

N° d'ordre :

THÈSE

présentée à la

Faculté des Sciences de l'Université de Paris

pour obtenir

Le Titre de Docteur 3 ème Cycle
SPECTROSCOPIE

par

Bernard LOTTE

Contribution à l'étude des propriétés d'une source d'étincelles
émettant un spectre continu dans l'ultraviolet lointain.

Soutenue le

1965 devant la Commission d'Examen

M. BROCHARDPrésident
MM. CHABBAL }
ROMAND } Examineurs
M. LEACH Invité

PARIS 1965

I N T R O D U C T I O N

De nombreuses sources émettant un spectre continu dans l'ultraviolet lointain ont été mises au point principalement dans le but d'obtenir une résolution suffisante pour les études d'absorption, car un spectre de raies, même très dense fournit des résultats peu précis ; mais peu d'entre elles sont d'un usage pratique dans l'ensemble du domaine spectral considéré qui s'étend depuis la limite de transparence de l'air vers 2.000 Å, jusqu'aux rayons X. Ces sources, que nous pouvons classer selon le type d'émission du spectre continu, comprennent les principales catégories suivantes : (1)

- Spectres continus d'origine moléculaire obtenus par le passage d'un courant électrique dans un gaz : hydrogène ou gaz rare; avec ces sources le domaine spectral couvert dans l'ultraviolet lointain est assez restreint (2) (3).

- Radiation continue émise par les électrons accélérés dans un synchrotron; ce spectre continu s'étend sur l'ensemble de l'ultraviolet lointain, mais l'appareillage utilisé est trop important pour permettre couramment son emploi (4) (5).

- Continu de freinage électronique dans les plasmas denses produits par une décharge électrique de forte densité de courant ; cette décharge est faite en général dans un gaz, à travers un capillaire, mais malgré de très importants perfectionnements réalisés récemment, la présence du gaz limite le spectre du côté des courtes longueurs d'onde. (6) (7)

Cependant, un type de source faisant appel aux radiations émises par un plasma dense, a été mis au point au laboratoire ; l'inconvénient de limitation du spectre vers les courtes longueurs d'onde est éliminé par la suppression du gaz, l'étincelle ayant lieu sous vide.

En plus du spectre de raies émis dans ces conditions,

nous pouvons observer un spectre continu dans la région de l'extrémité de l'anode, lorsque certaines conditions sont remplies, et en particulier pour des valeurs élevées de la densité de courant. Le spectre ainsi obtenu s'étend depuis le visible, jusqu'aux rayons X. (8) (9)

Nous allons décrire cette source ainsi que l'appareillage utilisé pour son fonctionnement et pour l'observation des résultats avant de traiter les différentes études entreprises à son sujet.

- DESCRIPTION DE LA SOURCE -

La "source" proprement dite se compose de trois électrodes, deux d'entre elles, distantes environ d'un centimètre sont reliées directement aux armatures du condensateur principal.

L'étincelle entre ces deux électrodes se produit lorsque le potentiel disruptif dans le vide est abaissé par ionisation de l'espace qui les sépare à l'aide d'une étincelle glissante entre la cathode et la troisième électrode ; cette étincelle d'initiation provoquée par la décharge d'un condensateur auxiliaire utilise un support d'alumine.

Une réalisation pratique de cette source représentée schématiquement sur la figure 1 comporte un circuit électrique coaxial composé par la tige porte électrode **L** dont une extrémité est vissée dans l'armature interne du condensateur, l'autre recevant l'anode interchangeable A ; le retour du courant vers l'armature externe du condensateur s'effectue pour la cathode C, le tube T et la pièce métallique B. Ce type de circuit a été choisi pour sa self induction assez faible et aussi parce qu'il correspond le mieux aux formes du condensateur cylindrique à armatures coaxiales "Bosch". utilisé pour la majeure partie des essais, il peut d'ailleurs être adapté à l'utilisation d'autres condensateurs par la réalisation de circuits de liaison (par exemple plat) selon les techniques connues des circuits à faible inductance.

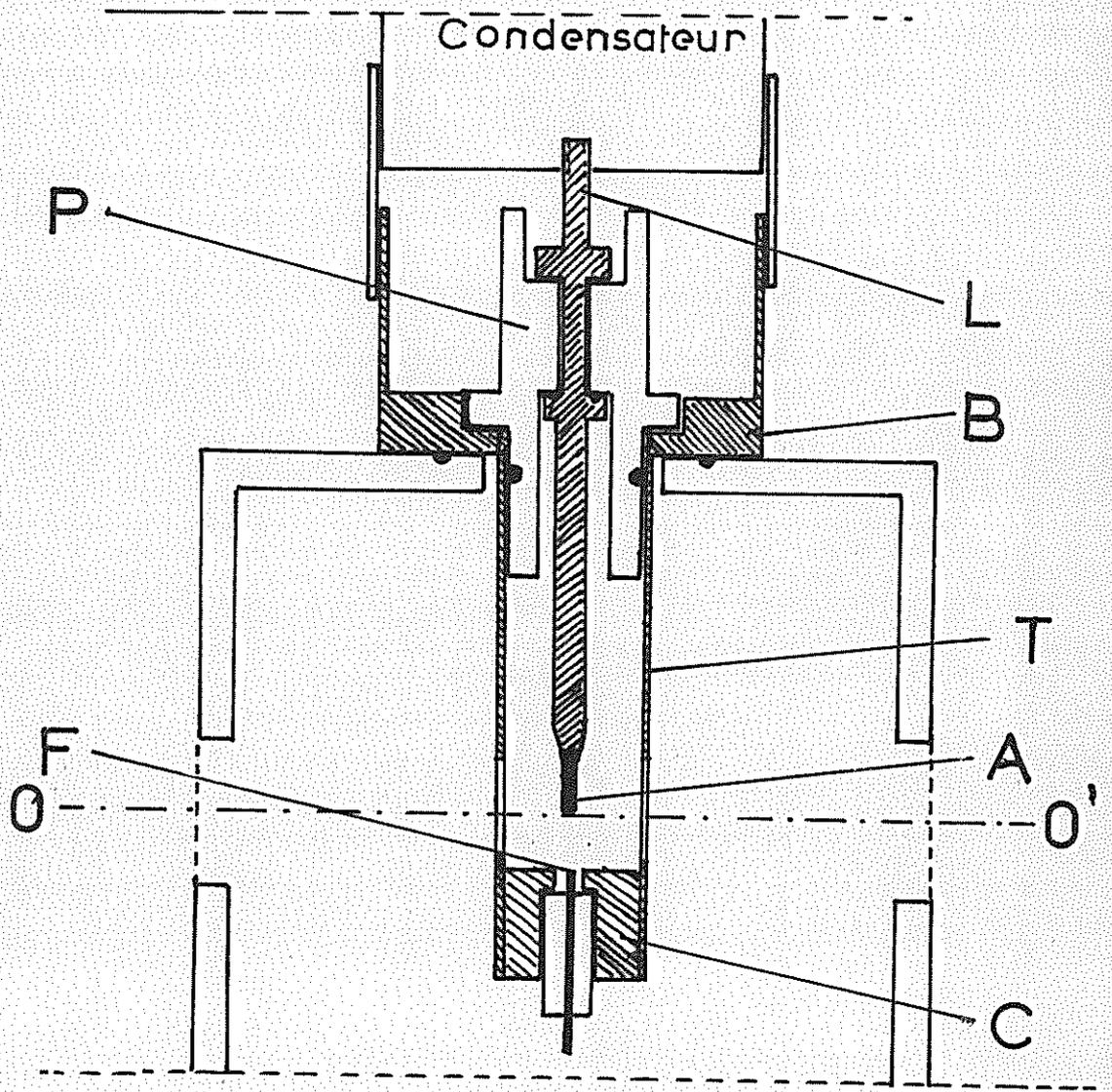


FIGURE 1

L'étincelle glissante d'amorçage a lieu entre l'anode auxiliaire F et la cathode C. L'isolement électrique est assuré par la pièce en stéatite P et l'étanchéité au vide est réalisée par des joints toriques, aussi bien entre les diverses pièces qu'entre l'ensemble de la "source" et la chambre à étincelles dans laquelle la pression est abaissée à mieux que 10^{-4} millimètre de mercure environ. L'observation s'effectue le plus souvent latéralement suivant l'axe OO' par des fenêtres pratiquées dans le tube T.

- APPAREILLAGE UTILISE -

Pour cette étude, nous avons disposé d'un spectrographe à vide équipé d'un réseau concave de un mètre de rayon de courbure, utilisé en incidence "normale" sous un angle de 10° ; cet appareil conçu et mis au point au laboratoire, (10) permet l'étude de l'ultraviolet jusqu'à 500 Å., cette limite étant imposée par la chute du pouvoir réflecteur du réseau vers les courtes longueurs d'onde. L'observation photographique s'est effectuée avec des films pour lumière visible sensibilisée pour l'ultraviolet par fluorescence du salicylate de sodium, celui-ci en solution dans l'alcool métylique étant étendu sur le film. Le pouvoir de résolution effectif de cet appareil équipé d'un réseau "Bausch and Lomb" de 1200 traits par millimètre ayant son angle de Blaze pour 800 Å est de 4.000 vers 1000 Å (11). L'aberration d'astigmatisme assez importante qui entache le réseau concave, sera étudié par la suite.

Le générateur Haute Tension construit au laboratoire utilisé pour charger le condensateur, comporte un transformateur pouvant fournir 25 KV en alternatif qui est ensuite redressé par deux kénotrons ; un autotransformateur a rapport variable monté dans le circuit primaire du transformateur permet de faire varier la Haute Tension appliquée au condensateur. Ce générateur sert aussi à alimenter les étincelles glissantes d'amorçage entre l'anode auxiliaire et la cathode grâce à un condensateur de $0,03 \mu\text{F}$ dont la décharge est

contrôlé par un éclateur tournant ; le rythme des étincelles étant réglé par la vitesse de rotation de cet éclateur.

ETUDE ENTREPRISE AVEC CETTE SOURCE

Les premiers travaux effectués sur cette source (12) avaient permis de localiser la région d'émission du spectre continu à proximité de l'anode, ainsi que les conditions électriques imposées au circuit de décharge pour qu'il y ait émission de ce spectre ; de plus, les auteurs avaient montré que le métal de l'anode joue un rôle important sur l'allure et l'intensité du spectre continu. Nous avons cherché à examiner ces problèmes de façon plus précise tout en poursuivant un double but :

1) Pratique : La recherche des meilleures conditions de fonctionnement de la source et d'utilisation du rayonnement émis.

2) Théorique : L'apport d'informations utiles à l'interprétation du mécanisme d'émission.

Les résultats obtenus au cours de cette étude sont présentés dans l'ordre suivant :

- Détermination de la région de l'étincelle qui émet le spectre continu.
- Essai d'utilisation d'une anode double.
- Influence du métal anodique
- Etude des caractéristiques électriques du circuit de décharge du condensateur.

Etude de la répartition de l'émission lumineuse

Au cours des premières observations effectuées sur cette source (13) la région de l'étincelle qui émet le spectre continu a été localisée en utilisant une méthode de diaphragmation faisant appel à une fente horizontale pratiquée dans un écran interposé entre l'étincelle et la fente du spectrographe. Par ce procédé, le spectre obtenu est celui de la portion de l'étincelle qui éclaire le réseau à travers la fente de l'écran. En déplaçant verticalement celui-ci, on obtient le spectre de chaque région de l'étincelle. Les résultats obtenus par cette méthode étant assez grossiers, nous avons cherché un autre procédé permettant plus de précision, mais l'utilisation simple du spectrographe où l'étincelle est produite à 35 millimètres environ de la fente, de même que la formation d'une image de la source sur cette fente, ne permettent pas de localiser sur le spectre la région de la source qui émet un spectre continu, car l'appareil, équipé d'un réseau concave est, par là même entaché d'une importante aberration d'astigmatisme. Il n'y a donc pas focalisation verticale sur le film et un point de l'image de la source sur la fente aura comme image dans le spectre une petite droite de hauteur Z donnée par la formule classique (14)

$$Z = (\sin^2 \beta + \sin \alpha \tan \alpha \cos \beta) l = Kl$$

dans laquelle α et β sont les angles d'incidence et de réflexion, et l la hauteur des traits du réseau.

L'angle d'incidence α étant de 10° , cette aberration d'astigmatisme a une valeur minimum de 2,4 millimètres pour la tache centrale et augmente ensuite en fonction de la longueur d'onde, en prenant les valeurs suivantes dans la région spectrale qui nous intéresse :

λ (Å)	Z (millimètres)
500	3,4
1.000	4,6
1.400	5,8
2.000	8

Pour obtenir à la fois focalisation horizontale de la fente et verticale de l'étincelle sur le spectre, il faut placer la source sur la focale sagittale objet du réseau dont la position est donnée par la formule

$$O S = \Delta = R (\cos \alpha - \sin \beta \operatorname{tg} \beta)^{-1}$$

donc, puisque l'on a :

$$O F = r = R \cos \alpha$$

elle est située à une distance F S de la fente égale à : (figure 2)

$$F S = \Delta - r = R [(\cos \alpha - \sin \beta \operatorname{tg} \beta)^{-1} - \cos \alpha]$$

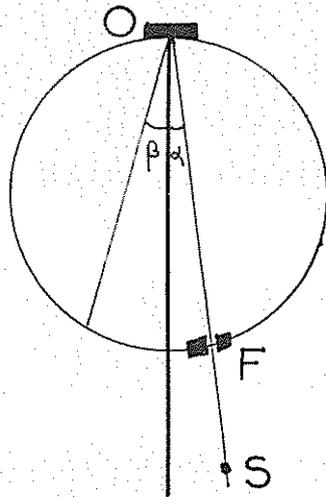


Figure 2

Cette position étant liée à la longueur d'onde par l'angle β , pour chaque valeur de F S, il y a focalisation

pour une seule valeur de λ . Cette distance F S est de 61 millimètres pour la tache centrale et croit ensuite lorsque la longueur d'onde augmente; nous pouvons calculer les valeurs suivantes :

λ (Å)	s-r (millimètres)
Tache centrale	61
500	90
1.000	131
1.400	175
2.000	269

Pour réaliser expérimentalement cette double focalisation correspondant à une longueur d'onde donnée, il eut été possible de placer l'étincelle au point S ainsi défini, cependant il est plus pratique de former en S l'image de l'étincelle au moyen d'un miroir concave auxiliaire. Cette disposition présente deux avantages : tout d'abord on peut utiliser un grandissement supérieur à un pour l'image de l'étincelle et augmenter ainsi la précision des observations. De plus, ce système nous permet de disposer dans le plan S (plan perpendiculaire en S à l'axe passant par le centre du réseau et de la fente) un fil horizontal dont l'ombre apparaît dans le spectre et qui joue un double rôle :

a) servir de repère de position pour l'image de l'électrode dans ce plan.

b) préciser dans le spectre la région focalisée.

L'observation des spectres montre que la netteté de l'image du fil est suffisante sur une plage de 50 Å environ de part et d'autre de la longueur d'onde choisie.

