



HAL
open science

Modélisation de l'Impact de Bâtiments Logistiques à Proximité des Radars de l'Aviation Civile

Lucille Kuhler, Alexandre Chabory, Hélène Galiègue

► **To cite this version:**

Lucille Kuhler, Alexandre Chabory, Hélène Galiègue. Modélisation de l'Impact de Bâtiments Logistiques à Proximité des Radars de l'Aviation Civile. XXIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2022, Limoges, France. hal-03726433

HAL Id: hal-03726433

<https://enac.hal.science/hal-03726433v1>

Submitted on 18 Jul 2022

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.

Modélisation de l'Impact de Bâtiments Logistiques à Proximité des Radars de l'Aviation Civile

L. Kuhler¹, A. Chabory¹, H. Galiègue¹

¹ ENAC, TELECOM-EMA, F-31055 Toulouse, France
lucille.kuhler@enac.fr

Résumé – Les performances des radars de l'aviation civile peuvent être impactées par la présence de bâtiments, tels que les hangars ou les terminaux. Ainsi, pour chaque nouvelle construction, une étude doit être faite pour vérifier son impact. Parmi les différents types d'impacts que peuvent subir les radars, seule la modification du diagramme de rayonnement est considérée dans cet article. Pour caractériser cet effet, appelé « masquage », un modèle analytique basé sur la théorie du *knife-edge* est proposé et comparé à un modèle de simulation électromagnétique. Ce modèle analytique a l'avantage de donner des résultats plus rapidement qu'en utilisant des logiciels de simulation électromagnétique.

1. Introduction

L'environnement autour des radars de l'aviation civile a un réel impact sur leurs performances. En effet, ces dernières peuvent être impactées par la présence de bâtiments imposants tels que les bâtiments de logistique, les terminaux, les déflecteurs de jets, ou encore les champs de panneaux solaires et d'éoliennes [1]–[4]. Différents types de risque peuvent être évalués, ceux-ci dépendant de la technologie du radar [3], [5].

Les radars primaires et secondaires peuvent être exposés à l'effet de masquage [6]. On peut caractériser cet effet par une amplification ou une atténuation du champ total, pouvant créer une zone d'ombre pour le radar. C'est pourquoi les autorités de l'aviation civile définissent des zones de servitude où les constructions peuvent être soit restreintes soit complètement interdites. En s'éloignant du radar, les bâtiments peuvent être limités en taille. Par ailleurs, l'aspect opérationnel de la situation doit lui-aussi être pris en compte.

Ainsi, des études au cas par cas doivent être menées pour évaluer l'impact de nouvelles constructions à proximité des radars. Ces études requièrent des outils de simulation électromagnétique, souvent très chers et demandant une certaine maîtrise pour s'en servir. De plus, les simulations peuvent parfois nécessiter plusieurs jours de traitement. C'est pourquoi la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) souhaite travailler à l'aide d'abaques permettant d'obtenir les hauteurs maximales des bâtiments en fonction de leur distance au radar et du niveau de perturbations toléré. Ainsi, les simulations électromagnétiques spécifiques pour quantifier cet effet peuvent être évitées. Pour cela, un modèle analytique se basant sur la théorie du *knife-edge* [7] est proposé dans cet

article. Seul le pire scénario est pris en compte. Celui-ci se produit lorsque le radar illumine le bâtiment avec une incidence normale.

La configuration et les méthodes d'analyse sont présentées dans la section 2. Dans la 3^{ème} section, le modèle est appliqué pour obtenir les abaques lorsque l'avion se situe à 2 km du radar. Cette distance correspond à la zone de détection des aéronefs en approche d'un aéroport. Le trafic est donc dense dans cette zone. Une comparaison et une analyse critique des résultats obtenus à l'aide de ce modèle et d'un logiciel commercial, ici FEKO, sont présentées dans cette même section.

2. Principe de caractérisation

Dans la première partie de cette section, la configuration générale du problème est présentée. La possibilité de remplacer le bâtiment par une plaque verticale, dans les simulations électromagnétiques est présentée dans la section 2.b. Puis dans les deux sections suivantes, les modèles numérique et analytique sont introduits.

2.a. Configuration

Les différentes dimensions du problème sont présentées sur la Figure 1. Habituellement, les antennes des radars sont placées sur des fûts en béton à une hauteur $h_R = 35$ m. La hauteur du bâtiment h_B maximale dépend directement de la distance d_{ground} et du niveau de perturbations accepté. La largeur des bâtiments de type hangar est souvent grande par rapport à l'angle d'ouverture à -3 dB (*Half Power Beam Width* - HPBW) du faisceau radar dans le plan horizontal, valant $1-2^\circ$ [8]. Ainsi, le problème peut être simplifié en un problème 2D, justifiant l'intérêt d'un modèle analytique tel que le *knife-edge*.

