
RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR

LES CLAPETS ÉLECTROLYTIQUES,

PAR M. ALBERT NODON.



Un clapet ou soupape électrique est un organe qui est susceptible d'interrompre le courant électrique dans une direction déterminée et de le laisser circuler librement dans une direction inverse.

Les clapets électrolytiques comportent une anode métallique de surface plus faible que la cathode, qui est constituée par un métal résistant à l'attaque chimique ou par du graphite. Les électrodes sont plongées dans un électrolyte généralement constitué par une dissolution saline.

Historique. — Buff découvrit en 1856 la propriété que possède l'aluminium, plongé dans une solution saline, d'arrêter le courant dans un sens et de le laisser circuler librement dans le sens opposé. Cette propriété fut utilisée par M. Duret en 1874 pour redresser le courant alternatif.

Une série de recherches furent poursuivies dans ce sens par MM. Pollack, Léo Gratz et Carl Liebenow, en modifiant la nature des solutions salines et le dispositif de montage de l'appareil. En 1899 nous reprîmes les essais antérieurs et nous fîmes une série de recherches sur ce sujet, jusqu'en juillet 1903.

Ces recherches nous ont amené à l'établissement d'un modèle définitif de *soupape électrique*, utilisé aujourd'hui couramment. Nous allons exposer rapidement les résultats de ces recherches.

Effet clapet. — L'effet clapet est un effet d'ordre général, qui peut être réalisé à l'aide d'un métal de nature quelconque, plongé dans un électrolyte et soumis à une différence de potentiel déterminée. L'effet clapet consiste à produire l'interruption d'un courant électrique dans une direction déterminée, au sein d'un électrolyte, et à rétablir la circulation du courant dans une direction inverse de ce courant.

Les phénomènes de *couches doubles* sont des effets clapets produits sous une différence de potentiel inférieure à un volt.

Phénomènes d'ionisation électrolytique présidant à l'effet clapet. — Par la mesure des capacités électrostatiques des clapets agissant comme condensateurs, on constate que le diélectrique qui entoure le métal en le séparant de l'électrolyte a une épaisseur de l'ordre de grandeur des molécules.

On constate, en outre, que la valeur de la charge électrique est fonction inverse du poids moléculaire du métal formant clapet.

Le pouvoir inducteur spécifique des oxydes métalliques paraissant croître en raison inverse du poids moléculaire des métaux correspondants, on peut admettre que l'ionisation a pour effet de former une couche d'oxyde d'épaisseur moléculaire à la surface de l'anode, et que les oxydes à poids moléculaire faible, tels que ceux de magnésium et d'aluminium, permettent de réaliser l'effet clapet sous une différence de potentiel plus élevée que les oxydes à poids moléculaire élevé, tels que ceux de mercure et de plomb. Dans ce dernier cas on obtient l'effet *couche double*.

Les métaux qui permettront de réaliser l'effet clapet de la façon la plus parfaite seront ceux qui ont le plus faible poids atomique, et qui pourront donner naissance à des oxydes insolubles. Les deux métaux réalisant le plus complètement ces deux conditions sont le *magnésium* et l'*aluminium*.

Cathode. — Dans les clapets électrolytiques, la cathode joue, en principe, un rôle secondaire. Elle doit être de nature telle, que les produits secondaires de la réaction électrolytique ne lui fassent subir aucune attaque chimique ni aucune modification physique nuisible. Sa surface doit être sensiblement plus étendue que celle de l'anode, afin que la densité de courant par unité de surface y soit toujours faible, et que les causes de destruction précédentes y soient réduites au minimum. Le plomb pur et l'acier poli réalisent le mieux ces conditions; mais on peut également utiliser comme cathodes : le graphite dur ou des alliages d'aluminium à forte teneur en cuivre ou en nickel.

Densité du courant à l'anode. — Pour un métal anode déterminé, qui est plongé dans un électrolyte à température fixe et qui est soumis à une différence de potentiel déterminée, la grandeur de la charge qu'il est susceptible d'acquérir pendant l'unité de temps, sous l'influence de l'effet clapet, est fonction de la densité de courant par unité de surface. Cet effet dépend également de la surface effective de l'anode, et enfin du rapport entre les surfaces de l'anode et de la cathode.

On constate généralement une différence de potentiel de l'ordre du volt entre les deux électrodes.

L'épaisseur de la couche du diélectrique est fonction, dans de certaines limites, de la densité de courant et de la durée de la charge.

Lorsque la durée de la charge n'excède pas $\frac{1}{40}$ à $\frac{1}{50}$ de seconde, comme dans le cas des courants alternatifs industriels, la surface active de l'anode doit être de l'ordre du centimètre pour un débit moyen de 1 ampère, sous une différence de potentiel moyenne de 100 volts, afin d'obtenir l'effet clapet maximum. La composition de l'alliage d'aluminium joue également un rôle important dans le phénomène. Par exemple, en se plaçant dans des conditions expérimentales semblables aux précédentes, une anode constituée par un alliage de 97 pour 100 d'aluminium pur et de 3 pour 100 de cuivre devra avoir une surface active 100 fois plus faible environ qu'une anode en aluminium pur pour fournir un effet clapet équivalent.

Électrolyte. — En principe, la nature de l'électrolyte ne joue, comme la cathode, qu'un rôle secondaire dans l'effet clapet; de l'eau ordinaire permet de réaliser un clapet avec de l'aluminium et du plomb.

