HAL
open science

SUR L'ÉTUDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE DE L'ABSORPTION DE LA LUMIERE PAR LES SURFACES RUGUEUSES

R. Petit

To cite this version:

R. Petit. SUR L'ÉTUDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE DE L'ABSORPTION DE LA LUMIERE PAR LES SURFACES RUGUEUSES. Journal de Physique Colloques, 1981, 42 (C1), pp.C1-43-C1-56. 10.1051/jphyscol:1981104 . jpa-00220654

HAL Id: jpa-00220654

https://hal.science/jpa-00220654

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

JOURNAL DE PHYSIQUE
Colloque C1, supplément au n°1, Tome 42, janvier 1981 *page* C1-43

SUR L'ÉTUDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE DE L'ABSORPTION DE LA LUMIERE PAR LES SURFACES RUGUEUSES

R. Petit

Laboratoire d'Optique Electromagnétique, E.R.A. n° 597, Université Aix-Marseille III, Faculté des Sciences de St-Jérôme, 13397 Marseille cedex 13, France.

Résumé.- Les réseaux ou les réseaux croisés tracés sur un matériau de conductivité finie constituent un modèle simple de surface rugueuse. Nous avons donc essayé de prédire, à partir des équations de Maxwell, l'absorption de la lumière visible par ces surfaces particulières. Nous rendons compte ici de nos premières conclusions en insistant sur les difficultés rencontrées.

Abstract.- Finitely-conducting gratings and crossed gratings can be used as a simple model of corrugated surfaces. We therefore tried to predict from the Maxwell equations how these surfaces absorb the visible light. We report here our first conclusions and emphasize the difficulties we have encountered.

La réalisation des capteurs solaires pose au Physicien la question suivante : étant donné une longueur d'onde de cut-off λ_c , dépendant de la température de conversion mais toujours située dans le proche infrarouge, existe-t-il des surfaces matérielles parfaitement absorbantes pour $\lambda < \lambda_c$ et parfaitement réfléchissantes pour $\lambda > \lambda_c$? Plusieurs méthodes ont été envisagées pour réaliser au mieux une telle surface sélective /1/. L'une d'entre elles consiste à créer une rugosité sur un dioptre air-métal (ou plus généralement air-milieu conducteur) dans l'espoir de considérablement diminuer son pouvoir réflecteur dans le visible. Cet effet est généralement expliqué qualitativement de la façon suivante. Si la rugosité est due à la création de crevasses dont la dimension caractéristique d est grande devant la longueur d'onde λ, on dit que les rayons incidents, piégés dans ces crevasses, y subissent de nombreuses réflexions qui affaiblissent rapidement leur intensité. Dans le cas contraire ($d \ll \lambda$), on assimile la rugosité superficielle à une couche de transition à l'intérieur de laquelle les constantes optiques passent continûment de celles de l'air à celles du milieu conducteur ; on invoque alors un effet d'adaptation d'impédance. Pour quiconque a une certaine expérience en matière de propagation d'ondes électromagnétiques, il est clair que ces explications, si séduisantes soient-elles, doivent être regardées avec circonspection. Que penser, en particulier

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/jphyscol:1981104

du"domaine de résonance" très souvent rencontré en pratique et pour lequel d et λ sont du même ordre de grandeur ? D'un point de vue purement théorique, la question semble pouvoir être tranchée à partir des équations de Maxwell et de l'équation de la surface rugueuse S séparant l'air du milieu d'indice ν (supposé connu à partir de mesures). Il s'agit en fait de résoudre un système différentiel compte tenu des classiques conditions de passage sur S (continuité des composantes tangentielles du champ électrique $\vec{E}$ et de l'excitation magnétique $\vec{H}$)et de certaines conditions de rayonnement nécessairement vérifiées à l'infini (quand on s'éloigne indéfiniment de S). Malheureusement, de grosses difficultés apparaissent sur le plan numérique et, en dépit de l'aide fournie par les plus puissants ordinateurs, on ne sait toujours pas effectuer cette résolution pour une surface S quelconque. Un cas cependant a été étudié avec succès au cours des quinze dernières années. C'est celui des réseaux de diffraction : étant donné une fonction périodique f(x) de période d, S est alors la surface cylindrique y = f(x). La rugosité est créée par une infinité de traits rectilignes (sillons) équidistants, parallèles entre eux, et dont le profil de la section droite est décrit par f(x). La Théorie Electromagnétique des réseaux étant un de nos principaux thèmes de recherche - celui surtout par lequel nous nous sommes fait connaître - nous avons pensé pouvoir être utile à l'Energie Solaire en faisant profiter les thermiciens de nos nombreux résultats numériques : l'existence de réseaux métalliques très absorbants, et donc très mauvais pour la spectroscopie optique, ne méritait-elle pas d'être signalée aux ingénieurs en quête de capteurs sélectifs ? C'est dans cet esprit que j'ai engagé notre petit groupe dans l'A.T.P. Matériaux. Je nous croyais suffisamment armés pour résoudre rapidement le problème des "réseaux croisés", c'est-à-dire des surfaces y = f(x,z) où f est une fonction périodique par rapport à chacune des variables x et z (périodes d_1 par rapport à x et d_2 par rapport à z). On espérait que ces surfaces, ressemblant à une gaufre, à un carton à oeufs ou encore aux panneaux anéchoïdes utilisés comme "pièges à ondes", étaient susceptibles de donner lieu au phénomène d'absorption sélective tout en étant beaucoup moins sensibles à la polarisation que les réseaux. Où en est-on aujourd'hui après deux années d'étude ? On peut dire que nous avons largement contribué à l'étude des réseaux croisés sans toutefois satisfaire la curiosité des thermiciens. Compte tenu des difficultés numériques rencontrées, nous ne sommes pas encore capables de prévoir rigoureusement les propriétés optiques des dioptres suffisamment bosselés pour présenter une absorption sélective intéressante. Comme il ne semble pas que nous devions y parvenir prochainement, il est sans doute plus raisonnable de rediscuter avec les expérimentateurs pour définir des objectifs moins ambitieux que l'étude générale initialement envisagée.