L'objectif de ce papier est d'analyser l'impact d'un bâtiment devant un radar, ainsi le sol n'est pas pris en compte dans les deux méthodes d'analyse. Par ailleurs, le bâtiment est considéré comme un conducteur électrique parfait. Comme le bâtiment est éclairé avec une incidence normale, celui-ci est remplacé par une plaque dont la hauteur tient compte des acrotères (muret en bord de toiture) et d'épaisseur nulle. La validation de cette hypothèse est présentée dans la section suivante.

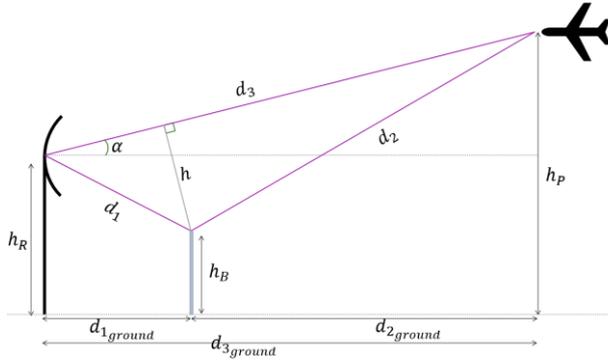


Figure 1. Configuration du problème.

2.b. Utilisation d'une plaque verticale

La Figure 2 représente un exemple de bâtiment type hangar, incluant les skydômes. Différentes simulations ont été menées pour valider l'utilisation d'une plaque verticale à la place d'un bâtiment réel. Pour la première, le champ électrique du radar est observé à la distance d'intérêt 2 km, en présence du bâtiment de la Figure 2. Puis le bâtiment est remplacé par un simple parallélépipède de même dimension. Pour la dernière simulation, seule la face illuminée du bâtiment est conservée, correspondant à l'utilisation de la plaque verticale. Dans ces simulations, le bâtiment est situé à 1000 m du radar.

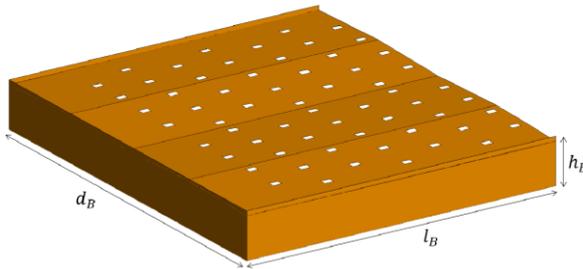


Figure 2. Exemple de bâtiment réel avec $d_B = 116$ m, $l_B = 100$ m et $h_B = 14.45$ m.

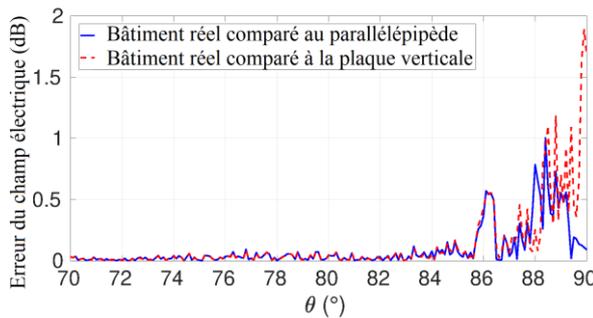


Figure 3. Différence du champ électrique (en dB) entre le bâtiment réel et son modèle simplifié.

La différence des champs électrique (en dB) est présentée sur la Figure 3, avec le bâtiment réel comme référence. Cette figure montre des différences autour de 1 dB pour des angles θ compris entre 88° et 90° . Cependant, cette différence n'est pas très élevée si l'on compare ce niveau au niveau de perturbation causé par le sol (autour de 2-3 dB). De plus, le fonctionnement des radars prévoit que seuls les avions volant à plus de 150 m

sont détectés lorsque d_{3_ground} vaut 2 km. Ceci correspond à des angles θ compris entre 0° et 86.7° .

Grâce à ces simulations, on voit qu'il est possible de remplacer le bâtiment par une plaque verticale. Cependant, cette hypothèse est moins fiable lorsque la longueur d_B du bâtiment augmente

2.c. Modèle numérique

Pour valider le modèle analytique, des simulations sont menées à l'aide d'un logiciel, ici FEKO, et dans ce cas le problème ne peut plus être 2D. Avec la valeur de HPBW, il est possible de définir une largeur de bâtiment. En effet, 90% de la puissance transmise est contenue dans un faisceau de largeur deux fois HPBW [9]. Pour une distance d_{1_ground} de 1000 m, ce faisceau a une largeur de 50 m. Ainsi la largeur du bâtiment est fixée à 70 m.

