

PROPAGATION ET DISTORSION D'UNE PERTURBATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

par M. A. DUFOUR.

Sommaire. — On sait que lorsqu'une perturbation électromagnétique se propage le long d'une ligne conductrice isolée, de résistance non négligeable, elle subit un changement de forme ou de distorsion.

Pour constater directement l'existence et la nature de cette distorsion, on enregistre ici la forme même de la variation de tension de la perturbation considérée, en utilisant à cet effet l'oscillographe cathodique enregistreur pour basses et hautes fréquences établi antérieurement par l'auteur.

On s'est limité au cas des lignes de faible longueur, constituées par des fils de cuivre ou de fer.

La distorsion constatée est très faible quand la ligne est en cuivre; elle est considérable pour la ligne en fer; dans ce dernier cas, l'amortissement global de la perturbation et l'amortissement sélectif des hautes fréquences sont particulièrement nets.

1. Introduction. — Quand une perturbation électromagnétique se propage le long d'une ligne conductrice soigneusement isolée, elle subit, comme l'on sait, un amortissement dû à diverses causes, parmi lesquelles la plus importante est celle qui résulte du fait que la résistance du conducteur parcouru par le courant n'est pas négligeable. L'effet est particulièrement net sur les lignes longues et se traduit par le phénomène connu sous le nom de diffusion du courant ou distorsion des signaux électromagnétiques. Il est d'autant plus marqué que la fréquence des oscillations considérées est plus grande, car il dépend aussi de la manière dont se répartit le courant dans la section du conducteur, répartition correspondant à ce qu'on appelle l'effet pelliculaire. Lord Kelvin a jadis calculé⁽¹⁾ le rapport de la résistance effective d'un conducteur en haute fréquence à sa résistance en courant continu; on sait que ce rapport croît, en particulier, très vite quand la fréquence considérée augmente.

Dans le cas des lignes en fer, les phénomènes sont plus compliqués et l'amortissement sélectif est accru, par suite des propriétés magnétiques du métal⁽²⁾.

Un grand nombre de mesures expérimentales ont été faites au point de vue de l'amortissement des oscillations, causé par leur propagation le long d'une ligne, en considérant soit des oscillations amorties, soit des oscillations non amorties. Les résultats se sont montrés en général d'accord avec les prévisions théoriques⁽³⁾.

2. Méthode d'observation. — Je me suis proposé de constater simplement, mais par un procédé direct, la déformation que doit éprouver, d'après ce qui précède, une perturbation électromagnétique de forme quelconque, lors de sa propagation le long d'une ligne, dans les conditions facilement réalisables dans un laboratoire où l'on ne peut disposer de lignes de grande longueur analogues à celles qui servent en télégraphie ou téléphonie.

L'emploi obligatoire d'une ligne courte nécessite l'usage de perturbations très brèves, à forme heurtée, si l'on veut espérer constater leur distorsion sur une petite distance; pour de telles perturbations à front raide, les oscillations qui peuvent s'y trouver seront de

(1) LORD KELVIN, *Mathematical and Physical Papers*, t. 3, p. 491.

(2) LAVILLE, *C. R.*, t. 176 (1923), p. 373 et 986. — BRYLINSKI, *C. R.*, t. 176 (1923), p. 1458. — LÉAUTÉ, *C. R.*, t. 179 (1924), p. 397.

(3) Parmi les expériences récentes, voir: KARTSCHAGIN, *Ann. der Physik*, t. 67 1922 — LAVILLE, *loc. cit.*

fréquence élevée, et il est à présumer que leur amortissement sélectif deviendra déjà assez notable, même sur un petit parcours, pour que la forme de la perturbation totale subisse des variations discernables.

La forme même de la perturbation s'obtiendra facilement par enregistrement direct à l'aide de l'oscillographe cathodique tel que je l'ai établi et décrit antérieurement ; il suffira de comparer les tracés obtenus aux deux extrémités de la ligne, l'un correspondant au départ de l'onde, l'autre à son arrivée en bout de ligne, pour constater la nature et l'importance de la distorsion attendue.