Le dispositif expérimental utilisé pour cette étude, représenté schématiquement sur la figure 3 se compose donc des éléments suivants :

... ..
... ..
... ..
... ..

... ..

... ..

L'étincelle produite au point E dans une chambre auxiliaire placée en avant de la fente du spectrographe est focalisée de façon à peu près stigmatique sur la focale sagittale objet S du réseau par le miroir sphérique concave M

La fente F de l'appareil reçoit donc les rayons provenant de S tout comme si l'étincelle y était elle-même. Le trajet des rayons lumineux devant être maintenu sous vide, les divers éléments de ce montage (étincelle et miroir) sont placés dans une seule enceinte, elle-même reliée à l'ouverture frontale de la chambre à étincelles du spectrographe par le conduit tubulaire B.

Avec ce dispositif il est intéressant de maintenir constante la distance entre l'étincelle et le miroir lorsque l'on fait varier la longueur d'onde focalisée afin d'éviter la variation du grandissement optique du miroir.

La distance entre le miroir et l'image de la source restant fixe, il suffit pour faire varier la région spectrale étudiée de déplacer l'ensemble source-miroir suivant l'axe de la fente du spectrographe en conservant à la distance $F S$ une valeur supérieure à $F S$ minimum pour laquelle S est la focale sagittale objet du réseau pour la tache centrale. Pour réaliser cette variation, nous avons intercalé des brides d'épaisseur diverses entre l'orifice de la chambre à étincelles du spectrographe et l'extrémité du conduit B dans lequel nous avons matérialisé par un écran semi-transparent en papier calque le plan S défini ci-dessus.

Le réglage des divers éléments de l'appareil ainsi constitué comporte en premier lieu la vérification de l'alignement des éléments optiques du système. (Centres du miroir et du réseau, fente du spectrographe et réticule matérialisant la focale sagittale objet du réseau dans le plan S.) Pour procéder à cette vérification, nous avons envoyé un faisceau lumineux sur la fente du spectrographe par une fenêtre placée derrière le centre du miroir M. L'observation directe de la

tache formée par ce faisceau au centre du réseau vérifie le centrage du système. Ceci devant être effectué avant que le miroir soit recouvert par un dépôt métallique provenant des particules arrachées à l'anode au cours des étincelles, et refait à chaque fois que l'on modifie le réglage de l'appareil.

Nous devons aussi contrôler la formation de l'image de l'étincelle au point S et régler sa position dans ce plan en fonction de la région dont on veut étudier le spectre. Ne pouvant vérifier la focalisation de l'étincelle elle-même à cause de sa trop brève durée, nous contrôlons celle de l'image de l'électrode sur l'écran de papier calque situé dans le plan S. Ce contrôle s'effectue par le trou de visée D en utilisant le miroir auxiliaire N, l'électrode étant éclairée par une petite ampoule électrique placée dans la chambre à étincelles. Les divers accessoires de ce réglage : petite ampoule, écran de papier calque et miroir N sont escamotés par des commandes extérieures lorsque l'on effectue les poses. De même, le miroir et la position en hauteur de l'électrode sont réglables de l'extérieur, ce qui permet de faire varier la région étudiée de l'étincelle sans faire de rentrée d'air dans l'enceinte.

Avant de présenter le travail effectué avec ce montage, nous allons parler du grandissement des systèmes optiques dont il faut tenir compte pour l'interprétation des spectres obtenus. Ainsi, soit G_1 celui du miroir et G_2 celui du réseau, il faudra diviser par G_1 toute distance mesurée sur l'écran placé en S et par le produit $G_1 G_2$ toute distance verticale lue sur le spectre pour avoir leurs valeurs correspondantes sur l'électrode. Mais si G_1 est constant dans le dispositif adopté

$$G_1 = \frac{MS}{ME} = \frac{550}{210} \approx 2,6$$

Il n'en est pas de même pour G_2

$$G_2 = \frac{OP}{-OS} = \frac{R \cos \beta}{R (\cos \alpha - \sin \beta \tan \alpha)^{-1}}$$

P étant la position de la région spectrale focalisée sur le spectre, nous voyons que lorsque celle-ci varie, OP et OS

varient, et il faut donc calculer G_2 pour chaque valeur de la longueur d'onde. Nous pouvons relever une valeur pour G_2 : 0,81 à 1400 Å. car la majeure partie des mesures ont été effectuées à cette longueur d'onde.

Une vérification expérimentale de ces valeurs a été faite pour G_1 en mesurant sur l'écran la largeur de l'image de l'électrode et en la comparant au diamètre de celle-ci, et pour G_2 en plaçant dans le plan S un réticule composé de deux fils horizontaux d'écartement connu ; la mesure de l'écartement de leurs images sur le film permet de calculer la valeur de G_2 .

Le travail effectué se divise en deux parties : au cours de la première, la source utilisée verticalement, donc avec l'anode parallèle aux traits du réseau nous a fourni la répartition longitudinale de l'émission du spectre continu dans l'étincelle. Ensuite, l'utilisation horizontale de cette source a permis de localiser radialement cette émission. Dans les deux cas, nous avons fait varier la longueur d'onde focalisée dans le spectre ainsi que certaines conditions électriques en utilisant diverses anodes (Tungstène, Platine, Uranium, Or, Argent, Cuivre, etc...)

Nous allons d'abord présenter les résultats obtenus pour l'une d'entre elle, le Tungstène, et ensuite étudier les différences enregistrées avec les autres métaux. Le tungstène a été choisi comme référence, en raison de certains avantages qu'il présente :

- Faible usure de l'électrode au cours des étincelles, donc moindre variation du réglage entre le début et la fin de la pose.

- Bon pouvoir réflecteur de la couche métallique déposée sur le miroir par les étincelles, donc possibilité d'éviter les poses trop longues entraînant des variations de réglage importantes.

- Spectre continu assez intense.

I - Etude du spectre fourni par une anode de Tungstène

Dans une première phase, l'anode étant parallèle aux traits du réseau, nous avons déterminé la nature du spectre en fonction de la position axiale de sa région d'émission et en particulier nous avons séparé deux zones :

- Le long de l'anode
- Entre l'anode et la cathode

Les résultats obtenus vers 1.400 Å. pour une tension de 20 KV appliquée au condensateur sont présentés sur la figure 4 sur laquelle sont disposés à côté de chaque spectre, la position de l'électrode par rapport au fil repère ainsi que l'échelle des distances sur l'axe de celle-ci ; nous pouvons les résumer brièvement de la façon suivante :

1) L'extrémité de l'anode étant tangente au fil repère (spectre 1), l'image de ce dernier sépare le spectre en deux :

- Dans la partie supérieure où l'émission est produite entre les électrodes, nous observons d'abord un spectre continu très intense s'étendant sur environ un millimètre à partir de l'anode, puis un spectre de raies, la séparation entre les deux étant assez nette.

- En dessous, le fond continu pratiquement dépourvu de raies que nous observons au niveau de l'anode s'étend jusqu'à la limite du spectre.

2) En déplaçant l'image de l'anode devant le fil repère (spectres 2 et 3), nous constatons que le spectre continu émis le long de l'anode, conserve sensiblement la même intensité jusqu'à trois millimètres environ de l'extrémité ; ensuite, l'intensité du spectre continu décroît en même temps que commencent à apparaître des raies. Il est à noter que, contrairement à ce qui se passe au delà de l'extrémité de l'anode, il n'y a pas le long de celle-ci de séparation nette, mais au contraire superposition des raies et du fond continu avec extinction progressive de ce dernier. Cette superposition s'étend sur environ quatre millimètres, la limite étant peu

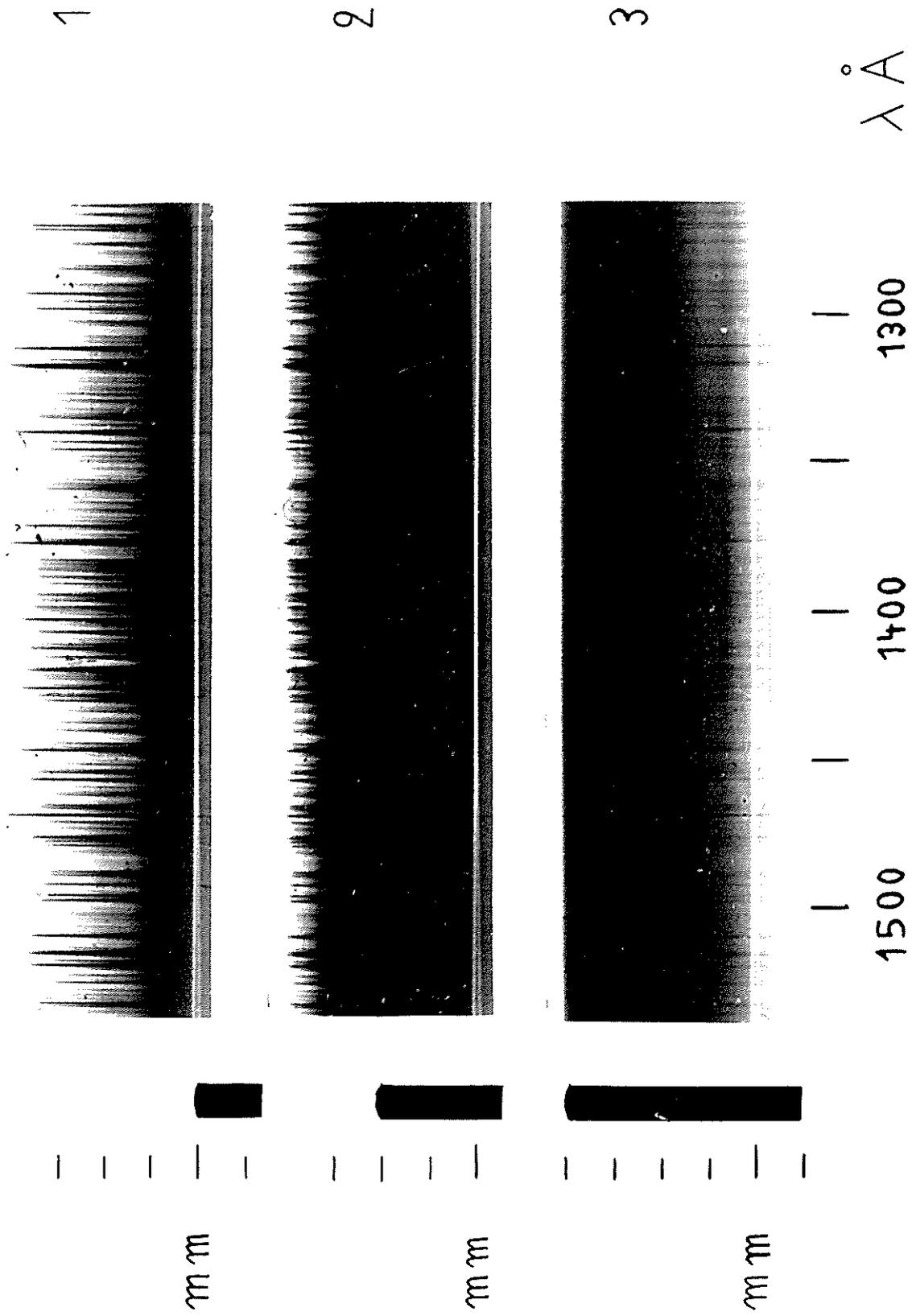


FIGURE 4

précise, soit entre trois et sept millimètres à partir de l'extrémité de l'anode.

L'émission d'un spectre continu par la région située immédiatement au delà de l'extrémité de l'anode permet de penser que le long de celle-ci, il peut être émis par une gaine de vapeur. Dans le but de confirmer cette hypothèse, nous avons étudié la répartition radiale du spectre obtenu au niveau de l'anode ; celle-ci étant horizontale. Afin de localiser la région observée sur l'électrode, nous avons disposé en S un diaphragme percé d'une fente verticale de quelques millimètres de large, définissant ainsi la portion étudiée de l'électrode. Au cours de cet essai, l'image de l'anode de Tungstène dans le plan S était tangente par un côté au fil repère et nous l'avons déplacé parallèlement à elle-même le long de ce fil pour observer l'émission produite en différents endroits.

Pour l'interprétation des résultats, nous devons distinguer verticalement dans les spectres trois régions ; au centre celle où l'émission est produite en avant de l'électrode par rapport à la direction d'observation et de chaque côté une zone où l'émission est produite sur le côté de l'électrode par rapport à la même direction. Sur la figure 5 ces trois régions sont représentées auprès de l'électrode.

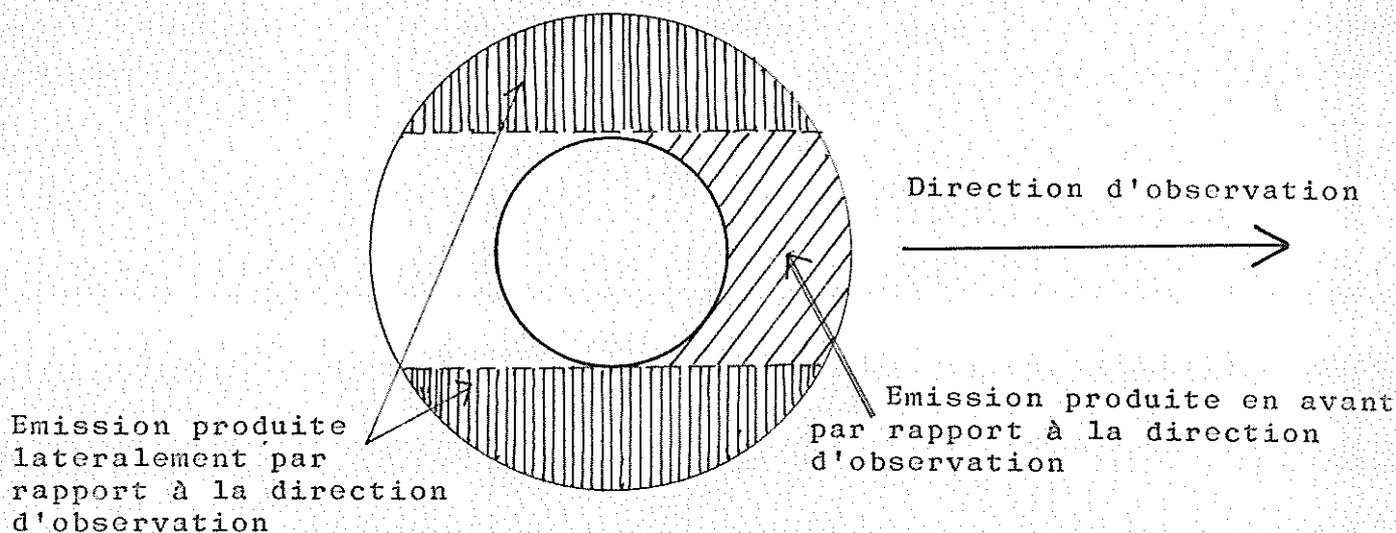


Figure 5

Les résultats obtenus, présentés sur la figure 6, sur laquelle la position de l'anode derrière le diaphragme, représentée par rapport au spectre ainsi que l'échelle sont disposés à côté de chaque spectre, sont les suivants :

1) Dans la région comprise entre les électrodes (spectre 1), nous observons un spectre de raies sur lequel se superpose un spectre continu dans le prolongement de l'anode et dans les environs immédiats de celle-ci. Ce spectre continu correspond à celui observé précédemment sous l'anode verticale, les raies étant émises plus loin entre les électrodes.

