Les Problèmes du Choc Electrique⁽¹⁾

par L. BARBILLION, Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble

I. INTRODUCTION

Les effets destructifs, soit électriques (contournement, perforation des isolateurs), soit mécaniques (explosion de la porcelaine, etc.) de la foudre, ont soulevé l'étude du choc électrique, que provoque celle-ci dans les installations électriques.

Quant à la nature de la foudre elle-même, différentes théories ont été émises, théories d'ailleurs assez discordantes. On semble néanmoins s'accorder sur le point que la foudre ne peut être assimilée ni à un arc, ni à une étincelle. Elle ne présente pas la stabilité d'un arc, mais, par rapport à l'étincelle, elle a une certaine stabilité qui assure sa progression.

Dans le but d'étudier la résistance des matériaux contre les décharges atmosphériques, on a été conduit à imaginer des générateurs d'ondes de choc produisant des effets analogues à ceux de la foudre. La foudre ou la décharge due à un générateur d'ondes de choc frappant une ligne électrique y provoquent la propagation d'une onde à front raide, qui occasionne des chocs successifs en toute installation qu'elle rencontre.

Les deux phénomènes reproduisant, l'un, le choc électrique en un point fixe, l'autre, l'onde à front raide en temps fixe (les abscisses représentent alors des longueurs), peuvent être repré-

FIG. 1

sentés par la courbe OABC de la figure 1. La courbe en trait discontinu indique l'allure réelle du phénomène.

II. CARACTÉRISTIQUES DU CHOC ÉLECTRIQUE

Le choc électrique est caractérisé par le front de l'onde t_a ou t'_a , par la crête H et par la queue t_b . On considère quelquefois t'_b au lieu de t_b , qui a l'avantage de représenter approximativement le temps pendant lequel la tension de contournement au choc de l'isolateur est supérieure à celle que l'isolateur peut supporter à tension constante (U_{max}).

La raideur du choc est égale à $\frac{dV}{dt}$ au point correspondant.

Elle est surtout importante à l'origine du choc où elle vaut $\frac{H}{t'_a}$: c'est cette raideur qui fait fonctionner les parafoudres.

Considérons un isolateur ou un éclateur quelconque et faisons agir sur celui-ci une suite de chocs électriques, t_a et t_b étant constants, mais H croissant. En partant d'un choc tel que OABC (fig. 2), on aura le premier contournement ou perforation

FIG. 2

pour une tension H_{min} , et la courbe de choc prendra l'allure OA_m, D_m, E_m . Si l'on continue à augmenter H , la tension de contournement s'élève jusqu'à une limite H_{max} , qui sera la tension maximum de contournement pour t_a et t_b donnés. A ce moment, il y a équilibre en M entre la raideur du choc qui a tendance à augmenter la tension en M et la perforation qui a tendance à diminuer cette tension.

La perforation demande un certain temps qu'il faut compter à partir du moment où la tension atteint la valeur de contournement sous tension constante. Ainsi l'on a sur la figure 2 le retard maximum t_m et le retard minimum t_M de l'isolateur ou l'éclateur considéré pour t_a et t_b donnés. Dans ce retard, il faut distinguer les deux parties AO et DE , dont le rapport et l'existence dépendront non seulement du choc, mais aussi de l'éclateur. Le retard AD est d'autant plus grand que le champ électrique de l'éclateur est plus déformé. Il disparaît complètement pour les éclateurs à champ uniforme, à sphères par exemple, où ne reste que le retard DE qui dépend du phénomène d'ionisation lui-même : du temps nécessaire aux électrons pour traverser l'intervalle de l'éclatement. Des impuretés en couches, même très minces, peuvent provoquer des retards considérables (30 à 50 μs), mais tout à fait irréguliers. Ce retard peut être supprimé par ionisation artificielle (radium, lampe à vapeur de mercure) ; on connaît encore très mal l'influence de cet artifice sur le retard propre de l'éclateur.

