HAL
open science

Principe de nouveaux appareils pour courants alternatifs

Henri Abraham

To cite this version:

Henri Abraham. Principe de nouveaux appareils pour courants alternatifs. J. Phys. Theor. Appl., 1911, 1 (1), pp.264-274. 10.1051/jphystap:0191100104026401 . jpa-00241668

HAL Id: jpa-00241668

https://hal.science/jpa-00241668

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PRINCIPE DE NOUVEAUX APPAREILS POUR COURANTS ALTERNATIFS;

Par M. Henri ABRAHAM.

I. — Fréquencemètre et ohmmètre enregistreurs [1].

Les appareils dont il va être question comportent l'emploi d'un cadre mobile pouvant tourner dans le champ magnétique alternatif d'un électro à fer feuilleté. Ce sont donc des sortes d'électrodynamomètres ; mais ils sont caractérisés par ceci qu'ils sont dépourvus de tout ressort élastique, de manière que le cadre est entièrement libre et que son orientation est due, comme nous le montrerons plus loin, aux courants qui y sont induits par le champ alternatif.

[1] Communication faite à la Société française de Physique : séance du 3 mars 1911.

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/jphystap:0191100104026401

1. *Les galvanomètres à cadre mobile pour courants alternatifs.* — Je rappellerai d'abord les propriétés des appareils galvanométriques à cadre mobile dont le champ magnétique alternatif est produit par un électro-aimant à fer feuilleté — tels que le galvanomètre pour courants alternatifs que j'ai décrit antérieurement dans ce recueil (1).

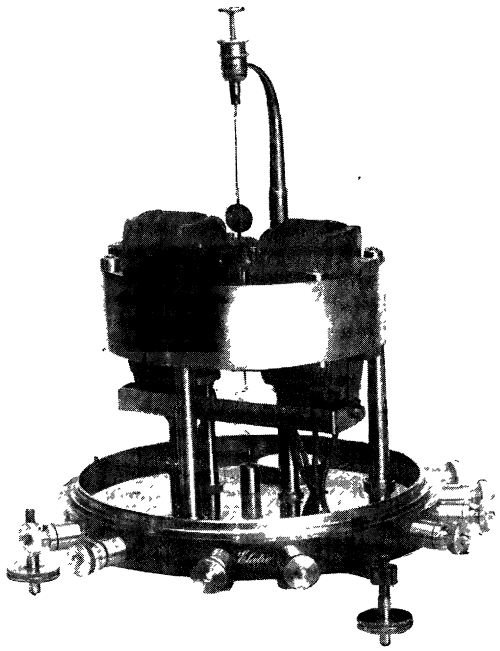

FIG. 1. — Galvanomètre à cadre mobile pour courants alternatifs.

Cet appareil ne diffère du galvanomètre d'Arsonval que par l'emploi d'un électro-aimant à fer feuilleté ; on peut donc lui donner pour les courants alternatifs autant de sensibilité que le d'Arsonval en comporte pour les courants continus.

Voici par exemple une capacité de moins d'un millième de microfarad, si je la charge en courants alternatifs sous une différence de potentiel de quelques volts, vous voyez sortir de l'échelle l'image du filament lumineux que projetait le miroir du galvanomètre.

Je mets maintenant le galvanomètre en relation avec une bobine exploratrice, et vous voyez, par les déviations de l'image sur

(1) H. ABRAHAM, *Galvanomètre pour courants alternatifs*, ce recueil, t. V, p. 576 (1906).

l'échelle, que toute la salle est pleine du champ alternatif créé par ce rhéostat où passent quelques ampères. Les champs magnétiques que l'on peut arriver à déceler de cette manière sont bien inférieurs au *microgauss*, il pourra donc être commode d'utiliser un tel galvanomètre pour les mesures qui demandent de la sensibilité, par exemple dans la méthode de détermination électrique des très petits déplacements de M. Guillet [1].

Il y avait quelque intérêt à examiner si le fer de l'électro n'apportait pas de perturbations importantes dans le fonctionnement de l'appareil.

On sait que dans les électro-aimants à fort entrefer, le champ magnétique doit être à tout instant proportionnel à la valeur actuelle du courant. Je me suis assuré qu'il en est en effet ainsi en relevant à l'hystérésigraphe [2] la courbe dont les abscisses sont proportionnelles aux valeurs du courant d'excitation et les ordonnées proportionnelles aux valeurs du champ dans l'entrefer de l'électro-aimant : cette courbe se confond bien *pratiquement* avec une ligne droite. L'effet de l'hystérésis et des courants de Foucault est seulement de mettre le champ en retard par rapport au courant d'une très petite fraction de la période $\left(\operatorname{tang}\varphi = \frac{1}{100}\right.$ à 42 périodes par seconde$\left.\right)$.

