

RAPPORT UIT-R SA.2098

Modèles de gain mathématiques d'antenne de station terrienne à grande ouverture du service de recherche spatiale utilisables dans les analyses de compatibilité portant sur des configurations à multiples sources de brouillage distribuées

(2007)

1 Introduction

Des études de compatibilité entre stations terriennes du service de recherche spatiale (SRS) et systèmes à haute densité du service fixe sont actuellement menées dans les bandes 31,8-32,3 GHz et 37-38 GHz.

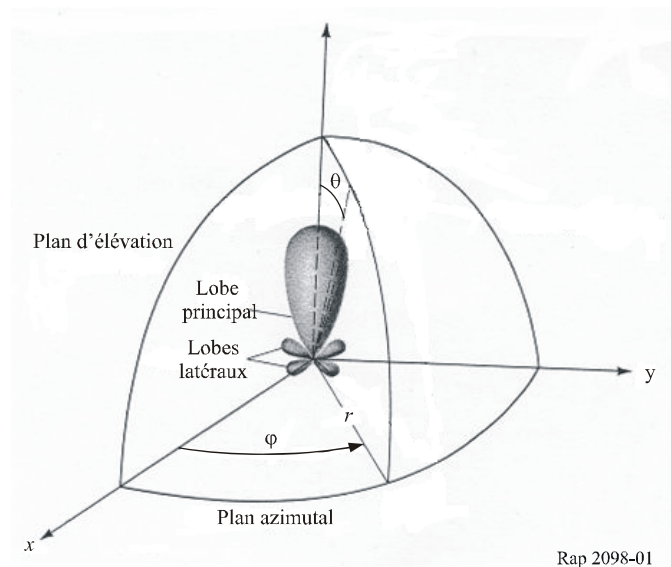
L'un des principaux paramètres qu'il faut définir pour déterminer le niveau de brouillage susceptible d'être observé au niveau des stations terriennes du SRS est le diagramme d'antenne à retenir dans les calculs. Un diagramme de rayonnement de crête applicable aux systèmes hertziens fixes est fourni dans la Recommandation UIT-R F.699, et un diagramme de rayonnement représentant les niveaux moyens des lobes latéraux dans le cas de faisceaux hertziens point à point en visibilité directe est proposé dans la Recommandation UIT-R F.1245. Le diagramme de la Recommandation UIT-R F.699, lorsqu'on l'applique seulement à des angles polaires supérieurs à 1°, est le même que le diagramme de la Recommandation UIT-R SA.509. Les diagrammes de rayonnement de crête correspondant aux stations terriennes exploitées dans le service fixe par satellite (SFS) sont indiqués dans les Recommandations UIT-R S.580 et UIT-R S.465, et un diagramme de rayonnement représentant les niveaux moyens des lobes latéraux des stations terriennes du service fixe par satellite est fourni dans la Recommandation UIT-R S.1428. Le présent Rapport compare l'application de ces différents diagrammes dans leurs applications pratiques et propose un nouveau modèle.

La détermination de diagrammes effectifs et réalistes fait intervenir un grand nombre de facteurs, trop complexes et trop diversifiés pour être pris en compte avec exactitude dans un calcul théorique simple. Par exemple, la position des minima et des maxima dans les lobes latéraux varie en fonction de la charge gravitationnelle de l'antenne, des vents, etc., et la meilleure solution consiste à les représenter par une enveloppe. Au fil des années, un grand nombre de modèles de rayonnement ont été proposés pour les antennes de grand diamètre (voir par exemple la Recommandation UIT-R F.1245-1 – Modèle mathématique de diagrammes de rayonnement moyens, de diagrammes de rayonnement connexes pour antennes de faisceaux hertziens en visibilité directe point à point, à utiliser dans certaines études de coordination et pour l'évaluation du brouillage dans la gamme de fréquences comprise entre 1 GHz et environ 70 GHz, la Recommandation UIT-R SA.509-2 – Diagramme de rayonnement de référence d'une antenne de station terrienne dans le service de recherche spatiale et de radioastronomie, à utiliser pour les calculs de brouillage ainsi que dans les procédures de coordination, ou encore la Recommandation UIT-R SA.1345 – Méthodes de prévision des diagrammes de rayonnement des grandes antennes utilisées pour la recherche spatiale et la radioastronomie, et [Jamnejad, 2003]).

Pour caractériser le diagramme de rayonnement effectif d'une antenne, une méthode simple mais efficace consiste à utiliser un modèle établi sur la base d'un grand nombre d'éléments théoriques et de résultats expérimentaux et à définir pour cette antenne une limite (ou enveloppe) supérieure et/ou une limite (ou enveloppe) inférieure, l'une ou l'autre facilement applicable à de nombreuses configurations. Dans l'idéal, comme cela est précisé dans la Recommandation UIT-R F.1245, après la définition de la directivité de l'antenne, le modèle du gain G (exprimé en dB) doit répondre à l'équation suivante du rapport de gain moyen, g_a :

$$g_a = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi g(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi = 1$$

dans laquelle θ est l'angle polaire par rapport à l'axe de visée et φ l'azimut, selon le schéma suivant:



Dans le cas d'un diagramme circulaire symétrique, l'équation prend la forme simplifiée suivante:

$$g_a = \frac{1}{2} \int_0^\pi g(\theta) \sin(\theta) d\theta = 1$$

Généralement, les modèles de gain sont formulés en dB, puisque G dépend du rapport de gain g :

$$G(\theta, \varphi) = 10 \log(g(\theta, \varphi))$$

ou

$$g(\theta, \varphi) = 10^{\frac{G(\theta, \varphi)}{10}}$$

Dans les modèles le plus souvent présentés dans la littérature, du fait que l'on utilise une enveloppe supérieure ou une autre forme d'approximation en lieu et place du diagramme effectif, les valeurs de gain moyennes, obtenues avec les formules intégrales précédentes, sont très supérieures à l'unité (soit supérieures à 0 exprimées en dB). Toutefois, on peut les utiliser pour vérifier la validité et la précision générale du modèle par rapport au diagramme effectif de l'antenne considérée. Avec une valeur inférieure à ou voisine de 2 (moins de 3 dB), on obtient une approximation raisonnable.