On caractérise l'effet du choc par les deux facteurs suivants : le *facteur d'impulsion* qui est le rapport de la tension de contournement au choc à la tension de contournement constante (ordre de grandeur : 1,8 à 2 pour les isolateurs et pour des raideurs pas

(1) Analyse de l'article de M. Ales BÉAHA dans la R. G. E. des 16 et 23 Février 1935, pages 209-214 et 245-253, 23 figures, 3 tableaux.

trop grandes) ; le *retard relatif*, rapport du retard de l'éclateur au choc, au temps qui s'écoule entre l'origine et le premier passage du choc par la tension de contournement constante, par exemple t_1/t_2 sur la figure 2.

III. GÉNÉRATEURS SIMPLES DE CHOC ÉLECTRIQUE A FRONT TRÈS RAIDE

Le générateur du choc électrique artificiel utilise la charge d'un condensateur ou d'un ensemble de condensateurs et les libère par amorçage d'un ou de plusieurs éclateurs. Le choc est obtenu aux bornes d'une résistance R , comme le montre la figure 3, qui représente le type de générateur de choc le plus simple.

Comme nous l'avons dit à propos de la figure 1, il y a lieu de distinguer deux phases dans un choc : le front OB et la queue BC . La première, le front, correspond à l'établissement de la décharge à travers l'éclateur. Le facteur essentiel est la durée t_a de cette décharge, durée dont dépend la raideur du front de l'onde de choc.

Plusieurs théories ont été élaborées afin d'expliquer le phénomène de la décharge ; les recherches oscillographiques modernes ont démontré que la décharge est plus compliquée que ne la suppose aucune des théories. Pour les calculs, on est réduit à une loi empirique due à TOEPLER qui rend assez bien compte de la raideur du front de l'onde pour des tensions jusqu'à 100 à 150 kV. Cette loi conduit à admettre que l'établissement de la tension s'effectue suivant une loi exponentielle, de la forme :

$$E = E_0 \left(1 - e^{-\alpha t} \right)$$

(E_0 = tension maximum)

$$\alpha = \frac{E_0}{-k\delta}$$

avec $(k = \text{constante} = 0,1, 10^{-3} \text{ à } 0,2 \cdot 10^{-3})$
 $(\delta = \text{distance des électrodes.})$

Cette loi n'est admise qu'au voisinage de l'origine et donne une durée t_a de la décharge, de l'ordre de 10^{-8} secondes, ce qui correspond à peu près à la réalité. L'intérêt de la formule est qu'elle permet d'entreprendre des calculs mathématiques des tensions et des courants dans les éclateurs ; elle permet aussi de tenir compte de la résistance R qui a été supposée nulle dans la relation précédente. Cette résistance diminue la raideur, mais son influence est négligeable dans les dispositifs pratiques. D'ailleurs, l'éclateur a toujours une capacité propre, qui facilite la décharge (c' sur la fig. 3).

FIG. 3

Ces conclusions ont été vérifiées jusqu'à 150 kV., limite supérieure actuellement atteinte par l'oscillographe cathodique.

IV. ESSAIS AU CHOC ÉLECTRIQUE DES ISOLATEURS ET DES PARAFONDRES

Ces essais posent deux problèmes : celui de la réalisation d'un choc de caractéristiques voulues et son enregistrement à l'aide de l'oscillographe à rayons cathodiques. Ces deux problèmes sont différents suivant qu'il s'agit d'isolateurs ou de parafoudres. Pour les isolateurs, on mesure la tension de choc initiale et sa valeur à l'amorçage de l'arc (fig. 2) sans s'occuper de la décharge même par l'amorçage, qui suit le choc. Dans l'essai des parafoudres, on s'intéresse surtout à l'amorçage lui-même et à toute la décharge à travers le parafoudre. Dans ce dernier cas, l'essai sera plus complet et plus délicat.

A. Réalisation d'un choc électrique de caractéristiques données

Le montage de la figure 3 pourra être employé pour les essais d'isolateurs, mais non pour ceux des parafoudres ; la décharge devrait, en effet, passer par la résistance inconnue qu'est le parafoudre ; elle serait par là même indéterminée. Il faut interposer dans ce cas, entre le générateur et le parafoudre, une ligne suffisamment longue, pour assurer la formation du choc avant qu'il attaque le parafoudre (fig. 4) ; c'est une erreur de remplacer la ligne par une résistance égale à son impédance caractéristique.

