



LA
RÉGULATION AUTOMATIQUE
DES
FOURS ÉLECTRIQUES

PAR

MAURICE DÉRIBÉRÉ

Ingénieur des Industries électro-mécaniques (E. B. P.)
Directeur d'usine électrochimique et électrométallurgique.

PRÉFACE DE

ALBERT LEVASSEUR

Professeur à l'École Supérieure de Fonderie.
Maître de Conférences à l'École Supérieure d'Électricité.
Ancien membre du Conseil supérieur de l'Enseignement technique.

PARIS



92, RUE BONAPARTE (VI)

1938



Tous droits réservés.
Copyright 1938 by Dunod.

PRÉFACE

Parmi tous les progrès réalisés depuis quelques années en matière de fours électriques, il convient certainement de citer au premier rang la mise au point et l'emploi généralisé des dispositifs de régulation automatique.

S'agit-il de fours à résistors, destinés par exemple aux traitements thermiques? Les régulateurs pyrométriques assurent la constance exacte des températures et, par suite, l'homogénéité rigoureuse des fabrications; sans l'électrothermie de précision, la métallurgie de précision ne serait pas. S'agit-il de fours à arc? Les régulateurs d'électrodes maintiennent invariables, selon la volonté de l'opérateur, le courant, la puissance ou d'autres grandeurs et libèrent la main-d'œuvre d'un travail fastidieux; les prix de revient sont abaissés, les produits trouvent des débouchés. La protection du matériel est, elle aussi, fort appréciable: moins de résistors mis hors d'usage, moins de transformateurs abîmés, moins d'électrodes détériorées. Quant aux fâcheuses perturbations produites sur les réseaux par le fonctionnement de certains fours, elles sont largement atténuées.

Il n'est pas surprenant qu'avec tant d'avantages, la régulation automatique se répande partout rapidement. Mais bien souvent, les industriels sont embarrassés lorsqu'il leur faut comparer les mérites respectifs des régulateurs qui leur sont offerts et choisir rationnellement le système qui convient à tel ou tel cas. Aucun traité ne leur apportait jusqu'à présent une documentation d'ensemble sur cet important sujet.

C'est cette lacune que vient combler l'ouvrage que notre



ancien élève, M. Maurice Dérivé, nous demande de présenter au public. Ingénieur expérimenté, muni d'une longue pratique de l'électrothermie, directeur, actuellement, d'un groupe de deux usines, auteur de travaux scientifiques justement réputés, M. Dérivé était mieux qualifié que personne pour écrire ce livre. Celui-ci rendra de très précieux services aux usagers, aux installateurs et aux constructeurs de fours électriques. Il en rendra, peut-être, de plus grands encore à certains fabricants de régulateurs automatiques.

Albert LEVASSEUR.

LA RÉGULATION AUTOMATIQUE DES FOURS ÉLECTRIQUES

CHAPITRE PREMIER

LE PROBLÈME DE LA RÉGULATION

Un four électrique est, essentiellement, un appareil recevant de l'énergie sous la forme d'un courant électrique et la restituant sous forme de chaleur utile dans une enceinte de travail. C'est donc un transformateur d'énergie dans lequel la transformation se trouve réalisée : soit par l'effet Joule classique, directement (fours à résistance); soit par le même effet, mais indirectement (fours à induction ou l'énergie électrique est transmise par induction dans la résistance où se produit finalement l'effet Joule); soit, enfin, par les propriétés de l'arc électrique.

On concevra donc aisément qu'il résulte d'une telle définition complexe de multiples appareils différents dans leur principe, puis dans leurs détails, et, en fait, chaque application particulière trouve aujourd'hui dans cette variété celui qui convient le mieux, ce qui contribue fortement au développement marqué du four électrique. Parmi les données générales de ces appareils, l'une, qui englobe tous les types de fours, est particulièrement à retenir et se trouve d'ailleurs parfaitement à l'ordre du jour : c'est la régulation.

Par régulation, on n'entendra pas seulement un réglage à température constante, mais bien un réglage de la température, de l'allure du four, de la marche en un mot, celle-ci pouvant être non pas constante, mais suivre un programme bien déter-

miné. Par régulation donc il faut comprendre maîtrise totale et automatique du fonctionnement et du travail du four, et l'on comprendra dès lors l'importance primordiale du problème.

Ainsi, dans un four de traitement thermique ou de cuisson, il faudra se tenir le plus souvent à une température bien déterminée; dans un four de fusion, il sera indispensable de se maintenir entre la température de fusion et celle d'ébullition pour obtenir un travail normal sans perte par volatilisation; dans les fabrications avec réactions chimiques, celles-ci demanderont une température bien définie; dans d'autres cas, au contraire, une température bien déterminée en chaque point, mais variant au cours des phases du travail, peut être nécessaire, et c'est le cas de certains traitements thermiques et de certaines métallurgies que la régulation « à programme » a grandement facilités; dans les fours à arc, enfin, un régime irrégulier amène un mauvais rendement, une usure prématurée du matériel et des électrodes et une qualité mauvaise et irrégulière du produit fabriqué.

Le réglage des fours par manœuvre à la main est lent, soumis à un facteur essentiellement variable et incertain, à une conscience et à un esprit faillibles et, même lorsqu'il est possible, un intérêt économique certain est généralement assuré par la réalisation de l'automatisme. Un facteur important est ici l'indication du cas particulier envisagé avec ses données; c'est ainsi que de nombreuses fabrications spéciales ou des traitements thermiques précis nécessitent un réglage automatique, car le réglage à mains par un ouvrier, même très attentif et très vif, ne pourrait assurer la constance, sans oscillation, qui est alors indispensable.

En ne considérant les avantages de l'automatisme dans la régulation des fours électriques que dans le cadre général, nous aurons :

1° Amélioration de la fabrication. — Il apparaît comme très naturel qu'une grande régularité de marche assure l'homogénéité et la qualité du produit fabriqué. Dans les fours de traitement thermique, d'émaillage, de fusion de métaux volatils ou d'alliages à éléments volatils, on conçoit que la



régulation assurera une amélioration du résultat. Si nous précisons que des fours à résistances, par exemple, pourront être réglés, vers 1.000 degrés, à plus ou moins 2 degrés centigrades près, on voit que l'homogénéité pourra être très grande et les rebuts fortement diminués.

De même, dans un four à arc la régulation permettra d'éviter les à-coups, les carburations par plongement brusque des électrodes, les modifications parasitaires dans l'allure des arcs....

2° Économie de main-d'œuvre. — La suppression d'une surveillance humaine, d'ailleurs plus faillible qu'un mécanisme bien entretenu, se manifeste déjà pour les fours à résistance, mais elle se trouve encore plus évidente dans le cas des fours à arcs où un « chargeur » est constamment occupé à la manœuvre des électrodes. Une idée trop généralement répandue consiste à croire que l'intérêt de la régulation automatique n'est certain que pour les gros fours et que les petites unités peuvent aisément s'en passer. Or cette opinion venant de ce que certains petits fours, anciens, sont encore réglés à la main, tandis que tous les gros fours, modernes, sont automatiques, est erronée. Le temps passé par l'ouvrier à régler l'électrode est en effet le même quelle que soit la capacité, mais la dépense qui en résulte doit être amortie sur une production bien moindre et, par suite, la dépense par tonne de produit fabriqué est d'autant plus grande.

Même et surtout sur les petits fours, donc, le réglage automatique se trouve parfaitement indiqué.

3° Protection du matériel. — La régulation automatique constitue une protection du matériel, car les résistances, les transformateurs, etc., risquent moins d'être endommagés par des surintensités. En outre, les régulateurs sont des organes plus sûrs que la main de l'homme, et non susceptibles de défaillance dans le travail; ils suppriment donc les risques pouvant provenir d'une faute du personnel dans le réglage.

Sur les fours à arcs, la marche plus régulière permet de notables économies d'électrodes, et également un meilleur rendement du lit de fusion.

4° Diminution des perturbations produites sur le réseau.
— Cet avantage est particulièrement apprécié dans le cas des fours à arc qui causent de fort à-coups sur le réseau.

On conçoit donc que la régulation automatique se soit très largement répandue dans la pratique industrielle, puisque le prix de revient de l'installation sera rapidement amorti dans le cours de la marche du four.

Selon le genre d'appareil à régler et les conditions locales, on aura le choix, pour la régulation automatique, entre de nombreux types qui peuvent être classés en trois groupes ou systèmes :

La régulation pyrométrique;

La régulation par déplacement des électrodes;

La régulation par variation de tension.

La régulation pyrométrique s'applique aux fours à résistance et à induction. A ces derniers, au surplus, peuvent être adjoints des dispositifs auto-régulateurs dont certaines réalisations, fort ingénieuses, seront examinées. Enfin les fours à arcs seront réglés par déplacement des électrodes ou par variation de la tension appliquée (1).

(1) Sur la régulation en général, voir :

A. LEVASSEUR : Équations de régulation, *Conférences de l'Ecole supérieure d'Electricité*. — Les progrès récents de l'emploi du four électrique en aciérie, *Bull. Soc. fr. des Electriciens*, août 1930. — Les tendances actuelles dans la construction et l'emploi des fours électriques de fonderie, *Bull. Ass. Tech. de Fonderie*, t. III, décembre 1929. — Les fours électriques et leurs emplois industriels, *Cours-Conférences du Centre de documentation chimique*, ds 29, 1935. — La régulation automatique des fours électriques; *Arts et Métiers*, n° 116, mai 1930. — M. MATHIEU : Systèmes de réglage des fours électriques à résistance et à arc, *Semaine d'octobre de la Soc. fr. des Electriciens et Bull.*, septembre 1927, *Journ. Four Elect.*, 15 décembre 1927. — A. CLERGEOT : La régulation automatique des fours électriques, *Electricité*, n° 17, février 1936. — La régulation automatique des fours à arc, *Electricité*, n° 21, juin 1936. — M. DÉRIBÉRÉ : La régulation automatique des fours électriques, *La Technique Moderne*, t. XXVIII, n°s 10 et 13, 15 mai et 30 juin 1936. — La régulation des fours électriques, *Revue Générale d'Electricité*, t. XL n° 13, 26 septembre 1936.

CHAPITRE II

RÉGULATION PYROMÉTRIQUE ET THERMOMÉTRIQUE

Les régulateurs pyrométriques comportent deux organes essentiels : le premier est un détecteur de température (thermomètre, pyromètre à dilatation, couple thermo-électrique, lampe à filament de fer dans l'hydrogène)... C'est simplement, par suite, un appareil continu de mesure. Le second organe est le régulateur proprement dit constitué par un relais sur lequel agit le détecteur et qui ramène la température à la valeur désirée en diminuant ou en augmentant l'énergie fournie, selon que cette température est trop basse ou trop élevée.

L'action du système de réglage devant intervenir sur la fourniture d'énergie primaire pourra porter sur la puissance ou, plus simplement et plus généralement, sur un de ses termes : tension ou intensité. La modalité la plus simple et qui est parfois utilisée consistera à régler simplement la puissance fournie par l'action de relais wattmétriques ou de relais ampéremétriques si la tension d'alimentation est constante. Toutefois une telle réalisation impose une enceinte et un milieu de travail rigoureusement constants, ce qui est très rarement réalisé. Sauf quelques cas particuliers, elle ne convient pas, et c'est l'énergie de l'enceinte utile, c'est-à-dire l'énergie à régler, qui doit agir sur le système pour abaisser ou augmenter l'apport d'énergie primaire. En autres termes, l'énergie secondaire est à la fois réglable et régulatrice.

La régulation par variation de la tension d'alimentation sera réalisée, lorsqu'on dispose du groupe générateur d'alimentation du four, en agissant sur la vitesse de celui-ci ou sur l'excitation

de la génératrice, ce dernier mode étant très progressif, souple et précis. Si l'énergie est empruntée à un réseau de distribution, cette régulation s'effectuera par un régulateur à induction qui donne un réglage très sensible et progressif, mais qui constitue un appareil délicat et coûteux, ou par le moyen d'une bobine d'inductance variable (par entrefer à commande par vis ou par noyau plongeur mobile et de position réglable.)

La régulation par variation de l'intensité du courant ou de la puissance s'obtiendra par les dispositifs usuels dits « tout ou rien », par ceux « par impulsions » ou « continus »... que nous allons examiner (1) :

1° Réglage par « tout ou rien ». — Ce procédé consiste à faire alterner, par le moyen d'un relais ou d'un interrupteur, et à une cadence déterminée, des périodes de chauffage maximum et de chauffage nul ou réduit. La régulation supprime, selon les besoins, le nombre voulu des demi-périodes correspondant à la variation désirée. Ce réglage n'est à recommander que dans certains cas particuliers, par exemple lorsque le régulateur agit sur une vanne électromagnétique ou sur le contacteur d'un circuit de chauffage. Dans ce dernier cas, d'ailleurs, il est toujours possible de n'agir que sur une partie des résistances chauffantes en laissant en circuit la partie correspondant à la compensation des pertes thermiques à vide.

2° Réglage par impulsions. — Dans ce mode de régulation, l'appareil provoque, à intervalles de temps réguliers, des émissions de courant actionnant l'un ou l'autre des deux relais correspondant l'un à la zone « trop chaude » et l'autre à la zone « trop froide » par rapport à la température à maintenir.

Une variante de ce procédé est le réglage par impulsions à plusieurs degrés qui consiste à remplacer les deux contacts du réglage simple par quatre contacts, par exemple disposés

(1) M. DÉRIBÉRÉ : La régulation des fours électriques, *Rev. Gén. Electricité*, t. XL, n° 13, p. 400, 26 septembre 1936. — Voir aussi M. DEVAUX : De la mesure des températures et de leur régulation, *Electricité*, n° 7, p. 184, avril 1935.

deux par deux de part et d'autre de la position correspondant à la température de base.

Dans le réglage par impulsions, la régulation se fait au moyen d'un moteur universel dont le fonctionnement est déterminé par des relais ou par celui d'un servomoteur commandant directement des vannes, papillons ou clapets.

3° Réglage proportionnel. — C'est un réglage à impulsions tel que la durée des émissions de courant soit proportionnelle

à l'écart entre la température de base choisie et la température existant au moment de l'action régulatrice. Un tel réglage peut être « dirigé » pour tenir compte du sens de la variation de la température et pour agir différemment, selon que celle-ci tend à se rapprocher ou à s'éloigner de la température de base. Le principe est alors le suivant. De A en B (fig. 1), le milieu étant à la température de base T_0 , les organes réglés restent au repos,

de A' en B'. De B en C, le milieu s'échauffe et les organes réglés sont actionnés dans le sens de la diminution du chauffage, soit suivant B'C'; de C en D, le milieu continue à s'échauffer, mais moins rapidement, et les organes réglés sont actionnés de C' en D' en continuant à diminuer le chauffage. A partir de D, la température du milieu décroît et se rapproche de T_0 qu'elle atteint en E. Pendant toute cette période, de D' en E', les organes réglés ne sont pas actionnés; la température continue à diminuer, et de E à F sa valeur, devenue inférieure à T_0 , s'écarte de cette base jusqu'en F. Alors de E' en F' les organes réglés sont actionnés dans le sens correspondant à l'augmentation du chauffage. De F à G, la température du milieu remonte vers T_0 et, pendant cette période, de F' en G', les organes de réglage ne sont pas actionnés.

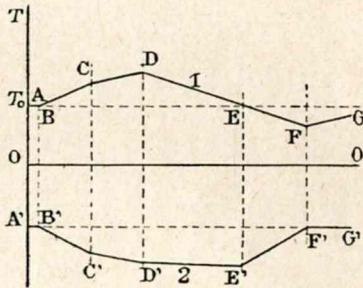


FIG. 1. — Courbes montrant la variation de la température (courbe 1) dans un four en fonction de la position de l'organe de réglage (courbe 2).

Il importe de remarquer que, si nous partions d'un milieu dont la température soit, au moment du départ, en dehors des limites de réglage que l'on s'est fixées par rapport à la température de base, le régulateur ne fonctionnerait pas automatiquement et ne commencerait à fonctionner que lorsqu'on aurait fait le nécessaire, par des manœuvres manuelles convenables, pour amener la température du milieu à régler à une valeur comprise entre les limites de réglage. Il y a donc lieu de prévoir dans un tel appareillage des dispositifs tels que l'on puisse mettre momentanément hors service les dispositifs de « direction » en faisant fonctionner l'appareil comme un régulateur non dirigé.

4° Réglage continu. — Le réglage continu est une modification du réglage par impulsions dans lequel on fait tendre vers zéro la période des impulsions. Un tel réglage peut être « dirigé ».

5° Réglage « à programme ». — Certaines applications qui nécessitent une température bien déterminée en chaque point, mais variant au cours des phases du travail (traitements thermiques, industries de produits chimiques, métallurgie de l'aluminium, par exemple) ont posé un problème complexe de régulation qui a été très ingénieusement résolu par les régulateurs dits « à programme » qui obligent le milieu à suivre un programme d'échauffement ou de refroidissement fixé à l'avance. Pour cela, on adjoint aux régulateurs des mouvements d'horlogerie ou un moteur synchrone réglable et les butées marquant le maximum du réglage ne sont plus fixes, mais disposées sur des cames mues par ces mouvements.

6° Réglages multiples. — Il est enfin possible de réaliser des régulations complexes où plusieurs modes de régulation se trouvent combinés, ou encore des régulateurs multiples qui permettent d'assurer plusieurs réglages, au moyen d'un seul appareil, soit à une même température, soit à des températures différentes. Une association fréquente dans la pratique consiste aussi à adjoindre au régulateur un dispositif indicateur ou enregistreur.

I. — Régulateurs thermométriques.

Le thermomètre est un appareil détecteur de température fort simple, mais il apparaît long-temps comme impossible de réaliser sa liaison avec le relais régulateur.

Or la chose apparaît fort aisée aujourd'hui et nous la donnerons en exemple des possibilités sans cesse nouvelles que le constructeur peut acquérir (fig. 2).

Une enceinte F à régler est contrôlée par un thermomètre T. Ce thermomètre s'interpose entre un faisceau lumineux issu d'une source S et un jeu de deux cellules photo-électriques C_1 et C_2 . Si la température est trop élevée, le liquide qui est fortement coloré monte dans la colonne thermométrique et intercepte le faisceau qui touche C_1 , les cellules étant réalisées telles qu'elles ne réagissent pas à la lumière de la couleur du liquide thermométrique. La cellule C_1 n'étant plus activée, le courant qu'elle fournit est coupé et cette rupture agit sur un relais pour réduire l'énergie primaire admise.

Si, au contraire, la colonne thermométrique descend au-dessous du faisceau frappant la cellule inférieure C_2 , le relais R_2 se trouve mis en action pour augmenter le courant.

Un tel dispositif peut être réalisé d'une façon très simple, et particulièrement dans les modes « tout ou rien » ou par impulsion.

Il ne saurait, bien entendu, convenir à de hautes températures, mais il peut parfaitement s'adapter à certains fours de traitement thermiques, à des fours pour boulangerie ou industries alimentaires, à des étuves électriques pour câbles isolés par exemple,... etc.

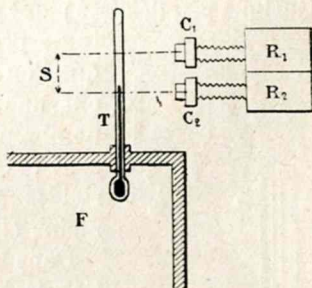


FIG. 2. — Régulation thermométrique photo-électrique.

II. — Régulateurs pyrométriques à dilatation.

Le pyromètre à dilatation a été utilisé il y a plus d'un siècle. Quelque peu délaissé parce que les traités classiques lui déniaient toute précision, il a été repris depuis parce que l'on a constaté que si nombre de solides ont une dilatation irréversible et douée de nombreuses anomalies, certains, par contre, sont assez régulièrement dilatables et assez rigides à chaud pour convenir en ce domaine (1).

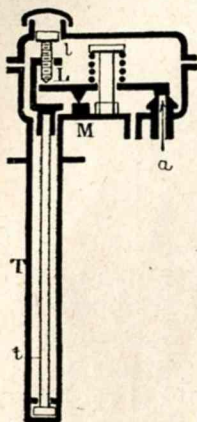


Fig. 3. — Croquis du régulateur pyrométrique à dilatation « Arca ».

Dans la régulation, le pyromètre à dilatation est un détecteur de choix, parce que sa variation avec la température à régler étant mécanique, elle peut aisément être amplifiée par un mécanisme convenable et être transmise ainsi aux organes régulateurs.

La tige dilatable est faite d'une substance convenable dont le choix est très important : invar, pyros, métal Monel, silice fondue, etc.

C'est sur le principe du pyromètre à dilatation qu'ont été réalisés les régulateurs Arca et ceux des Aciéries d'Imphy (système

P. Chevenard) que nous allons donner comme exemples.

Le régulateur ARCA (fig. 3) est un relais thermique et hydraulique commandant l'interrupteur du four et fonctionnant, par suite, selon le principe du « tout ou rien ». Une canne pyrométrique T qui contient l'élément dilatable t plonge dans l'enceinte à régler du four et doit être établie, bien entendu, de façon à supporter la température et les actions chimiques du milieu à régler. La canne T sera, par exemple, en nickel ou en métal Monel, et la tige t en invar, en silice fondue ou en porcelaine. La différence de longueur, après dilatation, de ces deux tiges

(1) P. CHEVENARD : Pyromètres industriels à dilatation, *Revue de Métallurgie*, p. 442, 1932.

se trouvera amplifiée par les jeux de levier *Ll* qui transmettent ce mouvement à un tampon obturant plus ou moins un ajustage *a*, et la variation de pression ainsi réalisée pour la manœuvre d'un interrupteur branché en série sur le circuit fournissant l'énergie primaire au four.

Le régulateur réalisé par les Acières d'Imphy comporte une canne pyrométrique (fig. 4) constituée par un élément étalon de pyros (1) *E* enfermé dans un tube de silice fondue *T*, transmet par une tige de silice *t* terminée par un coulisseau *C* la dilatation de son étalon à la pointe du levier *L* d'un pyromètre à dilatation. Ce levier *L* rappelé par un ressort *r* se termine par une aiguille *A* dont l'extrémité commande le bras α du levier horizontal du système régulateur muni d'un contre poids. Ce levier mobile autour de *O* est muni de deux contacts à mercure β_1 et β_2 qui commandent, par l'intermédiaire des relais ρ_1 et ρ_2 , les circuits des portions r_1 et r_2 du rhéostat *R* inséré dans le circuit du four.

