



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

Titre (français) : Diffraction en zone d'ombre pour un problème scalaire : relations entre le Principe de Babinet et l'Optique Physique

Title (English): Shadow radiation for a scalar problem: relations between Babinet Principle and Physical Optics

*Gildas Kubické**, *Christophe Bourlier***, *Nicolas Pinel***, *Philippe Pouliguen ****

* Direction Générale de l'Armement, Division CGNI, Département Maîtrise des Signatures Electromagnétiques, Bruz, gildas.kubicke@dga.defense.gouv.fr

** IETR, LUNAM Université, Université de Nantes, Nantes, {christophe.bourlier, nicolas.pinel}@univ-nantes.fr

*** Direction Générale de l'Armement, Mission pour la Recherche et l'Innovation Scientifique, Bagneux, philippe.pouliguen@dga.defense.gouv.fr

Mots-clefs (en français et en anglais) :

Optique Physique, Principe de Babinet, Propagation avant, Ombrage

Physical Optics, Babinet principle, Forward scattering, Shadow radiation

Résumé

Dans ce papier, il est démontré mathématiquement et par simulation que le principe de Babinet peut être vu comme une approximation de l'Optique Physique en zone d'ombre pour un problème bidimensionnel. Il est alors montré que la composante d'ombrage incluse dans l'Optique Physique est directement reliée au champ diffracté obtenu à partir du principe de Babinet. De plus, il est démontré mathématiquement que l'intégrale impliquée ne dépend pas de la forme de l'objet, ce qui revient alors à montrer l'équivalence entre l'Optique Physique et le principe de Babinet sous certaines conditions. Des résultats de simulations illustrent enfin le lien entre le Principe de Babinet et l'Optique Physique.

Introduction

La diffraction électromagnétique par une cible en zone de propagation avant (souvent nommée « Forward Scattering » : FS) est un phénomène très intéressant étudié pour la première fois par Mie en 1908. Pour une configuration correspondant à un angle de bistatisme proche de 180 degrés (le récepteur est dans la zone d'ombre de la cible), en hautes fréquences, la Surface Equivalente Radar (SER) en FS est principalement déterminée par la silhouette de la cible vue par l'émetteur. Une explication simple de ce phénomène peut être donnée en utilisant le Principe de Babinet (PB), qui établit que le diagramme de diffraction dans la zone d'ombre d'un corps opaque est identique à celle d'un trou réalisé dans un écran parfaitement conducteur de même forme que la silhouette de l'objet diffractant.

Néanmoins, l'Optique Physique (OP) est parfois également utilisée à la place du PB dans la zone d'ombre [2]. Ufimtsev [3] étudia le rayonnement d'un corps noir et démontra, à partir de l'OP en champ lointain, que le champ diffracté par un objet peut être décomposé en un champ contribuant principalement autour de la direction de réflexion spéculaire (zone illuminée) : la composante de réflexion, et en un champ qui contribue principalement dans la zone de « Forward Scattering » (zone d'ombre) : la composante d'ombrage. Dans ce papier, le lien entre le PB et l'OP est étudié. La convention temporelle $e^{-j\omega t}$ est considérée dans ce papier.

1. Etude théorique

Les courants induits sur la surface d'un objet peuvent être estimés en hautes fréquences à l'aide de l'Optique Physique. Pour un problème bidimensionnel (cas scalaire), et en considérant une onde plane incidente et le fait que la cible est située en champ lointain du récepteur, le rayonnement des courants de l'OP est obtenu à l'aide du principe de Huygens comme suit, $\nabla \mathbf{r}'$:

$$\begin{aligned} \psi_{s,PO}(\mathbf{r}') &= \underbrace{g_\infty \int_{\Sigma_{PO}} \mathcal{R} \hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i) e^{-j(\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i) \cdot \mathbf{r}} d\Sigma}_{\psi_{s,+}=g_\infty I_+} \\ &+ \underbrace{g_\infty \int_{\Sigma_{PO}} \hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i) e^{-j(\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i) \cdot \mathbf{r}} d\Sigma}_{\psi_{s,-}=g_\infty I_-}, \end{aligned} \quad (1)$$

où $g_\infty = \sqrt{\frac{1}{8\pi k r'}} e^{j(kr' - \pi/4)}$ est lié à la fonction de Green 2D en champ lointain, $\mathbf{r} = (x, z(x))$ est un vecteur pointant sur Σ_{PO} , la surface directement illuminée de la cible, et $\hat{\mathbf{n}}$ est le vecteur unitaire normal à Σ_{PO} . \mathbf{k}_i et \mathbf{k}_s sont les vecteurs d'onde incident et diffracté et le coefficient de réflexion de Fresnel est donné par $R = \pm 1$ pour les polarisations respectivement TM et TE (la cible étant considérée parfaitement conductrice). Les deux lignes de l'équation (1) correspondent à la décomposition proposée par Ufimtsev [3]. Il démontra ainsi par simulation numérique que le premier terme $\psi_{s,+}=g_\infty I_+$ contribue principalement autour de la direction spéculaire et correspond alors à la composante de réflexion. De plus, le second terme $\psi_{s,-}=g_\infty I_-$ contribue principalement autour de la direction de propagation avant et correspond alors à la composante d'ombrage.