FIG. 4

On admet, en général, que le choc peut être considéré comme "formé", lorsque la longueur de la ligne correspond à une durée de propagation de $\frac{t_b}{2}$ (fig. 1), la partie au-delà de l'onde étant beaucoup moins intéressante. Pour $t_b = 40 \mu s$, on doit avoir une ligne de 6 km. de longueur. Quelquefois, on ne peut pas se permettre de réaliser une ligne aussi longue ; on doit se contenter de quelques centaines de mètres. Aussi n'aura-t-on de certitude que dans la partie de l'onde de choc correspondant au début de son front. C'est d'ailleurs souvent suffisant, étant donné que les parafoudres satisfaisants s'amorcent sur le front (fig. 5).

FIG. 5

La présence d'une ligne sur le circuit fait intervenir des réflexions et, par suite, des oscillations. On peut éviter ces oscillations, comme on le sait, par une résistance égale à l'impédance caractéristique Z de la ligne. C'est ce qui est réalisé par la résistance R_2 de la figure 6. Toutefois, si la ligne est assez courte

pour que l'éclateur reste amorcé toute la durée de l'essai, au lieu de R_2 , ce sera l'impédance formée par l'ensemble c , R_1 , R_2 , qui va intervenir et l'amortissement de la ligne sera très discutable.

B. Enregistrement de l'effet du choc par l'oscillographe à rayons cathodiques

Les principales difficultés qui ont dû être résolues sont relatives au problème de la mise en route de l'organe assurant le balayage en fonction du temps, au moment voulu, quelques fractions de micro-seconde avant le déclenchement du phénomène à enregistrer ; un autre problème est celui évitant le voilement de la pellicule par le fonctionnement de la cathode.

L'inscription du choc nécessite un grand nombre de précautions : les prises de terre défectueuses, les effets d'induction mutuelle, etc., peuvent causer des perturbations, des oscillations, très gênantes.

Une autre difficulté est celle de l'inscription, à l'aide de l'oscillographe cathodique, du choc en haute tension, ce qui soulève la question des potentiomètres devant le choc. Il semble que l'état actuel de la technique ne permet pas d'enregistrer le front propre d'un choc à très haute tension. On aura recours à des potentiels présentant des retards certains, mais connus, d'où la possibilité de corriger les oscillogrammes par le calcul.

FIG. 6

V. RÉALISATION D'UN CHOC QUELCONQUE

Les générateurs simples donnent, comme nous l'avons vu plus haut, des ondes à front très raide, où t_a est de l'ordre de 10^{-8} secondes. Cette raideur est plus que suffisante dans la pratique, tout au moins lorsque les tensions ne sont pas trop élevées. Souvent on peut même négliger t_a devant t_b , dans le calcul des constantes du circuit.

Il s'agit de modifier à volonté le front et la queue de l'onde de choc. On peut songer, par exemple, à intercaler une inductance L dans le circuit (fig. 7), tout en maintenant la décharge apériodique ;

FIG. 7

mais l'emploi de bobines d'inductance ne va pas sans inconvénients, surtout pour de très hautes tensions de crête. C'est la solution représentée en figure 8 qui paraît la plus indiquée. Une capacité c_2 et une résistance R_1 servent à retarder la décharge.

On se donne, par exemple, les trois caractéristiques H , t_a , t_b (fig. 1) du choc à réaliser et l'on cherche par le calcul les valeurs à attribuer à c_1 , c_2 , R_1 , R_2 . L'auteur indique une méthode de

calcul ; t_a est le temps au bout duquel la tension passe par son maximum H ; t_b est défini par l'instant où la tension repasse par la valeur $\frac{H}{2}$.

On obtient ainsi deux équations pour déterminer quatre valeurs. Mais c_1 est d'habitude donné par les conditions techniques. Une quatrième équation sera fournie par la considération du rendement du générateur : la combinaison la plus avantageuse sera celle qui donne le maximum de tension, si ce maximum existe. On définit ce rendement par le rapport de la tension de crête à la tension de charge du générateur.