Le bref compte-rendu qui suit a pour but d'éclairer cette discussion. Je parlerai bien entendu en tant que "responsable scientifique d'une opération" et, même si j'ai personnellement préparé cette communication en questionnant souvent l'Ordinateur au cours des deux derniers mois, je me dois de rappeler que la grande majorité des travaux évoqués résultent d'un travail de groupe dont les principaux artisans ont été mes collaborateurs habituels (M. Cadilhac, D. Maystre, M. Nevière, P. Vincent) et deux chercheurs venu des antipodes (R.C. Mc Phedran et G.H. Derrick de l'Université de Sydney).

1. Rappel sur les propriétés des réseaux.- Quand une onde monochromatique se propageant dans un diélectrique d'indice réel ν_1 rencontre la surface $y = f(x)$ séparant ce diélectrique ($y > f(x)$) d'un milieu conducteur ($y < f(x)$) d'indice complexe ν_2 , elle donne naissance à un nombre fini N d'ondes planes diffractées par réflexion. La fraction de l'énergie incidente qui se retrouve dans l'onde diffractée d'ordre n est, par définition, l'efficacité e_n associée à cet ordre. Grâce à une longue étude théorique commencée au début des années 60 pour les réseaux parfaitement conducteurs /2/ et progressivement étendue aux réseaux conducteurs éventuellement recouverts de couches diélectriques ou métalliques /3/, notre Laboratoire dispose aujourd'hui de programmes capables de calculer rigoureusement (mises à part les erreurs inévitablement liées à l'utilisation d'un quelconque algorithme numérique) les efficacités d'un réseau à partir des caractéristiques de l'onde incidente (angle d'incidence, polarisation), des indices ν_1 et ν_2, et de la fonction $f(x)$ qui décrit le profil des sillons. On en déduit immédiatement l'absorption a, c'est-à-dire la fraction de l'énergie incidente absorbée :

$$a = 1 - \Sigma_{n=o}^{N} e_n \qquad (1)$$

Tant que le pas (la période d de $f(x)$) ne dépasse pas quelques longueurs d'ondes ($d < 5\lambda$), on peut compter sur une précision d'au moins 10^{-2} , à condition toutefois que la profondeur h des sillons ne soit pas trop grande. Toutes les profondeurs couramment rencontrées pour les réseaux utilisés en spectroscopie (elles dépassent rarement la moitié du pas) sont naturellement permises puisque c'est pour elles que nos programmes ont été initialement écrits, mais des difficultés numériques surgissent tôt au tard quand on augmente h/d ou h/λ. On verra toutefois au paragraphe 3 qu'on peut parfois obtenir des résultats pour des valeurs très élevées de ces deux paramètres (voir Fig. 4).

Faute de temps, il n'est pas question de décrire, même sommairement, les diverses méthodes utilisées en Théorie Electromagnétique des Réseaux ; le lecteur intéressé par une bibliographie détaillée pourra se reporter

à deux communications faites aux deux dernières conférences internationales d'Optique de Tokyo /4/ et Madrid /5/. Il pourra même bientôt se mettre plus rapidement au courant en consultant un ouvrage de synthèse publié en langue anglaise par Springer-Verlag dans la série "Topics in Current Physics" /6/.