De plus, le bâtiment se trouve en champ proche du radar primaire lorsque $d_{1_ground} \leq 600$ m et du radar secondaire lorsque $d_{1_ground} \leq 700$ m. Ainsi, pour les distances d_{1_ground} inférieures à ces deux limites, l'antenne radar est remplacée par une source équivalente champ proche. Cette source est obtenue par une transformation champ proche – champ lointain du diagramme de rayonnement du radar, utilisant la méthode Woodward [10]. Pour les distances supérieures, la source utilisée est une source champ lointain. L'avantage d'utiliser cette source est la réduction du temps de simulation.

2.d. Modèle analytique – le knife-edge

Le modèle analytique se base sur la théorie du *knife-edge* [7]. Grâce à ce modèle, il est possible de relier le niveau de perturbation J engendré par le bâtiment à la hauteur h et aux distances d_1 et d_2 , définies sur la Figure 1 :

$$\begin{cases} J(v) = -20 \log \left(\frac{\sqrt{(1-C(v)-S(v))^2 + (C(v)-S(v))^2}}{2} \right), \\ v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \end{cases}, \quad (1)$$

avec λ la longueur d'onde du radar, $C(v)$ et $S(v)$ les parties réelle et imaginaire de l'intégrale de Fresnel. Les différentes grandeurs de (1) sont reliées aux paramètres du problème par :

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(h_R - h_B)^2 + d_{1_ground}^2}, \\ d_2 = \sqrt{(h_P - h_B)^2 + d_{2_ground}^2}, \\ h = (h_R + d_{1_ground} \tan(\alpha) - h_B) \cos(\alpha), \\ \alpha = \arctan \left(\frac{h_P - h_R}{d_{1_ground} + d_{2_ground}} \right). \end{cases}$$

Ainsi, en imposant un niveau de perturbation J et en connaissant les distances d_1 et d_2 , il est possible d'obtenir h et donc h_B .

3. Perturbation dans la zone d'observation du radar

Les modèles analytique et numérique sont maintenant utilisés pour tracer l'abaque donnant la hauteur h_B maximale en fonction d'un niveau de perturbation et de la distance $d_{1ground}$. Dans un premier temps, les résultats pour un niveau de perturbations fixé à 1 dB est présenté, pour $d_{3ground}$ valant 2 km. Puis pour cette même distance $d_{3ground}$, les niveaux de perturbation choisis par la DGAC sont fixés à 1 dB, 2 dB et 3 dB. Les résultats sont présentés pour un radar primaire bande S et un radar secondaire bande L.

3.a. Niveau de perturbations de 1 dB

- Radar primaire :

Le ratio (en dB) du champ électrique avec le bâtiment et sans le bâtiment est présenté sur la Figure 4. Le bâtiment est situé à 400 m du radar et sa hauteur est fixée à 25 m. On peut constater de nombreuses oscillations sur cette figure, ce qui signifie que le bâtiment peut amplifier ou atténuer le signal du radar. Par ailleurs, le niveau de perturbation est supérieur à 1 dB pour un angle θ proche de 90° . Cependant, lorsque la distance radar-avion est de 2 km, le radar n'observe que les avions volant à plus de 150 m de hauteur. Ceci implique que l'angle θ est inférieur à 86.7° . Ainsi, dans cette configuration précise, le bâtiment ne semble causer aucun effet de masquage. Toutefois, il ne faut pas oublier que le bâtiment peut avoir d'autres impacts (saturation, risque de multitrajets, ...).

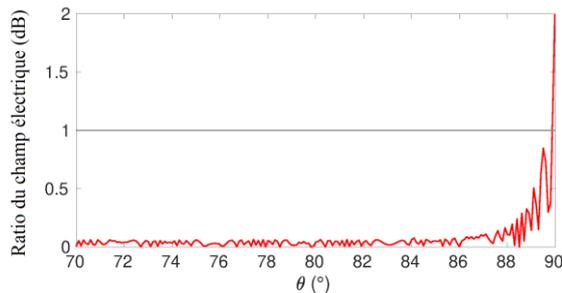


Figure 4. Ratio du champ électrique du radar primaire avec et sans bâtiment pour $d_{1ground} = 400$ m et $h_B = 25$ m.