2) Le long de l'anode, à proximité de son extrémité (spectres 3 et 4) l'image du fil repère sépare le spectre en deux :

- En dessous dans la partie qui correspond à l'émission sur le côté de l'électrode, nous observons un spectre continu de 1,5 millimètre environ de large, puis des raies, leur séparation étant assez nette.

- Au dessus, la largeur du spectre continu avant que l'on rencontre les raies, est de 3,5 millimètres environ, elle comprend à partir de l'image du fil, une zone de deux millimètres, dans laquelle le spectre est émis en avant de l'électrode par rapport à la direction d'observation, puis ^{le} symétrique par rapport à l'axe de l'anode du spectre observé en dessous de l'image du fil.

3) Une position intermédiaire entre les précédentes (spectre 2), l'électrode ayant son extrémité au milieu de l'ouverture du diaphragme, présente un spectre continu superposé aux raies plus large que sur le spectre 1 ; dans ce cas, on recueille à la fois les raies émises entre les électrodes et le début du spectre continu émis autour de l'anode.

4) Dans la région comprise entre 3 et 7 millimètres de l'extrémité de l'anode, le long de celle-ci (spectre 5), nous observons un spectre de raies, superposé à un fond continu assez faible sur toute la largeur du spectre.

Ces résultats sont en accord avec les précédents et confirment l'hypothèse déjà avancée selon laquelle l'émission du spectre continu est due à une gaine de vapeur enveloppant l'extrémité de l'anode ; la largeur de cette gaine atteignant

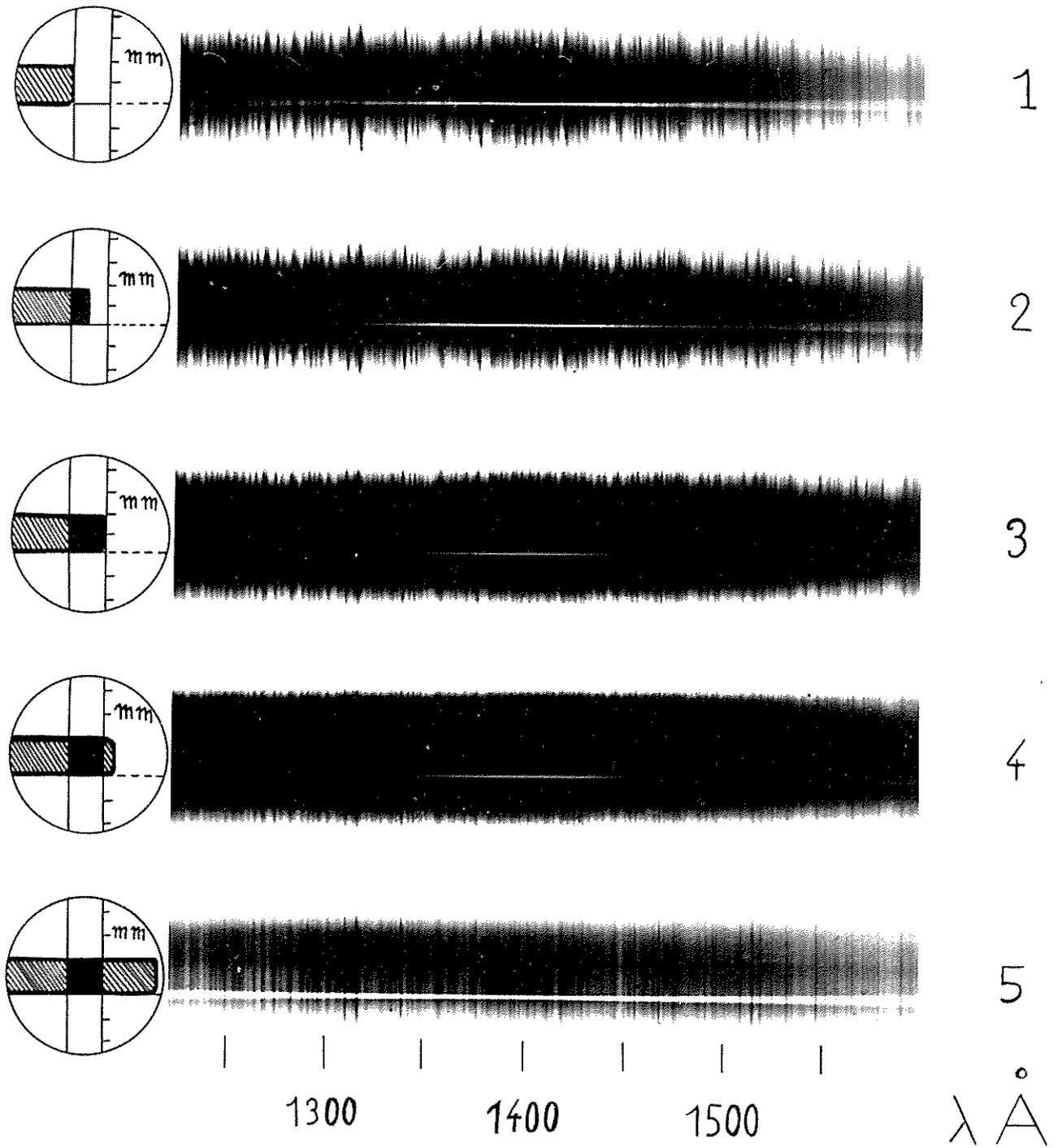


FIGURE 6

au maximum 1,5 millimètre d'épaisseur. La même étude a été effectuée à des longueurs d'onde différentes situées entre 1000 et 1600 Å, et nous n'avons pas remarqué de modifications notables de l'étendue de cette gaine. Il en est de même lorsque l'on fait varier la tension appliquée au condensateur, du moins lorsque l'on reste entre les limites de 18 à 25 Kilovolts, qui sont, d'une part la tension minimum nécessaire pour obtenir un spectre continu suffisamment intense pour être étudié par cette méthode, et d'autre part, la tension maximum applicable au condensateur. Par contre, nous avons noté, des différences très importantes en fonction de la nature du métal de l'anode, et nous allons maintenant comparer les résultats obtenus pour un certain nombre de métaux.

II - Comparaison des gaines de plasma entourant les différentes anodes utilisées :

Toutes les anodes ont été successivement placées verticalement, puis horizontalement afin de délimiter la région d'émission du spectre continu, aussi bien en dessous de l'anode que sur le côté.

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 7, 8 et 9, sur lesquelles nous avons regroupé, afin de les comparer, les spectres des différentes électrodes, placées dans les mêmes conditions par rapport au fil repère situé dans le plan S ; la position de l'électrode est indiquée à côté de l'un des spectres, ainsi que l'échelle. Les figures 7 et 8 représentent les spectres obtenus avec les électrodes verticales, pour les deux positions suivantes :

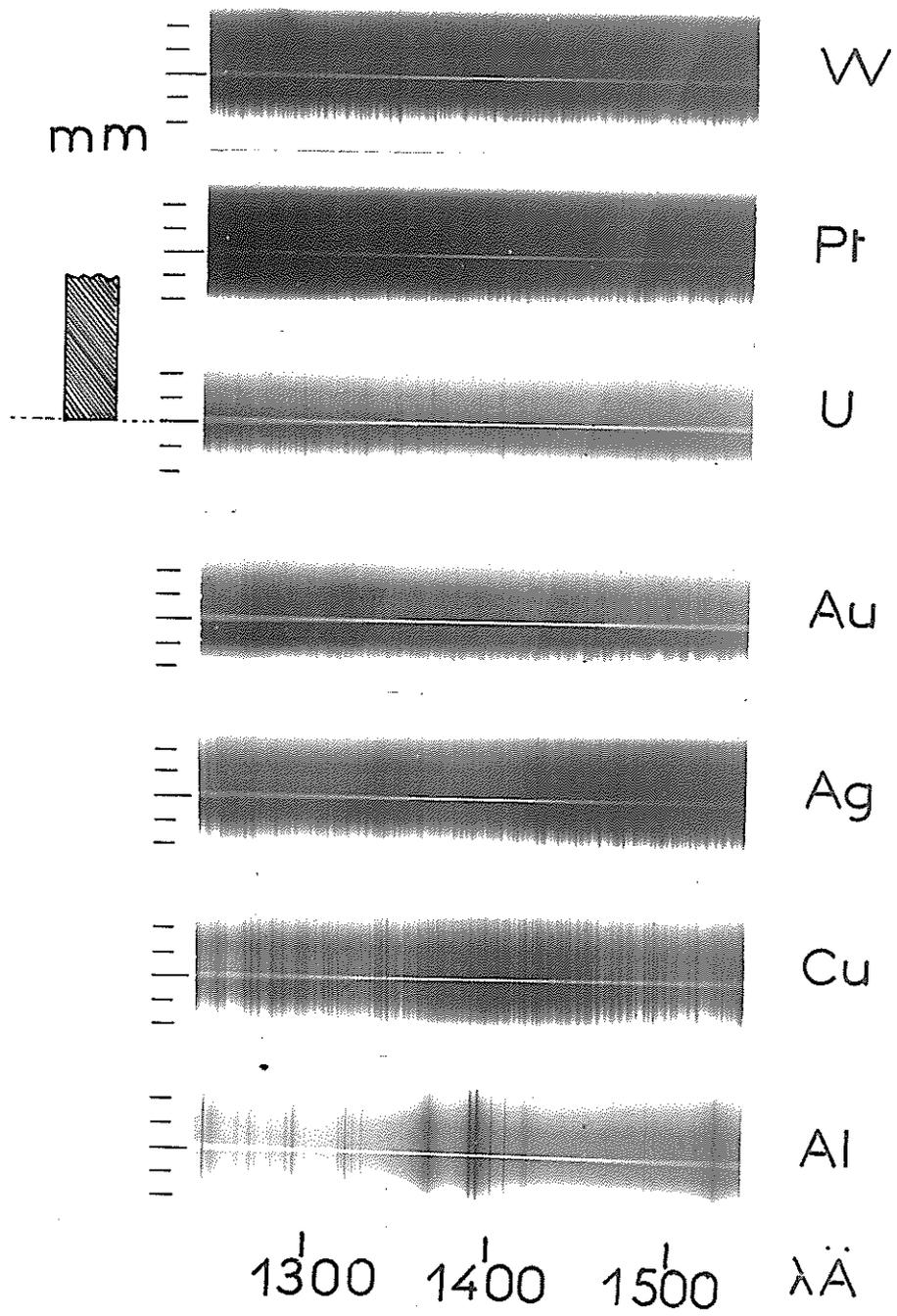


FIGURE 7

- Extrémité tangente au fil repère sur la figure 7
- Extrémité à trois millimètres de ce fil sur la figure 8.

La figure 9 correspond aux électrodes utilisées horizontalement.

Il est à noter que nous ne devons pas tenir compte des intensités relatives des différents spectres sur ces figures, car d'une part, le temps de pose n'est pas égal pour tous, par exemple, l'aluminium nécessite un temps de pose plus long, et d'autre part, le miroir étant recouvert par une couche de particules métalliques arrachées à l'anode au cours des étincelles, son pouvoir réflecteur dépend largement du métal utilisé.

Nous allons maintenant, à l'aide de ces figures, comparer les gaines de plasma qui entourent les diverses anodes.

- Le platine et l'or sont entourés par des gaines ayant à peu près les mêmes dimensions que celle du Tungstène, mais les spectres de ces éléments présentent de nombreuses raies d'absorption dans la région où est émis le spectre continu, ces mêmes raies étant visibles en émission en dehors de cette région; ce phénomène étant difficile à voir sur les reproductions. Par contre, nous y trouvons moins de raies d'émission que pour le tungstène.

- L'uranium présente une gaine un peu plus réduite, son épaisseur autour et en dessous de l'anode est à peine d'un millimètre et elle s'étend sur deux ou trois millimètres à partir de l'extrémité. La faible intensité de ce spectre par rapport à ses voisins, sur les figures 7, 8 et 9, est due au mauvais pouvoir réflecteur du dépôt métallique qui se forme sur le miroir.

- Avec l'argent et le cuivre, les résultats ne sont pas nets, et les limites sont très difficiles à définir, car nous rencontrons partout un spectre de raies superposé au spectre

continu et ce dernier est peu intense surtout dans le cas du cuivre. La gaine de plasma dans laquelle est émis le spectre continu a une épaisseur à peine égale à un millimètre et elle s'étend jusqu'à un ou deux millimètres du bout de l'anode le long de celle-ci.

- Avec une électrode d'aluminium, le très faible fond continu que l'on peut observer est émis juste à l'extrémité de l'anode.

- L'Iridium et le fer, non représentés sur les figures, présentent des résultats comparables respectivement au platine et au cuivre, avec des raies d'absorption dans le cas de l'Iridium.

Nous avons limité notre étude à ces métaux car, d'une part ils représentent assez bien les différentes sortes de spectres continus que nous pouvons obtenir avec cette source en couvrant à peu près toute la gamme de classification des éléments et d'autre part ce sont ceux que nous pouvons le plus facilement obtenir sous forme de cylindre de deux millimètres de diamètre, taille des électrodes employées ici. En outre certains métaux tels que le plomb et l'étain se prêtent mal à cette étude à cause de leur mauvaise conductibilité électrique et thermique et de leur point de fusion trop bas.

De ces résultats, nous pouvons conclure que l'émission d'un spectre continu est produite dans la gaine de plasma épaisse environ de 1,5 millimètre, qui entoure l'extrémité de l'anode ; ceci étant valable pour les métaux de numéro atomique assez élevé, tels que le Tungstène, l'or, le platine l'Iridium et l'uranium, pour ne citer que ceux que nous avons utilisés ; ce sont d'ailleurs ces métaux lourds, riches en électrons, qui émettent un spectre continu assez intense. Cette gaine de vapeur dont le volume est sensiblement le même pour ces divers métaux est constituée par des particules métalliques arrachées à l'anode au cours des étincelles par le passage du courant. Les témoignages de ce phénomène étant l'amincissement de l'extrémité de l'anode et la diminution de sa longueur, ainsi que la métallisation des parois de la chambre à étincelles par une fine couche du métal de l'anode. Les propriétés électriques de ces particules ne sont pas encore déterminées.

Nous pouvons remarquer, par ailleurs, sur la figure 8, que pour ces éléments, le spectre continu situé en dessous du fil repère, donc dans la partie où l'émission est produite sur le côté de l'électrode par rapport à la direction d'observation, est plus intense que dans la région où l'émission est produite en avant de l'électrode dans la même direction ; ceci nous permet de penser que dans le plasma, il n'y a pas, ou seulement très peu de réabsorption à part les raies de certains métaux que nous voyons en absorption sur les spectres dans ces figures. Avec des matériaux de numéro atomique plus faible, tels que le cuivre et l'aluminium, nous n'avons pas observé de phénomènes très nets, car la présence de raies sur toute la largeur du spectre ne permet pas de déterminer avec précision les limites de la région d'émission du continu dont l'intensité est assez faible.

