ces bénéfices calculés de cette manière paraîtront plus convaincants lorsqu'on se rappellera les résultats que nous avons indiqués dans notre quatrième leçon sous le titre *rendement*.

Nous avons vu, en effet :

Que le petit industriel qui achète le kilowatt-heure au prix considérablement plus élevé de 0 fr. 30 réalise en général un bénéfice notable sur la production d'énergie mécanique par moteurs à gaz ou machines à vapeur ;

Que les grandes usines, filatures, tissages, ateliers de construction ont intérêt à remplacer la commande mécanique par la commande électrique et l'installation d'une petite usine centrale électrique ; or, la production de l'énergie étant environ deux fois plus économique dans les grandes usines centrales, il en résulte un bénéfice certain et considérable pour le grand industriel dont l'installation mécanique est la mieux comprise.

3° Meilleure utilisation des locaux et terrains industriels.

L'industriel au lieu d'acheter son charbon, achèterait son énergie à la grande usine centrale, et serait ainsi débarrassé d'un souci d'ordre secondaire à sa profession : la production de l'énergie. Au lieu d'employer un espace précieux à loger le charbon, sa machine à vapeur et tous les accessoires de la production de l'énergie, il réserverait un espace de quelques décimètres cubes, pour placer un compteur d'énergie et utiliserait la salle des machines, des chaudières, le magasin à charbon, etc., à agrandir son usine et à accroître sa production industrielle.

100 Conséquences générales. — *1° Amélioration de l'hygiène publique.*

Outre ces avantages qui touchent immédiatement l'industriel, il y en a d'autres d'une portée plus générale, dont il bénéficierait lui-même et dont il ferait bénéficier ses concitoyens.

L'air des agglomérations déjà vicié par des milliers de poitrines, l'est davantage encore par les fumées et les gaz brûlés des usines.

En supprimant les installations des machines à vapeur dans les villes industrielles, on supprimerait du même

coup en partie les exhalations malsaines des cheminées et on rendrait l'air plus pur ; la ville gagnerait en propreté et en gaieté.

2° *Éclairage électrique généralisé.*

Malgré le fractionnement toujours plus ou moins dispendieux, l'énergie pour éclairage pourrait se vendre à des prix incomparablement inférieurs au tarif des stations d'éclairage actuelles, de sorte que la création des grandes centrales pour force motrice, rendrait par contrecoup l'éclairage électrique à la portée de tous.

3° *Applications en agriculture.*

L'introduction du moteur électrique dans le labourage et les travaux agricoles est déjà chose faite et a produit les résultats les plus encourageants même en empruntant l'énergie à une petite station centrale. Ces conditions seraient bien plus avantageuses avec les grandes centrales.

Objections. — A côté des avantages, examinons les objections. L'une des plus immédiates est la suivante :

1° L'arrêt de l'usine centrale pour une cause quelconque déterminerait simultanément l'arrêt de toutes les usines qui en dépendent.

Ce raisonnement est incontestable, mais il paraît bien improbable. Il faudrait admettre une grève des ouvriers de l'usine génératrice, mais le personnel de l'usine étant restreint et payé au-dessus du taux moyen, ne serait pas excité à la grève, et d'ailleurs l'emploi de mécanismes pour la manutention du charbon et le foyer réduirait au minimum le personnel.

2° Il peut paraître dangereux de placer l'usine dans un pays minier où les grèves peuvent être fréquentes et dangereuses, mais il n'est nullement nécessaire de placer l'usine à la mine, car le calcul du transport de l'énergie électrique nous a montré qu'il y a avantage à placer l'usine au voisinage du centre d'utilisation et à transporter le charbon.

Ces objections tombent et les avantages importants que nous avons signalés restent intangibles. *Le remplacement des moteurs mécaniques par des moteurs électriques est extrêmement avantageux pour les faibles puissances et*

l'est encore d'une façon indubitable pour les usines mécaniques les mieux agencées.

