

Retour aux sources.....

Au cours de la réalisation du petit émetteur précédemment décrit, et plus particulièrement pour la partie amplification de puissance, il y avait souvent en arrière pensée qu'il serait plus logique d'utiliser des triodes TM pour retrouver pleinement les conditions du début des années vingt. C'était alors le seul tube accessible à l'amateur moyen....qui le mettait d'ailleurs souvent à rude épreuve.

Oui mais voilà...ces vénérables ancêtres sont rares, chères, et forcément fragiles plus de quatre vingt ans après leur fabrication. La dernière remarque concerne plus particulièrement le filament dont l'état de santé est a priori inconnu : durée d'utilisation, avec un chauffage plus ou moins intense suivant les montages. Ceci indépendamment du chauffage plus ou moins prolongé à 6 volts durant le pompage, suivi du 'durcissement' du tube après sa fabrication.

Quoi qu'il en soit le courant maximum (de saturation) de ces tubes tourne autour de 12 mA. pour un chauffage avec 4 volts sous 0,7 ampère, valeurs confirmées par de nombreux auteurs : C. GUTTON-M. VEAUX-L. BRILLOUIN etc. Ce courant est donc assez limité, sauf si l'on pousse à 6 volts le chauffage.....A vos risques et périls.....En 1924 Paul BERCHE évoque le sort des tubes TM suralimentés à 6 volts. 'Ils durent un mois avant de rendre l'âme ; ils s'en vont vers l'ouest'...suivant une expression chère aux amateurs Américains.

Mis à part le filament, il est également possible que le vide, déjà plus ou moins poussé à l'origine, se soit dégradé : dégazage résiduel des électrodes ou du verre suite à un emploi à puissance élevée. Enfin on peut craindre une lente rentrée d'air par les microfuites résultant d'une étanchéité imparfaite entre les fils de sortie et le verre du pied....quatre vingt ans c'est long, même avec un tube reconnu bon à l'origine. Cette crainte est à rapprocher de l'observation de R. ALINDRET (QST Français 7/1924) 'Il n'est pas rare de trouver remplie d'air une lampe qui était bonne quelques jours auparavant'. Tout ceci donnera de jolies effluves bleues et un tube impropre à notre emploi.

Un filament constitué par du tungstène 'pur', donc ni 'thorié' ni recouvert d'oxydes, fournit un courant électronique directement lié à sa température, elle même dépendant de la puissance (tension x courant) appliquée. Ce flux d'électrons disponibles augmente considérablement dès que le filament dépasse 2400 degrés, une faible variation de la puissance de chauffage provoquant un accroissement important du courant utilisable.

Le tungstène pur donne 1 mA. de courant plaque 'utile' par watt filament selon CLIQUET (tome 1 page 96), alors que R. WARNER propose plutôt de rapporter le courant cathodique utilisable au courant de saturation par $I_c = I_s/6$ (Etude du fonctionnement des lampes dans le 'Haut Parleur' n°810)... cela nous ramène toujours au chauffage filament...

Ceci explique pourquoi les Amateurs poussaient à 6 volts le filament de leurs tubes TM reconvertis en émission. Par suite la solution logique se trouvait dans l'emploi d'un filament consommant nettement plus et délivrant finalement 40 ou 50 mA. à la saturation.

Dès octobre 1922 on voit la publicité pour les triodes E4 dont le filament chauffé sous 6 volts avec 2,3 Ampères autorise un courant de 62 mA. sous 800 volts. On trouve également dans la première édition du livre de Paul BERCHE (page 348) des informations sur le filament de diverses lampes d'émission du moment.....Destinée aux émetteurs de la catégorie '50 watts' la triode E4 est représentative des tubes 'a cornes' ou les connexions grille et plaque se trouvent sur l'ampoule, et non plus sur le culot, afin de réduire les capacités parasites et en permettre l'emploi en ondes courtes. Pour l'anecdote cette forme de tube était surnommé 'Kamerad' en allusion aux soldats Allemands qui se rendaient en levant les bras. Rapidement adopté par les Radio-Amateurs du moment on trouve ce tube au cœur des

émetteurs de 8BA – 8BV – 8BN (Paul BERCHE) ce dernier utilisant un tube ‘refilamenté’, cette opération étant assez courante en ce temps là, en raison du prix très élevé des tubes.

Bien que prévue pour l’emploi projeté nous avons renoncé à utiliser notre vénérable triode E4 après lecture d’un numéro spécial de ‘La T.S.F. Moderne’ consacré à l’émission d’amateur:

J. LABORIE décrit minutieusement deux émetteurs, dont un utilise la triode E4. Dans ses conseils de mise au point, une mise en garde mérite d’être prise en considération...’Nous avons là une lampe de grand prix et une fausse manœuvre peut parfaitement la faire trépasser’.....Cette éventualité étant redoutable cette lampe est donc d’un emploi tout aussi aléatoire que celui d’une TM ordinaire reconvertie en émission.....

Ceci nous conduit à envisager de réaliser nous-mêmes le tube souhaité....

À ce stade, et avant de se lancer dans l’aventure, il faut rendre hommage à ceux qui ont déjà réalisé cela à titre individuel : le plus connu étant, selon nous, Monsieur H. MIGNET, nous ne pouvons mieux faire que de reproduire, en annexe, la série d’articles publiée au début des années vingt dans ‘La T.S.F. Moderne’.....À lire et relire plusieurs fois pour admirer....

Après ce retour aux sources du véritable Amateurisme (avec un A majuscule...du latin *amator* ; de *amare* aimer, donc rien, ici, de péjoratif...P. BERCHE serait content...) on peut tirer divers enseignements sur les problèmes et les solutions apportées.... à cette époque.

Quatre vingt ans plus tard il est facile de voir les défauts des lampes obtenues par Monsieur MIGNET. En premier lieu le niveau de vide limité par l’emploi d’une trompe à mercure aux alentours de 0,001 mb. ; ce vide imparfait amenant des effluves en cas d’utilisation du tube avec une tension plaque dépassant 50 volts.

Dans ‘Au delà des ondes perdues’ deux témoignages sur le problème du vide :

Lucien CHRETIEN se souvient des Amateurs qui fabriquaient eux-mêmes leurs tubes :

‘Ces fanatiques soufflaient le verre et avaient fabriqué une trompe à eau pour faire le vide’

On rappelle également que F. DUROQUIER, dans ses conseils pour réaliser une triode, cite l’emploi d’une pompe à vide utilisant le robinet de l’évier. Aujourd’hui, faute de détails complémentaires, on peut supposer qu’il s’agissait de pompes utilisant l’eau pour remonter le mercure dans la pompe principale, puisque l’emploi de l’eau dans une trompe limite le vide aux alentours de 15 millibars donc parfaitement insuffisant...Revenons à Monsieur MIGNET.

Ensuite le choix des métaux, de plaque notamment, et l’absence de dégazage des éléments qui devaient peu à peu détériorer le vide. Enfin l’assemblage des divers éléments qui demande des doigts de fée...Au moins...La soudure platine cuivre, entr’autres, nous laisse rêveur.

Entendons nous bien, il n’est pas question ici de réaliser une TM avec des performances ‘années 2000’, mais de se rapprocher de l’illustre modèle, ne serait-ce que pour se conformer au dicton

SAVOIR C’EST BIEN.....FAIRE C’EST MIEUX

Avant d’aller plus loin il faut rappeler que la forme ou l’assemblage d’une éventuelle triode ne sont pas forcément figés dans la descendance directe de la TM. Côté forme on sait que le tube initial de LEE DE FOREST était très éloigné de celle habituelle où la plaque entoure l’ensemble grille-filament. La disposition centrale du filament avec la plaque et la grille situées de part et d’autre se retrouve dans le tube électromètre PHILIPS 4060 (M. ADAM décrit ce tube en montrant sa différence par rapport aux modèles habituels). On trouve déjà ce tube dans ‘L’Onde Electrique, numéro spécial de mai 1935, ou encore L. CHRETIEN ‘théorie et pratique de la radioélectricité’. Du côté de l’assemblage on se reportera aux lampes démontables de F. HOLWECK souvent décrites (par exemple ‘Toute la Radio’ de juin 1934).

En fait il faut convenir que la forme et conception générale de la TM étaient pratiquement parfaites pour l’époque, du moins dans la version où les éléments sont positionnés à l’horizontale. On consultera avec intérêt la brochure ‘Grande et petite histoire de la triode

TM' de R. CHAMPEIX ; de même 'le Général FERRIE' par Michel AMOUDRY donne de nombreux détails sur la mise au point du tube.

Les dimensions des éléments internes de la triode TM, ainsi que la nature des métaux utilisés, sont reconstitués, et confirmés, à partir de diverses sources : H. MIGNET (La T.S.F. Moderne 1920/1921), ou Robert CHAMPEIX dans la brochure déjà citée.

Quelques légères différences existent toutefois entre les tubes réalisés sous les marques FOTOS ou METAL. Le nickel est employé dans les deux cas pour la plaque avec un diamètre de 8 ou 10 mm. pour une longueur de 15 mm. Le filament de tungstène, diamètre 0,051 à 0,059mm est long de 21 ou 23 mm pour le chauffage normal 4 volts 0,7 ampère.

Par contre la grille montre plus de variations :

métal	diamètre du fil	diamètre	pas	nb. de tours	longueur
FOTOS molybdène	0,2 mm.	4,5 mm.	1,3 mm.	12	16 mm.
METAL nickel	0,3 mm.	4,0 mm.	1,7 mm.	11	19 mm.

Dans son cours de T.S.F. (1926) M. VEAUX donne les courbes détaillées I_p/V_g des deux marques, au demeurant très voisines, les valeurs ci-dessous étant bien sur des moyennes variant légèrement suivant les exemplaires, dans chaque marque.

	coeff. amplif.	pente	résistance int.	Courant de saturation
FOTOS	10,5	0,4 ma/v	23000 ohms	14 ma.
METAL	9 à 10	0,4 ma/v	24000 ohms	11 ma.

Au passage signalons que M. VEAUX décrit longuement les émetteurs à étincelles amorties et arcs ou alternateurs haute fréquence en ondes entretenues ; ce qui fait de son ouvrage une référence précieuse sur ces sujets bien oubliés.....

Avant de revenir au temps présent, une remarque...Monsieur H. MIGNET est très probablement le même que celui cité par C. PEPIN (F8JF/F1001 'père' de la radiocommande en France) , dans le numéro spécial consacré à la télécommande par 'Le Haut Parleur' en décembre 1966 . Leur collaboration étant la suite de la rencontre de deux Amateurs exceptionnels ayant marqué leur époque...Il semble que Monsieur H. MIGNET était également le père du 'pou du ciel' très petit avion qui eut son heure de gloire

Après ces détours il est donc temps de revenir à notre sujet principal.....la triode.

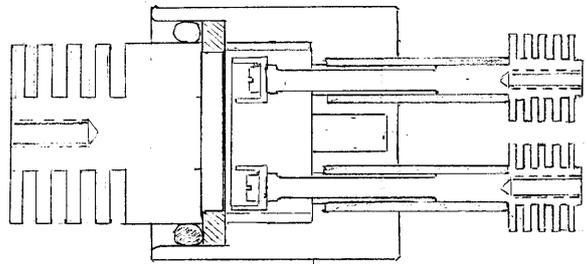
Au terme de la lecture de nombreux ouvrages sur le sujet, et compte tenu de notre volonté de rester proche du modèle de base, il est devenu évident que le filament est le cœur du tube, en particulier si ce dernier doit délivrer tant soit peu de puissance. Ceci conduit à mesurer le courant électronique qu'il est possible d'obtenir de filaments de diamètre ou longueur variés, le tout soumis à un chauffage plus ou moins énergique....Toutefois il existe de nombreux tableaux dans les ouvrages détaillant le problème, ce qui permet de débroussailler le terrain et évite de grossières erreurs. Quelques références sur le sujet : 'Les cathodes chaudes' Charles BIGUENET 1947 – 'Les tubes à vide' (tome 1) H. BARKHAUSEN 1933 – 'Physique et technique des tubes électronique' R. CHAMPEIX 1959 etc....Cette petite liste n'est pas limitative, mais ces trois livres, et le dernier en particulier, valent la peine que l'on casse sa tirelire pour les obtenir.....(Nous en avons trouvés, bien esseulés, dans des brocantes...)

En dépit des précieux renseignements fournis par ces livres nous avons préféré passer à un peu d'expérimentation ne serait-ce que pour sortir du côté livresque de la question...De plus certains détails doivent être vérifiés par la pratique...par exemple l'influence des deux points de fixation du filament qui empêchent ses extrémités d'atteindre la même température que le

centre du filament ; donc émission électronique réduite d'autant...H. BARKHAUSEN analyse cela avec quelques détails mathématiques, mais, à nos yeux, rien ne vaut un essai.

Les résultats obtenus sont donnés en laissant momentanément de côté les problèmes de réalisation du vide, ou de sa mesure, qui sont ici supposés résolus.....

Pour faciliter le changement et la comparaison entre divers filaments, le plus simple est d'utiliser un dispositif démontable inspiré, en plus modeste, des travaux de H. HOLWECK. Après diverses tentatives intermédiaires, nous utilisons un ensemble qui se compose d'une embase métallique munie des arrivées du courant de chauffage, une petite cloche en verre recouvre le tout, un joint torique en Viton assurant l'étanchéité.



A propos d'étanchéité : les arrivées du courant de chauffage sont isolées par des tubes en verre collés avec le mélange Scotch-Weld 2216 B/A de la Société 3M. Cette colle bi-composants, une fois durcie, dégage peu et autorise son emploi dans des enceintes à vide entretenu. Hormis le filament l'ampoule recouvre le collecteur d'électrons qui est soit un cylindre de nickel diamètre 10x15 mm., soit une spirale en molybdène faisant office de grille pour vérifier son comportement dans l'opération de dégazage par bombardement électronique.



Sur le croquis montrant l'intérieur de l'embase on note les ailettes refroidissant l'extrémité des arrivées du courant filament. Elles limitent la température dans une zone où les joints de colle risquent de se dégrader sous l'action d'une chaleur excessive....A quelques centimètres de là nous avons un filament qui dépasse allègrement les 2000 degrés, aussi l'action bienfaisante d'un petit ventilateur aérant les arrivées de courant est-elle appréciée....

Les ailettes de plus gros diamètre font partie d'un cylindre de cuivre ayant fait office de plaque, pour des essais préliminaires, avant passage à la petite cloche en verre.

Pour les divers essais une tension de 400 volts est appliquée entre plaque et filament.

Filament diamètre 0,15 mm. x 18 mm. de long :

If (A)	3,15	3,25	3,30	3,35	3,40	3,35	3,39	3,41	3,37
Ip (mA)	5	10	15	20	30	40	50	60	70

La tension aux bornes du filament est de 2,6 à 3 volts à la naissance du courant plaque.

Ce premier relevé met en évidence la très rapide augmentation de l'intensité plaque pour de petites variations du courant filament. On note également que le courant plaque final est obtenu avec une intensité filament inférieure à celle venant d'être relevée : ceci a été observé sur d'autres mesures et suggère que le filament doit être stabilisé (rodé...?) avant d'être utilisé au régime souhaité. Durant cet essai, compte tenu du refroidissement apporté par les supports du filament, on peut estimer que seulement un centimètre de tungstène est réellement productif d'électrons, sa température dépassant les 2500 degrés la définition de l'aspect 'blanc éblouissant' est parfaitement justifiée. Un autre essai, avec un filament de mêmes diamètre et longueur, mais disposé différemment a confirmé les mesures précédentes.

Filament diamètre 0,15 mm. x 26 mm. de long :

Avec 3,2 Ampères sous 5,15 volts ce filament délivre 70 mA. sur la plaque qui est cette fois constituée par un tube de nickel diamètre 10 mm. x 25 mm. de long, au lieu de l'anode massive en cuivre des essais précédents. Le tube en nickel, porté au rouge sombre avec 70 mA., passe au rouge vif dans sa partie centrale sous un courant de 100 mA. obtenu avec 3,2 A sous 5,3 volts sur le filament. A nouveau on constate la forte variation du courant plaque pour un faible changement de l'intensité du chauffage, ceci étant du reste assez difficile à mesurer avec une grande précision, l'ajustage du chauffage filament étant assez 'pointu' à ce stade.

Filament diamètre 0,12 mm x 23 mm. de long :

Cette fois l'anode est munie de deux petites ailettes améliorant la dissipation. Elle passe au rouge sombre, sous 100 mA., environ 5 secondes après application de la haute tension mais sans arriver au rouge vif. Le chauffage filament est de 2,28 Ampères sous 4,47 volts.

Le courant plaque retombe à moins de 1 mA. avec un chauffage de 1,5 A x 2 volts.

On observe que, pour un même courant plaque, ce filament absorbe seulement 10,2 watts contre 17 watts pour celui de l'essai précédent. Autre point intéressant : au cours de la montée graduelle du chauffage, avec la tension plaque appliquée, plusieurs décharges du genre 'arcs' se produisent mais disparaissent une fois le régime maximum atteint. Après plusieurs montées de 0 à 100 mA. le problème disparaît. Cela est peut-être dû à la libération brutale de gaz occlus, ou encore à la volatilisation de particules lubrifiantes utilisées au cours du tréfilage du tungstène. Quoi qu'il en soit...il faut purger le filament sans tension plaque.

Les anomalies évoquées ci-dessus sont à rapprocher d'une étude sur le nettoyage des filaments de tungstène pour tubes électroniques, parue dans la revue 'Le Vide' en novembre 1950. Il s'agit, pour l'essentiel, de se débarrasser du graphite colloïdal servant de lubrifiant au cours de l'opération de tréfilage : hormis les procédés purement chimiques, par la soude, on se débarrasse du graphite par chauffage sous vide au dessus de 1000 degrés...notre cas.

L'étude évoque également la variation de la 'température de brillance', mesurée au pyromètre optique, sur des filaments ayant subi des températures élevées, ceci étant à rapprocher de certaines de nos mesures suggérant un 'rodage' du filament...à suivre.

Filament diamètre 0,05 mm. x 23 mm. de long :

Avec ce filament nous retrouvons pratiquement celui de la triode TM. A partir de cet essai, pour réduire les risques d'arcs susceptibles de détruire le filament, une résistance est placée en série avec la source de haute tension, ceci diminuant en conséquence la tension appliquée. Celle-ci avec 470 volts à vide aux bornes d'un condensateur de 125 microfarads est capable de décharges fatales pour un filament qui devient nettement plus fragile.