Ceci a une certaine importance pour la recherche des dispositifs à adopter pour la résolution de chaque problème expérimental, car il résulte de cette propriété que l'électro-aimant peut être traité comme un bobinage sans fer : au degré de précision que nous venons de dire, il a un coefficient de self-induction bien défini.

2. *Les appareils à cadre mobile sans ressort de rappel.* — Dans le fréquencemètre que vous avez sous les yeux, et dans toute une série d'appareils du même genre (capacimètre, ohmmètre, etc.), le cadre mobile, soit suspendu, soit monté sur pivots, est dépourvu de tout ressort de rappel. Il est entièrement libre de tourner dans le champ magnétique ; le courant lui est amené par des rubans d'argent très minces dont le couple est tout à fait négligeable.

Ce sont les forces électromotrices induites dans le cadre par le champ alternatif de l'électro qui fixent sa position d'équilibre.

Il est aisé de s'en rendre compte.

---

(1) A. Guillet, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CXLVI, p. 364 (1908).

(2) Henri Abraham, *Hystérésigraphe de projection* [*Bulletin de la Société des Electriciens*, t. IX, p. 461 (1909)].

Puisque le cadre est entièrement libre, il ne peut garder une position fixe que s'il n'est soumis à aucune force, c'est-à-dire si les courants qui le traversent sont en quadrature avec le champ magnétique dans lequel il peut tourner.

Supposons que l'appareil se trouve d'abord dans la position où le cadre n'est traversé par aucun flux (c'est sa position normale d'équilibre) ; et faisons-le traverser par un courant capable de le faire dévier, c'est-à-dire qui ne soit pas en quadrature avec le champ : l'appareil commence à tourner.

Mais, dès que le cadre tourne, la force électromotrice d'induction due au champ alternatif de l'électro se fait sentir, il en résulte un courant induit qui se superpose au courant moteur, se compose avec lui et en modifie progressivement l'intensité et la phase en la faisant tendre vers la quadrature. Le cadre continue à être entraîné tant que le courant n'est pas en quadrature, et la nouvelle position d'équilibre est atteinte lorsque le courant est ramené à présenter cette différence de un quart de période avec le champ alternatif de l'électro-aimant.

Il convient de remarquer, et c'est une propriété importante des appareils galvanométriques sans couple directeur, que la déviation ainsi acquise est indépendante des variations de voltage du réseau alternatif. Si ce voltage venait, en effet, à varier, le courant dans le cadre varierait bien dans la même proportion ; mais, comme il ne cesserait pas d'être en quadrature avec le champ, la position où se trouvait primitivement le cadre ne cesserait pas d'être la position d'équilibre.

3. *Couples stabilisants et instabilisants.* — La position initiale du cadre, aussi bien que celle qu'il prend lorsqu'on y envoie un courant, sont en général des positions d'équilibre très stables. Si on l'écarte de cette position, il y revient de lui-même, ramené par un couple proportionnel à l'angle d'écart, comme il le ferait s'il était rappelé par l'action d'un ressort élastique.

C'est que, en effet, le déplacement supplémentaire que l'on vient d'imprimer au cadre provoque la production d'un supplément de courants induits, et l'action du champ magnétique sur ces courants ramène le cadre vers sa position d'équilibre, si toutefois la différence de phase entre le courant et le champ alternatif a un sens convenable.

Le moment du couple de rappel, du *ressort électromagnétique*

ainsi créé, dépend essentiellement de cette différence de phase entre le courant induit dans le cadre et la force électromotrice qui lui donne naissance. Le couple de rappel serait nul si le courant était en phase avec la force électromotrice, c'est-à-dire si le circuit était dépourvu de self-induction, ou si l'effet de cette self-induction était compensé par un effet de capacité. Le couple deviendrait négatif et l'équilibre serait instable si l'effet de capacité devenait prépondérant. Le couple de rappel est au contraire positif et l'équilibre est stable si le circuit possède de la self-induction, la self-induction la plus favorable à la stabilité étant celle qui cause un retard de un huitième de période ($\omega L = R$).

Le calcul et l'expérience s'accordent pour constater que ces couples de rappel électromagnétiques peuvent être rendus assez intenses pour que le cadre mobile ait une période d'oscillation propre d'une fraction de seconde ([1]). Il est alors dans de bonnes conditions pour suivre les variations usuelles de la plupart des expériences de courants alternatifs et pour enregistrer ces variations.