Si la température devient trop élevée, l'aiguille *A* actionne le levier *X* et le contact β_1 s'établit. Le relais ρ_1 fonctionne et la résistance r_1 s'ajoute à celle du rhéostat *R*, la température s'abaisse et tend vers une nouvelle valeur inférieure à celle désirée, mais qui est enrayée, car l'aiguille *A* libérant le levier, le contact β_1 s'ouvre et met r_1 en court-circuit. La résistance r_2 qui entre de même en action quand le contact β_2 se ferme permet un réglage plus fin. Un tel régulateur peut être utilisé pour des températures allant jusqu'à 1.000 degrés centigrades (et même 1.100 degrés centigrades en service intermittent) et permet un réglage à ces températures de ± 2 degrés centigrades, ce qui en fait un précieux auxiliaire des fours de laboratoire demandant une grande précision de réglage.

Cet appareil pyrométrique a été réalisé par les mêmes Acières d'Imphy d'une façon encore plus simple. Or ici la sim-

(1) Le pyros est un alliage de fer, nickel, chrome, tungstène et manganèse, sans point de transformation et à coefficient de dilatation pratiquement constant entre 200 et 1.000 degrés centigrades. — Voir P. CHEVENARD, : Application des alliages spéciaux à la pyrométrie, *Chaleur et Industrie*, juillet 1923.

plicité joue un rôle primordial et l'expérience a montré que

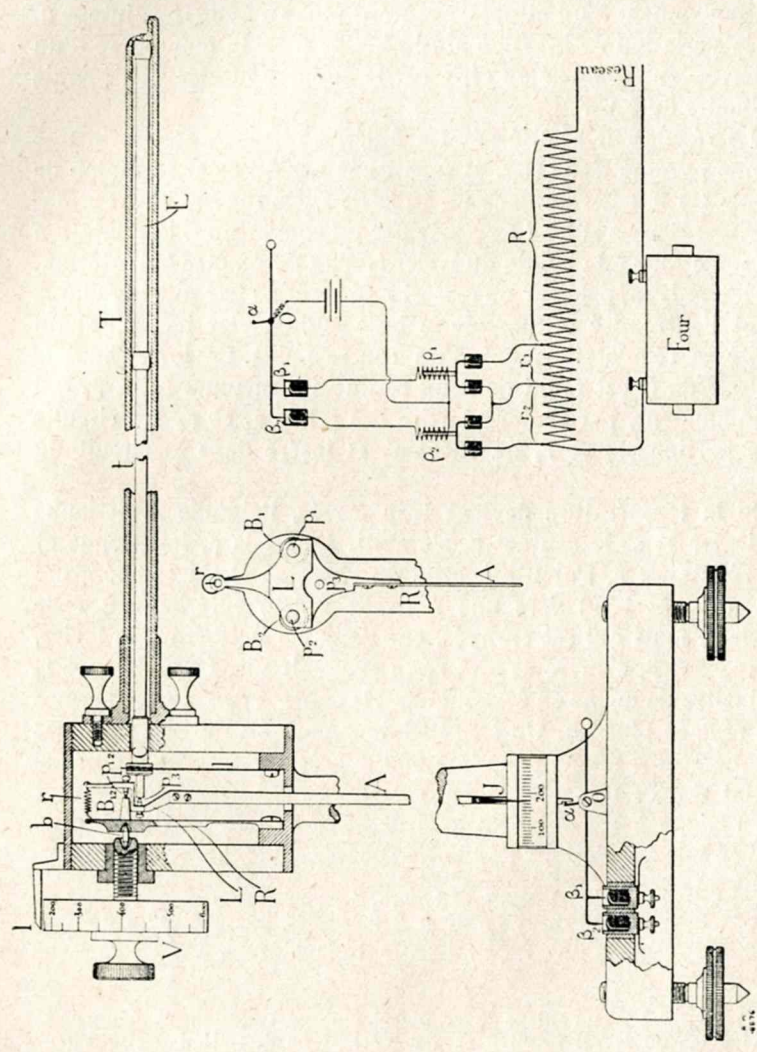


Fig. 4. — Croquis et schéma des connexions du régulateur pyrométrique à dilatation des Acieries d'Imphy.

les mécanismes compliqués étaient généralement peu fidèles.

Dans le nouveau dispositif, un bras B_2 (fig. 5) convenablement isolé, mobile autour d'un axe situé dans le prolongement de celui de l'aiguille et portant deux lames d'argent flexibles, est muni d'un index I_2 que l'on amène au point correspondant à la température minimum voulue.

Si cette température est atteinte, l'aiguille vient toucher la lamelle L_2 par une de ses pointes p ; un circuit se ferme et le

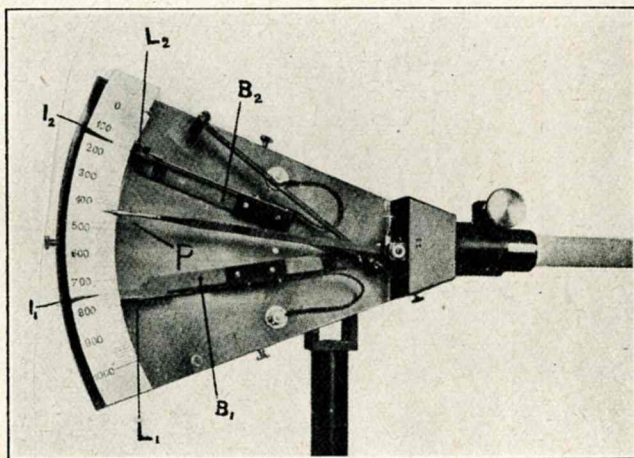


FIG. 5. — Vue du mécanisme avertisseur-régulateur du pyromètre type B, des Aciéries d'Imphy.

relais entre en action pour modifier le courant primaire admis. De même, le repère I_1 et la lamelle L_1 assurent le réglage à la température maximum.

La figure 6 indique le schéma de montage d'un tel appareil pour la régulation d'un four électrique de laboratoire par « tout ou rien », mais il est également possible d'insérer dans le circuit un tronçon supplémentaire de rhéostat de façon que le courant ne soit jamais interrompu totalement.

Supposons l'index I_2 du pyromètre en regard de 800 degrés : lorsque l'aiguille A_i indique cette température, une de ses pointes touche le bras B_2 . A ce moment, un courant est lancé

dans la bobine du relais, celui-ci bascule, la goutte de mercure de l'interrupteur se divise et le courant s'interrompt. Le four se refroidit, mais dès que la pointe de l'aiguille a quitté le bras B_2 , le relais agit et lance de nouveau le courant : ainsi, la température visée se maintient constante à de faibles écarts près, écarts

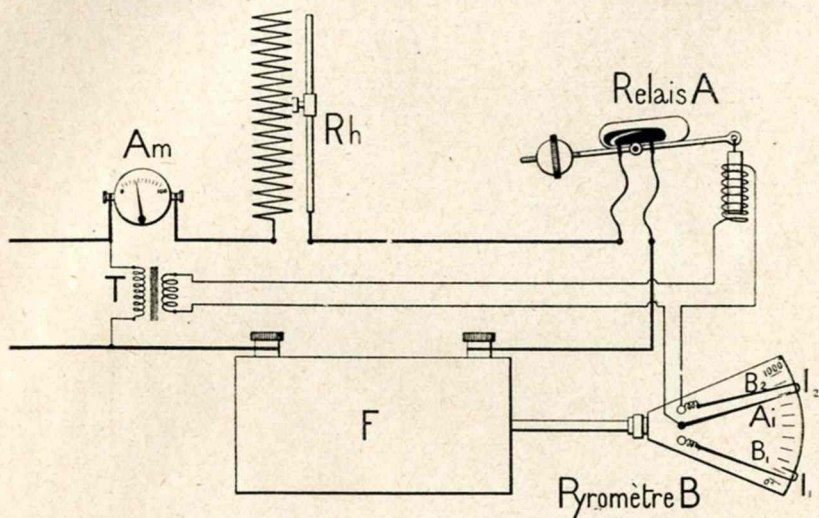


FIG. 6. — Schéma du montage du pyromètre régulateur type B, utilisé pour le réglage par « tout ou rien » de la température d'un four électrique de laboratoire. (Commentry-Fourchambault et Decazeville.)

Rh, rhéostat; — F, Four; — Am, Ampèremètre; — T, Transformateur auxiliaire donnant 8 volts au secondaire.

d'ailleurs amortis par l'inertie thermique des masses à chauffer.

Le pyromètre B des Acieries d'Imphy peut, au surplus, être enregistreur, le cadran étant remplacé par un tambour chronographe et l'aiguille étant munie d'une plume. Il peut aussi être encore reproducteur de cycles thermiques, c'est-à-dire « à programme ». A cet effet, le bras porte-contact, qui par sa position fixe maintient la température constante, est remplacé par un contact mobile dont le déplacement réalise la marche désirée de la température en fonction du temps. Ce résultat est obtenu



par l'emploi d'une mince feuille d'argent découpée selon la courbe à réaliser et fixée sur le tambour du chronographe.

Pour en bien faire saisir le principe, nous reproduisons la description d'une application particulière pour les essais de cémentation selon Mc Quaid et Ehn (1) :

L'industrie automobile américaine s'oriente, pour les pièces cémentées, vers l'emploi d'aciers à trempe sans traitement de régénération.

La trempe au sortir des caisses de cémentation a pour avantages évidents la simplicité et l'économie et elle donnerait, en outre, une meilleure résistance à l'usure, car elle maintient une plus forte proportion d'austénite non transformée que la trempe normale à température plus basse. Quoi qu'il en soit, seuls les aciers réfractaires au grossissement du grain sont admissibles pour ce traitement simplifié. D'où l'épreuve de recette instituée par Mc Quaid et Ehn (2) : un échantillon d'acier est cémenté dans des conditions bien déterminées, puis on mesure la grosseur des grains. Le cycle thermique admis comprend une chauffe en 1 h. 30 à 925 degrés, un séjour de huit heures à cette température, et un refroidissement tel que la chute de 925 à 625 degrés, s'effectue en trois heures.

Il fallait, pour réaliser automatiquement cette opération, créer une température uniforme, mais suivant une loi du temps fixée.

« L'uniformité est obtenue à 2 ou 3 degrés près par l'emploi d'un four à tube dont l'enroulement de chauffe est divisé en trois tronçons. Le tronçon central est shunté, ce qui renforce en valeur relative l'effet thermique des deux autres et compense le refroidissement aux extrémités du four. Quant à la *commande automatique de la chauffe et du refroidissement*, elle est réalisée par un *régulateur à cycle thermique imposé*.

« L'organe pyrométrique est un fil de pyros F_1F_2 (fig. 7), tendu à l'intérieur du four à tube, très près de la paroi. L'ex-

(1) P. CHEVENARD : Deux nouvelles applications du pyromètre à dilatation, *Le Génie Civil*, 2 novembre 1935.

(2) MC QU Aid et EHN : *Transactions Amer. Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, vol. 67, p. 341 à 391, 1922.

RÉGULATION DES FOURS ÉLECTRIQUES

trémité F_2 s'amarre à un collier fixé au tube de silice S, S_2 : l'extrémité F_1 attaque le petit bras d'un levier L , mobile autour

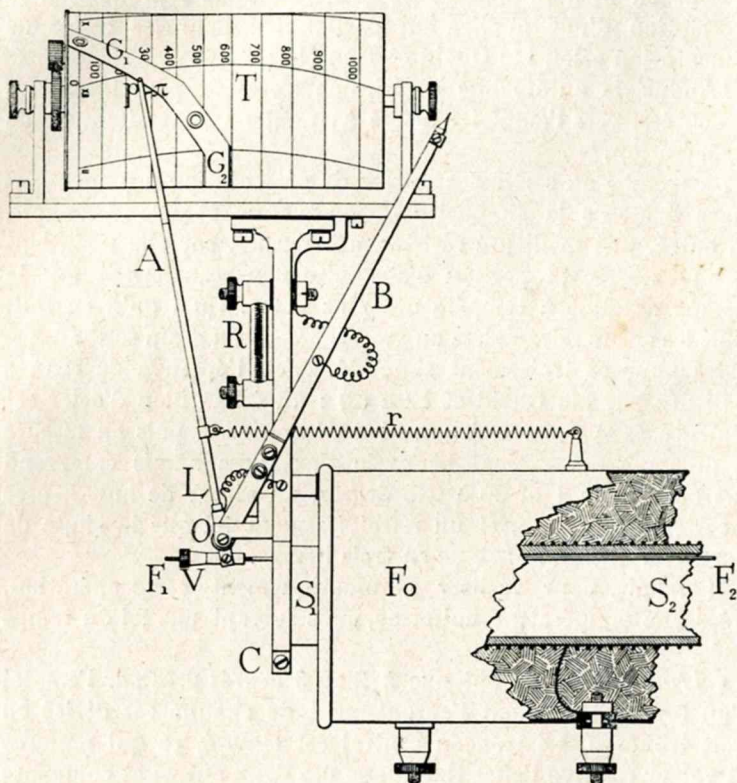


FIG. 7. — Coupe schématique du four à cycle thermique imposé, équipé pour l'épreuve des aciers de cémentation (essai Mc Quaid et Ehn). (Commentry-Fourchambault et Decazeville).

de l'axe O , et dont l'aiguille A forme le grand bras. Une pointe de platine p , qui termine l'aiguille A , vient au contact d'un gabarit G_1G_2 découpé dans une feuille mince d'argent suivant la courbe « température-temps » visée. Ce gabarit est agrafé par des œillets métalliques au papier enroulé sur le tambour de chronographe T ;

le bord de la feuille d'argent est légèrement relevé pour assurer un contact franc. Par les œillets, le gabarit est relié électriquement au tambour dont le support est isolé du collier C.

« La température est réglée par « tout ou rien » : quand elle atteint le degré prévu pour tout instant du cycle, la pointe p vient au contact du gabarit G_1G_2 , le relais entre en jeu et le

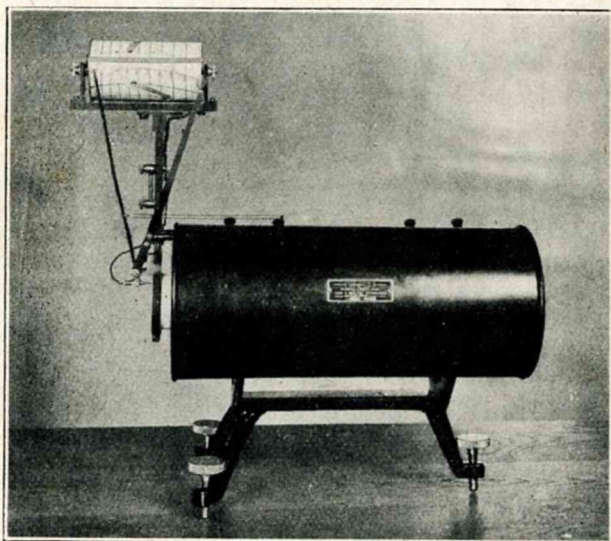


FIG. 8. — Vue du four à cycle thermique imposé (Commentry-Fourchambault et Decazeville).

courant de chauffage se trouve interrompu. Alors le four se refroidit, la pointe p s'éloigne du gabarit et le courant est aussitôt rétabli. Une résistance R étouffe l'étincelle de rupture ».

Le réglage « tout ou rien », rudimentaire par principe, donne ici de bons résultats grâce au fait que le fil F_1F_2 long, fin et tendu très près du tube de silice, ne présente aucune inertie et constitue un organe extrêmement sensible.

La finesse du réglage dépend au plus haut point de l'emplacement du pyromètre régulateur qui doit être placé à proximité

aussi immédiate que possible du circuit de chauffage. On évite

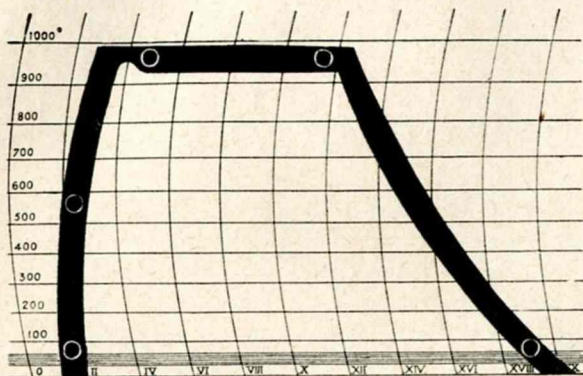


FIG. 9. — Gabarit « température temps » découpé dans une feuille d'argent. L'encoche de gauche est nécessitée par l'allure rapide du chauffage vis-à-vis du retard de la température prise par les échantillons.

ainsi les inerties qui se traduisent, dans le système « tout ou rien », par des oscillations.

Dans des cas particuliers, au contraire, ces oscillations pour-

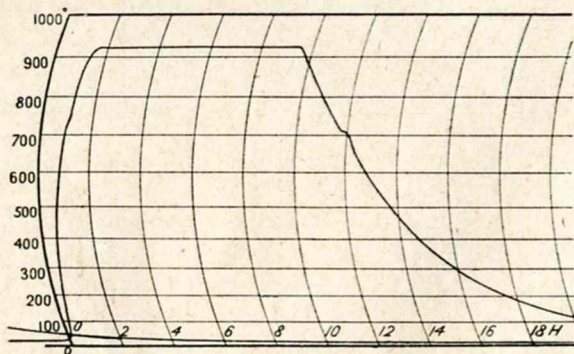


FIG. 10. — Courbe « Température temps » conforme au gabarit, suivie par les échantillons d'acier au cours de l'essai Mc Quaid et Ehn.

ront être entretenues, par exemple pour obtenir dans un traitement thermique certaines modifications structurales.

CHAPITRE III

RÉGULATION PYROMÉTRIQUE (suite)

RÉGULATION PYROGALVANOMÉTRIQUE ET PYROPOTENTIOMÉTRIQUE

III. — Régulateurs pyrogalvanométriques.

Le principe de ces appareils est le suivant (fig. 11). Une canne pyrométrique C est placée dans l'enceinte du four à régler et connectée à un galvanomètre sur le cadran duquel sont disposés

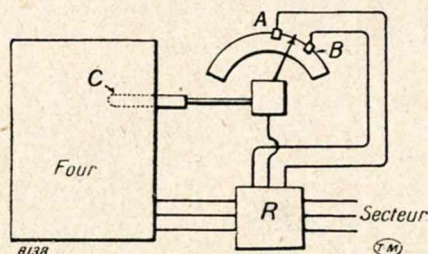


Fig. 11. — Schéma de principe d'un régulateur pyrogalvanométrique.

A B, Plots; — C, Canne pyrométrique; — R, Relais.

deux plots A et B dont la position, réglable à volonté, correspond aux températures-limites admises. En se déplaçant, l'aiguille du galvanomètre vient s'appuyer sur l'un ou l'autre de ces plots, et le contact ainsi établi ferme le circuit d'un relais R.

Le dispositif pyromètre-galvanomètre, qui est la base du procédé en question, implique un choix convenable de ces appa-

reils et, en particulier, du pyromètre. On utilise dans la pratique le pyromètre à résistance et le pyromètre à couple thermo-électrique. Le pyromètre à résistance comporte une résistance constituant l'élément sensible détecteur et plongeant dans l'enceinte à contrôler et à régler. Cette résistance est intercalée dans une branche d'un pont de Wheatstone alimenté par une source auxiliaire. A toute variation de température correspond une variation de la résistance et, par suite, une variation de courant dans le galvanomètre. Dans le pyromètre à couple thermo-électrique, le courant émis dans un galvanomètre de sensibilité appropriée est une fonction de la température. Le dispositif à résistance permet, contrairement au second, une lecture indépendante de la température et une grande précision; mais, par contre, il ne convient qu'entre les limites de température de 0 degré à 500 degrés centigrades, tandis que les dispositifs à couples thermo-électriques peuvent aller jusqu'à 1.100 degrés centigrades. Avec des lunettes à radiation totale et une cellule photo-électrique du système Fery, ils permettent même le réglage à des températures de 1.400 et 1.800 degrés centigrades. Ils devront comporter un dispositif de correction de la soudure froide et être montés sur des galvanomètres à grande résistance intérieure.

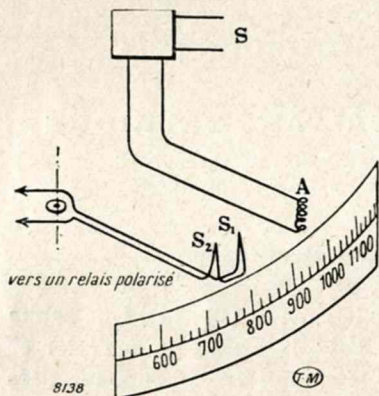


FIG. 12. — Schéma de la disposition adoptée dans le régulateur Cambridge.

A, Hélice de platine alimentée par S; — S, Source auxiliaire de courant; — S₁ et S₂, Soudures du couple thermoélectrique.

Ce principe étant très schématiquement exposé, nous allons l'illustrer par une courte description d'un appareil de ce genre : le régulateur Cambridge.

Une petite hélice de platine A (fig. 12), chauffée par un cou-

source auxiliaire. A toute variation de température correspond une variation de la résistance et, par suite, une variation de courant dans le galvanomètre. Dans le pyromètre à couple thermo-électrique, le courant émis dans un galvanomètre de sensibilité appropriée est une fonction de la température. Le dispositif à résistance permet, contrairement au second, une lecture indépendante de la température et une grande précision; mais, par contre, il ne convient qu'entre les limites de température de 0 degré à 500 degrés centigrades, tandis que les dispositifs à couples thermo-électriques peuvent aller jusqu'à 1.100 degrés centigrades. Avec des lunettes à radiation totale et une cellule photo-électrique du système Fery, ils permettent même le réglage à des températures de 1.400 et 1.800 degrés centigrades. Ils devront comporter un dispositif de correction de la soudure froide et être montés sur des galvanomètres à grande résistance intérieure.

rant auxiliaire, est disposée sur le cadran du galvanomètre, à l'endroit qui correspond à la température à maintenir constante dans l'enceinte du four. L'aiguille du galvanomètre porte elle-même un couple thermo-électrique différentiel dont les soudures S_1 et S_2 peuvent être chauffées par l'hélice de platine A, et ce courant polarisé actionne indirectement l'interruption du four.

La régulation s'effectue dès lors de deux façons :

1° L'hélice A n'étant pas placée entre les soudures S_1 et S_2 , si la température s'élève, S_1 s'approche de A, s'échauffe, et le relais s'actionne pour couper le circuit d'alimentation; c'est donc une régulation par « tout ou rien »;

2° L'hélice A étant placée entre les soudures S_1 et S_2 , si le cadre du relais polarisé qui commande les circuits de deux électro-aimants dévie dans un sens ou dans l'autre, selon que S_1 ou S_2 s'approche de A, il ferme par des contacts l'un ou l'autre des deux circuits et les électro-aimants attirent des cliquets qu'un moteur spécial anime d'un mouvement continu d'oscillation. Ces cliquets agissent sur une roue à double rochet qui tourne dans un sens ou dans l'autre, selon que S_1 ou S_2 s'est approché de A, et cette roue manœuvrant un rhéostat en série avec le four donne une régulation progressive.

