

# MESURE DES COEFFICIENTS D'ACCOMMODATION DE MOLECULES DE TRES HAUTE ENERGIE ET RESULTATS

F. MARCEL DEVIENNE

Laboratoire Méditerranéen de Recherches Thermodynamiques, Nice, France

(Reçu le 5 février 1967)

**Résumé**—Après avoir rappelé les phénomènes qui peuvent se produire par impact d'une molécule de haute énergie sur une surface métallique, on indique les méthodes de mesure utilisées en vue de la détermination des coefficients d'accommodation. On analyse ensuite les différents facteurs physiques influençant les coefficients d'accommodation; en particulier, l'influence du dégazage qui est moins importante pour les molécules de haute énergie que pour celles ayant une énergie d'origine thermique. Les coefficients d'accommodation augmentent, en général, avec l'énergie, diminuent lorsque l'angle d'incidence augmente et dépendent de la nature des molécules et, pour un même gaz, de leur atomicité. Enfin, le coefficient d'accommodation varie avec la nature de la surface.

Les recherches ont été effectuées dans le cas de l'hélium, de l'argon, de l'hydrogène et de l'azote avec des surfaces métalliques d'aluminium, d'argent, d'or et de platine. Les énergies, dans la plupart des cas, ont varié entre 500 et 12000 eV.

## NOTATIONS

$a$ ,	coefficient d'accommodation;	$\theta'$ ,	élévation de température de l'appareil de mesure des intensités;
$a_0$ ,	coefficient d'accommodation moyen d'une molécule;	$\epsilon$ ,	facteur d'émissivité moyen d'une plaquette;
$a_r$ ,	coefficient d'accommodation des molécules par rapport à la paroi de l'appareil de mesure des intensités;	$\epsilon_1$ ,	facteur d'émissivité moyen de l'appareil de mesure des intensités;
$T_s$ ,	température de la surface;	$\sigma$ ,	constante de Stéfán;
$T$ ,	température de la chambre d'essais;	$\tau$ ,	constante de temps d'une plaquette;
$E_i$ ,	énergie incidente;	$\tau_1$ ,	constante de temps de l'appareil de mesure des intensités;
$E_r$ ,	énergie réfléchié;	$\rho$ ,	masse spécifique d'une plaquette;
$E_{s_1}$ ,	énergie de la molécule à la température $T_s$ ;	$e$ ,	épaisseur d'une plaquette;
$E_a$ ,	énergie cédée sous forme de chaleur;	$m$ ,	masse d'une plaquette;
$E_p$ ,	énergie emportée par les particules éjectées de la surface;	$m_p$ ,	masse de l'appareil de mesure des intensités;
$v_m$ ,	intensité du jet moléculaire;	$c$ ,	chaleur spécifique d'une plaquette;
$\theta_m$ ,	élévation totale de température de la plaquette ou cible recevant les molécules, par rapport à la plaquette de référence;	$c_1$ ,	chaleur spécifique de l'appareil de mesure des intensités;
$\theta$ ,	élévation totale de température de l'appareil recevant les molécules, par rapport à l'appareil de référence;	$s_1$ ,	surface de l'orifice d'admission de l'appareil;
		$S_1$ ,	surface rayonnante de l'appareil;
		$i$ ,	angle d'incidence.

## INTRODUCTION

LORSQUE les molécules de haute énergie (énergie supérieure à 25 eV) viennent heurter une surface solide, disposée dans un gaz très raréfié, différents phénomènes sont susceptibles de se produire simultanément ou séparément.

Il peut y avoir émission électronique, éjection d'atomes ou d'ions par la surface, ou adsorption par celle-ci. Il est également possible, qu'il se produise un échange énergétique, entre les molécules de haute énergie et la surface.

Dans ce cas, une molécule se "réfléchit", ou, si l'on préfère, est renvoyée dans le gaz très raréfié, en ayant une certaine énergie  $E_r$  qui, dans la majeure partie des cas, est différente de celle qu'elle avait initialement. Si l'on désigne l'énergie incidente par  $E_i$ , le coefficient d'accommodation est théoriquement défini par :

$$a = \frac{E_i - E_r}{E_i - E_s} \quad (1)$$

Dans cette expression,  $E_s$  représente l'énergie moyenne qu'aurait la molécule si elle quittait la surface à la température  $T_s$ , correspondant à celle du solide.

Remarquons tout de suite que, dans le cas des jets moléculaires de haute énergie, on peut négliger  $E_s$  devant  $E_i$ . En effet, même en admettant que la température de la surface soit de l'ordre de 2000°C, l'énergie correspondant à cette température est de l'ordre de  $\frac{2}{10}$  d'électron-volt, elle est négligeable vis-à-vis d'une molécule ayant une énergie initiale supérieure à quelques dizaines d'électron-volt.

Cette définition que nous venons de donner du coefficient d'accommodation est la transposition de la définition classique. En réalité, l'énergie incidente  $E_i$  d'une molécule est égale à la somme de l'énergie  $E_a$  cédée sous forme de chaleur à la surface, augmentée de l'énergie  $E_p$  emportée par les différentes particules éjectées par la surface, à laquelle on ajoute l'énergie  $E_r$  que possède la molécule "réfléchie". D'où l'expression :

$$E_i = E_a + E_p + E_r.$$

Pour connaître exactement l'énergie perdue par une molécule dans un choc contre la paroi, il est nécessaire de connaître  $E_a$  et  $E_p$ , ou bien il suffit de connaître  $E_r$ .