Vf	6,72	6,86	6,98	7,13	7,23	7,36	
Ip (mA.)	50	60	70	80	90	100	N.B : résistance de 1000
Vp	340	320	300	270	250	230	ohms en série avec la HT

Pour le tableau ci-dessus le courant filament a été relevé pratiquement constant à 0,56A entre 50 et 100 mA. sur la plaque, alors que la tension de chauffage montait régulièrement.

Ceci justifie le conseil de P. BERCHE (et d'autres) de mesurer plutôt la tension filament que le courant. H. BARKHAUSEN proposant lui de régler le chauffage pour obtenir le courant de saturation désiré. A nouveau on comparera la puissance de chauffage, 4,15 watts à celle des premiers essais. Pour confirmer l'ensemble des essais ci-dessus une mesure sur un filament de petit diamètre, assez court, est réalisée suivant divers paramètres.

Filament diamètre 0,05 mm. x 13 mm. de long.

If	Vf	Ip	R série	Vp	
0,63	4,12	10	6400	400	Période de 'rodage/purge' du filament pour éviter les arcs.
0,64	4,38	20	-	300	
0,65	4,58	30	-	230	
0,60	3,96	10	1000	450	Montée en puissance.....
0,62	4,24	20	-	420	
0,62	4,36	30	-	400	
0,62	4,50	40	-	370	Noter la valeur presque constante de If, la tension Vf étant plus variable.
0,62	4,65	50	-	350	
0,63	4,83	60	-	330	
0,63	4,95	70	-	300	
0,61	5,17	80	-	280	
0,61	5,26	90	-	260	
0,61	5,36	100	-	240	Anode rouge sombre (24 watts...)
0,59	5,33	100	330	310	En fin d'essai la puissance filament diminue pour un même courant plaque...Filament 'décrassé' ???
0,55	5,01	100	-	310	
0,52	5,02	100	-	310	
0,50	5,00	100	-	310	

Sur cet essai la puissance absorbée par le filament est, en gros, de 2,5 à 3 watts, a rapprocher des essais précédents. Ceci ne doit pas faire oublier que le filament est nettement plus sollicité, et que sa température plus élevée abrège d'autant sa durée suite à l'évaporation.

Suivant les 'bons auteurs' on admettra qu'un filament sera détruit lorsqu'il aura perdu 10% de son diamètre, ceci arrivant d'autant plus vite qu'il est plus chaud, ce qui conduit tout naturellement à l'emploi de filaments de plus gros diamètres avec l'inconvénient d'avoir des puissances de chauffage très élevées...Une autre possibilité consiste à augmenter la longueur du filament, pour un même diamètre, mais nous aurons rapidement une 'cathode' qui ne sera pas du tout équipotentielle, problème plus particulier au cas d'emploi du tube en réception.

Pour en finir avec les essais de filaments...Vérification du comportement de la future grille pendant l'opération de dégazage par bombardement électronique

Un enroulement de 12 tours, en fil de molybdène diamètre 0,21 mm., bobinés sur un diamètre de 4 mm. x 16 mm. de long fait office d'anode. Avec un courant de 50 mA. sous 350 volts (17 watts dissipés) la spirale ne montre pas de signe de déformation. Si l'examen visuel de cette 'grille' ne laisse rien deviner de ce qu'elle subit, on peut néanmoins supposer qu'elle est portée à une température très élevée en raison de la dissipation qu'elle supporte, surtout si

on compare avec le cylindre de plaque, en nickel, qui rougit avec des puissances certes plus élevées, mais réparties sur une plus grande surface. La proximité du filament incandescent ne permet pas vraiment de distinguer un changement dans la forme ou la couleur de la spirale.

Au terme des essais sur divers filaments, notre choix s'est orienté sur un diamètre de 0,1 mm pour un bon compromis entre puissance de chauffage/température/courant de saturation.

D'ailleurs le livre de P. BERCHE déjà cité mentionne ce filament comme étant celui de la lampe d'émission de 10 watts. Cette dernière valeur peut paraître modeste, mais il ne faut pas oublier que la plaque en nickel ne doit pas, sans risque de dégradation, dissiper plus de 1,5 watt au centimètre carré, soit ici environ 7 watts, ce qui est acceptable pour notre projet

Quoi qu'il en soit le nickel 'nu' (métal brillant) convient pour la réalisation de la plaque dont la température ne devrait pas dépasser 900 degrés. En cas d'une dissipation plus importante, faute de pouvoir utiliser du métal carburé (noirci), dont le facteur d'émissivité est quadruple, l'emploi du molybdène autoriserait un doublement de la température.....

Avant de clore le chapitre 'filament', quelques remarques sur la grande différence entre la résistance a froid, au moment de sa mise sous tension, et celle atteinte en service normal.

Les constantes thermiques du tungstène données par différents auteurs sont éloquentes : la résistivité a froid, exprimée en microhms/cm, est de 6 à 8 pour BERCHE, 5,66 à 6 pour BIGUENET, et 5,51 pour TERMAN, une valeur moyenne de 6 étant donc représentative.

Ceci change radicalement au moment où le filament chauffe, pour atteindre 70 à 90 vers 2000 à 2300 degrés, température prise comme référence par BERCHE. Par ailleurs TERMAN et BIGUENET donnent 0,0045 et 0,0053 (par degré) au coefficient de variation de la résistivité. Globalement ces chiffres concordent pour arriver à un décuplement de la résistance 'a chaud', vis a vis de celle 'a froid', ce que confirme la formule $R_{ch}=R_{fr}(1+K(T_{ch}-T_{fr}))$.

Dans ces conditions une triode TM, qui présentait une résistance normale de l'ordre de 6 ohms, devait démarrer avec guère plus de 0,5 ohm...soit un courant instantané de 7 ampères.

Bien entendu cette valeur excessive ne durait qu'une fraction de seconde, le très faible volume du filament étant rapidement amené à la température normale de fonctionnement.

On retrouve cela dans le livre de R. CHAMPEIX, dans le tableau des divers paramètres des filaments de tungstène, un rapport de 13 a 15 étant observé vers 2400 à 2700 degrés.

Ce qui précède est aisément vérifié sur des petites ampoules alimentées par les piles plates de 4,5 volts bien connues : la résistance 'a froid' est très inférieure à celle relevée sous 4,5 v., on passe de 1,5 ohm au repos à une douzaine d'ohms en marche normale. Il faut toutefois noter que le choc thermique initial est moins sévère compte tenu de la résistance interne des piles classiques. Dans le cas de la triode TM, généralement alimentée par des accumulateurs au plomb, un rhéostat en série sur le circuit des filaments trouvait toute sa justification. En ce qui nous concerne, une montée ou descente graduelle, et automatique, de la tension filament sera a prévoir; ceci ne présentant pas de difficulté avec l'électronique actuelle...

Au terme de cette évocation de l'aspect 'filament' du tube, au demeurant passionnant et qui mériterait d'être encore développé, il faut revenir sur un problème que nous avons supposé résolu, a savoir le vide, son obtention et sa mesure...tout au moins à notre échelle....

LES POMPES.....

Les trompes a mercure.

Un tube électronique n'est au fond qu'une petite enceinte de verre ou métal avec quelques tiges et fils bobinés en spirale, le tout comportant un minimum d'air dans ladite enceinte.....rien de bien compliqué n'est-il pas..?.. A priori la séquence logique de cette construction semble être l'assemblage des éléments internes (plaque-grille-filament) suivi de leur montage dans 'l'emballage' et enfin le vidage au moyen d'une pompe plus ou moins élaborée. Or c'est justement cette dernière opération qui nous a paru devoir être solutionnée en premier, tout au moins sous l'aspect 'pompes'. En effet les Amateurs audacieux qui se sont lancés dans cette aventure ont subi les limites imposées par la seule pompe qui leur soit accessible, a savoir la 'trompe a mercure'.

Bien que de nombreux modèles existent, rappelant bien souvent le nom de leur inventeur, (SPRENGEL...TOEPLER...) ils procèdent toujours du même principe : un tube de chute reçoit du mercure s'écoulant goutte à goutte, mais toutefois assez rapidement, à partir d'un réservoir relié par un siphon empêchant l'air de rentrer. L'air contenu dans le volume a vider est entraîné sous forme de petites bulles intercalées dans le chapelet des gouttes de mercure.

Ceci donne une construction assez simple à la portée de tout amateur un peu habile de ses doigts....et sachant travailler le verre. Toutefois cette simplicité est contrebalancée par divers inconvénients : la lenteur du processus, liée au débit, donc à la section des tubes qui est limitée à un diamètre intérieur de 2 mm. maximum pour obtenir un bon vide. Dans ces conditions il faut une demi-heure à une heure pour venir à bout de l'air que contient une triode classique, durée variant avec l'appareillage annexe qu'il faut également vider (tubulures de raccord...manomètre éventuel de contrôle...). En pratique, dans notre application, cette durée n'est pas un défaut rédhibitoire, un amateur se devant d'être patient....encore que....

Plus grave est la limite inférieure de la pression obtenue avec ce genre de pompe, le mercure ayant une tension de vapeur (relisez vos cours de physique...) d'environ 0,001 mm. de mercure aux températures courantes, pour descendre à 0,0004 mm. à zéro degré.

On ne peut prétendre à un meilleur vide à moins d'utiliser des 'pièges' refroidis, par exemple à l'azote liquide, ce qui sort nettement de nos possibilités. Et encore faut-il utiliser du mercure parfaitement pur, bien sec et exempt d'impuretés, zinc, plomb, résidus cuivreux qui vont s'ingénier à dégrader les choses. Vues sous cet angle les qualités du mercure que nous utilisons dépendent directement du prix d'achat : de 50 Francs les 100 grammes chez les fournisseurs de produits pour laboratoires, à 20 Francs le kilogramme chez les ferrailleurs du Marché aux Puces. Bien sur, dans ce dernier cas, il ne faut pas être trop regardant sur la qualité du mercure à la surface duquel nous avons vu flotter une bille de roulement et quelques résidus oubliés au fond du bocal de harengs marinés ayant reçu les 4 Kg de la transaction....Après dégrassage sur un papier filtre, nettoyage à l'acide nitrique et enfin séchage à l'acide sulfurique cela nous a donné un produit, sinon parfait, du moins très acceptable pour notre emploi...Nous sommes loin de la distillation sous vide du mercure....

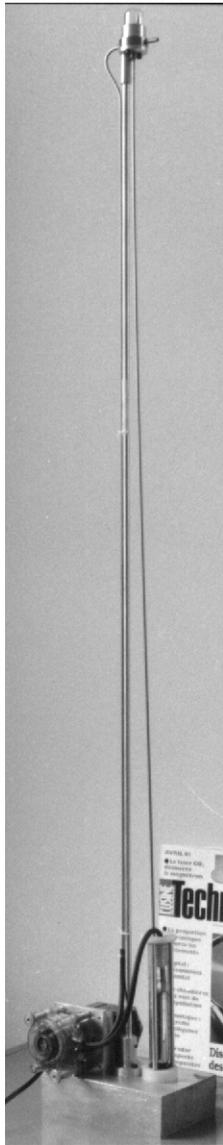
Malgré les limites évoquées ci-dessus de nombreuses triodes ont été vidées avec des trompes à mercure, a commencer par les illustres Audions de LEE DE FOREST, et, pour peu que les tensions appliquées restent modérées, ont correctement rempli leur fonction.

Une dernière contrainte dans l'emploi de ces trompes vient du relevage du mercure qui doit être régulièrement récupéré, dans le récipient au bas du tube de chute, pour remplir le réservoir et continuer le cycle. Ceci est particulièrement fastidieux aussi diverses

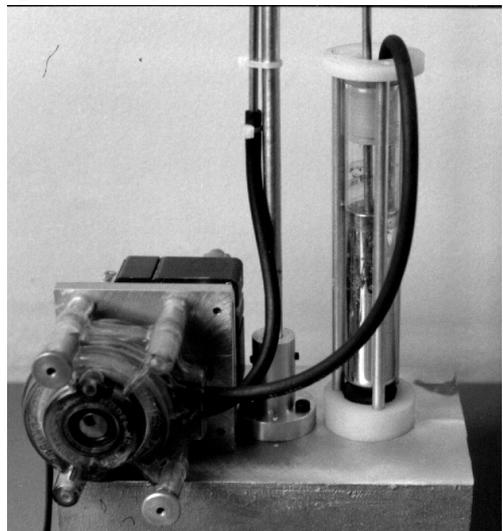
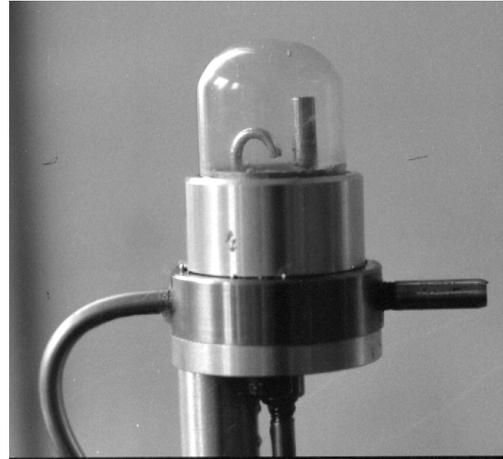
améliorations ont été proposées : la plus courante consiste à employer une seconde trompe, à eau cette fois, chargée de remonter le mercure en haut de la pompe principale.

À ce stade de notre projet, et malgré les limitations évoquées, il devient évident qu'il faut réaliser une trompe à mercure, ne serait-ce que pour se familiariser avec les divers problèmes soulevés : mesure du degré de vide (manomètres), étanchéité (joints), graisse pour vide, problèmes éventuels liés à l'emploi du mercure, ceci avant de passer à plus performant.

Après lecture attentive des descriptions de plusieurs modèles de trompe, en particulier celles de Monsieur MIGNET, et plusieurs tentatives incertaines... nous arrivons à la version

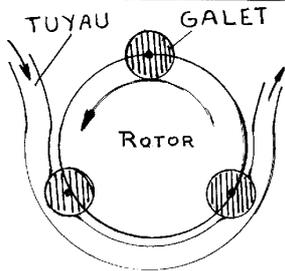


représentée ci-contre : Avec pour principale caractéristique l'emploi de métaux, avec l'exception du couvercle supérieur et du réservoir de mercure, en bas du tube de chute, obtenus à partir de tubes à essais coupés à la longueur voulue. Dans le cas d'une pompe soumise à rude épreuve au cours de divers essais, avec parfois des chocs, cela met à l'abri de la casse d'un modèle réalisé entièrement en verre. Plusieurs essais sur la forme ou la position du tube gicleur n'ayant pas montré la nette supériorité d'un quelconque modèle, le plus simple s'est révélé le plus efficace (comme cela est souvent le cas...) donc nous amenons le mercure juste au dessus du trou du tube de chute, assez près, un point c'est tout. Une vue rapprochée de la 'tête de pompe' montre l'ensemble. Une pompe péristaltique assure la circulation automatique du mercure qu'elle relève au niveau de la trompe. Avant de poursuivre quelques mots sur ce type de pompe, peu connue en dehors des milieux industriels et, surtout, médicaux où elle est irremplaçable, par exemple en dialyse sanguine. Suivant le croquis un tambour, portant trois galets à 120 degrés les uns des autres, tourne en écrasant un tuyau souple dans



lequel se trouve le fluide à pomper (généralement un liquide). Il y a toujours deux galets en action sur le tuyau, leur mouvement engendrant le déplacement du volume contenu dans le tuyau entre les deux galets. Cette pompe présente de nombreux avantages : en premier lieu l'absence totale de pollution du liquide à pomper par le milieu extérieur puisque le tuyau, choisi compatible avec le fluide, est étanche bien que déformable ; de même il n'y a pas de fuite en sens inverse. Ensuite le débit, fonction du diamètre du tube et de la vitesse de rotation du tambour, est très aisément réglable depuis zéro ou presque (un tour par minute...) jusqu'à plusieurs dizaines de litres par minute pour les gros diamètres. La matière utilisée pour le tuyau est à choisir avec soin pour chaque application. Dans notre cas le silicone habituel est

fortement déconseillé car rapidement attaqué par le mercure qui se trouve ensuite pollué par des dépôts noirâtres.. Le VITON est par contre excellent dans l'emploi, aucune dégradation n'étant visible, même après un long usage. Toutefois son prix très élevé nous a fait choisir le NORPRENE qui se dégrade assez peu, après un temps d'utilisation jugé raisonnable, offrant



ainsi un excellent rapport qualité/prix. Notons en passant qu'il est également possible d'utiliser (à titre de dépannage) les pompes péristaltiques en pompe à vide simples : un vacuoscope (environ 50 centimètres cubes) est amené à 20 millibars au bout d'une demi-heure...pas vraiment rapide.... Avant d'abandonner le sujet passionnant que sont les pompes péristaltiques, nous ne pouvons que conseiller la lecture du catalogue de la Société BIOBLOCK qui donne une foule de renseignements sur ces

pompes et leurs accessoires, notamment les divers tuyaux. Poursuivons l'examen des constituants de la pompe : les tubes de chute ainsi que de remontée du mercure sont obtenus à partir d'un tuyau en acier inoxydable de diamètre intérieur 2 mm., fileté sur son diamètre extérieur (4mm.), directement vissé dans le corps de la pompe avec interposition d'un peu de graisse aux silicones 'spéciale vide'(cf. BIOBLOCK).

De même pour le tube en NORPRENE sortant de la pompe péristaltique, simplement glissé sur le tube en acier de remontée du mercure. Dès à présent on notera la simplicité des raccords entre les divers éléments avec, le plus souvent, un film MINCE (on ne beurre pas des tartines...) de graisse aux silicones. Cette façon de faire, fruit de nombreux essais, est appliquée sur l'ensemble des diverses pompes que nous avons réalisées, même pour vide élevé ; des graisses spéciales existant pour cette dernière application.

Par contre plusieurs essais malheureux nous ont rappelé qu'il faut proscrire de la construction de la pompe certaines matières plastiques, particulièrement les polyamides (NYLON) qui, par suite de leur affinité pour l'humidité de l'air qu'elles absorbent jusqu'à 3% de leur poids, se feront un plaisir de la restituer au pompage sous forme de vapeur d'eau limitant fortement l'efficacité de la pompe. Egalement ne pas utiliser de laiton ou autre tuyau en cuivre, pourtant d'emploi si pratique, mais que le mercure va grignoter avec apparition d'une forte pollution à sa surface. Donc utiliser de l'acier, inoxydable de préférence.....