Dans les lignes qui suivent, nous allons considérer la partie gauche du diagramme général et calculer l'intégrale pour un certain nombre de modèles de gain circulaires symétriques, afin de tracer les courbes de variations de la valeur du gain en fonction des caractéristiques de l'antenne (fréquence et diamètre d'ouverture).

2 Modèles de gain

Dans tous les modèles décrits ci-après, les valeurs de gain sont données en dB, et les angles en degrés. Soient:

D : diamètre de l'ouverture principale de l'antenne (m)

et

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{0,3}{f_{GHz}}, \text{ longueur d'onde (m)}$$

Dans le présent document, nous ne considérons que les valeurs d'ouverture importantes, avec $D/\lambda > 100$.

a) Le modèle de la Recommandation UIT-R F.699-7

La Recommandation UIT-R F.699-7 propose le diagramme de rayonnement suivant (enveloppe maximale) pour la gamme de fréquences 1-70 GHz:

$$G(\theta) = G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \theta \right)^2 \quad \text{pour } 0 < \theta < \theta_m$$

$$G(\theta) = G_1 \quad \text{pour } \theta_m \leq \theta < \theta_r$$

$$G(\theta) = 32 - 25 \log_{10}(\theta) \quad \text{pour } \theta_r \leq \theta < 48^\circ$$

$$G(\theta) = -10 \quad \text{pour } 48^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

Il convient de noter que si nous adoptons pour θ_r la valeur 1° , le modèle de gain de la Recommandation UIT-R F.699-7 défini pour l'intervalle 1° à 180° est le même que le modèle de la Recommandation UIT-R SA.509.

Avec:

$$G_{max} = 10 \log \left(\eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right)$$

$$G_1 = 2 + 15 \log_{10} \left(\frac{D}{\lambda} \right)$$

$$\theta_m = 20\sqrt{G_{max} - G_1} \left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-1} \quad \text{degrés}$$

$$\theta_r = 15,85 \left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-0,6} \quad \text{pour } D/\lambda > 100$$

b) **Le modèle de la Recommandation UIT-R RA.1631**

La France a proposé d'utiliser le modèle décrit dans la Recommandation UIT-R RA.1631. Il ne s'agit pas d'une enveloppe de crête mais d'un diagramme moyen défini comme suit:

$$G(\theta) = G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \theta\right)^2 \quad \text{pour } 0^\circ < \theta < \theta_m$$

$$G(\theta) = G_1 \quad \text{pour } \theta_m \leq \theta < \theta_r$$

$$G(\theta) = 29 - 25 \log_{10}(\theta) \quad \text{pour } \theta_r \leq \theta < 10^\circ$$

$$G(\theta) = 34 - 30 \log_{10}(\theta) \quad \text{pour } 10^\circ \leq \theta < 34,1^\circ$$

$$G(\theta) = -12 \quad \text{pour } 34,1^\circ \leq \theta < 80^\circ$$

$$G(\theta) = -7 \quad \text{pour } 80^\circ \leq \theta < 120^\circ$$

$$G(\theta) = -12 \quad \text{pour } 120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

avec:

$$G_{max} = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)$$

$$G_1 = -1 + 15 \log_{10} \left(\frac{D}{\lambda}\right)$$

$$\theta_m = 20\sqrt{G_{max} - G_1} \left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-1} \quad \text{degrés}$$

$$\theta_r = 15,85 \left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-0,6} \quad \text{degrés,} \quad \text{ou } \theta_r = 10^{1,28k^2 - 0,08k} \left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-0,6k} \quad \text{degrés}$$

$$\theta_r = 15,85 \left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-0,6} \quad \text{degrés, pour } k = 1$$

c) **Le modèle de la Recommandation UIT-R F.1245-1**

La Recommandation UIT-R F.1245-1 propose le diagramme de rayonnement moyen suivant pour la gamme de fréquences 1-40 GHz, et pour la gamme de fréquences 40-70 GHz à titre provisoire:

$$G(\theta) = G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \theta\right)^2 \quad \text{pour } 0^\circ < \theta < \theta_m$$

$$G(\theta) = G_1 \quad \text{pour } \theta_m \leq \theta < \theta_r$$

$$G(\theta) = 29 - 25 \log_{10}(\theta) \quad \text{pour } \theta_r \leq \theta < 48^\circ$$

$$G(\theta) = -13 \quad \text{pour } 48^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

avec:

G_{max} : gain de crête

$$G_1 = 2 + 15 \log_{10}\left(\frac{D}{\lambda}\right)$$

$$\theta_m = 20 \sqrt{G_{max} - G_1} \left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-1}$$

$$\theta_r = 12,02 \left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-0,6}$$

d) **Le modèle Jp (enveloppe de crête)**

Il s'agit d'un nouveau modèle définissant une enveloppe maximale pour toutes les gammes de fréquences considérées. Ce modèle ressemble à celui de la Recommandation UIT-R F.699 avec quelques modifications concernant les points suivants:

- i) La largeur du faisceau principal peut varier légèrement, en fonction de divers paramètres d'antenne (rapport d'ouverture, blocage, erreurs de surface, etc.). La largeur de faisceau à mi-puissance sur un côté répond à $\theta_{hp} = 0,5 C_{hp} / (D/\lambda)$, équation dans laquelle la constante C_{hp} a une valeur approximative comprise entre 65 et 71. Pour une modélisation plus efficace, on peut faire varier ce paramètre selon le type et la qualité de l'antenne utilisée. Ici, on a choisi une valeur $C_{hp} = 69$ pour des raisons de compatibilité avec la Recommandation UIT-R F.699.
- ii) Le bord plat du diagramme a une valeur plus réaliste. La valeur ne dépend normalement pas des dimensions de l'antenne ou de la longueur d'onde, il s'agit plutôt d'une fonction assez complexe des coefficients d'ouverture et de blocage. On utilise une valeur de 17 dB que l'on peut adapter au besoin.
- iii) Le rendement du diagramme est pris en compte dans la détermination de la valeur de crête ainsi que de la pente, alors que dans les autres modèles, on considère une pente fixe. Le rendement est une combinaison de plusieurs rendements partiels: rendement d'illumination, rendement de blocage, rendement de débordement et rendement résultant des erreurs de surface. Nous distinguons ici un élément de tolérance de surface qui dépend directement de la fréquence, et nous regroupons tous les autres paramètres en une seconde composante distincte, plus ou moins indépendante de la fréquence.
- iv) On introduit une surélévation de 5 dB dans la région plate du lobe extérieur, entre 80° et 120° , pour tenir compte des éventuels effets de débordement dans le réflecteur principal dont la hauteur et le lieu exact varient en fonction du rapport F/D (distance focale/diamètre) et d'autres caractéristiques de conception du réflecteur. Dans de rares cas, cette plate-forme est visée par les dispositions de la Note 2 ci-après.

Ainsi, le modèle s'exprime comme suit:

$$\begin{aligned}
 G(\theta) &= G_0 - 3 \left(\frac{\theta}{\theta_{hp}} \right)^2 && \text{pour } 0^\circ \leq \theta \leq \theta_1 \\
 G(\theta) &= G_0 - G_1 && \text{pour } \theta_1 < \theta \leq \theta_2 \\
 G(\theta) &= G_0 - G_1 - G_2 \log_{10} \left(\frac{\theta}{\theta_2} \right) && \text{pour } \theta_2 < \theta \leq \theta_3 \\
 G(\theta) &= G_3 && \text{pour } \theta_3 < \theta \leq 80^\circ \\
 G(\theta) &= G_3 + 5 && \text{pour } 80^\circ < \theta \leq 120^\circ \\
 G(\theta) &= G_3 && \text{pour } 120^\circ < \theta \leq 180^\circ
 \end{aligned}$$

avec:

$$\begin{aligned}
 G_0 &= 10 \cdot \log_{10} \left[\eta_a \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right] - 4,343 \left(\frac{4\pi h_{rms}}{\lambda} \right)^2 \\
 G_1 &= 17 \\
 G_2 &= 27 + 10 \left[\log_{10}(\eta_a) - \log_{10} \left(60 \frac{h_{rms}}{\lambda} \right) \right] \\
 G_3 &= -10 \\
 \theta_{hp} &= 0,5 \frac{C_{hp}}{(D/\lambda)} \quad (65 \leq C_{hp} \leq 70, \text{ valeur nominale} = 69) \\
 \theta_1 &= \theta_{hp} \sqrt{\frac{G_1}{3}} \\
 \theta_2 &= \theta_{hp} 10^{\frac{G_1}{G_2}} \sqrt{\frac{G_2}{36}} \\
 \theta_3 &= \theta_2 10^{\frac{G_0 - G_1 - G_3}{G_2}}
 \end{aligned}$$

Le paramètre η_a correspond au rendement de l'antenne rapporté au diagramme de rayonnement (éclairage de l'ouverture, rayonnement de diffraction, effet de blocage, etc.), à l'exclusion du rendement associé à la tolérance de surface. Il convient de noter que dans ce modèle, le gain sur l'axe de visée diminue lorsque η_a diminue, tandis que la pente de gain, G_2 , dans la fourchette de valeurs angulaires comprises entre θ_2 et θ_3 , augmente lorsque η_a augmente. Cette observation rend compte d'une réalité physique: une diminution du gain de crête doit s'accompagner d'accroissements dans la région des lobes latéraux. Cette caractéristique n'est pas prise en compte dans les autres modèles.

NOTE 1 – La perte de gain due à la tolérance de surface est prise en compte séparément comme fonction de h_{rms} , tolérance de surface, laquelle affecte également la pente du modèle de rayonnement. La fourchette valable des valeurs de tolérance de surface à utiliser dans les formules qui précèdent s'écrit:

$$\frac{1}{60} \leq \frac{h_{rms}}{\lambda} \leq \frac{1}{15}$$

Toute valeur de h_{rms}/λ supérieure à 1/15 doit être remplacée par 1/15; toute valeur inférieure à 1/60 doit être remplacée par 1/60.

Il faut donc utiliser la valeur 1/60 pour une très bonne antenne, 1/30 pour une antenne de rendement modéré et 1/15 pour une antenne médiocre.