Le calcul ainsi effectué n'est qu'approximatif et l'on doit faire diverses corrections. Ainsi, on a supposé t_a négligeable devant t_b ; autrement dit, on a négligé l'influence de la raideur propre de l'onde de choc, en admettant que la décharge par l'éclateur J (fig. 8) est instantanée.

FIG. 8

L'influence des autres circuits, des terres, peut également modifier le choc.

D'autre part, les oscillogrammes révèlent des oscillations parasites dues à l'inductance des connexions du générateur et à leurs capacités. On peut supprimer ces oscillations en augmentant un peu R_2 , de façon à rendre le circuit apériodique. On a tracé des abaques indiquant comment il faut alors faire varier c_2 (en même temps que R_2) pour ne pas changer t_a et t_b .

La méthode de calcul que nous venons d'esquisser brièvement se modifie quelque peu lorsque la tension de crête atteint des valeurs de l'ordre de 1000 kV. Dans ce cas, on prend pour c_2 la capacité des connexions et de l'éclateur par rapport au sol par exemple. Mais, alors, des quatre arbitraires c_1 , c_2 , R_1 , R_2 , ne reste plus que les deux derniers et c'est le rendement qui en souffre. L'auteur insiste sur ce fait, que l'on a tendance à négliger : avec une tension de charge de 1 MV on peut n'obtenir que 0,5 MV de tension de crête seulement.

VI. GÉNÉRATEURS D'ONDE A TRÈS HAUTE TENSION

On exige aujourd'hui des tensions de 3 à 5 MV pour des chocs destinés à reproduire les effets des décharges atmosphériques. Si nous considérons le générateur simple de la figure 8, on peut être limité quant à la tension par deux des éléments de ce circuit : par la source de tension et par le condensateur c .

Quant au condensateur, on en construit économiquement avec diélectrique en papier, mica ou verre, jusqu'à 150 kV. Au-delà de cette tension, il faudra utiliser, soit plusieurs condensateurs en série, soit des condensateurs à air, dont les dimensions seront importantes. On a proposé enfin (BERGER) une solution très élégante, consistant à employer comme condensateurs des câbles, ce qui permettra d'atteindre 350 kV. par étage, avec des tensions continues.

Les sources peuvent être continues ou alternatives. Dans ce dernier cas, avec des transformateurs élévateurs en cascade, on n'est pas limité en tension. Toutefois, ce dispositif n'est pas en faveur, car la polarité de l'onde n'est pas assurée sans un

dispositif spécial — (la décharge se produit à la crête de la sinusoïde) — ; le transformateur est menacé par le choc et la charge du condensateur est irrégulière. Les sources continues nécessitent un redresseur. Les redresseurs mécaniques permettent d'atteindre 400 kV., mais on préfère les redresseurs statiques électroniques, bien que l'on soit limité avec ceux-ci à 150 à 200 kV. au maximum.

Pour réaliser dans ces conditions des chocs à très haute tension, on emploie des générateurs à plusieurs étages : les condensateurs sont chargés en parallèle et déchargés en série, le changement des connexions étant effectué par les éclateurs. Tel est, par exemple, le principe du montage représenté schématiquement par la figure 9. Les condensateurs c représentent les capacités des différents étages, par rapport au sol ; les résistances R sont destinées à rendre chaque étage apériodique, de façon à éviter ses oscillations intérieures (il faut toujours compter avec une certaine inductance des connexions).

Voici les valeurs qu'on peut attribuer à titre d'ordre de grandeur aux différentes constantes du montage :

$$\begin{aligned} C_0 &= C_1 = C_2 = \dots = C_n = 0,1 \mu F \\ c_1 &= c_2 = \dots = c_n = 0,0001 \mu F \\ R_1 &= R_2 = \dots = R_n = 100 \text{ Ohms} \end{aligned}$$

Pour étudier le processus de la formation du choc, on considère deux cas extrêmes : dans l'un, tous les éclateurs s'amorcent simultanément ; dans l'autre, les éclateurs s'amorcent l'un après l'autre.

