

Techniques du vide et métallisation des miroirs

 [español](#)

Qu'est-ce que le vide?

Selon le dictionnaire le vide est un espace qui ne contient rien, ni objet, ni matière. Pour le physicien, c'est un espace où les particules matérielles sont raréfiées (pression inférieure à celle de l'atmosphère). En fait, le vide a une définition différente pour chaque domaine d'utilisation.

Observons la figure 1. Elle montre les échelles de différentes grandeurs physiques qui représentent la pression d'un gaz ou qui y sont directement liées.

Par convention, l'unité utilisée pour mesurer une pression est le Pascal :

(1 Pascal = 1 Pa = 1 Newton / Mètre-Carré). Toutefois, une unité encore employée est le Torr. Une pression de 1 Torr provoque une élévation de 1mm du mercure dans un baromètre de Torricelli (1 Torr = 133,322 Pa, 1 Pa = 7,5 10⁻³ Torr).

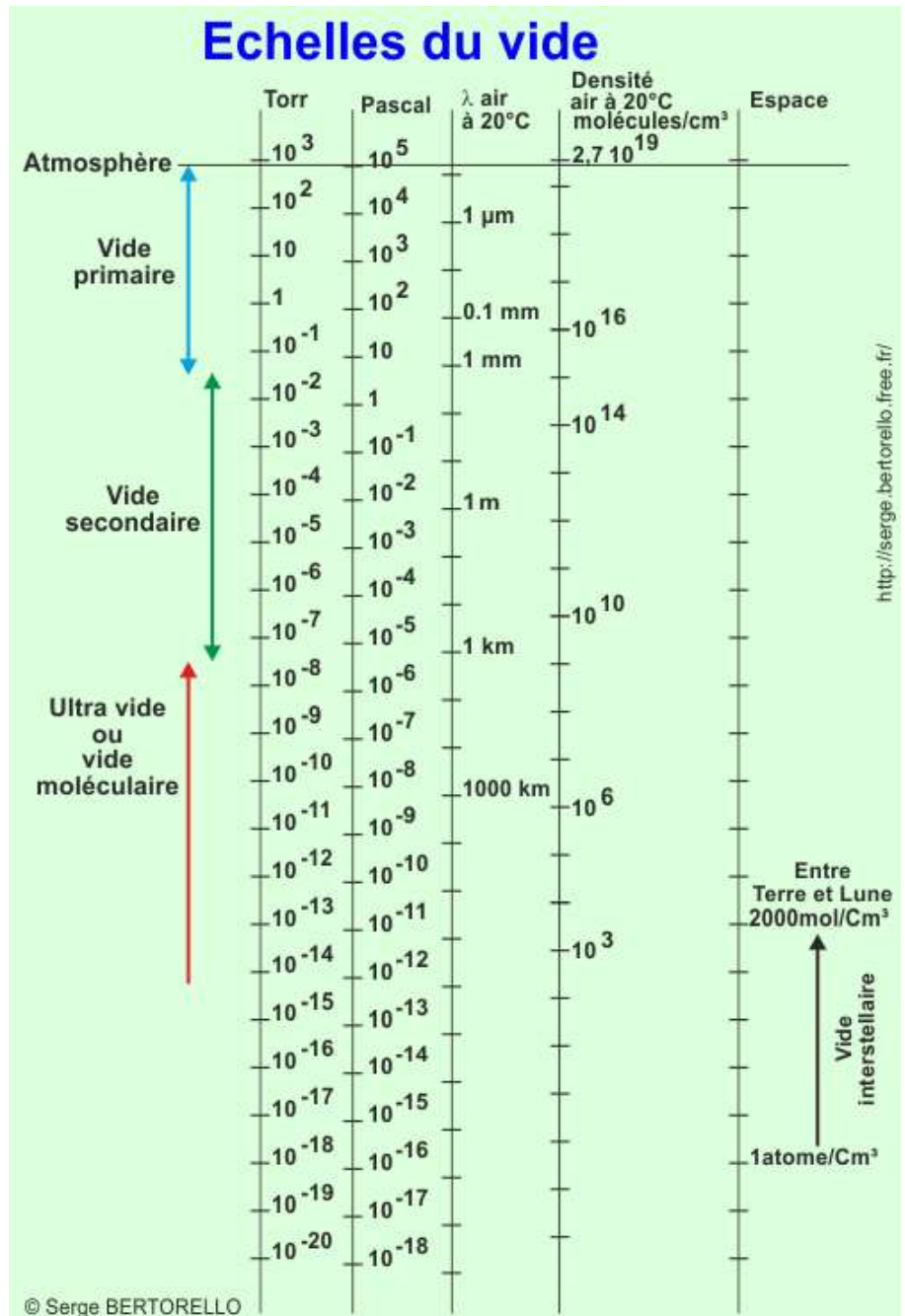


Figure 1 : Différentes façons de considérer le vide.

Pour faire un vide poussé, il faut disposer des pompes l'une derrière l'autre. Le vide primaire porte ce nom, car il est obtenu avec la première pompe.

Le meilleur vide que l'on sait réaliser en laboratoire vaut 10⁻¹² Torr (~10⁻¹⁰ Pa). Dans l'espace situé entre la Terre et la Lune la pression gazeuse descend jusqu'à 10⁻¹³ Torr environ (~10⁻¹¹ Pa) et le vide interstellaire s'étend au-dessous de cette valeur.

Un gaz est composé de molécules qui se déplacent, se percutent et rebondissent. Plus la pression est faible et plus le trajet parcouru par ces particules entre deux chocs successifs sera grand. La valeur moyenne de cette distance est le libre parcours moyen. La figure 1 indique, avec la lettre grecque λ (lambda), le libre parcours moyen d'une molécule de l'air en fonction de la pression.

La formule suivante indique le libre parcours moyen (en mètres) des molécules dans l'air à 20°C :

$$\lambda = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{P \text{ (Torr)}} = \frac{6.65 \cdot 10^{-3}}{P \text{ (Pascals)}}$$

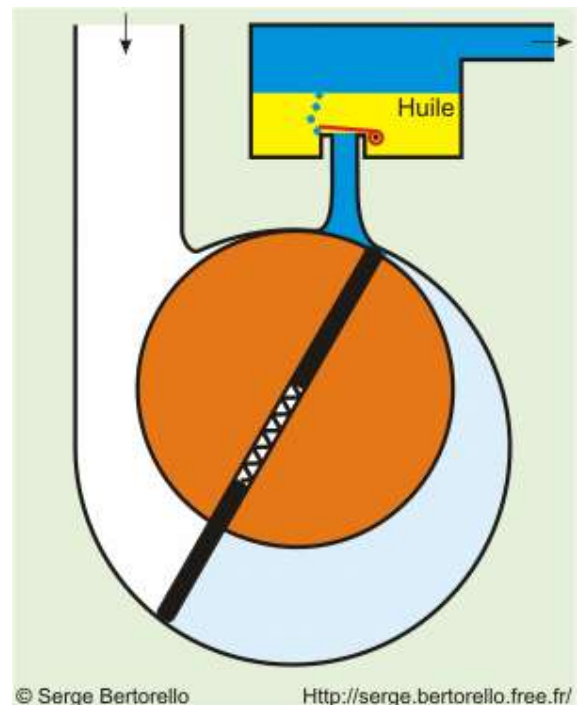
Les pompes à vide

Nous examinerons ici les types de pompes les plus courants. Ils correspondent aussi aux techniques utilisées dans notre système de métallisation sous vide.

Une pompe primaire : la pompe à palettes

La pompe à palette est couramment employée pour réaliser un vide primaire. La figure 2 nous aide à comprendre son fonctionnement. La rotation du système à palettes dans une enceinte cylindrique déplace le gaz. Ce dernier pénètre d'abord dans une chambre qui se dilate. La rotation entraîne successivement l'isolement de ce volume et sa compression vers la sortie. Les gaz s'échappent par une soupape noyée dans l'huile.

Ce type de pompe permet d'atteindre une pression de 10^{-1} à 10^{-2} Torr (~ 10 à 1 Pa). On pourrait imaginer qu'il est possible de repousser cette valeur limite en disposant plusieurs pompes à palettes en cascade l'une après l'autre. En fait, on n'améliore pas grand-chose en procédant ainsi, car l'huile nécessaire au fonctionnement s'évapore et limite le vide à environ 10^{-3} Torr. On dit que la tension de vapeur de cette huile vaut 10^{-3} Torr ($\sim 10^{-1}$ Pa).



© Serge Bertorello [Http://serge.bertorello.free.fr/](http://serge.bertorello.free.fr/)

Figure 2 : La pompe à palettes

Une pompe secondaire : la pompe à diffusion d'huile

Pour améliorer le vide ainsi obtenu il faut avoir recours à un autre principe. La pompe à diffusion d'huile est très employée comme pompe secondaire. Ainsi que nous pouvons l'examiner sur la figure 3, cette pompe est intercalée entre l'enceinte à vider et la pompe primaire. Cette dernière est indispensable, car la pompe à diffusion d'huile ne peut pas fonctionner à une pression supérieure à quelques Torr.

L'huile est portée à ébullition par le système de chauffage. Les vapeurs émises sont canalisées vers les éjecteurs. Chacun de ceux-ci réexpédie un jet vers le bas à grande vitesse en formant une nappe conique qui entraîne les molécules rencontrées sur son passage. Elle atteint ensuite

la paroi refroidie par une canalisation d'eau où elle se condense pour retourner vers le chauffage.

Il peut y avoir un ou plusieurs étages d'éjection suivant le modèle (et les performances) de la pompe.

Les gaz emportés par ce phénomène sont récupérés par la pompe primaire de même que les vapeurs les plus volatiles de l'huile qui sont envoyées par l'éjecteur inférieur.

Entre la pompe et l'enceinte à vider est disposé un piège à azote liquide. Il s'agit d'une chicane dans laquelle on verse de l'azote liquide dont la température d'ébullition est égale à -196°C . Les vapeurs d'huile viennent se condenser sur les parois refroidies. Ainsi elles ne vont pas polluer l'enceinte à vider.

A l'autre extrémité de cette pompe secondaire se trouve une chicane qui est refroidie par le circuit d'eau et qui récupère par condensation les vapeurs d'huile pour éviter qu'elles ne soient évacuées par la pompe primaire.

L'huile utilisée circule donc en circuit fermé. Il faut faire en sorte qu'elle ne soit pas en contact avec la pression atmosphérique lorsqu'elle est chaude. Ceci la détériorerait.

Il s'agit d'une huile à faible pression de vapeur (10^{-7} à 10^{-10} Torr ou 10^{-5} à 10^{-8} Pascal à 25°). Elle est choisie en fonction des contraintes chimiques et des contraintes de pression (pression limite, pression d'amorçage, débit...) parmi des huiles minérales, des huiles silicones ou bien des huiles de synthèse spécialement conçues.

Le débit de la pompe primaire doit être adapté au débit de la pompe secondaire. Il faut que la pompe primaire absorbe le flux gazeux maximal débité par la pompe secondaire à une pression de travail qui doit être comprise entre sa pression limite et la pression d'amorçage de la secondaire.

Dans des cas extrêmes, une pompe à diffusion d'huile permet d'obtenir un vide de l'ordre de 10^{-9} Torr ($\sim 10^{-7}$ Pa). Notez qu'il faut prendre de nombreuses précautions pour approcher cette valeur.

La valeur limite de la pression du vide obtenu dépend bien entendu du type de pompe et des caractéristiques de l'huile. Elle dépend aussi des fuites résiduelles qui sont difficiles à localiser. De plus, des dégazages peuvent être provoqués par la nature des matériaux employés (phénomènes de désorption).