Le principe de Babinet est à l'origine un principe d'optique généralisé à l'électromagnétisme au sens large [4] et qui établit que le phénomène de « Forward Scattering » est indépendant de la forme de l'obstacle. Le rayonnement en zone d'ombre est uniquement lié à la surface de la cible projetée sur le plan orthogonal à la direction d'incidence : la silhouette de la cible. En effet, le principe de Babinet établit l'équivalence entre la diffraction par un obstacle occultant l'onde incidente et la diffraction par une ouverture, dans un plan infini, ayant la même forme que la silhouette de la cible. Les courants équivalents induits sur cette ouverture sont uniquement liés à la présence du champ incident et on retrouve ainsi les conditions aux limites données par : $\psi(\mathbf{r}) = \psi_i$ et $\partial\psi(\mathbf{r})/\partial n = \partial\psi_i(\mathbf{r})/\partial n$. En champ lointain, le rayonnement en zone d'ombre des courants du PB est obtenu à l'aide du principe de Huygens, $\forall \mathbf{r}' \in \Omega$ (Ω étant le demi-espace inférieur en-dessous de la cible) :

$$\psi_{s,Ba}(\mathbf{r}') = g_\infty I_{Ba} = g_\infty \int_{\Sigma_{Ba}} \hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i) e^{-j(\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i) \cdot \mathbf{r}} d\Sigma, \quad (2)$$

où Σ_{Ba} est la surface de la cible projetée sur le plan orthogonal à la direction d'incidence et centrée sur l'origine des phases ; ainsi $\hat{\mathbf{n}} = \hat{\mathbf{z}}$ dans le cas d'une incidence normale ($\hat{\mathbf{n}}$ étant ici la normale à Σ_{Ba}). En comparant les équations (1) et (2), si $I_{Ba} = I_-$, alors :

$$\psi_{s,PO}(\mathbf{r}') = g_\infty I_{Ba} + g_\infty I_+, \quad (3)$$

et l'égalité (3) est satisfaite si l'intégrale I_- est indépendante de la surface d'intégration Σ .

Après quelques développements mathématiques sur l'intégrale I_- , on peut montrer que la composante d'ombrage de l'OP s'exprime à partir d'un sinus cardinal qui ne dépend pas de la forme de l'obstacle. De plus, le même travail peut être fait sur l'intégrale I_{Ba} pour montrer que le PB s'exprime à partir d'un autre sinus cardinal et on peut alors montrer que l'égalité entre la composante d'ombrage de l'OP et le PB est vérifiée pour une des deux conditions suivantes :

- Les points à l'extrémité de Σ_{PO} (qui correspond à un segment dans le cas bidimensionnel) sont les mêmes que ceux à l'extrémité de l'écran complémentaire de Babinet Σ_{Ba} .
- Pour la direction de propagation avant pour laquelle \mathbf{k}_i et \mathbf{k}_s sont colinéaires.

Ainsi, le PB peut être vu comme une bonne approximation de l'OP autour de la direction de propagation avant. A l'inverse du rayonnement en zone d'ombre, quelques développements mathématiques sur l'intégrale I_+ montrent que le champ dans la zone illuminée dépend de la forme de la surface de l'obstacle. De plus, on peut montrer que la composante d'ombrage (via l'intégrale I_-) s'annule dans la direction de réflexion spéculaire mais contribue très fortement dans la direction de « Forward Scattering », tandis que la composante de réflexion (via l'intégrale I_+) contribue très fortement dans la direction de réflexion spéculaire mais s'annule dans la direction de « Forward Scattering ».

2. Résultats numériques

On considère la scène illustrée sur la figure 1 (à gauche), dans laquelle une cible triangulaire parfaitement conductrice (avec $a=5\lambda$ et $b=3\lambda$) est illuminée par une onde plane incidente. On a $\Sigma_{PO} = S_1 \cup S_2$ et $\Sigma_{Ba} = S_3$. Les diffractions d'arêtes ne sont pas considérées dans ce papier car l'étude est focalisée sur le phénomène d'ombrage (forward scattering).

La figure 1 (à droite) compare la SER en fonction de l'angle d'observation θ_s , pour $\theta_i=0^\circ$ et en polarisation TE, obtenue à partir du champ diffracté calculé par l'OP : $\psi_{s,PO}$, des deux composantes de l'OP : $\psi_{s,+}$ et $\psi_{s,-}$ et enfin à partir du PB : $\psi_{s,Ba}$. Comme on peut le remarquer, le champ diffracté par l'OP est principalement dû à la composante de réflexion $\psi_{s,+}$ pour $\mathbf{r}' \in \Omega_1 \cup \Omega_2$ (la zone illuminée). Pour des angles de bistatisme plus élevés (pour θ_s allant de 120° à 180°), la composante de réflexion décroît fortement et la composante d'ombrage $\psi_{s,-}$ devient la contribution la plus importante au champ diffracté par l'OP ; $\psi_{s,+}$ devenant négligeable dans la zone d'ombre étendue (derrière l'obstacle) Ω_4 .