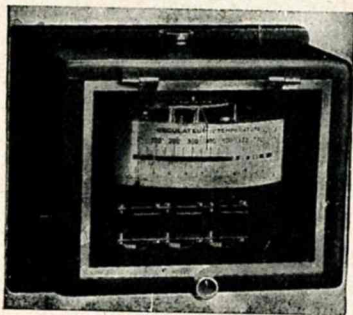


Fig. 14. — Pyromètre régulateur Chauvin-Arnoux. Type T2.

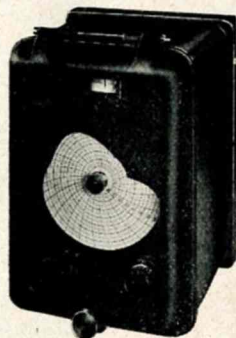


Fig. 13. — Régulateur à programme (Chauvin et Arnoux).

Pour réaliser par ce dispositif un réglage « avec programme », il suffira de faire déplacer l'hélice A au moyen d'un dispositif d'horlogerie et d'une came.

On peut aussi réaliser un réglage multiple avec un commutateur automatique et régler avec un même appareil plusieurs fours fonctionnant simultanément.

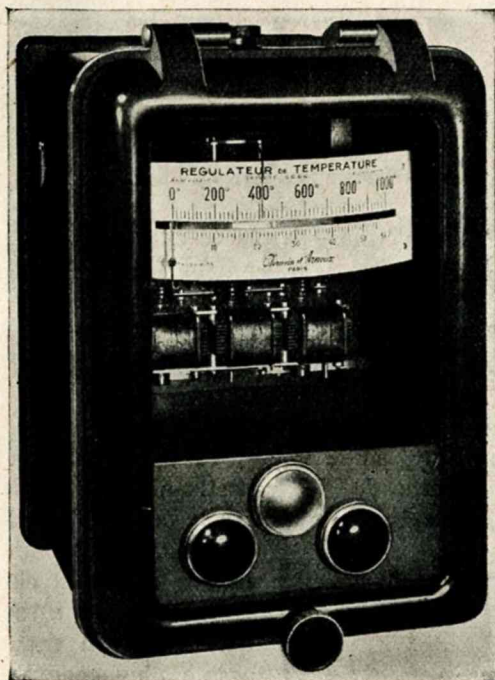


Fig. 15. — Pyromètre régulateur Chauvin et Arnoux type T32.
(Galvanométrique avec relais oscillants à grande course).

Enfin, pour certains réglages très précis, le galvanomètre sert d'appareil de zéro.

Pour les hautes températures, on pourra remplacer la canne pyrométrique par un pyromètre optique comme il a été dit plus haut.

IV. — Régulateurs pyropotentiométriques.

Le système potentiométrique permet d'éviter l'imperfection de principe du dispositif pyrogalvanométrique inhérent à la résistance du galvanomètre relativement à celle des conducteurs, qui le relie au couple thermoélectrique, et aux mauvais contacts possibles. On l'utilisera donc dans les réglages très précis.

Le principe d'un régulateur pyropotentiométrique est le

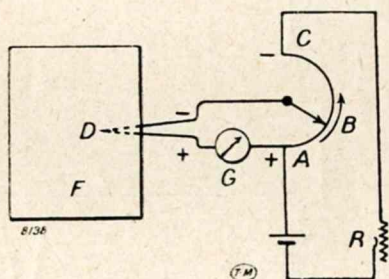


Fig. 16. — Schéma de principe du régulateur pyropotentiométrique.

A, B, C, Résistance calibrée; — D, Couple thermoélectrique; — F, Four; G, Galvanomètre.

suivant : une résistance calibrée ABC (fig. 16) étant parcourue par un courant constant, il se produit en AB une chute de tension qui dépend de la position du point mobile B. Cette différence de potentiel s'oppose à la force électromotrice du couple thermo-électrique D et lui sera égale lorsque l'aiguille du galvanomètre G sera au zéro. Il n'y aura plus qu'à lire la température sur l'échelle ABC. En réalité, les appareils conçus sur ce principe doivent comporter un dispositif destiné à étalonner et à régler le courant qui parcourt ABC au moyen d'un potentiomètre, d'une seconde pile (pile étalon de Weston, par exemple), d'un rhéostat et d'un dispositif compensateur de la température de la soudure froide, qui peut être automatique. La régulation est automatique si le déplacement du point B sur la résistance ABC est lui-même automatique. C'est dans ce but que les régula-

teurs Leeds et Northrup comportent un petit moteur actionnant un arbre à cames. Les cames sont sans action sur la position de B tant que le galvanomètre est au zéro, mais elles déterminent le déplacement de B dans le sens convenable dès que l'aiguille du galvanomètre dévie et elles le ramènent au zéro.

En outre, ces régulateurs comportent deux disques calés

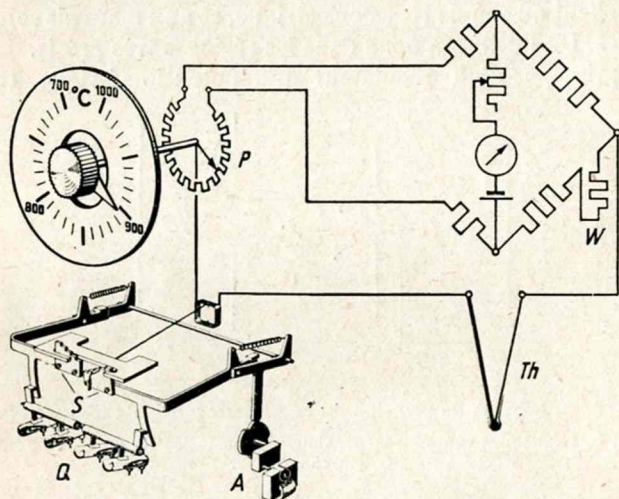


FIG. 17. — Schéma du régulateur pyropotentiométrique Siemens.

sur l'axe du rhéostat circulaire et tournant, par conséquent, avec lui quand la température s'écarte de sa valeur convenable. L'un de ces disques commande un contact « trop chaud » et l'autre, un contact « trop froid » qui produisent l'ouverture ou la fermeture de l'interrupteur du four et actionnent, au besoin, des voyants lumineux de contrôle.

Dans un tel système, la régulation s'effectue par le déplacement du point B sur la résistance ABC. Dans d'autres appareils, le point B a une position fixe réglée une fois pour toutes pour la température de réglage désirée. La commande des organes de réglage est alors faite par contacts (généralement à mercure)

sous le contrôle du système détecteur de la position de l'aiguille. C'est à ce procédé que fait appel, par exemple, le régulateur Siemens dont le système détecteur de la position de l'aiguille est constitué par un étrier ouvert, à bras articulés et à intervention rythmée. La disposition adoptée est le montage classique en pont de Wheatstone sur couple thermo-électrique

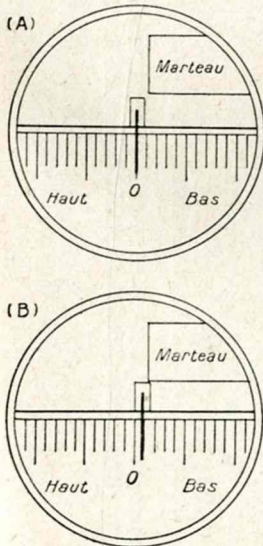


FIG. 18. — Schéma du détecteur-régulateur Wilson-Maeulen.

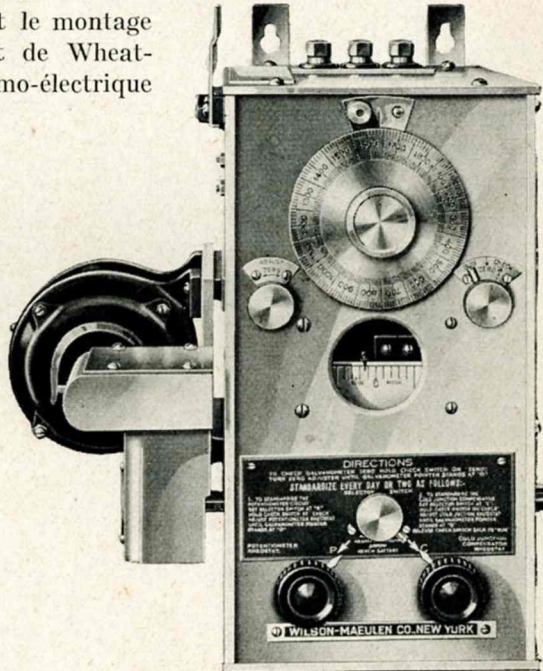


FIG. 19. — Régulateur automatique de température Wilson-Maeulen.

avec une résistance R de compensation de la soudure froide (fig. 17). Un cadran de lecture à index repère sur le potentiomètre P la température correspondant à l'équilibre du pont. L'étrier S à profil en escalier est actionné par un moteur A et conjugué avec un ensemble d'interrupteurs à mercure Q .

Les profils en gradins commandent le basculement des inter-

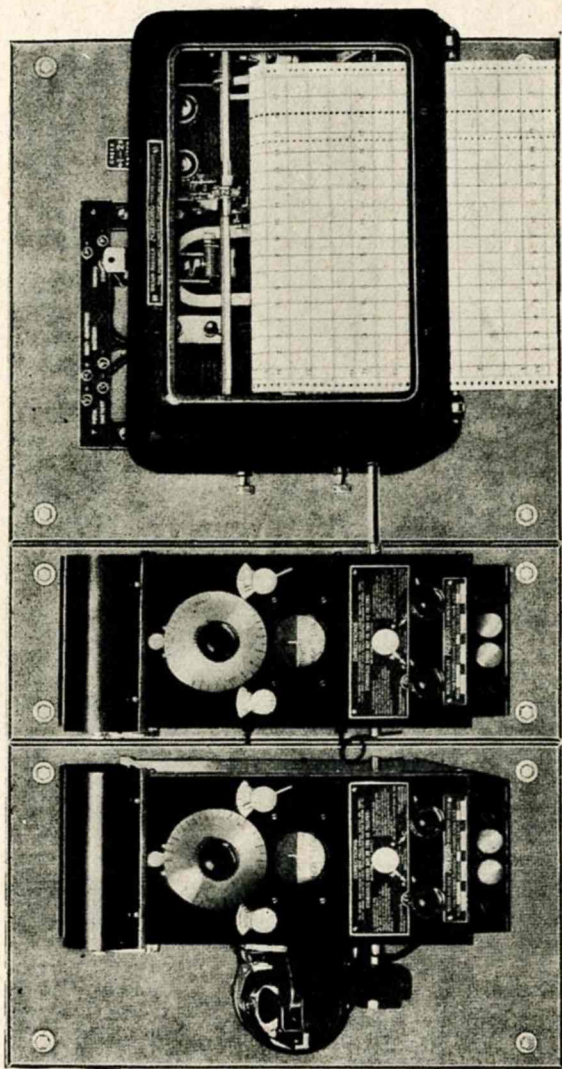


Fig. 20. — Groupe comprenant deux régulateurs potentiométriques Wilson-Macaulen et un enregistreur potentiométrique à deux courbes (Société générale d'Application électrique thermique).

rupteurs pendant un temps proportionnel à la levée de chaque gradin et, par suite, à la déviation de l'aiguille.

Dans le régulateur Wilson-Maeulen (fig. 18, 19, 20 et 21), qui est basé sur le même principe, la plus petite déviation de l'aiguille gavalnométrique et détectée par un cadre rectangulaire qui se déplace périodiquement dans le plan vertical de l'aiguille

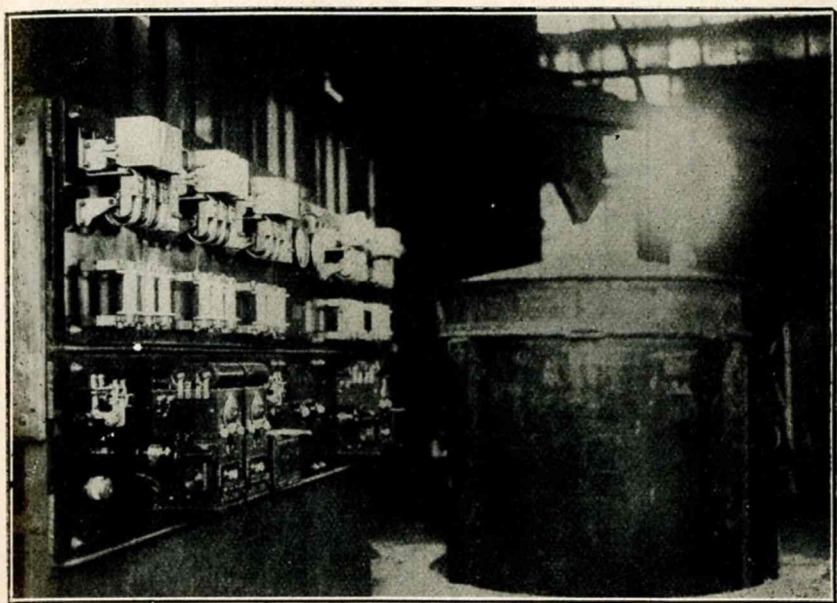


FIG. 21. — Four électrique à puits pour trempe de tubes d'acier. 164 kilowttas Tableaux de régulation (Société générale d'Application électrique thermique).

(fig. 18). Ce dispositif actionne des contacts basculeurs à mercure ou des contacts intermittents par balais montés sur disque à plots.

Relativement aux systèmes à contacts intermittents, les contacts continus permettent un plus grand pouvoir de coupure (par exemple, pour des basculeurs à mercure 40 ampères sous 110 volts ou 30 ampères sous 220 volts), la suppression des relais intermédiaires de maintien et de fermeture des circuits,

une plus grande simplicité de l'appareillage, de l'entretien et de la surveillance.

Les régulateurs pyrogalvanométriques et pyropotentiométriques, actuellement fort répandus, permettent donc l'ob-

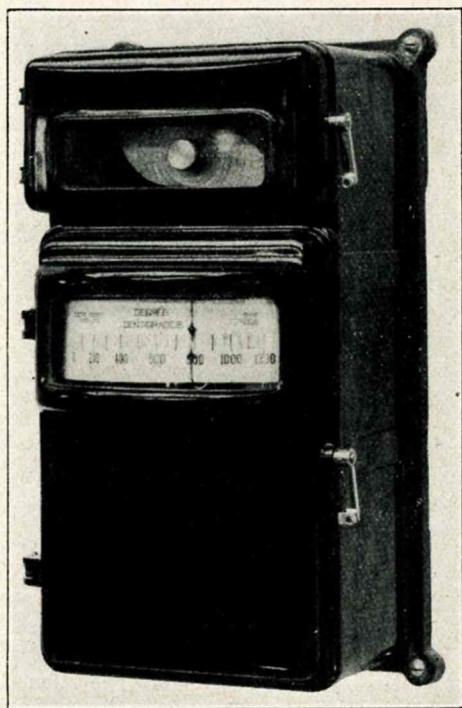


FIG. 22. — Pyromètre indicateur et régulateur automatique de température à marche imposée (L'Électro-Soudure).

tention de la température voulue, au besoin selon des variations données en fonction du temps. La métallurgie et le traitement des métaux et outils n'ont pas été seuls à en profiter, car les fours de laboratoire, l'industrie chimique, les alambics à parfums, les cuves de traitements de câbles, les tables chauffantes, les étuves pour matières plastiques, les sècheurs, les locaux chauffés

électriquement, etc., y trouveront le même intérêt. Si nous nous en tenons d'ailleurs à notre définition générale du four électrique qui est un appareil transformateur d'énergie électrique

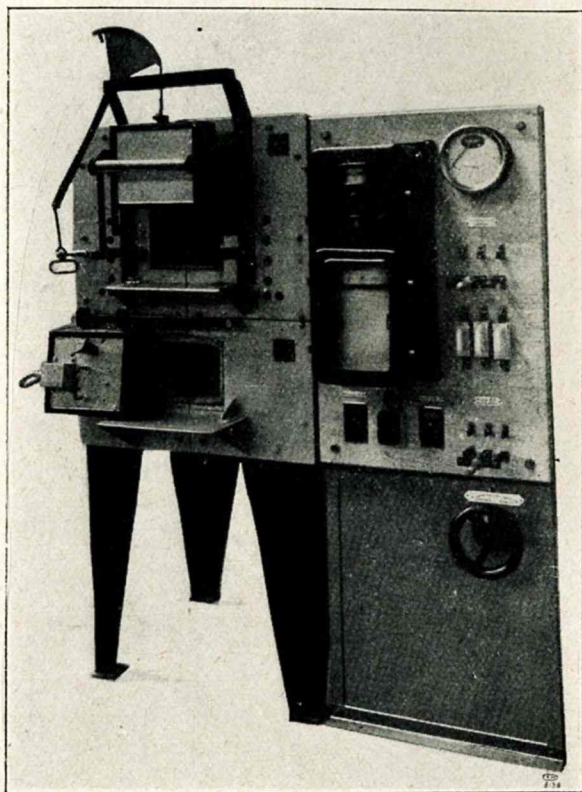


FIG. 23. — Four à deux mouffes pour traitement des aciers spéciaux et des aciers rapides (L'Électro-Soudure).

Ce type de four a, notamment, été en service aux Constructions navales de Toulon. Il est réglé automatiquement par un pyromètre du type de la figure 22, mais disposé en outre enregistreur.

en énergie calorifique utile dans l'enceinte où se développe cette chaleur, nous voyons que tous ces exemples rentrent, en fait, dans cette définition.

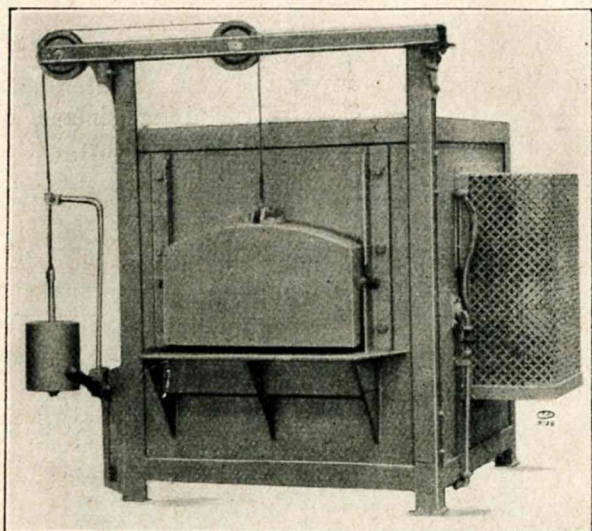


FIG. 24. — Four électrique à deux chambres pour trempe d'aciers rapides (Alsthom, constructeur).

Chambre de préchauffage à résistances nickel-chrome, 1 000°, 7 kw. — Chambre de chauffe à résistance « Globar », 1.400°, 13,2 kw. — Régulation automatique.

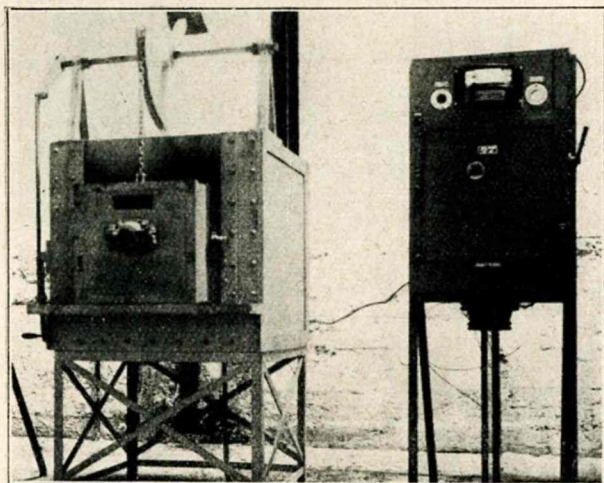


FIG. 25. — Petit four de traitement thermique Heurtey-Scei, équipé avec appareillage de contrôle et de régulation automatique.

CHAPITRE IV

L'AUTO-RÉGULATION

Equation des fours à induction à noyau magnétique. —

L'auto-régulation ne s'applique qu'à certains cas bien particuliers, mais joue alors un rôle important par sa simplicité et son efficacité. Le procédé est indiqué pour le four à induction à noyau magnétique avec action indirecte sur la masse à échauffer.

Un four à induction à noyau est un véritable transformateur statique ou le secondaire est constitué par une seule spire formée par le corps à chauffer.

La puissance P_2 mise en jeu dans le secondaire d'un tel four est, U_1 étant la tension appliquée aux bornes du primaire, φ_1 le déphasage aux bornes de celui-ci, η le rendement électrique propre du four, R_2 la résistance du secondaire, n_1 le nombre de spires au primaire :

$$P_2 = \frac{\eta^2 U_1^2 \cos^2 \varphi_1}{R_2 n_1^2}$$

Cette expression de la puissance, établie par A. Levasseur (1) est d'un grand intérêt pratique dans le calcul de ces fours car le rendement η étant approximativement connu, de même que $\cos \varphi_1$, le calcul de la puissance est immédiat. Dans le domaine qui nous intéresse ici cette formule montre avec précision dans quelle mesure la variation de la tension appliquée U_1 et la variation de la résistance R_2 du secondaire du four modifient la puissance de

(1) A. LEVASSEUR : *Conférences de l'Ecole supérieure d'Electricité*, pp. 3 et 19.

chauffage P_2 . La variation de U_1 s'effectue par un transformateur ou un auto-transformateur intercalé entre le réseau et le four. Ainsi les fours Russ (laitonnerie...) sont munis d'un auto-transformateur de réglage; les fours Röchling-Rodenhauser (aciérie), d'un transformateur de réglage sur lequel on agit au moment du décrassage, pour éviter le phénomène de pincement..... Quant à la

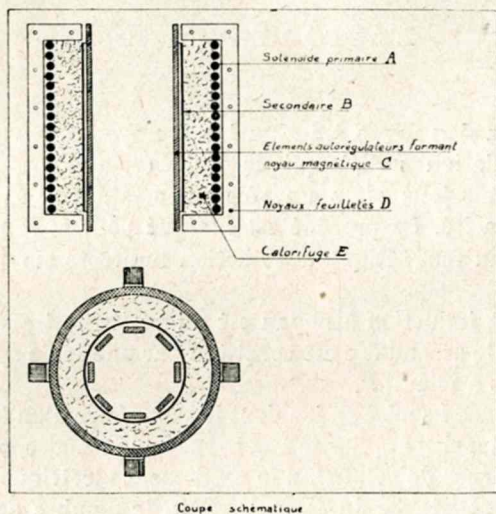


FIG. 26. — Coupe d'un four à induction (Ugine-Infra).

variation de R_2 elle a lieu lorsqu'on vide partiellement le four pour le mettre en veilleuse durant les intervalles du travail.