Temps de pompage

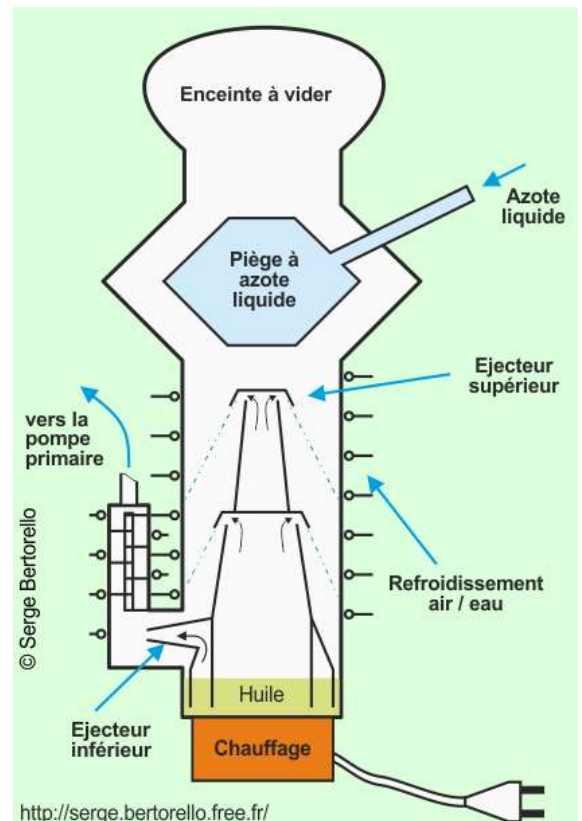


Figure 3 : La pompe à diffusion d'huile

La formule suivante permet de calculer le temps "T" nécessaire pour faire diminuer la pression depuis la valeur initiale "Po" à la valeur finale "Pf" dans une enceinte étanche de volume "V" en considérant le débit effectif de la pompe "S" :

$$T = 2,3 \cdot \frac{V}{S} \cdot \log \frac{P_0}{P_f}$$

La mesure du vide

Les pressions supérieures à une dizaine de Torr (ou un millier de Pascals) peuvent être mesurées avec un manomètre de type Bourdon. Dans cet appareil, une aiguille indique la déformation d'un élément soumis à la pression étudiée. C'est le manomètre utilisé par les pompistes pour contrôler la pression des pneumatiques. Autre instrument très répandu, le baromètre de Torricelli utilise une colonne de mercure et peut servir pour mesurer des pressions supérieures à quelques Torr.

Pour mesurer des pressions inférieures, il existe une grande variété d'appareils utilisant des phénomènes physiques divers. Nous considérerons, la jauge à ionisation et la jauge de Penning.

Le Baromètre de Torricelli :

En 1643, le physicien italien Evangelista Torricelli (1608-1647) a réalisé une expérience alors qu'il recherchait une explication à un problème de pompage. En effet, quelques années auparavant, un constructeur de pompes avait consulté Galilée (1564-1642) en lui demandant pourquoi la hauteur jusqu'à laquelle on peut aspirer de l'eau ne peut pas dépasser 10 mètres. Galilée avait bien constaté ce problème mais il n'a pas pu trouver d'explication. C'est son disciple Torricelli qui a solutionné ce problème. Pour cela, il a conçu une expérience qui est devenue très célèbre.

Pour réaliser cette expérience, Torricelli a employé du mercure. Il s'agit d'un métal qui est liquide à la température ambiante et dont la densité est 13,6 fois supérieure à celle de l'eau. Torricelli remplit avec du mercure un long tube de verre qu'il retourna ensuite dans un récipient contenant aussi du mercure.

Il constatât alors que le mercure descend jusqu'à une hauteur de 76 cm environ qui ne dépend pas du diamètre du tube. Cette hauteur de la colonne de mercure est toujours constante à quelques petites variations près d'un jour à l'autre.

Torricelli interpréta ce résultat en affirmant que c'est la pression exercée par le poids de l'atmosphère qui "pousse" le mercure dans le tube.

On peut comprendre cette idée en se remémorant une constatation qu'avait faite Archimède (287-212 avant J.-C). Ce savant ingénieur avait compris que, dans un

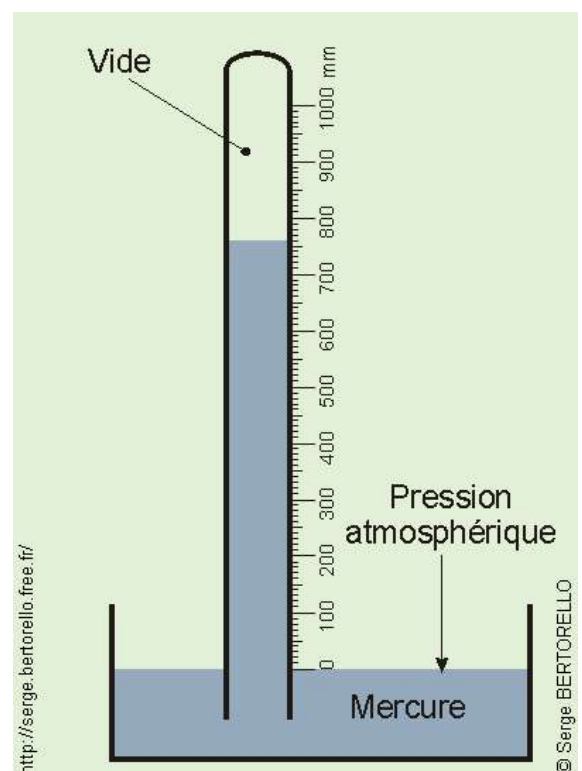


Figure 4 : L'expérience de Torricelli

liquide au repos, deux points situés à une même hauteur sont soumis à des pressions identiques.

On peut donc affirmer que la pression qui règne dans le mercure à la base de la colonne est la même que celle qui s'applique sur la surface libre du liquide. Cette pression est la pression atmosphérique, elle compense habituellement une hauteur de 76 cm de mercure. Le poids d'une colonne de mercure de 76 cm de hauteur est équivalent au poids d'une colonne d'eau de même diamètre et de 10m de hauteur. Avec cette expérience, Torricelli put donc expliquer pourquoi il est impossible de pomper de l'eau par aspiration à plus de 10 mètres.

Plus tard, après avoir pris connaissance de cette hypothèse, Blaise Pascal (1623-1662) comprit que la hauteur de la colonne de mercure doit être plus faible en altitude car l'épaisseur de l'atmosphère est moins grande. Son beau-frère vérifia cette idée le 19 septembre 1648, entre Clermont-Ferrand et le sommet du Puy de Dôme.

Revenons à notre sujet, nous voulons mesurer un "vide", c'est à dire la pression qui règne dans une atmosphère raréfiée. Pour cela, nous pouvons relier par une tuyauterie adaptée l'extrémité supérieure du tube de Torricelli à notre enceinte à vider. Ainsi la hauteur de la colonne de mercure nous renseignera sur la pression qui réside dans l'enceinte. Avant le pompage le mercure ne s'élève pas dans le tuyau. Puis, suivant la progression du pompage, la colonne va s'élever pour atteindre sa hauteur maximale. C'est la technique du manomètre hydrostatique.

Exemple : si la colonne atteint une hauteur de 660mm, on peut dire que la pression de l'enceinte vaut 100mm de mercure (ou 100 Torrs) car il faut rajouter 100mm pour obtenir la hauteur maximale de 760mm (au niveau de la mer).

Si m est la masse volumique du liquide, pour une colonne de hauteur h , considérant l'accélération de la pesanteur g , la pression régnant à sa base sera :

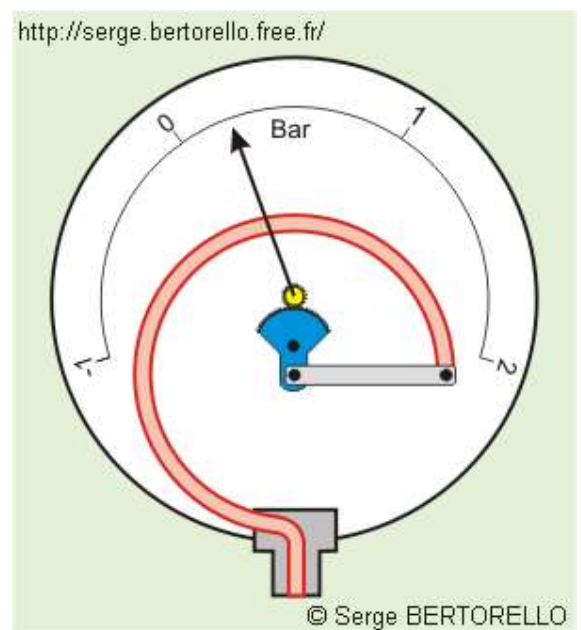
$$p = h.m.g \quad \text{avec } g = 9,81\text{m/s}^{-2} \text{ (en France au niveau de la mer)}$$

Le manomètre de Bourdon :

C'est un manomètre à déformation élastique.

Le manomètre de Bourdon possède un tube de section elliptique qui est enroulé suivant un arc de cercle et fixé à une extrémité. Il apparaît en rouge et rose sur la figure 5. A travers son extrémité fixe, ce tube est en communication avec l'enceinte dans laquelle on veut mesurer la pression. L'autre extrémité est fermée et elle est reliée par une bielle (grise) à un secteur denté (bleu). Sous l'effet de la pression la section du tube tend à devenir circulaire, ce qui entraîne son redressement. Cette déformation est amplifiée par le palier et le pignon qui porte l'aiguille indicatrice. Bien entendu, une dépression (un vide) entraîne un mouvement inverse.

C'est selon le même principe qu'a été conçu l'accessoire de cotillon que l'on nomme "langue de



belle-mère".

Figure 5 : Le manomètre de Bourdon

Le manomètre de Bourdon illustré sur la figure 5 est gradué en Bar. C'est une unité qui était très employée, il est recommandé de ne plus l'utiliser maintenant.

$$1 \text{ Bar} = 1 \text{ Kgf} / \text{cm}^2 = 1 \text{ Kilogramme force par centimètre carré} \approx 10^5 \text{ Pa}$$

Il est en position "0" au repos. Son aiguille se dirige vers la partie négative de son échelle (-1) quand il mesure une atmosphère raréfiée.

Des manomètres de ce type permettent de mesurer des pressions jusqu'à environ 100 mégapascals, c'est à dire un millier de fois la valeur de la pression atmosphérique.

Il peut aussi mesurer le vide mais dans ce cas, la précision de la mesure est perturbée par les variations de la pression atmosphérique. Les mesures des faibles valeurs de pression doivent être interprétées avec prudence. Il ne devrait pas être utilisé en dessous de 10^4 Pascals (environ 80 Torr).

La jauge à ionisation :

Il s'agit d'une ampoule de verre reliée à l'enceinte dans laquelle on veut mesurer la pression. Elle est équipée de deux électrodes métalliques entre lesquelles on génère une haute tension électrique.

Lorsque la pression atmosphérique règne à l'intérieur de l'ampoule, aucun courant électrique ne circule dans le montage. Pourtant, il existe toujours dans le gaz quelques ions qui sont formés par des chocs ou par des rayonnements ionisants divers. Ils sont attirés par une électrode et sont repoussés par l'autre à cause de leur charge électrique mais ils se recombinent rapidement parce que leur libre parcours moyen est très faible (inférieur au micromètre).

Quand la pression n'atteint plus que quelques Torr, le libre parcours moyen est plus grand, les ions du gaz sont accélérés plus longtemps par le champ électrique et ils atteignent une vitesse suffisante pour ioniser les molécules qu'ils finissent par percuter. Il se produit alors une réaction en chaîne et un courant électrique s'établit. La recombinaison des ions produit une émission lumineuse visible avec toutefois une zone sombre à proximité immédiate de chaque électrode (Zone obscure de Hittorf). Au fur et à mesure que la pression diminue les zones de Hittorf s'élargissent et finissent par se rejoindre. A ce moment la lueur disparaît, la pression vaut 10^{-1} à 10^{-2} Torr environ (~ 10 à 1 Pa).