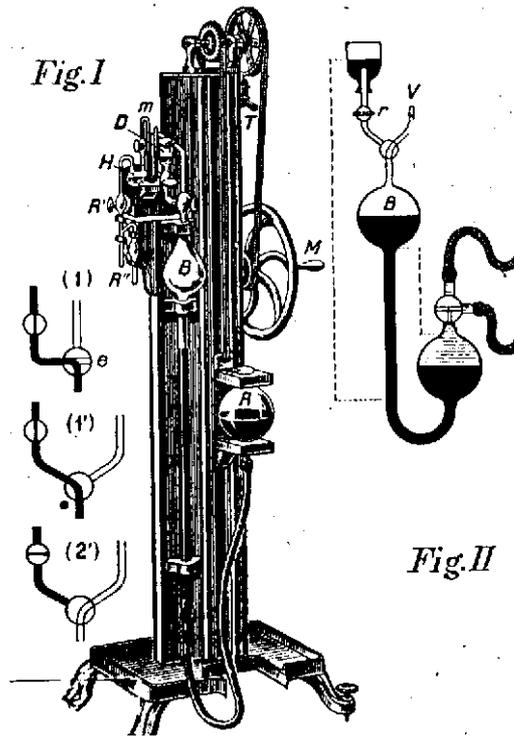
Telle quelle, le moteur tournant paisiblement à 30 tours par minute, la pompe donne un vide variant entre 0,05 Torr avec un tube NORPRENE et du mercure usagé et 'quelque chose'...(restons prudents) proche de 0,001 Torr avec du mercure très propre et tube VITON.

Même dans le cas le plus défavorable cela permet quantité d'essais, notamment dans la zone de 10 à 1 Torr, point de transition entre les pompes primaires et les pompes pour vide élevé, comme nous le verrons ultérieurement. L'emploi d'un moteur assurant l'autonomie de la pompe permet de se consacrer entièrement aux essais en cours, même si ce confort est obtenu au prix d'un moindre vide limite au bout d'un certain temps.

Malgré les limites inhérentes à ce genre de pompe nous lui devons beaucoup coté apprentissage...deux exemples entre cent : comment récupérer des billes de mercure tombées à terre, entre les lames de parquet, au moyen d'une seringue médicale en guise d'aspirateur...ou encore attendre (longtemps...) que le vide s'établisse, faute d'avoir raccordé les tuyaux en sortie de pompe....passons....

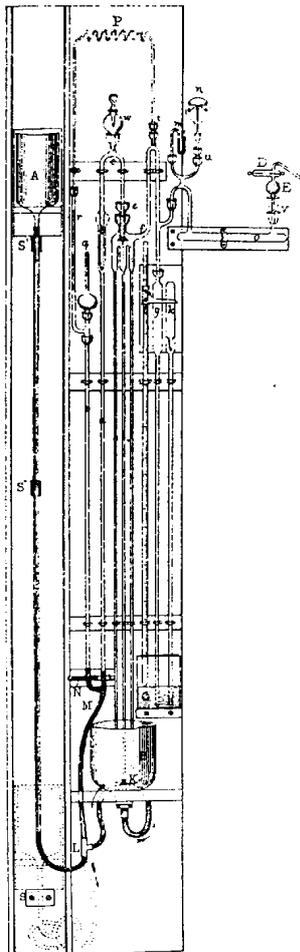
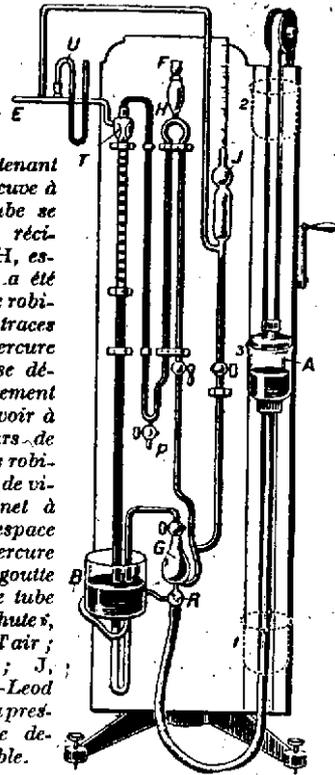
Avant d'abandonner ces vénérables ancêtres il convient d'en montrer quelques exemples remarquables : extraits de 'La Science et la Vie' de juillet 1920 deux modèles où le relevage du réservoir de mercure s'effectue au moyen d'un ensemble manivelle-volant-poulies etc...

Mis à part la présentation des pompes 'barométriques', l'article décrit l'ensemble des pompes anciennes et actuelles (en 1920...), certaines, très efficaces, venant d'apparaître ; et ceci est d'autant plus intéressant que nous connaissons leur développement futur.



TROMPE
A MERCURE
A UNE SEULE
CHUTE

A, réservoir contenant le mercure ; B, cuve à mercure ; E, tube se raccordant au récipient à vider ; H, espace où le vide a été fait, fermé par le robinet F et où les traces d'air que le mercure peut entraîner se dégagent ; G, renflement servant de réservoir à mercure au cours de la manœuvre des robinets ; P, robinet de vidange ; R, robinet à trois voies ; T, espace où se rend le mercure avant de tomber goutte à goutte dans le tube capillaire, ou « chute », en entraînant l'air ; U, manomètre ; J, jauge de Mac-Leod pour apprécier la pression quand elle devient très faible.

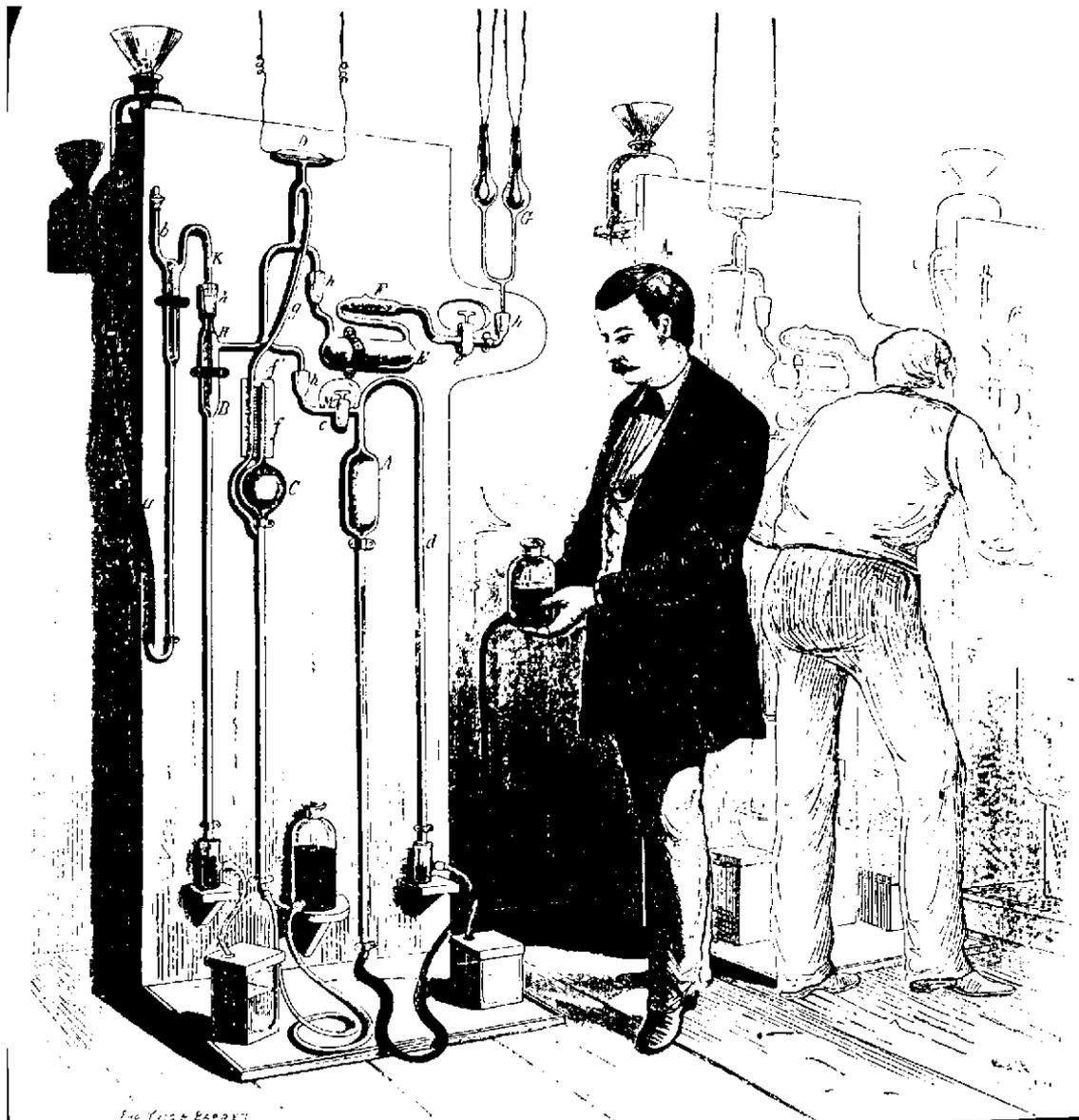


En octobre 1934 un autre article fera à nouveau le point sur l'état de la technique des pompes a vide....Nous avons vu plusieurs fois, dans des brocantes, les deux revues ...A ne pas laisser passer car ce sont deux excellents documents sur l'évolution de ces matériels....

On trouvera page suivante le modèle utilisé par EDISON pour vider les lampes à incandescence : c'est un peu plus simple.....

Ici le relevage du mercure est confié aux mains d'un opérateur qui fait alternativement monter et descendre le réservoir de mercure. En fait nous avons regroupé l'ensemble des pompes utilisant du mercure et des tubes barométriques sous le vocable de 'trompe a mercure', alors que les deux exemples ci-dessus font plutôt appel à la circulation du mercure dans divers volumes où il comprime ou déplace l'air à éliminer au lieu d'une simple chute en chapelet de la trompe a mercure conventionnelle. Quoi qu'il en soit toutes ces pompes ont en commun un nombre parfois impressionnant de tubes en verre témoignant de l'habileté de leur réalisateur.

Terminons par ce qui nous semble avoir été un chef d'œuvre dans le genre : Vers 1875/1876 William CROOKES réalise une longue série d'essais pour obtenir le 'vide absolu'. Avec l'aide de GIMMINGHAM (qui était un remarquable souffleur de verre) il utilise une trompe avec un puis trois et, enfin, sept tubes de chute. Ajoutant à cela de nombreux perfectionnements de détails il arrive à descendre à une pression de 10-8 atmosphère.



Les pompes volumétriques

Après l'entrée en matière via les trompes à mercure et les nombreux essais consécutifs, il devient évident que, comme la théorie le prévoit, le vide limite à espérer dans notre cas sera, au mieux, voisin de 0,001 Torr donc insuffisant. Enfin le débit est faible et met la patience à rude épreuve....Ceci conduit à deux étapes dans le pompage d'un tube : une pompe primaire étant chargée d'abaisser rapidement la pression à un niveau où une pompe secondaire prendra la relève pour parfaire l'opération.....Intéressons nous à la première pompe.

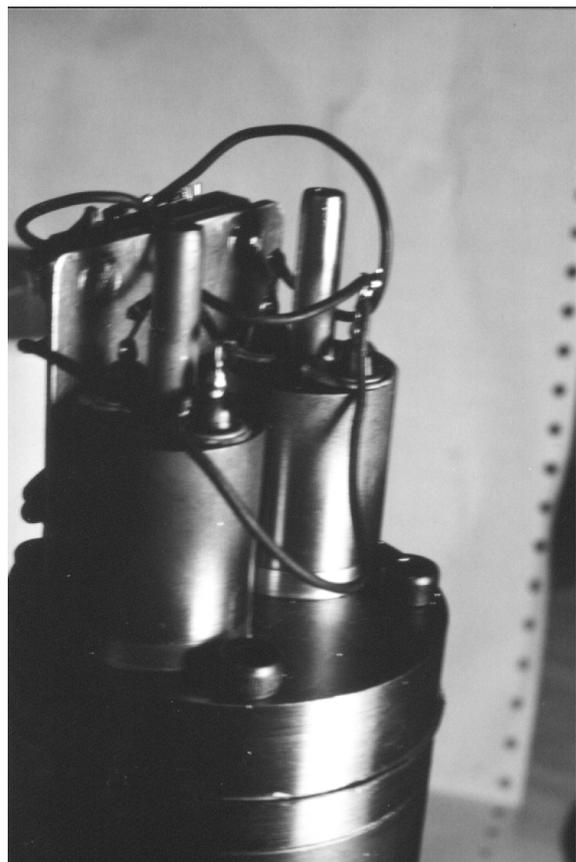
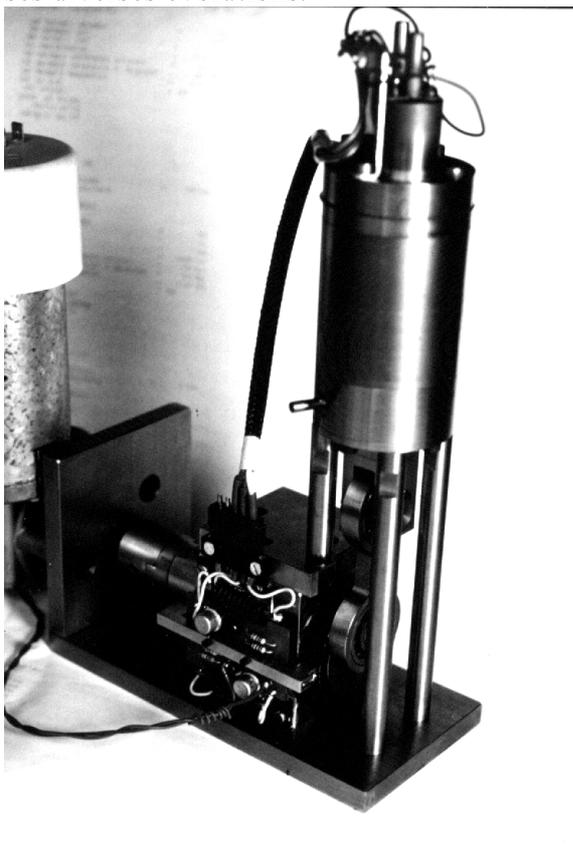
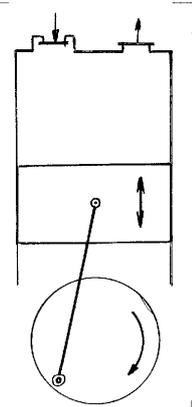
Parmi les multiples possibilités nous avons tout d'abord été tentés par la classique pompe à piston, réminiscence, dans un autre genre, des machines à vapeur de notre période 'modèles réduits' ; il y a bien longtemps....Suivant le schéma ci-après on reconnaît quelque chose ressemblant à un moteur à quatre temps pour automobile. La comparaison s'arrête là : les soupapes sont remplacées par des clapets permettant l'admission et le refoulement de l'air déplacé par le piston. La principale difficulté réside justement dans la marche de ces clapets : ils ne sont pas pilotés par un quelconque arbre à cames, la dépression et la compression agissent seules sur eux pour obtenir leur ouverture. Vers les basses pressions (quelques Torr)

les poids et résistance mécanique des clapets sont capables de s'opposer au libre passage de l'air. Les poids et efforts doivent donc se limiter à quelques grammes, grand maximum.

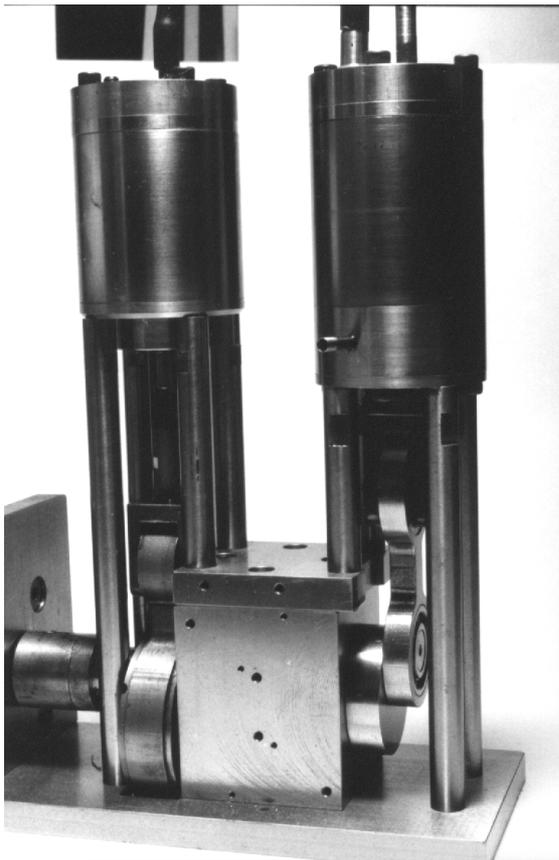
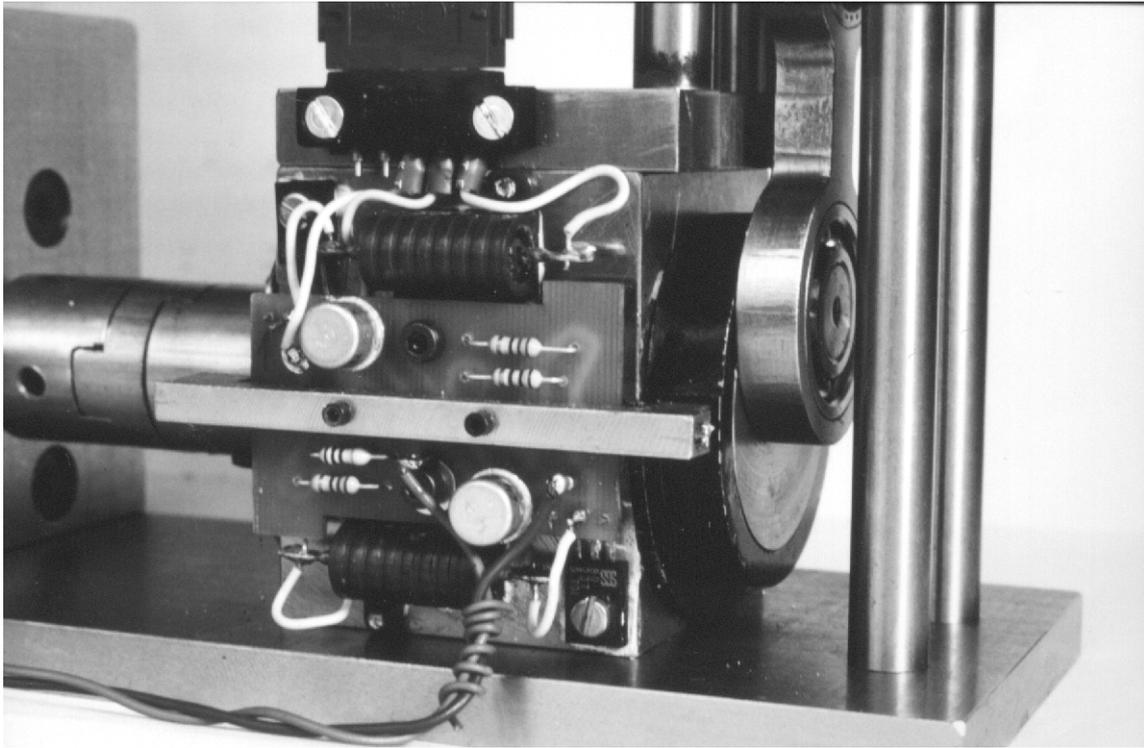
Un autre ennemi sournois se trouve dans le 'volume mort' : quel que soit le soin apporté à la construction il existe toujours quelques millimètres cubes qui traînent ici ou là et sont, dans une pompe à un étage, amenés en fin de remontée du piston à une pression égale à la pression atmosphérique plus 'quelque chose' nécessaire pour ouvrir le clapet d'échappement.