En vue d'étudier le bilan de l'énergie cédée à une surface, nous avons utilisé deux voies différentes.

D'une part, nous avons effectué la mesure directe de l'énergie des molécules dites "réfléchies" en déterminant leurs vitesses, ce qui permet de connaître la valeur de  $E_r$  [1], et d'autre part, nous avons déterminé la valeur des coefficients d'accommodation, c'est-à-dire, de l'énergie  $E_a$ . Cependant, il y a lieu de préciser, étant donné l'existence de particules éjectées par le solide, qu'il existe un terme  $E_p$ . Par conséquent, en mesurant les coefficients d'accommodation grâce à l'échauffement d'une surface bombardée par des jets moléculaires de grande énergie, nous ne déterminons pas les coefficients d'accommodation réels, mais les coefficients apparents. Avant d'entrer dans le détail des méthodes de mesure et des résultats obtenus, indiquons que les coefficients d'accommodation que l'on mesure avec précision, n'ont pas une valeur égale à l'unité comme le supposent un certain nombre d'expérimentateurs. Les résultats que nous avons obtenus sur les mesures des taux d'arrachement, c'est-à-dire le nombre de molécules ou d'atomes éjectés par la surface par molécule de haute énergie, montrent que ceux-ci peuvent atteindre des valeurs dépassant dix. On comprend aisément que même si la molécule après impact d'une surface n'a aucune énergie résiduelle, une fraction seulement de l'énergie initiale est transmise sous forme de chaleur à la surface.

Les recherches relatives à l'énergie des molécules "réfléchies", que nous avons effectuées, ont montré que celle-ci était loin d'être nulle et avait, en général, le même ordre de grandeur que l'énergie des molécules incidentes.

## 1. METHODE DE MESURE

Pour déterminer les coefficients d'accommodation de molécules constituant un jet

moléculaire de haute énergie, par rapport à différentes surfaces, on utilise le principe d'une méthode de mesure, décrite il y a plusieurs années [2].

(a) *Mesure du coefficient d'accommodation proprement dit*

La méthode consiste d'une part à mesurer l'élévation de température  $\theta_m$  d'une plaquette du métal, vis-à-vis duquel on mesure  $a$ , lorsque celle-ci est soumise à l'impact du jet moléculaire, et d'autre part à déterminer l'intensité et l'énergie du faisceau.

La plaquette dont on mesure l'élévation de température, est fixée, ainsi qu'une plaquette identique, sur deux cadres par deux fils de nylon. L'une des plaquettes est disposée dans le jet moléculaire, l'autre est à l'extérieur du faisceau. On détermine, grâce à un thermocouple l'élévation de température  $\theta_m$  de la plaquette soumise à l'impact du jet moléculaire par rapport à l'autre plaquette qui est à la température absolue  $T$ . Les deux soudures du thermocouple sont fixées sur les faces arrières des plaquettes. On dispose entre les deux plaquettes, le fil qui a la plus faible conductivité thermique. Ce fil qui est très fin—quelques dixièmes de mm de diamètre—est boudiné, de manière à diminuer encore la conduction thermique entre les deux plaquettes (Fig. 1).

Le tout est disposé dans un appareil (Fig. 2) que nous avons appelé canon moléculaire, appareil décrit par ailleurs [1]. Cet appareil permet d'obtenir des jets moléculaires de gaz de nature très différente, pour des énergies comprises entre 200 et 12000 eV.

L'élévation de température  $\theta_m$  est donnée par l'équation suivante :

$$v_m a E_i = 2\epsilon\sigma[(T + \theta_m)^4 - T^4]. \quad (2)$$

Si cette élévation de température  $\theta_m$  est faible, de l'ordre du degré centigrade, on a l'équation suivante :

$$v_m a E_i = 8\epsilon\sigma T^3 \theta_m. \quad (3)$$

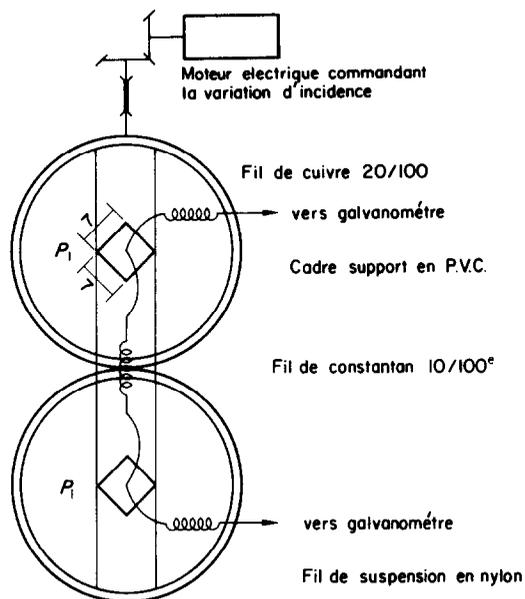


FIG. 1. Schéma du dispositif servant à tenir les plaquettes.