NOTE 2 – Dans de rares cas, en présence d'importantes erreurs de surface, θ_3 peut dépasser 80° , et on observe un recouvrement de la région pentue des lobes latéraux et de la bosse plate de la région 80° - 120° . Il faut alors sélectionner la valeur maximale de ces deux éléments pour chaque angle.

e) Le modèle Ja (enveloppe moyenne)

Outre l'enveloppe maximale, on peut définir une enveloppe moyenne du gain pour tout angle considéré dans la région des lobes latéraux, enveloppe intéressante comme nous allons le voir. Considérons un certain nombre d'antennes et un angle fixe donné par rapport à l'axe de visée. Comme les antennes ne sont pas identiques, la répartition de leurs lobes latéraux peut être telle que la valeur de crête d'un lobe de l'une des antennes correspond à la direction fixée tandis qu'avec une autre antenne, on observera une valeur nulle sur cet axe, ou encore que, pour une troisième antenne, la valeur pourrait être comprise entre le maximum et le minimum, etc. On peut donc sans doute utiliser une valeur moyenne de gain pour la direction retenue, moyenne de l'ensemble des valeurs comprises entre le minimum et le maximum. On constate que pour un lobe donné et lorsque la valeur minimale correspond à un creux très aigu, cette moyenne est de près de 3 dB inférieure à la valeur de crête du lobe (l'écart étant généralement moins important lorsque les minima sont des creux «remplis» dans une certaine mesure). Si l'on suppose maintenant que le contour de l'enveloppe de crête passe par l'ensemble des maxima, on voit que l'enveloppe moyenne est parallèlement inscrite dans l'enveloppe de crête, avec un écart d'environ 3 dB.

En conséquence, pour obtenir un modèle d'enveloppe «moyenne», on modifie simplement le modèle précédent en relevant de 3 dB la valeur de G_1 , en abaissant de 3 dB la valeur de G_3 et en ajustant la valeur de θ_2 en conséquence. Dans l'application d'un tel modèle, certaines situations particulières devront être traitées avec prudence. Ainsi:

$$\begin{aligned}
 G(\theta) &= G_0 - 3 \left(\frac{\theta}{\theta_{hp}} \right)^2 && \text{pour } 0^\circ \leq \theta \leq \theta_1 \\
 G(\theta) &= G_0 - G_1 && \text{pour } \theta_1 < \theta \leq \theta_2 \\
 G(\theta) &= G_0 - G_1 - G_2 \log_{10} \left(\frac{\theta}{\theta_2} \right) && \text{pour } \theta_2 < \theta \leq \theta_3 \\
 G(\theta) &= G_3 && \text{pour } \theta_3 < \theta \leq 80^\circ \\
 G(\theta) &= G_3 + 5 && \text{pour } 80^\circ < \theta \leq 120^\circ \\
 G(\theta) &= G_3 && \text{pour } 120^\circ < \theta \leq 180^\circ
 \end{aligned}$$

avec:

$$G_0 = 10 \log_{10} \left[\eta_a \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right] - 4,343 \left(\frac{4\pi h_{rms}}{\lambda} \right)^2$$

$$G_1 = 20$$

$$G_2 = 27 + 10 \left[\log_{10}(\eta_a) - \log_{10} \left(60 \frac{h_{rms}}{\lambda} \right) \right]$$

$$G_3 = -13$$

$$\theta_{hp} = 0,5 \frac{C_{hp}}{(D/\lambda)} \quad (65 \leq C_{hp} \leq 70, \text{ valeur nominale} = 69)$$

$$\theta_1 = \theta_{hp} \sqrt{\frac{G_1}{3}}$$

$$\theta_2 = \theta_{hp} 10^{\frac{G_1-3}{G_2}} \sqrt{\frac{G_2}{36}}$$

$$\theta_3 = \theta_2 10^{\frac{G_0-G_1-G_3}{G_2}}$$

Toutes les notes concernant le modèle Jp s'appliquent également au modèle Ja.

3 Analyse numérique et résultats

Pour calculer les différents modèles de gain, tracer les courbes correspondantes et procéder aux comparaisons requises, notamment avec les valeurs «moyennes», un certain nombre de programmes MATLAB ont été écrits. Ces programmes sont très faciles à utiliser et offrent une méthode simple d'analyse et de tracé de nouveaux modèles. Les résultats suivants ont été obtenus à l'aide de ces programmes.

Chaque graphe des Fig. 1 à 6 (a, b, c) rassemble à des fins de comparaison plusieurs tracés, à savoir l'enveloppe de crête de la Recommandation UIT-R F.699-7 (laquelle, pour les valeurs d'angle supérieures à 1°, présente le même tracé que celui du modèle de la Recommandation UIT-R SA.509), l'enveloppe moyenne de la Recommandation UIT-R F.1245-1, l'enveloppe moyenne de la Recommandation UIT-R RA.1631 et enfin une nouvelle enveloppe de crête, proposée comme modèle «Jp», établie sur la base du modèle de la Recommandation UIT-R F.699.

Comparaison pour $D/\lambda = 1\ 000$ (par exemple antenne de 34 m exploitée au voisinage de 8,4 GHz)

Les Fig. 1 à 3 sont établies pour une antenne de diamètre égal à 1 000 fois la longueur d'onde, correspondant à une ouverture de 34 m de diamètre, fonctionnant au voisinage de 8,4 GHz, bande fortement utilisée pour la recherche dans l'espace lointain. Les diagrammes correspondant aux modèles Jp et Ja sont donnés pour des antennes de qualité «médiocre», «moyenne» et «bonne», correspondant à une tolérance de surface rms de 1/15, 1/30 et 1/60 de la longueur d'onde, respectivement. Les cas a), b), et c) correspondent respectivement à une représentation linéaire, à une représentation étendue et à une représentation logarithmique de la variable angulaire sur l'axe horizontale.