Dans l'optique "Energie Solaire", il faut surtout retenir qu'en utilisant des réseaux, une très forte absorption peut surtout se produire dans l'une des deux circonstances suivantes :

a) avec des réseaux peu profonds lorsque le champ magnétique est parallèle aux sillons pourvu que λ/d et l'incidence θ soient liés par une relation convenable /7,8/. L'absorption, qui peut même être totale, peut alors recevoir une interprétation en termes de plasmons de surface. Un réseau peut ainsi se comporter comme un corps noir mais, puisque des conditions très strictes sont pour cela imposées non seulement à la longueur d'onde mais aussi à l'incidence et à la polarisation, ce curieux phénomène semble à priori sans grand intérêt pour la réalisation des capteurs à large bande que nous avons en vue.

b) avec des réseaux très profonds comme le montre la figure 1. On notera qu'ici encore l'effet est sensible à la polarisation. L'interprétation physique n'est pas évidente.

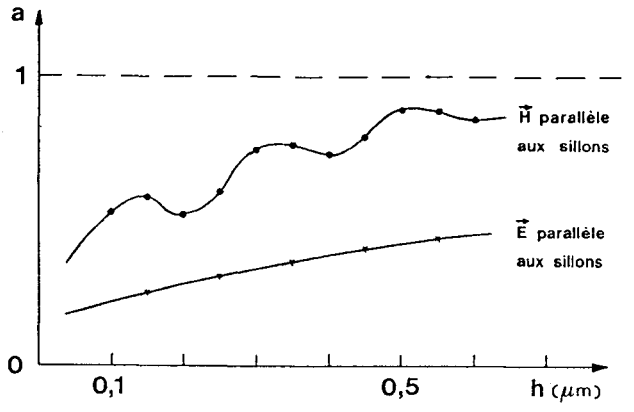

Fig. 1.- Cette figure extraite du dossier fourni lors de la création de l'A.T.P. montre, pour λ = 0,55 μm, l'absorption a d'un réseau sinusoïdal en or, de pas d = 0,25 μm, éclairé en incidence normale. On a porté en abscisse la profondeur h des sillons.

2. L'absorption d'une onde plane par un réseau croisé.- Les propriétés d'un tel réseau (y = f(x,z)) semblent à priori pouvoir être obtenues par une généralisation évidente des méthodes mises en oeuvre pour l'étu-

de du réseau simple (y = f(x)). Malheureusement, du point de vue numérique, l'introduction d'une dimension supplémentaire se paie très cher : les calculs deviennent si volumineux qu'ils ont du mal à être effectués par les plus puissantes machines (UNIVAC 7600, par exemple). L'étude des réseaux croisés impose donc en fait une réflexion théorique nouvelle : le choix d'une méthode de calcul. Cette réflexion qui, début 78, constitua le début de nos travaux, nous conduisit à l'élimination des méthodes intégrales ([1]) pourtant utilisées avec fruit dans le cas des réseaux simples : ces méthodes semblaient inévitablement exiger de l'ordinateur une capacité en mémoires centrales peu réaliste et conduire à des durées de calcul peu raisonnables. Nous nous orientâmes donc vers les méthodes différentielles ([1]) et vers une méthode nouvelle qui n'avait pratiquement jamais été utilisée pour les réseaux simples. Trois programmes furent alors mis au point /9,10,11/, non seulement pour les réseaux métalliques, mais aussi pour les réseaux diélectriques qui nous intéressent en raison de leur transmission sélective dans l'ordre 0 : obtention de filtres colorés sans utilisation de pigments, par déformation convenable de la surface plane d'une lame transparente /12/. On a bien entendu vérifié que ces programmes donnent les mêmes résultats dans leur domaine commun d'utilisation, c'est-à-dire quant ils fournissent des valeurs numériques en accord avec nos habituels critères de validité (convergence des approximations numériques successives, conservation de l'énergie, relations de réciprocité). Deux d'entre eux /9,10/ qui aboutissent à la résolution d'un système différentiel se révèlent malheureusement inutilisables (pour des raisons numériques encore mal comprises) dans le cas de matériaux fortement conducteurs ; ceci leur interdit d'explorer la zone du proche infrarouge et les rend donc de faible intérêt pour nos préoccupations solaires actuelles. Le troisième (qui exploite un changement de variables, destiné à simplifier l'expression des relations de passage en faisant du réseau une surface de coordonnées) ne possède pas cet inconvénient. Il tolère bien les fortes conductivités mais, en dépit des améliorations qui lui ont été apportées l'an dernier à Sydney, il n'est pas encore capable de s'attaquer aux fortes profondeurs de modulation ([2]) qui semblent nécessaires pour obtenir le type d'absorption que nous recherchons. Même en acceptant le coût élevé des calculs, il ne semble

---

([1]) On parle respectivement de méthode intégrale et de méthode différentielle quand le problème du réseau se ramène à la résolution numérique d'un système d'équations intégrales ou d'équations différentielles.