Four Ugine-Infra. — Perrin et Sorrel ont conçu un four de cette catégorie dont la température peut se régler d'elle-même, à toute valeur désirée, sans le secours d'aucun appareil pyrométrique (1).

Le principe en est très simple. Considérons, par exemple, un four à induction avec moufle auto-régulateur de température,

(1) PERRIN et SORREL : *Compte Rendu Acad. Sciences*, 27 avril 1931.

du type Ugine-Infra (fig. 26 et 27). Ce four est formé par : un solénoïde A, alimenté par du courant alternatif de fréquence industrielle et constitué par du fil de cuivre convenablement enroulé et de section suffisamment importante pour éviter

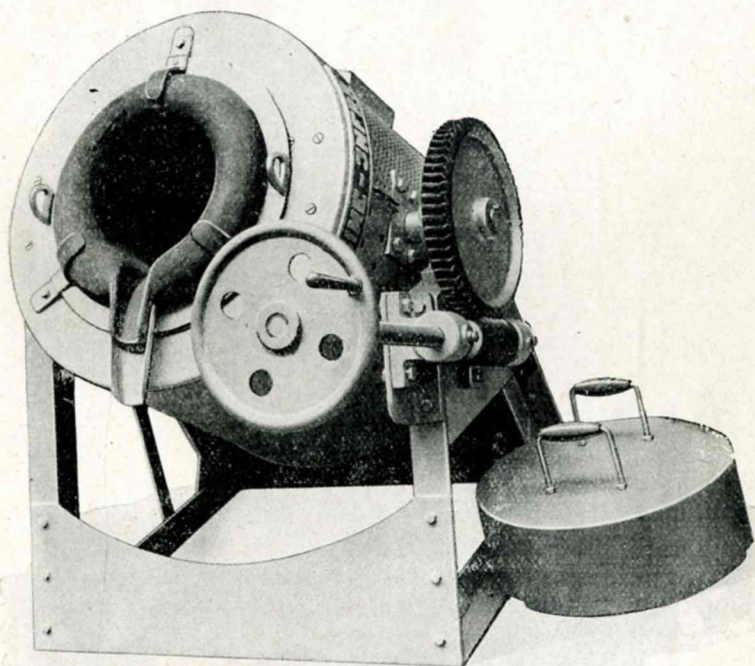


FIG. 27. — Four à induction autorégulateur (Ugine-Infra).

l'échauffement dû au passage du courant inducteur; un noyau ferro-magnétique B pouvant former moufle et constituant alors l'enceinte même du four; une enveloppe conductrice fermée C en métal non magnétique (acier au nickel) et des noyaux de fer feuilleté D.

Ce système est analogue à un transformateur dont l'enroulement secondaire, en l'espèce l'enveloppe C, constitue le secon-

daire en court-circuit. Le courant passant dans A induit un courant dans l'enveloppe C qui s'échauffe. La chaleur est transmise au moufle B qui s'échauffe à son tour jusqu'à la température correspondant au point de Curie de la substance qui le constitue; à ce moment le flux diminue à travers le noyau magnétique B qui peut alors dégager des quantités de chaleur égales aux pertes par radiation ou transmission. Si le four se refroidit, la température du noyau ou moufle B diminue; l'in-

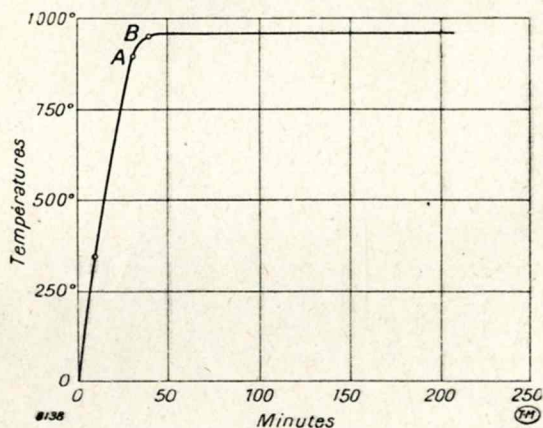


FIG. 28. — Courbe de mise en température du four Ugine-Infra.

duction dans ce noyau augmente ainsi que le courant induit dans l'enveloppe C.

Le régime d'un tel four peut être atteint sans oscillation autour de la température d'équilibre (fig. 28).

Autres applications de l'auto-régulation. — Une autre réalisation de ce principe est le four horizontal pour traitements thermiques « Ugine-Infra » (fig. 29 et 30) dans lequel le mouvement des pièces à traiter est produit par l'attraction que le solénoïde inducteur exerce sur celles-ci. Cette attraction produit l'introduction, puis le cheminement des pièces dans le four; les pièces se poussent mutuellement.

AUTO-RÉGULATION

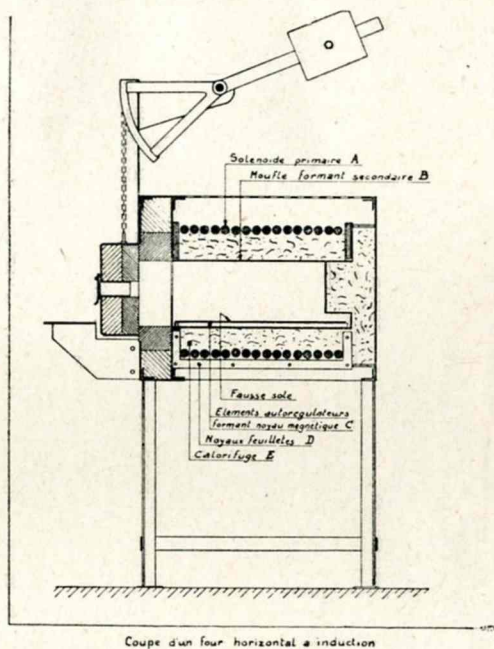


FIG. 29. — Coupe d'un four horizontal à induction (Ugine-Infra).

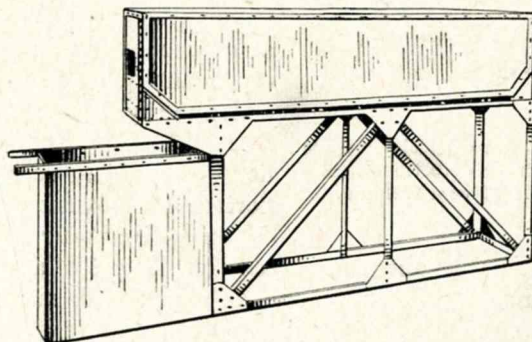
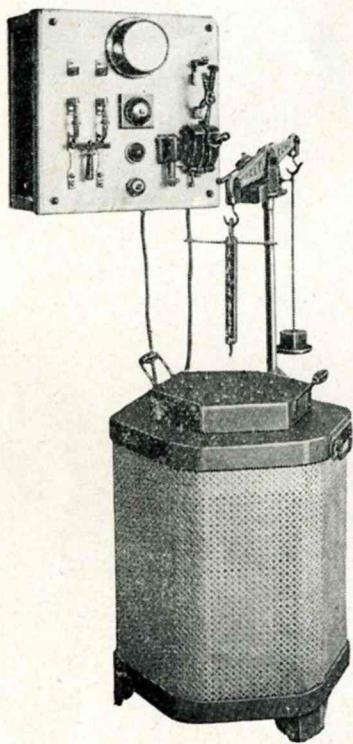


FIG. 30. — Four continu automatique de trempe Ugine-Infra à détection magnétique.

Pour régulariser ce mouvement, un frein constitué par une masse encore magnétique à la température du four arrête les pièces au passage jusqu'à ce qu'elles aient perdu leur propre magnétisme, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'elles soient parvenues à une température bien définie.



Le frein permet de réaliser un cheminement discontinu d'une vitesse moyenne absolument constante. Un tel four, de 2 mètres de longueur, permet la trempe de 5.000 axes de pistons par jour, avec un rebut pratiquement nul. Il s'agit donc d'une auto-régulation qui porte directement sur les pièces.

Ce principe est à la base des fours verticaux à balance où les pièces suspendues dans l'enceinte du four à une extrémité du fléau sont attirées par un champ magnétique jusqu'au moment où, le magnétisme des pièces ayant disparu par suite de l'élévation de la température, elles cessent d'être attirées et se trouvent relevées cependant qu'un avertisseur est actionné (fig. 31).

FIG. 31. — Four vertical à balance Ugine-Infra, à détection magnétique de la pièce à tremper.

De même, les fours spéciaux de trempe Wild-Barfield comportent un élément magnétique et un indicateur qui montre

à l'opérateur le moment précis où la pièce a atteint la température de trempe. On conçoit l'économie de main-d'œuvre, de matière première et d'énergie, ainsi que la réduction de déchets que permettent de réaliser de tels dispositifs.

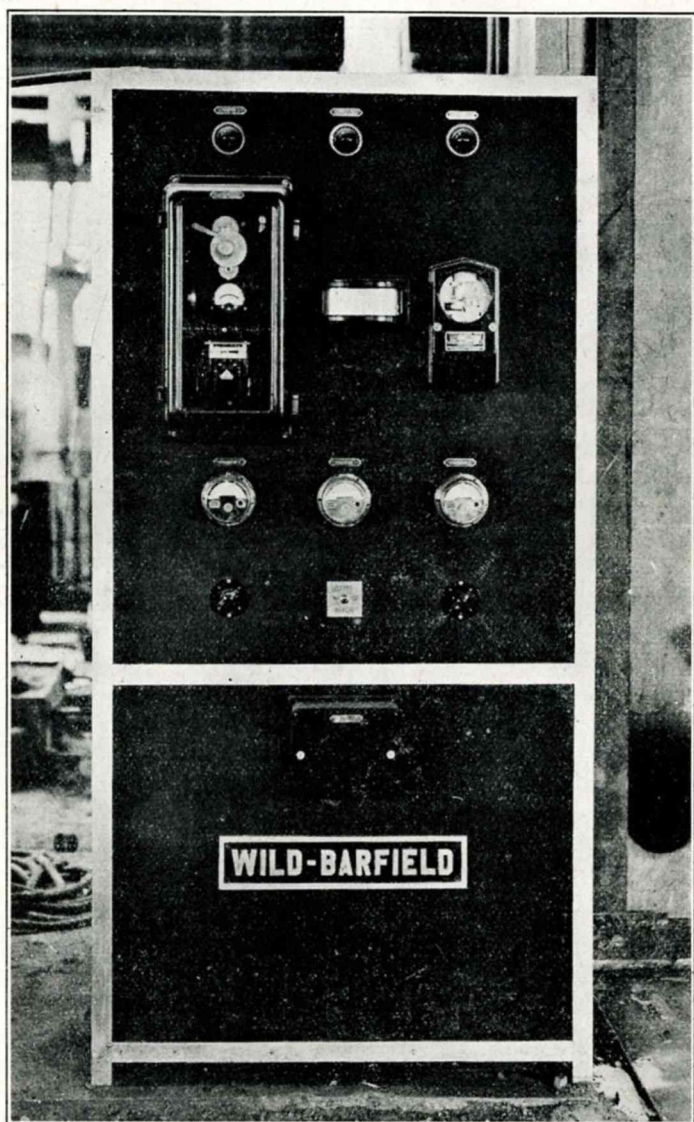


Fig. 32. — Tableau de contrôle de four électrique Wild-Barfield avec régulateur automatique permettant une régulation « à programme ».



CHAPITRE V

PROBLÈME GÉNÉRAL DE LA RÉGULATION PAR DÉPLACEMENT DES ÉLECTRODES

Pour les fours électriques à arcs qui travaillent à des températures très élevées et où les dispositifs pyrométriques sont inutilisables, le mode de régulation le plus usuel consiste à agir par déplacement des électrodes. Il existe à cet effet divers types de régulateurs qui diffèrent les uns des autres par la façon d'obtenir le mouvement utile.

Le déplacement de l'électrode va, on le conçoit, modifier la longueur de l'arc. La mise en action de ce réglage peut dépendre de la tension, de l'intensité ou d'une combinaison des deux, c'est-à-dire de la puissance. Par suite, on pourra avoir divers types que nous allons examiner et qui seront rapportés aux facteurs tension constante, intensité de courant constante, puissance constante, ou encore impédance constante.

1^o Régulation à tension constante. — La tension étant maintenue constante à l'usine génératrice, il faudrait réaliser une forte variation du courant pour créer la régulation, aussi cette solution est peu recommandable. On l'utilise cependant dans certains cas, par exemple lorsque, pour régler deux arcs en série, on agit sur l'un à tension constante, l'autre étant réglé à intensité constante (c'est le cas des régulateurs Cuénod-Thury sur four à deux électrodes et à sole conductrice).

2^o Régulation à intensité constante. — Le réglage à intensité constante ne présente pas les inconvénients du précédent, car l'intensité est indépendante de la tension secondaire du

transformateur. Il sera simple et convient bien aux fours à arc libre ou à arc unique sur bain de métal.

Sur les fours à arc sur métal (Héroult par exemple), cette régulation ne permet guère l'amorçage automatique des arcs avec une suffisante limitation des pointes de courant, car elle donne un enfoncement trop grand de l'électrode dans la charge et elle ne fournit qu'un réglage instable des arcs monophasés en série par suite du partage inégal de la tension entre les deux arcs. Avec le mode de régulation constante, il faudra prévoir, quel que soit le type de four, un dispositif additionnel de relevage des électrodes en cas de manque de courant ou, à la rigueur, un disjoncteur à minimum de tension.

3° Régulation à puissance constante. — Ce mode de réglage a des propriétés semblables à celles de la régulation à courant constant.

4° Régulation différentielle. — La régulation différentielle, dite aussi à impédance constante, est représentée par l'équation $U - AI = 0$, A étant une constante. Ce mode de réglage, qui présente de grands avantages, surtout sous sa forme perfectionnée $U - AI - B = 0$ à deux constantes, est celle par exemple du régulateur Secomet-Vastel que nous décrirons plus loin.

Dans cette formule, U est la tension entre l'électrode et la masse, et I le courant dans l'électrode, A et B sont des constantes.

Par construction, l'appareil donne la solution suivante :

Si $U - AI - B = 0$, l'électrode reste immobile;

Si $U - AI - B > 0$, l'électrode descend et I augmente jusqu'à ce que l'égalité de base soit satisfaite;

Si $U - AI - B < 0$, l'électrode monte jusqu'à reprise de l'égalité.

Voyons maintenant les avantages de ce système sur ceux à intensité ou à puissance constante :

Dans le cas d'un four genre Héroult, les électrodes descendant simultanément vers la charge, on pourra créer l'amorçage automatique des arcs en série avec une limitation suffisante des pointes de courant. Une électrode rencontrant par exemple

un copeau d'acier prend un retard sur l'autre, et l'équilibre électrique demeure, sans à-coup.

Pour deux arcs en série on n'a plus, en outre, instabilité. Enfin, en cas de manque de tension, les électrodes remontent sans qu'un dispositif additionnel soit nécessaire. Notons que ces avantages résultent de l'introduction de la seconde constante, B, c'est-à-dire de la forme perfectionnée de l'équation de régulation.

Courbes de puissance.

Pour compléter ces principes fondamentaux, il ne sera pas inutile de mentionner le diagramme classique établi en 1924 par A. Levasseur (1).

Il est parfois facile, en effet, en matière de régulation, de commettre de fâcheuses erreurs, que la connaissance de ce graphique permettrait d'éviter.

Il peut sembler, à première vue, qu'en diminuant la résistance d'un four alimenté sous tension constante (par exemple en rapprochant les électrodes) on doit augmenter la puissance. Or, en examinant l'expression de cette puissance, on s'aperçoit que cela n'est pas nécessairement exact; U étant la tension constante, R la résistance variable, $L\omega$ la réactance d'induction (qui est pratiquement constante), la puissance :

$$P = RI^2 = \frac{RU^2}{R^2 + L^2\omega^2}$$

ne dépend que de R, et la courbe $P = f(R)$ a l'allure indiquée figure 33.

Ce diagramme montre qu'on augmente la puissance fournie à un four en diminuant sa résistance, pourvu que le facteur de puissance soit, et reste, supérieur à 0,707 (2).

(1) A. LEVASSEUR : Communication du 6 novembre 1924 à la 3^e section de la Société française des Electriciens, réimprimée dans le bulletin de cette Société d'août 1925.

(2) Il convient de bien remarquer que le graphique ci-dessus repose essentiellement sur l'hypothèse que la self-inductance est une quasi-constante,

Pour diverses tensions constantes, le diagramme deviendra celui de la figure 34.

Il s'agit là, comme on le voit,

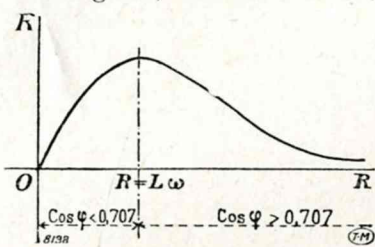


FIG. 33. — Courbe montrant la variation de la puissance P en fonction de la résistance R , dans un circuit à réactance d'induction constante sous tension constante.

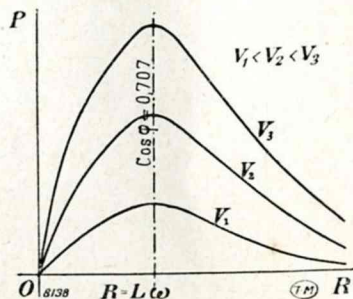


FIG. 34. — Réseau des courbes analogues à celle de la figure 33, pour diverses valeurs de la tension $V_1 < V_2 < V_3$.

d'une règle de la plus haute importance en matière de régulation.

Mode de commande des électrodes.

Sur les principes qui viennent d'être énoncés ont été conçus divers appareils pouvant être classés selon leur mode de commande des électrodes; cette commande est réalisée soit au moyen d'un moteur électrique, soit par un dispositif hydraulique, soit par l'intermédiaire de redresseurs à gaz.

Chacun de ces dispositifs possède des avantages et des inconvénients. Les régulateurs travaillant dans un milieu de température assez élevée, puisqu'ils sont au voisinage des fours et dans des poussières, doivent être robustes et exempts d'organes délicats, de contacts, de machines tournantes, ce qui donne à ce point de vue un avantage aux dispositifs de com-

pratiquement indépendante de l'intensité du courant, ce qui, pour une installation de four électrique n'est pas évident *a priori*. La validité de cette hypothèse fut d'ailleurs mise en question par d'autres auteurs (*Bull. Société Franç. des Electriciens*, août 1926, p. 890), mais finalement confirmée.

mande hydraulique des électrodes, dont l'entretien est facile.

Toutefois, on note pour ceux-ci des possibilités d'encrassement des soupapes et des défauts possibles d'étanchéité sur les joints. Les systèmes à redresseurs à gaz, également utilisés, sont libérés de tout contact mobile, ce qui leur confère une bonne sécurité de fonctionnement.

Du point de vue de la rapidité de l'action régulatrice, l'avantage est à la commande hydraulique, qui est impérative puisque l'eau est incompressible.

Les dispositifs à commande par moteur ne peuvent prendre leur vitesse ou s'arrêter d'une façon instantanée, et ils présentent une certaine inertie. Au surplus, ils sont, de ce fait, soumis à des à-coups et à un régime brutal qui les détériore et qui nécessite des dispositifs d'amortissement, d'asservissement ou de compensation nuisibles à une grande sensibilité.

Les systèmes à redresseurs sont rapides par rapport aux dispositifs à contacts ou à relais électromagnétiques et évitent l'usure et l'adhérence des contacts. On notera aussi à leur avantage qu'ils peuvent avoir une action intimement variable avec l'importance de la perturbation. Ils produisent, en effet, une excitation de la génératrice qu'ils commandent variable avec le courant débité, et le moteur du treuil tourne avec une vitesse proportionnelle à ce dernier. Par suite, il n'y a pas de retard dans la régulation.

De leur côté, les systèmes hydrauliques ouvrent les distributeurs plus ou moins complètement, selon les écarts d'intensité. Par contre, les moteurs d'électrodes des autres systèmes ont une vitesse indépendante des surintensités.

Malgré les divers avantages apparents des systèmes hydrauliques ou à redresseurs, les appareils à commande électrique ont de larges emplois, et il convient de préciser qu'il y a encore un facteur indépendant du système, qui intervient d'une façon importante et qui est la robustesse de l'appareil et la perfection de sa mise au point. C'est pour cette raison qu'un certain nombre d'appareils, quel que soit leur système, ont pris la tête en matière de régulation, grâce à leurs qualités, et nous examinerons successivement quelques-uns de ceux-ci qui seront donnés en exemple

des principaux modes de régulation par déplacement des électrodes, ceux-ci étant :

A moteur d'électrode;

A moteur d'électrode et génératrice à plusieurs enroulements inducteurs;

A redresseur statique;

Combinés différentiels à moteur d'électrodes;

Hydrauliques.



CHAPITRE VI

RÉGULATEURS A MOTEUR D'ÉLECTRODE

Dans le mode de commande des électrodes par moteur, la mise en action de cet organe de travail par l'organe régulateur est réalisée par l'intermédiaire de relais et contacteurs ou par mise en action d'un moteur simplement réversible commandé directement.

Régulateurs à moteur d'électrode simplement réversible commandé par relais et contacteurs. — De tels régulateurs comportent un relais ampéremétrique dans lequel passe le courant secondaire du transformateur de courant. Ce relais commande les contacteurs actionnant le moteur dans le sens désirable : « montée » ou « descente ».

Un tel réglage est simple dans son principe. Il implique toutefois un appareillage relativement compliqué et délicat, ainsi que les inconvénients inhérents au principe du « tout ou rien ». On note aussi une certaine inertie, donc un retard dans le réglage et une usure souvent rapide du matériel.

Quelques bons régulateurs de ce type ont cependant été réalisés et nous en donnerons pour exemple le régulateur de la *Siemens und Halske Aktien-Gesellschaft*.

Ce régulateur est constitué par une commande par moteur d'électrode au moyen de contacteurs et de relais. L'ensemble est assez analogue à une installation normale de commande de moteurs par contacteurs, semblable à celles employées pour les machines-outils et les ascenseurs, les boutons-poussoirs étant ici remplacés par un relais différentiel spécial. C'est ce relais qui donne les commandes nécessaires pour la montée



et la descente des électrodes. Il consiste en une bobine de tension et une autre d'intensité, assurant ainsi un réglage de l'arc par intensité et par tension.