On peut remarquer que cette méthode d'observation rappelle tout à fait celle employée dans l'étude de la propagation d'une onde acoustique solitaire dans un tuyau. Elle est évidemment d'un emploi moins facile que cette dernière car la vitesse de propagation du phénomène utilisé est ici de l'ordre de 300 000 kilomètres par seconde au lieu des

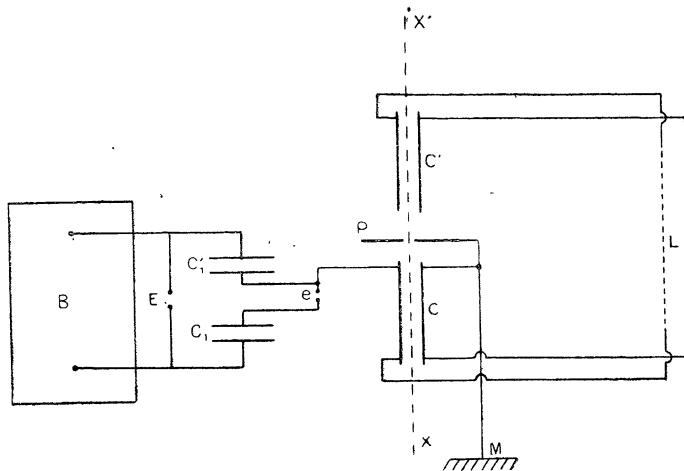


Fig. 1.

340 mètres de la vitesse du son ; en outre, il est moins commode de canaliser, sans complications, dans un fil une oscillation électrique que d'enfermer une onde acoustique dans un tuyau ; néanmoins le parallélisme est évident ; il m'a suffi de transposer dans le domaine électromagnétique la méthode classique d'inscription acoustique.

3. Dispositif expérimental. — La figure 1 représente le schéma du dispositif expérimental employé.

La ligne L, soigneusement isolée, est formée de deux fils faits du même métal, ayant chacun 1 millimètre de diamètre, parallèles, distants l'un de l'autre de 2 cm. Elle est connectée à ses extrémités à deux condensateurs à air ⁽¹⁾, identiques, C et C'. Le faisceau cathodique inscripteur, représenté schématiquement par la droite pointillée XX', passe entre leurs armatures, et vient, comme à l'ordinaire, impressionner la plaque photographique sur laquelle s'inscrivent successivement, par suite des actions créées par les champs électriques C et C', les formes des variations de tension observées aux deux extrémités de la ligne.

Afin d'assurer l'indépendance des indications des deux voltmètres constitués par C et C', une plaque métallique épaisse P convenablement disposée et reliée par un fil conducteur à la masse au sol M de l'oscillographe, constitue un écran imparfait mais très suffisant.

⁽¹⁾ Les armatures des condensateurs C et C' avaient comme dimensions 50 mm × 20 mm, et se trouvaient à une distance de 14 mm l'une de l'autre.

L'un des fils de ligne est de même connecté à la masse M précédente; de cette manière on peut soustraire le faisceau cathodique à l'influence gênante de champs électriques accidentels pouvant s'établir entre C, C' et les différentes pièces de l'appareil.

Il n'a pas été possible de disposer les fils correctement, c'est-à-dire en ligne droite, par suite de difficultés d'installation. Il fallait, en effet, satisfaire aux conditions suivantes : l'isolement devait être très soigné pour éviter toute dérivation ; pour ne pas faire intervenir les pertes dans le diélectrique, l'emploi du fil nu était imposé ; en outre, bien que la longueur de ligne envisagée fût relativement faible, il n'était guère possible de descendre au-dessous d'une longueur d'une centaine de mètres, correspondant à une durée de propagation de l'ordre d'un trois millionième de seconde permettant l'usage de perturbations brèves, de durée par exemple 10 fois moindre, assurant la séparation complète des deux enregistrements faits aux deux extrémités du parcours.

La condition d'isolement s'opposait à l'installation de la ligne à l'extérieur du laboratoire, par crainte des intempéries, et la condition de longueur rendait impossible sa disposition sous forme rectiligne dans les locaux disponibles.

En définitive, j'ai dû me résoudre au montage suivant : les deux fils parallèles, nus, sont enroulées en hélices parallèles sur un grand support de dimensions convenables : afin de réduire les actions mutuelles des diverses portions de la ligne, le pas des hélices a été fait le plus grand possible par rapport à la distance des deux fils ; l'isolement était assuré par de l'ébonite de place en place, et enfin on a eu soin d'éviter les changements brusques de direction des fils en les faisant contourner de gros tubes de verre gomme laqués disposés aux arêtes du support indiqué précédemment.