([2]) On appelle ainsi la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de f(x,z).

pas que l'on puisse dépasser une profondeur de modulation h supérieure au pas (la valeur commune des deux périodes supposées égales pour simplifier) et dans ces conditions, pour un réseau en cuivre éclairé en incidence normale, on prévoit une longueur d'onde de cut-off λ_c voisine de 0,6 µm même pour des valeurs du pas aussi petites que 0,2 µm (Fig.2). Des calculs effectués en Australie et non encore publiés /13/ montrent que l'amélioration d'absorption, observée en incidence normale pour $\lambda < \lambda_c$, se maintient pour des angles d'incidence notables (30° par exemple) et est très peu sensible à une rotation du plan d'incidence autour de la normale Oy au plan moyen du réseau. La polarisation ne semble pas non plus être un facteur déterminant. Ainsi le tracé d'un réseau croisé sur un dioptre plan air-cuivre permet d'obtenir une courbe d'absorption ayant la forme désirée, mais la valeur de λ_c reste beaucoup trop faible. D'après Mac Phedran /13/, l'accroissement souhaité de cette valeur du cut-off (il faudrait atteindre par exemple 1,5 µm) pourrait vraisemblablement être obtenue en augmentant considérablement h. Sans doute faudrait-il que le rapport h/d soit de l'ordre de quelques unités. Mais dans ces conditions le calcul n'est plus possible ! En dépit de l'énorme travail de programmation réalisé, nous restons donc sur notre faim.

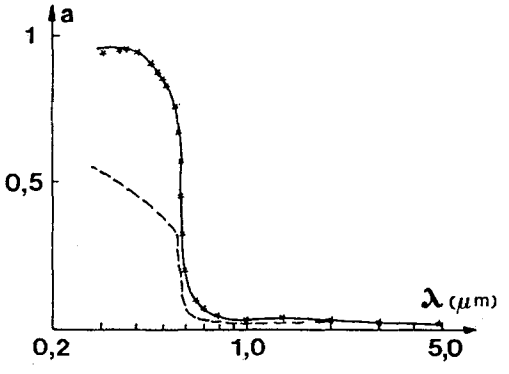

Fig. 2 .- Absorption d'un réseau croisé en cuivre utilisé en incidence normale (d'après une illustration empruntée à /6/).
$y = \frac{h}{4}\left(\sin\left(\frac{2\pi x}{d}\right) + \sin\left(\frac{2\pi z}{d}\right)\right)$ h=d=0,20 µm ; la courbe en trait plein correspond à un "calcul exact" sur ordinateur. Les croix sont les valeurs prévues par la règle empirique signalée au paragraphe 2. La courbe en tirets correspond au dioptre.

Il semble cependant important de rappeler une règle empirique déduite de l'examen des résultats obtenus pour les faibles valeurs de h/d. Cette règle s'applique pour les bons conducteurs dans le cas particulier où :

$$f(x,z) = f_1(x) + f_2(z) \qquad (2)$$

On sait qu'une onde plane tombant sur un réseau croisé donne naissance à des ondes diffractées dont chacune est repérée par un couple de deux entiers n et m. Quand $\frac{h}{d} < 0,3$, on a constaté /14/ qu'à une précision de l'ordre du centième :

$$e_{n,m} = \frac{1}{R} \; e_{1,n} \; e_{2,m} \qquad (3)$$

R étant le pouvoir réflecteur du dioptre y = o calculé par les formules de Fresnel dans les mêmes conditions d'incidence et de polarisation, $e_{1,n}$ et $e_{2,m}$ les efficacités dans les ordres n et m quand on remplace le réseau croisé respectivement par les réseaux d'équations $y = f_1(x)$ et $y = f_2(z)$. Dans le cas particulier de l'incidence normale, et en supposant f_1 et f_2 égales à une même fonction f de période d, une seule onde diffractée existe dès que $\lambda/d > 1$. C'est l'onde spéculairement réfléchie dont l'efficacité $e_{0,0}$, alors indépendante de la polarisation, est donnée par :

$$e_{0,0} = \frac{1}{R} \; e_{0,1} \; e_{0,2} \qquad (4)$$

où $e_{0,1}$ et $e_{0,2}$ ne sont autres que l'efficacité dans l'ordre zéro du réseau simple y = f(x) pour les deux cas fondamentaux de polarisation ($\vec{E}$ ou $\vec{H}$ parallèle aux sillons). L'absorption a (fraction de la lumière incidente absorbée) est donc :

$$a = 1 - \frac{1}{R} \, e_{0,1} \; e_{0,2} \qquad (5)$$

Notre expérience numérique semblant montrer que $e_{0,1}$ et $e_{0,2}$ sont toujours inférieures à R, on en déduit les deux inégalités suivantes :

$$a > 1 - e_{0,2} \qquad \text{et} \qquad a > 1 - e_{0,1} \qquad (6)$$

Elles montrent que l'absorption du réseau double (ici indépendante de la polarisation) est toujours supérieure à celle du réseau simple utilisé dans les meilleures conditions. Qui plus est, et d'après (3), il suffit que l'une des deux efficacités $e_{0,1}$ ou $e_{0,2}$ s'annule pour que le réseau croisé soit totalement absorbant quelle que soit la polarisation et, par suite, en lumière naturelle. Cette possibilité d'absorption totale a d'ailleurs été récemment observée sur un réseau en or, conformément aux prédictions théoriques /15/.