Mais l'hypothèse que nous faisons d'une transformation sur place de toutes les transmissions mécaniques en transmissions électriques ne peut se réaliser d'une façon subite, mais d'une façon progressive.

Il faut un peu de temps pour que les idées les plus mûries et les vérités les plus évidentes se fassent jour.

Nous assistons en ce moment à une évolution très caractéristique de la production et de la distribution de la force motrice; il dépend des électriciens d'en accélérer la marche par le soin scrupuleux et la compétence avec lesquels ils étudieront leurs installations.

101. **Conséquences sociales.** — D'ailleurs la transformation sur place des transmissions mécaniques des usines en transmissions électriques n'est pas désirable. Le projet de transmission de l'énergie par le courant électrique et les grandes centrales peut prétendre à un but plus élevé; je veux parler de sa portée sociale et morale, de l'idée de reconstituer pour l'ouvrier de l'usine l'atelier familial d'autrefois.

Le XIX^e siècle a été caractérisé par le développement du machinisme: le métier du tisseur, le rouet des fileuses de jadis ont été renversés; le métier à bras a fait place au métier mécanique qui produit davantage, et à meilleur compte.

L'impossibilité de fractionner économiquement la puissance mécanique par la machine à vapeur a fait concentrer la production autour d'une grande machine à vapeur centrale actionnant un grand nombre de métiers mécaniques.

Devant la concurrence redoutable de l'usine, l'artisan, pour subsister, a quitté son atelier familial pour devenir ouvrier à l'usine et malheureusement la mère de famille a dû quitter son foyer et abandonner à la rue ou à des mercenaires la garde et l'éducation de ses enfants.

La machine à vapeur a détruit la vie familiale par cette nécessité inéluctable, qui était la condition de la vie industrielle créée par la machine à vapeur, de concentrer

tous les éléments de production en un même endroit, lieu même de production de l'énergie.

A l'aurore du XX^e siècle, une idée nouvelle, éclose à la fin du XIX^e, surgit et paraît appelée à avoir non seulement les conséquences économiques les plus heureuses sur la production industrielle, mais aussi des conséquences morales et sociales des plus inattendues. La vapeur avait créé l'antagonisme entre la vie familiale du travailleur de l'usine et la vie industrielle. L'électricité supprime cet antagonisme.

L'installation d'usines électriques centrales de puissance considérable, l'économie du transport de l'énergie par le courant et le fractionnement jusqu'à un quart et à un dixième de cheval de la puissance motrice des moteurs électriques ont fait naître la généreuse pensée de rendre à l'ouvrier et surtout à l'ouvrière de l'usine la vie réconfortante de la famille.

Cette pensée philanthropique se réalise déjà en Suisse pour l'horlogerie, à St-Etienne, à Lyon, pour l'industrie de la soie. Le canut lyonnais et le tisseur de ruban stéphanois peuvent, aujourd'hui comme autrefois, tisser chez eux, se faire aider de leur femme et de leurs enfants.

Le *Bulletin de l'Office du Travail* du mois d'octobre 1903 donne les renseignements suivants :

Dans la région de la Loire, le développement des métiers actionnés électriquement s'est accru dans de notables proportions.

Ces installations, commencées en 1894 avec 8 ateliers et 19 métiers, comptent en 1902, 3.989 ateliers et 8.736 métiers.

L'effectif total étant de 28.000 métiers, il y a donc, dès à présent, un tiers de métiers actionnés électriquement.

Et dans cette région, les autres industries ont suivi l'exemple de la rubannerie ; en 1894, les moteurs électriques étaient de 5 seulement d'une puissance totale de 18 chevaux ; en 1902, il y a 428 moteurs d'une puissance totale de 789 chevaux un quart.

D'après le rapport de MM. Dubois et Julin (1), la Société

(1) Rapport présenté à M. le Ministre du Travail de Belgique, en 1902.

lyonnaise de force motrice du Rhône fournissait l'énergie électrique à 1.458 abonnés au 30 avril 1901.