On remarquera l'analogie entre ces résultats et les photographies de l'électrode, prises antérieurement en rayons X (13), sur lesquelles l'extrémité de l'anode apparaît plus large qu'elle ne l'est en réalité. D'autre part, des photographies en lumière visible de l'étincelle montrent l'électrode entourée par une gaine lumineuse très intense ; c'est donc dans cette gaine que le spectre continu est émis dans l'ultraviolet lointain, comme il est émis dans l'ultraviolet proche et le visible (13').

B - ETUDE DU SPECTRE EMIS PAR UNE ANODE DOUBLE

Nous avons utilisé le dispositif de focalisation décrit précédemment pour étudier la région d'émission du spectre continu dans l'étincelle lorsque l'on remplace l'anode unique de deux millimètres de diamètre par deux anodes parallèles de même diamètre et dont la disposition est représentée sur la figure 10

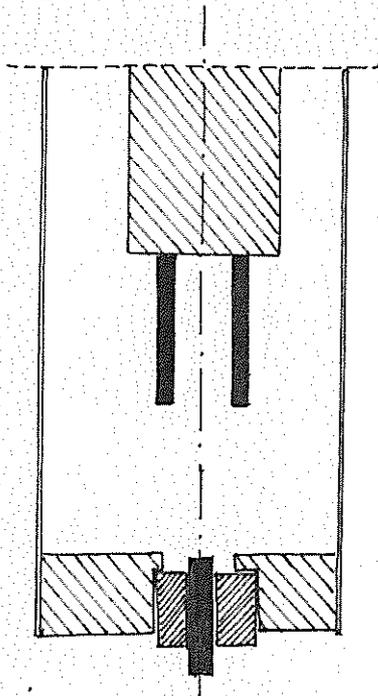


Figure 10

Nous avons effectué cette étude dans le but de rechercher si la région située entre les électrodes émet un spectre continu et éventuellement si ce spectre est plus intense que celui fourni par une seule anode ; ce que l'on peut envisager en raison de l'augmentation possible de la densité du plasma dans cette région. Nous avons aussi cherché à savoir s'il y avait un effet d'interaction entre les spectres des deux électrodes lorsque celles-ci ne sont pas constituées par le même métal, aussi les trois cas suivants ont été étudiés :

- Deux électrodes identiques
- Deux électrodes différentes constituées par deux métaux fournissant chacun un spectre continu assez intense (or et tungstène)
- Deux électrodes différentes, l'un des métaux fournissant un spectre continu intense (Platine) et l'autre très faible (Aluminium).

Nous allons maintenant étudier successivement les résultats obtenus dans chacun de ces cas :

Handwriting practice



Handwriting practice

Handwriting practice

1) Cas de deux électrodes identiques :

Nous avons pratiqué cet essai avec deux anodes d'or, ce métal assez mou permettant de faire varier facilement l'écartement qui joue un rôle important dans la répartition spatiale de l'émission du spectre continu. Nous n'avons pas noté d'augmentation de l'intensité de ce dernier par rapport à celle enregistrée avec une électrode unique, mais plutôt une diminution lorsque les électrodes sont assez éloignées l'une de l'autre et nous allons examiner maintenant la variation de la région d'émission du spectre continu en fonction de l'écartement de celles-ci. Les résultats sont représentés schématiquement sur la figure 11 et nous allons les résumer ci-dessous :

a) Ecartement inférieur ou égal à 1 millimètre

Tout se passe comme dans le cas d'une anode unique de diamètre égal à 5 millimètres avec toutefois une intensité légèrement plus forte entre les électrodes.

b) Ecartement égal à deux millimètres

Entre les électrodes l'émission est plus intense qu'en avant de celles-ci tandis que, à l'extérieur, la région d'émission se rétrécit ; elle n'est plus que de 0,5 à 0,7 millimètres alors qu'elle est de 1,5 millimètre pour une seule anode et nous y voyons apparaître quelques raies d'émission.

c) Ecartement égal à trois millimètres

A l'extérieur, le spectre continu devient très faible et contient de nombreuses raies, tandis qu'à l'intérieur nous pouvons noter trois zones d'émission de continu intenses, larges chacune d'un demi millimètre et séparées par un spectre continu plus faible sur lequel apparaissent quelques raies ; ces trois zones sont localisées sur les anodes, du côté où elles se font face et au milieu de l'espace qui les sépare.

d) Ecartement égal ou supérieur à quatre millimètres

Le spectre continu intense se localise le long des anodes du côté où elles se font face, tandis qu'en avant de celles-ci, il est plus faible et superposé à des raies ; à l'extérieur, il n'y a pratiquement plus qu'un spectre de raies.

Nous pouvons conclure de ceci que lorsque l'écartement est faible, la gaine qui entoure l'ensemble est la réunion de celles des deux anodes, tout se passe donc comme si chaque anode était entourée par sa propre gaine de plasma épaisse environ de 1 à 1,5 millimètre avec à l'endroit où celles-ci se superposent émission d'un spectre continu plus intense. Toutefois, l'intensité du spectre émis par chaque anode est plus faible que si celle-ci était seule, ce qui peut s'expliquer par le fait que le plasma formé autour de chaque anode est moins dense, car la même énergie se partage entre elles au lieu de se dissiper dans une seule. Lorsque l'écartement est plus grand, la gaine de plasma qui entoure les anodes se rétrécit, puis disparaît à l'extérieur pour se localiser entre les anodes. Cette localisation est confirmée par un essai au cours duquel nous avons utilisé le dispositif de focalisation avec deux électrodes d'or séparées de trois millimètres et placées verticalement, dans ce cas, il n'y a plus émission de spectre continu au delà de l'extrémité des anodes comme cela se produit lorsqu'il n'y en a qu'une seule. D'autre part, il faut rapprocher de ce résultat, la forme de l'usure des anodes, en effet, celles-ci au lieu de s'user normalement par réduction de leur longueur et affinement des extrémités se creusent sur environ cinq millimètres près de leurs extrémités, du côté où elles se font face, alors que leur longueur diminue très peu. Nous pouvons tenter d'expliquer ce phénomène par le fait que les anodes étant excentrées par rapport à la cathode, les lignes de courant dans l'étincelle suivent l'axe de la cathode et frappent les anodes le plus près possible de cet axe, c'est à dire du côté où elles sont face à face ; le plasma se forme donc surtout dans cette région. Nous avons obtenu des résultats comparables avec deux anodes de tungstène.

2) Cas de deux électrodes différentes fournissant chacune un spectre continu intense :

C'est le cas notamment de l'or et du tungstène et avec ces deux anodes, distantes environ de deux millimètres, nous avons obtenu les résultats suivants, que nous avons représenté

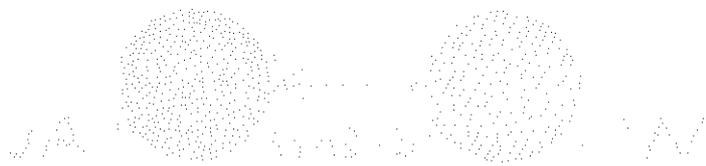


FIGURE 13

schématiquement sur la figure 12 : l'intensité du spectre continu n'est pas constante et nous observons successivement en se déplaçant de l'électrode de tungstène à celle d'or, entre celles-ci : d'abord une zone très intense de largeur inférieure à un demi millimètre, puis une zone plus faible, large également d'un demi millimètre, puis à nouveau une zone intense dont la largeur est un peu supérieure à un millimètre. Nous avons le même genre de phénomène que dans le cas des deux anodes identiques avec creusement de leurs extrémités du côté où elles se font face, mais la zone d'émission du spectre continu est plus développée près de l'électrode d'or que de celle de tungstène. Le résultat peut s'expliquer par le fait que l'or étant meilleur conducteur électrique que le tungstène, une plus grande partie du courant électrique passe par l'électrode d'or au cours de la décharge du condensateur ; le plasma entourant cette électrode étant ainsi plus dense et plus étendu que celui formé autour du tungstène.

Nous pouvons aussi noter que certaines raies de l'or sont visibles en absorption sur le spectre continu émis au voisinage de l'électrode de tungstène ; ce phénomène d'interaction d'un spectre sur l'autre sera étudié dans le cas du platine et de l'aluminium, car il est plus net.

3) Cas de deux électrodes fournissant des spectres continus très différents les uns des autres :

Nous avons étudié ce cas en utilisant le platine, dont le spectre continu est intense, et l'aluminium pour lequel il est au contraire très faible ; les résultats obtenus peuvent se résumer de la façon suivante : autour de l'électrode d'aluminium nous observons uniquement un spectre de raies tandis que le spectre continu émis par le platine est sensiblement identique à celui qui est obtenu avec cette électrode seule, c'est à dire une gaine de plasma émettrice épaisse de 1,5 millimètre et les raies d'absorption de platine en avant de l'anode. Donc, la présence de l'électrode d'aluminium à côté de celle de platine ne semble pas modifier beaucoup le spectre émis par cette

dernière, les seules perturbations enregistrées étant la présence en émission, sur l'ensemble du spectre, de certaines raies intenses de l'aluminium ionisé ; ce sont les raies 1379, 67 Å, 1384, 14 Å, 1605, 77 Å et 1611, 84 Å de Al III. Nous observons aussi, dans l'espace compris entre les électrodes, près de l'anode de platine, plusieurs raies de l'aluminium en absorption ; ces raies appartenant au spectre de Al IV et correspondant à des transitions entre états excités (les raies de la série principale seraient situées dans l'extrême ultraviolet) peuvent être dues soit à des ions de l'aluminium ayant quitté l'anode avec un niveau d'énergie assez faible et qui absorbent un photon, soit à des ions ayant perdu une partie de leur énergie d'excitation par émission au voisinage de l'anode d'aluminium et qui reviennent à un niveau plus élevé en atteignant le plasma du platine.

Donc, cette méthode qui consiste à utiliser une électrode double ne présente pas, en général d'avantages du point de vue pratique lorsque les deux électrodes sont constituées par le même métal car elle a tendance à provoquer un élargissement du volume du plasma, donc pour une même énergie disponible, à diminuer sa densité. De plus, la présence d'une deuxième anode complique le problème du point de vue théorique en supprimant la symétrie de révolution de l'étincelle ; cela supprime d'ailleurs toute symétrie lorsque l'on utilise deux métaux différents car la répartition des lignes de courant entre les deux anodes dépend des propriétés du métal de ces dernières.

Toutefois, l'utilisation simultanée d'une électrode d'aluminium avec une électrode constituée par un métal lourd, tel que le platine, peut présenter certains avantages :

1) Permettre l'étalonnage du spectre du métal lourd ; les raies de l'aluminium, peu nombreuses et facilement identifiables servant de repère. Avec ce procédé, il n'y a pas à craindre un éventuel déplacement latéral du chariot porte film qui peut se produire lorsque l'on fait deux spectres différents.

2) Du fait de la présence en absorption sur le spectre continu du platine de certaines raies de l'ion Al IV, nous

pouvons envisager une utilisation éventuelle de ce procédé pour l'étude des raies d'absorption des états excités de certains ions.

C) ETUDE COMPARATIVE DES SPECTRES CONTINUS EMIS PAR LES
DIFFERENTS METAUX UTILISES POUR CONSTITUER L'ANODE.

Depuis la mise au point de cette source, il a été constaté que l'intensité et la pureté du spectre continu étaient des fonctions du métal constituant l'anode. La conclusion générale étant la suivante : Les métaux "lourds" possédant un grand nombre d'électrons fournissent un spectre continu beaucoup plus intense que les métaux "légers" ; par ailleurs, la présence ou l'absence de raies sur le fond continu apparaît comme un phénomène plus complexe. La recherche des relations entre les propriétés du métal utilisé et le spectre obtenu présente un grand intérêt pour la détermination du mode d'émission car les différents mécanismes d'émission possibles font intervenir le métal de l'anode par des paramètres différents. Nous pouvons, en effet, envisager que le spectre continu observé est produit par l'un des mécanismes suivants :

1) Spectre continu dû aux rayons cathodiques ou spectre de rayons X.

D'après le principe même de l'étincelle produite, il est naturel de penser que les rayons cathodiques freinés en atteignant l'anode, vont émettre un spectre continu ; dans ce cas, c'est le numéro atomique du métal, ou son carré, qui interviennent selon que l'on considère que le freinage est opéré par une couche mince ou par une couche épaisse.

En effet, d'après FINKELNBURG (15) et KIEFFER (16) l'énergie prend les valeurs suivantes dans chaque cas :

a) Rayonnement émis par la traversée d'une couche mince :

Dans ce cas, l'énergie émise par unité de surface et par seconde dans tout l'espace et dans la bande spectrale $\nu, d\nu$ est donnée par l'expression suivante :

$$i_{\nu, d\nu} = \frac{32 \pi^2 Z^2 e^6}{3\sqrt{3} c^3 m^2 \nu_0} g N_c N_e \delta d\nu$$

formule dans laquelle on appelle :

δ : l'épaisseur de la couche de matière traversée par le faisceau

N_i : la densité particulaire de la couche

N_e : la densité électronique du faisceau

e , m et v_0 sont respectivement la charge, la masse et la vitesse initiale des électrons supposés mono cinétiques.

g est un facteur dont la valeur varie selon la région spectrale considérée ; égale à 1 aux environs de la fréquence limite de Duane et Hunt ν_0 , sa valeur augmente pour les basses fréquences, ainsi elle est voisine de 6 lorsque le rapport ν/ν_0 est de 10^{-4} .

b) Rayonnement émis par pénétration des rayons cathodiques dans la matière :

Soit d la profondeur de pénétration dans la matière, l'énergie émise, en admettant que l'émission totale est l'ensemble de l'émission produite par une infinité de couche mince, sera :

$$I_\nu d\nu = d\nu \int_0^d \epsilon_\nu dx$$

En utilisant une loi de freinage de la forme

$$\frac{dv}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z N_i l}{m^2 v^3}$$

où l est une grandeur qui, selon les auteurs, prend des valeurs différentes, nous obtenons pour l'intensité émise une valeur approximative calculée en supposant g et l constants

$$I_\nu d\nu = \frac{8\pi Z e^2 h N_e v_0}{.3\sqrt{3} c^3 m l(\nu_0)} (\nu_0 - \nu) d\nu$$

2) Spectre continu dû au freinage des électrons du plasma.

Dans le plasma formé par vaporisation d'une partie de l'extrémité de l'anode pendant l'étincelle, le phénomène de freinage et de recombinaison électronique est capable lui aussi de fournir un spectre continu, mais dans ce cas, le coefficient d'émission ξ_ν (énergie émise dans l'unité d'angle solide) donné par KIEFFER (16) est de la forme :

$$4\pi \xi_{\nu} = \frac{128 \pi^3 Z'^2 e^6}{3\sqrt{3} c^3 (2\pi m)^{3/2}} \frac{N_e N_i}{\sqrt{hT}} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

N_e représente ici la densité électronique totale du plasma.