Le système producteur des perturbations électromagnétiques agit unipolairement sur un fil de la ligne. Quand la bobine d'induction B de la fig. 1 est mise en fonctionnement, et chaque fois qu'une étincelle jaillit à l'éclateur E, il se produit dans les condensateurs auxiliaires C₁ et C'₁ une variation brusque de charge qui détermine au second éclateur e une autre étincelle. Quand cette seconde étincelle prend naissance, elle est accompagnée d'une modification de l'état électrique des conducteurs reliés à l'une des électrodes de l'éclateur e, et la perturbation qui en résulte se propage tout le long du fil de ligne isolé, parallèlement auquel se trouve l'autre fil de ligne en communication avec le sol.

A priori, ce montage paraît peu satisfaisant car les divers circuits ne se ferment pas comme à l'ordinaire et il manque de symétrie ; l'expérience montre que c'est pourtant celui qu'il y a lieu de préférer au point de vue de la commodité des observations. Il convient enfin de noter que les deux étincelles qui jaillissent en E et e sont soufflées et que l'étincelle E est très petite, sa longueur ne dépassant pas une fraction de millimètre.

La technique d'enregistrement employée avec l'oscillographe cathodique est celle relative aux hautes fréquences (1) : la plaque photographique est immobile ; c'est le faisceau cathodique qui se déplace rapidement sous l'influence de la variation d'un champ magnétique auxiliaire convenable, dit de balayage. L'allongement du tracé est obtenu, comme d'habitude, au moyen de l'action sur le faisceau d'un courant alternatif, ici de fréquence 273 000 par seconde. Perpendiculairement aux grandes oscillations précédentes, et parallèlement à la direction du balayage, s'inscrivent enfin les variations de la tension d'abord à la tête de ligne (condensateur C) puis en bout de ligne (condensateur C').

4. Résultats. — On a reproduit ici, en grandeur naturelle, une partie des résultats expérimentaux obtenus. Dans ces reproductions, la grande sinusoïde horizontale est due au courant alternatif de fréquence 273 000 s⁻¹.

Les figures 2 et 3 se rapportent à l'emploi d'une ligne en fil de cuivre, ayant une longueur d'environ 147 mètres.

La figure 2 fournit un exemple dans lequel la distorsion est, insensible : la forme de la perturbation électromagnétique enregistrée à son départ sur la ligne et qui correspond à l'accident marqué de la lettre D sur la photographie, se retrouve bien inchangée

(1) Pour plus de détails, voir : *On. de électrique*, t. 1 (1922), p. 638 et 699 ; t. 2 (1923), p. 19 et 1^a brochure *l'Oscillographe cathodique*, Chiron, éditeur, Paris (1923).

lors de son enregistrement en A à son arrivée à l'autre extrémité de la ligne ; l'absence de distorsion est due à ce que cette perturbation n'a pas une forme particulièrement heurtée. En outre, on ne peut constater ici d'amortissement global sensible durant le court trajet utilisé. Enfin, on peut vérifier que l'amplitude de la perturbation, exprimée sous forme de tension, est à très peu près deux fois plus grande en A

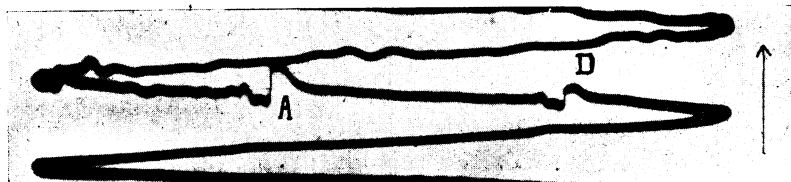


Fig. 2.

pour l'extrémité isolée de la ligne, qu'en D correspondant à son point de départ ; ce résultat est bien d'accord avec ce que permet de prévoir la théorie de la propagation d'une perturbation le long d'une ligne isolée, sans résistance et à capacité uniformément répartie.

Il n'y a pas lieu de comparer entre eux les enregistrements successifs de la perturba-

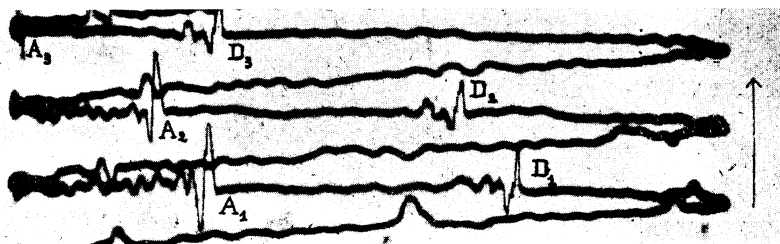


Fig. 3.

tion après sa réflexion à l'extrémité de départ à cause des complications résultant du montage spécial nécessité pour l'excitation de la ligne.