Au cours de sa descente le piston va détendre le résidu d'air qui ne s'est pas échappé et, à un certain moment, la pression sera enfin suffisamment basse pour vaincre l'effort demandé pour forcer l'ouverture du clapet d'admission ; ceci limitant naturellement la pression minimale au niveau de l'effort imposé par le clapet. Le volume mort peut être réduit par une construction soignée amenant le piston pratiquement au contact du bas des chambres portant les clapets .(il restera toujours le volume des chambres)

Nous avons réduit cet espace à près d'un centième de millimètre au moyen de roulements à billes et a aiguilles pour les divers embellages. Toutefois il restera toujours le volume des logements des clapets : Après de multiples essais nous employons une bille de 6 mm. de diamètre avec un joint torique pour siège coté échappement, un clapet en silicone (rescapé d'un détendeur de plongée sous-marine...) coté admission. Cette pompe est représentée dans ses diverses évolutions.



Pour mémoire , un essai de clapets pilotés par des électro-aimants, annulant les efforts à un moment soigneusement choisi du cycle, s'est révélé un peu trop délicat à l'usage bien qu'assez efficace. Une pompe réalisée suivant ce principe est également représentée : on voit les capots des électro-aimants en haut de la pompe, leur système de commande par capteur optique de position étant visible au niveau du vilebrequin.

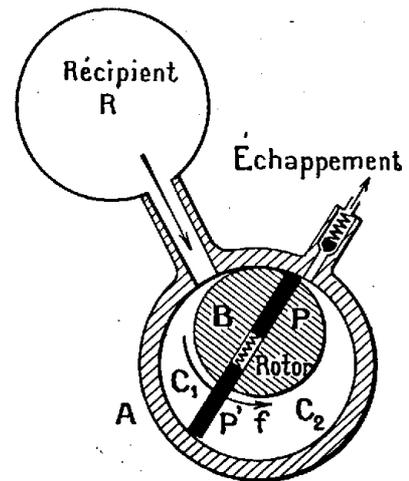


Avec un alésage de 32 mm. et une course de 25 mm. un vide de l'ordre de 6 Torr est obtenu en une à deux minutes dans les diverses enceintes utilisées pour ces essais (50 à 100 centimètres cubes) . Arrivé à ce stade deux points sont encore à améliorer : le vide atteint qui est un peu 'juste' pour attaquer correctement la pompe secondaire. Plus grave en pratique l'effort à vaincre par le moteur d'entraînement varie considérablement au cours d'un tour de vilebrequin : durant la descente du piston celui-ci est le siège de deux efforts antagonistes ; la face supérieure reçoit un appui minime de la part de la pression interne (dès que le piston commence à descendre), par contre la face inférieure du piston est constamment soumise à la pression atmosphérique. A la remontée du piston les choses s'améliorent quelque peu...mais la différence d'effort entre montée et descente du piston reste importante. La solution de ces deux défauts se trouve dans l'emploi d'une pompe à deux étages dont les mouvements seront décalés de 180 degrés. Ainsi les efforts sur les faces inférieures des pistons se

compenseront très largement, l'embiellage étant chargé d'encaisser les efforts alternés de traction et de compression. Enfin la mise en cascade des deux pompes permet d'obtenir un vide convenable pour l'attaque de la pompe secondaire. On retrouve ce qui précède sur la vue d'ensemble de la pompe qui, avec des clapets en silicone et billes évoqués plus haut, donne un vide limite un peu en dessous de 1,5 Torr. A l'usage, tournant imperturbablement à 30 tours par minute, cette pompe est particulièrement fiable et demande très peu d'attention. De plus

elle est très agréable a regarder en fonctionnement....un petit air 'rétro' qui récompense des nombreuses heures consacrées à sa réalisation.....

Dans la gamme des pompes primaires nous avons ensuite envisagé la désormais classique pompe rotative a palettes. Bien qu'étant également une pompe volumétrique régie par la loi de Boyle-Mariotte, elle substitue un simple mouvement rotatif au mouvement alternatif de la pompe a pistons. Le dessin ci-contre donne une idée de sa constitution interne : un rotor, excentré par rapport au cylindre le contenant, est fendu suivant son diamètre, une lame coulissant sans jeu dans cette fente. Au cours de la rotation le déplacement radial de la lame fait varier le volume, d'une part entre l'orifice d'aspiration et la lame, et également entre la lame et l'orifice d'échappement. Pour peu que les fuites internes soient faibles on voit que l'air est constamment aspiré puis refoulé par le déplacement de la lame. En pratique les jeux, au demeurant très faibles, sont obstrués par un mince film d'huile. Cette dernière est continuellement admise par un petit trou muni d'un robinet pointeau, l'excédent étant refoulé par la palette qui racle la paroi du cylindre et expulse un mélange air/huile par la soupape.



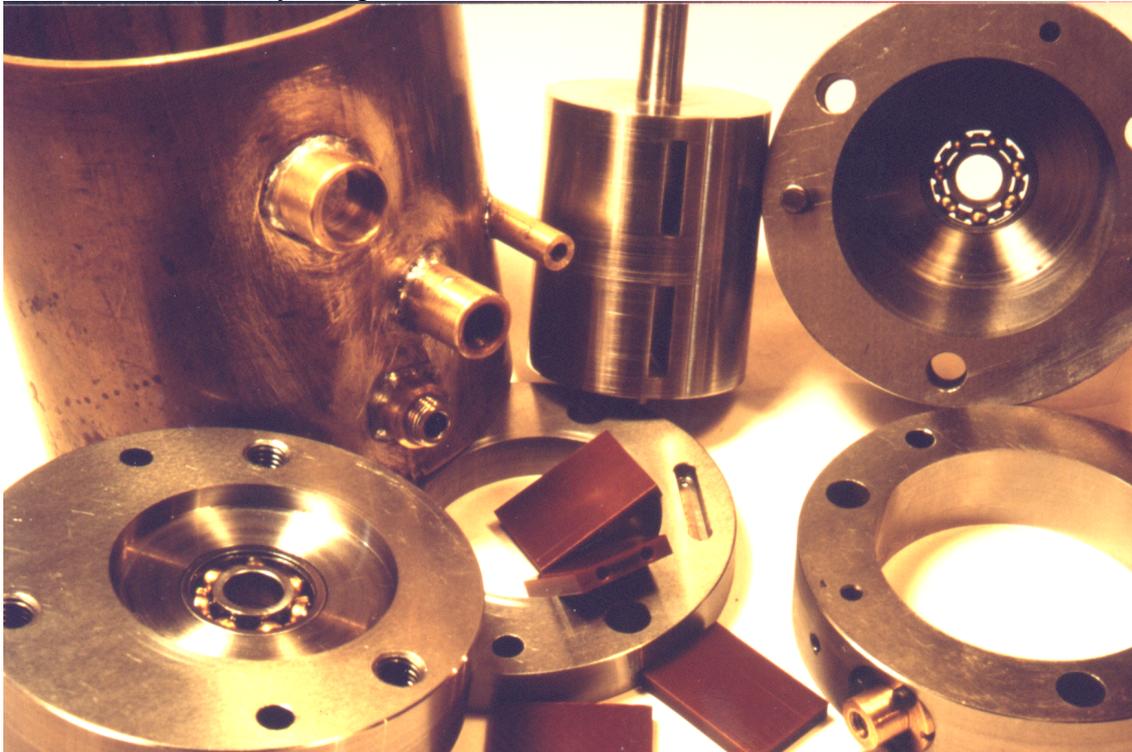
Dans les petites pompes (notre cas bien sur) l'ensemble de la pompe est placé dans un boîtier rempli d'huile a faible tension de vapeur (ici BIOBLOCK type A, tension de vapeur 4×10^{-7} mm à 20°), donc aucune possibilité de rentrée d'air parasite. Pour peu que l'on place deux pompes en cascade on obtient aisément un vide très inférieur à 1 Torr, les meilleures atteignant 0,001 Torr, soit un vide comparable à celui des trompes a mercure, mais avec un débit beaucoup plus élevé ; une dizaine de litres par seconde n'a rien d'exceptionnel.....

Avant d'aller plus avant il faut rappeler qu'elles furent réinventées par GAEDE au début du siècle. 'réinventées' parce qu'elles rappellent beaucoup une pompe a eau dite 'du Prince Rupert' vers 1650, elle même citée par Ramelli en 1588...Ceci n'enlève rien au génie de GAEDE à qui l'on doit également la pompe 'à escargot', une petite merveille d'ingéniosité qui, avec son mercure tournant dans un tambour muni d'un hublot, vous a un petit air de machine a laver. Dans la foulée il invente en 1915 la pompe a vapeur de mercure qui, reprise et améliorée par LANGMUIR, sera au cœur de tous les systèmes de pompage durant des décennies. Enfin il est également l'inventeur de la pompe moléculaire dont nous aurons l'occasion de reparler....Dommage qu'il soit mort misérablement en 1945 de diphtérie et de malnutrition....Cette fin est a rapprocher de celle de F. HOLWECK, qui avait repris et amélioré sa pompe moléculaire, tout aussi tragique et a peu près à la même époque.

Mais revenons à notre pompe : Elle comporte deux étages dont le rotor de 50 mm. de diamètre tourne dans un cylindre de 60 mm. avec des palettes de 20 mm. de large. Tournant aux environs de 300 tours par minute elle amène en cinq minutes une enceinte de 200 centimètres cubes à 0,02 Torr, ceci étant une sensible amélioration vis a vis de la pompe a pistons. Nous obtenons à nouveau une pompe très fiable demandant un minimum d'entretien, très suffisante pour nos objectifs de débit et pression. Le corps de pompe proprement dit est enfermé dans un carter de 105 mm. de diamètre, rempli d'huile pour assurer l'étanchéité.

Des joints du type 'a lèvres' évitent les fuites sur l'arbre d'entraînement. Cet entraînement est assuré par un ensemble moteur/démultiplicateur ramenant vers 300 tours minute la vitesse d'un petit moteur électrique. L'emploi de courroies crantées, associées à des roues adaptées à ce genre de courroies, serait a préférer au démultiplicateur a pignons droits utilisé dans notre cas. Le fonctionnement nettement moins bruyant facilitant le réglage auditif de l'admission d'huile par le robinet a pointeau, en écoutant les petits claquements de la soupape a bille soulevée à chaque passage du rotor sous la poussée du mélange air/huile. Dans le cas présent

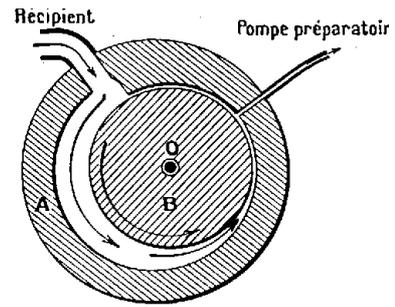
le bon réglage sera celui donnant le meilleur vide indiqué sur un manomètre de Pirani...Pas assez d'huile donnant un vide insuffisant, un excès provoquant des efforts inutiles sur les palettes et un ralentissement de la vitesse de rotation...A ce propos il convient, avant mise sous tension du moteur, de faire tourner le rotor manuellement sur un ou deux tours, afin d'évacuer le surplus d'huile qui peut avoir rempli la chambre et, étant incompressible, opposera un effort anormal au départ de la pompe. Egalement un joint d'Oldham relie le démultiplicateur à l'arbre de la pompe pour éviter un cintrage de l'axe du rotor consécutif à un effort latéral transmis par la pignonnerie du démultiplicateur. Cela serait également indispensable dans le cas d'emploi de courroies pour ne pas transmettre une composante de traction sur l'arbre de la pompe. Ce type de joint autorise des écarts d'alignement tout en éliminant le problème évoqué ci-dessus. Pour mémoire le rotor passe à 0,01 mm. de la paroi des chambres, dans la zone située entre les orifices d'admission et d'échappement et il convient d'éviter toute cause de détérioration par torsion ou traction...Un filtre séparant l'air et l'huile est placé au dessus de la pompe. En effet, au début du pompage, de petits geysers d'huile ont la fâcheuse habitude de sortir de la pompe...ce qui est du plus bel effet sur son environnement si l'on n'y met pas bon ordre....



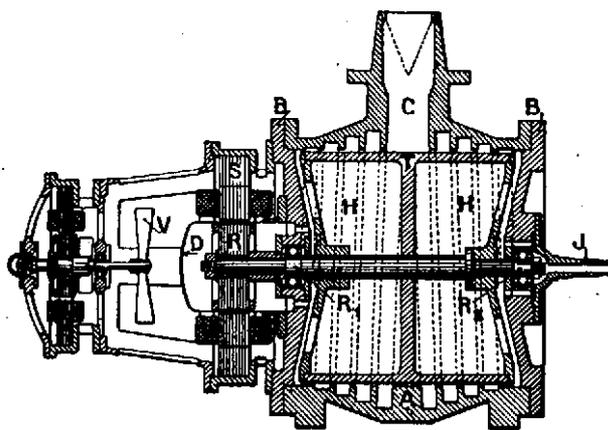
Au fond le rotor avec les deux fentes recevant les palettes présentes au premier plan.

Si la pompe a palettes réunit les qualités des pompes précédentes, a savoir le débit élevé de la pompe a pistons plus un niveau assez bas obtenu de la pompe a mercure, il n'empêche que ce dernier vide est encore insuffisant pour l'emploi projeté. Notre objectif initial étant de vider un volume de 100 centimètres cubes pour l'ensemble tube plus canalisations, ce qui est très peu. Coté valeur du vide nous souhaitons obtenir mieux que 10-5 mb.....Cette relative imprécision confirme bien notre désir d'un bon vide, au sens du début des années vingt, sans pour autant prétendre aux 10-10 mb. des pompes turbomoléculaires actuelles. Ceci nous place largement au dessous du vide des premiers Audions, ou encore des tubes 'mous' réservés à la détection. Donc il nous faut à nouveau envisager la réalisation de quelque chose de plus performant, uniquement sous l'angle du vide limite. Délaissant les pompes à vapeur de mercure ou d'huile, le coté 'belle mécanique de précision' nous a attiré vers la pompe moléculaire : Comme déjà mentionné elle est due à GAEDE qui propose en 1912/1913 le

montage du croquis ci-dessous. On y trouve un rotor tournant rapidement dans une enceinte où un vide préliminaire de quelques Torr a déjà été obtenu. Les molécules d'air qui rebondissent aléatoirement contre les parois reçoivent une petite impulsion au contact du rotor, ceci dans la direction du sens de rotation. Par suite elles sont incitées à se diriger, par chocs successifs, vers l'orifice de sortie. Bien que très simple en apparence ce principe impose une réalisation mécanique très délicate : la vitesse périphérique du rotor doit être du même ordre de grandeur que la vitesse des molécules se déplaçant à plusieurs centaines de mètres par seconde. Ceci oblige soit à un rotor de grand diamètre tournant relativement doucement, ou bien de plus petit diamètre mais tournant très vite. Si au début les pompes tournaient entre 3000 et 10000 tours par minute, les réalisations actuelles pédalent aux alentours de 100.000 tours minute. De ce qui précède on déduit aisément que les problèmes de paliers (roulements à billes) ou d'équilibrage (vibrations) sont assez délicats à résoudre. Les jeux entre rotor et enceinte doivent être très réduits pour ne pas offrir une échappatoire aux molécules qui tentent de revenir en arrière malgré les sollicitations du rotor. Un jeu de 0,02 à 0,05 mm. (grand maximum) est la règle. Enfin le problème de l'entraînement du rotor par un moteur tournant forcément très vite n'est pas a priori évident. Ces problèmes mécaniques ont longtemps freiné le développement de ce type de pompe au profit des pompes à vapeur de mercure ou d'huile qui n'ont pas d'éléments internes mobiles.



On doit toutefois à Fernand HOLWECK, en 1923, un type de pompe moléculaire très



évolué vis à vis du modèle originel. Ceci est visible sur la vue en coupe qui permet d'apprécier les principales innovations : D'abord la présence de deux canaux hélicoïdaux dans le stator et, surtout, le moteur dont le rotor fait partie de la zone de la pompe qui est sous vide primaire. Un mince capot de métal non magnétique assurant l'étanchéité, tout en laissant agir le champ magnétique du stator. La grande longueur développée des canaux donne sa pleine efficacité au principe des chocs successifs tout en offrant un débit

satisfaisant. On trouve la description de ces pompes en 1923 dans 'L'onde Electrique' .