D'après cette formule, nous voyons que c'est le degré d'ionisation Z' du plasma qui intervient, donc les métaux lourds plus faciles à porter à des degrés d'ionisation élevés que les métaux légers doivent nous fournir des spectres continus plus intenses. Mais l'application de cette formule se heurte à des difficultés, car nous rencontrons plusieurs sortes d'ions dans le plasma, ainsi que l'indique l'étude du spectre de raies superposé au spectre continu.

Il est à remarquer que la comparaison des résultats expérimentaux à ces formules se heurtera à des difficultés pratiques dues aux hypothèses de base choisies pour l'établissement de ces formules; par exemple l'existence d'un faisceau incident d'électrons monocinétiques dans la première hypothèse alors que ce n'est pas le cas, en général et plus particulièrement pour les étincelles. Dans le second cas, ainsi que nous venons de voir, la valeur de ξ_{ν} devrait être sommée sur toutes les catégories d'ions possibles en tenant compte des concentrations.

Remarquons, d'autre part, que les formules ci-dessus donnent les courbes d'intensité i_{ν} en fonction de la fréquence, or les comparaisons avec les mesures expérimentales concernent l'intensité en fonction de la longueur d'onde i_{λ} ; c'est à dire que l'on doit tenir compte de la relation

$$i_{\lambda} = \frac{c}{\lambda^2} i_{\nu}$$

toutefois, ceci n'intervient pas dans la recherche actuelle concernant l'intensité en fonction du métal de l'anode.

Dans le but de rechercher les relations liant l'intensité du spectre avec le métal et ne disposant pas, dans ce domaine spectral de source de référence d'intensité connue, nous avons tenté une étude portant sur l'intensité relative du spectre continu pour différents métaux. Nous avons vu précédemment que le spectre continu est émis dans la gaine de plasma qui

enveloppe l'extrémité de l'anode, or l'étendue de cette gaine étant variable selon le métal utilisé, lorsque nous comparons les spectres de différentes électrodes placées à 35 millimètres de la fente du spectrographe, nous ne pouvons pas dire que le rapport d'intensité des spectres, pour une certaine longueur d'onde, est égal au rapport des intensités totales émises par les sources pour la même longueur d'onde, car la fraction de plasma qui éclaire le réseau, à travers la fente, n'est pas la même, et de plus est mal connue. Si la différence est négligeable lorsque les plasmas entourant les anodes comparées ont à peu près la même étendue, par exemple dans le cas de l'or, du platine et du tungstène, il n'en est pas de même lorsque les plasmas sont très différents, notamment pour la comparaison Or, Argent et Cuivre. Nous ne pouvons donc pas parler du rapport d'intensité, mais seulement d'un ordre de grandeur de celui-ci.

Pour effectuer cette étude, nous avons enregistré sur le même film des spectres émis par divers métaux ; la graduation du film, nécessaire pour comparer les intensités, a été obtenue en faisant varier le temps de pose de l'un d'entre eux.

Ne pouvant enregistrer à la fois tous les métaux utilisés, faute de place sur le film, nous les avons partagés entre les deux séries suivantes :

1) Métaux ayant des numéros atomiques éloignés les uns des autres : Uranium, Or, Argent, Cuivre ; les trois derniers ayant la même structure électronique externe.

2) Métaux dont les numéros atomiques sont voisins : or, platine, tungstène, iridium, ces éléments faisant partie de la troisième série des métaux de transition, leur structure électronique ne diffère que par les couches extérieures.

Les résultats de cette étude sont présentés sur les figures 13 et 14, en portant les densités optiques des spectres sur le film, en fonction de λ

L'or qui figure dans chaque série est utilisé pour la graduation des films et les couches représentatives des différents temps de pose effectués avec cet élément vont nous