On notera bien que la règle proposée (3) n'a évidement aucune raison de

rester valable pour des grandes valeurs du rapport $\rho = h/d$. Sa précision décroit avec ρ d'une façon que nous ignorons pour devenir tôt ou tard rapidement inopérante. Avec un peu d'optimisme, on peut cependant espérer qu'elle puisse nous permettre de prévoir au moins qualitativement les propriétés des réseaux croisés profonds. Il semble par exemple raisonnable de penser que si, dans l'un ou l'autre des deux cas fondamentaux de polarisation, un réseau simple suffisament profond permet d'obtenir un cut-off bien placé, le réseau croisé associé constitue un bon absorbeur solaire. Ce sont des considérations de ce type qui nous ont récemment poussé à reprendre l'étude des réseaux profonds et qui justifient les deux paragraphes suivants.

3. L'absorption sélective par un réseau en cuivre.- Pour faire cette étude - étude académique qui n'a pas la prétention de déboucher sur des applications immédiates - j'ai adopté des indices récemment publiés /16/ et relatifs à du métal fraichement évaporé. Il est possible que d'autres valeurs provenant de tel ou tel laboratoire soient meilleures... A mon avis, la question n'est pas là, les ordres de grandeur sont certainement bons et la précision suffisante pour analyser les effets purement géométriques de la profondeur h des sillons sur l'absorption. Pour un réseau sinusoïdal d'équation $y = \frac{h}{2}(1 + \cos\frac{2\pi x}{d})$ éclairé en incidence normale, seule existe l'onde diffractée d'ordre 0 pourvu que $\lambda/d > 1$. C'est dans ces conditions que j'ai utilisé le plus performant de nos programme /3/ pour tracer de nombreuses courbes donnant l'efficacité e_0 en fonction de d. Le tableau I donne quelques valeurs numériques correspondant intentionnellement à de très fortes valeurs de h pour montrer nos possibilités en matière de réseaux simples profonds. Pour chaque couple (λ,h), on y trouve l'absorption dans chacun des deux cas usuels de polarisation. La dernière colonne donne l'absorption $a_0 = 1 - \left|\frac{\nu_2 - 1}{\nu_2 + 1}\right|^2$ du miroir de cuivre (h=o). Les courbes de la figure 3 correspondent à la deuxième colonne du tableau (h = 0,7 µm). Celles qui correspondent aux deux autres colonnes (h = 0,5 µm et h = 1 µm) ont une forme semblable. Leur défaut majeur est de correspondre à un cut-off trop faible et très peu différent de celui observé aux faibles profondeurs. J'ai vérifié que la même forme, avec toujours λ_c voisin de 0,65 µm, se maintient pour d = 0,2 µm. Ainsi, dans la mesure où la règle empirique (3) peut être prise comme guide, il ne semble pas que l'utilisation de fortes modulations ($h/d \sim 3$, $d \sim 0,2$ µm) entraine un important déplacement du cut-off vers les grandes longueurs d'onde. Je serai donc personnellement enclin à penser que l'obtention d'une absorption voisine de l'unité par introduction d'une rugosité de surface n'est possible que si le pouvoir réflecteur du matériau n'est déjà pas très bon (de l'ordre de 0,6 peut-être). Mais, répétons-le, cette conclusion est sujette à caution puis-

qu'elle ne provient pas de calculs rigoureux mais de l'utilisation peut-être abusive d'une règle empirique (3) dégagée à partir de résultats obtenus pour des faibles valeurs de $\rho = h/d$.