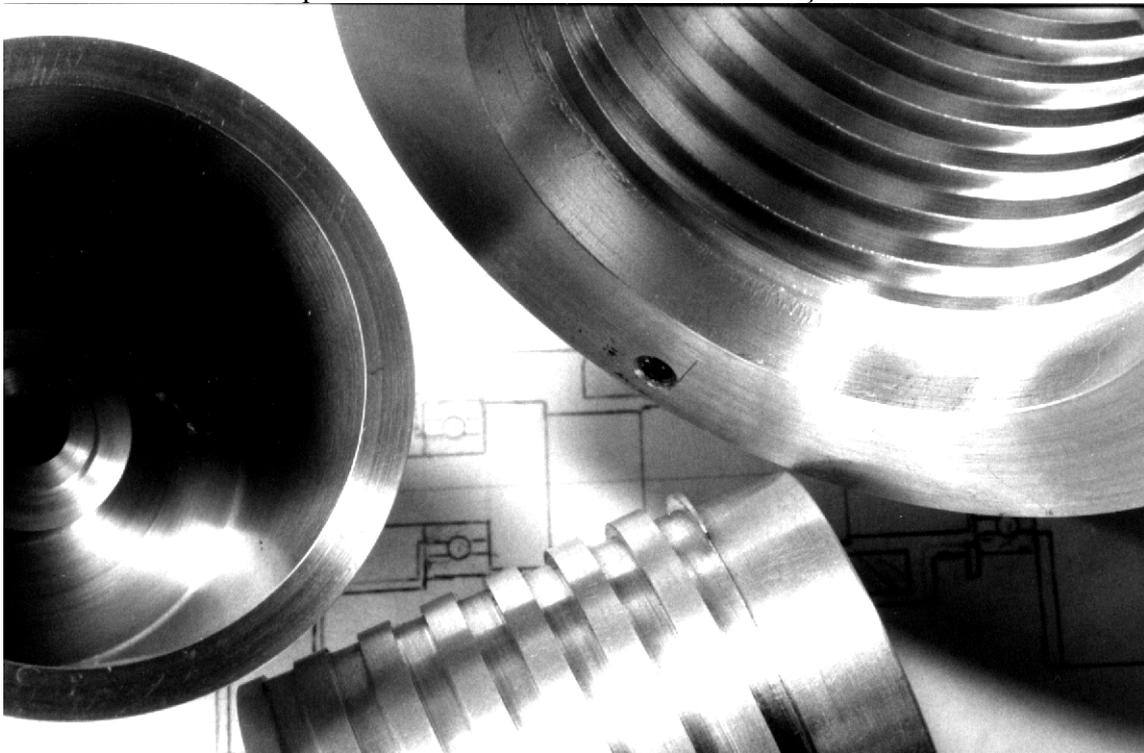
L'apport de Fernand HOLWECK à la technique du vide est remarquable et permettra la réalisation de tubes démontables pour d'éventuelles réparations (changement du filament), un pompage en permanence ne posant pas de problème en raison de la grande fiabilité de cette pompe. Après une éclipse de près de trente ans ce type de pompe est de nouveau revenu au premier plan , surtout dans la version turbomoléculaire où une turbine à aubes (analogue à un réacteur d'avion) précède une pompe dérivée de celle que nous venons de voir.

Vis à vis des pompes à vapeur de mercure ou d'huile on apprécie l'absence de rétrodiffusion de vapeur polluante vers l'enceinte à vider. Egalement le vide obtenu est très bas et limité, en principe, uniquement par le dégazage des matériaux constituant la pompe, pour peu que le vide préliminaire soit suffisamment bas. A notre niveau le vide à espérer sera également dépendant de la première pompe, la pompe à palettes étant ici satisfaisante.

Va donc pour une pompe moléculaire....Oui mais....il apparaît vite que les paliers ou le moteur placés dans l'enceinte sous vide posent problème...Après évaluations des diverses objections (et de nos possibilités...) le principe d'un rotor en porte à faux en bout de l'arbre

moteur est retenu suivant les vues de détail ci-dessous. Choix fait après étude attentive des catalogues ou notices techniques des Sociétés réalisant du matériel pour l'industrie du vide...BALZERS-VEECO-SOGEV. S'il y a un large fossé entre le matériel actuel et nos objectifs, ce n'est pas une raison pour ne pas s'informer et...garder les pieds sur terre.

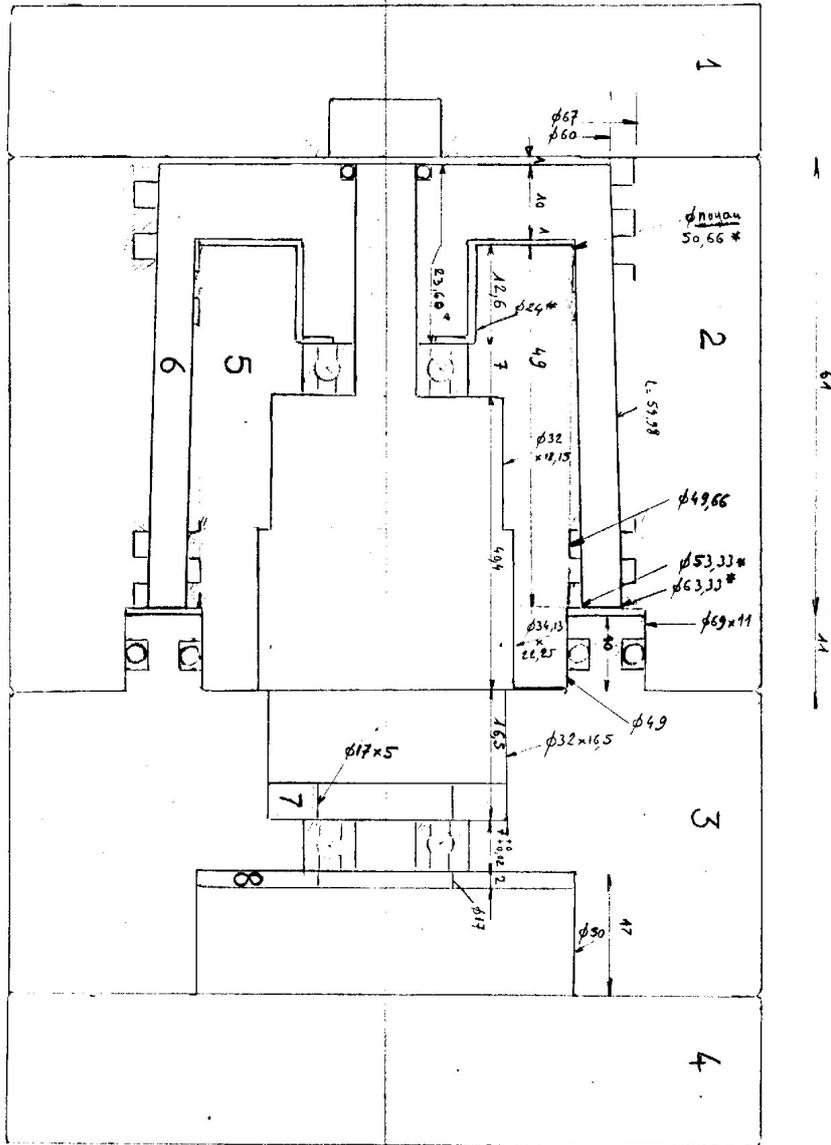
En fait la première opération consiste à trouver un moteur de petite taille capable de tourner à plus de 10000 tours minute et entraînant un rotor peu chargé, puisque l'air, déjà raréfié, offre peu de résistance à la rotation. Une possibilité réside dans la reconversion des ventilateurs miniatures utilisés dans le matériel aviation. La place leur étant chichement attribuée ils sont obligés de tourner très vite afin de compenser leurs petites dimensions pour brasser un volume d'air satisfaisant. Alimentés en triphasé 400 Hz. leur consommation est généralement assez élevée pour atteindre les 15000 ou 20000 tours, l'air opposant une forte résistance à ces régimes au déplacement des ailettes du rotor. Quelques exemples : 27 volts triphasés pour les 9000 tours du ventilateur diamètre 25 mm. dans l'émetteur-récepteur ARC44 ; 115 volts toujours triphasés dans le Collins 618T qui monte à 20000 tours ; enfin 21500 tours avec 40 volts pour les ventilateurs de la Société Française L.M.B.



Le cœur de la pompe moléculaire : le rotor (à gauche) et les deux stators coniques.

Dans notre application on peut tabler sur une sensible réduction de la consommation suite à la diminution des frottements évoqués plus haut. Par contre on peut s'attendre à un dégazage notable des produits d'imprégnation des bobinages....Ceci nous ramène au douloureux souvenir d'un excellent moteur diphasé Sadir-Carpentier, récupéré dans les 'surplus', qui acceptait sans broncher de tourner à 24000 tours (ou à peu près....'glissement' oblige) sous 400 Hz. au lieu des 3000 tours sous 50 Hz de son utilisation normale. Toutefois l'animal sentant à plein nez l'imprégnation de ses bobinages il fut décidé de le faire dégazer sous vide...la suite sera moins heureuse....une malencontreuse panne de la régulation thermique de l'enceinte sous vide qui s'emballe, et le malheureux moteur dégaze pour de bon, calciné à point...Ce problème de dégazage, commun à tous les types de moteurs envisages devenant préoccupant, nous avons finalement récupéré un moteur fabriqué par la Société PRECILEC, bien connue pour ses excellents 'synchros-répéteurs-selsyns'. La gamme comprend aussi

* voir l'écoulement (sens du fluide)



POMPE MOLECULAIRE

divers moteurs tournant à vitesse élevée, souvent employés dans la technique du vide, leur imprégnation est donc tout naturellement adaptée à notre projet...Un souci de moins...

Un autre point critique concerne les roulements à billes qui sont très sollicités : si le faible poids du rotor en aluminium implique de faibles charges tant statiques que dynamiques, il reste la vitesse de rotation à 24000 tours par minute qui limite le choix, du moins dans les fabrications standard. Nous avons finalement opté pour des 608 de S.N.R, indiqués comme pouvant accepter un maximum de 31000 tours minute. Comme il persiste toujours un léger jeu, surtout dans le sens axial, il serait préférable d'utiliser des roulements à contacts obliques, avec précharge réglable, analogue au type RA8220 de la Société R.M.B, dont le prix reste très acceptable. Toutefois, dans notre cas où l'axe de la pompe est vertical, l'utilisation de roulements courants s'est avérée satisfaisante, seule une légère vibration autour de 4000/5000 tours étant perceptible, les choses s'apaisant au delà. Un autre point important concerne la graisse lubrifiant les roulements : il existe de nombreuses graisses pour la technique du vide, mais la plupart sont destinées aux applications statiques et ne conviennent pas forcément aux pièces en mouvement. Nous utilisons finalement de la graisse pour haute vitesse GV de S.N.R qui, de plus ne dégaze pas de manière appréciable à notre niveau, même chauffée vers 60 degrés aux environs de 1 Torr, ceci étant dans la moyenne de notre vide préliminaire.

Enfin le rotor doit être parfaitement équilibré, toutes les séquences d'usinage étant prévues pour obtenir une concentricité rigoureuse dès le départ car il est pratiquement impossible, à notre niveau, d'équilibrer un ensemble rotor pompe/rotor moteur. De plus la précision des cotes ne donne pas droit à l'erreur. Pour alimenter le moteur un générateur 400 Hz. triphasé est réalisé suivant un schéma classique. Un oscillateur à réseau déphaseur $3 \times 120^\circ$ attaque trois amplificateurs équipés de TDA2003. L'impédance de sortie de ces amplificateurs (quelques

ohms) est adaptée au moteur via des transformateurs sur pots de ferrite. La montée en régime étant assez lente (2 minutes pour la stabilisation à 24000 tours) elle s'accompagne d'une relative surcharge du générateur triphasé et, par suite, d'une abondante production de calories évacuées par un radiateur et un ventilateur. Une fois le synchronisme 400 Hz./24000 tours établi il est possible de réduire la charge des amplificateurs au moyen (rustique...) de l'introduction d'un trio de résistances en série avec les enroulements du moteur. Une photographie a présenté les éléments internes de la version finale de la pompe. Le rotor de 60 mm. de diamètre, conique, tourne entre deux stators portant les canaux hélicoïdaux. L'assemblage du tout donne un bloc diamètre 100 sur une hauteur de 150 mm. dans lequel un compte tours, incorporé dans la base, permet de suivre le bon fonctionnement de la pompe : montée en régime....synchronisation. Résultat de ces nombreux essais de diverses pompes, on voit,

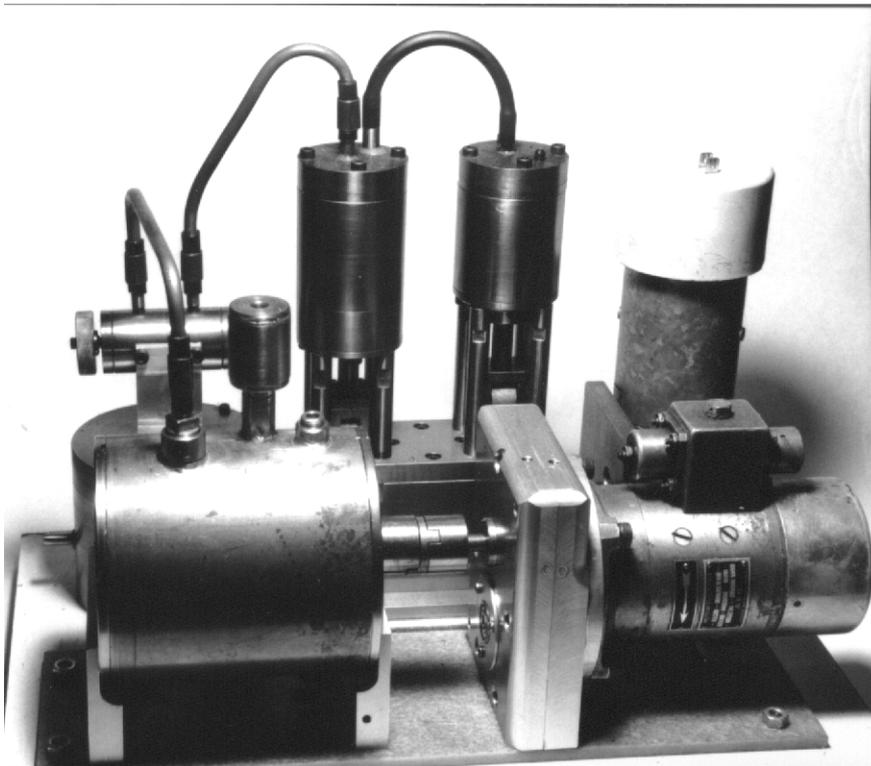


réunies sur un support commun, les deux pompes volumétriques (à pistons et à palettes), reliées, à travers un robinet, à un petit réservoir de vide. Ainsi le vide préliminaire est obtenu de l'une ou l'autre pompe, la pompe moléculaire prenant la suite. Le réservoir de vide, isolé en amont si le robinet est fermé, donne une autonomie suffisante pour se passer des pompes

primaires, une fois l'ensemble convenablement évacué. Un manomètre (jauge de Pirani) contrôle en permanence le niveau du vide pour, le cas échéant, relancer la pompe primaire si la pression remonte trop.

Dans la pratique la pompe moléculaire fonctionne d'autant mieux que le vide préliminaire est maintenu à la faible pression (0,02 mb.) de la pompe à palettes. A l'inverse elle perd toute efficacité si la pression remonte trop et 'décroche' vers 10 à 12 mb. Ce qui laisse une marge...

De même la vitesse de rotation de la pompe à palettes a une influence sensible sur le vide obtenu : si son premier étage est capable de donner une pression de l'ordre du millibar dès 150 à 200 tours par minute, grâce aux joints d'huile qui assurent une bonne étanchéité, la situation est différente pour le deuxième étage, à vide plus élevé. Ce dernier n'utilisant pas de joint d'huile, l'étanchéité est seulement obtenue par les faibles jeux entre rotor-palettes-chambre. Cela donne une conductance entrée-sortie réduite qui est acceptable puisque la différence de pression est, tout au plus, d'un millibar. Encore faut-il que les palettes tournent assez vite pour compenser ces fuites naturelles : vue sous cet angle, notre pompe qui tourne vers 300 tours par minute se hâte lentement comparée aux pompes commerciales qui tournent sensiblement plus vite (vers 500/600 tours par minute). Mais nous avons déjà évoqué les bruits de pignonerie de notre démultiplicateur... Aussi 300 tours seront décrétés 'bons'.



MANOMETRES

Avant de décrire les divers manomètres que nous avons utilisés, il faut préciser les limites de leur utilité pratique:

Leur principal emploi réside dans le contrôle de la pression obtenue des diverses pompes au cours de leur mise au point, plutôt que de la mesure du vide au cours du vidage d'un tube.

En effet cette dernière opération peut, dans une large mesure, être autocontrôlée par observation du tube (leurs bleuâtres de l'ionisation de l'air résiduel) ou mesure du courant ionique, le tube étant utilisé comme 'jauge' en fin de pompage. Il faut également constamment penser qu'un manomètre, quel qu'il soit, représente un volume complémentaire à vider, ceci étant à éviter, surtout dans la région des basses pressions. Par contre la comparaison entre diverses pompes passe obligatoirement par l'utilisation de manomètres plus, le cas échéant, une enceinte plus ou moins volumineuse afin de connaître le débit de la pompe en cours de mise au point.

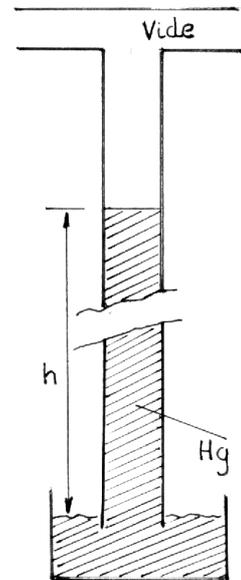
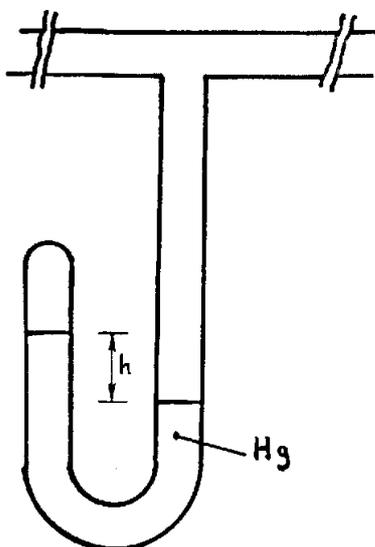
Toutefois le pompage d'un tube mettant en oeuvre une succession de deux pompes (vide préliminaire, vide final) une zone de transition entre les deux sera observée. Cette pression, située aux alentours d'un Torr, une fois atteinte et déterminée par un manomètre relativement simple, permet la mise en marche de la pompe moléculaire; ceci justifiant l'emploi d'un manomètre intermédiaire. Voyons donc les divers manomètres utilisables dans notre cas:

-Manomètres hydrostatiques: Descendants du baromètre de TORRICELLI ils couvrent la gamme 760 à 1 mm de mercure, en deux modèles facilement réalisés à partir d'un bout de tube en verre..... Le premier est on ne peut plus simple.....