4. *Application à un fréquencemètre enregistreur.* — Une combinaison à peu près quelconque des circuits reliant au réseau un appareil galvanométrique sans ressort de rappel, pourra constituer un fréquencemètre, puisque la déviation de l'appareil dépend en général de la fréquence sans dépendre du voltage du réseau.

Les combinaisons les plus avantageuses seront celles qui, facilement réalisables, n'exigeront qu'une consommation de courant très réduite.

En employant des condensateurs, on peut arriver à une sensibilité considérable, mais les condensateurs n'ont pas toujours une constance très parfaite.

Le dispositif représenté schématiquement par la *fig.* 2, repose sur l'emploi d'une induction mutuelle.

Le réseau PP′ alimente en même temps deux circuits. Le premier contient l'électro-aimant (1) de l'appareil galvanométrique qui fonc-

---

([1]) Je laisserai de côté la question de l'amortissement. Avec certaines dispositions de circuits, l'amortissement peut devenir négatif. L'équilibre est alors instable; mais c'est une instabilité d'un genre particulier. Si l'on place le cadre près de sa position d'équilibre, il oscille d'abord lentement autour de cette position, et l'amplitude de ces oscillations va progressivement en croissant de plus en plus jusqu'à donner au cadre un mouvement désordonné qui force à interrompre l'expérience.

tionne ici comme une simple self-induction, et qui est en série avec une faible résistance (2). Le second circuit contient au contraire une forte résistance (3) et une petite induction mutuelle (4, 5). Le cadre du galvanomètre (6) est monté en série avec la résistance (2) et le secondaire (5) du transformateur sans fer qui constitue l'induction mutuelle (4, 5).

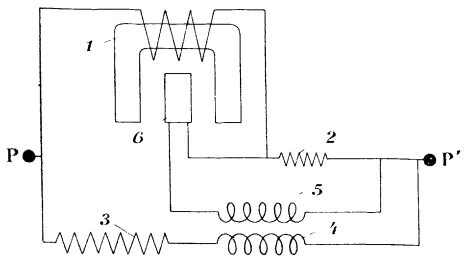

Fig. 2. — Schéma des circuits d'un fréquencemètre.

Il est aisé de voir que l'on oppose ainsi deux forces électromotrices (2) et (5), toutes deux sensiblement en phase avec le champ magnétique alternatif, mais dont l'une croît avec la fréquence, tandis que l'autre décroît.

Si donc on a établi l'équilibre pour la fréquence normale du courant toutes les variations de fréquence du réseau se traduisent par des déplacements proportionnels du cadre galvanométrique [1].

Avec une consommation modérée $\left(\text{environ } \frac{1}{2} \text{ ampère}\right)$, l'appareil est suffisamment robuste pour être employé directement comme enregistreur. Il a été adapté à l'enregistreur à plume à ordonnées rectilignes de M. Carpentier. C'est l'appareil qui fonctionne ici ce soir.

Voici (*fig.* 3) la réduction à l'échelle $\frac{1}{3}$ environ d'une feuille de journée de ce fréquencemètre enregistreur branché sur un réseau urbain dont la fréquence moyenne est de 42 périodes par seconde.

On y relève quelques particularités curieuses. Après un certain calme nocturne, la charge progressive au réveil se traduisant par

[1] L'indication de l'appareil dépend en général fort peu des variations de *forme* de la courbe de courant. Mais il est bien clair que ses indications seraient tout à fait faussées si le courant contenait des harmoniques plus importants que le courant de fréquence fondamentale.

un abaissement progressif de la fréquence suivi d'un brusque réglage ; les grandes variations accidentelles qui se répètent toute la journée ; les irrégularités exceptionnelles aux moments des changements de

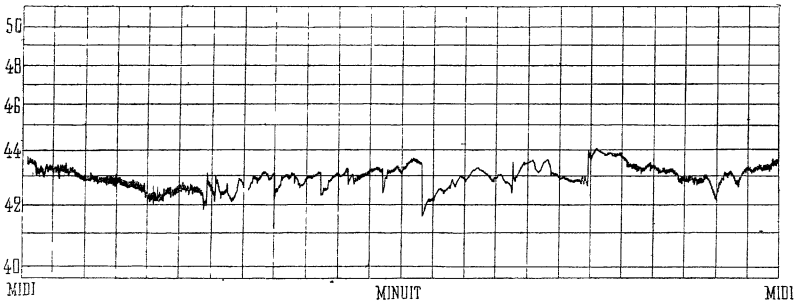

FIG. 3. — Feuille de journée du fréquencemètre enregistreur sur un réseau urbain à 42 périodes par seconde.