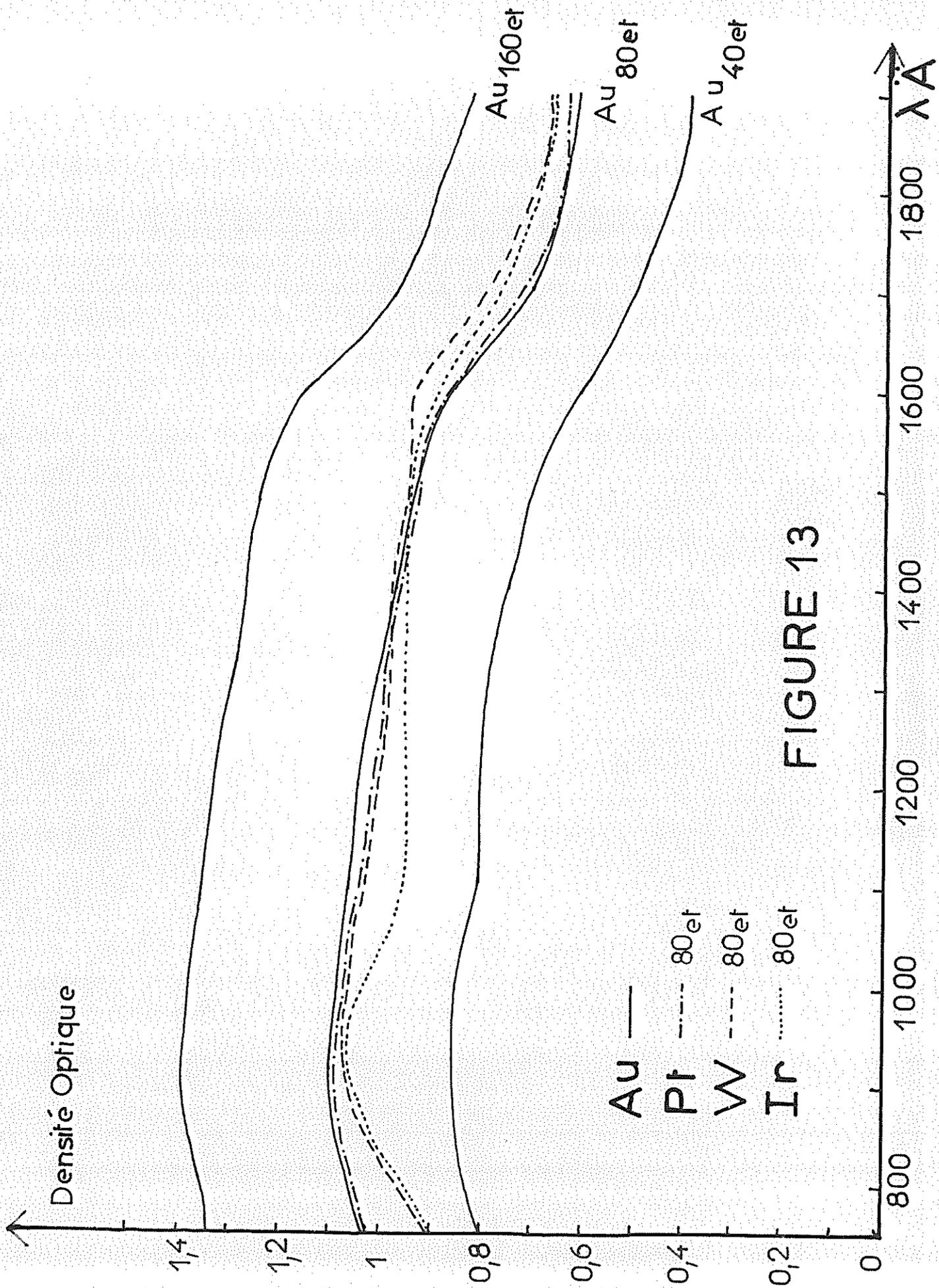


FIGURE 13

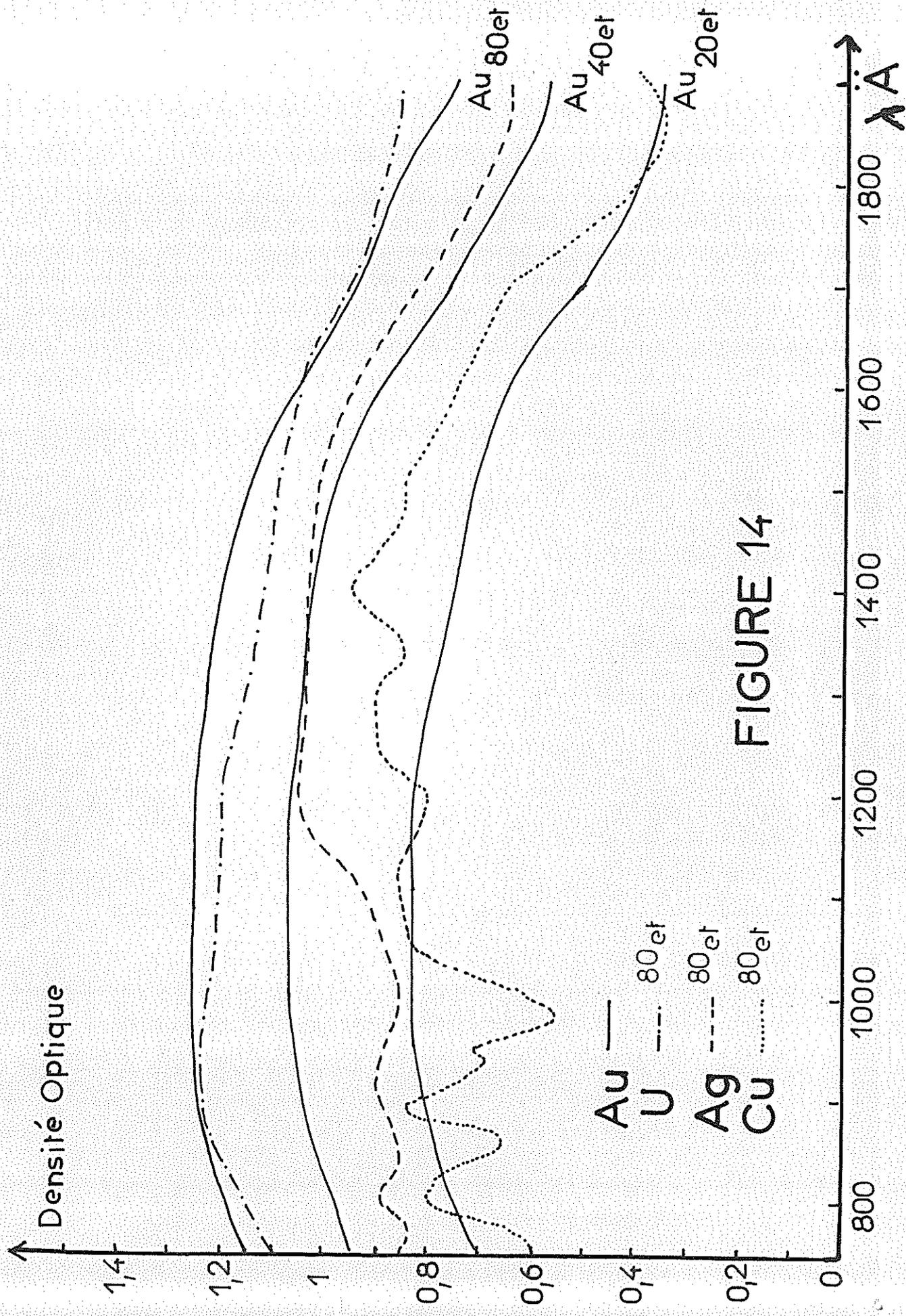


FIGURE 14

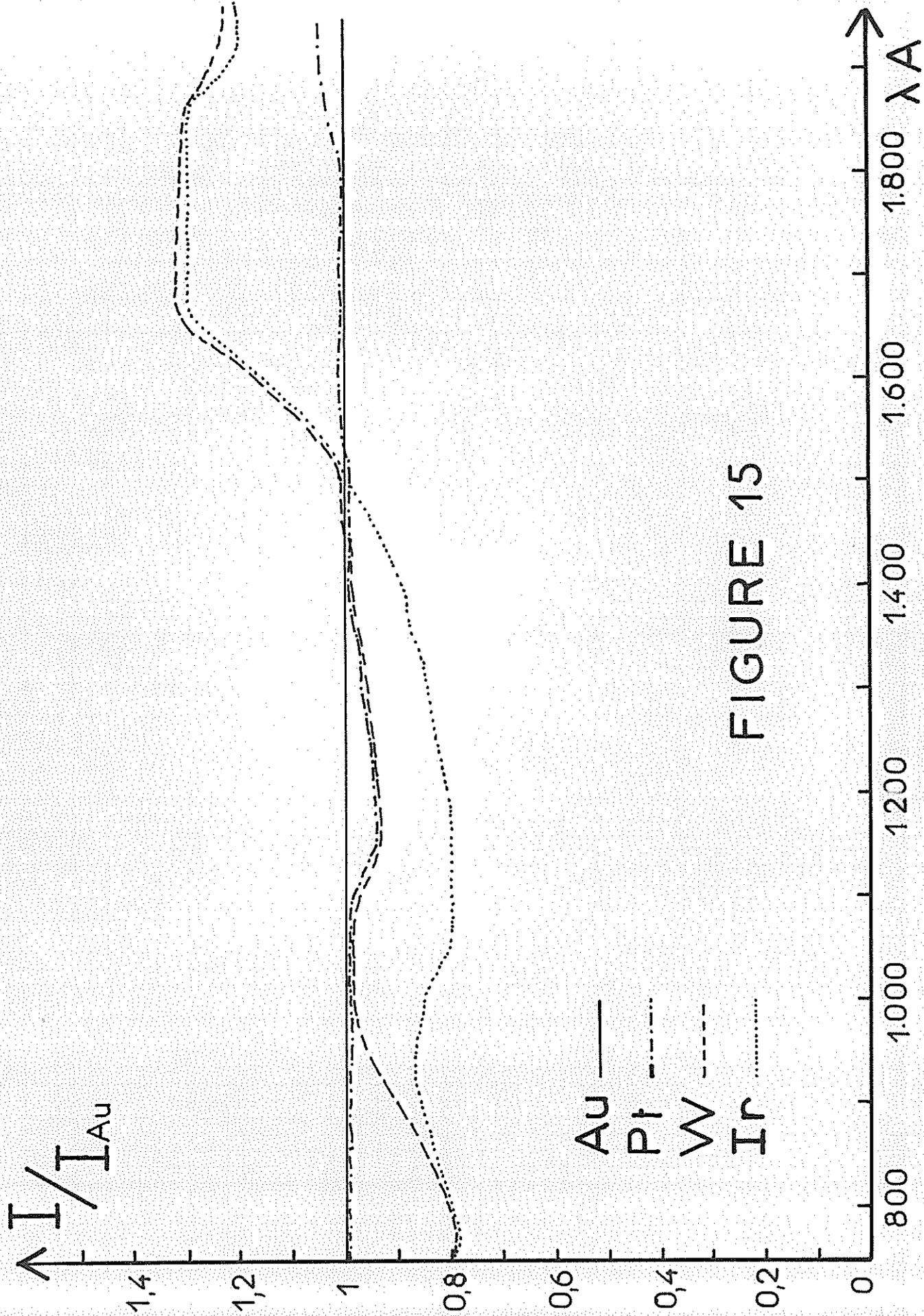


FIGURE 15

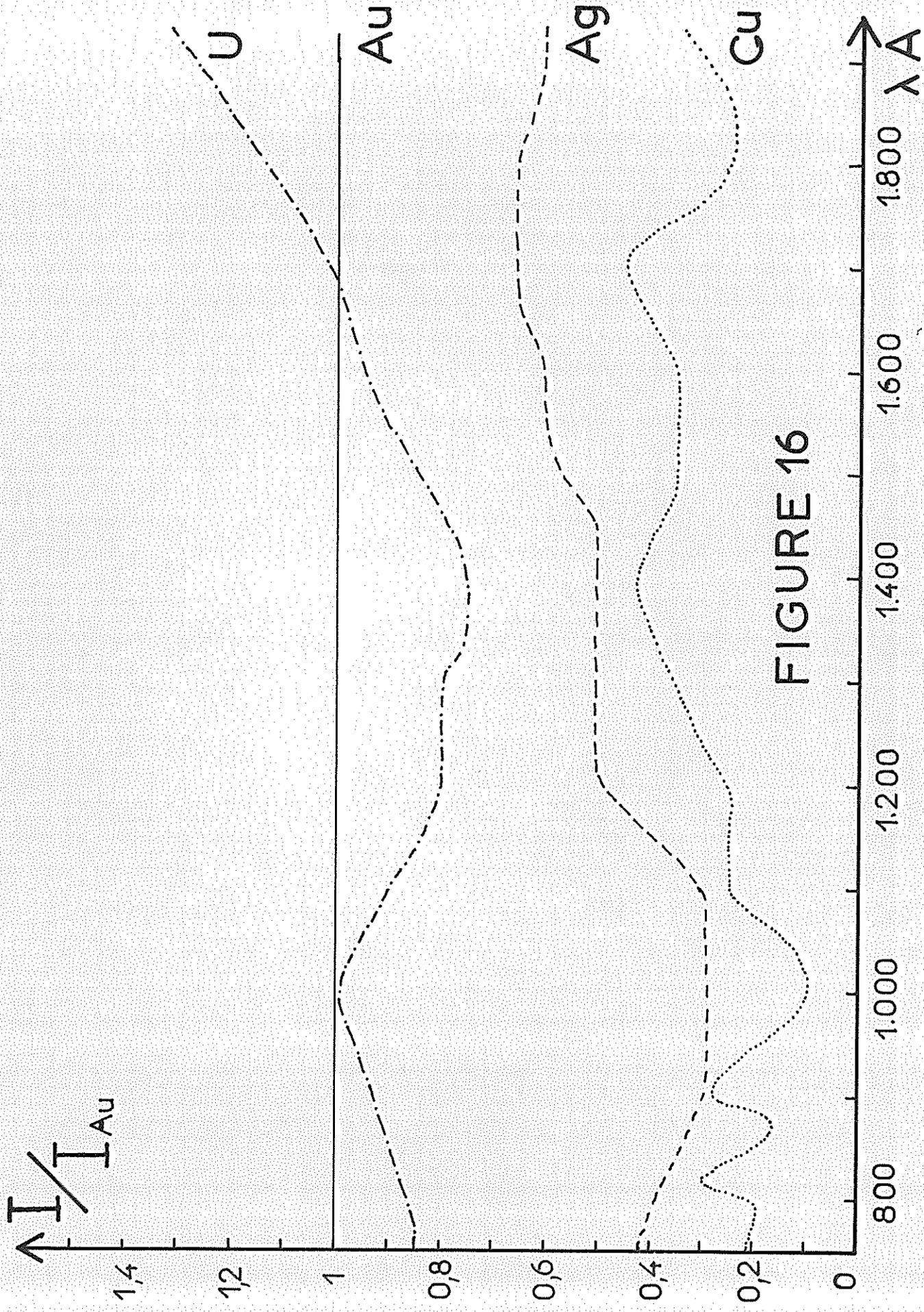


FIGURE 16

permettre de passer des densités optiques aux intensités relatives qui sont représentées en fonction de la longueur d'onde sur les figures 15 et 16, en donnant arbitrairement la valeur unité pour chaque longueur d'onde au spectre continu de l'or.

L'examen de ces figures fait apparaître tout d'abord que ce rapport entre les spectres continus émis par deux métaux différents varie en fonction de la longueur d'onde, sauf si l'on considère le cas de l'or et du platine, pour lequel il reste constant et de plus sensiblement égal à l'unité. D'autre part, si les courbes donnant les densités optiques des spectres des métaux lourds tels que l'or, le platine, l'iridium, le tungstène et l'uranium, sont régulières, il n'en est pas de même pour l'argent et plus encore pour le cuivre avec lequel nous enregistrons des variations très importantes surtout entre 700 et 1.100 Å. Ces remarques étant faites et en ne considérant que des valeurs moyennes à cause de ces variations, nous allons maintenant comparer les intensités des spectres émis par les différents métaux.

Dans le cas des éléments de la troisième série des métaux de transition (or, platine, iridium et tungstène) les courbes représentatives sont assez voisines les unes des autres et presque confondues entre 1400 et 1500 Å. (fig. 13). Pour des longueurs d'onde inférieures, le spectre de l'iridium a une intensité plus faible que celui des trois autres métaux, le rapport oscillant entre 0,8 et 0,9. Au dessus de 1500 Å. le tungstène et l'iridium d'une part, l'or et le platine d'autre part, ont des courbes qui sont presque confondues ; le rapport d'intensité entre ces deux groupes étant environ de 1,25. Les spectres continus émis par ces éléments ont donc des intensités très voisines, sinon égales, si l'on considère l'ensemble du domaine spectral étudié.

IL n'en est pas de même lorsque l'on compare les métaux ayant des numéros atomiques éloignés les uns des autres, ainsi, le rapport d'intensité entre les spectres du cuivre et de l'or a une valeur comprise entre 0,2 et 0,25 pour des longueurs d'onde inférieures à 1200 Å. ; pour des longueurs d'onde

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice. This ensures transparency and allows for easy verification of the data.

2. In the second section, the author outlines the various methods used to collect and analyze the data. This includes both manual data entry and the use of specialized software tools. The goal is to ensure that the data is both accurate and easy to interpret.

3. The third section provides a detailed breakdown of the results. It shows that there is a clear trend in the data, with a steady increase in the number of transactions over the period. This is supported by several charts and graphs that illustrate the growth.

4. Finally, the document concludes with a summary of the findings and some recommendations for future work. It suggests that further analysis should be conducted to identify the factors that are driving the growth and to develop strategies to maintain and improve the current performance.

Date: 10/10/2023
 Author: [Name]

supérieures, il est voisin de 0,4. Lorsque l'on considère la comparaison des spectres de l'argent et de l'or, ce rapport, voisin de 0,4 en dessous de 1200 Å, est sensiblement égal à 0,5 entre 1200 et 1500 Å pour être ensuite légèrement supérieur à 0,6.

A la lumière de ces résultats et du tableau 1, il apparaît que le rapport entre les intensités des spectres continus correspond à peu près à celui des numéros atomiques des éléments pour les longueurs d'onde supérieures à 1200 Å ; ce rapport étant de 0,36 entre le cuivre et l'or, de 0,6 entre l'argent et l'or, et très voisin de un entre l'or, le platine, l'iridium et le tungstène. En dessous de 1200 Å et lorsque l'on considère des longueurs d'onde décroissantes, le rapport des intensités s'écarte de cette valeur.

Cette correspondance n'a pas été vérifiée dans le cas de l'uranium, en effet, l'intensité de son spectre continu est du même ordre de grandeur, voir même inférieure à celle de l'or en dessous de 1700 Å alors que le rapport des numéros atomiques est de 1,16, l'uranium étant le plus lourd.

Toutefois, la diminution rapide de la longueur de l'électrode d'uranium et sa déformation au cours de temps de pose, peuvent expliquer en partie cette exception.

Donc, tout en faisant quelques réserves en ce qui concerne l'uranium et en ne tenant pas compte des variations locales parfois importantes, l'intensité du spectre continu apparaît comme une fonction linéaire du numéro atomique du métal constituant l'anode émettrice pour des longueurs d'onde comprises entre 1200 et 1600 Å. En dessous de 1200 Å. cette fonction n'est plus linéaire mais tend vers une fonction proche du carré de ce numéro et au dessus de 1600 Å. la fonction, tout en étant presque linéaire enregistre des variations en particulier avec le Tungstène et l'Iridium qui, bien qu'ayant des numéros atomiques plus petits que l'Or, ont un spectre continu plus intense.

Ces variations dans les rapports d'intensité entre les

spectres continus émis par les différents métaux nous permettent de penser que nous n'avons pas un phénomène simple, mais la superposition de plusieurs mécanismes avec prédominance du continu de rayons X. La présence de ce spectre continu dans ce domaine spectral pouvant s'expliquer par le fait que le courant électrique étant très intense dans l'étincelle produite par cette source, le nombre d'électrons ayant une vitesse faible est encore assez important pour donner un spectre continu de rayons X assez intense tout de même.

D-ETUDE DES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE LA SOURCE

La décharge du condensateur principal dans la source constitue un circuit oscillant dans lequel une partie de l'énergie emmagasinée dans le condensateur est rayonnée dans l'étincelle. L'équation bien connue d'un tel circuit est de la forme :

$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0$$

formule dans laquelle L est la self induction totale du circuit et R sa résistance comprenant en plus de celle des conducteurs métalliques qui est faible en courant continu, mais peut être plus élevée en raison de l'effet de peau, la résistance de l'étincelle.

Le régime^{de} décharge du condensateur dépend donc de $R^2 - 4 \frac{L}{C}$ et nous pouvons l'étudier au moyen d'une ceinture de Rogowsky placée entre les deux conducteurs coaxiaux du circuit; avec ce dispositif le courant induit dans la ceinture étant reçu par un oscillographe, la lecture des oscillogrammes permet de déterminer le régime du circuit et dans le cas d'un régime oscillant, de mesurer la période des oscillations et le décrétement entre les amplitudes successives. En utilisant les différents circuits construits jusqu'à présent, nous nous sommes toujours trouvés dans le cas du régime oscillant caractérisé par :

$$R^2 - 4 \frac{L}{C} < 0$$

Ce qui indique que la résistance est relativement faible. Dans ce cas, mesurant la période des oscillations $T = 2\pi\sqrt{LC}$ et le décrétement $\delta = \frac{RT}{2L}$ et connaissant la capacité du condensateur nous pouvons calculer L, puis R.

Nous allons maintenant étudier l'influence de ces divers facteurs caractéristiques du circuit de décharge du condensateur sur le spectre émis par la source . Nous

avons vu précédemment que le spectre continu est émis dans la gaine de plasma qui entoure l'anode pendant l'étincelle, or, pour que ce spectre soit intense, il faut un plasma dense, sinon, il y a un spectre de raies; donc l'énergie fournie pour créer ce plasma doit être importante mais pour des raisons matérielles (condensateurs utilisés, source de haute tension; problèmes d'isolement électrique) nous ne pouvons augmenter cette énergie au delà de certaines valeurs, elle doit donc être libérée dans le minimum de temps possible afin d'augmenter la densité du plasma.

Pour réaliser ces conditions, il faut d'une part que la valeur du courant maximum I_m de la première alternance soit élevée et d'autre part que la variation de ce courant à l'origine $(\frac{dI}{dt})_0$ soit rapide.

L'intensité du courant dans le régime de décharge oscillante de ce circuit et la variation de ce courant ^{sont} données par les formules classiques :

$$i = V_0 \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} t \quad (1)$$

et sa dérivée

$$\frac{di}{dt} = -\frac{V_0}{L} e^{-\frac{R}{2L}t} \left[\frac{R}{2\sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}} \sin \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} t - \cos \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} t \right] \quad (2)$$

Le courant maximum I_m dans le circuit sera obtenu lorsque la dérivée de la fonction (1) s'annulera, c'est à dire lorsque :

$$-\frac{V_0}{L} e^{-\frac{R}{2L}t} \left[\frac{R}{2\sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}} \sin \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} t - \cos \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} t \right] = 0$$

la fonction exponentielle contenue dans cette formule ne s'annulant que pour t infini, il faut donc que l'on ait :

$$\frac{R}{2\sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}} \sin \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} t - \cos \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} t = 0$$

ou, en posant :

$$\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = \alpha$$

il faut que

$$\frac{R}{2\alpha L} \sin \alpha t = \cos \alpha t$$

soit

$$\operatorname{tg} \alpha t = \frac{2\alpha L}{R}$$

Cette condition sera réalisée au temps

$$t = \frac{1}{\alpha} \operatorname{arctg} \frac{2\alpha L}{R}$$

En reportant cette valeur dans l'équation (1) nous aurons :

$$I_m = \frac{V_0}{\alpha L} e^{-\frac{R}{2\alpha L} \operatorname{arctg} \frac{2\alpha L}{R}} \sin \operatorname{arctg} \frac{2\alpha L}{R} \quad (3)$$

D'autre part la variation du courant à l'origine sera obtenue en faisant $t = 0$ dans l'équation (2) :

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_0 = \frac{V_0}{L} \quad (4)$$

C'est à partir des formules (3) et (4) que nous pouvons dégager l'influence des différents paramètres caractéristiques du circuit. Si la formule (4) indique clairement que pour avoir une variation rapide du courant à l'origine on doit utiliser la tension la plus élevée possible dans un circuit possédant une self induction la plus faible possible, il n'en est pas de même pour la formule (3) sur laquelle nous allons pratiquer quelques approximations pour la rendre d'un emploi plus facile. Pour cela, considérons avec les condensateurs utilisés au cours des expériences les valeurs de la self induction et de la résistance du circuit calculées à partir de la période et du décré- ment lus sur les courbes donnant l'allure de la décharge qui

sont enregistrées sur les oscillogrammes. L'ordre de grandeur de la self induction étant de 0,1 μ H et celui de la résistance de 0,05 ohm pour un circuit comprenant une capacité de 0,5 μ Farad, nous pouvons négliger $\frac{R^2}{4L^2}$ devant $\frac{1}{LC}$, l'erreur introduite étant de quelques millièmes, dans ce cas, nous avons :

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

D'autre part, avec ces valeurs nous avons :

$$\operatorname{tg} \alpha t = \frac{2\alpha L}{R} \approx 1,8$$

Ce qui correspond à un angle de 87°, dont $\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2\alpha L}{R}$ sera voisin de $\frac{\pi}{2}$ et en le remplaçant par cette valeur dans la formule (3), nous avons :

$$I_m = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\frac{\pi R}{4} \sqrt{\frac{C}{L}}} \quad (5)$$

formule qui revient à placer le maximum de la fonction (1) à un temps t égal au quart de la pseudo-période; cette formule, bien qu'approximative permet de mieux voir le rôle des divers paramètres.

- La tension V_0 appliquée au condensateur doit être la plus élevée possible pour avoir un courant maximum élevé, il en était de même pour la variation du courant à l'origine; donc, dans la mesure où les problèmes d'isolement électrique ne nécessitent pas la modification du circuit, nous avons intérêt à appliquer au condensateur le maximum de tension qu'il puisse supporter.