FIG. 9

Le premier cas peut se traiter par la méthode de Heaviside par exemple, en assimilant le générateur à une ligne artificielle qui remplace les câbles à inductance nulle. E étant la tension de la source et n le nombre d'étages, la tension aux bornes de l'éclateur J_{n+1} atteint la valeur nE , suivant une loi à peu près exponentielle, et au bout d'un temps de l'ordre de la micro-seconde.

Dans le deuxième cas extrême, l'éclateur J_1 s'amorce seul et le premier. Le condensateur c_0 charge c_1 à la tension E , le rapport $\frac{C}{C+c}$ étant peu différent de 1. Alors la tension de l'éclateur suivant devient $2E$. On suppose que cet éclateur s'amorce lorsque la tension de crête $2e$ est atteinte. Ce phénomène se reproduit jusqu'à c_n qui se charge à la tension nE et produit alors l'amorçage de l'éclateur J_{n+1} . Pour étudier la formation de ce choc et surtout sa durée, on a simplement supposé que les durées d'amorçage sont d'autant plus grandes que la tension est plus grande, ce qui a conduit à des durées totales du même ordre de grandeur que dans le cas précédent.

Ces hypothèses et ces résultats devraient être vérifiés expérimentalement. Jusqu'à présent, aucune vérification quantitative n'a été effectuée. Ce sont ces mesures qui devront décider lequel des deux cas limites précédemment envisagé est le plus avantageux, quant à la raideur du front de l'onde de choc.

VII. INFLUENCE DE LA RÉSISTANCE DE L'ÉCLATEUR SUR LE FRONT DE L'ONDE DE CHOC

Dans ce qui précède, on a supposé la décharge à travers l'éclateur instantanée, c'est-à-dire la résistance de celui-ci nulle. Or, en réalité, pour des tensions de l'ordre de 150 kV., nous avons vu que cette décharge dure un temps fini de l'ordre de 10^{-8} seconde, et, d'après ce que nous venons de dire, cette durée est probablement notamment augmentée dans le cas des très hautes tensions. Il est donc intéressant de connaître la correction à faire, quand la résistance de l'éclateur n'est pas négligeable. On peut, à cet effet, utiliser la loi de Toepler, d'après laquelle la tension aux bornes de l'éclateur décroît exponentiellement :

$$E = E_0 (1 - e^{-\alpha t})$$

et que l'on peut encore confondre, pour simplifier les calculs, avec une loi hyperbolique :

$$E = \frac{E_0}{1 + kt}$$

k étant une constante convenablement choisie, de l'ordre de 10^9 .

FIG. 10

En tenant compte de cette tension aux bornes de l'éclateur, on est conduit à une équation différentielle, dont une solution approchée fournit les corrections cherchées. On constate que l'influence de la résistance de l'éclateur doit être plus grande pour les ondes très raides.

VIII. CONCLUSION

Dans l'étude que nous venons de résumer, l'auteur avait pour but de résoudre quelques problèmes relatifs à la réalisation et à la mesure des chocs électriques, qui se posent lorsqu'on désire opérer avec la précision obtenue dans d'autres domaines de l'électrotechnique.

Il indique que d'autres problèmes se posent encore qui n'ont pas été envisagés, notamment celui de l'inductance des circuits des générateurs de choc, celui de l'influence des prises de terre et celui du comportement des potentiomètres au choc.

Sur une nouvelle conception électromagnétique de la lumière

du Professeur ANTUNEZ DE MAYOLO DE LIMA

Le professeur SANTIAGO ANTUNEZ de MAYOLO est un ancien élève de l'Institut Electrotechnique de Grenoble (1907-1909) et le premier de nos étudiants de l'Amérique latine ayant fait ses études dans cet Institut. Aujourd'hui, M. ANTUNEZ est professeur à l'École d'Ingénieurs du Pérou et à l'Ecole Nationale d'Arts et Métiers de Lima.

M. SANTIAGO ANTUNEZ de MAYOLO est l'auteur d'une nouvelle théorie électromagnétique de la lumière, théorie qui, partant de conceptions différentes de celles de Maxwell, arrive aux mêmes résultats que celles-ci, et, en plus, il en tire la déduction logique de la théorie des Quanta, qui unifie celle-ci avec le champ électromagnétique de Maxwell.