La figure 3 est relative à la même ligne mais correspond à des variations de tension de forme plus heurtée. Le même rapport d'amplitude se retrouve bien aux deux extrémités de

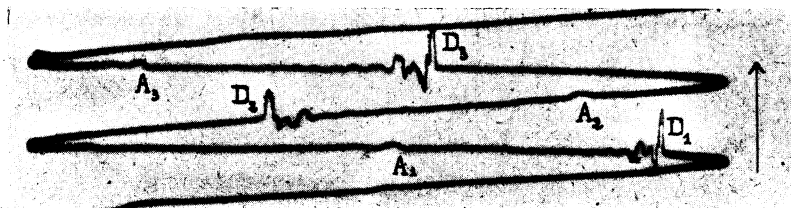


Fig. 4.

la ligne comme précédemment, mais cette fois on commence à deviner un léger amortissement sélectif des hautes fréquences. C'est ainsi que les accidents de très haute fréquence visibles sur les ondes de départ marquées D, ne se retrouvent qu'imparfaitement en A à leur arrivée en bout de ligne ; ils correspondent à des oscillations de longueur d'onde de l'ordre de quelques mètres tandis que l'ensemble de la perturbation s'étale sur une longueur de 10 à 20 mètres.

La figure 4 est relative maintenant à l'emploi d'une ligne en fer, de même longueur que la ligne de cuivre précédente. L'amortissement global devient tel que c'est tout juste si l'on peut discerner aux endroits marqués A la perturbation à l'arrivée en bout de ligne tandis que son départ en D apparaît nettement avec ses détails. En outre les formes des tracés D et A n'ont plus cette fois de parenté bien accusée.

En diminuant la longueur des fils, on peut facilement faire réapparaître plus marquée l'existence de la perturbation lors de sa réflexion en bout de ligne. C'est ce qui a lieu pour la figure 5 correspondant à l'emploi d'une ligne de fer de longueur moitié de la précédente, soit ici 73,5 mètres. L'amortissement global est toujours important, au point qu'on ne retrouve pas le rapport du simple au double des amplitudes, constaté lors de l'utilisation

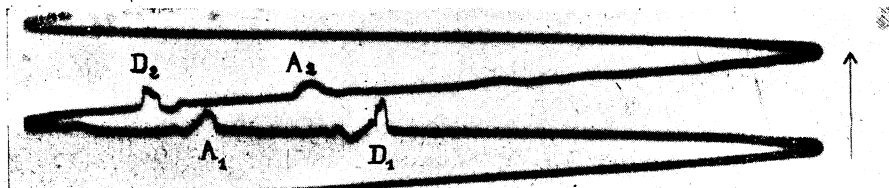


Fig. 5.

d'une ligne en cuivre; l'amortissement sélectif des hautes fréquences est encore assez marqué pour créer une déformation assez notable de la perturbation.

On peut essayer de déduire de ces clichés, sur l'enregistrement, une comparaison de la vitesse de propagation d'une perturbation électromagnétique le long de la ligne en cuivre et le long de la ligne en fer. Mais la précision d'une telle comparaison ne peut être ici bien grande par suite de l'imperfection des tracés, de la trop faible longueur de la ligne employée, et de l'inconstance des oscillations du poste à lampes créant le courant alternatif à 273 000 périodes. Aussi les enregistrements donnent-ils la même vitesse de propagation des perturbations dans tous les cas, en première approximation, ce qui n'est pas en contradiction avec les résultats fournis par des mesures plus précises antérieures ⁽¹⁾ utilisant la propagation d'ondes entretenues.

Cette méthode d'enregistrement se prêterait d'ailleurs facilement, le cas échéant, à une comparaison plus précise des valeurs des vitesses de propagation des perturbations électromagnétiques le long des fils, méthode caractérisée par la connaissance détaillée de la forme du phénomène qui se propage, à condition de pouvoir disposer de lignes convenables suffisamment longues.

(1) LAVILLE, *loc. cit.*