Un tube vertical relié à la canalisation de vide, une petite cuvette remplie de mercure....c'est tout. Très robuste pour peu que le tube soit d'un diamètre raisonnable (5 à 8 mm extérieur); de même ne pas utiliser un tube trop petit pour éviter les problèmes de capillarité ou de 'collage' du mercure aux parois. Etalonnage naturellement en mm de mercure (Torr) avec une simple règle, une légère amélioration de la précision sera apportée en tenant compte de la pression atmosphérique locale en consultant le minitel sur 3615 METEO. Le mercure s'élève dans le tube à mesure que la pression diminue pour plafonner vers 760 mm bien sûr. Ce très rustique instrument sera utilisé pour suivre la bonne marche d'une pompe primaire ou étalonner des manomètres plus modernes (et moins encombrants)...

La précision n'est pas très grande à moins d'apporter des corrections qui nous éloignent du but à atteindre. Ensuite nous trouvons le manomètre tronqué du croquis ci-contre. Guère plus compliqué que le premier il sera

obtenu d'un simple tube, recourbé en forme de U et bouché à une extrémité. Rempli de mercure, en veillant à ne pas laisser la moindre bulle d'air en haut de la branche obstruée (ce qui est plus facile à dire qu'à obtenir en pratique) il sera employé en gros entre 40 et 1 mm de mercure avec une précision acceptable. Le mercure colle au fond du tube obturé jusqu'au moment où, la pression diminuant, il commence à descendre tout en remontant dans l'autre branche. La faible pression existant dans la canalisation de vide exerce une poussée sur le mercure de la branche de



droite, cette poussée étant équilibrée par le poids de la partie gauche du manomètre. La différence des niveaux dans les tubes indique la pression ; avec un vide parfait le niveau dans les deux tubes serait le même. ..en théorie. En pratique, dans notre cas, il y a toujours une microscopique bulle d'air qui traîne quelque part au moment du remplissage en mercure et limite vers un Torr la pression minimum mesurable. De même ce manomètre n'apprécie pas du tout les brusques rentrées d'air qui font remonter à vive allure le mercure dans la branche de droite, façon "coup de bélier", capable d'éclater le fond du tube. En fait ce manomètre est d'une utilité restreinte, son seul emploi réel étant l'étalonnage de la zone basse pression du manomètre suivant qui couvre l'intervalle de 2 ou 3 Torr jusqu'aux 760 Torr de la pression atmosphérique courante.

Manomètre avec capteur de pression 'tout silicium'

Ici nous passons des années 1600 (1647 pour être précis, date de l'ascension au Puy de Dôme à la demande de PASCAL pour vérifier la pesanteur de l'air suite aux travaux de TORRICELLI),..... à nos jours.

Implantée sur une puce de silicium une fine membrane se déforme sous l'action de la pression appliquée et, par le jeu de l'effet piézo-résistif, délivre une tension variant en conséquence. Ce capteur monté dans un pont de Wheatstone donne une tension variant d'environ 10mV./millibar; cette tension, dûment amplifiée, étant l'image même de la pression à mesurer.

Les choses ne sont toutefois pas aussi simples qu'il y paraît de prime abord, de sévères problèmes de stabilisation en température et tension étant à prendre en considération.



La revue "ELEKTOR", pour ne citer qu'elle, a consacré plusieurs articles à ce sujet: Septembre 1981 sur le capteur LX0503A de National et, en Novembre 1986, sur le KP101A de R.T.C. Un kit basé sur ce dernier article, proposé par la Sté SELECTRONIC, est le coeur du manomètre montré ci-contre. Une fois soigneusement réglé et étalonné ce petit appareil s'est révélé extrêmement précieux pour tous les essais de pompes "primaires". Donnant la pression en millibars (Torr x 1,333= mb) son afficheur LCD est d'une utilisation bien plus confortable que les colonnes de mercure précédentes qui seront seulement utilisées pour l'étalonnage. Seule différence par rapport au montage d'origine son étalonnage sera effectué d'abord sur les pressions voisines de zéro (début de la gamme) au lieu de la zone "1013mb" qui nous intéresse évidemment moins. La précision est remarquable, meilleure que 1%. sur toute la

gamme, donc très supérieure à nos besoins réels. Seule ombre au tableau: arrivé à 3 ou 4mb l'affichage passe directement à 00 pour les pressions inférieures; mais il est vrai que nous sommes en limite du capteur et les dérives des divers amplificateurs, même bien réglés, rendent délicate la mesure d'aussi basses pressions. Afin d'apprécier des pressions plus basses il nous faut changer encore une fois de principe de mesure et aborder les manomètres basés

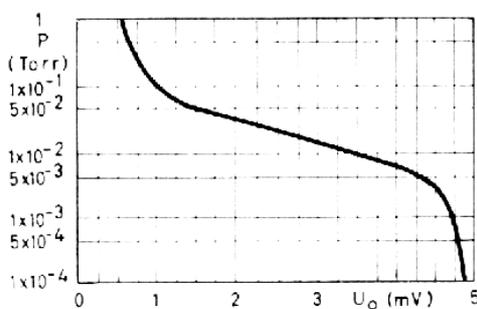
sur la variation du flux thermique en fonction de la pression à mesurer. Le principe, indiqué pour la première fois en 1906 par PIRANI (ingénieur Italien travaillant chez Siemens et Halske), utilise la variation de résistance d'un fil placé dans une enceinte sous vide.

Quelques exemples de jauges sont visibles ci-contre ; un modèle métallique, donc très robuste, voisine avec deux autres réalisées en verre. Le connecteur électrique de ces jauges montre aussi quelque diversité : si deux jauges sont munies du connecteur habituel à deux broches, la troisième est alimentée par une douille copie conforme des 'ampoules cadran' des postes radio.....On trouve de tout dans les 'surplus'....Il suffit de regarder attentivement.



Revenons à nos jauges : on y trouve un fil très fin, dans l'axe du tube, un courant, maintenu constant, traverse ce fil et en élève sensiblement la température, jusque vers 100 à 150 degrés. Cette température se stabilise à un niveau qui dépend des échanges par : rayonnement calorifique direct vers l'ampoule - conduction thermique par les connexions terminales - convection vers l'ampoule en utilisant le gaz de remplissage comme véhicule du flux thermique (conductivité thermique). La convection est d'autant plus faible que la pression diminue, ceci étant sensible dans l'intervalle de 1 à 10^{-3} Torr, par suite le fil chauffe encore plus pour atteindre un nouvel équilibre qui se traduit par des variations de résistance mises en évidence sur un pont résistif pré-étalonné pour des valeurs autour de 150 ohms. Ce principe présente certaines analogies avec la mesure des puissances hyper-fréquences dans un bolomètre (baretter ou thermistance). Dans les deux cas on place l'élément sensible dans une branche d'un pont alimenté par une tension ajustée afin d'équilibrer les deux branches; l'application de la grandeur à mesurer provoque un déséquilibre que l'on apprécie sur le galvanomètre. Ce principe, au demeurant très simple, se décline en de nombreuses variantes plus ou moins complexes, notamment dans les instruments capables de mesurer quelques microwatts hyperfréquence avec une faible marge d'erreur. A notre échelle il convient de faire simple et pratique d'autant qu'il s'agit d'apprécier le degré du vide obtenu, plutôt que de prétendre à une mesure très précise hors de nos possibilités.

L'étendue de mesure de ce type de jauge va, approximativement, de 1000 mb à 10^{-3} mb. Avec toutefois les restrictions suivantes : au dessus de 50 mb. La sensibilité du pont est presque nulle, l'indicateur d'équilibre ne dévient pratiquement pas car, la convection de l'air contenu dans la jauge étant élevée, la température du fil, donc sa résistance, reste stable; d'ou limitation d'emploi "en haut". Après une zone de transition vers 20mb les choses bougent rapidement pour atteindre un maximum de sensibilité à partir de 1mb début de la gamme "utile". Vers la fin de la gamme, aux environs de 10^{-2} mb on constate de nouveau un ralentissement des déplacements de l'aiguille du galvanomètre en fonction de la pression.



Après une zone de transition vers 20mb les choses bougent rapidement pour atteindre un maximum de sensibilité à partir de 1mb début de la gamme "utile". Vers la fin de la gamme, aux environs de 10^{-2} mb on constate de nouveau un ralentissement des déplacements de l'aiguille du galvanomètre en fonction de la pression.

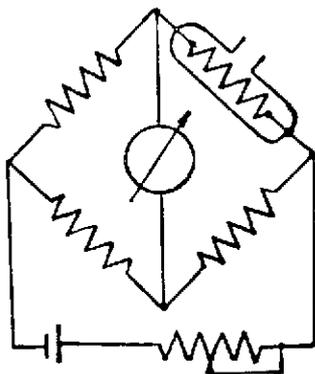
A ce stade le flux thermique, entre le fil chaud et la paroi de l'enveloppe, devenant très faible les variations de pression ne sont plus mises en évidence car la valeur de la résistance du fil est pratiquement constante. Donc limitation d'emploi "en bas"...la courbe ci-contre donne l'allure des variations que nous venons d'évoquer. Le choix des éléments du pont est effectué après mesure de la caractéristique température/résistance sur des jauges de construction métallique ou "tout verre" d'origine inconnue... Les courbes ont été relevées à 20-50-75-100 degrés et sont extrapolées pour un fonctionnement à 125 degrés,

Les courbes ont été relevées à 20-50-75-100 degrés et sont extrapolées pour un fonctionnement à 125 degrés,

température moyenne d'utilisation citée par les descriptions des montages de DUNOYER (voir plus loin) évoquent le fonctionnement allant du rouge sombre au rouge cerise suivant la nature du métal du filament avec des températures pouvant dépasser 500 degrés.

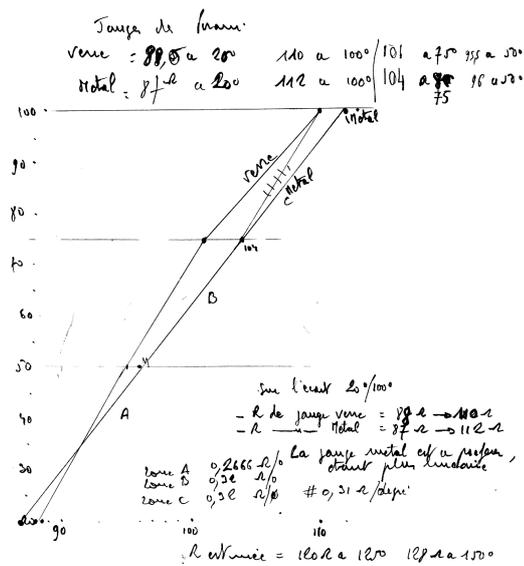
Le manque de linéarité du modèle "verre" est probablement du à la rusticité des moyens de mesure de la température (casserole d'eau plus thermomètre ordinaire...) alors que la mesure de la résistance par un ohmètre digital à faible courant traversant la jauge est plus digne de foi. Tous calculs faits cela nous amène à un pont constitué de 3 résistances fixes de 120 ohms plus notre jauge traversée par un courant qui, par effet Joule direct, amène également sa valeur à 120 ohms. Après quelques mesures sur les jauges ce courant se situe aux alentours de 46 mA., soit quelques

5,5 volts aux bornes de la jauge et le double (11v) au sommet du pont. Une alimentation stabilisée suivie d'un potentiomètre multitours de réglage du zéro complètent le schéma sans oublier un microampèremètre (0 à 100 microampères R interne 3000 ohms) dans la diagonale du pont (prendre un instrument avec un cadran d'une bonne taille...). Comme on vient de le voir tout ceci est assez rustique puisque nous n'avons pas prévu une deuxième jauge, scellée sous vide, pour compensation, le seul réglage étant celui du zéro après quelques minutes de stabilisation tant thermique qu'électrique. A ce propos on ne peut qu'admirer le travail de Louis DUNOYER qui se débattait entre un pont à fil (au lieu d'un potentiomètre multitours banal de nos jours) et une batterie de 6 volts 160 Ampères (bigre...) pour une série de mesures très précises dont il rend compte dans la revue LE VIDE en Mars et Mai 1949.



Notre but étant tout autre, le montage s'est révélé suffisant dans l'emploi: Deux échelles de mesure sont prévues, la première servant essentiellement au tarage du zéro avant mise en service. Les résistances 120 ohms seront choisies aussi stables que possible afin de ne pas varier (par échauffement) durant la mesure. La précision n'est pas critique, 5% suffisent amplement puisque l'étalonnage final sera effectué suivant les indications du microampèremètre par rapport à un étalon externe. Dans ces conditions nous relevons un courant de 100 microampères pour 5 Torrs (6,5mb) en fin de la première échelle, 20 micro-ampères pour 3 Torrs et 90 microampères à 10-3 Torr sur la seconde échelle. Ces deux dernières valeurs appellent quelques remarques: Le niveau 3 Torrs correspond au vide primaire, obtenu avec une pompe a deux pistons, à partir duquel est lancée la pompe moléculaire qui peut valablement entrer en action. 10-3 Torr constitue la limite estimée du vide (restons prudents...) décelé par la jauge, ceci par comparaison avec un tube a décharge dont le courant d'ionisation (quelques milliampères au départ) décroît à mesure que la pression baisse pour se couper brusquement en dessous de 3 microampères dans le tube. De toutes façons nous arrivons à la limite théorique de ce capteur de pression, au delà il faut passer aux jauges "triodes" a cathode chaude. Comme prévisible à l'examen de la courbe vue plus avant, le déplacement de l'aiguille du microampèremètre au dessus de 80 microampères devient très

"bons auteurs". On notera toutefois que les



lent, ceci correspondant grosso-modo à 10-2mb. Si ce genre de manomètre n'est en aucun cas linéaire aux deux extrémités de sa gamme, il présente par contre divers avantages décisifs dans notre emploi: Couverture globale de la gamme des pressions a partir desquelles nous pouvons utilement activer le tube triode en cours d'élaboration (allumage prudent du filament...dégazage des électrodes.. etc.). Faible volume interne n'allongeant pas inutilement la durée du pompage. Grande robustesse vis à vis des rentrées d'air accidentelles sans risquer de griller le filament comme cela serait le cas d'une jauge triode.

Cette dernière remarque est a rapprocher de la température relativement basse choisie pour point de fonctionnement (environ 120 degrés) au lieu des 150 à 300 degrés parfois cités et qui auraient demandé nettement plus de puissance dissipée dans notre fragile filament.

Hormis l'emploi d'une jauge a fil chauffé, il est possible d'utiliser une thermistance en forme de perle de petites dimensions (diamètre de l'ordre du millimètre), des précautions étant toutefois a prendre en raison de sa structure plus ramassée vis a vis d'un fil, certes fin mais long de plusieurs centimètres. Le principe est le même, le montage final pouvant s'inspirer des ponts de mesure hyperfréquence déjà évoqués (voir également la revue LE VIDE en Janvier-Février 1964). En Novembre 1948 la revue 'Le Haut Parleur' donne déjà un schéma (simplifié) de cette application.

Dernière famille de manomètres a notre portée, voyons ceux faisant appel à l'ionisation:

Nous débuterons par les plus simples indifféremment appelés "manomètres a décharge" en rappel de leur principe, "voyant" pour leur luminosité, ou enfin plus simplement "tube en T" en raison de leur forme . Dérivés du tube de GEISSLER il sont, en gros, utilisables entre 10 et 10⁻³mb, l'ionisation du gaz (de l'air le plus souvent) diminuant avec la pression. Rappelons que c'est ce type de manomètre qu'utilisait Monsieur MIGNET pour suivre le pompage de ses triodes. Il est possible de les alimenter par une tension continue ou alternative, bien que dans ce dernier cas l'observation soit moins commode suite au dédoublement des zones lumineuses.

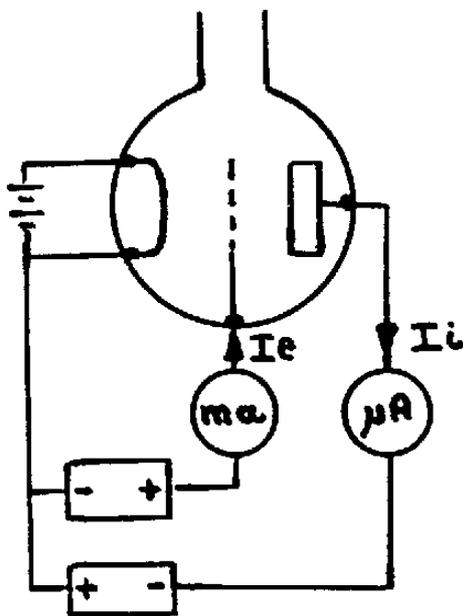


Ne pas oublier que ces manomètres font appel a des tensions élevées, donc dangereuses. Toujours prévoir une résistance en série d'environ 100000 à 150000 ohms pour limiter le courant, sinon, pour les pressions supérieures à 0,5mb., la puissance dissipée dans le tube arrache des molécules de métal qui se vaporisent sur les parois et provoquent un dépôt gênant l'observation. De toutes façons le courant diminue beaucoup vers les basses pressions ce qui rend négligeable la chute de tension au moment où le tube se désamorce faute d'ionisation suffisante. On note environ 3 microampères juste avant la coupure (soit 0,45 volt de chute dans une résistance 150000 ohms) pour une alimentation sous 1500 volts d'un tube avec deux électrodes distantes de 8 centimètres. Avec une tension encore plus élevée (nous sommes allés jusqu'à 4000 volts) on obtient des courants légèrement plus élevés, mais avec des risques (T.H. T.. !..) encore accrus. Donc ce manomètre sera utilisable jusque vers 10⁻³mb., limite définitive de la décharge qui n'est d'ailleurs plus visible mais constatée sur le micro-ampèremètre monté en série. Principal avantage: très robuste, ne craint pas les rentrées d'air brutales. Coté inconvénients: un volume plus ou moins important a vider a seule fin de connaître la pression. Par exemple nous utilisons un tube en T dont le volume intérieur (96 centimètres cubes) est supérieur à celui d'une classique triode TM (environ 85 centimètres

cubes), ce qui peut allonger abusivement la durée du pompage. Egalement on ne peut qu'estimer très approximativement la pression sans prétendre à une mesure précise. En fait nous utilisons ce manomètre uniquement pour la mise au point d'un ensemble de pompes pour suivre la baisse de pression jusqu'au moment où le courant cesse dans le tube puisque, rappelons le: la valeur exacte de la pression ne nous intéresse pas, nous la souhaitons seulement la plus faible possible.

Dernier manomètre, et le plus sensible, notre triode elle même.