Dans le numéro de janvier-février 1935 de la « Houille Blanche » nous avons signalé dans la section bibliographique l'un des derniers mémoires de Monsieur le Professeur ANTUNEZ, intitulé « Une même équation pour le champ électromagnétique et le champ gravitationnel » en indiquant son importance théorique. Il y a peu de temps (Mars-Avril 1935) Monsieur ANTUNEZ de MAYOLO a parcouru l'Italie et la France, afin de visiter les grands Centres d'Enseignement scientifique et de faire connaître à ses collègues européens ses travaux originaux de recherches. C'est ainsi qu'en Italie, le très éminent Professeur Giovanni GIORGI, de l'Université de Rome a présenté à la « Pontificia Accademia delle Scienze » un mémoire de M. ANTUNEZ, qui avait pour titre « Teoria unitaria del campo elettromagnetico » (théorie unitaire du champ électromagnétique), A Paris, l'illustre M. Louis de BROGLIE a présenté à l'Académie des Sciences un autre mémoire de M. ANTUNEZ, sous le titre « Le champ électromagnétique et les quanta », où il a montré comment de l'équation fondamentale du champ électromagnétique qu'il a trouvée, on peut déduire la théorie des quanta. Ces deux mémoires se trouvent ainsi attaquer, en liaison l'un avec l'autre, le même problème.

Quelque temps avant d'écrire ces mémoires, vers le milieu de l'année 1932, M. ANTUNEZ de MAYOLO a publié à Lima son important travail « Los tres elementos primordiales constitutivos de la materia », (Les trois éléments primordiaux constitutifs de la matière). Dans cette étude, il expose ses idées sur la constitution de la matière et indique en quoi consisterait le courant électrique. Ces dernières idées paraissent avoir été confirmées par la théorie qu'il a développée du champ électromagnétique. Nous allons donner ci-après une brève synthèse de cette très originale théorie du Professeur péruvien.

Selon M. ANTUNEZ, les éléments simples constitutifs de la matière sont au nombre de trois : l'électricité positive, l'électricité négative et l'élément neutre ; ce dernier n'est pas électrique, ni ne peut être transformé en électricité. Ces trois éléments simples possèdent chacun un certain coefficient d'inertie qui est sa masse, et l'élément neutre qui est le moins actif est le plus inerte des trois.

Les trois éléments simples peuvent se trouver à l'état fluide, mêlés entre eux et remplissant l'espace, qui n'est pas vide.

Les deux sortes d'électricité peuvent se combiner avec l'élément neutre, en se transformant alors en corpuscules. Ces corpuscules ont toujours besoin pour leur formation d'un noyau d'élément neutre. Le neutre serait ainsi le véritable substratum de

la matière, il entrerait en une grande proportion dans le proton et en une très petite proportion dans l'électron et dans le positron, qui ne seraient pas simples, mais composés.

Les électricités positives et négatives diluées, accouplées en quantités rigoureusement égales, et en mouvement avec la vitesse de la lumière, constituent, d'après la démonstration de M. ANTUNEZ, le champ électromagnétique dans le vide. Entre ces électricités non différenciées s'exerceraient des forces centrales d'une structure analogue à celle représentant la loi de la gravitation de NEWTON et la loi des actions électriques de COULOMB. Celle-ci s'applique aux électricités différenciées distribuées autour des corps ou constituant des corpuscules, tandis que la loi de M. ANTUNEZ de MAYOLO s'appliquerait aux électricités non différenciées et aurait pour expression :

$$F = -K \frac{M M}{\rho^2} \quad (1)$$

L'une des nouveautés de ce travail consiste dans la mesure de la quantité d'électricité, non corpusculaire et en mouvement avec la vitesse de la lumière, non par sa charge, mais par sa masse, en prenant comme telle la grandeur qui multipliée par le carré de la vitesse de la lumière, mesure l'énergie du champ électromagnétique dans le vide. Il y a une relation notable entre la grandeur de la charge électrique exprimée en unités du système électrostatique, et la masse électrique M correspondant à une telle charge :

$$Q = c \sqrt{M \rho} \quad (2)$$

Le professeur ANTUNEZ de MAYOLO déduit l'équation suivante pour le champ électromagnétique dans le vide, dans un système de trois grandeurs fondamentales seulement, savoir : longueur, temps et masse électrique.

$$E = -c B \quad (3)$$

Dans cette équation, E est le champ électrique absolu de dimensions (LT^{-2}) donc, c'est une accélération, comme le champ gravitationnel, c est la vitesse de la lumière et B est l'induction magnétique de dimensions (T^{-1}) , c'est donc une vitesse de rotation.