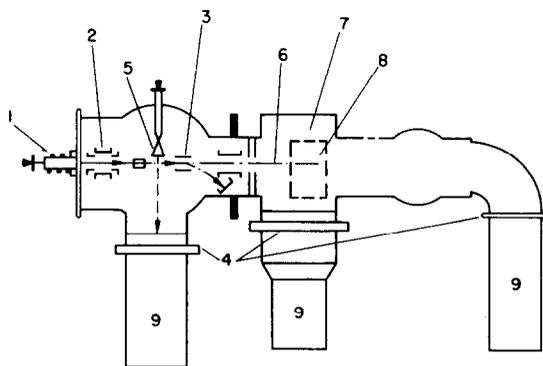


FIG. 2. Canon moléculaire.

- |   |                           |   |                   |
|---|---------------------------|---|-------------------|
| 1 | Source d'ions             | 6 | Molécules rapides |
| 2 | Lentilles de focalisation | 7 | Chambre d'essais  |
| 3 | Déflexion                 | 8 | Porte objet       |
| 4 | Pièges                    | 9 | Pompe à diffusion |
| 5 | Jet moléculaire lent      |   |                   |

Dans ces expressions,  $E_i$  est l'énergie cinétique d'une molécule incidente. On suppose dans l'équation précédente que l'énergie d'une molécule à la température  $T$  est négligeable devant  $E$ ;  $\epsilon$  est le facteur d'émissivité moyenne de la plaquette,  $\sigma$  la constante de Stéfán,  $v_m$  est

l'intensité du jet moléculaire en  $\text{mol}/\text{cm}^2 \text{ s}$ ;  $E_i$  est obtenu par la mesure directe de la vitesse des molécules [3],  $v_m$  est mesuré ainsi que nous l'indiquons plus loin.

Pour déterminer  $\epsilon$  (les valeurs réelles de  $\epsilon$  ne correspondant pas toujours à celles qui sont données par les tables des constantes), on étudie la variation de l'élévation de température (supposée faible) de la plaquette bombardée par le jet moléculaire en fonction du temps.

Elle est donnée par l'équation suivante :

$$\theta = \theta_m(1 - e^{-t/\tau}) \quad (4)$$

avec

$$\tau = \frac{mc}{8\epsilon\sigma T^3} = \frac{\rho ec}{8\epsilon\sigma T^3} \quad (5)$$

$m$ , étant la masse de la plaquette correspondant à l'unité de surface,  $\rho$ , sa masse spécifique,  $e$ , son épaisseur.

A partir de cette équation et de la courbe d'enregistrement, on peut déterminer  $\tau$  et  $\epsilon$  avec une précision de l'ordre de un à deux pour cent.

#### (b) Détermination de l'intensité du jet moléculaire

La détermination, la plus délicate, est *a priori* celle de l'intensité du jet moléculaire, étant donné que les jets moléculaires obtenus, ont des intensités comprises entre  $2 \cdot 10^9$   $\text{mol}/\text{cm}^2 \text{ s}$  et  $5 \cdot 10^{14}$   $\text{mol}/\text{cm}^2 \text{ s}$ .

Avant de mettre au point de nouvelles méthodes de détermination des intensités des jets moléculaires, nous avons utilisé une jauge à ionisation de sensibilité très grande, ayant une forme particulière. Cependant, la difficulté de reproductibilité des mesures, les modifications des indications de la jauge en fonction du temps, nécessitent un étalonnage constant d'où, d'une part une cause importante d'erreurs et d'autre part la nécessité de passer beaucoup de temps pour effectuer une mesure avec une précision admissible sinon suffisante. C'est pour cette raison que nous utilisons une méthode qui a été mise au point dans notre laboratoire [4].

Le jet moléculaire, ou une fraction déterminée de ce jet, est reçu dans un appareil ayant une forme étudiée pour que les molécules subissent plusieurs chocs contre la paroi de l'appareil avant d'en ressortir.

Si  $a_0$  est le coefficient d'accommodation moyen d'une molécule par rapport à la paroi de l'appareil, et si cette molécule subit  $n$  chocs avant de ressortir de celui-ci, on peut écrire :

$$a_t = [1 - (1 - a_0)^n] \quad (6)$$

Dans la plupart des cas,  $n$  est au moins égal à 5, et l'on voit immédiatement, en prenant pour  $a_0$  la valeur de 0,6, qui représente un ordre de grandeur des coefficients d'accommodation, que  $a_t$  est très voisin de 1. Il est d'ailleurs possible de faire une correction.

On mesure alors la différence de température  $\theta_1$ , à l'équilibre, entre l'appareil qui reçoit les molécules et un appareil identique disposé toujours dans la chambre d'essais du canon moléculaire (de manière à ce que les conditions de rayonnement soient identiques), mais hors de l'impact du jet moléculaire.

L'appareil utilisé a la forme indiquée sur la Fig. 3: il est simplement constitué par un tronc de cône s'appuyant sur un cône de même base mais d'angle au sommet différent.

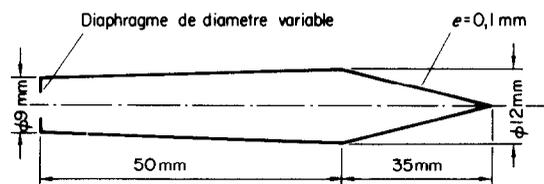


FIG. 3. Appareil à accommodation totale d'énergie.