Au-dessous d'une pression d'environ 1 Torr (= 133 Pa), le courant électrique qui circule entre les électrodes suit la loi :

$$\log(p) = K \cdot \log(i)$$

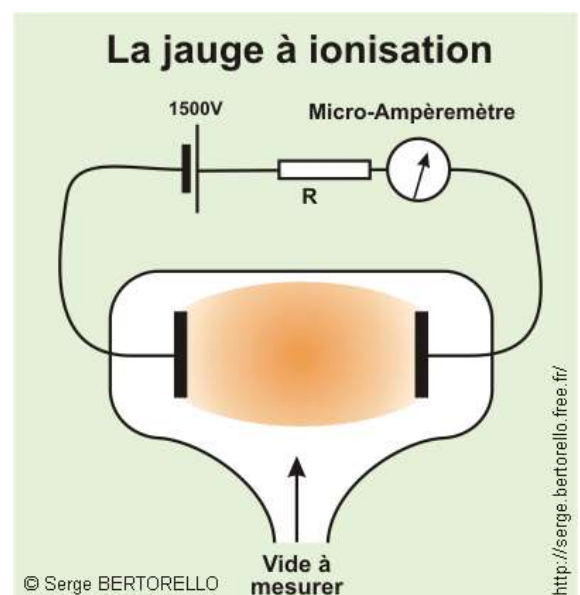


Figure 6 : La jauge à ionisation

Autrement dit, le logarithme du courant est proportionnel au logarithme de la pression.

K est un paramètre qui dépend des caractéristiques du montage, du gaz analysé et de la tension employée...

Ce dispositif permet ainsi de déterminer une pression supérieure à 10^{-4} Torr environ ($\sim 10^{-2}$ Pa).

Pour descendre plus bas dans la gamme des pressions mesurables on peut disposer un intense champ magnétique dans le but d'allonger le parcours des ions afin d'augmenter leur probabilité de rencontrer une autre particule. On forme ainsi une jauge de Penning dont certains modèles peuvent mesurer jusqu'à 10^{-9} Torr ($\sim 10^{-7}$ Pa). Sur notre bâti de vide, nous avons disposé une jauge de Penning dont la limite d'affichage des pressions est 10^{-6} Torr.

La métallisation sous vide

Cette technique consiste à provoquer l'évaporation d'un métal dans le vide en le chauffant jusqu'à sa température d'ébullition. Les atomes métalliques se propagent alors jusqu'à la surface froide de l'objet à traiter. Le vide doit être suffisamment poussé pour qu'ils ne rencontrent pas de particules pendant leur trajet jusqu'au miroir. Pour cela, il faut que le libre parcours moyen soit supérieur à la distance qui réside entre la source d'aluminium et le miroir.

Les atomes ainsi projetés dans le vide suivent des trajectoires "balistiques". Ils obéissent naturellement aux lois de la chute des corps.

Nous possédons un système de métallisation sous vide avec lequel nous déposons une couche d'aluminium de 50 nanomètres d'épaisseur sur les miroirs de nos télescopes. Nous plaçons habituellement l'optique à métalliser à 25cm environ des filaments ou de la nacelle utilisés. La figure 1 nous montre qu'il faut réaliser un vide meilleur que 10^{-4} Torr ($\sim 10^{-2}$ Pa) pour que le libre parcours moyen soit supérieur à 1m. Avec cette pression résiduelle, la quasi-totalité des atomes d'aluminium partant en direction du miroir l'atteignent sans faire d'autre rencontre. Pour métalliser un miroir à une plus grande distance, il faudrait réaliser un meilleur vide car il faudrait obtenir un plus grand libre parcours moyen.

Plusieurs méthodes permettent de réchauffer le métal à évaporer :

- Le filament de tungstène : On dépose quelques cavaliers constitués avec le métal à évaporer sur de robustes filaments en tungstène. Ceux-ci sont chauffés par un courant électrique qui les traverse (effet Joule). Quand la température de fusion des cavaliers est atteinte leur métal "mouille" le filament et se répand sur la surface de celui-ci avant de s'évaporer. On choisit le tungstène pour constituer ces filaments, car ce corps a une haute température de fusion. L'optique à traiter est placée dessous le filament. Après quelques évaporations, les filaments deviennent cassants et il faut donc prévoir de les remplacer régulièrement.

- La nacelle (ou creuset) : On place le métal dans un creuset. C'est un petit récipient réchauffé par un courant électrique qui le traverse (effet Joule). L'optique à traiter est placée au-dessus de ce dispositif.

Le creuset doit être changé régulièrement. Quand nous utilisons cette méthode nous devons changer le creuset toutes les deux ou trois évaporations.

- Le canon à électrons : Un échantillon du métal à évaporer et soumis à un intense faisceau d'électrons qui le réchauffe jusqu'à l'évaporation. L'optique à traiter est placée au-dessus. Avec cette méthode, il n'y a pas de pollution du métal à évaporer avec les parois du creuset.

Les composants qui s'usent sont le filament et le creuset mais ils peuvent subir plusieurs dizaines d'évaporations sans dégradation du résultat.

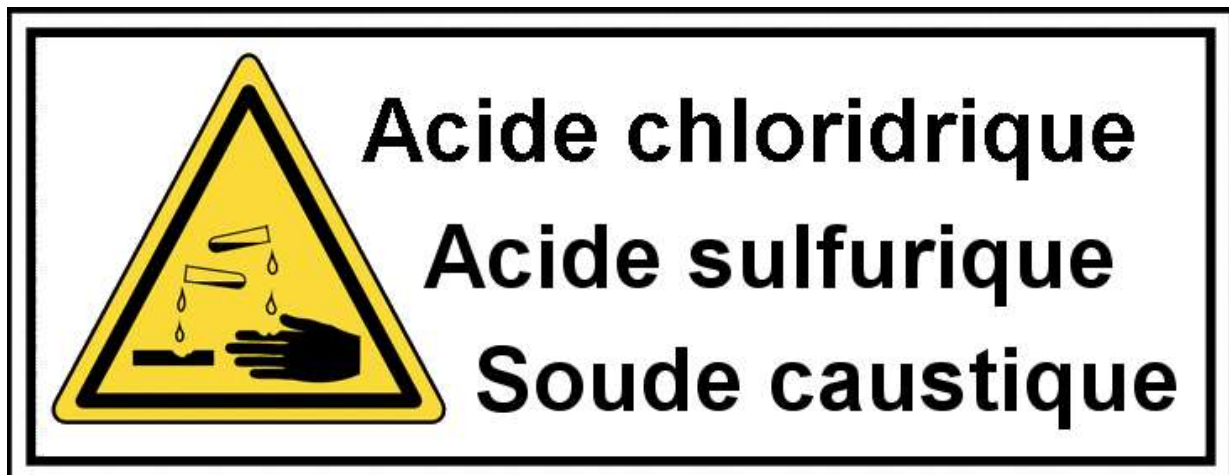
Jusqu'en 2004, nous avons adopté la solution des cavaliers d'aluminium sur les filaments de tungstène mais parfois... il est arrivé que des gouttes d'aluminium tombent... sur un miroir et ceci nous a incités à changer de méthode.

De 2004 à 2012, nous préférons disposer l'aluminium dans une nacelle en tungstène placée sous le miroir. Le courant nécessaire (jusqu'à 150 Ampères) était fourni par un poste de soudure à l'arc.

Depuis 2012, nous employons un canon à électrons.

Le nettoyage des optiques à métalliser

Dangers lors de l'utilisation d'un acide ou de la soude caustique



Pour nettoyer le miroir ou la cuve, nous devons utiliser un acide ainsi que la soude caustique. Ces produits chimiques sont corrosifs et provoquent de graves brûlures, ils doivent être manipulés avec précaution.

Ces produits ne doivent pas être disposés à la portée d'un enfant.

Pour l'utilisation d'un acide ou de la soude caustique, il faut porter un vêtement de protection approprié, des gants en plastique compatible avec les produits utilisés et un dispositif de protection des yeux ou du visage.

Notez que le code du travail interdit la manipulation de ces produits par les mineurs. Cette loi vaut aussi bien pour les établissements scolaires que pour les entreprises et même pour les associations...

Conduite à tenir en cas de contact avec la peau : rincer abondamment avec de l'eau.

Conduite à tenir en cas de contact avec l'œil : rincer à l'eau et consulter un ophtalmologiste.

Si vous tenez à un vêtement qui vient de recevoir de l'acide ou de la soude caustique, rincez-le immédiatement.

Les miroirs qui viennent d'être polis doivent tout d'abord être lavés avec un solvant comme le white spirit afin de faire disparaître toute trace de la poix du polissoir. Ces miroirs "neufs" subissent ensuite la même procédure de nettoyage que les miroirs dont on veut refaire le dépôt d'aluminium.

Pour nettoyer les miroirs avant de les aluminer nous utilisons une méthode très banale. Nous enlevons tout d'abord l'ancienne aluminure et les traces de corps gras avec une solution de soude caustique (NaOH) puis, après rinçage, nous nettoyons cette surface optique avec de l'acide nitrique concentré. Nous rinçons à l'eau et ensuite nous nettoyons la face optique en la frottant avec un coton imbibé d'alcool à 90° (nous avons même pratiqué un mélange Alcool-Ether). Ce dernier nettoyage peut être prolongé. Nous l'effectuons en changeant plusieurs fois le tampon de coton. On peut apprécier la qualité du nettoyage en examinant un reflet sur la face optique après avoir déposé une couche de buée en expirant avec la bouche sur le miroir. La buée montre bien les zones mal nettoyées.

Depuis quelques années, nous utilisons des compresses dites en "non tissé" à la place du tampon de coton. C'est plus pratique et plus sûr car ces compresses ne laissent pas traîner derrière elles des fibres comme le fait un tampon de coton.

Parfois, la buée nous révèle des traces qui résistent à notre tampon d'alcool. Il faut alors reprendre le nettoyage à l'acide.

Il faut se méfier de ne pas ramener sur la surface optique des impuretés qui pourraient se trouver sur le chanfrein. Il faut donc nettoyer soigneusement ce dernier.

Les différents rinçages sont effectués avec de l'eau déminéralisée achetée au rayon droguerie d'un supermarché. C'est aussi en ce lieu que nous nous procurons la lessive de soude qui constitue notre solution de soude caustique.

Bien entendu, nous pratiquons ce nettoyage avec des gants en plastique. C'est notamment le cas pour le nettoyage à l'alcool car sinon l'alcool dissoudrait les graisses de la peau de la main et les déposerait sur le miroir...

Nous vous recommandons aussi de mettre des lunettes de sécurité lors de l'utilisation de l'acide et de la soude ainsi qu'une blouse pour protéger vos vêtements.

Comme vous pouvez le constater, notre méthode tient plus de la recette de cuisine que de la chimie moderne. Elle nous donne satisfaction.

Nettoyage des miroirs protégés :

L'aluminure des miroirs du commerce est souvent protégée par une fine couche de Silice (SiO₂) qui résiste à l'action de la soude caustique. Pour ôter la métallisation protégée de ces

miroirs, il faut employer l'acide chlorhydrique (disponible dans le rayon droguerie de votre supermarché préféré).

Le résultat n'apparaît pas immédiatement, il faut laisser séjourner le miroir dans l'acide pendant quelques heures à quelques jours.