Mais, en pratique, le choix de cet électrolyte a une grande importance, par suite de la nature des produits secondaires que fournit l'action électrolytique. Avec le *magnésium*, les meilleurs résultats sont obtenus à l'aide d'une dissolution saturée de *fluorures alcalins*, par suite de l'insolubilité du fluorure de magnésium et de la magnésie dans les fluorures alcalins. Avec l'*aluminium* ou avec ses alliages, on réalise les clapets les plus parfaits avec le *phosphate neutre d'ammonium*, par suite de l'insolubilité de l'alumine et du phosphate d'aluminium dans cette dissolution et dans l'ammoniaque. Les sels correspondants de potassium ou de sodium favorisent au contraire la dissolution de la pellicule isolante à la surface de l'aluminium, par suite de la production secondaire de potasse et de soude pendant l'électrolyse.

Nous avons résumé, dans le tableau ci-dessous, le résultat d'essais comparatifs effectués avec des métaux et des sels divers.

Les anodes en aluminium, magnésium, cadmium, bismuth, antimoine, étaient constituées par de petits barreaux prismatiques de surfaces égales. Les cathodes étaient constituées par des lames de graphite.

Les mesures étaient effectuées à l'aide d'un ampèremètre continu Carpentier, d'un ampèremètre thermique Chauvin et Arnoux, et d'un électrodynamomètre Siemens.

Les forces électromotrices étaient mesurées à l'aide d'un voltmètre continu Carpentier, d'un voltmètre thermique Chauvin et Arnoux, et d'un voltmètre alternatif réglé pour la période du courant. Les faibles forces électromotrices étaient effectuées à l'aide d'un galvanomètre aperiodique de Desprez-d'Arsonval.

Le courant était fourni par une batterie d'accumulateurs.

Dans ce Tableau, nous désignerons par

S la solution saturée à froid;

M le métal de l'anode;

U la force électromotrice en volts entre les deux électrodes du clapet disposées en circuit sur le voltmètre;

U' la différence de potentiel du clapet à l'instant où se fait le changement de signe du courant continu à l'aide d'une clé d'inversion;

I' l'intensité du courant de fuite dans le clapet, du métal vers le graphite;

I l'intensité du courant direct, du graphite vers le métal utilisé comme cathode.

S.	M.	U.	U'.	I'.	I.
		volts	volts	ampères	ampères
Fluorure de potassium.....	Aluminium	85	20	2,9	3,7
»	Cadmium	85	17	4,0	4,0
»	Bismuth	85	16	4,0	4,1
»	Antimoine	85	16	4,0	4,1
Fluorure d'ammonium.....	Magnésium	16	19	0,1	3,9
»	Aluminium	25	24	0,1	3,8
Fluosilicate d'ammonium	Aluminium	54	3	1,2	3,4
»	Magnésium	54	3	1,2	3,4
»	Bismuth	Ne forme pas clapet.			
Carbonate d'ammonium.....	Aluminium	15	42	0	3,8
»	Bismuth	64	20	0,10	
»	Antimoine	64	20	0,10	
»	Magnésium	Ne forme pas clapet.			
Oxalate d'ammonium.....	Aluminium	4	56	0	1,7
»	Bismuth	45		0,2	2,65
»	Antimoine	75		0,5	
»	Cadmium	68		0,2	
Phosphate d'ammonium	Aluminium	4	50	0	2,11
»	Bismuth	20	38	0,1	2,85
»	Antimoine	Ne forment pas clapets.			
»	Cadmium				
»	Magnésium				
Phosphate double d'ammonium et de potassium.....	Aluminium	8	25	0	3,25
Phosphate de potassium		Attaque les anodes.			

De l'examen de ce Tableau ressortent les faits suivants :

1° Le magnésium, le cadmium, le bismuth et l'antimoine ne donnent pas l'effet clapet d'une façon complète.

2° Les sels à base de potassium et de sodium produisent une attaque des anodes; avec l'aluminium, on constate un précipité d'alumine au fond de l'électrolyte.

3° L'aluminium seul donne l'effet clapet d'une façon complète.

4° Le carbonate, l'oxalate et le phosphate d'ammonium donnent seuls de bons résultats comme électrolytes.

5° On observe une augmentation de la résistance intérieure du clapet à l'ouverture du circuit, et à l'instant du renversement cette augmentation de résistance est toujours appréciable; elle varie dans la proportion de 1 à 4, suivant les cas.

Résistivité des clapets. — Une nouvelle série de mesures a été effectuée à l'aide de clapets constitués : d'une part, par de l'aluminium pur ou divers alliages de ce métal, et d'autre part, par du plomb, du graphite, des alliages d'aluminium, de l'antimoine et du bismuth.

Dans le Tableau suivant nous aurons :

A métal de l'anode;

C nature de la cathode;

N nature du courant continu ou alternatif (110 volts, 42 périodes);

R résistance du clapet, au régime permanent, en ohms-centimètres;

r résistance du clapet en ohms-centimètres à l'ouverture de celui-ci;

D nature de l'électrolyte.

A.	C.	D.	N.	R.	r.
Plomb.....	Plomb	{ Phosphate double de potassium et d'ammonium }	continu	12,11	
Plomb.....	Aluminium pur	»	continu		18,90
Aluminium et 5 p. 100 de nickel.	Aluminium et 5 p. 100 de nickel	»	continu	12,11	
Plomb.....	Plomb	»	alternatif	8,39	
Aluminium et 5 p. 100 de nickel.	Aluminium et 5 p. 100 de nickel	»	alternatif	6,91	
Aluminium.....	Plomb	»	alternatif	60,00	
Plomb.....	Plomb	Carbonate d'ammonium	continu	8,84	
Plomb.....	Aluminium	»	continu	18,9	
Plomb.....	Aluminium et 5 p. 100 de nickel	»	continu	8,84	
Aluminium et 5 p. 100 de nickel.	Aluminium et 5 p. 100 de nickel	»	continu	15,00	
Plomb.....	Aluminium et 5 p. 100 d'acier	»	continu	12,47	
Plomb.....	Plomb	Carbonate d'ammonium	alternatif	10,62	
Aluminium et 5 p. 100 de nickel.	Plomb	»	alternatif	61,40	
Bismuth.....	Plomb	»	alternatif	10,62	
Antimoine.....	Plomb	»	alternatif	12,17	
Aluminium.....	Graphite	»	alternatif	28,00	
Aluminium.....	Plomb	»	alternatif	30,00	