Si l'on désigne par  $s_1$ , la surface de l'orifice d'admission des molécules, par  $S_1$ , la surface totale de l'appareil rayonnant dans la chambre d'essais, par  $\epsilon_1$  la valeur moyenne du facteur d'émissivité et si  $E_i$  représente l'énergie d'une molécule déterminée exactement grâce à la mesure de sa vitesse, on a :

$$v_m a_t s_1 E_i = \epsilon_1 \sigma S_1 [(T + \theta_1)^4 - T^4] \quad (7)$$

$\sigma$ , étant la constante de Stéfán,  $T$ , étant la température absolue dans la chambre d'essais. Si  $\theta_1$  est faible par rapport à  $T$ , on peut écrire :

$$v_m a_i s_1 E_i = 4\epsilon_1 \sigma S_1 T^3 \theta_1. \quad (8)$$

Le terme  $4\epsilon_1 \sigma S_1 T^3$  est déterminé grâce à la variation de l'élévation de température  $\theta'$  de l'appareil en fonction du temps qui est de la forme :

$$\theta' = \theta_1 (1 - e^{-t/\tau}) \quad (9)$$

avec

$$\tau_1 = \frac{m_p c}{4\epsilon_1 \sigma S_1 T^3}; \quad (10)$$

une telle variation est représentée sur la Fig. 4.

sensibilité est évidemment proportionnelle à l'énergie des molécules incidentes. En particulier, à 100 eV, elle est trente fois plus faible que pour 3000 eV. Avec les premiers appareils utilisés qui avaient une longueur totale de 10 cm, la durée des mesures n'excédait pas une heure. Avec les appareils que nous utilisons actuellement et dont la longueur ne dépasse pas 3 cm, la durée des mesures est de l'ordre de quelques minutes. La Fig. 5 représente un schéma de tout le dispositif qui est porté par un chariot dont les déplacements sont commandés de l'intérieur.

Lorsque nous mesurons l'intensité des jets moléculaires au moyen d'une jauge à ionisation, il fallait répéter les mesures pendant plusieurs jours pour avoir une précision de l'ordre de

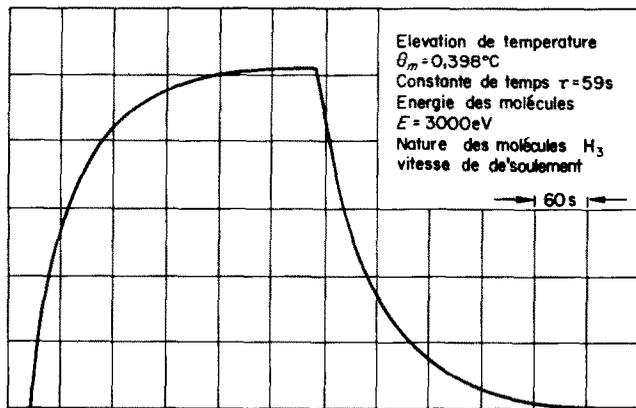


FIG. 4. Variation de la température de l'appareil à accommodation totale en fonction du temps.

Cette mesure du terme  $4\epsilon_1 \sigma S_1 T^3$  obtenue en déterminant d'une part la constante de temps  $\tau$  et la masse  $m_p$  de l'appareil, sa chaleur spécifique  $c$  étant connue, avec exactitude, permet de déterminer  $\epsilon_1$  avec précision.

Il est également facile d'étalonner directement l'appareil en envoyant dans celui-ci un faisceau d'ions ayant une intensité et une énergie données.

Avec les derniers appareils que nous avons construits, la sensibilité est telle que l'on peut mesurer une intensité de  $3 \cdot 10^9 \text{ mol/cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  pour une énergie de l'ordre de 3000 eV. Cette

10 à 20 pour cent. La méthode que nous utilisons actuellement a l'avantage d'être à la fois plus rapide, plus sensible et beaucoup plus précise.

Dans le cas où l'intensité du jet moléculaire est très faible, inférieure à  $10^{10} \text{ mol/cm}^2 \text{ s}$ , et pour une énergie plus petite que 1000 eV, nous utilisons une nouvelle méthode basée sur la mesure de l'émission électronique secondaire d'un ruban de tungstène, chauffé à une température comprise entre 600° et 800°C, sous l'impact du jet moléculaire. Les mesures sont très reproductibles.

Cette méthode permet de mesurer, avec

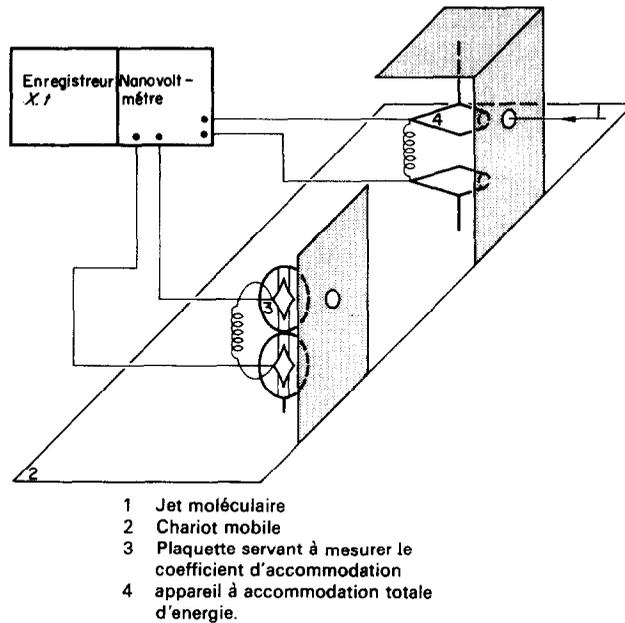


FIG. 5. Schéma du dispositif expérimental.

précision, des jets moléculaires ayant des intensités aussi faibles que  $10^6$  mol/cm<sup>2</sup>s. Il est d'ailleurs possible d'obtenir encore une sensibilité plus grande en envoyant, grâce à un champ électrique, les électrons émis par la surface du ruban de tungstène sur la première dynode d'un multiplicateur d'électrons [5].