λ en µm	h = 0,5 µm		h = 0,7 µm		h = 1,0 µm		a_0
0,451	0,88	1	0,97	1	1	1	0,46
0,471	0,84	0,99	0,93	1	0,99	1	0,45
0,496	0,78	0,98	0,87	1	0,96	1	0,42
0,521	0,74	0,96	0,82	0,98	0,92	1	0,41
0,549	0,70	0,94	0,78	0,97	0,87	1	0,38
0,582	0,55	0,85	0,62	0,92	0,72	0,98	0,36
0,617	0,21	0,45	0,25	0,68	0,30	0,63	0,10
0,660	0,11	0,30	0,13	0,39	0,16	0,41	0,06
0,705	0,09	0,25	0,10	0,27	0,11	0,31	0,04
0,756	0,08	0,23	0,09	0,23	0,10	0,24	0,04
0,821	0,07	0,18	0,08	0,20	0,09	0,21	0,04
0,892	0,06	0,15	0,07	0,20	0,08	0,20	0,03
0,984	0,05	0,12	0,06	0,20	0,07	0,16	0,03
1,14	0,05	0,12	0,06	0,17	0,06	0,19	0,03

Tableau I.- Absorption théorique d'un réseau sinusoïdal en cuivre de pas d = 0,3 µm. Pour une valeur donnée de h, on donne successivement et pour chaque longueur d'onde la valeur prévue pour l'absorption en supposant le champ électrique, puis le champ magnétique parallèle aux sillons. Deux chiffres significatifs seulement ont été conservés.

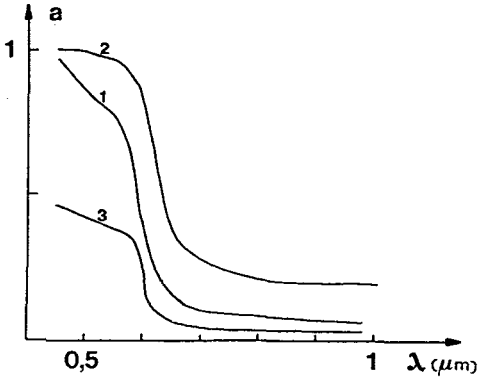

Fig.3.- Absorption théorique d'un réseau sinusoïdal en cuivre éclairé en incidence normale.
h = 0,7 µm. d = 0,3 µm.
1. $\vec{E}$ parallèle aux sillons.
2. $\vec{H}$ parallèle aux sillons.
3. Dioptre air-cuivre.

4. Equivalence entre une surface rugueuse et un milieu stratifié.- Pour essayer d'analyser l'effet de rugosité, on a souvent utilisé le modèle de la couche de transition jouant le rôle d'adaptateur d'impédance. Pour des valeurs suffisamment petites de d/λ, on admet alors que tout se passe comme si l'onde incidente, incapable d'apprécier les détails du relief, effectuait une certaine moyenne sur les constantes optiques et remplaçait la région des sillons par une couche inhomogène dont l'indice dépend de la seule variable y. La validité de ce modèle peut être testée dans le cas du réseau simple ($y = f(x)$) dans la mesure où nous savons alors faire le calcul exact. Voici un exemple. Proposons nous de remplacer un réseau par une bande inhomogène ($\min f(x) < y < \max f(x)$) séparant un demi-espace vide ($y > \max f(x)$) de permittivité ε_0 d'un demi-espace ($y < \min f(x)$) rempli d'un matériau de permittivité $\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \nu_2^2$. Dans la bande inhomogène, la permittivité $\varepsilon(y)$ est donnée par :

$$\varepsilon(y) = \frac{1}{d} \int_0^d \varepsilon(x,y)\, dx. \qquad (7)$$

Il est facile de vérifier que, dans le cas d'un réseau sinusoïdal ($y = \frac{h}{2} x \cos(1 + \cos \frac{2\pi x}{d})$), cette fonction ne dépend pas de d, mais uniquement de h. Le pouvoir réflecteur R_h d'une telle structure (et par suite son absorption $a_h = 1 - R_h$) peut être calculé rapidement par intégration numérique d'une équation différentielle, intégration pour laquelle nous possédons des programmes efficaces. Bien entendu, en incidence normale, R_h est indépendant de la polarisation, contrairement aux efficacités du réseau.

La figure 4 résume une étude effectuée à 0,9 µm sur l'aluminium ($\nu_2 = 0{,}96 + 7{,}70\, i$). Le pouvoir réflecteur en l'abscence de modulation est dans ce cas :

$$R_o = \left|\frac{\nu_2 - 1}{\nu_2 + 1}\right|^2 = 0{,}95$$

et $R_h = 0{,}70$. Le calcul rigoureux des efficacités dans l'ordre 0 a pu être effectué jusqu'à des valeurs de d très faibles : un dépassement de capacité (over flow) n'est intervenu que pour d = 0,01 µm et je pense que les résultats donnés sont significatifs (erreur absolue de l'ordre du centième) tant que d est supérieur à 0,05. On constate que, si le pas d est de l'ordre du dixième de micron, aucune des deux efficacités n'est proche de 0,70 et ceci semble enlever tout intérêt pratique à la moyenne que nous avons effectuée.