Il faut un relais et deux contacteurs (l'un pour la montée, l'autre pour la descente) par électrode (fig. 35).

Ce système permet de mettre le four en marche d'une manière tout à fait automatique, même sur des charges solides, c'est-à-dire que, dès qu'on enclenche le disjoncteur principal, les électrodes commencent automatiquement à descendre; à l'instant même où l'une d'entre elles aura touché la charge, son mouvement de descente sera arrêté. Dès qu'une des autres électrodes entre à son tour en contact avec la charge, l'arc s'allume et le courant voulu, réglé par le régulateur d'intensité, s'établit. Il est à noter tout particulièrement qu'avec ce réglage électrique les électrodes ne se posent pas avec force sur la charge, même solide, et que, par suite, on ne risque pas de la casser.

Même si la charge est peu conductrice et que, par suite, le réglage électrique soit insuffisant pour arrêter le mouvement de descente de l'électrode, celle-ci ne sera soumise à aucun effort, parce qu'elle est équilibrée par un contrepoids et que le glissement du câble qui la soutient empêche sa descente forcée. En cas de panne de courant, tout mouvement des électrodes devient impossible : la tension et le courant étant alors nuls, le balancier du relais différentiel reprendra immédiatement sa position d'équilibre, coupant ainsi automatiquement les circuits de commande des moteurs, aussi bien pour la montée que pour la descente.

Ce réglage grossier ne peut en aucun cas suffire à obtenir une allure du four aussi régulière que possible, car de faibles écarts entraîneraient les électrodes dans leur mouvement de montée ou de descente au delà des positions voulues. Non seulement la marche régulière du four ne pourrait alors être obtenue, mais, au contraire, on aurait constamment l'indésirable allure oscillante. Pour l'éviter, il a été nécessaire de recourir à des moyens auxiliaires, et d'ouvrir les contacts des contacteurs, avant que le courant du four n'ait été ramené à sa valeur réglée d'avance. A cet effet, les bobines de tension et d'intensité du relais diffé-

RÉGULATION DES FOURS ÉLECTRIQUES

rentiel sont munies chacune d'une bobine auxiliaire raccordée par des résistances à des contacts spéciaux placés sur les contac-

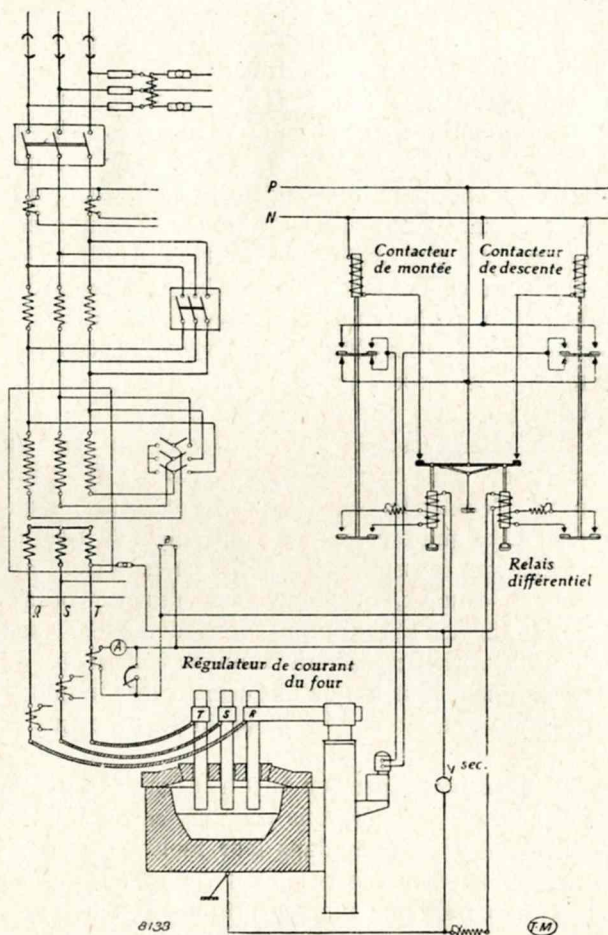


FIG. 35. — Schéma des connexions du système de réglage Siemens.

teurs. Dès qu'un contacteur agira, l'enroulement supplémentaire correspondant de tension ou d'intensité sera court-circuité



sur sa résistance, provoquant ainsi un affaiblissement de la force attractive de la bobine de ce relais. Pour des faibles écarts, le moteur sera immédiatement arrêté. Si, au contraire, l'intensité dépasse (dans un sens ou dans l'autre) 15 % de sa valeur réglée, la force d'affaiblissement de l'enroulement supplémentaire ne suffit plus à arrêter le mouvement; le moteur tourne alors à pleine vitesse et ramène rapidement l'intensité à sa valeur voulue.

Régulateurs à moteur d'électrode simplement réversible et commande directe. — La suppression des relais est un progrès dans la recherche de la simplicité, mais impose une mise au point soignée des organes régulateurs et une grande robustesse de ceux-ci.

Nous donnerons comme exemple de ce type le régulateur Thury des Ateliers Cuénod.

Dans cet appareil, l'organe régulateur (fig. 36) fonctionne de la façon suivante : lorsque le courant qui traverse le solénoïde est normal, une bobine mobile est en équilibre; le levier auquel elle est fixée prend une position médiane et le couteau porté par ce levier ne touche pas les butées montées, il en est de même des cliquets placés sur bascule animée d'un mouvement de va-et-vient. Supposons maintenant qu'il se produise une augmentation d'intensité. La bobine mobile sera repoussée, le levier basculera et le couteau viendra au contact de la butée. Celle-ci va dégager le cliquet de droite qui pénètre dans l'encoche que comporte la roue solidaire du levier du commutateur. Ce dernier est entraîné de droite à gauche, vient appuyer contre des contacts en charbon qui transmettent le courant au moteur du treuil et actionnent celui-ci en l'entraînant dans le sens correspondant à l'augmentation de la longueur de l'arc. Dès que le contact a été provoqué, le levier revient dans sa position verticale, mais, selon l'importance du réglage à obtenir, plusieurs contacts successifs peuvent se trouver réalisés en un temps restreint.

Si le courant était, au contraire, inférieur à la valeur normale, la bobine mobile serait attirée par le ressort et les opérations se poursuivraient dans l'ordre inverse, le moteur étant actionné dans le sens « descente ».

RÉGULATION DES FOURS ÉLECTRIQUES

Les charbons du commutateur maintenus en place dans de fortes pinces sont réglables par vis et leur usure peut ainsi être compensée et leur réglage assuré.

Pour éviter que le point de réglage ne soit dépassé par le fait que la correction résultant du lancement du courant dans le moteur d'électrode se heurte à l'inertie propre de celui-ci, l'ap-

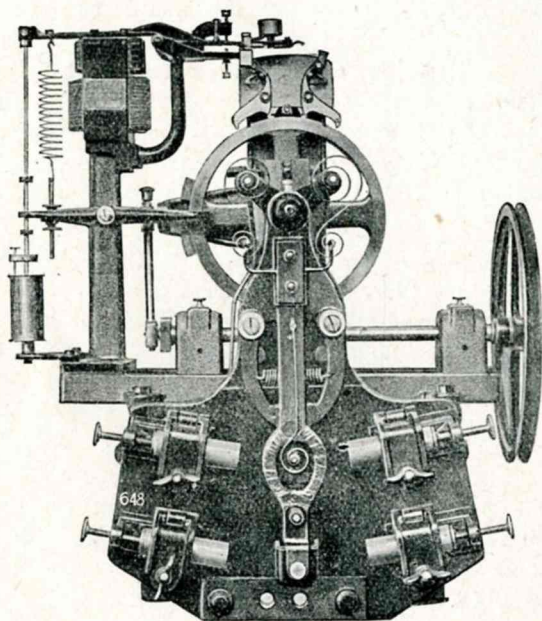


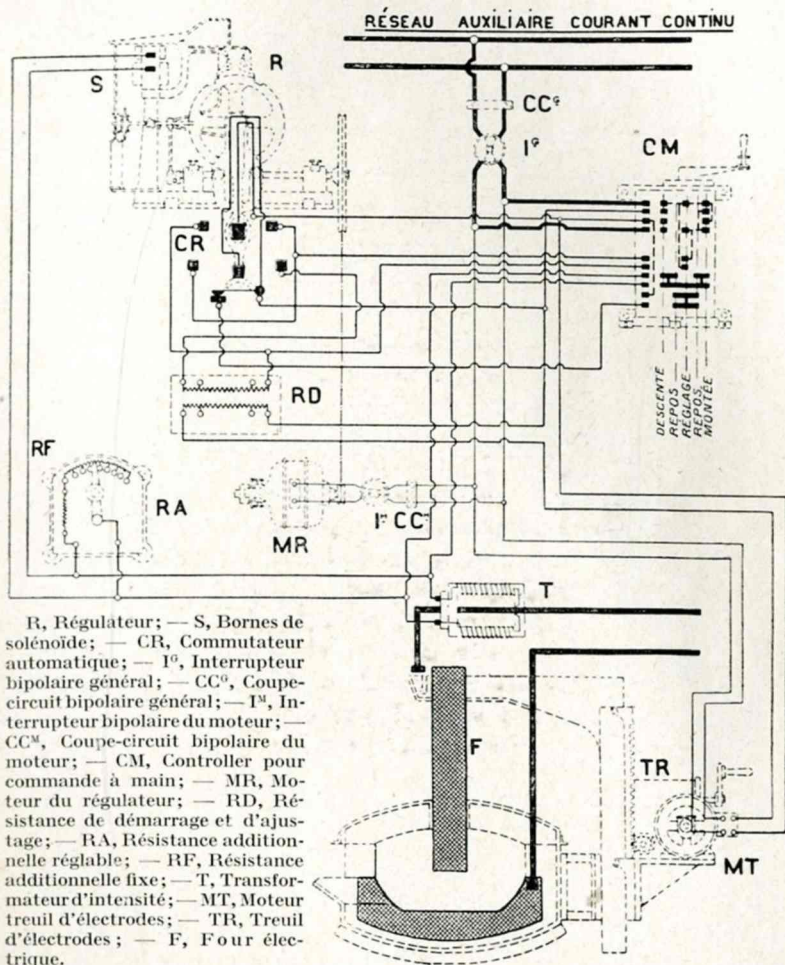
FIG. 36. — Régulateur Thury pour réglage de four électrique (Cuénod, Genève).

pareil comporte un dispositif d'asservissement réalisé par une pompe à huile qui est mise en jeu à chaque « coup de réglage ».

On peut aussi, dans une certaine mesure, égaliser l'effet du réglage en le provoquant dans les deux sens, l'un étant plus prolongé que l'autre.

Le solénoïde absorbe, avec 50 périodes, 2,5 ampères sous 32 volts et est branché entre sole et électrode s'il s'agit d'un

réglage de la tension, ou aux bornes d'un transformateur de



R, Régulateur; — S, Bornes de solénoïde; — CR, Commutateur automatique; — I°, Interrupteur bipolaire général; — CC², Coupe-circuit bipolaire du moteur; — I¹, Interrupteur bipolaire du moteur; — CC¹, Coupe-circuit bipolaire du moteur; — CM, Contrôleur pour commande à main; — MR, Moteur du régulateur; — RD, Résistance de démarrage et d'ajustage; — RA, Résistance additionnelle réglable; — RF, Résistance additionnelle fixe; — T, Transformateur d'intensité; — MT, Moteur treuil d'électrodes; — TR, Treuil d'électrodes; — F, Four électrique.

Fig. 37. — Schéma du réglage automatique de l'intensité d'un four électrique avec moteur de treuil à courant continu (schéma pour une électrode).

courant dans le cas plus fréquent d'un réglage de l'intensité.

Le montage est un cas d'espèce dont la figure 37 donne un exemple relatif au réglage d'une seule électrode sur four à sole conductrice. Il se répète autant de fois qu'il y aura d'électrodes.

La commande de l'électrode s'effectue par l'intermédiaire d'un treuil qui est monté avec câble ou avec chaîne Galle et

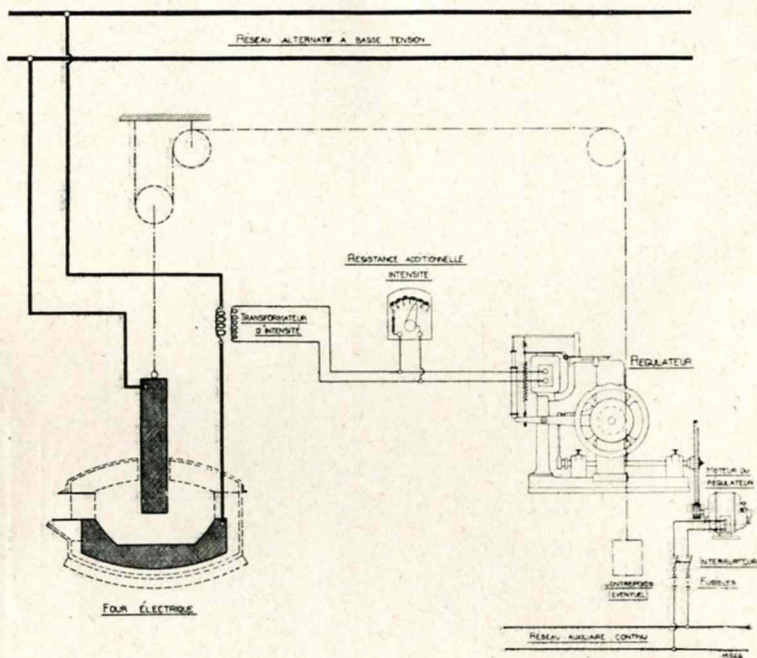


Fig. 38. — Schéma de réglage automatique d'un four à faible capacité par régulateur Thury (H. Cuénod, Genève)

vis tangente. Dans le cas de fours de faible capacité où l'effort à vaincre pour déplacer l'électrode est faible (fours de laboratoire, par exemple, ou petits fours pour éléments spéciaux), le treuil et le moteur de commande peuvent être supprimés et le régulateur commande directement l'électrode par câble, le tambour sur lequel s'enroule ce dernier étant monté directement sur l'arbre du régulateur (fig. 38).

Pour les fours à deux électrodes en série sur sole conductrice ou bain conducteur, le montage préconisé pour assurer non seulement la constance du courant, mais aussi une répartition égale de la tension, consiste en la commande d'une des électrodes par un régulateur de courant maintenant constant ce dernier dans le four, l'autre électrode étant commandée par un régulateur de tension dont le solénoïde est branché entre la sole et l'électrode.

Régulateurs à moteur d'électrode et génératrice à plusieurs enroulements inducteurs. — Le principe des régulateurs de ce genre est le suivant : un moteur M (fig. 39)

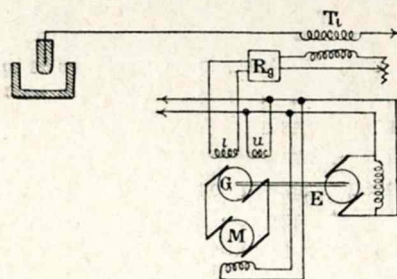


FIG. 39. — Schéma des connexions du moteur d'électrode.

M, alimenté par une génératrice G à deux enroulements inducteurs; — E, Excitatrice; — F, Four; — Ti, Transformateur de courant; — Rg, Régulateur.

actionne le treuil d'électrode; il est alimenté par la génératrice G qui possède deux enroulements d'excitation à action différentielle. L'un, u , est alimenté par l'excitatrice E; l'autre, i , par le courant variable d'un régulateur Rg agissant sous l'influence des variations du courant de l'électrode transmises par l'intermédiaire du transformateur Ti. Le courant débité par la génératrice a un sens variable avec l'importance relative des deux champs inducteurs et provoque ainsi, en changeant de sens, l'inversion du sens de rotation du moteur et la montée ou la descente de l'électrode.

Sur ce principe, peuvent être établis des appareils plus com-

plexes avec trois bobinages d'excitation, par exemple comme c'est le cas dans le régulateur Tirrill que nous décrivons comme type de cette catégorie.

Le régulateur Tirrill est un régulateur à commande par moteur et groupe Leonard et à intensité constante (1).

Dans ce système (fig. 40), chaque treuil d'électrode est actionné par un moteur shunt à courant continu et excitation indépendante 3. Ces moteurs sont montés selon le procédé Leonard, chaque moteur d'électrode ayant sa propre dynamo en couplage Leonard 4. Les trois dynamos Leonard, ainsi que leur excitatrice 6, sont commandées par un moteur commun 5; elles tournent donc toutes à la même vitesse constante. Des régulateurs Tirrill 9 — un pour chaque électrode — se chargent de maintenir constante l'intensité du courant des électrodes; leur fonctionnement est le suivant : chaque dynamo Leonard est munie de deux enroulements d'excitation antagonistes *a* et *b*. L'enroulement *a* est branché sur la tension d'excitation invariable; l'enroulement *b*, dont le nombre d'ampères-tours est environ le double de celui de l'enroulement *a*, est branché sur la tension d'excitation par l'intermédiaire de la résistance 9. Cette résistance est court-circuitée par le régulateur Tirrill suivant un rythme déterminé. L'effet de l'enroulement exciteur *b* prédomine au moment du court-circuitage, tandis que, lors de l'ouverture des contacts du Tirrill, le champ *b* est fortement affaibli, et c'est l'effet opposé de l'enroulement *a* qui prévaut. Le rythme du régulateur Tirrill, c'est-à-dire le rapport entre la période d'activité et celle d'inactivité de la résistance 9, détermine la tension d'excitation de la dynamo Leonard entre une valeur maximum positive et négative. La tension d'excitation détermine d'une manière absolue la tension de la dynamo et le sens de la rotation du moteur.

La bobine d'intensité du régulateur Tirrill est raccordée à l'enroulement secondaire du transformateur d'intensité 2; elle est donc influencée par le courant traversant les électrodes. A

(1) Réglage automatique des électrodes des fours à arc, *Revue A. E. G.*, n° 1, 1935.

Le courant qu'il s'agit de maintenir constant est ajusté à l'aide d'une résistance de réglage 10 insérée dans le circuit de l'enroulement d'excitation a . Outre cet ajustage individuel de chaque électrode, l'ajustage simultané des trois électrodes peut être réalisé à l'aide du régulateur 7 qui provoque la modification de la tension d'excitation nominale.

La caractéristique de ce régulateur est que les moteurs de commande des électrodes, au lieu d'être mis en et hors circuits, restent accouplés en permanence avec leurs dynamos. Les courants d'excitation sont très faibles.

Régulateurs à redresseurs statiques. — Il est possible, comme nous l'avons indiqué précédemment, de remplacer les organes mécaniques et les contacts par des redresseurs statiques substitués aux relais et aux contacteurs.

Ces redresseurs sont, en général, des lampes tungar ou à oxyde métallique et métal. Ils redressent le courant transformé à contrôler et à régler et en transmettent les variations aux inducteurs d'une génératrice connectée au moteur du treuil, ce dernier équipement fonctionnant comme dans le cas des régulateurs avec machines à plusieurs bobinages d'excitation.

En fait, le système n'est qu'une variante des types précédents et ne s'en distingue que par son équipement électrique régulateur.

Les principaux modèles en sont fournis par le régulateur G. E. C., et le régulateur Secomet-Vastel-Stein. Nous donnons plus loin la description de ce dernier.

Régulateurs combinés à moteur d'électrode. — Si les modèles simples exposés conviennent en fait à la plupart des cas, l'obtention de caractéristiques bien déterminées et la recherche du mieux ont conduit certains constructeurs à rechercher, sur les mêmes principes de base, des appareils plus complexes ou plusieurs modalités se trouvent groupées.

C'est ainsi que dans le régulateur Secomet-Vastel, licence Stein, sont réunies l'application du redresseur statique et celle du moteur d'électrode et génératrice à plusieurs enroulements inducteurs, cependant que l'adjonction d'un redresseur de la

tension entre sole et électrode permet une montée impérative de l'électrode lorsque la tension s'abaisse au-dessous d'un minimum déterminé.

L'équation de régulation de cet appareil est de la forme différentielle améliorée :

$$U - AI - B = 0$$

et les avantages inhérents à ce mode ont été précédemment signalés.

Le régulateur (fig. 41) (1) comporte, pour chaque électrode contrôlée, un moteur J à courant continu et à excitation séparée alimenté par une génératrice N avec, éventuellement, une excitatrice O. Chaque électrode est commandée par un groupe indépendant, et chaque régulateur agit absolument comme s'il était seul, sans subir, dans les fours à deux arcs en série ou à trois arcs en étoile, l'influence des arcs en série avec celui qu'il règle. Le moteur tournera dans un sens ou dans l'autre, selon le sens du flux d'excitation de la génératrice N et avec une vitesse proportionnelle à ce flux.

Les enroulements inducteurs de la génératrice N comprennent essentiellement trois parties :

- Deux enroulements shunt identiques et à action différentielle;
- Un enroulement série;

Les enroulements shunt sont alimentés de la manière suivante : l'un, K, par un redresseur statique de courant E qui débite dans l'enroulement K un courant ondulé dont la valeur moyenne est constamment proportionnelle à la valeur moyenne du courant alternatif que lui fournit le transformateur d'intensité C monté sur les conducteurs principaux de courant qui aboutissent à l'électrode commandée par le moteur J. Un transformateur statique auxiliaire D reçoit le courant du transformateur d'intensité C et l'envoie au redresseur E après l'avoir élevé à la tension convenable.

(1) M. VASTEL : Les derniers perfectionnements aux fours électriques de fusion, *Journ. Four élect.*, novembre 1934. — R. BOUTIGNY : Le four électrique à arc en aciérie et en fonderie, *Conférence à l'Ecole pratique de Dessin industriel*, 7 mars 1935, *Journal Four élect.*, mai 1935.

On remarquera, en outre, sur le schéma, que l'enroulement K est connecté à O avec une résistance importante en série, de façon que le courant dans K ne soit jamais nul.