## 2. DIFFERENTS FACTEURS PHYSIQUES INFLUENÇANT LES COEFFICIENTS D'ACCOMMODATION

Dans le cas de faibles énergies, c'est-à-dire en particulier pour les jets moléculaires d'origine purement thermique, les coefficients d'accommodation dépendent d'un grand nombre de facteurs physiques, en particulier de la nature de la surface solide et de sa propreté, de sa température, de la nature et de l'énergie des molécules incidentes. Nous renvoyons ceux qui sont intéressés par cette question, à deux monographies que nous avons publiées, l'une en 1952 [6] et l'autre en 1965 [7].

Rappelons simplement que dans le cas des faibles énergies, la propreté de la surface est

un facteur déterminant de la valeur des coefficients d'accommodation. Dans certains cas, il est possible d'avoir un coefficient d'accommodation très faible, de l'ordre de 0,05 avec une surface fortement dégazée et d'avoir, au contraire, un coefficient d'accommodation de l'ordre de 0,8 avec une surface non dégazée.

Dans le cas des jets moléculaires de haute énergie, les valeurs des coefficients d'accommodation dépendent, ainsi que nous le verrons plus loin, d'un certain nombre de paramètres, cependant, l'incidence du dégazage est moins prépondérante que pour les faibles énergies.

## 3. INFLUENCE DE DEGAZAGE

L'état de la surface joue un rôle assez important dans les valeurs des coefficients d'accommodation des molécules de haute énergie vis-à-vis d'une surface, toutefois, les variations que l'on observe suivant la propreté de la surface sont plus faibles pour les molécules de haute énergie, que pour les molécules ayant une énergie d'origine thermique.

Lorsque l'on dégaze une surface, le coef-

ficient d'accommodation augmente, mais l'augmentation est, en général, au maximum de l'ordre de 10 pour cent.

Ce résultat peut s'expliquer par le fait que, dans le cas de molécules de haute énergie, l'impact de celles-ci produit l'éjection des molécules appartenant à la couche gazeuse adsorbée par la surface.

Dans le cas où il existe une couche adsorbée, une partie de l'énergie des molécules incidentes sert à dégazer la surface, et si la pression du gaz dans laquelle baigne la surface solide n'est pas trop faible, cette couche se reforme plus ou moins rapidement, suivant l'intensité du jet moléculaire.

On peut admettre également que la pénétration à l'intérieur du solide est d'autant plus grande qu'aucune couche gazeuse ne le protège. Ces résultats sont d'ailleurs à rapprocher de ceux que nous avons obtenus dans l'étude du sputtering par impact sur une surface de jets moléculaires de haute énergie. Par exemple, on n'observe aucune pulvérisation du solide, ou une pulvérisation très faible, lorsque la surface n'est pas propre, même pour des énergies de jets moléculaires de l'ordre de 2500 eV. Par contre, dès que la surface est dégazée, on observe une pulvérisation plus ou moins importante, et le taux d'arrachement ou d'éjection, c'est-à-dire le nombre d'atomes éjectés par molécule incidente, peut atteindre une valeur égale à plusieurs unités.

#### 4. INFLUENCE DE L'ENERGIE

Les recherches effectuées entre 500 et 12000 eV montrent que les coefficients d'accommodation varient en fonction de l'énergie. En général, ils augmentent avec l'énergie. Cependant, il existe des exceptions. C'est ainsi que le coefficient d'accommodation de l'hydrogène monoatomique passe par un maximum égal à 0,895 pour une énergie de 8000 eV (Fig. 6). Ce résultat est assez exceptionnel, car nous n'avons trouvé aucun cas analogue dans le domaine d'énergies où nous avons opéré. Ce résultat peut s'expliquer, par le fait que les molécules monoatomiques

d'hydrogène pénètrent profondément à l'intérieur du solide et que, suivant l'importance de cette profondeur de pénétration, les phénomènes qui se produisent à l'intérieur du solide changent et viennent modifier la répartition énergétique de l'énergie cédée par la molécule durant son impact avec la surface.

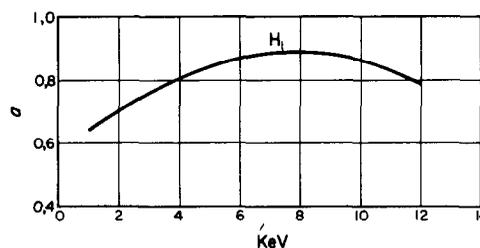


FIG. 6. Variation, en fonction de l'énergie, du coefficient d'accommodation de  $H_1$ , sur une plaquette en argent.