Plusieurs hypothèses peuvent être émises quant à l'allure des courbes pour les très faibles valeurs de d :

a) les deux efficacités finissent par atteindre 0,70, comme on

semble parfois l'admettre,

b) l'une des deux efficacités tend ver 0,70, l'autre vers une valeur différente obtenue en moyennant une autre fonction (pourquoi pas $1/n^2$ par exemple),

c) aucune des deux tend vers 0,70 car, quelle que soit la polarisation, la moyenne n'a pas été faite sur la fonction adéquate.

Nous sommes encore dans l'impossibilité de conclure, pas plus théoriquement que numériquement ([3]). Des considérations plus intuitives que rigoureuses (et sans doute familières aux radioélectriciens) nous poussent cependant à penser que pour envisager de faire la moyenne (3) la largeur d'un sillon doit être supérieure à la profondeur de pénétration du métal. Ceci se traduit par une inégalité du type $d < \lambda/2 \ \mathrm{Im}\ \{\nu_2\}$ qui n'est vérifiée pour aucun des calculs utilisés pour tracer les courbes de la figure 4.

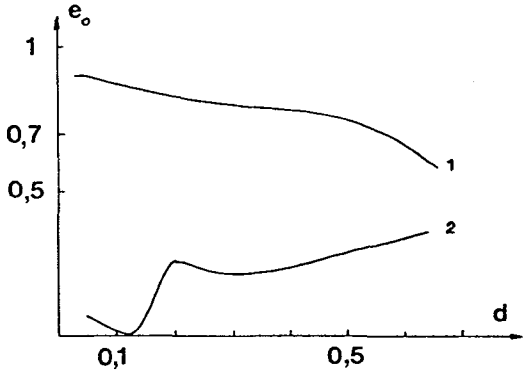

Fig.4.- Efficacités dans l'ordre 0 en fonction du pas pour un réseau en aluminium éclairé en incidence normale. h = 1,5 µm, λ= 0,9, λ/d >1
1. $\vec{E}$ parallèle aux sillons.
2. $\vec{H}$ parallèle aux sillons.

Il serait aussi intéressant de comprendre le phénomène physique entrainant l'annulation du pouvoir réflecteur au voisinage de d = 0,12 µm lorsque $\vec{H}$ est parallèle aux sillons. Il ne s'agit pas d'un effet de plasmon qui exigerait pour λ/d des valeurs voisines d'un entier. J'ai tracé d'autres courbes correspondant à d'autres valeurs de h. Il semble que le "zéro" (qui n'est peut-être d'ailleurs qu'un minimum très accusé) se translate légèrement vers la gauche quand h diminue. Mais comme nous sommes à la limite du domaine d'utilisation de nos programmes, il est peut-être sage de ne pas conclure. Doit-on en particulier prévoir, par utilisation abusive de (3), que le réseau croisé associé au"zéro" est un excellent absorbeur ?

([3]) Le problème aurait très récemment été résolu par l'équipe de Sidney pour un réseau lamellaire diélectrique /13/.

5. Amélioration de l'absorption d'un empilement de couches par la création d'une rugosité de surface.- On sait qu'un miroir de cuivre recouvert d'une couche de carbone peut constituer un bon absorbeur solaire. On peut se demander si les propriétés d'un tel absorbeur peuvent être encore améliorées en remplaçant le miroir par un réseau croisé. Cette question a déjà été abordée par R.C. Mc Phedran à la réunion de Cargèse (1978). Elle a depuis été étudiée à Sydney à l'aide d'un programme signalé au paragraphe 2 /11/. Les résultats récents ont donc été obtenus hors de notre laboratoire et toutes mes connaissances se fondent sur des relations épistolaires avec nos collègues australiens /13/. Les figures 5a et 5b, extraites d'un livre en cours d'édition /6/, comparent l'absorption théoriquement prévue pour un réseau croisé en cuivre recouvert de carbone (trait plein) à celle d'un plan de cuivre recouvert de la même épaisseur de carbone (courbe en tirets).