Cette méthode est efficace sur les protections ordinaires. Cependant, certaines aluminures disposent d'une protection "améliorée" qui est plus difficile à enlever voire impossible... Je tiens à préciser que je n'en ai pas l'expérience.

Attention cet acide est dangereux ! Vous devrez employer toutes les précautions nécessaires pour éviter des projections de ce produit. N'oubliez pas de mettre des lunettes de sécurité, d'enfiler des gants de protection en plastique et de porter une blouse pour protéger vos vêtements. Disposez l'acide dans un lieu inaccessible aux enfants.

Notre bâti de métallisation sous vide

La figure 7 représente un schéma de ce système. L'enceinte à vider est constituée par un manchon en verre de 28cm de diamètre intérieur. Une plaque circulaire obture son extrémité supérieure et supporte les filaments de tungstène ou l'optique à métalliser selon la méthode choisie.

Un robinet situé à la base de l'enceinte à vider permet de réintroduire l'air en fin d'opération.

Trois vannes permettent de maîtriser le parcours des flux de gaz.

La qualité du vide primaire est appréciée par le phénomène lumineux provoqué par une jauge à ionisation (sans ampèremètre). Celle-ci est constituée par deux électrodes placées dans une ampoule de verre et reliées à un transformateur de 1500V~.

Cette lueur nous indique que nous avons atteint un vide primaire suffisant pour l'amorçage de la pompe secondaire. Cette dernière est maintenue sous vide en dehors des périodes d'utilisation par la fermeture des vannes 1 et 3.

Une jauge de Penning est montée sur la base de l'enceinte. Elle est reliée à un appareil de mesure qui nous indique la valeur de la pression atteinte. Sa gamme de mesure s'étend de 10^{-2} à 10^{-6} Torr.

Notez aussi la présence du piège à azote liquide que nous n'utilisons pas... ou plutôt que nous n'utilisons plus car nos essais nous ont démontré qu'il n'apportait pas d'avantages pour notre utilisation.

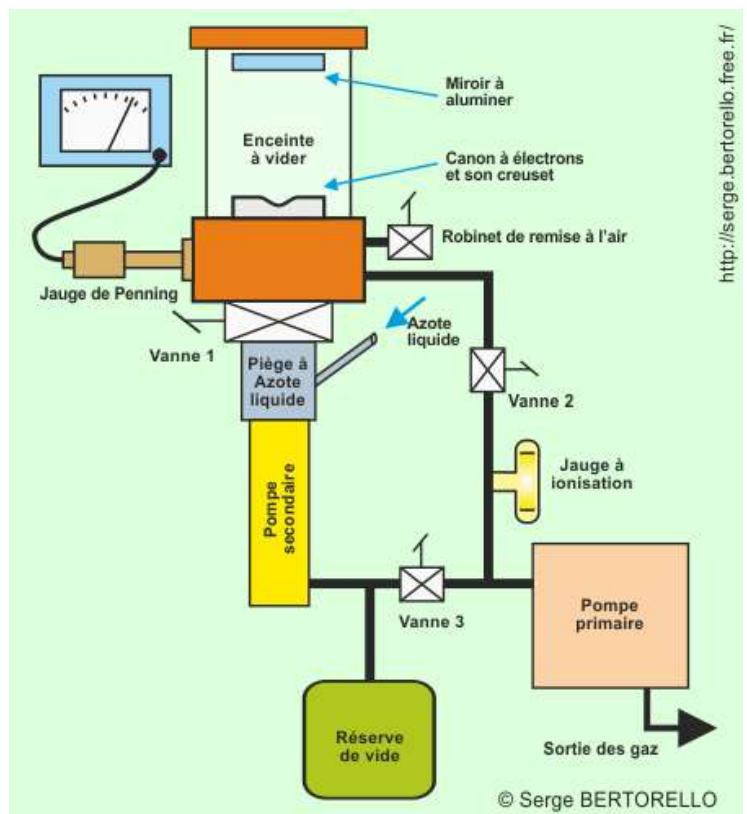


Figure 7 : Notre bâti de métallisation sous vide.

Chauffage de l'aluminium avec des filaments en tungstène :

Auparavant, le miroir à aluminer était placé au bas de la "cloche", la surface optique vers le haut. Avec cette configuration, nous utilisons des filaments de tungstène pour faire évaporer l'aluminium.

Nous avons acheté nos filaments de tungstène auprès de LEYBOLD OPTICS France. Ils sont composés de 3 fils de tungstène torsadés de 0,5mm de diamètre chacun (Figure 8). Un courant de 35A doit les traverser pour que leur température s'élève à 1400°C. Ils sont connectés "en parallèle" à la source de courant (poste à souder électrique).

Il faut accrocher des petits cavaliers d'aluminium très pur sur le filament. Ils sont constitués par des bouts de fil d'aluminium (pur à 99.98%, 1mm de diamètre et 8mm de long) repliés pour leur donner la forme de la lettre U. Ces cavaliers doivent tout d'abord séjourner un moment dans de l'acide nitrique dilué (1/10) afin de les débarrasser de leurs

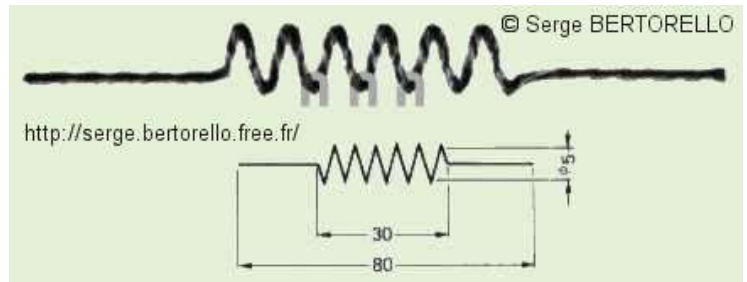


Figure 8 : Filament de tungstène avec trois cavaliers en aluminium

éventuelles impuretés superficielles. Avant de les installer sur les filaments, nous les sortons de l'acide avec une petite pince (brucelles en plastique) et nous les essuyons avec un papier absorbant (genre Sopalin). Après les avoir "accrochés" sur le filament, nous les écrasons légèrement avec une pince (propre) pour améliorer le contact avec le tungstène.

Quand arrive le moment de déclencher l'aluminure, nous faisons passer un fort courant électrique dans les filaments. L'échauffement du filament ainsi provoqué entraîne la fusion des cavaliers qui se transforment en gouttes d'aluminium. Puis, ce métal léger "mouille" le tungstène et se répartit sur le filament avant de s'évaporer.

Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre car elle ne nécessite pas de support particulier pour le miroir qui doit simplement être posé dans le fond de l'enceinte avec sa face optique dirigée vers le haut. Hélas, parfois l'aluminium refuse de mouiller le tungstène et il forme une goutte qui peut se décrocher et tomber... sur le miroir. Nous avons connu cette mésaventure très désagréable sans comprendre l'erreur que nous avons pu commettre.

C'est pour ne plus subir cet incident que nous avons ensuite employé un creuset.

Chauffage de l'aluminium dans un creuset en tungstène :

Avec cette méthode le miroir doit être maintenu dans le haut de l'enceinte avec sa face optique dirigée vers le bas.

Nous employons un creuset en tungstène à travers lequel nous faisons circuler un courant électrique. Ainsi, le creuset s'échauffe par effet joule et fait fondre les morceaux d'aluminium que l'on a préalablement disposés dans son creux.

La figure 9 montre différents types de creusets. Nous utilisons habituellement le modèle du milieu. Il nécessite un courant d'environ 120 Ampères pour l'aluminure.

Nous disposons la quantité d'aluminium nécessaire dans ce réceptacle. Nous utilisons des bouts de fil d'aluminium (pur à 99.98%, 1mm de diamètre) dont la longueur est compatible avec la taille du creuset choisi. Dans notre dispositif habituel, nous plaçons une douzaine de segments de fil d'aluminium de 12mm de long que nous nettoyons auparavant en les faisant séjourner quelques instants dans une solution d'acide nitrique suivi d'un rinçage à l'eau déminéralisée.

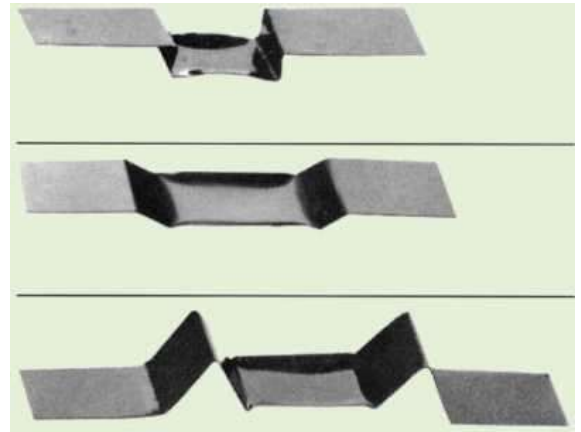


Figure 9 : Exemples de creusets en tungstène (Unaxis)

Avec cette méthode, nous ne risquons plus de faire tomber des gouttes d'aluminium sur nos miroirs. Toutefois, elle présente quelques difficultés.

Il faut tout d'abord trouver un dispositif pour maintenir en toute sécurité le miroir au-dessus du creuset. Nous ne pouvons pas employer plusieurs creusets simultanément comme nous le faisons avec les filaments, nous devons donc placer le miroir à une distance suffisante pour que le dépôt d'aluminium soit suffisamment uniforme. En effet, si le miroir est trop près du creuset, sa partie centrale recevra trop d'aluminium et le bord pas assez... Nous disposons nos miroirs à 25cm du creuset quand leur diamètre est inférieur ou égal à 260mm.

Un autre obstacle réside dans l'intensité du courant nécessaire au creuset pour faire fondre et évaporer l'aluminium. C'est ce qui limite la taille des creusets que nous employons. Ce n'est pas gênant pour les petits miroirs mais cela complique la métallisation des gros miroirs (comme notre miroir de 400mm) car ils doivent être placés à plus grande distance et il faut donc évaporer une plus grande quantité d'aluminium avec une chaleur plus intense.

La figure 10 montre la disposition du creuset sur notre système.

Le creuset est maintenu par deux barres en cuivre au centre de la tourelle qui sert de base à l'enceinte. Ces deux barres sont isolées électriquement du bâti et sont traversées par le fort courant électrique qui sert à chauffer le creuset. Elles ont une section rectangulaire de 5x15mm.



Figure 10 : Le creuset est maintenu au centre de la tourelle par des barres en cuivre.

La vanne 1 qui sépare l'enceinte de la pompe secondaire se trouve au-dessous du creuset. C'est pour la protéger d'une éventuelle chute de matière chaude que nous avons fixé une "gouttière" en acier inox au-dessous du creuset.

Chauffage de l'aluminium avec un canon à électrons :

Un laboratoire qui se débarrassait de son matériel nous a donné un canon à électrons avec son alimentation électrique mais sans notice d'utilisation et sans explication sur son fonctionnement, nous ignorons même le nom de son fabricant. Nous avons donc "tâtonné"

pour le mettre en œuvre mais c'est maintenant un dispositif que nous apprécions beaucoup pour métalliser nos miroirs. Nous n'utilisons plus les autres méthodes.

Pour comprendre le fonctionnement de ce dispositif, il faut connaître quelques notions de base de l'électrostatique :

- Il existe des particules chargées électriquement et leur charge peut être positive ou négative.
- Ces particules créent autour d'elles un champ électrique proportionnel à leur charge.
- Les charges électriques de même signe se repoussent.
- Les charges électriques de signes opposés s'attirent.

La figure ci-contre montre dans une enceinte vide un filament qui est chauffé par un courant électrique (effet Joule).

L'échauffement du filament provoque une forte agitation des atomes de tungstène qui le composent et une éjection de certains électrons.