La figure permet également de comparer la composante d'ombrage de l'OP $\psi_{s,-}$ et le PB $\psi_{s,Ba}$. Un parfait accord est obtenu. Ceci permet d'illustrer l'égalité (3). En effet, on a ici concordance entre les points à l'extrémité de la surface Σ_{PO} avec ceux à l'extrémité de l'écran de Babinet Σ_{Ba} ; dans ce cas, le PB est inclus dans l'OP puisque $\psi_{s,Ba} = \psi_{s,-}$. Il est également intéressant de préciser que ces résultats (composante d'ombrage et PB) sont en parfait accord avec ceux obtenus pour d'autres valeurs de b : même si la surface de la cible est différente, la même composante d'ombrage est obtenue. La forme de la surface directement illuminée ne joue aucun rôle dans l'ombrage ; ce qui est consistant avec le théorème du contour d'ombre (Shadow Contour Theorem) d'Ufimtsev [3].

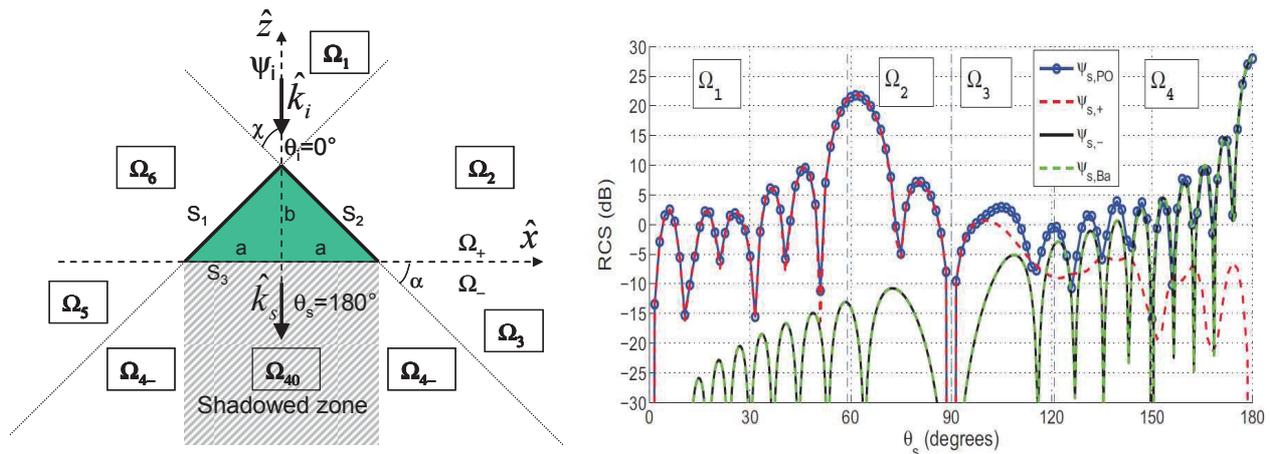


Figure 1 : A gauche : illustration de la scène constituée d'un triangle parfaitement conducteur excité par une onde plane avec $\theta_i=0^\circ$. A droite : SER bistatique ($a=5\lambda$, $b=3\lambda$) du triangle en fonction de l'angle d'observation θ_s avec l'OP, les deux composantes de l'OP et le principe de Babinet

Conclusion

Dans ce papier, il est démontré à la fois mathématiquement et par simulation que le PB peut être vu comme une approximation de l'OP en zone d'ombre pour un problème bidimensionnel. Il est en effet possible de montrer, après quelques développements mathématiques, que l'intégrale présente dans la composante d'ombrage de l'OP ne dépend pas de la forme de l'objet : la forme de la surface directement illuminée ne joue aucun rôle dans l'ombrage. Ceci revient alors à montrer l'équivalence entre l'OP et le principe de Babinet sous certaines conditions. Des résultats de simulations illustrent enfin le lien entre le principe de Babinet et l'OP.

Références bibliographiques

- 1- K. M. Siegel, « Bistatic radars and forward scattering », *Aero Electronics Nat. Conf.*, pp. 286–290, 1958
- 2- J. I. Glaser, « Some results in the bistatic Radar Cross Section (RCS) of complex targets », *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 5, pp. 639–648, May 1989.
- 3- P. Y. Ufimtsev, *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction*, John Wiley and sons, 2007.
- 4- P. Poincelot, « Sur le théorème de Babinet au sens de la théorie électromagnétique », *Annales des télécommunications*, pp. 410-413, Nov. 1957.