De l'ensemble des résultats obtenus on peut déduire les conséquences suivantes :

1° La résistance spécifique en ohms-centimètres des solutions saturées de phos-

phate double de potassium et d'ammonium, de carbonate d'ammonium, de phosphate d'ammonium, sont d'un même ordre de grandeur, variable de 6 à 9 ohms-centimètres;

2° Le plomb donne une résistance propre de 2 ohms-centimètres, due à la formation d'une légère couche de peroxyde de plomb à sa surface;

3° La résistance qui se manifeste entre l'aluminium et la cathode passive au moment du retournement du clapet est trois fois plus élevée environ que celle de l'électrolyte. La résistance augmente après une certaine durée de fonctionnement du clapet; elle provient de la présence constante d'une gaine légère d'alumine qui subsiste autour de l'anode. La résistivité propre de l'électrolyte devient alors pratiquement négligeable par rapport à celle produite à l'anode;

4° La résistance de plusieurs clapets reliés en tension est proportionnelle au nombre de ces clapets.

Hystérésis électrolytique. — On peut désigner sous le nom d'*hystérésis électrolytique*, le retard qui se produit dans le phénomène de destruction du diélectrique à la surface du métal actif du clapet quand celui-ci est utilisé comme cathode après avoir été employé, immédiatement avant, comme anode. La valeur de l'hystérésis est donnée par le rapport des temps mis pour la formation et pour la destruction du clapet. L'étude de cette question amène aux conclusions suivantes :

1° Une valeur de l'hystérésis, sensiblement plus grande que l'unité, rend le clapet impraticable pour le redressement du courant alternatif;

2° Une valeur de l'hystérésis, plus petite que l'unité, rend le clapet d'autant plus parfait qu'elle est plus faible.

C'est le magnésium combiné avec le fluorure d'ammonium qui donne la plus faible valeur d'hystérésis.

Pour l'aluminium, l'hystérésis a sa plus faible valeur avec le phosphate d'ammonium.

Étude micrographique de l'anode d'aluminium. — Si l'on examine avec un microscope la surface de l'anode d'aluminium d'un clapet disposé d'une façon appropriée, on ne constate aucune modification appréciable de l'état de la surface pendant le fonctionnement du clapet. La production de la couche diélectrique passe donc inaperçue, et ce fait permet de supposer que l'épaisseur de cette couche est d'un ordre extrêmement faible.

Capacité électrostatique des clapets. — L'aluminium et l'électrolyte forment les armatures d'un condensateur dont le diélectrique est constitué par la pellicule

d'alumine qui se forme à la surface de l'aluminium, quand ce métal est utilisé comme anode.

La capacité de ce condensateur peut varier dans le rapport de 1 à 1000 environ, suivant la densité de courant par unité de surface, la durée de fermeture du clapet, la température, etc.

Nous avons fait la mesure de la capacité d'un clapet de surface extrêmement petite : 0^{mm^2} , 1 de section, chargé sous une différence de potentiel de 2 volts pendant un temps extrêmement court, de l'ordre du $\frac{1}{100}$ de seconde, et nous avons trouvé des capacités variant de 7 à 10 microfarads environ. Ces capacités correspondent à des valeurs de 700 000 à 1 000 000 microfarads par décimètre carré. Si les surfaces utilisées sont de l'ordre du décimètre carré, les capacités ne sont plus alors que de l'ordre de 1 farad par 10^{m^2} .

La capacité diminue très rapidement avec le temps de la charge, par suite de l'augmentation d'épaisseur de la couche d'alumine.

Une charge effectuée pendant 1 seconde n'a plus que le millième de la valeur précédente. La charge du condensateur se conserve pendant un temps appréciable variant entre $\frac{1}{10}$ et 1 seconde. Si l'on calcule l'épaisseur de la couche diélectrique correspondant à la capacité de 1 farad par décimètre carré, on la trouve être de l'ordre de 10^{-7} , c'est-à-dire de l'ordre des grandeurs *moléculaires*.

Condensateur à lames d'aluminium. — La capacité très élevée des clapets permet de réaliser des condensateurs électrolytiques à l'aide de lames d'aluminium plongées dans un bain de carbonate d'ammonium par exemple. Ces condensateurs, qui ne conservent pas leur charge pendant un temps prolongé, ne sont susceptibles que d'applications spéciales, telles, par exemple, que le démarrage des moteurs alternatifs.

Redressement des courants alternatifs à l'aide des clapets. — Nous avons effectué de nombreuses recherches sur le redressement des courants alternatifs par les clapets. Les mesures ont été faites avec des appareils thermiques et l'étude comparée des phénomènes a été effectuée à l'aide de graphiques obtenus par l'*ondographe* Hospitalier.

Influence de l'électrolyte sur les constantes d'un clapet. — Dans le Tableau suivant, nous désignerons par

- U force électromotrice efficace du courant alternatif, mesurée à l'aide d'un voltmètre thermique;
- U_N force électromotrice efficace du courant redressé;
- U_C force électromotrice mesurée à l'aide d'un voltmètre continu à aimant;

I intensité du courant alternatif mesurée avec un ampèremètre thermique ;
 I_c intensité du courant redressé mesurée avec le continu ;
 T température.