Une telle équation (3) est analogue à l'équation : $G = -\omega B$ qu'on déduit dans le cas de la gravitation pour le mouvement de rotation d'un corps autour d'un autre dans une orbite circulaire, en appelant G l'accélération centripète, ω , la vitesse tangentielle et B la vitesse angulaire de rotation.

De l'équation fondamentale (3), le Professeur de MAYOLO a déduit les équations de MAXWELL dans son mémoire : « Une même équation pour le champ électromagnétique et le champ gravitationnel ». Partant de cette même équation, il établit que l'énergie du champ électromagnétique se trouve mesurée par Mc^2 (produit de la masse par le carré de la vitesse de la lumière). Dans la note présentée par le savant Louis de BROGLIE à l'Académie des Sciences, M. ANTUNEZ déduit de la relation (2) la théorie des Quanta :

$$Mc^2 = h\nu \quad (4)$$

La valeur de la constante h de PLANCK est : $2\pi\rho Mc$.

La longueur d'onde λ est donnée par : $\lambda = 2\pi\rho$ et la

fréquence ν (inverse du temps de rotation), B étant l'induction, magnétique correspond à une pulsation :

$$B = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu \quad (5)$$

D'après une telle théorie, un photon constitue le doublet de deux quantités d'électricité égales et de signes contraires. Celles-ci peuvent se dédoubler et, en englobant des noyaux infinitésimaux du neutre résiduel, former un électron et un positron, ainsi qu'on le constate dans les rayons cosmiques. Il résulte aussi de cette théorie, que le carré de la vitesse de la lumière dans le vide mesure le potentiel électrique newtonien des masses accouplées. En effet, si dans la relation de MAXWELL :

$$\frac{I}{\epsilon\mu} = c^2 \quad (6)$$

On remplace ϵ par $\frac{I}{K}$, étant donné que la perméabilité magnétique μ dans le champ électromagnétique dans le vide vaut $\mu = \frac{\rho}{M}$ on en déduit que la formule antérieure devient

celle du potentiel électrique newtonien :

$$\frac{KM}{\rho} = c^2 \quad (6')$$

On comprend d'après cela pourquoi la vitesse de la lumière, dans le vide est une vitesse limite, puisqu'elle est la mesure d'une certaine grandeur qui dérive des forces électriques centrales.

Telle est la théorie électromagnétique du Professeur ANTUNEZ de MAYOLO. Au lieu d'un élément hypothétique simple : l'éther, qu'il est impossible de mettre en évidence et qu'on dote de propriétés extravagantes, on a deux électricités dont les existences respectives peuvent être mises en lumière par différenciation.

Il n'y aura pas de tension ni de pression de l'éther simple, mais des mouvements d'électricité obéissant à des forces centrales. Telles sont les différences entre la conception du champ électromagnétique de MAXWELL, et celle de l'ancien élève de l'Institut Electrotechnique de Grenoble.

L. B.

DOCUMENTATION

L'aménagement du fleuve Columbia au Canada et aux Etats-Unis

Le Columbia prend sa source à 3.135 mètres d'altitude dans la Colombie britannique, province du Canada. La longueur de son cours est de 1.920 kilomètres, en majeure partie encaissé.

La puissance disponible est de 1.350.000 CV. pour la partie du fleuve sur le territoire canadien et de 12.320.000 CV. aux Etats-Unis.

Au Canada, le Columbia a une longueur de 745 km., un bassin versant de 102.000 km², une différence de niveau de 2.327 mètres. A sa sortie du Canada, son débit varie de 500 m³/sec. en hiver à 12.750 m³/sec. à la fonte des neiges.