Dans certains cas, le coefficient d'accommodation reste sensiblement constant. C'est ce qui se produit, par impact sur une surface d'or de molécules monoatomiques d'hydrogène (Fig. 7). Le coefficient d'accommodation garde une valeur très voisine de 0,67, quelle que soit la grandeur de l'énergie comprise entre 750 et 12000 eV. Ceci nous montre incidemment, que pour un même gaz et un même type de molécule, les variations en fonction de l'énergie dépendent de la nature de la surface solide sur laquelle

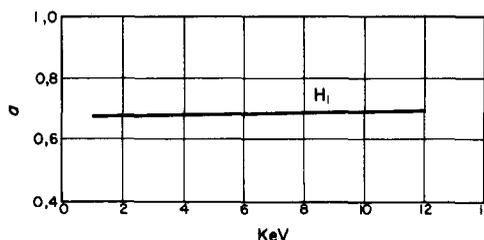


FIG. 7. Variation, en fonction de l'énergie du coefficient d'accommodation de  $H_1$ , sur une plaquette en or.

s'effectue l'accommodation. Cependant, dans le cas général, les coefficients d'accommodation augmentent lorsque l'énergie croît. On peut admettre que lorsque leur énergie augmente, les molécules pénètrent plus profondément à

l'intérieur du métal et les échanges énergétiques deviennent plus importants.

La Fig. 8 représente, pour une variation de l'énergie de 500 à 3000 eV, les coefficients d'accommodation des molécules d'argon vis-à-vis des surfaces d'aluminium, d'or, d'argent et de platine. Ces courbes montrent que les variations sont semblables pour les trois derniers métaux mais qu'elles sont plus faibles dans le cas de l'aluminium.

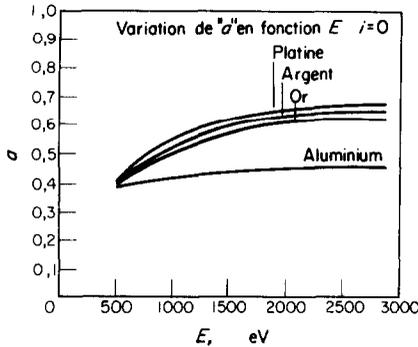


FIG. 8. Variation des coefficients d'accommodation des molécules d'argon en fonction de l'énergie.

Ces résultats, correspondant à des expériences effectuées il y a quelques années, indiquent des variations similaires à celles obtenues dans des recherches plus récentes.

La Fig. 9 donne les variations des coefficients d'accommodation de l'hydrogène diatomique par rapport à l'argent en fonction de l'énergie pour des valeurs comprises entre 1 et 12 KeV. Cette figure montre une augmentation régulière

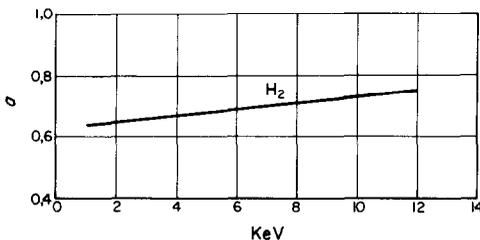


FIG. 9. Variation, en fonction de l'énergie, du coefficient d'accommodation de  $H_2$ , sur une plaquette en Ag.

de  $a$  qui varie de 0,65 à 0,755 lorsque l'énergie croît de 1 à 12 KeV.

### 5. INFLUENCE DE L'ANGLE D'INCIDENCE

Remarquons que lorsque l'angle d'incidence est différent de 0 l'équation (2) peut s'écrire sous la forme :

$$a = \frac{8\epsilon\sigma T^3\theta_m}{v_m E_i \cos i} \quad (11)$$

Nous avons pu avec l'appareil que nous avons décrit précédemment faire varier l'angle d'incidence du jet moléculaire de 0 à 75°. L'expérience montre que tout au moins dans le cas de l'argon, les coefficients d'accommodation diminuent lorsque l'angle d'incidence augmente.

Cette diminution relative n'est pas la même pour tous les métaux.

La Fig. 10 représente les variations du coefficient d'accommodation de l'argon en fonction de l'angle d'incidence pour les quatre métaux cités plus haut.

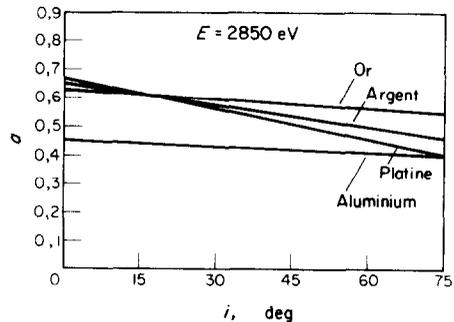


FIG. 10. Variation des coefficients d'accommodation des molécules d'argon, en fonction de l'incidence  $i$ .

Nous voyons que la diminution relative, lorsque l'angle d'incidence varie de 0° à 75°, est faible dans le cas de l'aluminium et qu'au contraire, elle est très grande dans le cas du platine.

### 6. INFLUENCE DE LA NATURE DES MOLECULES ET DE LEUR ATOMICITE

Dans les recherches que nous avons effectuées

sur les coefficients d'accommodation à haute énergie, nous avons opéré avec l'hélium et l'argon, et avec les différents types de molécules d'hydrogène et d'azote, ou plus exactement avec des jets moléculaires de haute énergie obtenus respectivement par échange de charges par résonance des ions  $H_1^+$ ,  $H_2^+$  et  $H_3^+$  avec  $H_2$  et  $N_1^+$ ,  $N_2^+$  et  $N_3^+$  avec  $N_2$ .