- Radar secondaire :

Le ratio (en dB) du champ électrique avec le bâtiment et sans le bâtiment est à nouveau représenté sur la Figure 5. Cette fois-ci, on considère un bâtiment de 35 m à une distance de 200 m du radar. On peut noter que le niveau de perturbations engendré dépasse 1 dB pour les angles θ supérieur à 87.1° . Comme précédemment, ce bâtiment ne semble pas causer d'effet de masquage.

À partir des ratio des champs électriques et du modèle du *knife-edge*, il est possible de tracer des abaques donnant la hauteur maximale en fonction de la distance $d_{1ground}$ pour un niveau de perturbations donné, comme présenté sur la Figure 6. Globalement, l'allure des courbes est croissante, ainsi plus la distance au radar est grande, plus le bâtiment peut être haut.

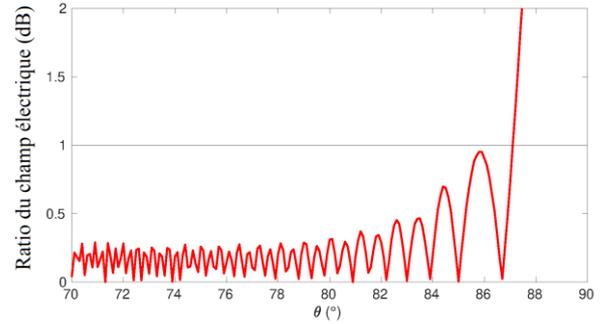


Figure 5. Ratio du champ électrique du radar primaire avec et sans bâtiment pour $d_{1ground} = 200$ m et $h_B = 35$ m.

Pour les deux courbes, on constate aussi un changement de l'allure autour de 700 m, cela est probablement dû au changement de source (champ proche ou champ lointain) dans les simulations.

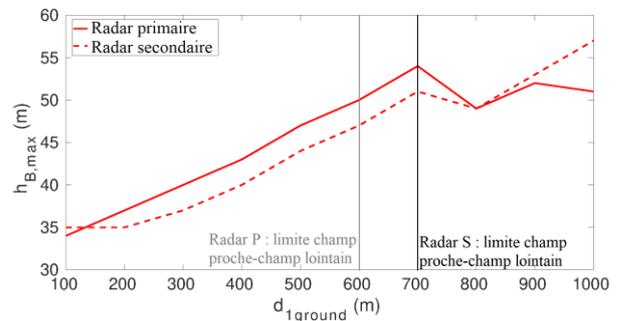


Figure 6. Hauteur du bâtiment maximale $h_{B,max}$ en fonction de la distance radar-bâtiment $d_{1ground}$.

Dans les deux parties suivantes, les résultats entre les deux modèles sont présentés et comparés en utilisant les abaques.

3.b. Radar primaire

La Figure 7 représente la hauteur maximale pour les 3 niveaux de perturbations imposés, pour différentes distances radar-bâtiment $d_{1ground}$. On peut constater que les hauteurs données par le modèle du *knife-edge* sont plus grandes que celles données par les simulations, ce qui semble logique. En effet, le modèle du *knife-edge* ne tient pas compte du rayonnement radar.

Par ailleurs, pour les deux modèles, on constate que l'écart entre les niveaux de perturbations de 1 dB et 2/3 dB est le même.

Comme expliqué précédemment, le fait de changer de type de sources dans les simulations cause un changement dans l'allure des courbes. Néanmoins, pour les deux modèles, on constate que la hauteur augmente avec la distance. L'écart entre les deux modèles augmente nettement pour de grandes distances, mais s'agissant d'une première approximation, pour étudier un seul effet, le modèle du *knife-edge* est pertinent.

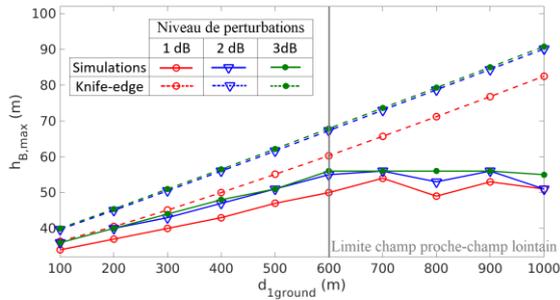


Figure 7. Hauteur du bâtiment maximale $h_{B,max}$ en fonction de la distance radar-bâtiment $d_{1ground}$.

3.c. Radar secondaire

Comme pour le radar primaire, on constate que les hauteurs données par le modèle du *knife-edge* sont supérieures à celles données par les simulations, d'après la Figure 8. Comme précédemment, on peut noter que l'écart entre les perturbations de 1 dB et 2 dB est plus important que celui entre les perturbations de 2 dB et 3 dB. Ces écarts sont du même ordre de grandeur pour les deux approches.