Quatre usines, d'une puissance totale de 226.000 CV. sont installées sur le Kootenay, affluent de gauche du Columbia.

Une centrale de 15.000 CV., une de 7.200 CV., une de 1.500 CV. sont installées sur d'autres affluents.

On pourrait facilement aménager le Pend d'Oreille qui, sur le parcours canadien de 22 km. 4, a une dénivellation de 120 mètres.

Aucun ouvrage n'est actuellement en étude, mais on pourrait aménager les lacs Arrow, intercalés sur le cours du Columbia, et qui créeraient une réserve de 2.450 millions de m³ et permettraient d'augmenter de 180 m³/sec. le débit moyen à la frontière.

Aux Etats-Unis, le Columbia a une longueur de 1.175 kilomètres, avec une dénivellation de 808 mètres. L'étude de l'aménagement du Columbia, par le Board of Army Engineers, envisage 10 barrages dont un, celui de Rock Island, avec 15 m. de chute et 60.000 CV., existe déjà et deux sont en construction. Il y a lieu d'ajouter un onzième barrage, en avant de ceux prévus, le barrage de Kettle Falls, dont une société privée a la concession. La puissance fournie par les 9 ouvrages envisagés par le Board of Army Engineers est de 7.486.000 kW.

Les deux plus importants, en construction, sont : le barrage du Grand Coulee et le barrage de Bonneville.

La puissance définitive que pourra fournir le Grand Coulee sera de 1.575.000 kW., avec une chute de 107 m. et une retenue de 6.150 millions de m³.

Les travaux en cours comprennent un ouvrage plus modeste, qui sera incorporé dans le barrage définitif. Ce barrage poudra 1.050 m. de longueur au couronnement, une hauteur nette de 44 m., une hauteur totale de 91 m. Le volume de maçonnerie sera de 2,66 millions de m³, alors que l'ouvrage définitif en aura 8 millions.

L'usine, qui doit être mise en marche en 1938, aura tout d'abord une puissance de 103.000 kW., qui sera portée ensuite à 617.000 kW.

Le barrage de Bonneville est situé à 225 km. de l'embouchure. La superficie du bassin versant est de 665.000 km². Le débit du Columbia varie de 5.380 à 22.700 m³/sec. A l'emplacement du barrage, le lit du fleuve est séparé par une île en deux bras : sur le bras de gauche, large de 150 m., s'élèvera l'usine ; le bras de droite, large de 320 m., sera fermé par un déversoir à hausses mobiles.

La chute utile variera de 6 à 21 mètres. La centrale comprendra 6 turbines Kaplan, à pales orientales de 43.000 CV. dont 2 seulement seront installées en premier stade.

Le barrage The Dalles pourra ultérieurement être exhaussé ; les deux barrages amont seront alors noyés.

Le Génie Civil, 4 mai 1935.

L'Usine hydro-électrique de Beauharnois (Canada) (1)

L'usine, située auprès du lac Saint-Louis, utilise les eaux du Saint-Laurent entre le lac Saint-Francis et le lac Saint-Louis. Le canal, qui peut débiter la totalité des eaux du Saint-Laurent, soit 6.200 m³/sec., n'est encore creusé que sur une partie de sa longueur. Actuellement, l'usine est construite sur le tiers de sa longueur et renferme 6 groupes principaux, 3 alternateurs de 44.000 kVA à 25 périodes/sec. et 3 de même puissance à 60 périodes/sec. et 2 groupes auxiliaires comprenant un alternateur de 5.760 kVA, 13.200 volts, 60 périodes/sec., entraîné par une turbine Francis de 7.800 CV.

Les transformateurs à 25 périodes/sec. sont du type monophasé et élèvent la tension à 220 kV. Les transformateurs à 60 périodes/sec. sont du type triphasé et élèvent la tension à 120 kV.

La mise en service de l'usine a eu lieu le 1^{er} octobre 1932. La puissance installée actuelle de 300.000 CV. sera portée à 500.000 CV. en 1937.

Le Génie Civil, 9 mars 1935.

(1) Voir La Houille Blanche N° 189-190, Septembre-Octobre 1932, Les Aménagements de Beauharnois par J.-A. Knight, M. E. I. C.