(Échelle environ $\frac{1}{3}$.) Limites des fréquences : 40 à 50 périodes par seconde.

machines génératrices, des gros allumages et des extinctions de l'éclairage, et l'épaississement du trait pendant les heures où l'alternateur est conduit par une machine dont tous les coups de piston produisent des variations périodiques de la fréquence.

Autres appareils de la même famille. — Si l'on actionne l'appareil galvanométrique avec un dispositif choisi de telle manière que la position d'équilibre se trouve être indépendante de la fréquence, la déviation du cadre qui déjà ne dépendait pas du voltage et qui ne dépend maintenant plus de la fréquence, ne sera donc plus fonction que des éléments inertes du circuit : résistances, capacités, coefficients d'induction.

Le même instrument devient alors un capacimètre, un inductomètre, un ohmmètre, selon l'élément du circuit que l'on considère comme variable.

C'est ainsi, par exemple, que l'on constitue un *ohmmètre*, en modifiant légèrement le dispositif de la *fig.* 2. On conserve le circuit dérivé contenant la résistance (3) et l'induction mutuelle (4, 5); mais le secondaire (5) sert à actionner un pont de Wheatstone comme le ferait une pile, le cadre galvanométrique occupant sa position habituelle dans la diagonale du pont opposée à celle qui contient la force électromotrice.

Cet *ohmmètre* est largement assez sensible pour permettre des mesures de résistances avec une précision dépassant le millième, et surtout il est assez robuste pour pouvoir enregistrer directement ses déplacements, c'est-à-dire les variations de résistance qui se produisent dans les branches du pont, en raison par exemple de leurs variations de température.

Cette disposition de circuit peut être utilisée, quand on dispose de courants alternatifs, pour enregistrer à distance des variations de température avec une bonne précision.

Je crois du reste pouvoir dire que les appareils galvanométriques à cadre mobile et à électro-aimants avec ou sans ressorts de rappel sont, à peu près en toutes circonstances, les instruments les plus sûrs et les plus sensibles pour toutes les mesures à faire en courants alternatifs.

II. — Relais et servo-moteurs électriques.

Le problème que je me suis proposé de résoudre est le suivant :

Etant donné un appareil indicateur très sensible, et par conséquent très délicat, tel qu'un galvanomètre, un sismographe, etc., il s'agit de construire un relais, ou plutôt un servo-moteur, dont l'organe *transmetteur* soit de faible masse et *entièrement libre*, afin qu'il puisse être aisément entraîné par l'appareil donné sans en altérer le mouvement. Cet organe transmetteur doit ensuite commander électriquement à distance un organe récepteur, au besoin avec amplification du mouvement, et l'organe *récepteur* doit être assez puissant pour inscrire, par exemple, directement ses déplacements sur le papier d'un enregistreur à plume, sans que le fonctionnement ou l'arrêt du récepteur puisse troubler en rien les mouvements de l'appareil très sensible sur lequel on a adapté l'organe transmetteur.

Ce problème, d'apparence paradoxale, se met aisément en équations et se résout sans difficulté, si l'on consent à prendre comme source d'énergie auxiliaire un réseau de distribution de courants alternatifs.

Une manière simple de réaliser l'expérience est représentée schématiquement par la *fig.* 4.

Le transmetteur (1) et le récepteur (2) (*fig.* 4) sont formés chacun par un cadre galvanométrique qui peut tourner librement, sans au-

cun ressort de rappel, dans le champ magnétique alternatif d'un électro (3) ou (4). Les deux cadres sont connectés borne à borne avec interposition d'une self-induction (5). Le cadre transmetteur est shunté à la fois par une résistance (6) et une capacité (7) montées en parallèle. Cette dernière capacité, qui est seule indispensable, est

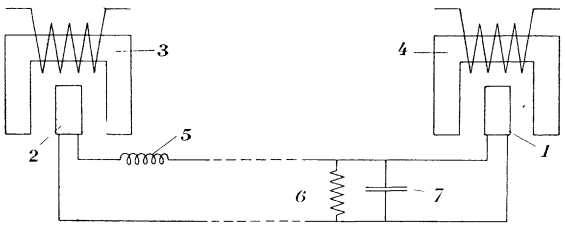

Fig. 4.

réglée de manière que le circuit bifurqué contenant le cadre transmetteur soit, pour toute force électromotrice créée dans ce cadre, équivalent à un circuit dépourvu de toute self-induction et de toute capacité. Le circuit du cadre récepteur possède au contraire de la self-induction.