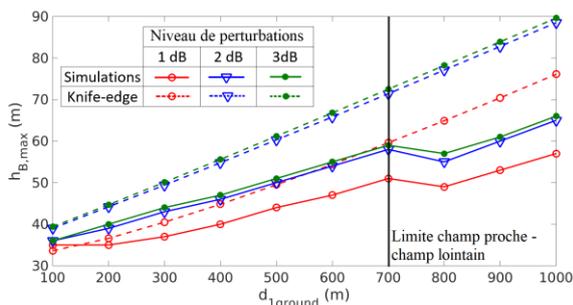


Figure 8. Hauteur du bâtiment maximale $h_{B,max}$ en fonction de la distance radar-bâtiment $d_{1ground}$.

Dans cette section, les abaques donnant les hauteurs maximales du bâtiment en fonction de la distance radar-bâtiment et de trois niveaux de perturbation ont été présentés. On constate que plus le bâtiment est loin du radar plus il peut être haut. De plus, pour des distances supérieures à 100 m, le bâtiment peut être plus haut que l'antenne radar h_R . Ceci peut être dû au fait que le rayonnement du radar émet avec un tilt de 2.5° par rapport à l'horizontal.

Concernant les niveaux de perturbation choisis, on sait que ceux-ci sont très restrictifs car le sol (forcément présent) peut causer des perturbations de l'ordre de 2 dB. Ainsi, le modèle du *knife-edge* peut être utilisé pour étudier l'effet de masquage, uniquement, en première approximation. En effet, ce modèle peut être utilisé pour refuser une construction si celle-ci engendre un niveau de perturbation trop élevé par rapport au seuil accepté. Cependant, si le niveau n'est pas atteint, il faudra vérifier que le bâtiment ne cause pas d'autres types de perturbations.

4. Conclusion

Dans cet article, l'effet de masquage induit par un bâtiment sur les radars de l'aviation civile a été étudié. Pour cela, un modèle analytique pour première

approximation a été développé et validé par comparaison avec des simulations numériques. Comme expliqué, les résultats ont été présentés sous forme d'abaques permettant à la DGAC de refuser rapidement la construction d'un bâtiment si ce dernier cause un effet de masquage trop important. Cependant, si les abaques ne montrent pas d'effet de masquage, il faut tout de même vérifier que les autres types de perturbations n'entrent pas en jeu. Dans les prochaines études, le modèle du *knife-edge* pourra être amélioré en tenant compte de la décroissance du champ sur l'obstacle.

5. Remerciements

Ce travail a été fait en collaboration avec l'ENAC et la DGAC-DSNA (Direction des Services de la Navigation Aérienne), et a été financé par la DGAC.

Références

- [1] I. Angulo *et al.*, 'Impact analysis of wind farms on telecommunication services', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 84–99, 2014.
- [2] D. de la Vega, D. Jenn, I. Angulo, and D. Guerra, 'Simplified characterization of Radar Cross Section of wind turbines in the air surveillance radars band', in *10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016, pp. 1–5.
- [3] A. Chabory, C. Morlaas, R. Douvenot, and H. Galiègue, 'Impact of Near-By Obstacles on ATC Primary and Secondary Radar', in *ENVIREM 2019*, 2019.
- [4] P. Hamel, J. Adam, Y. Béniguel, G. Kubické, and P. Pouliguen, 'Radar cross section evaluation of a wind turbine, based on an asymptotic method', in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016, pp. 1–3. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481545.
- [5] J. Wang, Y. F. Lok, O. Hubbard, B. Fournier, and A. Palevsky, 'Impact of wind turbines On ATC radars and mitigation results', in *2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13)*, 2013, pp. 1–4.
- [6] L. Claudepierre, R. Douvenot, A. Chabory, and C. Morlaas, 'Assessment of the Shadowing Effect Between Windturbines at VOR and Radar frequencies.', in *Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies (FERMAT)*, 2016, vol. 13, pp. 1464–1476.
- [7] International Telecommunication Union Std. ITU-R P.526-14, 'Propagation by Diffraction'. 2018.
- [8] International Telecommunication Union Std. ITU-R M.1851-1, 'Mathematical models for radiodetermination radar systems antenna patterns for use in interference analyses', 2018.
- [9] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [10] P. Woodward and J. Lawson, 'The theoretical precision with which an arbitrary radiation-pattern may be obtained from a source of finite size', *J. Inst. Electr. Eng.-Part III Radio Commun. Eng.*, vol. 95, no. 37, pp. 363–370, 1948.