Alternatif			Redressé		
U.	I.	U _c .	U _n .	I _c .	T.
<i>Biphosphate d'ammonium.</i>					
volts	ampères	volts	volts	ampères	degrés C.
105	6,3	38	42	5,6	35
103	6,7	37	43	5,6	75
<i>Phosphate neutre d'ammonium.</i>					
103	6,1	37	41	5,45	23
104	6,7	38,5	43	5,70	70
<i>Phosphate double de sodium et d'ammonium.</i>					
111	7,5	39	48	5,8	22
109	7,6	41,5	47	6,3	60
<i>Phosphate double de potassium et d'ammonium.</i>					
103	6,1	36	40	5,2	35
107	7,2	39,7	45	5,9	87
<i>Phosphate d'ammonium et de zinc.</i>					
104	6,7	38	43	5,0	25
104	7,3	36	45	5,4	60
<i>Biphosphate de sodium.</i>					
104	8,2	31	52	4,6	25
103	11,7	16	73	2,6	69
<i>Chromate neutre d'ammonium.</i>					
104	7,5	34,5	48	5,3	25
110	8,7	35	55	5,3	52
<i>Chromate double d'ammonium et d'aluminium.</i>					
110	9,3	33	57	5	23
108	10,2	31	62	4,7	85

Les conclusions de ces mesures sont les suivantes :

1° Le redressement est complet jusqu'à la température de 30° C. environ. De

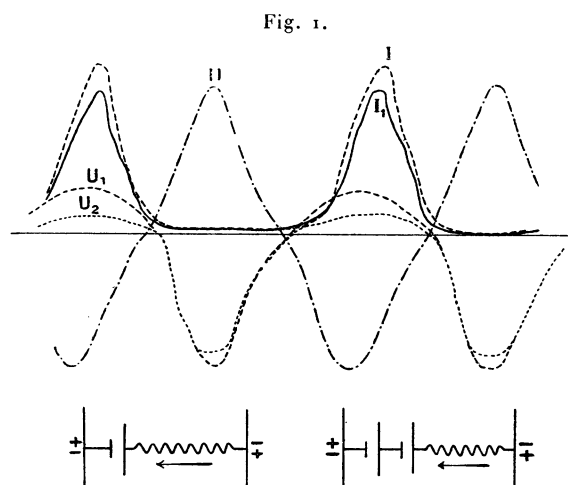
cette température jusqu'à l'ébullition, une *fuite* de plus en plus accentuée se manifeste ;

- 2° Les sels ammoniacaux fournissent un meilleur résultat que les autres sels ;
- 3° L'addition d'un autre sel aux sels ammoniacaux diminue l'effet clapet ;
- 4° Le phosphate *neutre* d'ammonium est celui qui donne les meilleurs résultats parmi tous les sels essayés.

Dispositif adopté. — L'ensemble des divers résultats précédents nous ont amené à adopter un dispositif définitif caractérisé essentiellement par les points suivants :

- 1° Une anode en aluminium allié à une faible proportion de cuivre ou de zinc ;
- 2° Une cathode en plomb, formant récipient ;
- 3° Une dissolution *concentrée* de phosphate neutre d'ammonium.

Forme ondulatoire du courant redressé. — En utilisant un clapet dont l'électrolyte était constituée par du phosphate double d'ammonium et de sodium, l'ondographe fournit le graphique suivant (*fig. 1*) :



- U courant alternatif dont la force électromotrice efficace = 100 volts ;
- Fréquence = 42 périodes ;
- U' force électromotrice aux deux bornes extrêmes du clapet = 82 volts ;
- U_N force électromotrice entre les bornes d'un clapet unitaire = 75 volts ;
- I intensité du courant dans un clapet = 3 ampères ;
- I' intensité avec deux clapets en tension = 2,6 ampères.

L'étude de ces graphiques montre que :

1° Le courant redressé ne se manifeste que pendant chaque demi-phase du courant alternatif;

2° La force électromotrice et l'intensité sont déphasées par rapport à la différence de potentiel du courant alternatif;

3° L'intensité du courant est plus faible avec deux clapets en tension qu'avec un seul;

4° Le redressement, dans le cas particulier précédent (phosphate double d'ammonium et de sodium), est rendu plus complet par l'emploi de deux clapets en tension.

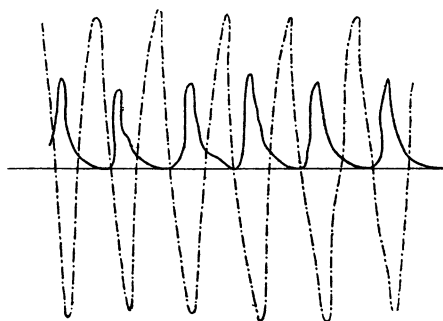
Il se manifeste une fuite au passage du courant alternatif au-dessus de l'axe d'origine pendant la période de fermeture.

La *forme de la courbe* de la force électromotrice varie suivant la nature de l'électrolyte.

Le *déphasage du courant redressé sur la différence de potentiel* s'observe dans tous les graphiques, il est dû à la capacité propre du clapet. Il est variable suivant la nature inductive du circuit extérieur.

Clapet au magnésium. — Le graphique (*fig. 2*) a été obtenu avec un clapet

Fig. 2.



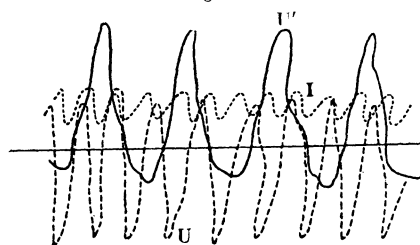
constitué par un fil de magnésium, un graphite et une dissolution de fluorure d'ammonium.

Le courant est complètement redressé et il présente un déphasage très net de l'intensité sur la différence de potentiel. Le fil de magnésium était entouré d'une gaine lumineuse pendant toute la durée du fonctionnement du clapet.