Chaque électron qui sort ainsi du filament emporte avec lui une charge électrique négative et provoque l'apparition d'une charge positive sur le filament. Ces deux charges opposées s'attirent et, si on ne fait rien pour les en empêcher, les électrons vont revenir sur le filament.

Nous voulons attirer ces électrons vers l'aluminium à évaporer. Pour cela, nous créons un fort champ électrique avec une alimentation de haute tension. Ainsi les électrons sont accélérés et se dirigent à grande vitesse vers leur cible. Toutefois, ces particules vont se disperser sur l'ensemble de l'électrode positive sans la moindre concentration sur le creuset. Ce montage ne suffit donc pas pour former notre canon à électrons mais il décrit le principal aspect électrique.

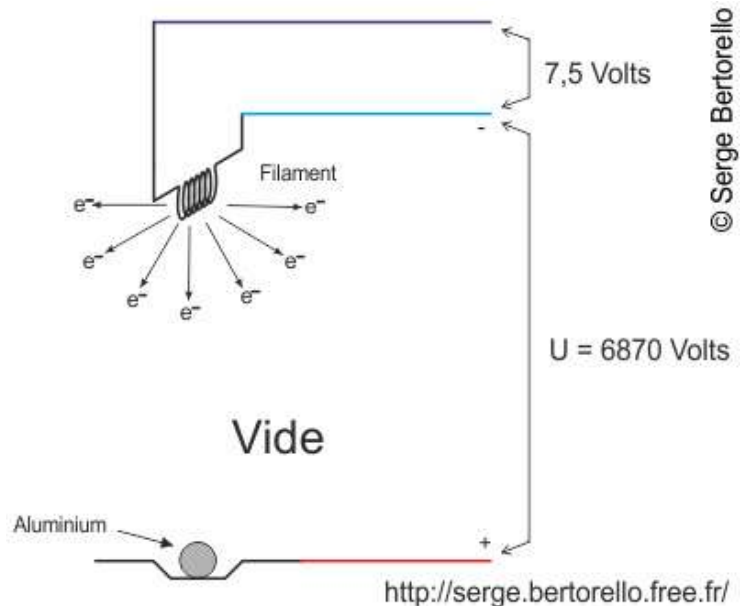


Figure 11 : Les électrons émis par le filament sont attirés par l'électrode positive. Les valeurs indiquées sont celles de notre dispositif.

Vitesse d'arrivée des électrons :

Le champ électrique fournit aux électrons une énergie cinétique E :

$$E = e.U$$

Avec : e = charge électrique de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

U est la tension accélératrice. Dans notre cas U = 6870 Volts

Du point de vue de la mécanique, cette énergie s'exprime de la façon suivante :

$$E = 1/2mV^2$$

Avec : $m =$ masse de l'électron $= 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg
 $V =$ Vitesse d'arrivée de l'électron

En rapprochant ces deux relations on déduit la vitesse d'arrivée des électrons V :

$$V = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = 49100 \text{ km/s}$$

Cette vitesse très importante n'est pas négligeable par rapport à la vitesse de la lumière et on devrait être tenté de corriger ce calcul des effets relativistes mais le résultat ainsi obtenu (48600km/s) diffèrerait d'à peine plus de 1%.

Pour atteindre notre but, nous devons concentrer les trajectoires des électrons sur le creuset dans lequel nous disposons l'aluminium à chauffer et nous voulons que le filament ne soit pas disposé au-dessus du creuset puisque c'est là que nous devons placer le miroir à métalliser. Il faut donc modifier la position du filament et guider les électrons vers leur cible. Pour cela notre dispositif fait appel aux deux techniques suivantes :

- **La déflexion électrostatique** : On forme un champ électrique sur le trajet de la particule. La particule est déviée en étant accélérée ou freinée par ce champ électrique, donc son énergie cinétique varie. Ce sont ces mêmes forces électriques qui sont déjà employées pour accélérer les électrons vers leur cible.

- **La déflexion magnétique** : Avec un aimant, on forme un champ magnétique perpendiculairement au trajet de la particule. La particule est déviée sans être accélérée, son énergie cinétique n'est donc pas modifiée par cette déflexion. Pour déterminer la direction vers laquelle est orientée la particule en fonction de la direction du champ magnétique, je vous propose la règle des trois doigts de la main droite illustrée ci-contre.

Pour employer cette règle dans le cas qui nous intéresse ici, il faut être bien conscient que les électrons se déplacent dans la direction opposée au sens conventionnel du courant électrique.

En effet, on considère que le courant électrique se déplace depuis le pôle positif de l'alimentation (le +) vers le pôle négatif (le -) mais les électrons se déplacent en sens inverse (du - vers le +).

Par ailleurs, la flèche indiquant la direction du champ magnétique est orientée du pôle sud de celui-ci vers son pôle nord.

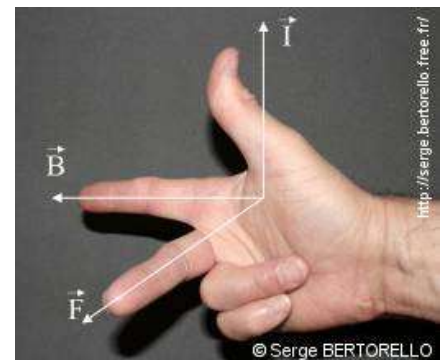


Figure 12 : Si le pouce montre la direction du courant et l'index celle du champ magnétique alors le majeur désigne la direction de la force subie par la particule chargée.

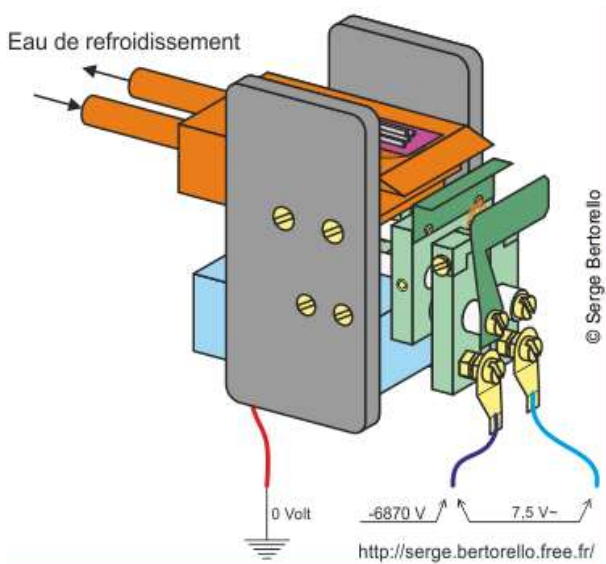


Figure 13 : Notre canon à électrons vu en perspective. Le circuit d'eau de refroidissement est couplé à celui de la pompe à diffusion.

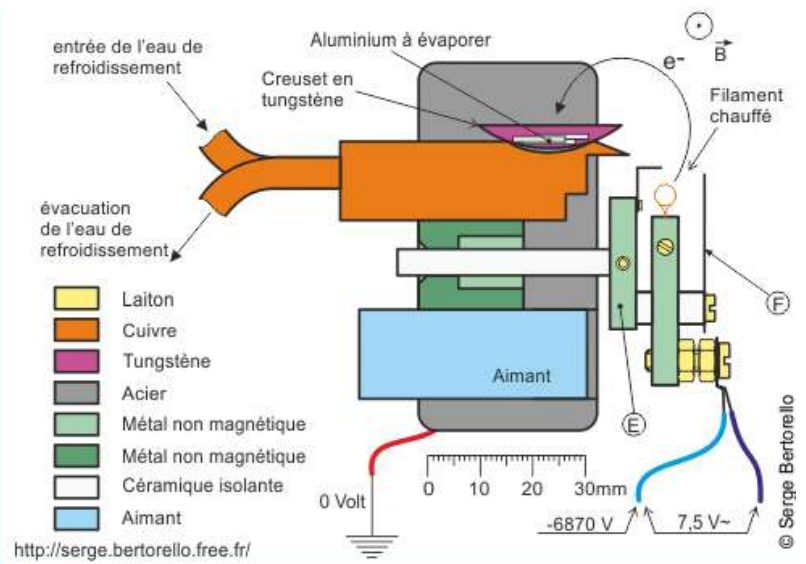


Figure 14 : Notre canon à électrons vu en coupe. Le champ magnétique est perpendiculaire à l'image et son pôle nord est dirigé vers l'arrière-plan.

Une fois que le vide est établi à la valeur souhaitée (10^{-4} Torr dans notre cas soit $\sim 10^{-2}$ Pa) et que l'alimentation électrique du canon est activée, le filament chauffe, brille intensément et se met à diffuser des électrons.

Les premiers électrons sont capturés par les pièces métalliques E et F qui sont isolées électriquement du reste du montage, elles se chargent donc en électricité négative (il faut savoir que les électrons sont chargés négativement). Dès lors, ces composants repoussent les électrons suivants qui ne peuvent plus s'échapper que par l'espace libre au-dessus du filament.



Figure 15 : Notre canon à électrons installé dans la base de l'enceinte.

Si l'aimant n'existait pas, les électrons se dirigeraient ensuite tout droit vers le sabot en laiton qui est refroidi par un circuit d'eau et sur lequel est posé le creuset. Ils ne nous seraient alors d'aucune utilité.

Mais cet aimant crée un champ magnétique guidé par les montants en acier du dispositif et qui est orienté perpendiculairement à notre schéma. La trajectoire du faisceau d'électrons est alors composée par la force électrique qui l'attire vers le creuset et par le champ magnétique qui tend tout d'abord à l'orienter vers la direction opposée. Ainsi guidé, le faisceau d'électrons arrive (à grande vitesse) sur le creuset par le dessus tout en étant concentré sur une surface de quelques millimètres carrés.

Rapidement, en chauffant l'aluminium se met à briller puis à fondre. Il mouille le creuset en tungstène qui devient lumineux à son tour et en une ou deux minutes l'aluminium s'évapore et va se déposer sur les surfaces froides de l'enceinte et du miroir à traiter.

Notons bien un point important : Les câbles électriques qui conduisent le courant d'alimentation du filament doivent être pourvus d'une isolation électrique particulièrement soignée. Cette isolation doit être compatible avec la très haute tension (en l'occurrence près de 7000 Volts) afin de protéger l'utilisateur de toute possibilité d'électrocution. Les cordons de notre installation sont de plus recouverts d'un blindage métallique relié à la masse du système (qui lui-même est relié à la Terre).

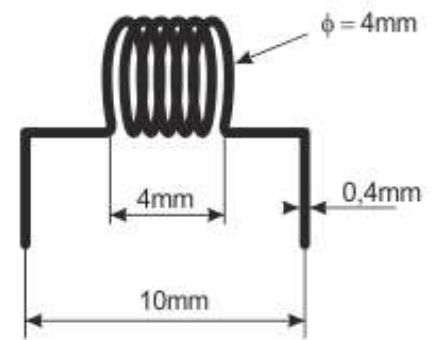


Figure 16 : Filament de notre canon à électrons.

Le filament : Nous avons acheté une bobine de 5m de fil de tungstène de 0,4mm chez un fournisseur d'accessoires de pêche (5,95€) qui le propose pour lester les mouches artificielles. Nous préparons notre filament en enroulant 6 spires de ce fil sur un clou. Ce clou sert juste à donner la forme aux spires, il est ensuite retiré.

Le creuset : Il s'agit d'un creuset en tungstène qui est prévu initialement pour être chauffé par effet Joule, c'est à dire par le passage d'un courant électrique comme nous l'avons vu plus haut. Nous lui enlevons les pattes externes pour conserver seulement la partie cambrée.



Figure 17 : Creuset du canon à électrons neuf et avant découpe.