Les résultats obtenus montrent que d'une part les coefficients d'accommodation sur une même surface métallique dépendent de la nature des molécules qui accommodent leur énergie sur cette surface, et que d'autre part ils dépendent de l'atomicité du gaz.

En ce qui concerne les variations en fonction de l'atomicité, elles sont assez nettes. Les Figs. 11 et 12 représentent respectivement les variations des coefficients d'accommodation des molécules de  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  et de  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ , par rapport à l'argent. Ils permettent de voir

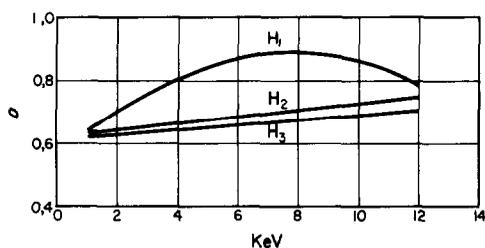


FIG. 11. Variation, en fonction de l'énergie, des coefficients d'accommodation de  $H_1$ ,  $H_2$  et  $H_3$ , sur une plaquette d'argent.

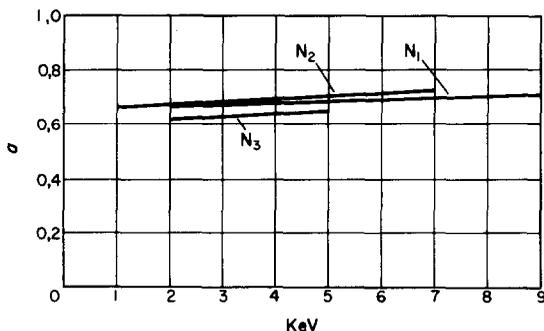


FIG. 12. Variation, en fonction de l'énergie, des coefficients d'accommodation de  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  sur une plaquette en argent.

que le coefficient d'accommodation dépend de la structure moléculaire.

L'ordre suivant lequel sont rangés les coefficients d'accommodation n'est pas toujours le même, c'est-à-dire, que dans le cas de l'hydrogène sur l'argent, le coefficient d'accommodation est d'autant plus élevé que l'atomicité est plus faible. Par contre, pour l'azote, les résultats ne sont pas réguliers et le coefficient d'accommodation de  $N_1$  est intermédiaire entre  $N_2$  et  $N_3$ .

### 7. INFLUENCE DE LA NATURE DE LA SURFACE

Nous avons opéré avec différentes surfaces : l'aluminium, l'argent, l'or et le platine. En particulier, dans le cas de l'argon, les résultats montrent que les coefficients d'accommodation, quelle que soit la nature des métaux considérés, ont le même ordre de grandeur. Cependant, il existe des différences plus ou moins notables en fonction de la nature de la surface ; par exemple, si l'on compare les valeurs et les variations des coefficients d'accommodation des différents types de molécules d'hydrogène avec l'argent et l'or, on trouve que l'allure des courbes et les valeurs des coefficients d'accommodation sont assez nettement différentes (Fig. 12 et 13).

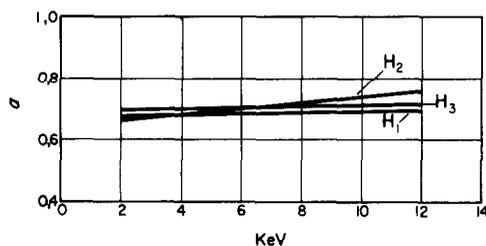


FIG. 13. Variation, en fonction de l'énergie, des coefficients d'accommodation de  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ , sur une plaquette en or.

Rappelons qu'en particulier, le coefficient d'accommodation de l'hydrogène monoatomique passe par un maximum dans le cas de l'argent et que, par contre, son coefficient d'accommodation par rapport à l'or est sensiblement constant (Fig. 6 et 7).

## CONCLUSION

Les recherches que nous venons d'exposer sont incomplètes, car pour connaître plus complètement les variations des coefficients d'accommodation en fonction de la nature des molécules gazeuses, il est nécessaire d'effectuer d'autres mesures. En particulier, il nous semble qu'il serait nécessaire, pour pouvoir dégager des lois générales, d'avoir des mesures effectuées avec une dizaine de gaz et sur une dizaine de surfaces différentes.

D'autre part, pour des raisons de précision, nous avons opéré à des énergies supérieures à 500 eV, or, il est incontestable que la mesure des coefficients d'accommodation à plus faible énergie, c'est-à-dire à énergies comprises entre 50 et 500 eV, donnera des résultats supplémentaires très intéressants. En effet, pour la plupart des métaux, le sputtering, à ces énergies, est plus faible et l'on aura une mesure du coefficient d'accommodation réel, étant donné que l'énergie due aux particules éjectées par la surface est très faible. Il semble, d'ailleurs, qu'elle diminue plus vite que l'énergie des molécules incidentes. La mesure des coefficients d'accommodation, telle que nous l'avons conçue, semble satisfaisante en ce sens que l'on obtient des résultats, en général, très reproductibles à 2 ou 3 pour cent près, à condition de dégazer la surface. Cependant, il y a lieu de signaler que lorsque l'on opère avec un jet moléculaire suffisamment intense, le dégazage se produit automatiquement et cela très rapidement par suite de l'impact du jet moléculaire.