- Pour C et L, le problème est plus complexe, car ces variables interviennent deux fois par le rapport $\sqrt{\frac{C}{L}}$; pour déterminer leurs rôles, nous allons étudier la variation de I_m en fonction de ce rapport. La fonction I_m étant le produit d'une fonction linéaire croissante de $\sqrt{\frac{C}{L}}$ par une exponentielle décroissante de ce rapport, il en résulte que lorsque $\sqrt{\frac{C}{L}}$ croît la fonction croît jusqu'à un maximum

qui est atteint pour

$$\sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{4}{\pi R}$$

ensuite, la fonction décroît quand $\sqrt{\frac{C}{L}}$ augmente encore ainsi que l'indique sur la figure 17 la courbe représentative de I_m calculée pour un circuit où la résistance reste constante et égale à une valeur moyenne de 0,05 lorsque l'on fait varier C et L. Mais, dans le cas de notre circuit, la résistance n'est pas indépendante de la self induction et de la capacité car elle varie lorsque l'on modifie les caractéristiques du circuit aussi, nous ne pouvons pas appliquer directement cette formule pour calculer la valeur de ce maximum.

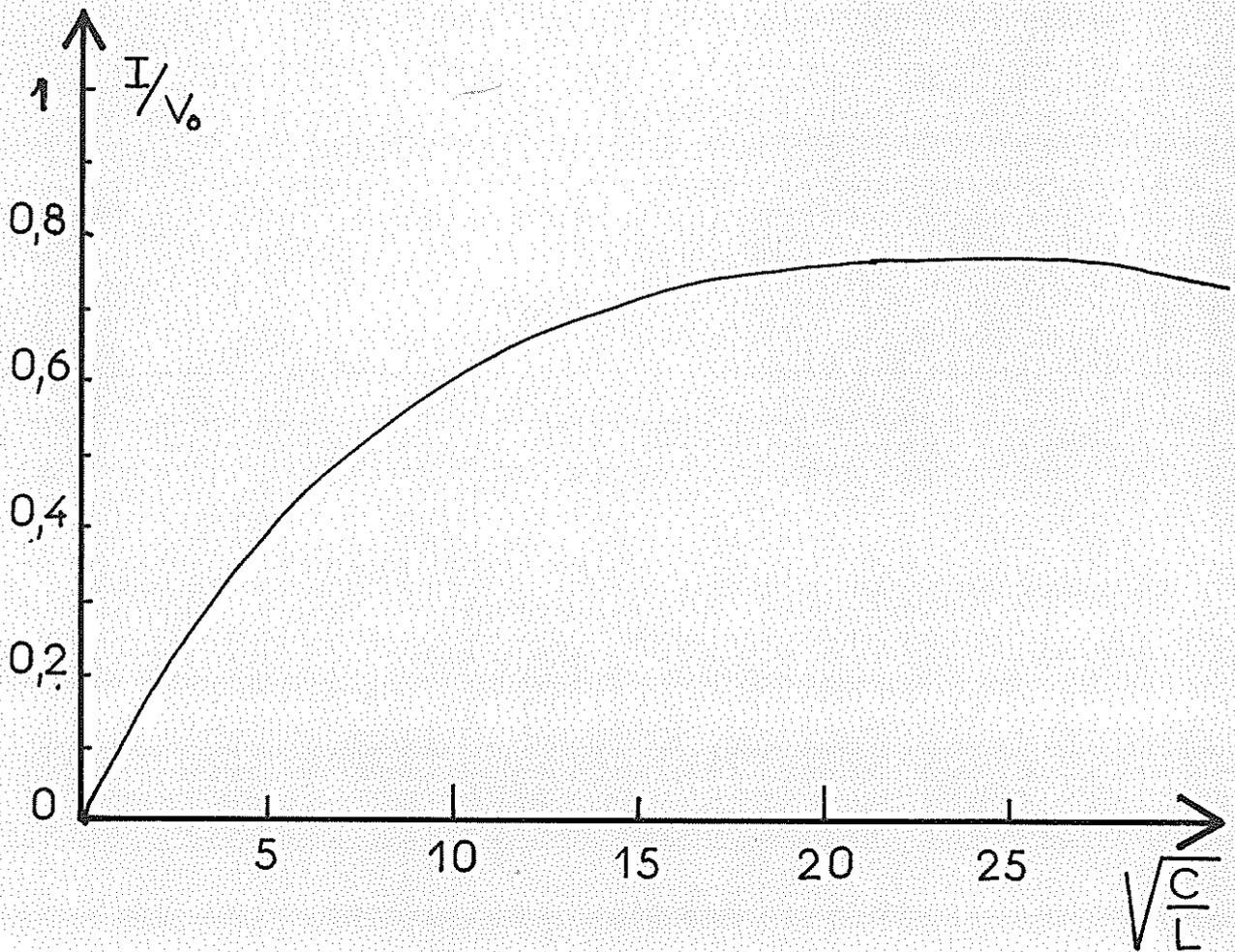


FIGURE 17

Examinons maintenant la résistance; son calcul est difficile car d'une part il est malaisé de calculer la résistance du circuit métallique en raison de la nature transitoire du régime de décharge et d'autre part la résistance de l'étincelle varie en fonction du temps et est mal connue car les mesures oscillographiques des intensités et tensions aux bornes de l'étincelle sont difficiles et sujettes à beaucoup d'erreurs causées par les parasites. Toutefois avec le circuit utilisé, lorsque l'on diminue la self induction en réduisant la longueur des conducteurs, la résistance a tendance à diminuer donc la valeur de $\sqrt{\frac{C}{L}}$ pour laquelle a lieu le maximum augmente; il en résulte que nous avons intérêt à augmenter la valeur du rapport $\frac{C}{L}$ étant donné que l'on se trouve en général dans les valeurs de $\sqrt{\frac{C}{L}}$ inférieures au maximum de I_m .

L'étude expérimentale de l'influence de ces paramètres se heurte à certaines difficultés du fait qu'ils ne sont pas indépendants les uns des autres, la tension mise à part. Une étude séparée est de ce fait inexacte et en particulier, chaque type de condensateur ayant sa self induction propre et nécessitant de par sa forme un circuit différent de celui utilisé pour un autre, à chaque valeur de C correspondent des valeurs de L et aussi de R différentes de celles obtenues pour un autre condensateur.

Différents essais portant sur la variation de ces paramètres ont été effectués au laboratoire (17); ils ont compris notamment l'utilisation de différents condensateurs et la modification des formes du circuit. Les résultats obtenus indiquant que l'intensité du spectre continu croît lorsque la capacité augmente et lorsque la self induction diminue sont en accord avec les considérations théoriques que nous venons de donner.

La présente étude sur les paramètres électriques comporte d'une part la construction d'un modèle de cette source possédant une très faible self induction et d'autre part la variation de l'intensité du spectre continu en

fonction de la tension appliquée au condensateur.

1°) Construction d'une source ayant une faible self induction :

A partir de la source décrite au début de cette étude, nous avons voulu en construire une qui possède de meilleures performances en ce qui concerne le rapport $\frac{C}{L}$; pour cela il faut augmenter la capacité et diminuer la self induction, mais ici nous nous heurtons à des problèmes d'ordre technique car les performances imposées au condensateur en limitent le choix. Il faut utiliser un condensateur de capacité élevée et de faible self induction pouvant supporter une tension élevée et un grand nombre de décharges; de plus il est nécessaire que son poids et ses dimensions permettent de l'installer sur la chambre à étincelles pour le relier aux électrodes par un circuit court afin de limiter la self induction de ce dernier. Devant ces considérations et chaque type de condensateur nécessitant la construction d'un circuit adapté à ses formes, nous avons préféré réduire au maximum la self induction du circuit en utilisant un seul condensateur possédant de bonnes performances. Ce dernier, un " Bosch " cylindrique à armatures coaxiales ayant pour caractéristiques 0,5 μF , 29 mVH et 25 KV a été relié aux électrodes par un circuit coaxial car ce type de circuit correspond assez bien aux formes du condensateur et présente une faible self induction.

La self induction théorique d'un tel circuit ayant pour valeur :

$$L = 2l \log \frac{B}{A}$$

(formule dans laquelle l est la longueur du circuit et B et A sont les diamètres respectifs des conducteurs extérieurs et intérieurs).

Nous voyons que pour avoir L faible, il faut rendre l le

plus petit possible et le rapport B/A voisin de 1. Ces conditions sont bien connues en électrotechnique et nous les avons respecté tout en étant limité par la longueur minimum nécessaire pour que l'extrémité de l'électrode soit sur l'axe optique du spectrographe et par une certaine différence entre les diamètres des conducteurs pour avoir un bon isolement électrique.

Avec cette source, la self induction calculée à partir de la période des oscillations est de $47 \text{ m } \mu \text{ H}$, ce qui donne en négligeant un éventuel couplage avec celle du condensateur qui est de $29 \text{ m } \mu \text{ H}$ une valeur de $18 \text{ m } \mu \text{ H}$ pour le circuit seul. Le calcul direct par la formule ci-dessus donnant $15 \text{ m } \mu \text{ H}$ l'accord entre les deux valeurs peut être considéré comme satisfaisant étant donné la complexité du circuit (sections variables, ignorance de la section de l'étincelle et des lignes de courant dans celle-ci, etc. .).

L'intensité du spectre continu obtenue avec cette source est légèrement supérieure à celle obtenue avec la source classique dont la self induction est de $88 \text{ m } \mu \text{ H}$, ainsi avec une électrode de tungstène, nous avons obtenu une intensité 1,3 fois plus grande alors que la self induction est presque deux fois plus petite.

2) Variation de l'intensité du spectre continu en fonction de la tension appliquée au condensateur

Cette variation a été étudiée pour des anodes d'uranium, d'or et de tungstène en appliquant au condensateur des tensions comprises entre 11 et 25 KV. Les résultats sont présentés sur les figures 18 et 19; sur la figure 18, nous avons représenté avec la courbe donnant la densité optique en fonction de la tension, du spectre de l'uranium vers 1500 Å (trait plein) une courbe de graduation (tirets) obtenue en faisant varier le temps de pose à tension constante, l'échelle des abscisses est alors le logarithme du temps de pose; cette courbe étant nécessaire

pour obtenir la pente de la précédente. Cette pente a une valeur sensiblement égale à 2. Ce résultat est confirmé sur la figure 19 par la courbe représentative de l'or vers 1200A et par celle du tungstène vers 1500°, pour une tension inférieure à 18 KV environ.