Figure 18 : Creuset du canon à électrons après découpe et après quelques utilisations. Nous avons déposé dans son creux quelques longueurs de fil d'aluminium pour la prochaine évaporation.

Support du miroir :

Lorsqu'on métallise un miroir avec un creuset, il faut le maintenir au-dessus du vide... je veux dire au-dessus du creuset. Lors de la conception du support nécessaire, nous avons souhaité qu'il puisse être employé pour la plupart des miroirs à traiter.

Nous avons fixé 3 pattes pivotantes sur le couvercle de la cuve. Comme l'illustrent les photographies suivantes, elles peuvent ainsi maintenir des miroirs de différents diamètres. La photographie du haut à droite montre l'emploi du support avec un miroir de 60mm alors qu'avec celles du bas c'est un miroir de 200mm.



<http://serge.bertorello.free.fr/>



<http://serge.bertorello.free.fr/>



<http://serge.bertorello.free.fr/>



<http://serge.bertorello.free.fr/>



<http://serge.bertorello.free.fr/>

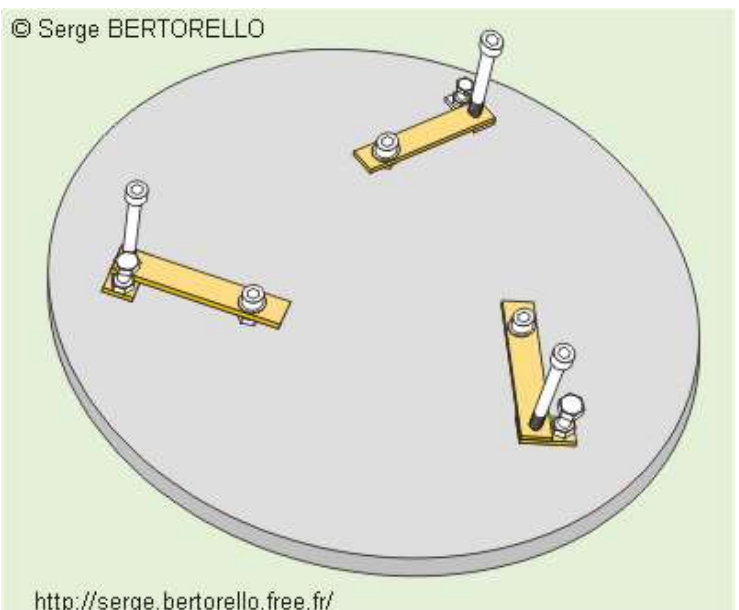


<http://serge.bertorello.free.fr/>

Les figures suivantes (19 et 20) montrent en détail ce support.

Les longues vis (désignées par la lettre A sur la figure 20) sont celles qui maintiennent le miroir. Pour ces vis, nous choisissons à chaque fois un type adapté au miroir (et à son épaisseur). Le modèle indiqué sur la figure 20 est celui que nous employons habituellement pour les miroirs de 200mm de diamètre (environ 35mm d'épaisseur).

Le miroir est tout d'abord posé sur les têtes des vis "C" en le centrant sur le support avec la face optique vers le haut. Ensuite, nous faisons pivoter les pattes pour plaquer



© Serge BERTORELLO

<http://serge.bertorello.free.fr/>

Figure 19 : Couvercle de la cuve avec le support de miroir.

les tiges des trois vis "A" contre le bord du miroir puis nous vissons les vis "B" à la main. Le serrage de ces vis "B" entraîne un blocage en rotation des pattes ainsi qu'une torsion de celles-ci qui les appuie fermement sur la tranche du miroir. Le miroir est alors bien tenu et le support peut être retourné pour reprendre sa place de couvercle de l'enceinte à vide. Dès lors, la face optique est orientée vers le bas, c'est à dire vers le creuset.

Nous employons ce système pour les miroirs dont le diamètre a une valeur maximale de 260mm. Pour les plus gros de ces miroirs (200 mm ou plus), lorsque nous en sentons la nécessité, nous améliorons la sécurité du dispositif en cerclant l'ensemble vis "A" et miroir avec un collier en plastique.

Les pattes du support sont maintenues par les vis "C" autour desquelles elles peuvent pivoter. Ces vis sont fixées dans des trous borgnes usinés dans le couvercle. Un contre-écrou bloque chacune de ces vis tout en laissant pivoter le bras en laiton.

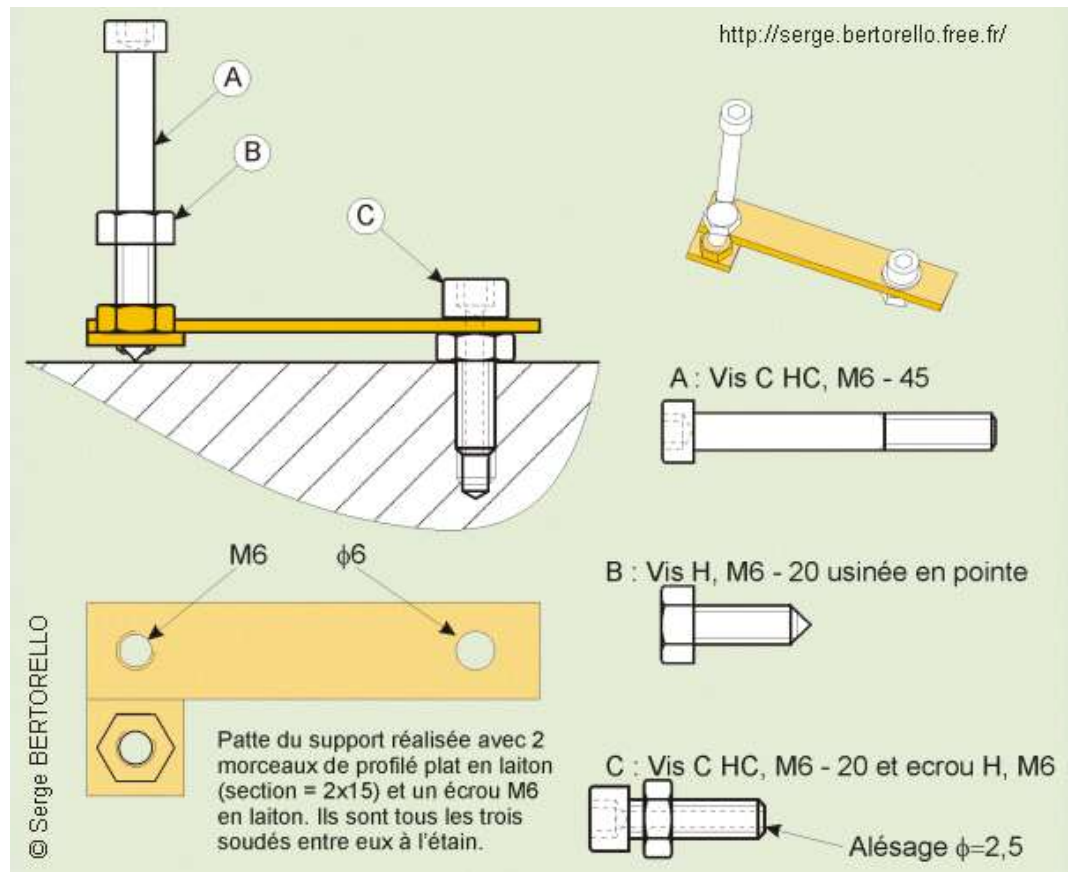
Les vis "C" ont été alésées selon leur axe. Cet orifice permet à l'air emprisonné dans le trou borgne de s'échapper sans

difficulté. Sans cette précaution, l'air retenu dans le trou borgne pourrait diffuser lentement en contrariant ainsi la progression du vidage de la cuve.

Les pattes elles-mêmes sont constituées de deux plaques en laiton issues d'une barre de 2x15mm de section et elles sont soudées entre elles perpendiculairement à l'étain avec un fer à souder. Ce type de profilé en laiton se procure facilement dans les grandes surfaces du bricolage. Un écrou M6 en laiton soudé lui aussi à l'étain sur la plus petite plaque vient compléter le dispositif. Notez la présence du trou taraudé M6 dans la partie où se superposent les deux plaques. La vis "A" est vissée dans ce trou sans aucun serrage.

Mode d'emploi de notre bâti de métallisation sous vide avec son canon à électrons

Après avoir mis en place les petits morceaux de fil d'aluminium dans le creuset, on place le miroir soigneusement nettoyé sur son support. L'enceinte est ensuite chapeautée avec le



couvercle auquel est agrippé le miroir et nous nous assurons que le robinet de remise à l'air est bien fermé. Nous mettons alors en marche les pompes et nous ouvrons la vanne 2 en laissant les autres vannes fermées.

En moins de 30 secondes la pression à l'intérieur de l'enceinte atteint une valeur de quelques Torr. Le phénomène lumineux autour des électrodes de la jauge à ionisation confirme cette situation. A ce moment, il convient d'orienter le flux de gaz pour qu'il circule à travers la pompe secondaire. Pour cela, il faut fermer la vanne 2 et ouvrir les vannes 1 et 3. Le chauffage de la pompe secondaire doit être poursuivi pendant une vingtaine de minutes avant que celle-ci ne s'amorce (c'est pour éviter cette attente que nous la faisons chauffer pendant que nous préparons le miroir à traiter). L'action de cette pompe provoque ensuite une baisse progressive de la pression dans l'enceinte que nous jugeons avec l'indication de la jauge de Penning. Une demi-heure à trois quart d'heure plus tard, la pression est descendue au-dessous de 10^{-4} Torr, il est temps de procéder à l'évaporation.

On établit la haute tension du canon à 6870 Volts et on alimente le filament (7,5 Volts / 3,5 Ampères). Celui-ci devient alors très lumineux et l'aluminium se met à rougir puis à briller. Il forme tout d'abord une goutte qui ensuite se répand sur toute la surface du creuset et s'évapore progressivement (en une ou deux minutes). La cloche devient opaque et prend des reflets métalliques. A ce moment, l'alimentation de haute tension débite un courant de 35mA.

Après avoir mis hors tension l'alimentation du canon, il ne reste plus qu'à fermer la vanne 1 et à introduire de l'air dans la cloche avant de l'ouvrir et d'admirer le pouvoir réfléchissant de la couche d'aluminium du miroir. En quelques semaines, celle-ci va se recouvrir d'une fine couche d'alumine, c'est à dire d'oxyde d'aluminium. Cette pellicule va renforcer la résistance de la couche réfléchissante aux agressions extérieures. Toutefois, ce dépôt d'aluminium devra être renouvelé au bout de cinq à dix ans.

L'aluminium déposé sur les parois de la cloche est ensuite éliminé avec une solution de soude caustique (NaOH).

Si la séance est terminée, nous devons fermer la vanne 3 (la vanne 1 est déjà fermée) et arrêter les pompes. Dans le cas contraire, nous préparons à nouveau la cloche avec un nouveau miroir ainsi qu'une nouvelle dose d'aluminium dans le creuset. Pour le pompage primaire, nous fermons la vanne 3 et nous ouvrons la vanne 2. Pendant ce nouveau pompage primaire, les vapeurs résiduelles captées par la pompe secondaire sont envoyées vers la réserve de vide. Ce réservoir permet à la pompe à diffusion d'huile de fonctionner quelques temps sans se désamorcer malgré l'absence de pompage primaire. Après moins de 30 secondes, une lueur apparaît sur les électrodes, nous passons au pompage secondaire comme précédemment.

Au cours de ces procédures, il faut bien penser à ne jamais mettre en contact l'huile chaude de la pompe à diffusion avec la pression atmosphérique. Il faut aussi être très prudent avec la haute tension électrique nécessaire au canon.

Quelques photographies

Voici tout d'abord deux photographies de notre bâti de métallisation sous vide.