Comparaison pour $D/\lambda = 4\ 000$ (par exemple antenne de 34 m fonctionnant au voisinage des bandes 32 et 37 GHz)

Les Fig. 4 à 6 illustrent les cas correspondants pour un diamètre d'antenne égal à 4 000 fois la longueur d'onde, soit des antennes de 34 m de diamètre fonctionnant au voisinage des bandes des 32 et 37 GHz dans des situations où le partage entre le service de recherche dans l'espace lointain et les systèmes à haute densité du service fixe pose problème.

Qualité de fonctionnement dépendant de la tolérance de surface

Comme on peut le constater dans le cas des modèles proposés Jp et Ja, les performances de gain du faisceau principal et de la région des lobes latéraux varient en fonction de la tolérance de surface. Dans les modèles Jp et Ja, on prend pour hypothèse une valeur initiale de rendement d'ouverture $\eta_a = 0,8$, ne tenant pas compte des effets de tolérance de surface. Cette valeur est typique de la combinaison de rendement d'ouverture et de rendement de débordement pour une apodisation nominale en bordure de 10-11 dB. On multiplie cette valeur initiale par le facteur de tolérance de surface pour obtenir le rendement d'ouverture net de l'antenne. Le facteur de tolérance de surface est pris en compte dans les formules, et ces valeurs sont 0,5; 0,9 et 1,0 respectivement pour une configuration «médiocre», «moyenne» et «bonne». En conséquence, le rendement d'ouverture net est respectivement de 0,4; 0,7 et 0,8. Il convient de noter qu'il faut multiplier ce rendement d'ouverture par les autres facteurs de perte, par exemple la perte dans le cornet d'alimentation, pour obtenir le rendement global de l'antenne. Dans le cas des autres modèles, la tolérance de surface n'est pas explicitement considérée. On prend pour hypothèse, dans tous les cas, une valeur d'ouverture de 0,7 pour tous ces modèles.

Parmi les antennes à grande ouverture utilisées pour la recherche dans l'espace lointain par le réseau Deep Space de la NASA, par exemple, la tolérance de surface des antennes de 34 m peut être caractérisée comme «bonne» à 8,4 GHz et 2,3 GHz, «moyenne» à «bonne» à 32 GHz et potentiellement «moyenne» à 37 GHz lorsque cette fréquence est utilisée. La tolérance de surface des antennes de 70 m peut être caractérisée comme «bonne» à 8,4 GHz et 2,3 GHz et potentiellement «médiocre» à 32 GHz si cette fréquence est utilisée.

Gain moyen pour l'ensemble des valeurs angulaires

Les Fig. 7 à 9 (a, b) donnent à des fins de comparaison les valeurs de gain moyennes sur l'ensemble des valeurs angulaires obtenues avec les équations spécifiées plus haut pour les divers modèles considérés, avec les modèles d'antenne «médiocre», «moyen» et «bon» correspondant aux cas Jp et Ja. Les cas a) et b) donnent les moyennes respectivement en dB et en échelle linéaire. On constate que les modèles Jp et Ja donnent des valeurs cohérentes pour l'ensemble des valeurs du rapport D/λ (diamètre d'antenne/longueur d'onde). Lorsque le rapport D/λ se rapproche de 4 000, la configuration «moyenne» donne des gains moyens inférieurs et les configurations «bonnes» donnent des valeurs de gain très inférieures aux autres modèles.

La Fig. 10 (a, b) est construite de la même manière pour une antenne de 34 m (avec erreur de surface de 0,25 mm rms) sur le domaine de fréquences 1-40 GHz. On constate que le modèle Jp (crête) donne un meilleur rapport de gain moyen que le modèle de la Recommandation UIT-R F.699 et, de même, le modèle Ja (moyenne) donne un meilleur rapport de gain moyen que les modèles de gain moyen des Recommandations UIT-R F.1245 et UIT-R RA.1631, à toutes les fréquences.

La Fig. 11 (a, b) donne les tracés correspondants pour l'antenne de 70 m (avec erreur de surface de 0,60 mm rms) dans le domaine de fréquences 1-35 GHz. On constate que pour l'antenne de 70 m du réseau espace lointain à 32 GHz, le rapport de gain moyen est un peu supérieur aux valeurs obtenues avec les autres modèles en raison du comportement de cette antenne aux très hautes fréquences et du fait que ce modèle est conçu pour donner un bon fit pour les lobes latéraux supérieurs, ce que l'on ne recherche pas dans les autres modèles. S'il était souhaitable d'utiliser cette antenne aux hautes fréquences, il faudrait améliorer la tolérance de surface.

Comparaison avec les diagrammes de rayonnement théoriques pour diverses longueurs de corrélation d'erreur de surface

La Fig. 12 (a, b, c) reproduit le diagramme théorique d'une ouverture circulaire calculée avec une fonction lambda (fonction de Bessel normalisée), qui rend compte aussi de l'effet de la tolérance de surface avec les formules de Ruze [Ruze, 1966]. La Figure comprend plusieurs diagrammes théoriques correspondant à diverses «longueurs de corrélation» des erreurs de surface. Ces valeurs, calculées pour $D/\lambda = 4\ 000$, montrent que les modèles Jp et Ja donnent une meilleure enveloppe que le modèle de la Recommandation UIT-R F.699-7. Dans les diagrammes théoriques, on utilise un rapport de blocage de 0,1, une illumination de champ d'ouverture de forme $E = (1 - c) + c(1 - r^2)^n$ avec une illumination en bordure $ET = 10$ dB, $c = 1 - 10^{(-ET/20)}$ et un facteur de pente $n = 1$.