On établit enfin une certaine différence de phase entre les champs magnétiques du récepteur et du transmetteur. Le champ du transmetteur est mis en retard d'une quantité juste égale au retard que présenterait un courant traversant le cadre du transmetteur par rapport à une force électromotrice qui lui donnerait naissance et qui aurait été créée dans le cadre récepteur. Les raisons d'être de ces conditions deviendraient plus claires en posant les équations du problème; mais on comprendra sans doute encore mieux leur rôle en examinant maintenant comment fonctionne l'appareil.

Les cadres transmetteur et récepteur se trouvant d'abord dans la position où ils ne sont traversés par aucun flux, faisons tourner le transmetteur d'un angle donné à partir de cette position initiale. Il s'y développe un courant induit; mais comme le circuit du cadre est par hypothèse sans self ni capacité, ce courant est en phase avec la force électromotrice qui le produit, c'est-à-dire en quadrature avec le champ. Le cadre ne sera donc soumis à aucun couple dû à ce courant, puisque le couple qui agit en général sur le cadre mobile a pour valeur :

$$SHI \cos \varphi,$$

et que le cos φ de la différence de phase entre le champ H et le courant I est ici nul.

Le cadre mobile peut donc tourner librement, sans dépense de travail, bien que dans sa position actuelle, il forme le secondaire d'un transformateur et qu'il soit ainsi capable de transmettre au récepteur une puissance qui peut être importante.

Une partie du courant induit dans le cadre du transmetteur se dérive, en effet, vers le cadre récepteur où la self-induction fait qu'il arrive en retard de phase par rapport à la force électromotrice d'induction qui l'a produit. A ce retard vient s'ajouter le retard établi à dessein entre les phases des deux électro-aimants, et il en résulte que le courant dans le cadre récepteur, ne se trouvant pas en quadrature avec le champ, ce cadre est soumis à un couple, et il commence à tourner : *le récepteur est donc bien commandé par le transmetteur.*

Mais cette rotation du récepteur l'a déplacé dans son champ magnétique ; il est alors traversé par un flux alternatif et se trouve le siège d'une force électromotrice qui modifie le courant dans ce même cadre. On verrait sans peine que la phase du courant se rapproche de la quadrature au fur et à mesure que le cadre tourne. La position d'équilibre est atteinte lorsque cette quadrature est réalisée, et l'angle dont a tourné le cadre récepteur est alors proportionnel à la rotation initiale du transmetteur.

Si l'on écartait le cadre récepteur de cette position d'équilibre, le courant cesserait d'y être en quadrature avec le champ, il serait en retard à cause de la self-induction ; et l'action du champ sur ce courant ramènerait le cadre vers sa position d'équilibre, comme pourrait le faire un ressort élastique : c'est ce que nous avons vu plus haut (p. 267).

Il reste à montrer qu'il n'y a aucun effet mécanique produit sur le cadre du transmetteur par la force électromotrice induite dans le cadre du récepteur quand celui-ci s'est déplacé, soit qu'il ait atteint sa position d'équilibre, soit que, pour une raison quelconque, il puisse encore en être quelque peu éloigné. Cela tient à ce que la différence de phase entre les champs magnétiques des deux électros a précisément été choisie de telle sorte que le courant venant du récepteur arrive dans le cadre transmetteur exactement en quadrature avec le champ. L'action mécanique sur le cadre transmetteur est donc exactement nulle, et ce cadre transmetteur est bien resté parfaitement libre sans être soumis à aucune réaction de la part du récepteur.

Le transmetteur commande énergiquement le récepteur, mais il n'est absolument pas commandé par lui.

Toutes ces considérations théoriques ont été confirmées par l'expérience. Les dispositifs qui viennent d'être décrits m'ont permis, par exemple, avec l'aimable collaboration de M. Carpentier, de transmettre à distance à un enregistreur à plume les indications d'un galvanomètre très sensible dont ni la période d'oscillation (10 secondes) ni la liberté de mouvements ne se sont trouvées modifiées par l'adjonction des circuits de transmission.

Des dispositifs de ce genre dans lesquels une sorte de transformateur à couplage variable sert de relais ou de servo-moteur sans réaction semblent devoir fournir, pour plusieurs autres problèmes intéressants, une solution à laquelle j'espère pouvoir apporter quelque contribution.