Pour résumer, en quelques lignes, tous les résultats importants obtenus dans cette étude, indiquons :

(1) que les coefficients d'accommodation dépendent de la propreté de la surface; mais que cette influence est d'autant plus faible que l'énergie et l'intensité du jet moléculaire sont plus grandes.

(2) que les coefficients d'accommodation ne

sont pas égaux à l'unité, tout au moins jusqu'à une énergie égale à 12 KeV.

(3) que ces coefficients d'accommodation dépendent, dans une certaine mesure, de la nature du gaz et de la surface métallique; mais cette dépendance est relativement faible, c'est-à-dire qu'elle ne modifie pas l'ordre de grandeur des coefficients d'accommodation, qui est voisin de 0,6 pour des énergies de l'ordre de 500 eV, et de 0,7 pour une énergie de 12 KeV. Cet ordre de grandeur peut permettre dans certains problèmes, pour fixer les idées, de se donner une valeur arbitraire du coefficient d'accommodation en vue de calculer l'importance des phénomènes d'échauffement.

Les recherches futures doivent préciser d'autres influences sur la valeur des coefficients d'accommodation, en particulier, celle de la température du solide et de la nature de la face cristalline, pour les monocristaux.

## BIBLIOGRAPHIE

1. F. M. DEVIENNE, J. C. ROUSTAN et M. RIVES, Vitesses et répartition spatiale des molécules "réfléchies", après impact sur une surface d'aluminium d'un jet moléculaire de haute énergie, *J. Phys.* **27** (1966).
2. F. M. DEVIENNE, Chaleur—Nouvelle méthode de mesure du facteur total d'émission et du coefficient d'accommodation d'une surface, *C.R. Hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris* **243**, 27 (1956).
3. F. M. DEVIENNE, R. CLAPIER et J. C. ROUSTAN, Détection et mesure des vitesses de molécules et atomes neutres rapides, *C.R. Hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris* **254**, 2733 (1962).
4. F. M. DEVIENNE, Mesure de l'intensité des jets moléculaires de grande vitesse, *C.R. Hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris* **259**, 1497 (1964).
5. F. M. DEVIENNE, Détermination de l'intensité d'un jet moléculaire de haute énergie au moyen de l'émission électronique secondaire d'un ruban de tungstène chauffé. Application à la mesure des jets moléculaires de très faible intensité, *C.R. Hebd. Séanc. Acad. Sci., Paris* **261** (1966).
6. F. M. DEVIENNE, Conduction thermique dans les gaz raréfiés—coefficient d'accommodation, *Fascicule LVI. Mémorial des Sciences Physiques*, Gauthier Villars (1953).
7. F. M. DEVIENNE, Low density heat transfer, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 2, pp. 271–356, Academic Press, New York (1965).

**Abstract**—First, the author refers to the different phenomena that may be produced by the impact of a high energy molecule on a metallic surface. The measurement methods used to determine the accommodation coefficient are pointed out. Different physical parameters are influencing the values of accommodation coefficients, for instance, outgassing, whose influence is less important for high energy molecules than for thermal energy molecules. The accommodation coefficients generally increase in relation to the energy, and decrease when the incidence angle increases. They depend on the nature of the molecules and, for the same gas, on their atomicity. Lastly, the accommodation coefficients vary with the nature of the surface.

Research have been effected in the case of helium, argon, hydrogen, and nitrogen with metallic surfaces of aluminum, silver, gold, and platinum. The range of energy is between 500 and 12000 eV.

**Zusammenfassung**—Es wird zuerst auf verschiedene Phänomene hingewiesen, die beim Aufprall eines Moleküls hoher Energie auf eine metallische Fläche auftreten können. Die angewandten Messmethoden zur Bestimmung des Akkomodationskoeffizienten sind dargestellt. Verschiedene physikalische Parameter beeinflussen den Wert des Akkomodationskoeffizienten, z.B. das Ausgasen; sein Einfluss ist für Moleküle hoher Energie weniger von Bedeutung als für Moleküle thermischer Energie. Gewöhnlich nehmen die Akkomodationskoeffizienten mit der Energie zu, sie nehmen dagegen ab, wenn der Aufprallwinkel zunimmt. Sie hängen weiter ab von der Art der Moleküle und für gleiche Gase auch von deren Wertigkeit. Ausserdem ändern sich die Akkomodationskoeffizienten mit der Beschaffenheit der Oberfläche.

Untersuchungen wurden durchgeführt mit Helium, Argon, Wasserstoff und Stickstoff an metallischen Oberflächen aus Aluminium, Silber, Gold und Platin. Der Energiebereich lag zwischen 500–12000 eV.

**Аннотация**—Вначале автор останавливается на различных явлениях, которые могут возникнуть при ударе молекулы, обладающей высокой энергией, о металлическую поверхность. Указаны методы измерения коэффициента аккомодации. Различные физические параметры влияют на аккомодацию, например, разрежение, влияние которого, однако, менее значительно для молекул с высокой энергией, чем для молекул с тепловой энергией. Обычно коэффициенты аккомодации возрастают с энергией и уменьшаются при увеличении угла падения. Они зависят от природы молекул и (для одного и того же газа) от валентности. Наконец, коэффициенты аккомодации зависят от характера поверхности.

Исследования проводились с гелием, аргон, водородом и азотом и поверхностями из алюминия, серебра, золота и платины в диапазоне энергий от 500 — до 12000 эв.