La Fig. 12a compare les diagrammes de gain d'une antenne «médiocre» caractérisée par une erreur de surface rms de $(1/15)\lambda$. Le modèle Jp donne une enveloppe supérieure serrée de toutes les courbes théoriques correspondant aux diverses hypothèses de longueur de corrélation. Toutefois, le modèle d'enveloppe de crête de la Recommandation UIT-R F.699-7 est largement dépassé par les courbes de gain théorique pour plusieurs longueurs de corrélation avec des valeurs de décalage angulaire supérieures à 1° . Il est également dépassé dans certains cas pour des valeurs de décalage angulaire comprises entre $0,05^\circ$ et $0,1^\circ$. Les modèles de «gain moyen», soit ceux des Recommandations UIT-R F.1245 et UIT-R RA.1631, sont encore plus dépassés par le modèle théorique, comme on peut s'y attendre.

La Fig. 12b concerne une antenne de tolérance de surface «moyenne». On voit que les différences sont moins importantes et qu'aussi bien le modèle Jp que le modèle de la Recommandation UIT-R F.699-7 donnent des enveloppes supérieures valides, exception faite de violations mineures dans le cas le plus défavorable. Le modèle de la Recommandation UIT-R F.699 commence à dépasser le modèle Jp pour des valeurs d'angle comprises entre $0,1^\circ$ et 10° .

Dans la Fig. 12c, correspondant à une antenne à «bonne» tolérance de surface, on constate que le modèle Jp demeure valide comme enveloppe supérieure des courbes de gain théoriques dans tous les cas de longueur de corrélation d'erreur de surface à l'exception des cas les plus défavorables. Le modèle de la Recommandation UIT-R F.699 dépasse le modèle Jp d'environ 5 dB entre $0,1^\circ$ et 30° . Même les modèles de gain moyen, à savoir ceux des Recommandations UIT-R F.1245 et UIT-R RA.1631, dépassent le modèle Ja d'environ 2 dB.

4 Modèle de gain moyen

Modèle de gain moyen basé sur le modèle Ja

Dans le domaine des valeurs angulaires comprises entre $0,1^\circ$ et 50° , le diagramme de rayonnement d'une antenne oscille comme indiqué par les diagrammes théoriques considérés plus haut. Dans cette région, une enveloppe de crête surestimerait le gain de l'antenne pour de nombreuses valeurs angulaires. Dans une étude de compatibilité faisant intervenir un grand nombre de sources brouilleuses distribuées sur l'ensemble des valeurs angulaires de cette région, il est souhaitable de réduire le gain de l'enveloppe pour minimiser les biais d'estimation du brouillage cumulatif. Comme nous l'avons vu au § 2, cas e), on peut considérer que la moyenne dans cette région est inférieure d'environ 3 dB aux niveaux de crête de l'oscillation.

Du fait que le diagramme de rayonnement de l'antenne de station terrienne considérée n'est pas connue et que le modèle d'enveloppe de crête, le modèle Jp par exemple, est proche de l'enveloppe minimale de la classe d'antennes considérée, on peut raisonnablement réduire les niveaux de gain du modèle Jp de 3 dB dans la région qui nous intéresse et utiliser ce résultat comme «diagramme de gain moyen» pour cette région. Ce «diagramme de gain moyen» serait encore supérieur, à certains angles, au gain moyen du diagramme de rayonnement effectif, si ce dernier était connu.

Ce «diagramme de gain moyen» établi d'après le modèle d'enveloppe Jp est compris dans les comparaisons des Fig. 1 à 12.

Ecart de gain par rapport au diagramme moyen

La réduction de 3 dB entre $0,1^\circ$ et 50° peut être considérée comme un indicateur du niveau d'incertitude, ou de la tolérance, du diagramme de gain d'antenne utilisé dans une simulation statistique de Monte-Carlo. Comme nous n'avons pas suffisamment de données sur la distribution de cette classe d'antennes, nous proposons de considérer que la variation par rapport au gain moyen est de type Gaussien, avec une valeur $3\text{-}\sigma$ égale à 3 dB.

5 Conclusion

On propose dans le présent document un modèle de gain mathématique, Jp représentant une enveloppe applicable à la classe des antennes à grande ouverture actuellement utilisées pour les stations terriennes du service de recherche spatiale. Ce gain prend en compte l'effet de la tolérance de surface sur la distribution des valeurs de gain dans le faisceau principal et les faisceaux latéraux. Le rendement d'ouverture dans le faisceau principal et dans les faisceaux latéraux est également pris en compte. Ce modèle présente manifestement des propriétés supérieures à celles des modèles existants à de nombreux égards.

On propose également un modèle de «gain moyen», Ja, pour estimer avec davantage de précision les brouillages cumulatifs occasionnés par un grand nombre de sources de brouillage distribuées au moyen d'une simulation statistique (Monte-Carlo). Un modèle simple décrivant les écarts incertains par rapport au diagramme de gain moyen est également fourni pour les simulations.

Pour une antenne type de 34 m ou de 70 m du service de recherche dans l'espace lointain fonctionnant dans la bande des 2,3 GHz ou dans la bande des 8,4 GHz, le modèle Jp (crête) donne une enveloppe plus serrée que le modèle de la Recommandation UIT-R F.699-7 et un meilleur rapport de gain moyen, tandis que le modèle Ja (gain moyen) donne une meilleure approximation et un meilleur rapport de gain moyen que les modèles de gain moyen des Recommandations UIT-R F.1245 et UIT-R RA.1631. Ces observations s'appliquent aussi à une antenne de 34 m fonctionnant à 32 GHz ou à 37 GHz.