Pour peu que le pompage ait abaissé la pression à mieux que 10-3mb. il est possible d'alimenter le tube pour observer la descente du courant ionique au fur et à mesure que le vide s'améliore. Toutefois ceci suppose que le filament ait déjà été (délicatement) allumé pour le dégazer.. De même il est souhaitable d'avoir déjà chauffé le verre de l'enveloppe..la plaque.. la grille...pour en chasser les gaz occlus. Egalement il est souhaitable de limiter le courant électronique à une valeur faible (1 mA. par exemple) en contrôlant soigneusement la température du filament. Cette valeur du courant électronique est nettement inférieure à celle



des jauges triodes habituelles (environ 10 mA.) mais nous devons ménager à cet instant notre précieux filament. Alimentée suivant le montage ci-contre notre triode nous permettra d'estimer le vide obtenu à partir des relations liant les dimensions géométriques du tube et les divers courants. De nombreux auteurs se sont penchés sur ce problème dès le début de la "T.S.F" La revue LE VIDE a souvent consacré de longs articles à ce sujet, le plus souvent dans le but d'obtenir la précision requise par l'électronique actuelle. De bons exemples sont également dans le "Traité Pratique de Technique du Vide"(GEP 1958), au chapitre "Mesure des basses Pressions" qui décrit bien le sujet Plus proche de notre problème J. GROSZf.OWSKI donne (en 1927) dans "Les lampes à plusieurs électrodes et leurs applications" des éléments de calcul du vide obtenu, à partir des mesures effectuées sur le tube en essai: pour un diamètre de plaque 1cm. et V_p 220v V_g -2v on doit

avoir 0,3 microampère maximum. Soit un vide de 0,8 10-6mm. de mercure. Dans "Le vide poussé au laboratoire et dans l'industrie" G. GRIGOROV et V. KANEV donnent également une vue générale de cette question. Finalement nous prendrons comme guide H. BÄRKÄUSEN qui étudie le sujet dans "Les tubes à vide et leurs applications" (tome 1).

Avant, un bref rappel de l'origine du courant ionique n'est peut-être pas inutile. Dans une enceinte remplie d'air les molécules se déplacent dans tous les sens, avec une grande vitesse, en s'entrechoquant ou rebondissant contre les parois. La distance moyenne entre deux chocs successifs est appelée "libre parcours moyen". Si la pression baisse le nombre de molécules baisse et leur probabilité de rencontrer une autre molécule diminue d'autant. Sous des pressions très faibles les collisions auront pratiquement uniquement lieu contre les parois À la pression atmosphérique le libre parcours moyen sera de 10-5 centimètre, pour passer à 6,3 centimètre à 10-3millibar. Si un centimètre cube d'air "atmosphérique" contient 27x10 puissance 18 molécules, il en reste encore 27 milliards à la pression (!) de 10-6 millibar.

La faible probabilité de rencontre entre molécules est due à leur très petite taille (diamètre 3,7 10-8 centimètre) ce qui les rend absolument minuscules vis à vis des dimensions

habituelles des enceintes sous vide.

Dans un tube triode courant, les électrons rapides, puisque suffisamment accélérés par le potentiel de la plaque, traversent le gaz raréfié et produisent des ions positifs au moment de la collision avec les molécules. Par suite une électrode négative attirera ces ions positifs et donnera un courant proportionnel au nombre de collisions, lié au nombre de molécules, donc à la pression. Il faut évidemment que le potentiel de l'électrode attirant les électrons les accélère assez pour dépasser nettement le potentiel d'ionisation du gaz considéré. Ceci explique pourquoi on alimente les tubes électromètres sous faible tension afin de ne pas faire naître ce courant grille. Partant de là on détermine un facteur de vide $V=I_{ionique}/I_{électronique}$ qui est une mesure directe du degré de vide atteint. Les dimensions géométriques du tube, notamment le diamètre de la plaque dans notre cas, sont à prendre en compte. A ce point nous ne pouvons mieux faire que de reproduire un passage du livre de H. BARKHAUSEN qui date, dans sa première édition, des années 1920. "I ionique/I électronique =0,001 signifie en fait qu'un pour mille, en moyenne, de tous les électrons allant du filament à l'anode rencontre une molécule de gaz. Tous les autres passent sans empêchement. Cela veut dire que le libre parcours moyen des électrons dans le gaz est mille fois plus grand que le trajet réellement parcouru, qui, dans les amplificatrices à plaque cylindrique de 1cm. de diamètre est de un demi-centimètre. A la pression atmosphérique, le libre parcours moyen est égal à 10⁻⁵ centimètre environ et il augmente proportionnellement à la diminution de pression. Un libre parcours de 1000x0,5 centimètre sera donc atteint pour une diminution de pression dans le rapport 10⁻⁵/1000x0,5, c'est à dire pour 2.10⁻⁸ atmosphère ou 760x2x10⁻⁸=1,5x10⁻⁵mm. de mercure. ". Il donne, par ailleurs un moyen simple de mettre en évidence le courant ionique en abaissant progressivement la tension (positive au départ) appliquée à la grille, un renversement du sens du courant sera un indice de la présence du courant ionique. On observe toutefois que le vide estimé par les mesures précédentes sont souvent quelque peu "optimistes" par rapport à celles effectuées avec une jauge de Mac Léod qui sert de référence à ce niveau.



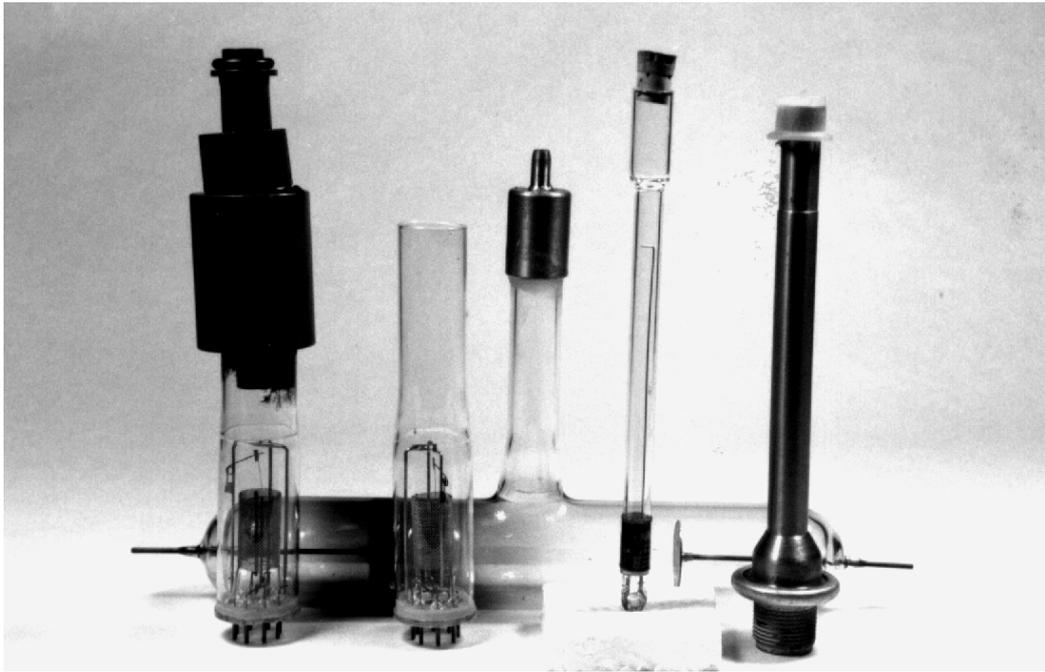
Il est possible d'améliorer nettement la sensibilité de la jauge triode de base; en inversant les tensions appliquées à la plaque et à la grille. Dans ce dernier cas les électrons atteignent la grille (positive) après une série d'oscillations autour d'elle, ce qui allonge leur parcours et, par la même, leur probabilité de rencontrer une molécule, d'ou amélioration de la sensibilité. Toutefois cela peut amener la production d'oscillation sur des fréquences très élevées (oscillations de BARKHAUSEN) qui vont perturber la mesure.

Si la mesure du courant ionique (une fraction de microampère), n'était pas très commode autrefois, cela ne présente guère de problèmes de nos jours où le moindre multimètre digital a haute résistance d'entrée règlera la question. Terminons en indiquant les conditions d'essai de la triode TM: elle était reconnue "bonne pour le service" si, avec 160 volts plaque et -2 volts sur la grille, on trouvait un courant plaque entre 3 et 6 milliampères et un courant grille inférieur à un microampère.

Nous arrêtons ici ce petit tour d'horizon des manomètres de base, sans décrire ceux qui leur ont succédé, avec une amélioration notable de la sensibilité....Penning....Bayard-Alpert.

A notre niveau, et compte tenu de notre objectif, leur utilisation ne serait pas justifiée.....

Au sujet des pompes il était déjà question de...garder les pieds sur terre.



Photographie de l'ensemble des 'manomètres' évoqués ci-dessus.....

Montage et fixation des éléments.....

La fabrication des premières triodes rencontrait déjà divers problèmes dus au manque de fiabilité de l'assemblage des éléments internes simplement agrafés ou pincés sur les tiges supportant l'ensemble ; ces tiges dépassant plus ou moins régulièrement du verre.

Si cela est compréhensible au vu des réalisations des Amateurs des années vingt (Messieurs DUROQUIER et MIGNET) on peut remonter à une note du 7/10/1915 où le Général FERRIE se plaignait que « sur six lampes envoyées à Bordeaux, six sont arrivées hors service »

A cette époque la plaque était placée en position verticale, en porte à faux, et ne résistait pas aux chocs ou vibrations. Si, à la suite de cette critique, la plaque fut positionnée à l'horizontale, sa fixation était toujours obtenue par pincement sur les supports.

Cela n'étant pas vraiment satisfaisant, on eu recours, en 1918, à une soudure soit à l'aide d'un chalumeau très fin ou bien d'un arc électrique.

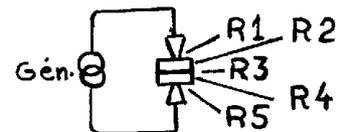
Plus tard la solution, employée par tous les constructeurs de lampes, fut donnée par la soudure électrique par points.

Ce procédé, inventé par Elihu THOMSON dans les années 1880, est resté relativement confidentiel jusqu'au début des années 1920, principalement pour des raisons technologiques. Néanmoins il est étonnant que l'équipe du Général FERRIE n'ait pas fait usage de la soudure par points alors que divers équipements étaient déjà présents à l'exposition universelle de Paris en 1889, 25 ans auparavant. Dès cette époque des générateurs donnaient jusqu'à 40000 Ampères pour souder des barres de 50 mm de diamètre. On trouvait également des 'dynamos' plus modestes pour souder des fils de 0,5 mm....Alors la question reste posée.

Rappelons brièvement le principe de la soudure par points, en insistant dès à présent sur le fait qu'il s'agit d'une soudure autogène, donc sans apport de métal extérieur aux pièces à assembler.

Nous avons ici l'emploi direct de l'effet JOULE consécutif à un fort courant traversant une succession de résistances avec une élévation de température amenant la fusion locale des métaux en présence.

Suivant le croquis, le générateur fait passer un courant à travers les deux pièces à souder au moyen de deux 'pointes' en cuivre. Plusieurs résistances s'opposent au passage du courant : R1 et R5 contact entre les électrodes en cuivre et les éléments à souder, R2 et R4 constituées par la nature même des pièces à souder, enfin R3 représentée par le contact initial au point de



soudure. Cette dernière résistance est l'élément le plus important de la chaîne et, dès à présent, il faut noter que sa maîtrise conditionne beaucoup le résultat final. De toutes façons R1 à R5 sont très faibles et évaluées en milliohms plutôt qu'en Ohms. A partir de ce point il suffit de faire passer un courant capable d'amener la fusion de la zone entourant R3.

En effet les autres résistances sont plus faibles (contact cuivre/métal à souder R1-R5, ou métal traversé R2-R4) et, par suite, donnent lieu à une plus faible élévation de température. De plus le cuivre des électrodes, étant un excellent conducteur de la chaleur, réduit d'autant la température dans les zones R1-R5. Par contre la région autour de R3, en s'échauffant, verra sa résistance augmenter, d'où un accroissement correspondant de la chaleur produite, cet effet étant cumulatif jusqu'au point de fusion des métaux.

L'échauffement est donné par la formule $Q=1/J R*T*I*I$ où l'on remarque qu'il augmente comme le carré de l'intensité. La durée de passage du courant paraît donner un moyen commode pour obtenir les résultats espérés avec des intensités modérées. En fait cela conduit

à un très mauvais emploi des calories produites, celles-ci étant largement évacuées, à travers les diverses conceptions entre éléments à souder, vers les électrodes en cuivre qui vont en quelque sorte 'ventiler' l'assemblage en l'empêchant d'arriver à température de fusion.

Dans la pratique il faut obtenir une 'bouffée de chaleur' qui est le plus souvent provoquée par le passage du courant durant moins d'une seconde, voire moins de 100 millisecondes. La technique actuelle va dans le sens de durées très courtes sous de très fortes intensités : 5000 à 50000 Ampères étant de pratique industrielle courante, avec des durées qui se comptent en périodes du réseau E.D.F. 50 cycles. En effet un courant d'une telle intensité sera logiquement obtenu à partir du secteur 220/380 volts convenablement abaissé au moyen d'un transformateur, souvent de taille respectable, comportant seulement un ou deux tours au secondaire. Un dernier élément, très important, réside dans la force de serrage exercée par les électrodes sur les éléments à souder : un effort important minimise les résistances de contact et demande par suite un courant plus élevé, par contre un effort moindre, en faisant remonter la valeur des résistances mises en série, demandera un courant réduit. Cette constatation trouve son application directe dans les matériaux de faible résistivité et de bonne conduction thermique, tel l'aluminium, qui doivent être soudés très rapidement (pour éviter de 'ventiler' les calories) donc sous forte intensité, cette intensité étant encore augmentée pour compenser la faible résistance d'un assemblage soumis à un important effort de serrage.

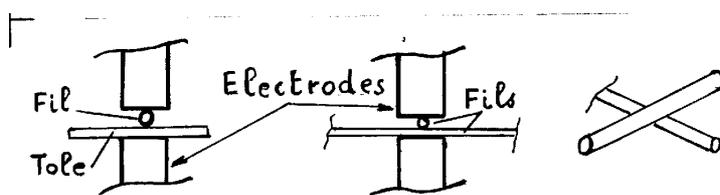
Des compressions de 5000 daN (disons 5 tonnes pour parler comme autrefois) sont fréquemment atteintes en soudage industriel.

En conclusion de ce préambule on se trouve en face d'un problème à résoudre en jouant sur trois paramètres : Temps – Courant – Pression.

Le contrôle précis du temps ne pose aujourd'hui aucun problème avec les circuits logiques associés aux relais 'statiques' issus de l'électronique de puissance, aussi verrons nous ce point ultérieurement.

L'effort de serrage, pour ce qui nous concerne, et après divers essais, s'établira entre quelques centaines de grammes (mettons 3 Newtons) et un maximum de 15 Kg. (15 daN pour les puristes....) rien de bien critique ici.

Coté courant, compte tenu des très faibles épaisseurs à souder, 1000 à 1500 Ampères suffiront. En effet la plus grande part des soudures s'effectuera sur des tôles de 0,2 mm. d'épaisseur ou des fils de 0,2 à 0,5 mm. de diamètre, le plus souvent en nickel. De plus la position relative des pièces à assembler est très favorable puisque les zones en contact sont faibles et conduisent à une densité de courant très élevée et, par suite, une soudure très rapide



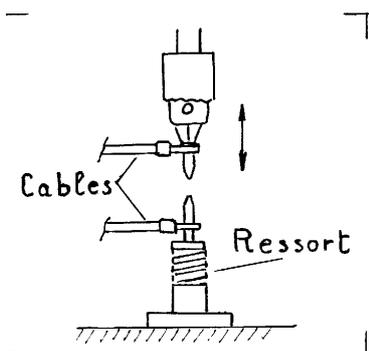
Les croquis ci-contre montrent que le contact entre les tôles et les tiges rondes s'effectue sur les génératrices de ces dernières avec, en théorie du moins, une surface infiniment petite, cela est encore plus net dans le cas de tiges rondes

placées en croix, dont la soudure est très facile.

Voyons en détail les moyens mis en œuvre :

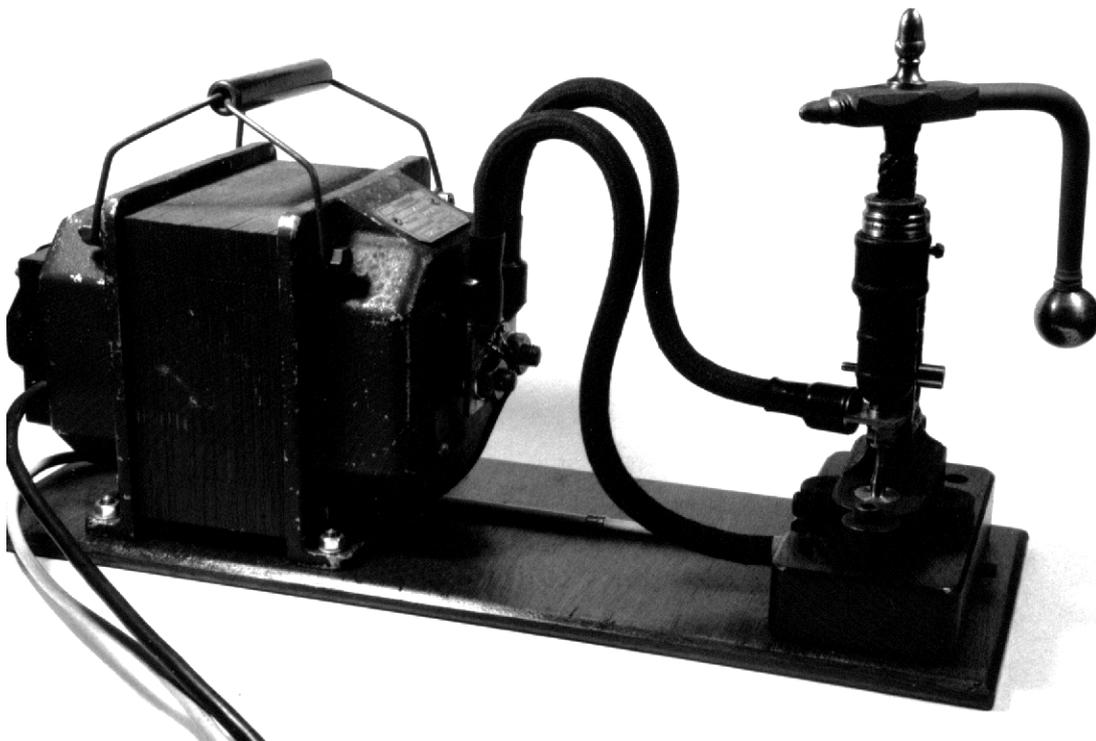
Serrage : le plus simple, utilisé pour les essais préliminaires, réside dans l'emploi d'une petite perceuse d'établi légèrement modifiée suivant le croquis. Une électrode serrée dans le mandrin, la seconde solidaire d'une tige couissant dans un tube isolant fixé sur le plateau mobile de la perceuse. Un ressort à boudin bien choisi donne un effort de serrage progressant à mesure que le mandrin descend.....simple et efficace.