Ce développement est intéressant au plus haut degré, d'autant plus que l'énergie électrique est loin d'être produite dans les meilleures conditions économiques et l'installation de grandes centrales à vapeur améliorerait notablement les prix de revient et de vente de l'énergie.

Ce bienfait peut-il être espéré dans nos régions? serait-il possible de restaurer l'atelier du filtier et du tisserand de jadis? Des praticiens compétents me l'ont affirmé. Le tisserand d'aujourd'hui, logé à la campagne, muni de métiers à tisser mus par un moteur électrique alimenté par les grandes centrales, travaillerait chez lui dans des conditions au moins aussi bonnes qu'à l'usine.

Il serait téméraire peut-être de l'espérer pour toutes les industries et même pour toutes les industries qui emploient des ouvrières.

En effet, le moteur mécanique n'est pas le seul facteur de la production économique à bon marché, qui est la condition de la vie industrielle moderne.

Le principe de la division du travail joue un rôle au moins aussi important.

Les divers organes d'un réveil-matin américain passent par des centaines de machines différentes avant d'être achevés. Pour concilier cette conception industrielle, la seule logique, avec la conception de l'industrie à domicile et tous ses avantages moraux, il n'y a, à mon avis, qu'un seul moyen, mais qui me paraît réalisable pratiquement dans certains cas à condition de placer les usines dans les banlieues des villes ou à la campagne.

Puisqu'un certain nombre d'industriels construisent des cités ouvrières pour leurs ouvriers, pourquoi ces maisons ne seraient-elles pas groupées autour d'une salle rectangulaire formant la salle du magasin et des services généraux de l'usine?

Pourquoi n'auraient-elles pas à l'arrière un appartement qui contiendrait les métiers et, sur la façade, le jardinet qui délasserait le travailleur de son labeur? (1)

(1) Une usine de ce genre vient de se créer à Haubourdin près de Lille.

L'usine de demain deviendrait ainsi l'atelier de jadis et l'industriel n'y gagnerait qu'en sécurité et en tranquillité, l'ouvrier en liberté, en bien-être matériel et moral.

La question des heures de travail serait résolue du même coup et bien d'autres encore qu'il ne m'appartient pas de traiter ici.

La réglementation des heures de travail notamment deviendrait inutile et superflue, car de quel droit voudrait-on empêcher l'ouvrier tisseur de travailler le temps qui lui p'ait plutôt que le bottier ou le tailleur?