Le premier cliché montre la "cloche à vide" et le second montre le bâti vu de dessus après que l'on a retiré la cloche. Sur ce dernier nous remarquons les fils électriques qui alimentent sous haute tension le filament du canon que l'on aperçoit au centre. Il montre aussi la jauge de Penning et son boîtier d'alimentation.



A une époque, notre seule indication du vide était donnée par une jauge à ionisation que nous avons improvisée avec deux vis isolées qui étaient alimentées en haute tension.

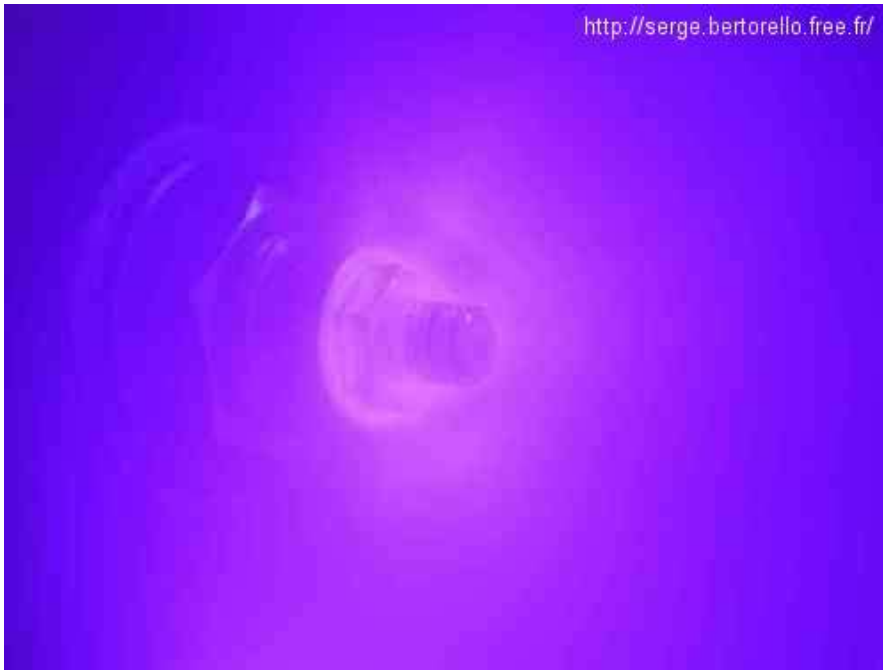
Le cliché de gauche montre cette disposition sur la base de l'enceinte vue de côté. On distingue les deux têtes de vis qui font office d'électrodes entre lesquelles on a placé une haute tension électrique alternative. En fait, cette tension est fournie par un transformateur "élevateur". Celui-ci élève la tension alternative du secteur à 1600 Volts environ mais cette valeur diminue à 300 Volts quand les lueurs apparaissent. Ensuite quand la pression diminue la tension remonte progressivement. C'est l'intensité du courant électrique qui est responsable de cette chute de la tension.

La vue suivante montre l'apparition des premières lueurs qui apparaissent sur les électrodes vers la fin du pompage primaire. Ces lueurs se diffusent ensuite autour des vis. Le dernier des trois clichés ci-dessus montre la lueur au début du pompage secondaire.

Les trois clichés suivants montrent les lueurs de la jauge à ionisation pour différents degrés d'avancement du vide secondaire. Vous pouvez remarquer les zones obscures de Hittorf, ce sont les zones légèrement moins brillantes qui entourent les vis.



Voici maintenant un gros plan sur une des vis.



Ces lueurs sont beaucoup plus spectaculaires à voir. Les photographies ne rendent pas compte de toute la beauté de ce phénomène. Notamment, les zones de Hittorf sont plus évidentes que sur les clichés.

Voyons maintenant les filaments qui ont constitué notre premier dispositif d'évaporation de l'aluminium.



La première image montre un des quatre filaments de tungstène sur lequel nous avons placé trois cavaliers d'aluminium. Quand le pompage est suffisamment avancé, nous faisons circuler un fort courant électrique dans les filaments (à l'aide d'un poste à souder électrique). Ceci entraîne un échauffement du fil qui rougit. Il faut contrôler ce chauffage pour qu'il entraîne

progressivement la fusion de tous les cavaliers d'aluminium. Après avoir fondu, ce métal "mouille" le filament, il s'étale sur sa surface. Ensuite, les atomes du métal fondu se diffusent en ligne droite et se fixent sur toutes les surfaces qu'ils rencontrent.

Alors, le miroir et les parois en verre de la cloche prennent un aspect métallique brillant. Il faut ensuite couper le courant qui chauffe les filaments, on ferme la vanne 1, on fait entrer l'air dans l'enceinte et on sort le miroir. Il est prêt.

Les deux clichés suivants montrent notre bâti équipé du canon à électron et de la jauge de Penning.



A gauche, la lueur de la jauge à ionisation (en bas à travers l'orifice ovale) indique qu'il est temps de débuter le pompage secondaire. La photo de droite est un gros plan sur le canon à électron vu à travers la paroi de verre au moment où le creuset brille tellement il est chaud. L'aluminium commence à être diffusé dans l'enceinte.

Métallisation de notre miroir de 400mm

Notre télescope de 400mm s'appelle Hercule. Son miroir ne peut pas être métallisé dans la cuve en verre que nous vous avons présentée ci-dessus. Pour traiter ce miroir, nous employons une cuve en inox de dimensions plus imposantes que nous déplaçons avec l'aide d'un treuil électrique.

Cette cuve dont nous n'avons pas choisi les dimensions est inutilement haute. En effet, si nous fixions le miroir sur le couvercle, comme nous l'avons fait pour la cuve précédente, il serait situé beaucoup trop loin du creuset. En conséquence, il faudrait un vide plus performant et il faudrait évaporer plus de métal.

Nous avons donc conçu un dispositif qui suspend l'optique en bas de cette enceinte à une distance raisonnable du creuset.

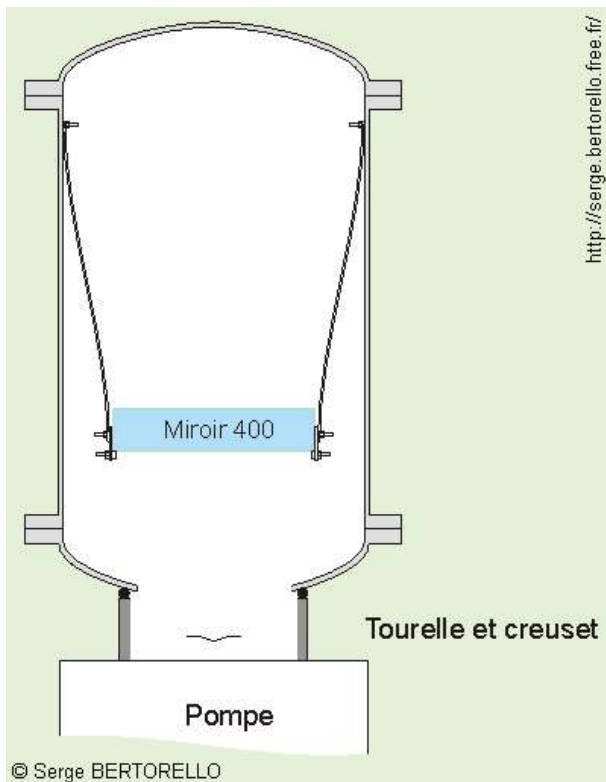


Figure 21 : Cuve inox vue en coupe



Figure 22 : Cuve employée pour la métallisation du miroir de 400mm.

Nous avons réalisé ce système de suspension du miroir avec des profilés plats en aluminium.

Le miroir s'appuie sur quatre têtes de vis. Pour le mettre en place, nous fixons des poignées à ventouses sur son dos (Figure 23).

Ce support fait sur mesure est donc employé uniquement avec ce miroir.

La cuve ainsi préparée est posée sur la tourelle porte accessoires avec interposition d'un joint en caoutchouc. L'étanchéité de cette disposition n'est pas suffisante, nous devons l'améliorer en disposant un mastic sur le joint juste avant de mettre en place la cuve. Nous utilisons pour cela le mastic RUBSON sanitaire pour joints de lavabo. Ce mastic "sèche" pendant le vidage de la cuve et il bouche les micro-fuites que nous avions sans lui.

Ce dispositif présente un défaut, il ne permet pas de voir le miroir au cours de la métallisation. En effet, contrairement au précédent dispositif qui était en verre, cette cuve inox est opaque. Pour contrôler la métallisation, nous avons prévu un petit hublot en verre qui nous permet d'assister à l'évaporation de l'aluminium sur le creuset.

Ce hublot est disposé derrière un périscope. C'est un jeu de 2 petits miroirs qui abritent le hublot de la diffusion de l'aluminium tout en permettant de voir le creuset. Sans cette précaution, le hublot se métalliserait et deviendrait rapidement opaque nous empêchant ainsi de contrôler le processus.



Figure 23 : Mise en place du miroir de 400mm.

Calcul de la quantité d'aluminium à évaporer

Pour déterminer la quantité d'aluminium que nous devons disposer dans le creuset ou sur les filaments, nous allons considérer que l'aluminium se diffuse uniformément dans toutes les directions.

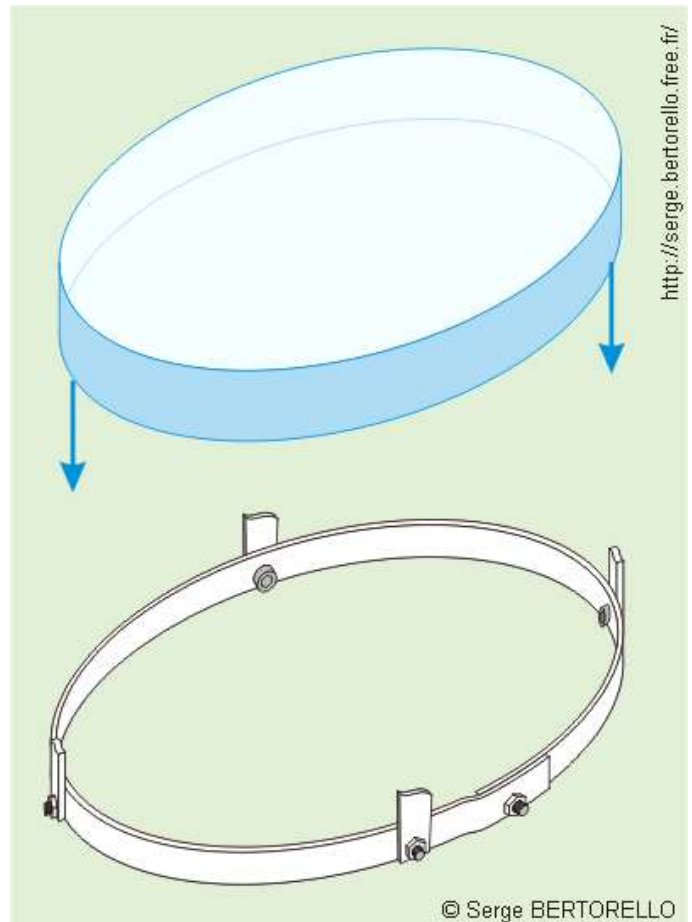


Figure 24 : Support du miroir de 400mm en détail.



Figure 25 : Le miroir de 400mm vient d'être aluminé.

Par ailleurs, nous considérons que l'épaisseur du dépôt d'aluminium que nous devons déposer sur notre miroir doit avoir une épaisseur de 50 nanomètres, nous la désignerons par la lettre "e".

$$e = 50\text{nm} = 50 \text{ milliardièmes de mètre} = 50 \cdot 10^{-9}\text{m}$$

Une épaisseur inférieure ne serait pas suffisamment réfléchissante et il faut éviter de déposer une trop grande épaisseur car les irrégularités du dépôt pourraient détériorer la précision de la surface du miroir.