Au final nous avons reconverti une petite presse à sertir des



années vingt pour obtenir un serrage de 0 à 15 daN. Avec un moelleux incomparable, ceci sans parler du côté 'rétro' de l'engin auquel nous avons redonné une nouvelle vie...

Transformateur abaisseur : ici tout n'est qu'affaire de tôles et de fil de cuivre et nous ne pouvons que renvoyer aux bons auteurs tels que notre chère Marthe DOURIAU dont le désormais classique 'construction des petits transformateurs' est une de nos bibles. On y trouve notamment la description d'un transformateur bien adapté à notre cas....En bref : noyau de 32 cm² de section avec un secondaire de trois tours réalisé par mise en parallèle de 10 méplats en cuivre de 25x4mm.....Le primaire comportant 230 tours de fil avec 8 mm² de section, plus 4 enroulements supplémentaires de 45 tours pour ajustage du courant. Le tout annoncé comme pouvant délivrer 3000 Ampères. Le transformateur que nous employons



(photo) a un petit air de famille. A ceux que rebuterait le bobinage d'un tel transformateur, nous proposons une alternative par l'emploi des transformateurs toriques récemment mis au catalogue des fournisseurs de composants électroniques 'grand public'.

Il est relativement aisé de bobiner quelques tours supplémentaires sur ce genre de composant...A titre d'exemple un modeste transformateur de 16 VA (le plus petit modèle disponible) sur lequel on bobine 7 tours de fil de 6,5 mm² de section délivre 90 ampères en court-circuit. Aussi nous pouvons espérer beaucoup plus avec certains modèles dépassant 500 VA ; en utilisant de la tresse cuivre de forte section pour un secondaire de quelques tours.

Au passage il faut noter que ce type de transformateur admet d'être quelque peu surchargé car il fonctionne (dans notre emploi) avec des durées très brèves suivies de temps de repos comparativement très longs. De même un point inhabituel est à souligner : ils sont toujours mis sous tension alors que leur secondaire est (fortement) chargé par le court-circuit virtuel des pièces à souder. Ils ne fonctionnent donc jamais à vide, secondaire 'ouvert'.

Les liaisons entre le secondaire et les électrodes de soudage devront être de très forte section, aussi courtes que possible, et bien serrées ou, mieux, soudées au moyen de cosses bien adaptées. La section des câbles sera choisie afin d'obtenir la résistance ohmique la plus faible possible, une valeur de l'ensemble cosses-câbles-bornes etc....bien inférieure au millième d'ohm est impérative. De toutes façons les critères habituels relatifs à la densité de

courant par mm² de cuivre sont de peu d'intérêt ici car l'échauffement sera normalement négligeable eu égard à la faible durée de fonctionnement.

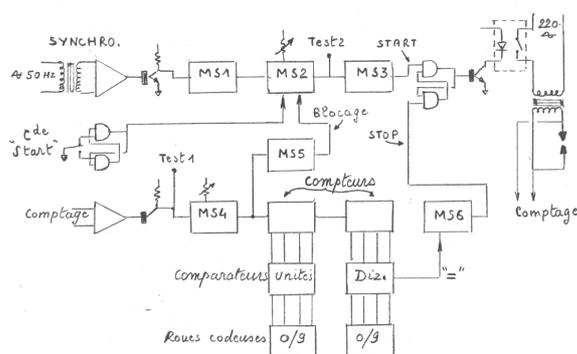
Dans le même esprit il convient d'éviter la présence de tout métal magnétique dans le champ de la boucle traversée par le courant du secondaire : nous avons là une bobine d'un tour parcourue par un courant d'un bon millier d'ampères qui a donc, en elle même, une certaine impédance. Donc inutile d'aggraver les choses en plaçant une quelconque ferraille dans le champ sous peine de voir chuter le courant disponible aux électrodes.

Un oscilloscope, avec une sensibilité de 10 à 50 millivolts par centimètre, sera très utile pour visualiser les chutes de tension indésirables tout au long de la chaîne allant des bornes du secondaire jusqu'aux électrodes.

Quel que soit le type de transformateur réalisé il conviendra d'en faire l'essai à puissance réduite, les sorties du secondaire reliées par un court morceau de gros câble. Ensuite, en alimentant le primaire par un auto-transformateur (genre VARIAC ou Alternostat FERRIX), on tracera la courbe tension primaire/courant secondaire, le courant étant relevé sur un ampèremètre à 'pince'. Comme ce genre d'instrument plafonne généralement à 200 ou 500 Ampères on extrapolera simplement les valeurs relevées à 50-100-150-200....Ampères.

Il est également possible de réaliser un transformateur de mesure sous forme d'un enroulement torique glissé sur le câble. Toutefois, au cas d'emploi d'un noyau magnétique de couplage, il faut vérifier qu'il ne soit pas saturé au passage du courant maximum et, de toutes façons, minimiser la perturbation apportée. Le mieux étant encore un simple bobinage, dépourvu de noyau, donc peu sensible ce qui se compense aisément par un amplificateur.

Quoi qu'il en soit connaître avec précision la valeur du courant disponible n'est pas une fin en soi, une approximation suffisante étant donnée par les méthodes ci-dessus.



Contrôle du temps de passage du courant : sur ce point il est possible de réaliser la commande précise d'un paramètre fondamental. Rappelons les données du problème : contrôler le passage du courant durant un temps voisin de zéro jusqu'à un maximum de l'ordre de la seconde, deux tout au plus, ceci par incréments d'une période du secteur 50 cycles, soit 20 millisecondes.

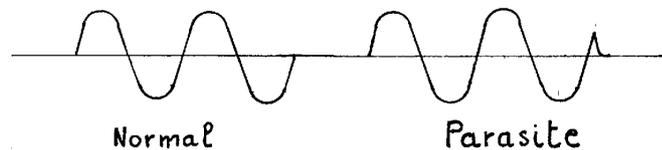
Notons également que , dans certains cas

difficiles, il est habituel de faire passer le courant pendant moins d'une période du secteur, par exemple 5 ou 10 millisecondes. Cela présente toutefois un sérieux inconvénient : le circuit magnétique du transformateur reste 'polarisé' par le magnétisme résiduel consécutif à une fraction d'alternance sans compensation par une demi-période de sens opposé ; d'où une forte pointe de courant, de valeur difficilement prévisible, à la mise sous tension suivante. Il est toutefois possible de faire passer un faible courant continu de compensation, de sens convenable, entre les périodes d'activité, pour démagnétiser les tôles. En poussant le raisonnement plus avant cela amène à délivrer le courant par périodes complètes de 20 millisecondes, débutant toujours sur une demi-sinusoïde de même polarité. Nous aurons donc un temporisateur du modèle 'synchrone' de 1 à 99 périodes (20 millisecondes à près de 2 secondes).

Le schéma présente les grandes lignes du montage adopté : l'autorisation de départ du cycle est fournie par un microswitch suivi d'un circuit anti-rebonds. Puis un comparateur assure que la mise sous tension aura bien lieu au début de l'alternance souhaitée. Cette information, dûment amplifiée, provoque la commutation du relais statique de puissance qui

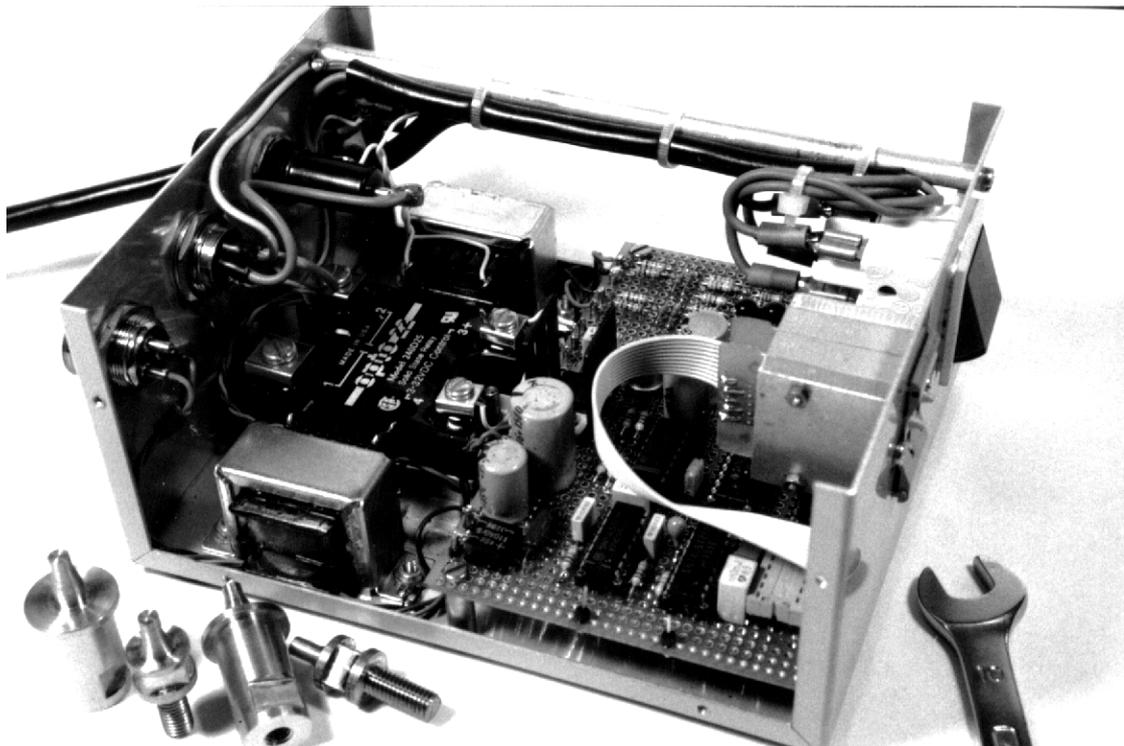
contrôle le transformateur principal. On prélève au secondaire la tension qui, une fois mise en forme, et après comptage, arrête le cycle. La durée de ce cycle est contrôlée par un ensemble de compteurs et de roues codeuses, un comparateur délivrant l'information d'égalité.

On notera la présence de divers monostables permettant de compenser les déphasages entre le début et la fin de la boucle ainsi réalisée. Une temporisation interdit le redéclenchement du cycle durant les quelques secondes suivant une soudure (au cas de manipulations répétées, donc intempestives, du contacteur de départ de cycle). Quelques remarques sont à faire concernant le relais statique : si ce genre de composant, très moderne, peut commander de forts courants (du moins à notre échelle... pas d'ignitrons ici) grâce au triac interne, ceci sans liaison directe, au moyen du photo-coupleur interne, il y a néanmoins quelques précautions d'emploi. La commutation a bien lieu en principe au passage par un zéro de tension, mais il sera judicieux de compenser un éventuel décalage (léger) d'où l'utilité des divers monostables dans la chaîne de commande. De même si la coupure a bien lieu en principe également au passage par le zéro de la tension secteur, le triac interne peut être maintenu en conduction par le courant résultant de l'énergie résiduelle conservée dans la self du primaire du transformateur. Donc si ce dernier n'est pas suffisamment chargé nous observerons (à l'oscilloscope) des portions de sinusoïde se prolongeant au delà du point de coupure normal



Ceci est montré sur le dessin ci-contre.

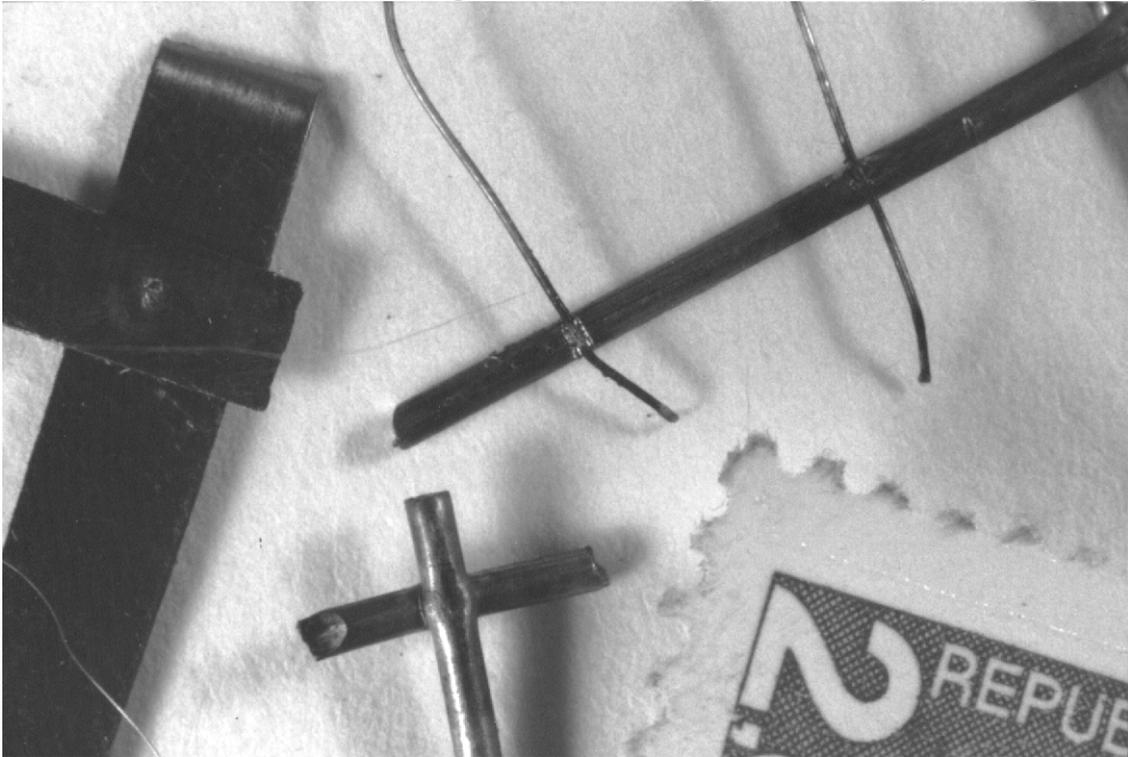
Ce défaut disparaît lorsque toute l'énergie magnétique du transformateur se trouve absorbée par la charge qui, en principe, constitue un beau court-circuit. Si l'oscilloscope ne montre pas un résultat satisfaisant, il sera toujours possible de placer une résistance d'assez faible valeur en parallèle sur le primaire afin d'absorber les signaux parasites. Cette façon de faire, peu orthodoxe en soi, est tolérable ici où nous utilisons des centaines de watts et non des centaines de kilowatts..... Enfin rappelons que la conduction débutant indifféremment sur une alternance positive ou négative ceci nous oblige à un contrôle de la phase.



La photographie montre le résultat final de ce qui précède avec un petit boîtier de commande muni d'un interrupteur marche-arrêt et de deux roues codeuses pour contrôle de la durée de soudage. On peut difficilement avoir un nombre plus réduit de commandes....

La mise en pratique de l'ensemble amène quelques observations :

La soudure de tôle d'acier mince ou de fil du genre 'corde à piano' est très facile (trop même...) : sous faible pression de serrage il y a risque de volatisation complète du métal qui s'envole en tous sens dans une belle gerbe d'étincelles, avec au passage dégradation des électrodes. En augmentant sensiblement la pression on améliore les choses avec, comme limite, l'aplatissement excessif des pièces soudées. Cette déformation n'est pas due au serrage initial 'à froid', mais à l'écroulement du métal porté à haute température, donc comme forgé par la pression. Solution : réduire la durée de passage du courant et en désespoir de cause diminuer l'intensité. Avec des métaux plus coriaces, du type nickel ou molybdène qui nous



concernent plus directement, les choses redeviennent plus intéressantes : il est possible d'ajuster la durée de passage, en gros entre une et dix périodes (grand maximum), un serrage bien dosé donnant les résultats attendus. Dans les cas rebelles la pression peut être sensiblement augmentée sans que cela apporte des déformations (à froid) aux pièces en présence, donc en assurant de faibles zones de contact et, par suite, un échauffement rapide (c'est fou ce que peuvent encaisser sans broncher des fils de 0,2 mm de diamètre). Dans notre cas une butée interne au mécanisme de serrage permet d'appliquer de fortes pressions à l'assemblage, une fois la limite élastique du ressort atteinte (15 daN) sans risque de le déformer d'une manière irréversible. Des durées inférieures à 20 millisecondes sont envisageables avec d'autres techniques : commande par thyristor dont on fait varier l'angle de passage vis à vis de la phase du secteur. Toutefois nous avons déjà évoqué les perturbations dues au circuit magnétique du transformateur... Ou encore décharge quasi-instantanée d'une batterie de gros condensateurs chargés en haute tension dans un transformateur du même genre que le notre. Toutefois cela impose des contraintes sévères à ce transformateur (choix du matériau des tôles-décharge oscillante plus ou moins bien maîtrisée-magnétisme rémanent)... Enfin, et surtout, de cuisants souvenirs nous laissent totalement allergiques aux décharges de condensateurs, quelle qu'en soit la justification éventuelle.

Quelques références bibliographiques pour en finir avec un sujet passionnant :

Science et Vie Juillet 1948

Engineering Electronics de RYDER (Mac Graw Hill 1957)

Dans la bibliothèque technique PHILIPS on trouve aussi un livre consacré à l'Electronique industrielle qui présente une bonne analyse des divers problèmes: Commutation au passage par zéro, nombre pair d'alternances, minuteriers...etc...le tout au moyen de tubes électroniques car il date de 1957.(excellent livre par ailleurs)

Le Soudage Electrique par Résistance, de Jean NEGRE 5^e édition (1979) aux 'Publications de la Soudure Autogène', véritable 'bible' sur le sujet qui détaille minutieusement tous les aspects d'une technique peu connue des non-initiés.....

Avec ce dernier ouvrage on peut constater le grand apport de l'électronique moderne dans le contrôle du temps de soudage. Ceci comparativement à la première édition de 1948 où les choses étaient nettement plus sommaires.