Compte tenu de toutes les variations et incertitudes qui caractérisent les diagrammes de rayonnement des différentes antennes, et du fait que le modèle Jp proposé donne une enveloppe supérieure plus serrée sur la base des principes de la physique, il conviendrait d'utiliser ce modèle dans toutes les études de compatibilité et de partage faisant intervenir un diagramme de gain déterministe unique. Le modèle de gain moyen, Ja, ne devrait être utilisé qu'en présence d'un grand nombre de sources de brouillage distribuées sur une large gamme de valeurs angulaires par rapport à l'axe de visée.

6 Références bibliographiques

JAMNEJAD, V. [8-13 mars 2003] Simple gain probability functions for large reflector antennas of JPL/NASA. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana.

RUZE, J. [avril 1966] Antenna tolerance theory-A review. *Proc. IEEE*, Vol. 54, p. 633-640.

FIGURE 1a

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 1\,000 \lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «moyenne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/15) \lambda$
 (Echelle angulaire linéaire)

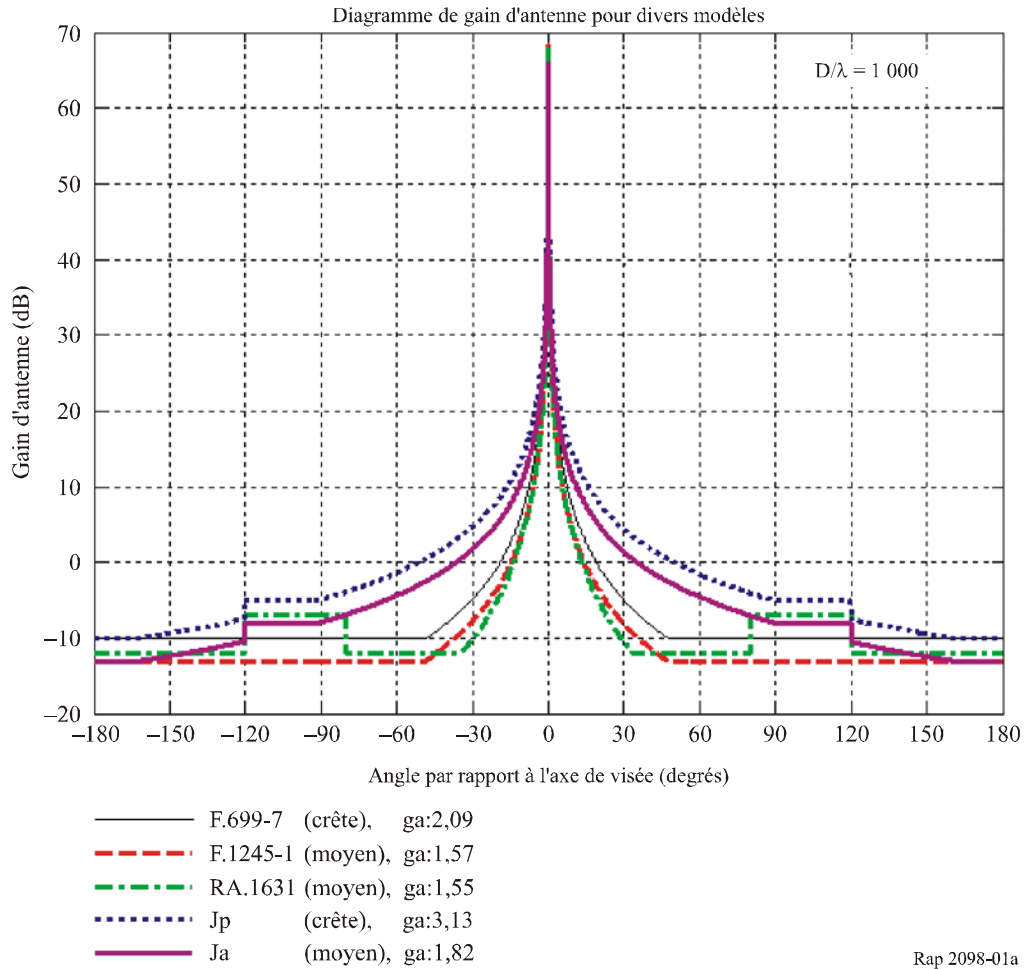
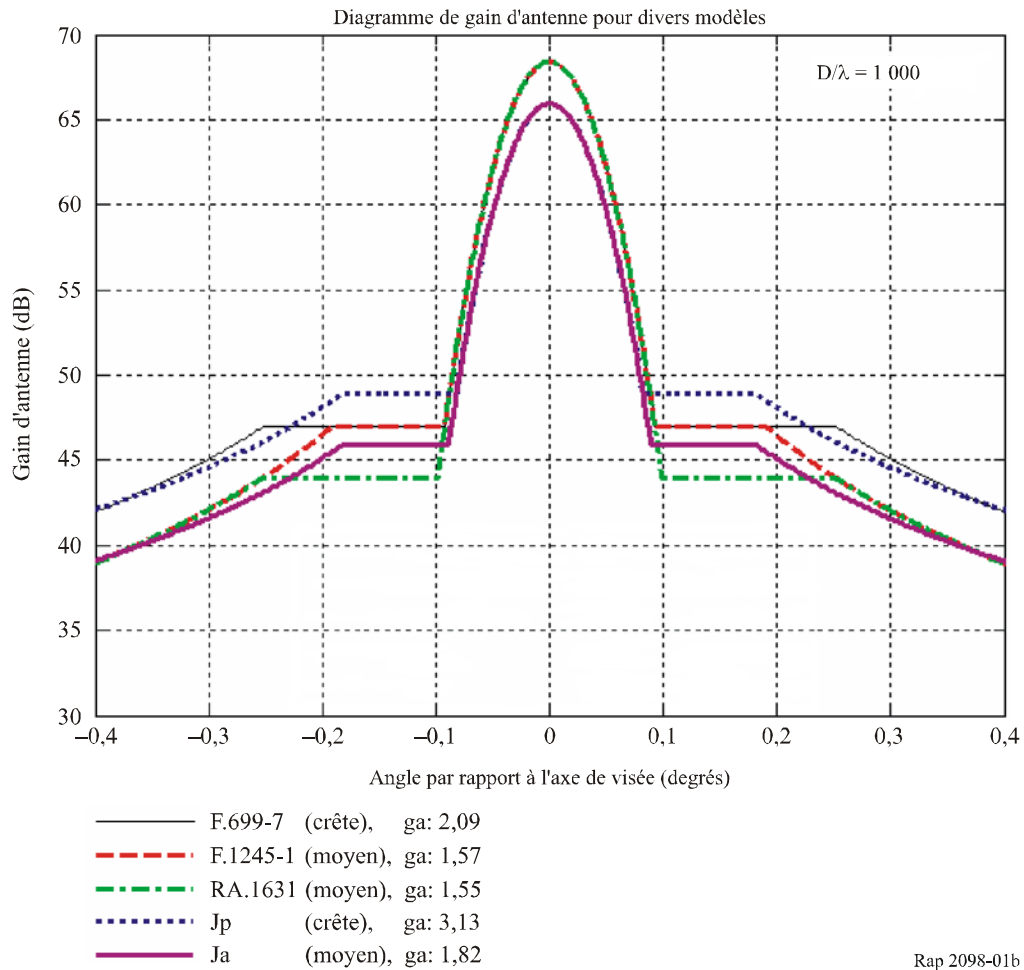