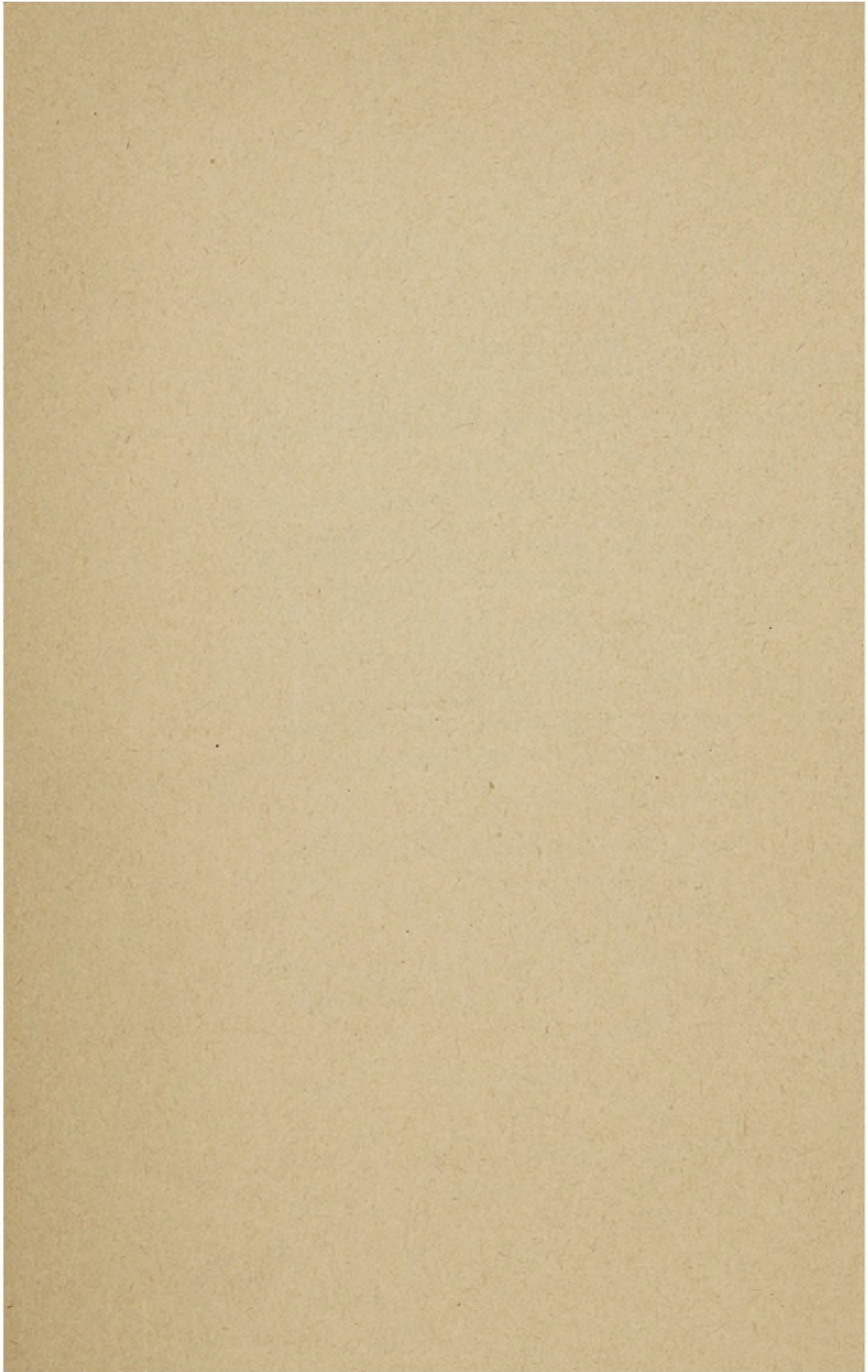
CONCLUSIONS

En résumé et pour conclure, l'installation de grandes usines électriques centrales à vapeur ou à gaz pauvre fournissant au pays ambiant l'énergie électrique pour force motrice et éclairage est possible et réalisable dans les conditions les plus économiques, comparables à celles des meilleures stations hydro-électriques des pays de houille blanche.

Si elles étaient généralisées, elles seraient une source incomparable de richesse pour le pays par la suppression du gaspillage inconscient et insensé du combustible, elles seraient un adjuvant puissant et fécond de rénovation économique et sociale.

TABLE DES MATIÈRES

	PAGES
<i>Préface.</i>	1
1 ^{re} LEÇON. — Considérations générales sur l'énergie.	1
2 ^e LEÇON. — Le courant électrique ; son rôle de véhicule de l'énergie	13
3 ^e LEÇON. — Les moteurs à champ tournant	27
4 ^e LEÇON. — Avantages généraux et économiques de la distribution électrique de l'énergie dans les ateliers et prix de revient de l'énergie dans une grande usine centrale.	41
5 ^e LEÇON. — Les pertes d'énergie dans les lignes de transmission de l'énergie	73
6 ^e LEÇON. — Les hautes tensions	90
7 ^e LEÇON. — Les accidents et les dangers des lignes de haute tension. — Appareils de protection	101
8 ^e LEÇON. — La densité de courant et la tension les plus favorables pour le transport de l'énergie	113
9 ^e LEÇON. — Etude économique d'un transport d'énergie	125
10 ^e LEÇON. — Conséquences économiques et sociales des transports d'énergie par le courant	136