Différence de potentiel aux bornes d'un clapet. — Le clapet était constitué par : une anode en aluminium pur, une cathode en aluminium allié à 10 pour 100 de cuivre, dont la surface était 100 fois plus grande que celle de l'anode; l'électrolyte était formée par une solution concentrée de carbonate d'ammonium.

Dans le graphique (fig. 3), on a :

Fig. 3.



U' différence de potentiel en circuit ouvert aux bornes du clapet = 69 volts;

U différence de potentiel en fonctionnement = 89 volts;

I intensité du courant redressé = 1,3 ampères.

Influence de la nature de la cathode. — Le graphite utilisé comme cathode se désagrège lentement sous l'influence du courant alternatif et il tombe en une boue épaisse au fond du récipient.

Le fer se recouvre d'une couche de phosphate double de fer et d'alumine, très adhérente, qui augmente progressivement la résistance intérieure du clapet.

La tôle d'acier polie ne subit qu'une attaque très faible. Un clapet ainsi constitué a pu fonctionner pendant 20 jours consécutifs sans présenter d'altération sensible de l'acier.

Le plomb se recouvre d'une couche de peroxyde qui introduit une légère résistance dans le circuit, mais dont l'épaisseur reste sensiblement stationnaire après quelque temps de marche.

Des alliages d'aluminium, contenant 8 à 10 pour 100 de cuivre ou 5 pour 100 de nickel, donnent des résultats inférieurs au plomb comme cathodes. Ces alliages ne subissent pas d'attaque sensible lorsque la surface active de la cathode est suffisamment développée.

Condensation à l'ouverture des clapets. — Nous avons vu que le temps de réduction de l'oxyde d'aluminium à l'ouverture du clapet était sensiblement égal à celui de sa formation, dans le cas d'un courant continu inversé. Avec un courant redressé sinusoïdal dans lequel l'intensité est diphasée par rapport à la différence de potentiel, la durée de la réduction est en général plus grande que celle de la formation du diélectrique. L'hystérésis électrolytique est alors supérieure à l'unité.

Du fait même de la persistance de la couche du diélectrique pendant une partie de la durée de la demi-période inverse, il résulte une charge électrostatique du condensateur dont le sens est inverse à celui de la charge directe, et dont l'effet est de détruire une partie de cette dernière.

D'autre part la résistance intérieure du clapet se trouve sensiblement accrue par la persistance du diélectrique à l'ouverture.

Influence d'une résistance de self-induction. — Soient :

- $\mathcal{E}_{\text{eff.}}$ la force électromotrice de self-induction;
 $U_{\text{eff.}}$ la différence de potentiel aux armatures du condensateur constitué par le clapet;
 γ l'angle que fait la force électromotrice avec l'intensité;
 f fréquence;
 \mathcal{L} coefficient en henrys de self-induction du circuit;
 C capacité du condensateur en farads;
 R résistance ohmique des condensateurs.

On a

$$4\pi^2 f^2 \mathcal{L} C = 1 \quad \text{quand} \quad \mathcal{E}_{\text{eff.}} = U_{\text{eff.}}$$

avec

$$\text{tang} \gamma = 0 \quad \text{et} \quad \varphi = 0;$$

il en résulte que

$$I_{\text{eff.}} = \frac{V_{\text{eff.}}}{R}.$$

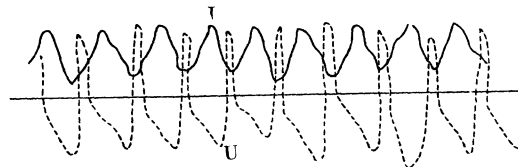
Tout se passe alors comme s'il n'y avait ni self-induction, ni condensateur.

Le courant reste en phase avec la différence de potentiel agissante, et sa valeur efficace est égale à celle de cette dernière, divisée par la résistance effective des conducteurs à laquelle se réduit l'impédance.

Si l'on dispose un clapet en série avec une inductance de valeur suffisante, on constate, en effet, que, pour de petits débits, le courant redressé ne présente plus de déphasage sensible de l'intensité sur la différence de potentiel.

Induction du courant redressé, dans un transformateur. — Si l'on utilise

Fig. 4.

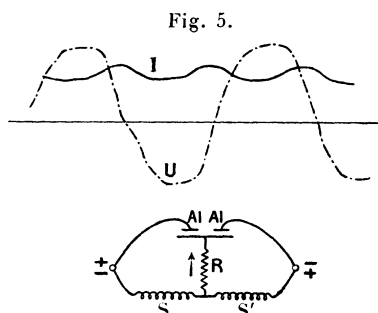


une bobine d'induction comme transformateur, en ayant soin de serrer le trembleur, on obtient à l'aide d'un courant redressé d'intensité T , lancé dans le gros fil inducteur, un courant ondulatoire alternatif, de force électromotrice U dans le fil fin induit (fig. 4).

Action du courant redressé sur les électromoteurs. — Le courant redressé à l'aide d'un seul clapet est fortement ondulatoire. Les électromoteurs, excités en série ou en dérivation, fonctionnent d'une façon imparfaite à l'aide de ces courants, par suite de la valeur élevée qu'y prend la self-induction. Le moteur s'échauffe et le collecteur donne de nombreuses étincelles. Les magnétos, et les dynamos excitées en magnétos, à l'aide d'un courant continu distinct, fournissent un fonctionnement meilleur que les précédents, par suite de la suppression presque complète de réaction de l'inducteur sur l'induit.

Clapet à anode double monté sur deux résistances opposées de self-induction. — Dans le mode de montage indiqué sur la figure ci-jointe, où la cathode est mise en circuit sur deux résistances de self-induction égales et opposées S et S', et dans lequel deux anodes d'aluminium Al Al sont disposées en présence de la cathode unique précédente, et reliées respectivement avec les pôles de la source alternative, on obtient dans le circuit d'utilisation A un courant I très peu ondulatoire.