Le second enroulement shunt de la génératrice N est alimenté par un redresseur statique de courant F qui débite dans

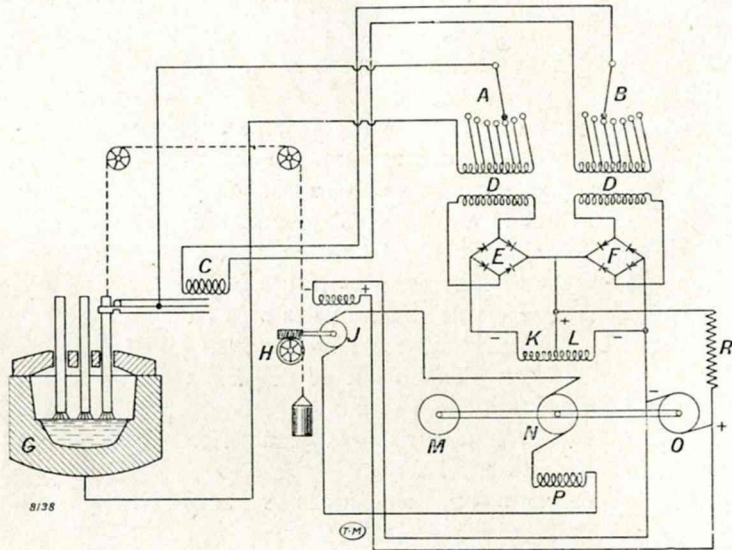


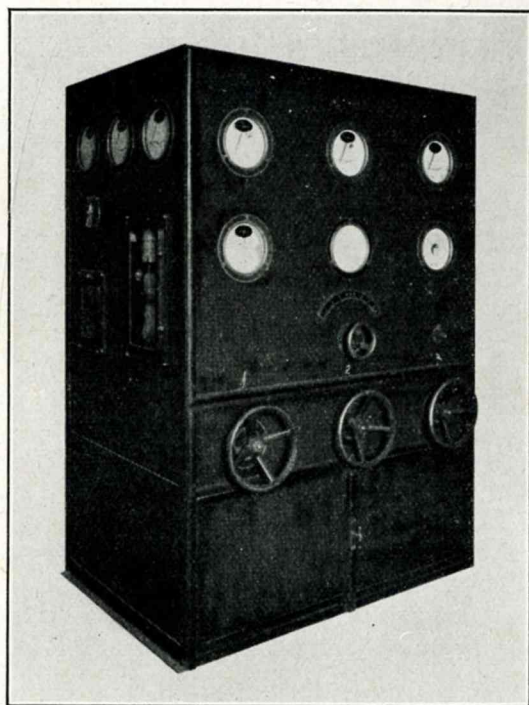
Fig. 41. — Schéma de principe (pour une électrode) du régulateur d'électrode Secomet-Vastel-Stein.

A, B, Commutateurs; — C, Transformateur d'intensité; — D, Transformateurs auxiliaires; — EF, Redresseurs statiques; — G, Four électrique; — H, Treuil de l'électrode; — J, Moteur du treuil; — KL, Enroulements shunts de N; — M, Moteur d'entraînement; — N, Génératrice de réglage; — O, Excitatrice; — P, Enroulement série de N; — R, Résistance.

cet enroulement un courant ondulé dont la valeur moyenne est constamment proportionnelle à la différence de tension entre l'électrode commandée par le moteur J et la sole du four, c'est-à-dire à la tension exacte de l'arc à régler; le transformateur auxiliaire D a pour but d'amener ce courant à la tension convenable pour l'alimentation du redresseur Rb.

Les connexions sont établies pour que les courants circulent

dans K et L produisent des champs magnétiques de sens opposés, il existera donc, de toute évidence, une relation entre l'intensité dans l'électrode I et la tension de l'arc U pour laquelle l'excitation de la génératrice N sera nulle et, par suite, le moteur J immobile.

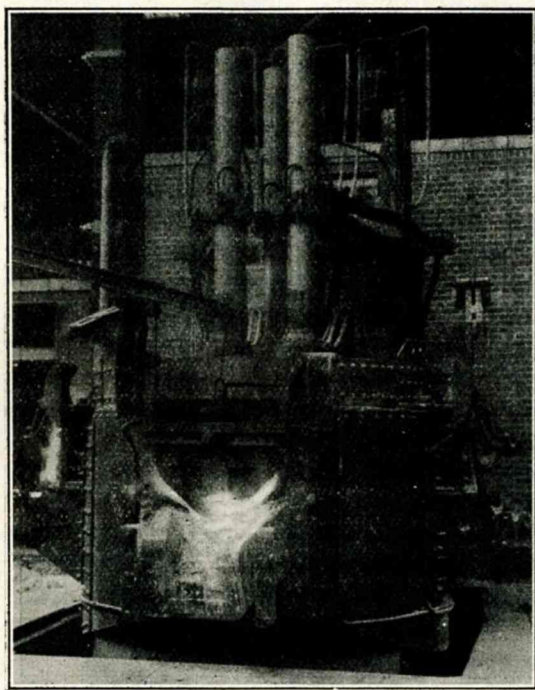


Cliché Stein-Roubaix.

FIG. 42. — Armoire de régulateur « Secomet-Vastel-Stein ».

Si, partant de l'état du four correspondant à cette relation entre I et U on suppose U constant et I ayant augmenté, la génératrice N est excitée, car le flux produit par l'enroulement K devient prépondérant, le moteur J est alimenté et tourne dans un sens que l'on fait correspondre à la montée de l'électrode, donc à un retour vers la relation d'équilibre.

La vitesse du moteur J est, en outre, d'autant plus grande que l'augmentation de I aura été grande elle-même; cette vitesse diminue au fur et à mesure que la variation de I est réduite par le mouvement de l'électrode et devient nulle lorsque la correction est terminée.



Cliché Stein-Roubaix.

FIG. 43. — Four de 3 tonnes pour aciers de moulage.
P = 900 kilovolt-ampères. Régulation automatique Secomet-Vastel.

Si l'on considère, au contraire, I comme ayant diminué, c'est le flux produit par l'enroulement L qui devient prépondérant, l'excitation de la génératrice N est en sens inverse de celui qui s'est produit dans le cas précédent, et le moteur J tourne aussi en sens inverse, l'électrode descend et l'on revient, comme

précédemment, à la relation d'équilibre. On a supposé, ci-dessus, que U était constant, ce qui n'est vérifié que dans le cas où le four possède une arrivée de courant dans la sole.

Ce n'est pas le cas de beaucoup de fours qui possèdent, soit deux électrodes en série, soit trois électrodes en étoile, sans aucune arrivée de courant dans la sole; dans ces cas, les variations de résistance des arcs sont accompagnées de variation de la tension de chaque arc.

Ces variations sont la conséquence du montage des arcs en étoile avec point neutre non connecté.

Si l'on considère trois arcs en étoile, I, II, III, de même longueur, donc de même résistance, et que l'on fasse varier la résistance de l'un d'eux (I) en la diminuant par exemple :

Dans l'arc I, dont la résistance a diminué, l'intensité augmente et la tension diminue;

Dans les deux arcs II et III, dont la résistance n'a pas varié, l'intensité augmente, mais la tension augmente aussi.

On voit donc que, par le jeu des excitations dans les génératrices N, les variations de la tension et de l'intensité ajouteront leurs effets pour la correction de la variation de résistance de l'arc I et que les variations opposeront leurs effets pour les arcs II et III. Seule l'électrode correspondant à l'arc dont la longueur a varié se trouve déplacée par l'action des régulateurs.

Examinons maintenant l'action des régulateurs dans quelques cas particuliers.

a) **Manque de tension.** — Si le courant d'alimentation du four est coupé, les deux redresseurs E et F ne débitent plus aucun courant, seule l'excitatrice O débite dans K un faible courant qui a pour résultat de faire remonter lentement l'électrode et de l'éloigner de la charge.

b) **Contact d'une électrode et de la charge.** — C'est le cas de l'amorçage des arcs : une première électrode vient au contact de la charge alors que les autres sont encore trop éloignées pour que les arcs puissent jaillir, puis, les autres électrodes s'étant suffisamment rapprochées, les arcs s'amorcent et la première électrode remonte.

La période entre le moment où la première électrode vient

en contact de la charge et le moment où les arcs s'amorcent est une période critique.

En effet, si la charge est solide, l'électrode peut se briser sur elle; si la charge est déjà liquide, l'électrode peut pénétrer dans le bain et le carburer.

Ces risques n'existent pas avec le régulateur Secomet-Vastel, car si l'électrode touche la charge, la différence de tension entre l'électrode et la charge U devient nulle, donc le courant d'excitation devient nul dans l'enroulement L de la génératrice N , et le mouvement de descente de l'électrode ne se continue pas, car, au contraire, le courant débité par la génératrice O dans l'enroulement K tend à faire remonter l'électrode.

En définitive, l'électrode s'arrête dès qu'elle réalise le contact électrique avec la charge, et il suffit pour cela qu'elle touche un copeau ou qu'elle frôle le laitier.

Un tel régulateur est précis, car le démarrage et le freinage du moteur sont très francs, grâce à la commande Leonard. Il est simple, robuste et ne nécessite qu'un minimum d'entretien.

Dans de tels régulateurs et, en général, dans tous ceux à régulateurs statiques, il convient de noter que les redresseurs « oxy-métal » ont marqué un net progrès sur les lampes « Tungar ». Elles permettent, en effet, la suppression du transformateur de chauffage, ce qui simplifie l'installation et son entretien; elles ne « vieillissent » pas et le système demeure d'une plus grande constance dans le temps; elles sont plus robustes et d'aspect plus « industriel »; enfin elles donnent la possibilité d'employer des intensités plus grandes dans les induits des génératrices, d'où augmentation sensible de la puissance et de la sensibilité du régulateur (1).

(1) R. SEVIN : Un four électrique à arc dans Paris, *Journ. Four Elect.*, n° 9, septembre 1936.

CHAPITRE VII

RÉGULATEURS A COMMANDE HYDRAULIQUE DES ÉLECTRODES

La commande hydraulique des électrodes est, comme nous l'avons dit, précise, impérative, robuste, rapide. Ces avantages ont dirigé vers ce mode plusieurs constructeurs, et nous signalerons à titre d'exemple quelques-unes des principales réalisations en ce domaine.

1° Régulateur « Arca ». — Le régulateur « Arca » (fig. 44) est un régulateur de courant à commande hydraulique et par servo-moteur des électrodes. Les variations du courant dans l'électrode produisent des attractions correspondantes et différentes entre les armatures fixe et mobile d'un électro-aimant m dont les déplacements sont transmis par un levier L à un tampon J obturant plus ou moins un orifice ouvert sur le distributeur. Ce dernier est sou-

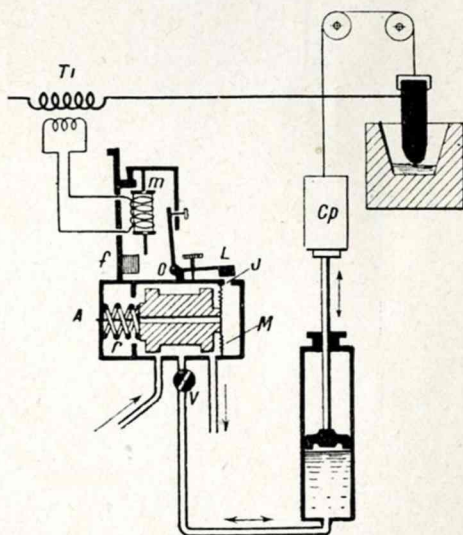


FIG. 44. — Schéma de principe du régulateur « Arca ».

mis, d'une part, à l'action d'un ressort r et, d'autre part, à l'action de la pression d'eau sur une membrane M . Selon que l'un ou l'autre de ces organes agit avec le plus de force, le distributeur est déplacé : vers la droite, en mettant le cylindre à l'évacuation, tandis qu'un contrepoids Cp remonte l'électrode; ou vers la gauche, ce qui a pour effet de mettre le cylindre à l'admission et de faire descendre l'électrode.

Un robinet permet de régler la vitesse du piston, et un dis-

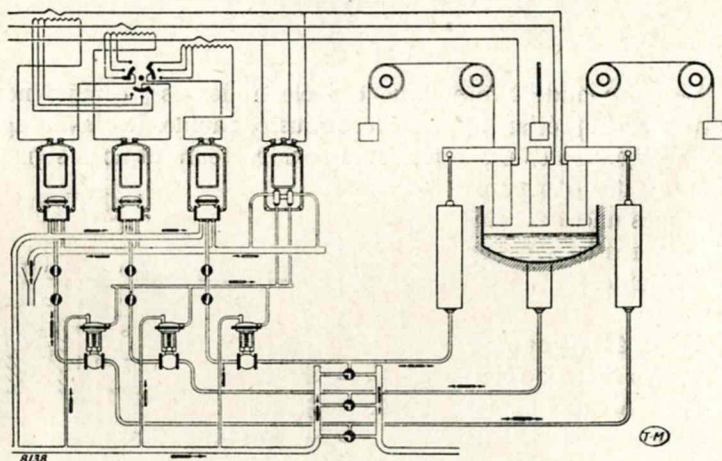


FIG. 45. — Réglage d'électrodes de fours Héroult par régulateur « Arca ».

positif de passage de la régulation automatique à la régulation à main est prévu, de même que les dispositifs habituels de sécurité.

Le réglage est très sensible en raison du faible déplacement du levier du relais nécessaire pour provoquer le mouvement de l'électrode qui est de l'ordre du centième de millimètre (sensibilité $\pm 2\%$). La pression d'eau de service est de 1 à 4 kilogrammes par centimètre carré. Ce système prévoit un régulateur complet pour chaque électrode.

Les figures 45 et 46 montrent l'application de ce système

à un four triphasé genre Héroult d'une part, et, d'autre part,

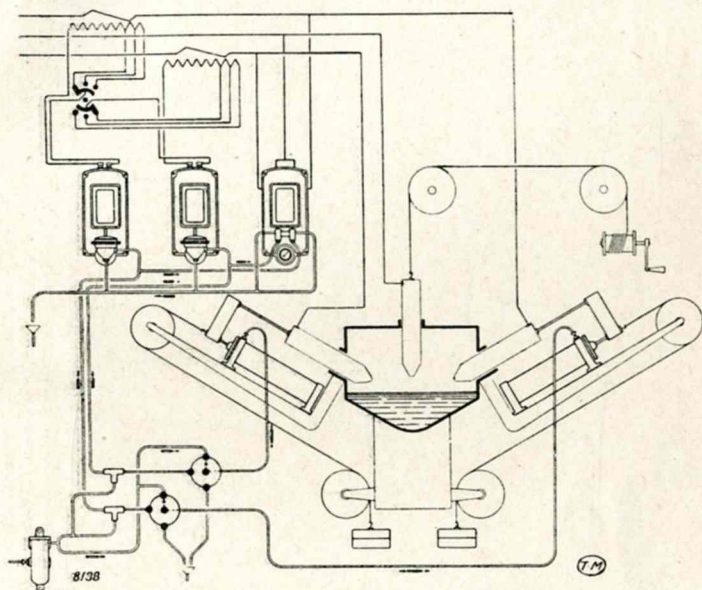


FIG. 46. — Réglage d'électrodes de four Rennerfelt par régulateur « Arca ».

à un four diphasé du type Rennerfelt à trois électrodes et arc en fleur de lis.

2° Régulateur hydro-électrique Brown-Boveri et C^{ie}.

— Ce régulateur est un régulateur à commande des électrodes par piston hydraulique qui effectue la régulation soit à intensité de courant constante, soit à puissance constante (1).

Dans le premier cas, qui est le plus fréquemment réalisé avec cet appareil (fig. 47 et 48), le courant qui traverse l'électrode fait varier, par l'intermédiaire d'un transformateur d'intensité à prises multiples 4, un champ tournant qui tend à entraîner le

(1) E. DE MULINEN : Fours électriques système Brown-Boveri à réglage électro-hydraulique des électrodes, *Le Génie Civil*, 11 août 1928.

RÉGULATION DES FOURS ÉLECTRIQUES

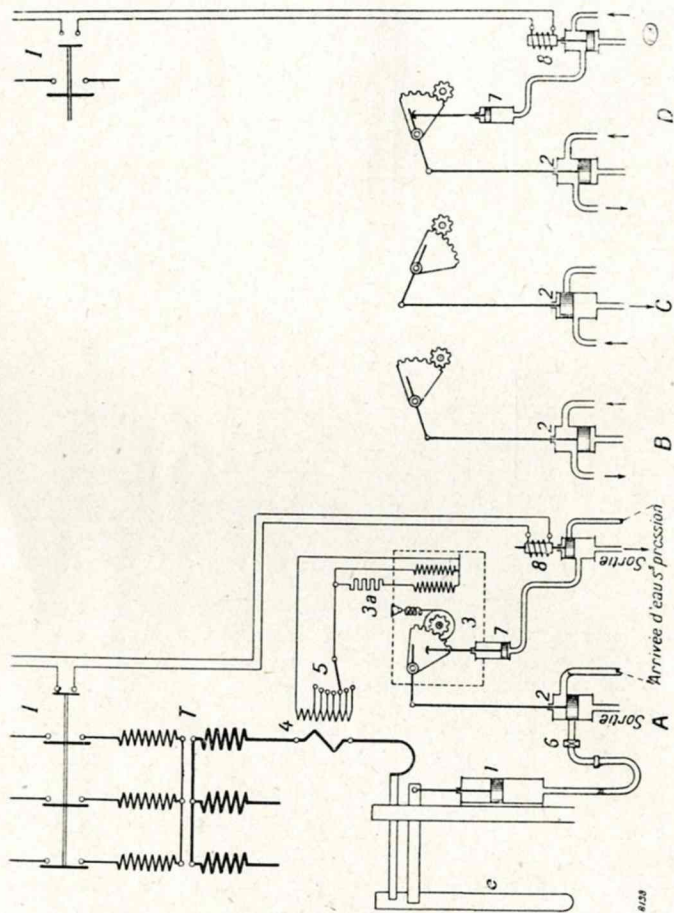


Fig. 47. — Four de fusion à arcs. — Réglage et remontée automatique d'une électrode (système BBC-CEM).

1, Interrupteur automatique principal; — T, Transformateur de puissance; — c, Électrode; — 1, Cylindre et piston d'actionnement de l'électrode; — 2, Distributeur; — 3, Régulateur à action rapide; — 3 a, Résistance; — 4, Transformateur d'intensité à prises multiples; — 5, Commutateur; — 6, Soupape de retenue; — 7, Cylindre et piston auxiliaire du régulateur; — 8, Electro-valve.

A, *Électrode immobile* (courant correspondant au réglage); — B, *L'électrode monte* (courant trop fort); — C, *L'électrode descend* (courant trop faible); — D, *Remontée de l'électrode* (courant coupé par l'interrupteur 1).

tambour du régulateur 3 (fig. 47 et 49); l'action de ce champ est

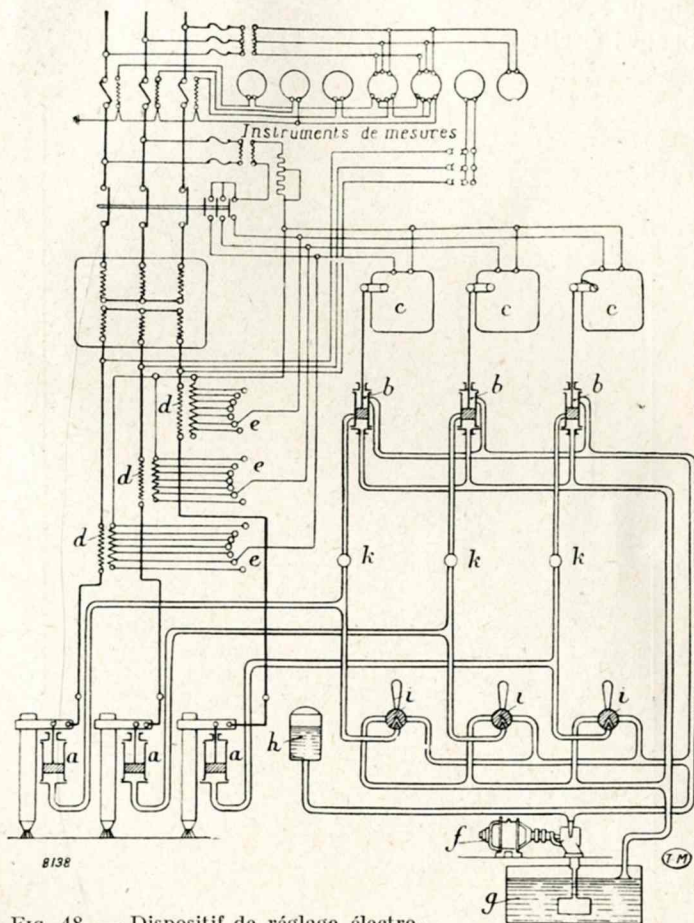


FIG. 48. — Dispositif de réglage électro-hydraulique des électrodes Brown-Boveri sur four Héroult triphasé.

a, Cylindres et piston d'actionnement des électrodes; — *b*, Distributeurs; — *c*, Régulateurs; — *d*, Transformateurs d'intensité; — *e*, Commutateurs; — *f*, Électropompe; — *g*, Réservoir; — *h*, Cloche à air; — *i*, Soupapes de commande à main; — *k*, Robinets isolant les distributeurs.

contrariée par celle d'un ressort antagoniste et les mouvements

du tambour sont transmis par un secteur denté au piston distributeur 2.