- Électrotechnique appliquée.** Cours professé à l'Institut Electrotechnique par A. MAUDUIT, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, Ingénieur électrique. une *Préface* de A. BLONDEL, Grand in-8° de 844 pages avec nombreuses figures. Broché 25 fr. ; cartonné.....
- Électricité. Applications industrielles:** Canalisation et distribution de l'électricité. Eclairage électrique. Transport électrique de l'énergie. Traction électrique. Chimie. Télégraphie. Téléphonie. Projet de distribution d'énergie électrique. Fd DACREMONT. In-8° avec nombreuses figures.....
- Agenda Dunod 1904. Électricité** (25^e édition), par J.-A. MONPELLIER, carnet de poche.....
- L'électricité industrielle mise à la portée de l'ouvrier.** Manuel pour l'usage des monteurs, électriciens, mécaniciens, élèves des écoles professionnelles, par E. ROSENBERG. Traduit de l'Allemand par A. MAUDUIT. In-8° de 400 pages avec 284 figures. Broché, 8 fr. 50 ; cartonné.....
- L'électricité à la portée de tout le monde,** par Georges CLAUDE. 3^e édition. fort volume grand in-8°.....
- Principes d'électrotechnie,** par E. PIÉRARD, professeur d'électricité industrielle à l'Université libre de Bruxelles. Grand in-8° avec 297 figures.....
- Électromoteurs. — I. Courant continu,** par G. ROESSLER ; traduit de l'Allemand par E. SAMITCA. Grand in-8° avec figures. Broché, 6 fr. 50 ; cartonné.....
- Électromoteurs. — II. Courants alternatifs et triphasé,** par G. ROESSLER ; traduit de l'Allemand par E. SAMITCA, Grand in-8° avec figures. Broché, 10 fr. ; cartonné.....
- Les deux volumes : *Courant continu et Courants alternatifs*, se vendent en un volume broché, 15 fr. ; cartonnés.....
- Les dynamos.** Principes, description, installation, conduite, entretien, calculs, par J.-A. MONTPELLIER. Grand in-8° avec 305 figures. Cartonné.....
- Théorie et calcul des phénomènes du courant alternatif,** par Ch. Pr. METZ. Traduit sur la 3^{me} édition américaine, revue et augmentée par M. METZ. Grand in-8° de XX-526 pages, avec 210 figures. Broché, 20 fr. ; cartonné.....
- Phénomènes fondamentaux et principales applications du courant alternatif,** par R. SWYNGEDAuw, chargé de l'enseignement électrotechnique à l'Université de Lille. In-8° de 174 pages, avec 62 figures et 3 planches.....
- Manipulations et études électrotechniques,** par L. BARBILLION, professeur à l'Institut électrotechnique de l'Université de Grenoble. Grand in-8° de 304 pages avec 162 figures. Broché, 12 fr. 50 ; cartonné.....
- Les accumulateurs électriques.** Théorie et technique, description, applications, par L. JUMAU, ingénieur-électricien. Grand in-8° de 944 pages avec 549 figures. Broché, 27 fr. 50 ; cartonné.....
- Eclairage.** Huiles, alcool, gaz, électricité, photométrie, par L. GALINE et B. PAUL. Deuxième édition. In-8° de 697 pages, avec 308 figures.....
- Les automobiles électriques,** par G. SENGIER et A. DELASALLE. Grand in-8° de 100 pages avec 100 figures.....
- Traité pratique de télécommunication électrique** (Télégraphie-Téléphonie), par E. ESTAUNIÉ, ingénieur en chef des Télégraphes. Grand in-8° de 670 pages avec 528 figures. Broché, 20 fr. ; cartonné.....