Dans le graphique (*fig. 5*) ci-joint les constantes étaient :



I intensité du courant : 10 ampères ;

U force électromotrice efficace du courant alternatif : 110 volts (53 périodes) ;

Différence de potentiel entre les deux extrémités de la résistance d'utilisation : 55 volts.

On constate que le rendement $\frac{55 \text{ volts}}{110 \text{ volts}}$ n'est que 50 pour 100.

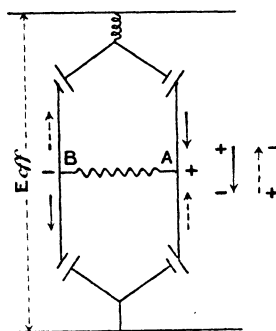
Montage en pont de Wheatstone. — Dans le but d'utiliser successivement les deux demi-phases, positives et négatives, du courant alternatif, on emploie quatre clapets, montés en pont de Wheatstone (*fig. 6*).

L'étude de ce mode de montage permet de constater que chaque demi-phase du courant traverse toujours deux clapets reliés en série, et que les deux demi-phases successives sont redressées dans une déviation unique et qu'elles ajoutent leurs effets dans le circuit extérieur.

Le réglage du débit est fait à l'aide de résistances de self-induction variables.
Chaque modèle de soupape est du reste réglé pour une intensité maxima déterminée.

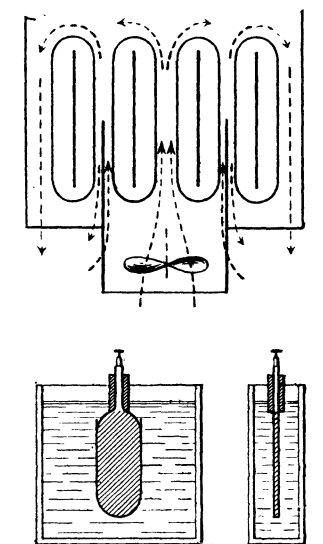
Les soupapes subissent un échauffement assez rapide, que l'on combat par un

Fig. 6.



simple rayonnement dans l'air pour les petits modèles, mais que l'on aide par un courant d'air insufflé par un ventilateur dans les modèles de moyenne puissance. Pour les fortes puissances, on a recours à des refroidisseurs à circulation d'eau froide. Les récipients des quatre clapets sont alors soigneusement isolés de la masse d'eau extérieure.

Fig. 7.



Le modèle le plus courant de soupapes électriques est celui représenté figure 7, qui est construit par la Société Mors et C^{ie} de Paris et par M. Snoudon, ingénieur à Londres.

Cette soupape se compose essentiellement d'un vase cathode prismatique en plomb pur embouti, enfermé dans une enveloppe de tôle formant support.

L'anode, en alliage d'aluminium, a la forme d'une plaque mince, arrondie sur les bords; elle est reliée au conducteur extérieur à l'aide d'une tige en aluminium goupillée sur la plaque et isolée à l'aide d'un tube de caoutchouc (*fig. 7*).

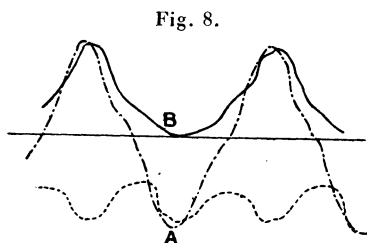
La soupape renferme une solution saturée de phosphate neutre d'ammonium.

Les quatre clapets sont renfermés dans une boîte en bois, et ils sont soigneusement isolés à l'aide de caoutchouc.

Un ventilateur, disposé sur le côté de la boîte, est actionné par une dérivation prise sur la soupape.

L'air froid, insufflé par le ventilateur, circule en chicane autour des quatre clapets et les maintient à une température constante de 35° à 40° C.

Graphiques obtenus à l'aide du montage précédent. — Un courant alternatif, dont la force électromotrice A était égale à 117 volts sous 53 périodes, fournissait un courant redressé dont la force électromotrice était égale à 82 volts. L'intensité



du courant alternatif était de 5 ampères, et celle du courant redressé de 4,5 ampères (*fig. 8*).

L'électrolyte était constituée par du phosphate neutre d'ammonium maintenu à une température constante de 9° C.

La cathode était constituée par de la tôle d'acier poli. Le graphique ci-joint a été obtenu après une marche continue, correspondant au passage de 3800 ampères-heure dans la soupape.

Si l'on fait circuler le courant redressé dans une *résistance inductive*, on constate que la courbe de l'intensité est sensiblement plus tendue que celle obtenue avec une résistance non inductive.

Lorsque la différence de potentiel moyenne du courant alternatif est égale à 110 volts, celle du courant redressé est égale à 96 volts au début du fonctionnement de la soupape, puis elle s'abaisse rapidement jusqu'à 80 volts environ.

Cet abaissement de la force électromotrice semble provenir principalement de l'augmentation d'épaisseur du diélectrique.

On observe une *fuite* du courant alternatif qui atteint parfois 5 à 10 pour 100

de l'intensité totale employée, quand la température est trop élevée ou que la surface de l'anode est trop grande.

On peut éviter entièrement cette fuite, en utilisant une anode en aluminium pur de faible surface et une solution de carbonate d'ammonium, mais la force électromotrice du courant redressé s'abaisse alors à 35 volts, par suite de la résistance de la pellicule formée à la surface de l'anode.

La nature de l'électrolyte joue un rôle important dans les soupapes montées au pont de Wheatstone.

Si l'on utilise, par exemple, une solution saturée de borate d'ammonium, dans une soupape dont les anodes sont en aluminium pur, on obtient, pour une différence de potentiel de 108 volts du courant alternatif, une différence de potentiel de 43 volts pour le courant redressé, et une intensité de 7,4 ampères dans un circuit non inductif.