Chaque électrode est commandée séparément par un système

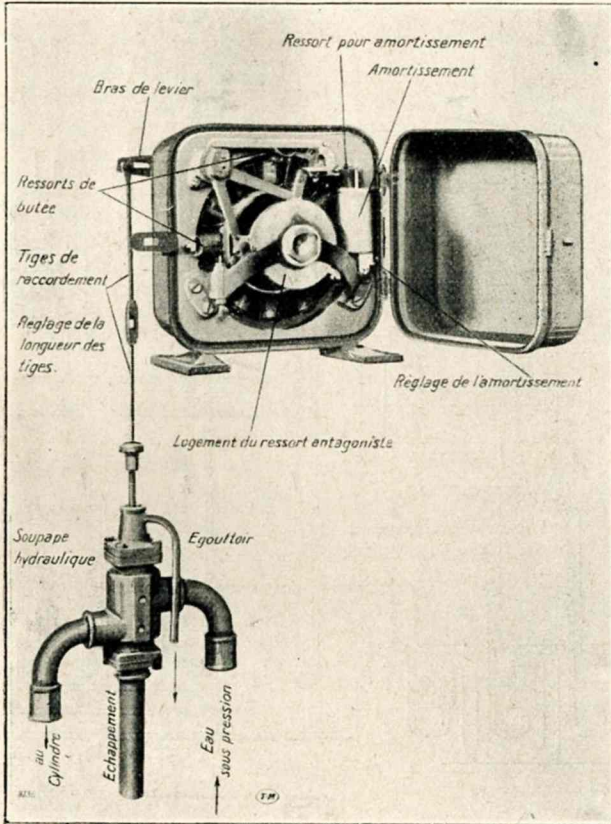


FIG. 49. — Régulateur à action rapide BBC.

hydraulique qui comprend le cylindre d'actionnement de l'électrode 1, la soupape de retenue 6, le distributeur 2, le régulateur 3 et son transformateur d'intensité à prises multiples 4. En outre, un commutateur 5 permet de changer en marche le

rapport de transformation du transformateur 4 et de fixer à volonté la valeur de l'intensité adoptée comme base de réglage. Lorsque l'intensité de l'arc correspond à celle fixée pour le

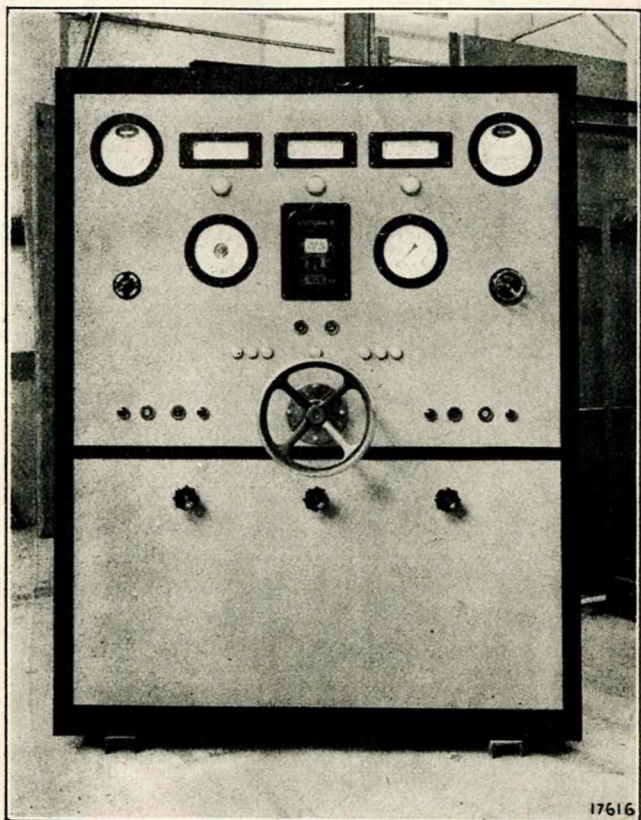


Fig. 50. — Tableau de réglage automatique des électrodes pour four triphasé type Hérault (Brown Boveri et Cie, C. E. M.).

réglage, le régulateur 3 est en équilibre. Le distributeur 2 isole le cylindre 1 et l'électrode reste immobile.

S'il y a surintensité, le régulateur 3 fait descendre le distributeur 2; le cylindre 1 est mis en communication avec la conduite

d'eau sous-pression alimentée par le groupe moto-pompe *f* (fig. 48) ; la soupape de retenue 6 ne s'oppose pas au passage de l'eau et l'électrode monte.

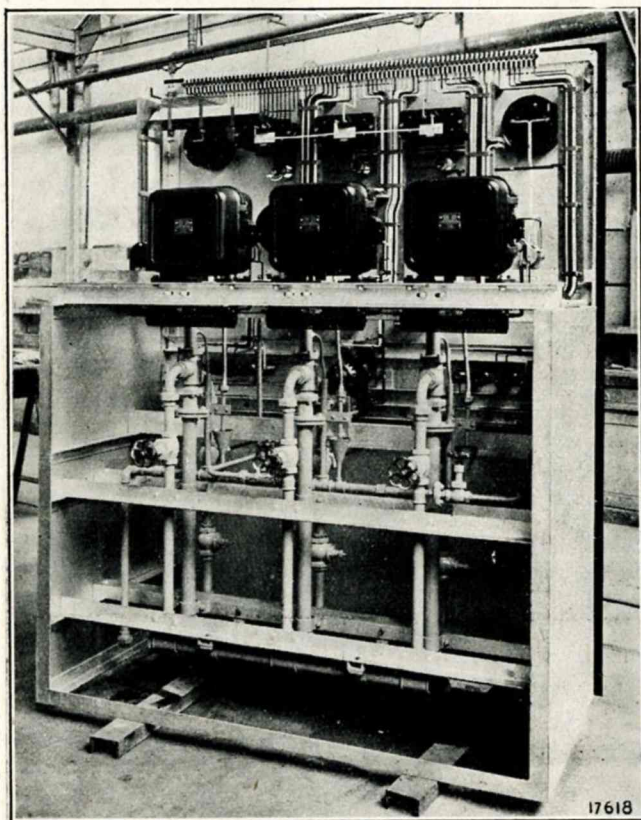


FIG. 50 bis. — Vue arrière du même tableau.

Si l'intensité vient à diminuer, le régulateur 3 fait monter le distributeur 2 ; le cylindre 1 est mis en communication avec la tuyauterie d'évacuation ; l'électrode descend sous l'effet de son poids et de celui du porte-électrodes. La vitesse est réglée par la soupape de retenue 6 qui s'oppose au passage de l'eau.



Quand le transformateur principal n'est plus sous tension, l'électro-valve 8 n'est plus alimentée; le piston 7 remonte et oblige le régulateur 3 à abaisser le distributeur 2. L'électrode remonte ainsi automatiquement. En période de marche, l'électro-valve 8 est sous tension et met à l'évacuation le cylindre 7. Le piston retombe et laisse libre le mouvement du régulateur.

Des contacts portés en bout d'arbre de l'interrupteur 1 commandent l'alimentation de l'électro-valve 8.

Les électrodes peuvent être également commandées à la main au moyen des soupapes à trois voies *i* (fig. 48), il suffit de fermer au préalable les robinets *K* pour passer du réglage automatique au réglage à main.

La pression d'eau préconisée pour le réglage électro-hydraulique par cet appareil varie entre 5 et 15 atmosphères et la consommation globale d'eau est faible (par exemple 100 à 500 litres par tonne d'acier fondu et affiné, selon la capacité du four et le mode de fusion). On peut donc réaliser le branchement d'une telle installation sur la plupart des réseaux normaux d'alimentation d'eau.

Toutefois, si le débit ou la pression de l'eau étaient insuffisants ou si l'eau, étant calcaire ou ferrugineuse, laissait de forts dépôts, il serait préférable d'installer un petit groupe moto-pompe (fig. 48) permettant d'utiliser toujours le même liquide en circuit fermé. On prévoit alors un réservoir *g* et une cloche d'air *h*. Cette cloche a pour double but de régulariser la pression et de servir, grâce à l'air comprimé au-dessus du liquide, de réserve d'énergie suffisante pour permettre de relever les électrodes en cas de manque général de courant.

Le régulateur BBC. permet un réglage rapide et sans oscillation avec une vitesse de déplacement des électrodes proportionnelles à l'écart du courant à régler. En outre, les vitesses maxima de montée et de descente des électrodes sont indépendantes l'une de l'autre et peuvent être judicieusement choisies. Le réglage peut se faire sur charge froide et le facteur de puissance demeure élevé.

Sur un four triphasé à trois électrodes, le montage de ce système sera, par exemple, celui de la figure 48.

Le réglage à intensité présente l'inconvénient de ne pas permettre une marche en monophasé avec deux arcs en série, la tension pouvant se répartir d'une façon quelconque entre ces deux arcs. Il ne permet pas non plus d'arrêter une électrode à la surface du bain.

Pour obvier à ces inconvénients, il est nécessaire d'influencer le régulateur, non seulement par l'intensité, mais encore par la

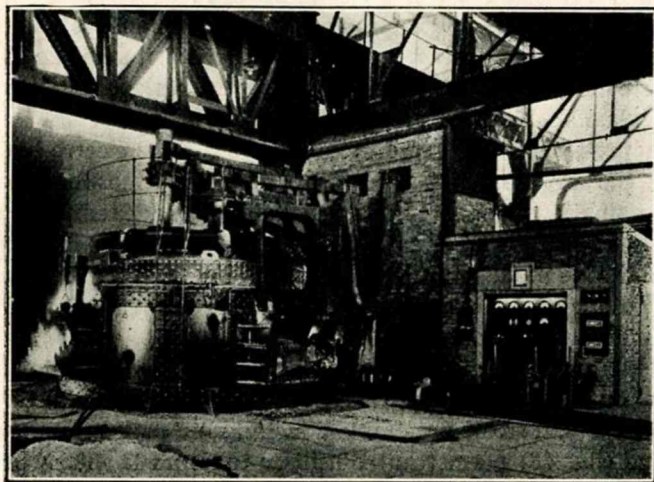


FIG. 51. — Four triphasé Héroult d'aciérie (Brown-Boveri. C. E. M.).
A droite, tableau de régulation (voir le dos de ce tableau sur la figure 51 bis).

tension de l'arc. La Société Brown-Boveri a réalisé ainsi des réglages différentiels, à tension et intensité, pour fours monophasés et triphasés, en utilisant toujours le régulateur à action rapide et la commande hydraulique de l'électrode, comme dans le réglage à intensité.

Une partie de l'enroulement du régulateur est utilisée uniquement comme excitation et alimentée à tension fixe; l'autre partie est parcourue par un courant, fonction de la différence de la tension de l'arc et d'une tension proportionnelle à l'intensité.

Au point de vue fonctionnement, tout se passe comme s'il était

appliqué sur le rotor du régulateur un couple proportionnel à la tension et un couple inverse proportionnel à l'intensité. Le couple tension tend à faire descendre l'électrode et le couple intensité à la

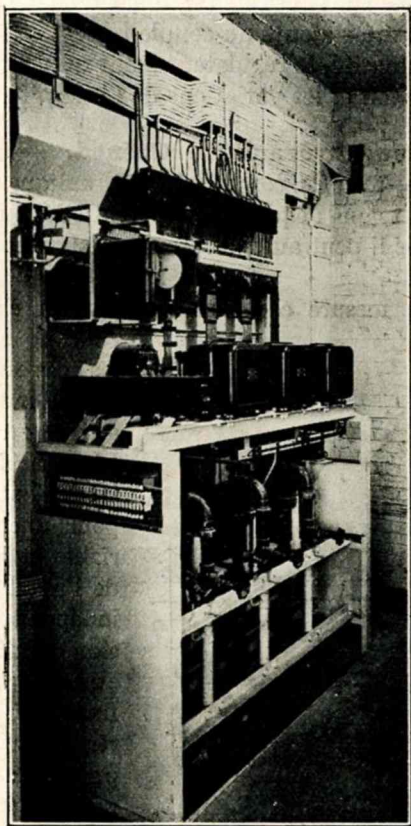


FIG. 51 bis. — Vue intérieure de la cabine de régulation dont le devant du tableau figure à droite sur la figure 51.

faire monter. Le ressort du régulateur s'oppose au couple tension c'est-à-dire tend à faire remonter l'électrode.

Quand l'électrode n'est pas sous tension, le ressort fait remonter automatiquement l'électrode. Quand on met sous tension, le

couple tension l'emporte sur le ressort : l'électrode descend et s'immobilise à la surface de la charge ou du bain, position pour laquelle la tension tombe à une valeur assez faible pour que le ressort l'emporte sur le couple tension. Lorsque l'arc est amorcé, le couple intensité s'ajoute au couple ressort et le système règle à tension et intensité, le régulateur étant influencé par les variations de la tension et les variations de l'intensité.

3° Régulateur hydraulique Cuénod. — Le régulateur Cuénod réalise, avec la commande hydraulique des électrodes, la régulation selon l'équation différentielle ou à impédance constante, mais il peut aussi être disposé simplement à intensité constante (1).

L'organe de mesure est constitué par un électro-aimant à

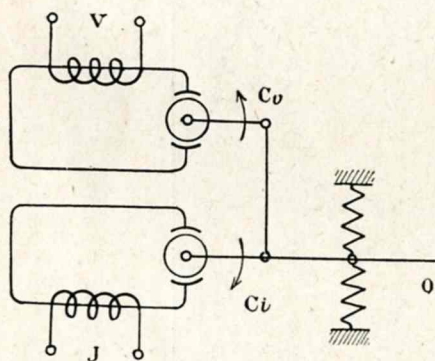


FIG. 52. — Schéma de montage pour régulation d'impédance.

courant alternatif entre les bords duquel peut tourner un induit muni d'une spire en court-circuit. L'organe à régler, l'électrode, est immobilisé pour une position invariable et bien déterminée de l'induit du solénoïde, indépendante de la pression d'huile ou d'eau; les conditions électriques fixant cette immobilité du régulateur ne sont donc pas influencées par la position du rotor du solé-

noïde, puisque ce dernier se retrouve alors toujours exactement dans la même position.

S'il s'agit de mesurer l'impédance (fig. 52), il est prévu deux solénoïdes identiques, jumelés, et maintenus par deux ressorts

(1) S. HEULAND : Le four électrique en sidérurgie, *La Technique Moderne*, 15 janvier 1934. — M. DÉRIBÉRE : La régulation des fours électriques, *Rev. Gén. Electricité*, t. XL, n° 13, 26 septembre 1936.

en opposition. Lorsque les solénoïdes sont sans courant, tous deux, les deux ressorts sont tendus de façon que le levier se trouve dans la position moyenne (position d'immobilité des électrodes). L'un des solénoïdes est sous la tension U et l'autre est parcouru par le courant I dans l'électrode et chacun d'eux

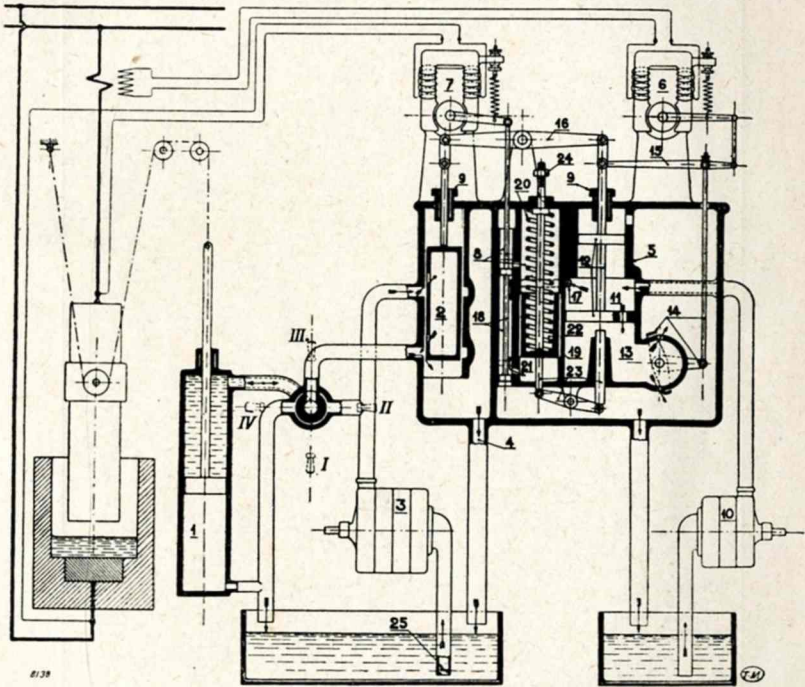


FIG. 53. — Schéma du régulateur haute fréquence hydraulique Cuénod.

créée sur le rotor correspondant un couple proportionnel, le premier au carré de la tension et le deuxième au carré du courant; ces couples sont de sens opposé. Pour la position moyenne, les ressorts sont sans effet et les couples sont égaux; si U ou I varie, c'est-à-dire si l'impédance varie, l'un des couples l'emporte sur l'autre et le système mobile subit une rotation d'un certain angle; les ressorts assurent la stabilité du dispositif.

Voici, en résumé, le fonctionnement de ce régulateur dans

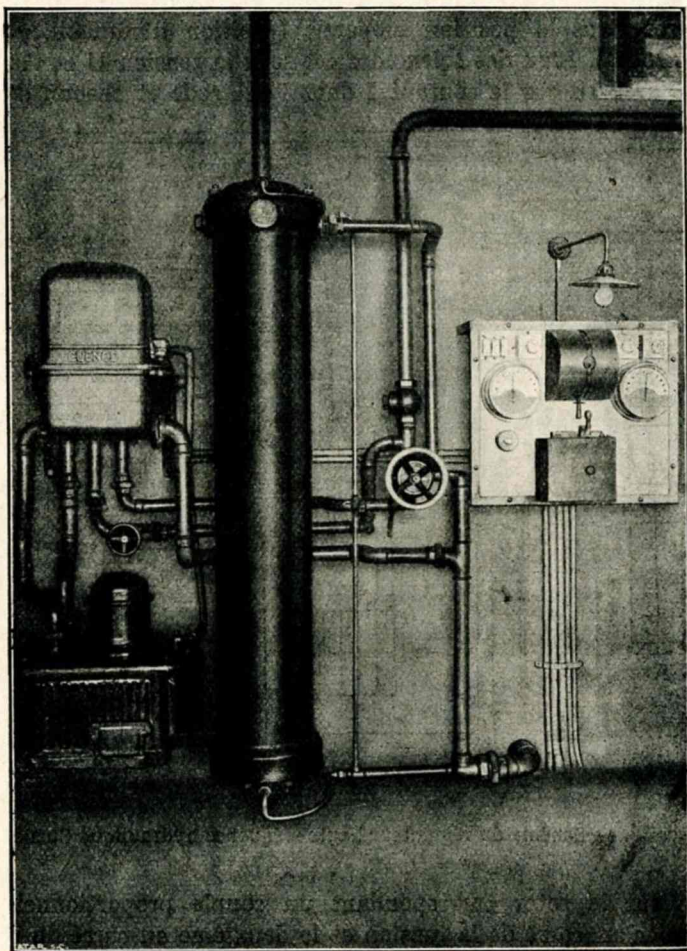


FIG. 54. — Vue d'une installation type (régulateur Cuénod haute fréquence-Genève).

le cas le plus simple du courant continu, agissant sur le système par l'intermédiaire de l'électro-aimant 6 (fig. 53). A l'état d'équi-

libre, c'est-à-dire lorsque le courant est normal, cet électro-aimant donne une position précise aux leviers 15 et une fuite déterminée à la cataracte 14, d'où il résulte dans les chambres 11 et 13 des pressions telles que le piston 12 est lui-même en équilibre;

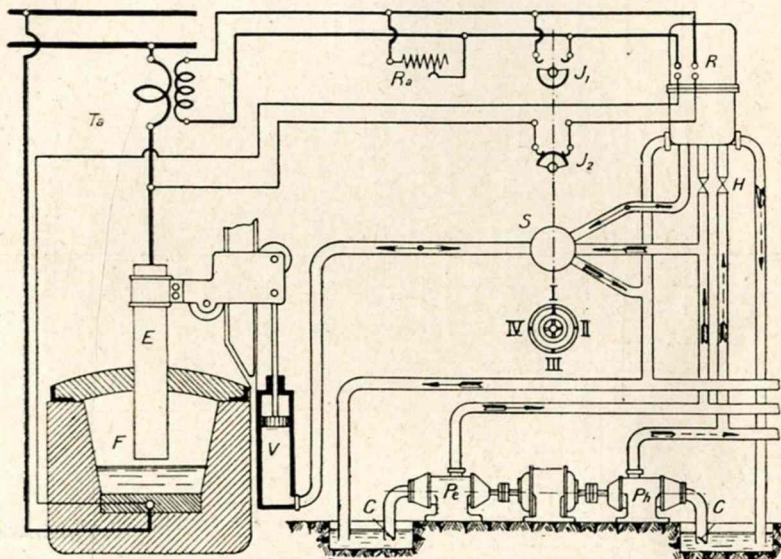


FIG. 55. — Schéma de réglage de l'intensité d'un four électrique (schéma pour une électrode).

F, Four; — V, Vérin; — R, Régulateur; — S, Vanne de commande à main et blocage hydraulique : I. Position réglage automatique; II. Position montée; III. Position arrêt; IV. Position descente; — E, Électrodes; — Ta, Transformateur intensité; — Ra, Résistance ajustage intensité; — I₁, Interrupteur de court-circuit; — I₂, Interrupteur du blocage; — H, Vannes; — Pe, Pompe à eau; — Ph, Pompe à huile; — C, Clapet de pied.

le piston 2 ferme à ce moment les lumières du distributeur d'eau : ainsi l'électrode est immobile.

Si le courant absorbé par le four augmente, l'effort fourni par le solénoïde augmente aussi et provoque une diminution de section de la cataracte 14, par conséquent une augmentation de pression dans la chambre 13 par rapport à la chambre 11, donc un mouvement de bas en haut du distributeur 12, et

de haut en bas du piston 2, qui met en relation la pompe 3 et le vérin 1 : l'électrode monte.

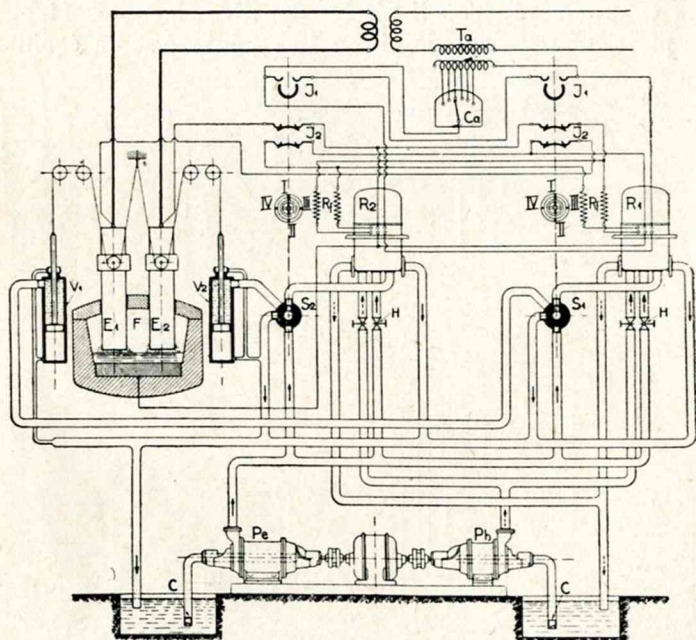


FIG. 56. — Schéma de réglage automatique de l'intensité et de la tension d'un four à deux électrodes série.

F, Four; — E₁ E₂, Électrodes; — V₁ V₂, Vérins; — Ta, Transformateur intensité; — R₁ R₂, Régulateurs; — Ca, Commutateur ajustage intensité; — R_f, Résistances fixes; — S₁ S₂, Vannes de commande à main et blocage hydraulique; — I, Position réglage automatique; — II, Position montée; III, Position arrêt; IV, Position descente; — II, Interrupteurs de court-circuit; — II, Interrupteurs des blocages; — H, Vannes; — Pe, Pompe à eau; — Ph, Pompe à huile; — C, Clapet de pied.