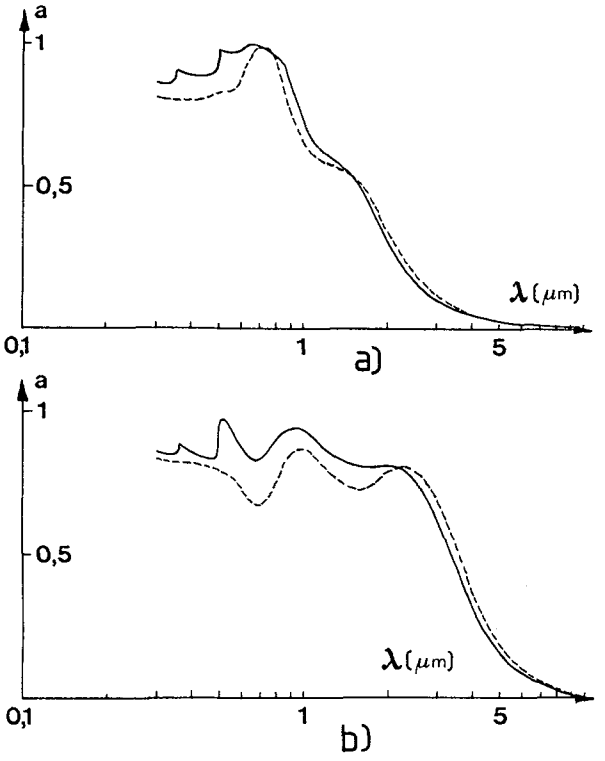

Fig.5.- En incidence normale, absorption d'un réseau sinusoïdal croisé en cuivre recouvert de carbone comparé à celle d'un plan recouvert de la même épaisseur de carbone (courbe en tirets). Les deux périodes d_1 et d_2 sont égales à 0,5 μm et la profondeur de modulation du cuivre est de 0,20 μm. L'épaisseur de carbone est 0,055 μm (a) ou 0,12 μm (b).

On constate qu'il est possible d'améliorer la réflexion sélective d'une façon dont je m'avoue incapable d'apprécier l'importance pour les applications. A première vue, il ne s'agit pas d'une amélioration très spectaculaire. Je me dois cependant de signaler que l'examen d'une dizaine de courbes non encore publiées /13/ montre que cette amélioration se maintient, ou même se renforce légèrement, quand on s'éloigne de l'incidence normale, et ceci pour diverses configurations de polarisation. Nous aimerions connaître l'avis des thermiciens sur l'intérêt pratique de ce genre d'étude. S'ils se montraient intéressés, il serait peut-être souhaitable, ici encore, d'entreprendre une étude systématique en utilisant le modèle du réseau simple pour lequel existe un programme /3/ bien au point conduisant à des temps de calcul compatibles avec un budget universitaire.

6. Conclusions.- Même si elles n'ont pas jusqu'ici débouché sur quelque recette directement utile à la captation de l'énergie solaire, les recherches entreprises par notre équipe dans le cadre de l'A.T.P. Matériaux ont été très profitables sur le plan général ; elles nous ont permis d'affronter de difficiles problèmes de propagation jusqu'ici négligés par manque d'intérêt pratique. Certains côtés négatifs de nos résultats n'ont fait que renforcer notre intérêt pour l'étude des réseaux profonds qui restera sans aucun doute un de nos thèmes de recherche au cours des prochaines années. Mais, puisque la mise au point de programmes généraux n'est pas pour demain, il faudrait peut-être restreindre nos ambitions initiales en fixant, dans un premier temps, des objectifs ponctuels plus modestes mais susceptibles d'intéresser directement les thermiciens ayant clairement orienté leurs recherches vers le Programme Solaire. J'espère que les discussions d'Ajaccio nous aideront dans cette voie car, nos préoccupations habituelles nous tenant assez éloignés des problèmes thermiques, nous avons du mal à recenser les problèmes précis, relevant de notre spécialité, pour lesquels les expérimentateurs apprécieraient une aide théorique.

Bibliographie

/1/ Spitz J, Thin Solid Films, 45, (1977) 31-44

/2/ Petit R, Rev. Opt., 45, (1966) 249-76, 353-70

/3/ Maystre D, J. Opt. Soc. Am., 68, (1978) 490-95

/4/ Petit R, Nouv. Rev. Opt., 6, (1975) 129-135

/5/ Petit R, Proceedings of ICO-11, Madrid (1978) 593-95

/6/ "The Electromagnetic Theory of Gratings", edited by R. Petit in topivd in Current Physics (Springer - Verlag) to be published.

/7/ Hutley M.C, et Maystre D, Opt. Commun., 19, (1976) 431-36

/8/ Maystre D, et Nevière M, J. Optics, 8,(1977) 165-74

/9/ Maystre D, et Nevière M, J; Optics, 9, (1978) 301-306

/10/ Vincent P, Opt. Commun., 26, (1978) 293-296

/11/ Derrick G.H., Mc Phedran R.C., Maystre D, Nevière M, Appl. Phys., 18, (1979) 39-52

/12/ Knop K, Appl. Opt., 17, (1978) 3598-3603

/13/ Mc Phedran R.C, Communication privée

/14/ Maystre D, Nevière M, Vincent P, Derrick G, Mc Phedran R.C, Proceedings of ICO-11, Madrid (1978) 601-604

/15/ Maystre D, Nevière M, Mc Phedran R.C, Derrick G, Hutley M.C, Proceedings of ICO-11, Madrid (1978) 609-612

/16/ Johnson P.B, Christy R.W, Phys. Rev. B, 12, (1975) 4370-79