Si l'on remplace le borate d'ammonium par du phosphate d'ammonium, on obtient, dans les mêmes conditions expérimentales, une force électromotrice de 70 volts pour le courant redressé et une intensité de 10,5 ampères.

Dans une même soupape, la force électromotrice varie à peu près proportionnellement à l'intensité du courant redressé, et la fuite en intensité est sensiblement constante pour tous les débits.

Le cloisonnement de l'anode abaisse très sensiblement le rendement du clapet.

Le cloisonnement de la cathode affecte peu ce rendement.

L'élévation de température de l'électrolyte a pour effet de produire une augmentation de la force électromotrice du courant redressé. Si la fuite est nulle à 20° C., elle commence à se produire vers 27° C., et à 75° C. elle est très importante.

Le redressement est d'autant plus complet que la surface des anodes est plus faible.

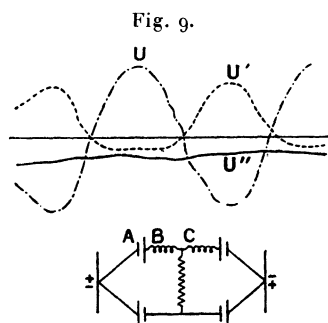
Action des circuits sur les constantes du courant redressé. — Si le circuit inductif est externe, on observe que pour une faible intensité variant de 0,1 à 0,5 ampère, l'inductance du circuit masque l'effet de capacité propre aux clapets.

Si le circuit inductif est disposé entre les clapets, il se produit une réaction énergétique de ce circuit sur la capacité propre des clapets, qui a pour effet d'accroître l'intensité apparente du courant et de tendre fortement les courbes d'intensité et de force électromotrice (*fig. 9*).

Dans le graphique ci-dessus, renfermant un double circuit inductif interne, on obtient en U la différence de potentiel alternative, en U' la force électromotrice d'un seul clapet fermé sur un circuit non inductif, et en U'' la force électromotrice aux mêmes points, quand la résistance inductive est mise en circuit.

Les anodes sont constituées par un alliage d'aluminium de composition bien

uniforme; ces anodes doivent subir une *formation* préalable qui a pour effet de préparer leur surface et d'assurer la régularité de leur fonctionnement.

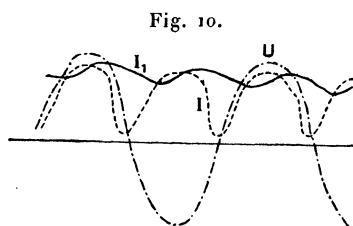


Si l'on examine dans l'obscurité l'intérieur d'une soupape en fonctionnement, on constate que les anodes sont entourées d'une auréole lumineuse, dont l'éclat diminue après l'interposition de circuits inductifs.

Condensateur électrolytique. — On peut réaliser un condensateur électrolytique à grande capacité, à l'aide de lames d'aluminium parallèles disposées dans une solution de phosphate d'ammonium.

Le condensateur doit subir une longue période de formation avant de pouvoir être employé, et il doit être maintenu à une basse température pour éviter toute fuite importante du courant alternatif.

La figure 10 montre l'action de ce condensateur sur le courant redressé :



U représente la force électromotrice effective du courant alternatif : 110 volts;
 I l'intensité de 8 ampères du courant redressé sur une résistance non inductive;
 I' l'intensité du courant redressé avec l'adjonction d'un condensateur électrolytique : 4,5 ampères.

On voit que le courant redressé prend la forme d'un courant sensiblement continu.

Les causes de l'abaissement de la force électromotrice dans les clapets peuvent se résumer ainsi :

1° Résistance ohmique produite à l'ouverture des clapets par la pellicule formée à la surface des anodes;

2° Résistance ohmique produite par la présence d'une pellicule à la surface des cathodes;

3° Effets de charge statique pendant les périodes d'ouverture et de fermeture des clapets;

4° Inégalité dans la composition du métal des anodes.

Si l'on utilise le courant redressé pour actionner des *électromoteurs*, on obtient des effets du même ordre que ceux signalés précédemment avec un clapet unitaire.

Les moteurs magnéto-électriques (ou excités en magnétos), fournissent un bon fonctionnement et un rendement élevé, par suite de l'absence de réaction nuisible de l'induit sur l'inducteur.

Le graphique (*fig. 11*) donne la représentation des constantes d'un moteur

Fig. 11.



Edison excité en dérivation. I est l'intensité, U la différence de potentiel alternatif et U_1 la force électromotrice du courant redressé.

On voit que l'intensité est représentée par une courbe assez tendue, mais que la force électromotrice passe au-dessus de l'axe d'origine. Cet effet était dû à la self-induction. Les étincelles étaient nombreuses au collecteur et le rendement mauvais.

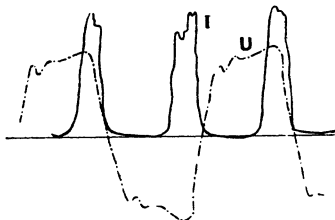
Influence des batteries d'accumulateurs sur les courants redressés. — Un accumulateur au plomb peut être assimilé à un condensateur électrolytique de grande capacité, dans lequel la charge se reproduirait, au fur et à mesure de sa disparition, grâce à des réactions chimiques internes.

Envisagé sous cette forme, on conçoit que l'accumulateur puisse produire, sur les courants redressés par les soupapes, un effet analogue à celui qui serait produit par un condensateur à lames d'aluminium.

Les réactions chimiques présidant à la charge de l'accumulateur ne peuvent utilement se produire qu'entre des limites de force électromotrice déterminées. Dans le courant ondulatoire, il convient de chercher à abaisser l'ordonnée maxima du potentiel de charge, jusqu'au régime de fonctionnement utile à l'accumulateur.