Enfin, si l'intensité du four décroît, le ressort antagoniste du solénoïde provoque une augmentation de la fuite de la chambre 13, un abaissement de la pression dans cette dernière, un déplacement de haut en bas du piston 12, de bas en haut du piston 2, qui ferme l'orifice de la pompe 3, mais ouvre le vérin sur la décharge 4 : l'électrode descend par son propre poids.

Le régulateur HD ne diffère du précédent que par le fait

COMMANDE HYDRAULIQUE DES ÉLECTRODES

qu'il possède un distributeur d'eau 2 à quatre voies, permettant l'envoi d'eau sous pression de part et d'autre du piston, des vérins ou de la palette des servo-moteurs.

Ces régulateurs peuvent être utilisés dans les divers types : tension, intensité, puissance ou impédance constante.

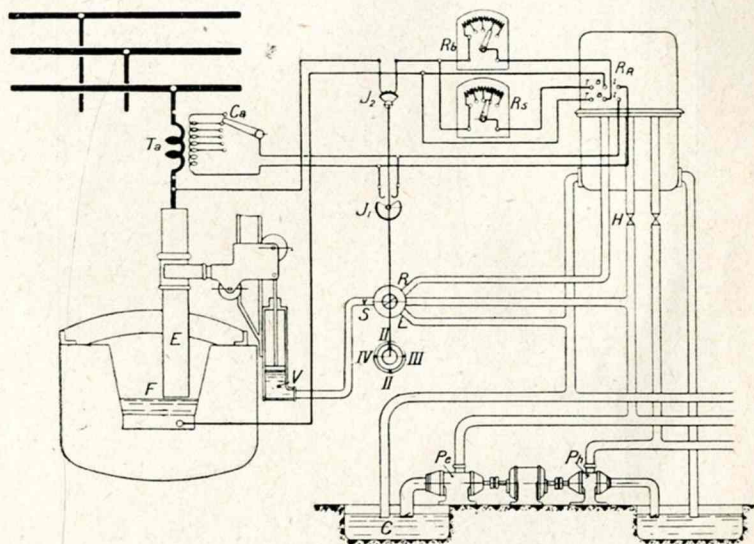


Fig. 57. — Schéma de réglage automatique d'impédance d'un four triphasé (schéma pour une électrode avec régulateur Cuénod haute fréquence).

F, Four; — E, Électrode; — V, Vérin; — Ta Transformateur intensité; — Ca, Commutateur ajustage; — R, Régulateur; — S, Vanne de commande à main et blocage hydraulique; — I, Position arrêt; II, Position montée; III, Position réglage automatique; IV, Position descente; — Rb Rs, Résistance d'ajustage; — C, Clapet de retenue; — Ph, Pompe à huile; — Pe, Pompe à eau; — H, Vannes à main.

Le réglage à intensité constante est simple et, par suite, souvent retenu. Il est avantageux pour le fournisseur d'énergie, le four faisant volant lors des variations de tension du réseau de distribution.

Si ces variations sont importantes et que l'utilisateur tiende à un débit régulier de son four, le réglage à puissance constante sera à retenir.

Quant au réglage d'impédance, il est précieux dans certaines fabrications.

Pour un réglage simple à intensité constante sur four à une

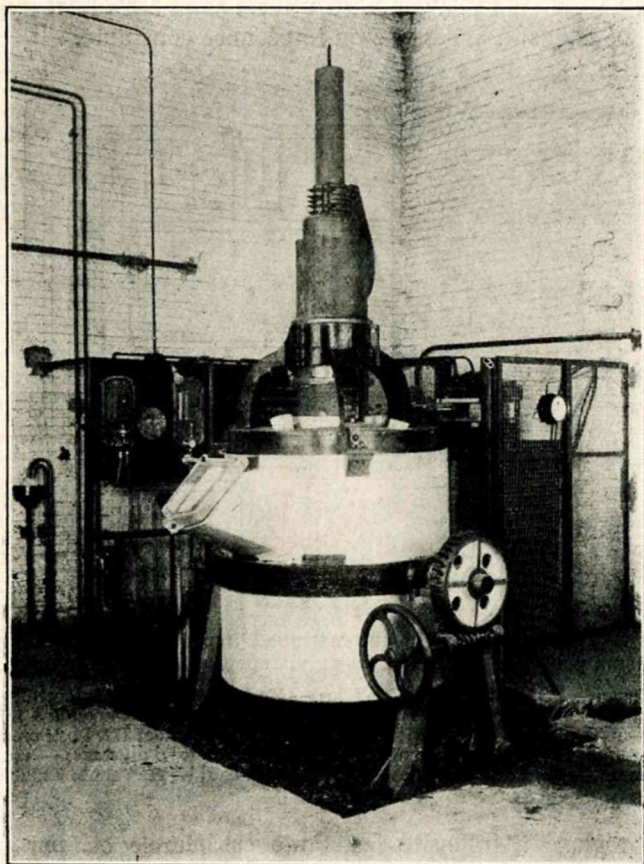


FIG. 58. — Vue d'un four à arc monophasé sans potence système Heuland. Capacité 500 kilogrammes. Régulation sur équipement étanche de l'électrode.

électrode, le montage sera celui de la figure 55. Le même montage pourra être appliqué séparément aux électrodes de fours

biphasé à deux électrodes ou triphasé à deux ou trois électrodes.

Pour un four monophasé à deux électrodes en série et sole conductrices, toutefois le réglage de l'intensité seule ne peut convenir, car il est nécessaire de réaliser en plus un partage égal de la tension sous chaque électrode. On réalisera alors le schéma de la figure 56 qui donne une solution de ce problème, chaque régulateur intervenant pour corriger, non seulement les variations de l'intensité, mais encore la tension sous chacune des deux électrodes qui restent soumises à l'action du blocage électromagnétique.

La figure 57, enfin, montre le schéma de réglage d'impédance de l'arc sur four triphasé.

4° Four sans potence. — Avant de clore ce chapitre des régulateurs à commande hydraulique des électrodes, nous devons encore mentionner le four sans potence créé par S. Heuland et qui comporte une régulation des électrodes par régulateur agissant sur l'ensemble de l'équipement étanche de l'électrode (1).

Par l'application de ce dispositif, une régulation plus rapide se trouve réalisée pour un même régulateur.

(1) S. HEULAND : *Journ. Four élect.*, février et mars 1935.



CHAPITRE VIII

RÉGULATION PAR VARIATION DE TENSION

Problème général de la régulation par variation de tension. — Le déplacement des électrodes entraînant une dépense d'énergie, un matériel relativement coûteux et délicat et, parfois, des inconvénients pour la fabrication (chutes de matières, difficulté de clore le four, etc.), on a recherché un moyen pratique de régler les fours à arcs en maintenant l'électrode fixe, et ceci a pu être réalisé par une régulation de la tension appliquée aux bornes du four (1).

Si on considère ce mode de réglage par rapport à ceux qui mettent en jeu le déplacement des électrodes, on verra que d'autres avantages en résultent en dehors de ceux précités. En effet, le déplacement des électrodes ne permet pas d'atteindre des puissances très élevées, ni d'obtenir des variations importantes de régime, puisque ces points sont limités par la condition d'un facteur de puissance égal ou supérieur à 0,707 qui doit être satisfaite pour que le rendement du four soit satisfaisant.

Or, pour un four donné, et quel que soit son régime, le facteur de puissance est invariable si la résistance du circuit est elle-même invariable.

Le procédé permet aussi de suivre la tendance actuelle dans l'utilisation des fours puissants adaptés aux disponibilités des réseaux, c'est-à-dire avec marche à facteur de puissance constant (résistance constante et électrode fixe quel que soit le régime).

(1) M. BERGEON : Le réglage des fours électriques par variation de tension *Bull. Soc. française des Electriciens*, t. X, p. 1 057, octobre 1930.

L'idée n'est pas à proprement parler nouvelle, car les transformateurs pour fours électrometallurgiques ont été munis depuis longtemps de prises destinées à faire choix d'une tension convenable. L'application a consisté à multiplier ces prises en étendant leur gamme et en prévoyant leur changement simple et rapide, ce qui permettra une marche très régulière sur un niveau de fusion optimum, une limitation du nombre des servo-moteurs, une diminution de l'usure d'électrode et, comme nous avons dit, un facteur de puissance constant et une régulation sur une large échelle de puissance. Les commutateurs de prises sont munis d'un dispositif permettant leur manœuvre en charge. Le réglage se fait du côté de la haute tension. Ainsi un four de 15.000 kilowatts pourra avoir cinquante-cinq prises, donc cinquante-cinq échelons de réglage sur le primaire qui permettent à la tension secondaire de varier de 25 à 55 volts. Mais en réalité les prises prévues sur l'enroulement sont réduites à 7, et entre deux prises consécutives est disposé un enroulement auxiliaire ou diviseur de tension qui porte les prises nécessaires pour le réglage fin. Ces deux groupes de prises sont reliés au plot de deux combinateurs dont le principe est le suivant (fig. 59) : les prises de réglage portées sur l'enroulement E sont reliées à des plots. La liaison avec la ligne est assurée par deux balais B_1 et B_2 solidaires des interrupteurs I_1 et I_2 et assurant la coupure rapide du courant et la mise en circuit d'une résistance de passage unique R. Le passage d'une prise à l'autre comporte donc :

- 1° L'ouverture de l'interrupteur I_1 ;
- 2° La progression de B_1 de 1 à 2;

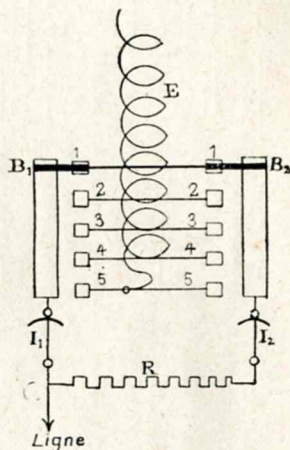


Fig. 59. — Schéma des connexions d'un commutateur de prises pour le réglage fin et manœuvrable en charge.

3° La fermeture de I_1 ;

4° L'ouverture de I_2 ;

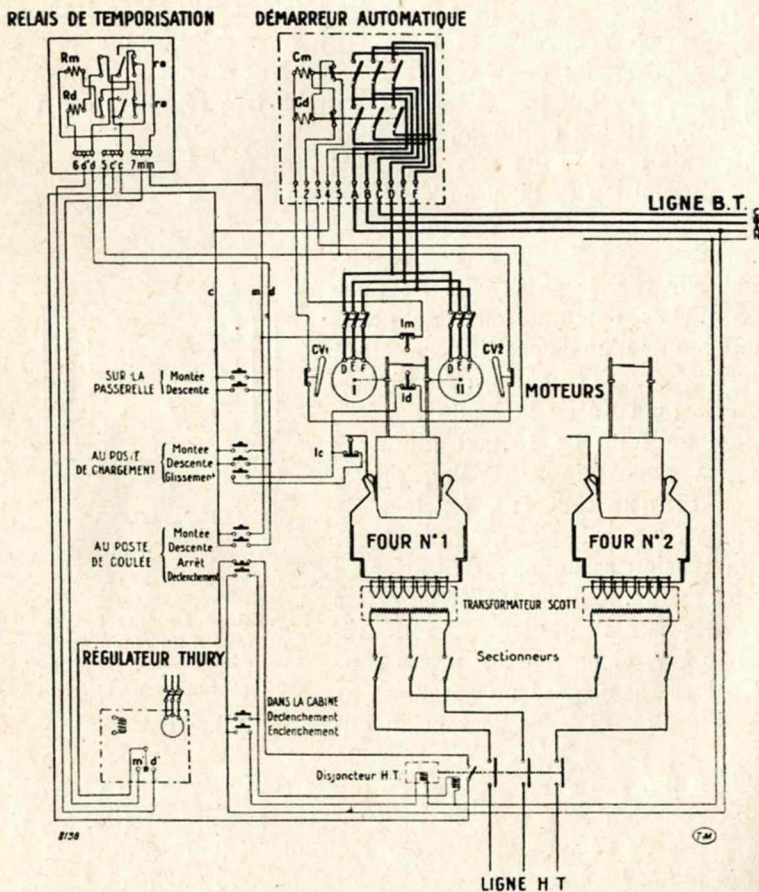


Fig. 60. — Réglage des électrodes des fours Mignet-Perron de la Societa San Marco par régulateur Thury (Télémeccanica Elettrica).

5° Le passage de B_2 de 1 à 2;

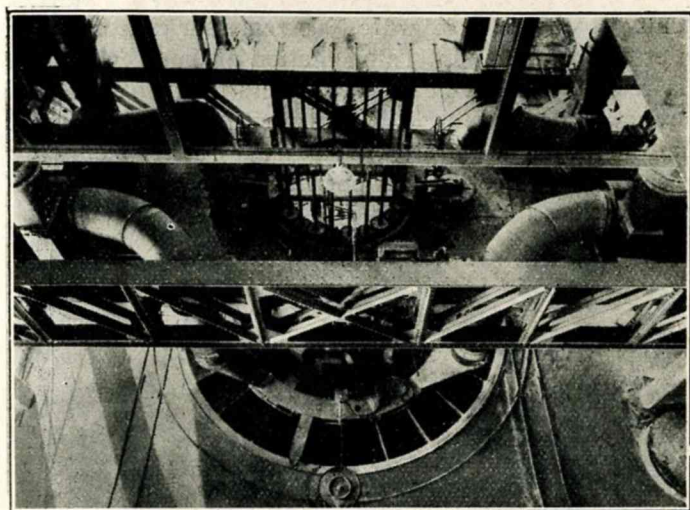
6° La fermeture de I_2 ;

ces opérations étant pratiquement réalisées par un seul

organe de commande et le déplacement des balais s'effectuant sans charge.

Quand le balai reprend contact avec le plot suivant, la résistance R se trouve mise en court-circuit et limite le courant de circulation créé par la dissymétrie due à la position des deux balais.

Applications de la régulation par variation de tension. — Ce système de réglage est appliqué aux fours Miguet-Perron



« Télémécanique-Électrique. »

FIG. 61. — Vue du dispositif de suspension de l'électrode et de son mécanisme de commande au four de la Société San Marco.

soit seul, soit associé à un autre dispositif de réglage. A propos de ces systèmes mixtes qui permettent en fait la solution de tous problèmes de régulation des fours à arc, nous donnerons, à titre d'exemple, une réalisation faite sur les fours de ce type de l'usine de carbure de calcium de la Società elettrometallurgica Veneta San Marco, à Porto Marghera, en Italie (fig. 60) (1).

(1) V. *Bulletin Télémécanique*, n° 35, 1935.

Le premier mode de réglage est celui par variation de tension, et le deuxième est celui par déplacement des électrodes au moyen du régulateur Thury. Cet appareil commande la fermeture de l'un ou l'autre des relais Rm et Rd , verrouillés entre eux électriquement et mécaniquement, et détermine, par leur intermédiaire, la fermeture correspondante des contacteurs Cm ou Cd . L'enclenchement de ceux-ci provoque la mise en marche dans le sens voulu du moteur I ou II actionnant le treuil de manœuvre de la chaîne sans fin engrenée avec les douze écrous des vis de suspension. Un relais d'accélération, à contact à ouverture retardée, est monté sur chacun des relais Rm et Rd dont il coupe l'alimentation au bout de 5 secondes et la rétablit aussitôt pour marquer des temps d'arrêt dans le mouvement de l'électrode. Ce dispositif peut d'ailleurs être shunté au moyen de barrettes reliant $d'd$, $c'c$ et mm , pour obtenir, au contraire, un déplacement obéissant d'une manière continue aux impulsions du régulateur.

POUR CONCLURE

Problème délicat et difficile, le réglage automatique des fours électriques a été résolu selon des modes d'action variés. Il s'impose en fait par des qualités primordiales que nous avons suffisamment indiquées au début de cet ouvrage pour ne pas avoir à y revenir et qui ressortent au surplus de l'évidence.

On pourra noter que, malgré leur apparente complexité, la plupart des appareils tendent vers une simplicité relative très avancée et vers une perfection de mise au point qui est particulièrement à l'honneur des constructeurs.

Il est indéniable que leur fabrication est encore en pleine évolution. Les principes généraux n'en sont pas moins établis dès maintenant sur des bases assez solides pour que nous ayons pu juger utile la publication de cette monographie d'ensemble qui pourrait paraître à certains prématurée.

Des nouveautés, comme les redresseurs oxy-métaux, ont pu amener d'intéressants progrès. D'autres suivront, ceux amenés par l'emploi de cellules photo-électriques, par exemple, mais le problème n'est déjà plus affecté dans ses grandes lignes.

C'est dans la robustesse, la simplicité de montage et la simplicité d'entretien que doivent désormais être entrevus les progrès les plus notables en matière de régulation automatique.

Ame vivante et active du four électrique, le régulateur doit être considéré comme un organe essentiel. C'est lui qui confère aux appareils qu'il contrôle : sûreté, souplesse, précision, économie. De tels avantages permettent d'amortir très rapidement le prix de son installation et il contribue puissamment, au surplus, à placer, par l'appoint précieux de ses qualités propres, le four électrique au tout premier rang des modes de chauffage industriel.



TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE, par A. Levasseur	v
---------------------------------	---

CHAPITRE PREMIER

LE PROBLÈME DE LA RÉGULATION

1° Amélioration de la fabrication.....	1
2° Économie de main-d'œuvre.....	3
3° Protection du matériel	3
4° Diminution des perturbations produites sur le réseau.....	4

CHAPITRE II

RÉGULATION PYROMÉTRIQUE ET THERMOMÉTRIQUE

1° Réglage par « tout ou rien »	5
2° Réglage par impulsions.....	6
3° Réglage proportionnel.....	7
4° Réglage continu.....	8
5° Réglage à programme.....	8
6° Réglages multiples.....	8
I. — Régulateurs thermométriques.....	9
II. — Régulateurs pyrométriques à dilatation.....	10

CHAPITRE III

RÉGULATION PYROMÉTRIQUE (suite)

RÉGULATION PYROGALVANOMÉTRIQUE ET PYROPOTENTIOMÉTRIQUE

III. — Régulateurs pyrogalvanométriques.....	19
IV. — Régulateurs pyropotentiométriques.....	23

CHAPITRE IV

L'AUTO-RÉGULATION

Équation des fours à induction à noyau magnétique.....	31
Four Ugine-Infra.....	32
Autres applications de l'auto-régulation.....	34

CHAPITRE V
PROBLÈME GÉNÉRAL DE LA RÉGULATION
PAR DÉPLACEMENT DES ÉLECTRODES

1° Régulation à tension constante.....	38
2° Régulation à intensité constante.....	38
3° Régulation à puissance constante.....	39
4° Régulation différentielle.....	39
Courbes de puissance.....	40
Mode de commande des électrodes.....	41

CHAPITRE VI
RÉGULATEURS A MOTEUR D'ÉLECTRODE

Régulateurs à moteur d'électrode simplement réversible commandé par relais et contacteurs.....	44
Régulateurs à moteur d'électrode simplement réversible et commande directe.....	47
Régulateurs à moteur d'électrode et génératrice à plusieurs enroulements inducteurs.....	51
Régulateurs à redresseurs statiques.....	54
Régulateurs combinés à moteur d'électrode.....	54
<i>a)</i> Manque de tension.....	59
<i>b)</i> Contact d'une électrode et de la charge.....	59

CHAPITRE VII
RÉGULATEURS A COMMANDE HYDRAULIQUE DES ÉLECTRODES

1° Régulateur Arca.....	61
2° Régulateur hydro-électrique Brown-Boveri et C ^{ie}	63
3° Régulateur hydraulique Cuénod.....	72
4° Four sans potence.....	79

CHAPITRE VIII
RÉGULATION PAR VARIATION DE TENSION

Problème général de la régulation par variation de tension.....	80
Applications de la régulation par variation de tension.....	83
POUR CONCLURE.....	85
TABLE DES MATIÈRES.....	86

LES FOURS ÉLECTRIQUES INDUSTRIELS ET LES FABRICATIONS ÉLECTROTHERMIQUES

PAR

J. ESCARD

Ingénieur civil
Lauréat de l'Institut

VIII-674 pages 16×25, avec 265 fig. et 40 pl. 2^e édition, 1924.
(1.540 gr.). (Relié 169 fr.). Broché. 149 fr.

LES FOURS ÉLECTRIQUES DE LABORATOIRE

ANALYSES ET INCINÉRATIONS, FUSIONS ET VOLATILISATIONS, ESSAIS
ET RECHERCHES CHIMIQUES, MÉTALLURGIQUES ET CÉRAMIQUES,
TREMPE ET TRAITEMENTS DIVERS DES MÉTAUX ET ALLIAGES

PAR

J. ESCARD

Ingénieur civil
Lauréat de l'Institut

VI-88 pages 16×25, avec 72 figures. 2^e édition, 1920. (260 gr.).
Broché 21 fr.

56^e ÉDITION

1937

AGENDA DUNOD ÉLECTRICITÉ

AIDE-MÉMOIRE PRATIQUE DE L'ÉLECTRICIEN

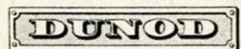
PAR

L.-D. FOURCAULT

Rédacteur en chef de l'Électricien

CXXVIII-392 pages 10×15, avec 119 fig. Relié simili-cuir. 20 fr.

92, RUE BONAPARTE



ÉDITEUR, PARIS (VI^e)

SOCIÉTÉ À RESPONSABILITÉ LIMITÉE
AU CAPITAL DE 1 200 000 FRANCS



DU MÊME AUTEUR

- Les applications Industrielles du pH**, 1 volume 16 × 25, vii-419 pages.
Dunod, Éditeur, 1935.
- Les applications Industrielles du rH (le potentiel d'oxydo-réduction)**, 1 volume
16 × 25, vii-99 pages. *Dunod, Éditeur, 1937.*
- Le titane et ses composés dans l'industrie**, 1 volume 13 × 21, vii-154 pages.
Dunod, Éditeur, 1936.
- Le Manganèse**, 1 volume 24 × 32, 36 pages, *Mines, Carrières, Grandes Entre-
prises, Éditeur, 1937.*
- La coloration des papiers**, 1 volume 16 × 25, 300 pages. *La Papeterie, Édi-
teur, 1937.*
- Les applications de la lumière de Wood et des rayons ultra-violetes dans
les industries textile et tinctoriale**, 1 volume 135 × 210, 400 pages, collec-
tion I' « Édition Textile Moderne ». *Éditions Textile et Technique, 1937.*
- Les Applications pratiques de la luminescence; fluorescence, phosphorescence,
lumière noire**, 1 volume, en préparation. *Dunod, Éditeur.*