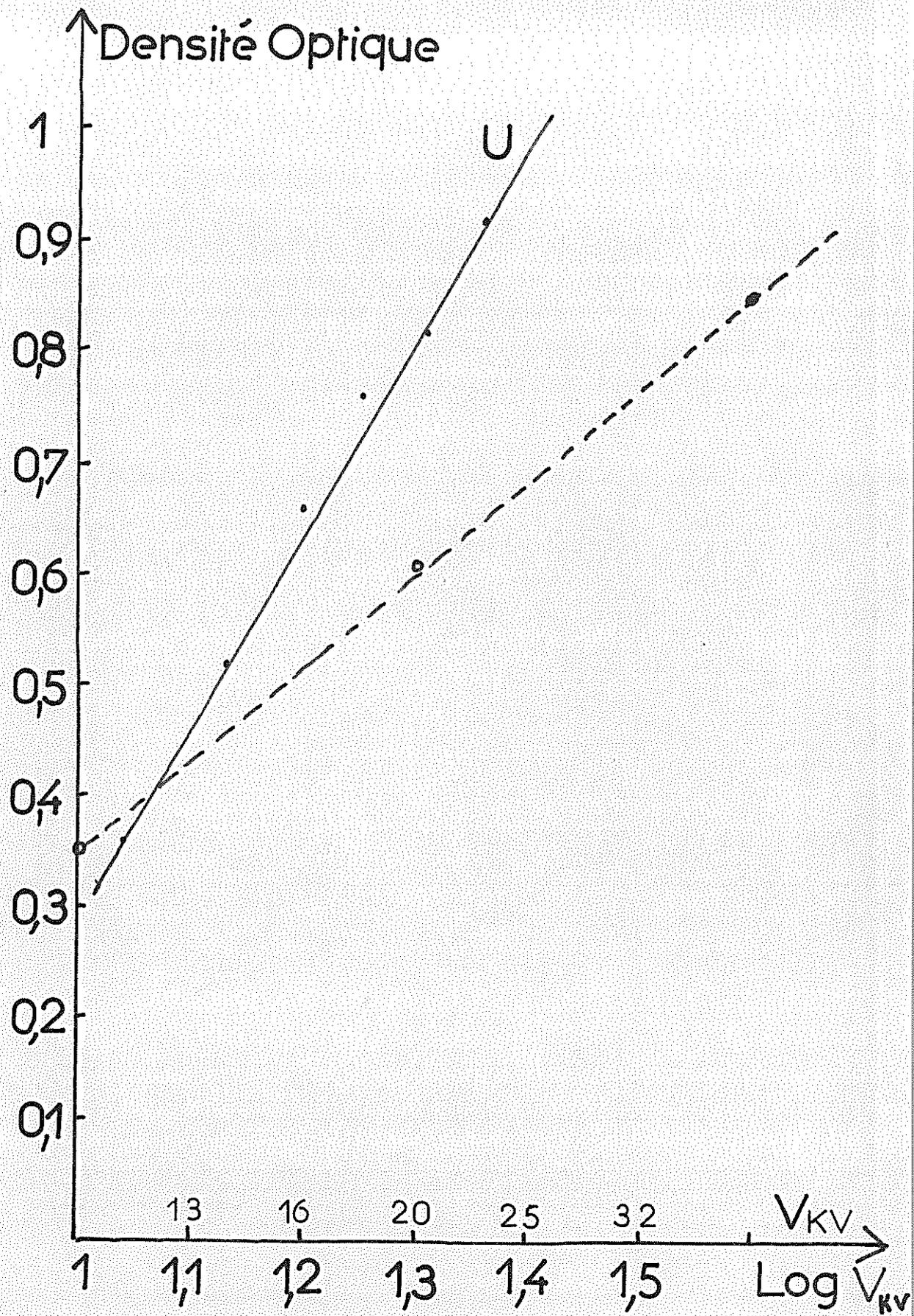


FIGURE 18

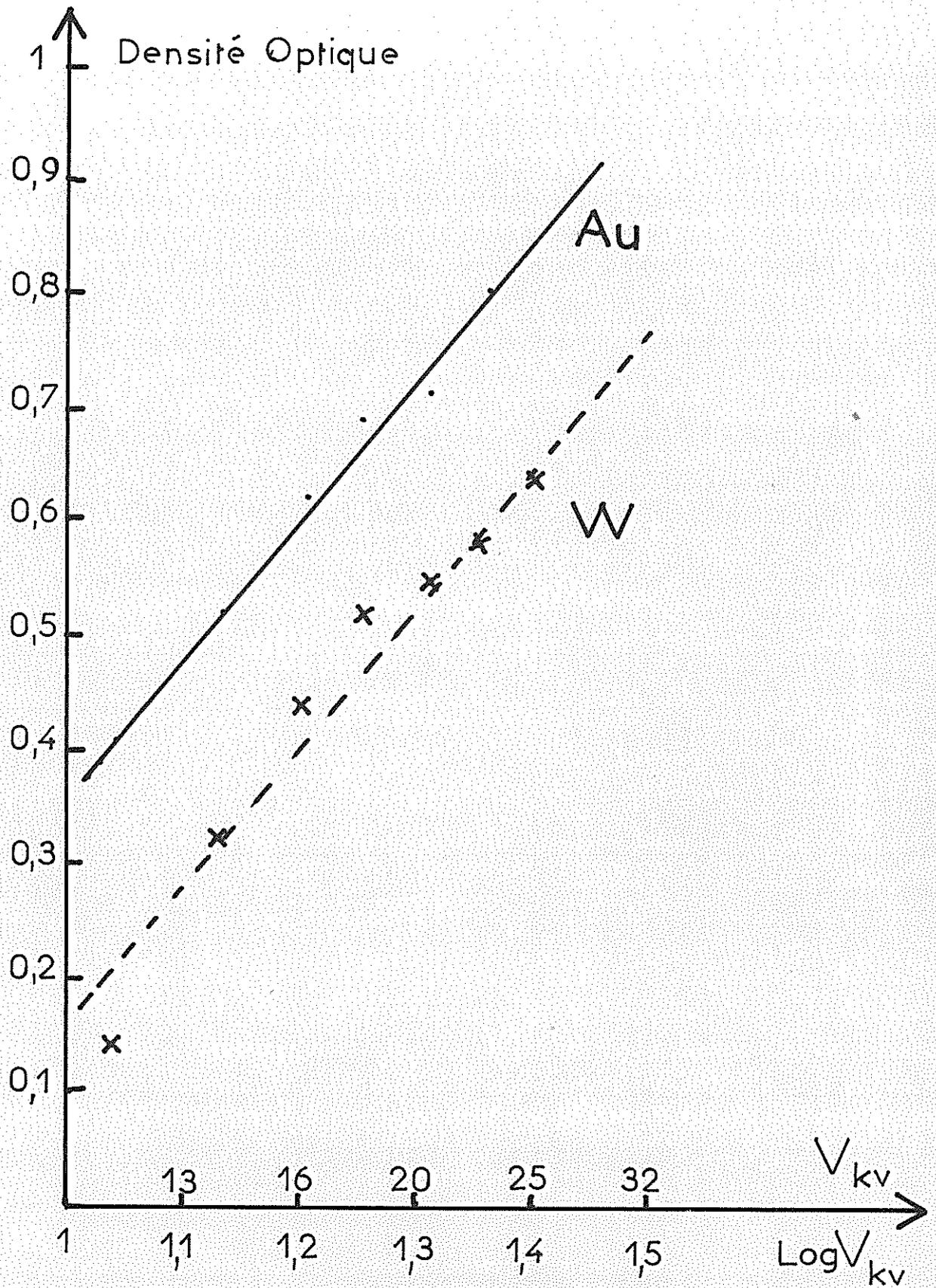


FIGURE 19

CONCLUSION

A partir des résultats de cette étude, nous pouvons dégager divers renseignements concernant d'une part le mécanisme d'émission du spectre continu par la source et d'autre part les conditions pratiques à remplir pour l'utiliser comme instrument de travail; ce sont ces dernières que nous allons considérer en premier.

I- CONDITIONS NECESSAIRES POUR L'UTILISATION PRATIQUE DE LA SOURCE :

Cette source ayant pour rôle principal de permettre l'étude des spectres d'absorption, elle doit, pour être intéressante fournir un spectre continu intense et aussi uniforme que possible. Il faut donc que l'intensité de ce spectre ne comporte pas de variations brusques et qu'il ne s'y superpose pas ou seulement très peu de raies d'émission; d'autre part le spectre continu fourni par chaque étincelle doit être suffisamment intense pour ne pas nécessiter l'utilisation du temps de pose trop long. Pour obtenir ces résultats, les conditions à remplir, que nous avons étudiées, portent sur le circuit électrique de décharge du condensateur, l'anode utilisée et la région de l'étincelle observée; nous allons les résumer brièvement :

1) Circuit électrique de décharge du condensateur

Nous avons vu précédemment que l'on doit rechercher un circuit (y compris le condensateur) de faible C/L l'influence du facteur self étant prépondérante. Donc le circuit de liaison devra présenter une self aussi faible que possible. Le condensateur devra également présenter le minimum de self, ce qui prohibe l'emploi de capacités élevées. L'étude en fonction de la tension a montré qu'il

s'agissait d'un effet rapide, et qu'il est préférable de ne pas descendre en dessous de 20 KV.

2) Choix de l'anode

Pour l'étude des spectres d'absorption il faut utiliser les métaux lourds et parmi eux les plus avantageux sont le tungstène, le platine et l'uranium avec lesquels on ne rencontre que très peu de raies superposées au spectre continu; le tungstène et le platine étant préférables à l'uranium, dans les cas où le nombre d'étincelles doit être élevé sans que l'on puisse faire de réglages au cours de la pose, en raison de la vaporisation moins rapide de l'extrémité de l'anode. D'autre part le diamètre de l'anode doit être de deux à trois millimètres car en dessous de cette valeur la vaporisation est trop rapide et au dessus la localisation de l'étincelle à l'extrémité de l'électrode devient médiocre d'où certaines imprécisions dans le réglage; de plus, pour des diamètres trop grands on provoque une diminution de la densité du plasma d'où une baisse d'intensité du spectre continu.

3) Régime de l'étincelle à observer

De l'étude de la répartition spatiale de l'émission du spectre continu, il résulte que la région à observer est l'extrémité de l'anode, et, pour se placer dans les meilleures conditions, il faut que l'axe optique de l'appareil d'observation rencontre l'anode légèrement au dessus de son extrémité. Il y a d'ailleurs intérêt à limiter avec un diaphragme la région de l'étincelle qui éclaire le réseau du spectrographe afin d'éviter que le spectre de raies émis en dehors de cette région ne vienne se superposer au spectre continu en raison de l'astigmatisme du réseau.

II- ESSAI D'INTERPRETATION DU MECANISME D'EMISSION

Parmi les résultats obtenus au cours de cette étude, le plus important pour l'interprétation théorique du phénomène concerne l'existence de la gaine de plasma qui se crée

autour de l'extrémité de l'anode pendant l'étincelle. Les renseignements que nous possédons sur ce plasma sont encore très incomplets et les seuls que nous connaissons avec une précision suffisante concernent sa forme et son volume. Les autres caractéristiques de ce plasma et en particulier sa densité, sa température, son évolution et le degré d'ionisation et d'excitation des particules qui le composent nous sont à peu près inconnues et sont difficilement calculables étant donné les conditions dont elles dépendent; parmi celles-ci, nous pouvons dégager :

- Les propriétés du métal de l'anode : conductibilité thermique et électrique, température de fusion et de vaporisation, potentiels d'ionisation et d'excitation et peut être même structure cristalline du métal.

- La quantité d'énergie dégagée sur l'anode et son intensité; ces conditions étant fonctions du condensateur utilisé, de la tension qui lui est appliquée ainsi que des caractéristiques électriques du circuit de décharge.

- Le rythme des décharges du condensateur, en effet, nous avons noté surtout pour des matériaux ayant une mauvaise conductibilité thermique et électrique comme l'uranium que lorsque nous augmentons le rythme des décharges, la température de l'anode reste élevée entre les étincelles et la quantité de métal vaporisé augmente.

A ces inconnues, il faut ajouter que nous ne connaissons ni l'évolution de ce plasma car le spectre enregistré correspond à l'émission pendant toute la durée de la décharge et même de plusieurs, ni l'intensité totale rayonnée car le spectre est dû à une partie seulement du plasma et cette partie est mal déterminée, les conditions expérimentales et en particulier l'astigmatisme du réseau ne permettent que difficilement de remonter du spectre enregistré au spectre réel émis par la source

Ces remarques étant faites, essayons de présenter la

situation telle que nous pouvons l'envisager; au cours de l'étincelle provoquée par la décharge du condensateur, nous avons à la fois :

- Autour de l'extrémité de l'anode création, puis expansion et dissipation d'un plasma sans doute très dense, en effet, les raies que nous enregistrons superposées au spectre continu sont élargies.

- Création par le passage du courant d'un champ électromagnétique et d'un faisceau de rayons cathodiques qui atteignant l'extrémité de l'anode.

Ces deux phénomènes pris séparément peuvent engendrer chacun l'émission d'un spectre continu, mais difficilement en expliquer l'existence dans une aussi grande partie du domaine spectral, en effet, examinons maintenant le spectre produit dans chaque cas.

1) Spectre produit par le freinage des rayons cathodiques

Ce spectre continu appelé continu de rayons X est dû au freinage par l'anode des rayons cathodiques qui l'atteignent, sa longueur d'onde minimum qui est fonction de la tension appliquée au condensateur nous est donnée par la relation de Duane et Hundt.

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV}$$

Pour les tensions que nous utilisons, elle est inférieure à 1 Å (0,5646 Å pour 22 kilovolts). Le domaine spectral que nous étudions étant bien au dessus de ces minimums et selon la courbe de répartition du continu de rayons X, l'intensité du spectre continu émis dans ce domaine devrait être assez faible surtout lorsque l'on s'approche de l'ultraviolet moyen. D'autre part, le spectre continu produit dans le cas de ce phénomène pris isolément serait localisé sur le métal de l'anode et non autour de celle-ci, il faut donc envisager le freinage des rayons cathodiques non par l'anode elle-même, mais par la gaine de plasma qui l'entoure, ce qui est possible, les particules qui la composent formant un écran suffisamment dense.

En utilisant la formule citée précédemment, concernant l'intensité du spectre continu en fonction de la fréquence : (p. 26)

$$I_{\nu} d\nu = d\nu \frac{8 n Z e^2 h N_e n_0}{3\sqrt{3} c^3 m \lambda(\nu_0)} (\nu_0 - \nu)$$

et en tenant compte du fait que d'une part

$$I_{\lambda} = I_{\nu} \frac{c}{\lambda^2}$$

et que d'autre part la variation de λ réduit celle de l'intensité lorsque la longueur d'onde augmente, le spectre continu devrait être environ 10^4 fois moins intense aux environs de 1000 Å que pour la région voisine de la limite de Duane et Hundt pour la tension considérée. Cette formule se rapporte au freinage des rayons cathodiques monocinétiques produits par une différence de potentiel constante or, ce n'est pas le cas avec notre source car la tension varie selon un régime oscillant pendant l'étincelle et il faut tenir compte des différentes valeurs de cette tension. Dans ce genre d'étincelle à forte densité de courant, le nombre d'électrons de faible énergie est plus important que celui des électrons de grande énergie car le courant étant en quadrature de phase avec la tension, aux fortes valeurs du courant correspondent les tensions faibles et inversement. L'intensité du spectre continu étant proportionnelle au nombre des électrons freinés, la présence d'un continu de freinage du type X peut s'expliquer vers les grandes longueurs d'onde par la somme des contributions des rayons cathodiques de faible énergie mais de forte intensité. Cette hypothèse est confirmée par le fait que nous n'observons un spectre continu dans le domaine spectral considéré que lorsque les caractéristiques électriques du circuit permettent d'obtenir une forte densité de courant.

2) Spectre continu produit par le freinage des électrons du plasma

Ce spectre continu est dû au freinage et à la recombinaison avec des ions, des électrons libérés dans le plasma par ionisation des particules métalliques provenant des

couches superficielles de l'extrémité de l'anode vaporisées par le passage du courant. Le domaine spectral couvert par ce spectre continu dépend de la température du plasma et la longueur d'onde pour laquelle nous avons le maximum d'émission, déduite de la formule :

$$4\pi \xi_{\lambda} = \frac{128 \pi^3 Z^2 e^6}{3\sqrt{3} c^2 (2\pi m)^{3/2}} \frac{N_c N_i}{\sqrt{hT}} e^{-\frac{hc}{hT\lambda}} \frac{1}{\lambda^2}$$

est

$$\lambda_{\xi_{\lambda} \max} = \frac{hc}{2hT}$$

L'application de cette formule donne pour différentes températures du plasma les valeurs suivantes de la longueur d'onde correspondant à l'émission maximum

T (°K)	$\lambda_{\xi_{\lambda} \max} (\text{Å})$
10^4	7201
10^5	720,1
10^6	72,01
10^7	7,20
10^8	0,72

Un calcul antérieur de la température du plasma formé par l'étincelle, effectué par mesure de l'intensité relative des raies d'un même ion (11) donne une valeur de l'ordre de $5 \cdot 10^4$ à 10^5 degrés pour des étincelles produites dans un circuit de caractéristiques analogues, mais avec cependant une valeur de self induction nettement plus élevée. Nous pouvons donc envisager la présence d'une émission de cette

origine dans une partie de l'ultraviolet lointain qui serait située vers les grandes longueurs d'ondes (supérieures à quelques centaines d'angströms) mais à proximité des rayons X son existence nécessiterait une température voisine de 10^7 degrés, ce qui est certainement trop élevé pour ce type d'étincelle.

Ces deux phénomènes pris séparément peuvent donc difficilement expliquer le spectre continu obtenu avec notre étincelle et qui s'étend depuis les rayons X jusqu'à la lumière visible; il faut donc envisager une contribution simultanée de ces deux mécanismes à la production du spectre continu observé.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) M. MORLAIS , D.E.S. Rennes, Juin 1963
- (2) D. CHALONGE , Ann. de Physique, 1934, 12, 13
- (3) P.G. WILKINSON , J.O.S.A. 1955, 45, 344, 1044
- (4) P.L. HARTMAN et D.H. TOMBOULIAN , Phys. Rev. 1953, 91, 1577
Phys. Rev. 1956, 102, 1423
- (5) K. CODLING et R.P. MADDEN, Journ. of Applied Physics, 1965,
36, 2, 380
- (6) W.R.S. GARTON, J. Sci. Instr. 1959, 36, 11
- (7) W.R.S. GARTON, I.W. CELNICK, H. HESSBERG et S.E.G. WHEATON
Proc. 4 th Int. Conf. Ionisation Phenomena in Gases, Uppsala
1959, p. 518, North Holland Publishing Co, Amsterdam
- (8) J. ROMAND, G. BALLOFFET, et B. VODAR, C.R. Acad. Sci. 1955,
240, 412
- (9) J. ROMAND, G. BALLOFFET et B. VODAR, Spectrochimica Acta,
1958, 13, 150
- (10) J. ROMAND et B. VODAR, Revue d'Optique 1958, 37, 329
- (11) G. BALLOFFET, Thèse Paris 1960
- (12) G. BALLOFFET, J. ROMAND et B. VODAR, C.R. Acad. Sci. 1961,
252 , 4139
- (13) G. BALLOFFET, J. ROMAND et J. KIEFFER, Spectrochimica Acta,
1962, 18, 791
- (14) T. NAMIOKA, J.O.S.A. , 1959, 49, 446
- (15) W. FINKELNBURG et T.H. PETERS, Handbuch der Physik XXVIII, 79
- (16) J. KIEFFER, Travaux en cours
- (17) G. BALLOFFET, Travaux en cours