Dans ces conditions, le volume d'aluminium à évaporer est donné la formule suivante :

$$V = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot e$$

avec r = distance entre miroir et source de diffusion de l'aluminium.

Ceci correspond à la surface d'une sphère de rayon " r " multipliée par l'épaisseur " e ".

L'aluminium que nous employons est conditionné en fil de 1mm de diamètre. La surface de sa section vaut :

$$S = \pi.D^2/4 = 3,14 / 4 = 0,785 \text{ mm}^2$$

avec $D = \text{diamètre du fil d'aluminium} = 1\text{mm}$

Ceci nous permet de déduire la longueur de fil d'aluminium nécessaire :

$$L = V / S$$

Nous pouvons aussi calculer la masse "M" d'aluminium :

$$M = \rho.V$$

avec $\rho = \text{masse volumique de l'aluminium} = 2,7 \text{ g/cm}^3$

Exemple :

Nous plaçons notre miroir à 250mm du creuset. Pour le métalliser, nous devons donc évaporer le volume d'aluminium suivant :

$$V = 4 \times 3,14 \times 250^2 \times 50.10^{-6} = 39,25\text{mm}^3$$

Ce qui correspond à une longueur de fil d'aluminium de :

$$L = 39,25\text{mm}^3 / 0,785\text{mm}^2 = 50\text{mm}$$

Quant à la masse :

$$M = 2,7 \times 39,25.10^{-3}\text{cm}^3 = 0,106\text{g}$$

Trajectoires des atomes d'aluminium lors de la métallisation

Les atomes d'aluminium sont projetés dans toutes les directions même lors de l'emploi d'un creuset. En effet, quand il est chaud, l'aluminium fondu mouille le tungstène et il s'étale sur toute la surface du creuset y compris au-dessous.

Par ailleurs, les atomes d'aluminium qui se propagent dans le vide parcourent les trajectoires paraboliques que leur impose l'attraction de la Terre (lois de la chute des corps). Par conséquent, les atomes devront être émis avec une vitesse suffisante pour pouvoir aller jusqu'à la surface du miroir si nous l'avons placé au-dessus. Dans le cas contraire, ils retomberont inutilement vers le bas de l'enceinte.

Uniformité du dépôt d'aluminium

Considérons une métallisation pour laquelle la source d'aluminium (un creuset par exemple) est placée à 250mm dans l'axe d'un miroir de 260mm de diamètre. Dans ce cas, la couche de l'aluminium déposé ne peut pas avoir la même épaisseur sur toute la surface du miroir. La figure 26 montre la variation de l'épaisseur du dépôt obtenu sur le miroir en fonction de la distance à son axe.

Ce graphique nous indique que l'épaisseur de la couche d'aluminium au bord du miroir vaut 70% de l'épaisseur du dépôt au centre.

En raisonnant au premier degré, nous dirions que cette variation d'épaisseur de la couche d'aluminium entraîne la création d'un défaut semblable sur le miroir. Ainsi, si l'épaisseur de la couche d'aluminium vaut 50nm au bord du miroir, son épaisseur au centre vaut $50/0,7=71$ nm. Nous avons donc introduit un défaut de $71-50=21$ nm sur la surface du miroir et du double (42nm) sur la surface de l'onde. La longueur d'onde de référence étant 560nm, nous avons introduit sur le front d'onde fourni par cette optique un défaut de : $560/42=\lambda/13$ (lambda sur 13). Ceci serait inadmissible.

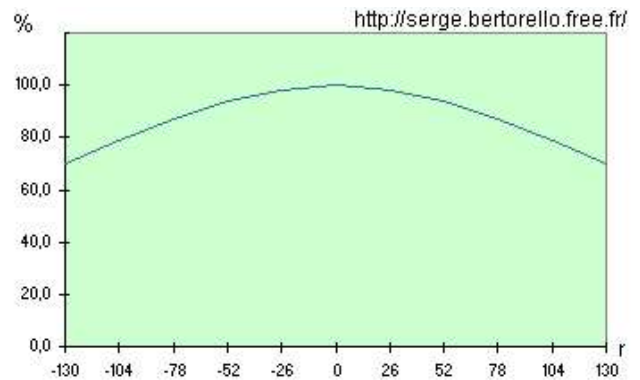


Figure 26 : Répartition du dépôt d'aluminium sur le miroir.

En étudiant de plus près ce problème, nous constatons que l'épaisseur du dépôt suit une loi grossièrement parabolique. Comme le profil de la surface du miroir était déjà parabolique la nouvelle surface du miroir sera peu éloignée d'une (autre) parabole. L'épaisseur déposée au centre étant supérieure à celle du bord, nous pouvons imaginer que ce dépôt va modifier la concavité du miroir et donc distance focale du miroir, il va la faire augmenter très légèrement. Notre miroir de 260mm de diamètre voit ainsi sa distance focale augmenter de $7\mu\text{m}$...

En suivant cette idée, nous devons étudier les défauts introduits par la métallisation en considérant le nouveau profil du miroir. La figure 27 nous montre que cette fois le plus gros défaut introduit vaut 2,2% de l'épaisseur déposée sur le centre du miroir soit 2,2% de 71nm = 1,6nm. Comme toujours, le défaut reporté sur la surface du front d'onde vaut le double c'est à dire 3,2nm ce qui correspond à : $560/3,2=\lambda/175$. Ce qui est tout à fait acceptable.

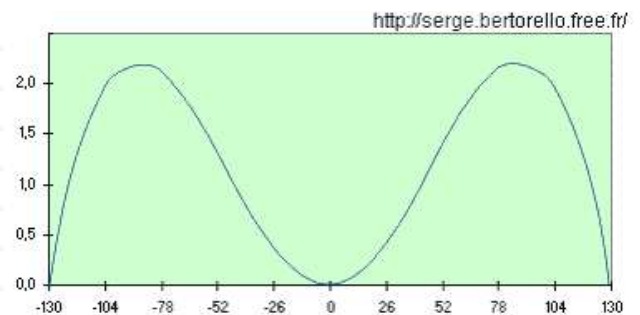


Figure 27 : Influence du dépôt sur le profil du miroir.

Ce dernier raisonnement peut être tenu uniquement pour un miroir à section parabolique quand la source de la métallisation est dans son axe. Les miroirs plans ne peuvent en bénéficier. Pour ces composants c'est le précédent raisonnement qu'il faut employer. Les miroirs plans ont habituellement des petites dimensions et dans ce cas l'homogénéité du dépôt est suffisante. Il faut quand même être très attentif sur cet aspect.

Pour déterminer la régularité du dépôt d'aluminium, nous étudions l'épaisseur de la métallisation grâce au logiciel EXCEL avec le fichier suivant "[homognt.xls](#)".

Constatation étonnante sur un miroir du commerce :

Je vais vous raconter ici la surprise que nous avons eue quand nous avons refait l'aluminure du miroir de 250mm de diamètre qu'un membre de l'AMAS avait acheté à un artisan français dans les années 1980.

La "surprise" est apparue quand nous avons attaqué la vieille aluminure avec la soude (lessive de soude du commerce). L'aluminure a été éliminée instantanément sur une partie du miroir

mais sa disparition a été très progressive sur le reste du disque de verre. Il nous a fallu près de 3/4 d'heure pour enlever en totalité cet ancien dépôt de métal.

Mon interprétation est que ce miroir a été métallisé avec une seule source placée à proximité immédiate du bord du miroir. Le dépôt était très épais à proximité de la source et il était plus ténu à plus grande distance. Si ceci était exact, cela signifierait que le dépôt n'avait pas une régularité suffisante pour conserver sa qualité au miroir...

Conclusion

Nous possédons un bâti de métallisation sous vide qui nous apporte beaucoup de satisfactions. Nous aluminons nos miroirs de télescopes avant que leur métallisation n'ait été excessivement détériorée. De plus, nous pouvons réaliser diverses expériences originales comme rendre réfléchissante une grosse lentille plan-convexe. Celle-ci est ensuite déposée sur une surface horizontale. Un appareil photo situé au-dessus d'elle enregistrera un cliché de tout le ciel en la photographiant.

Je remercie Jean MONTIXI pour les conseils qu'il m'a donnés sur cet article ainsi que pour son enseignement sur les techniques du vide.

Unités de pression utilisées pour les techniques du vide

Le tableau ci-après propose la conversion des différentes unités employées.

	Torr	kg / cm ²	atm.	bar	mb	psi	inch Hg	Pascal
1 Torr = 1mm Hg	1	1,36.10 ⁻³	1,316.10 ⁻³	1,33.10 ⁻³	1,33	0,0193	0,0394	133
1 kg / cm ²	735	1	0,967	0,981	981	14,2	28,9	98100
1 Atmosphère	760	1,034	1	1,013	1013	14,70	29,9	1,013.10 ⁵
1 bar	750	1,02	0,9869	1	1000	14,50	29,5	10 ⁵
1 mb (millibar)	0,75	1,02.10 ⁻³	0,987.10 ⁻³	10 ⁻³	1	0,0145	0,0295	100
1 psi	51,71	0,0703	0,068	0,0689	68,9	1	2,036	6899
1 inch of mercury	25,4	0,0345	0,0334	0,03387	33,87	0,491	1	3389
1 Pascal = 1 N / m ²	7,5.10 ⁻³	1,02.10 ⁻⁵	9,86.10 ⁻⁶	1.10 ⁻⁵	0,01	0,145.10 ⁻³	0,295.10 ⁻³	1

Caractéristiques physiques

Température d'ébullition de l'azote à la pression atmosphérique	- 195,8 °C
Température d'ébullition de l'oxygène à la pression atmosphérique	- 183 °C

Masse volumique de l'aluminium	2,7 g/cm ³
Température de fusion de l'aluminium	660 °C
Masse volumique du tungstène	19,3 g/cm ³
Température de fusion du tungstène	3 680 °C

Quelques adresses

[La Société Française du Vide](#) : 19 rue du Renard 75004 PARIS - Tél : 01 53 01 90 30

Cette association propose des formations sur les techniques du vide. Elle organise des manifestations, publie une revue et édite divers ouvrages sur ce domaine.

[KERDRY](#) : Espace de Broglie - 5, rue de Broglie 22300 LANNION - Tél : 02 96 48 84 77

Métallisation sous vide de miroirs.

[MCM](#) : 21 rue de la merlette, ZI Sept-Sorts, 77260 LA FERTE SOUS JOUARRE - Tél : 01 60 38 10 00

Dépôts de couches minces sous vide. Cette société propose notamment ses prestations aux astronomes amateurs.

Fournisseurs

[LEYBOLD France S.A.](#) - Parc du Technopolis, Bâtiment Beta, 3, Avenue du Canada, 91940 Les Ulis cedex - Tél : 01 69 82 48 00

[BUSCH](#) - rue Bois Chaland - 91090 LISSES - Tél : 01 69 89 89 89

[NEYCO](#) - 30 avenue de la Paix - 92170 VANVES - Tél : 01 41 90 50 50

[PFEIFFER-VACUUM SAS](#) - 98, avenue de Brogny, BP 2069, 74009 Annecy Cedex - Tél : 04 50 65 77 77

Bibliographie

Fundamentals of Vacuum Technology : C'est un manuel très intéressant (mais écrit en anglais), il est édité par la société LEYBOLD Vacuum.

Serge BERTORELLO

[Retour à la page d'accueil](#)

© Serge BERTORELLO : Tous les documents présents sur ce site sont protégés par les lois sur les droits d'auteur.

La reproduction et la diffusion de ces documents sont interdites sans le consentement de l'auteur.

serge.bertorello@free.fr