Le graphique (*fig. 12*) représente la charge d'une batterie d'accumulateurs

Fig. 12.



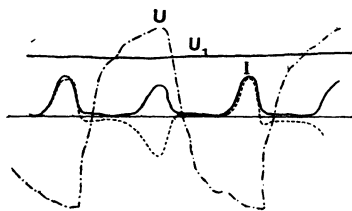
dont la force électromotrice est de 105 volts, à l'aide d'un courant redressé *très ondulatoire*.

La différence de potentiel efficace du courant alternatif était égale à 110 volts et elle atteignait 140 volts au sommet de l'ordonnée.

L'intensité affectait la forme I. Un abondant dégagement gazeux se manifestait dans la batterie pendant la période de charge, et le rendement à la décharge n'atteignait que 50 pour 100.

Dans le graphique (*fig. 13*), au contraire, U, la force électromotrice du cou-

Fig. 13.



rant alternatif, était égale à 119 volts, et U_1 , la force électromotrice du courant redressé, était sensiblement parallèle à l'axe d'origine et égale à 102 volts.

L'intensité du courant alternatif, avant l'entrée dans les clapets, était égale à 10 ampères; l'intensité du courant redressé utilisé dans la batterie était égale à 9,50 ampères. L'ordonnée maxima de l'intensité ne dépassait pas celle nécessaire à la charge utile.

Les rendements deviennent alors semblables à ceux obtenus avec la charge par courant continu.

La batterie d'accumulateurs peut encore être utilisée comme *condensateur*, sur un courant dérivé aux bornes de cette batterie pendant la charge de celle-ci avec le courant ondulatoire obtenu avec un clapet unitaire.

L'étude des graphiques permet de conclure qu'avec une batterie à faible capacité, mais de résistance intérieure aussi réduite que possible, on peut obtenir un courant de décharge sensiblement rectiligne sous un rendement élevé.

Redressement des courants polyphasés. — Les courants diphasés ou triphasés montés en triangle ou en étoile peuvent être redressés à l'aide des clapets.

On peut utiliser un montage composé de six clapets qui donne un fonctionnement analogue à celui de quatre clapets avec le courant monophasé. Les rendements sont les mêmes que dans ce cas et les courants redressés sont sensiblement rectilignes.

M. Émile Mors, concessionnaire de la Soupape électrique Nodon, en France, a fait des mesures de rendements à l'aide de ce montage, à la Société du Nord Lumière, dans ses sous-stations de Clichy et de Courbevoie, avec des courants triphasés de 25 périodes par seconde à 110 et 220 volts. Il a pu faire fonctionner d'une façon parfaite 6 arcs Bardon, en tension, avec le courant redressé à 230 volts sortant des soupapes. Les rendements mesurés avec deux compteurs Aron ont varié entre 75 et 78,5 pour 100, sans que l'échauffement de l'appareil ait dépassé de 20° la température ambiante (*Industrie électrique*, n° 294).

On peut encore utiliser un clapet constitué par une seule cathode mise en présence de deux anodes en aluminium, dans le cas des courants diphasés, et de trois anodes dans le cas du courant triphasé.

Les courants redressés pulsatoires correspondant aux demi-ondes successives sont utilisés à la charge d'une batterie de faible capacité et de résistance extérieure extrêmement faible. Le courant dérivé aux bornes de la batterie est sensiblement rectiligne.

Application des clapets pour le fonctionnement des bobines d'induction. — M. Rochefort a étudié un modèle spécial de clapet unitaire à capacité variable qui permet d'actionner des bobines d'induction à l'aide de récepteurs rapides et de courants alternatifs.

Les rendements obtenus sont élevés et le fonctionnement des transformateurs est très régulier.

Le fonctionnement des tubes à rayons X, pour la radiographie, se fait, avec cet appareil, dans d'excellentes conditions. On peut également employer le montage en pont de Wheatstone, avec un interrupteur rotatif.

Effet Wenhelt produit par le clapet. — Un clapet, dont la surface d'aluminium est très réduite, fonctionne avec le courant alternatif sur un transformateur, à la façon d'un interrupteur Wenhelt. Un effet analogue est obtenu avec du courant continu. Il semble probable que l'effet Wenhelt est un effet de capacité électrolytique du même ordre que celui des clapets.

Rendements des soupapes. — M. Hospitalier a établi les rendements industriels de notre soupape électrique (*Industrie électrique*, n° 263, 10 décembre 1902).

Les rendements en énergie varient entre 65 et 75 pour 100 suivant les conditions d'utilisation des soupapes. M. Émile Mors a trouvé des rendements variant de 75 à 78,5 pour 100 avec les courants triphasés.

Résumé. — Les soupapes et clapets électrolytiques sont susceptibles de recevoir de nombreuses applications dans les laboratoires et dans l'industrie.

Dans les laboratoires, ils permettent d'effectuer la mesure de courants oscillatoires, à l'aide des méthodes simples employées pour les courants continus.

Le fonctionnement des transformateurs à hauts potentiels à l'aide du courant alternatif et d'un clapet permet de rendre de signalés services. L'emploi de capacités élevées sous un volume réduit est également susceptible de recevoir des applications.

Dans l'industrie, les soupapes électriques sont utilisées d'une façon courante pour la charge des accumulateurs et pour le fonctionnement de petits électromoteurs continus à l'aide du courant alternatif simple ou polyphasé.

Les rendements des soupapes sont supérieurs à ceux des petits transformateurs tournants, et la surveillance en est beaucoup plus simple.

Les soupapes ne subissent aucune détérioration appréciable sous l'action d'un fonctionnement intermittent ou continu.