FIGURE 1b

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 1\,000 \lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «moyenne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/15) \lambda$
 (Echelle angulaire linéaire étendue)



Rap 2098-01b

FIGURE 1c

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 1\,000 \lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «moyenne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/15) \lambda$
 (Echelle angulaire logarithmique)

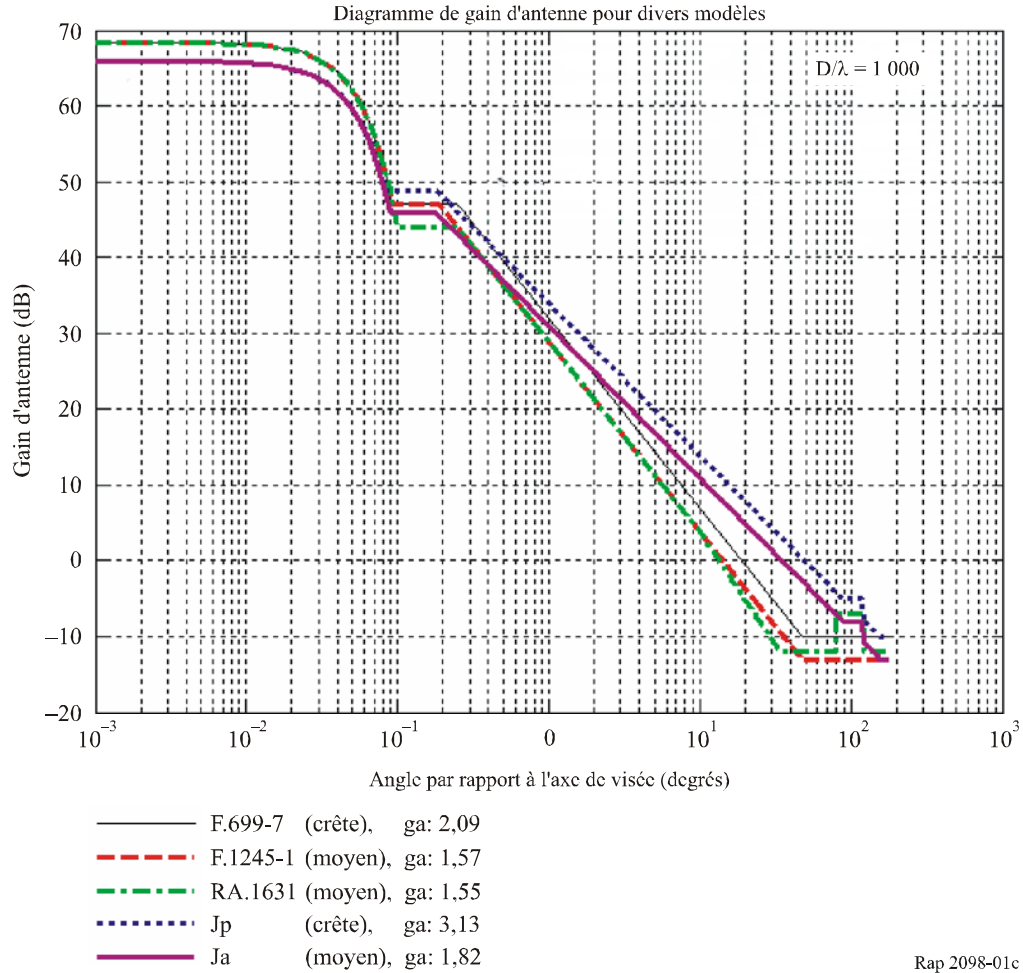
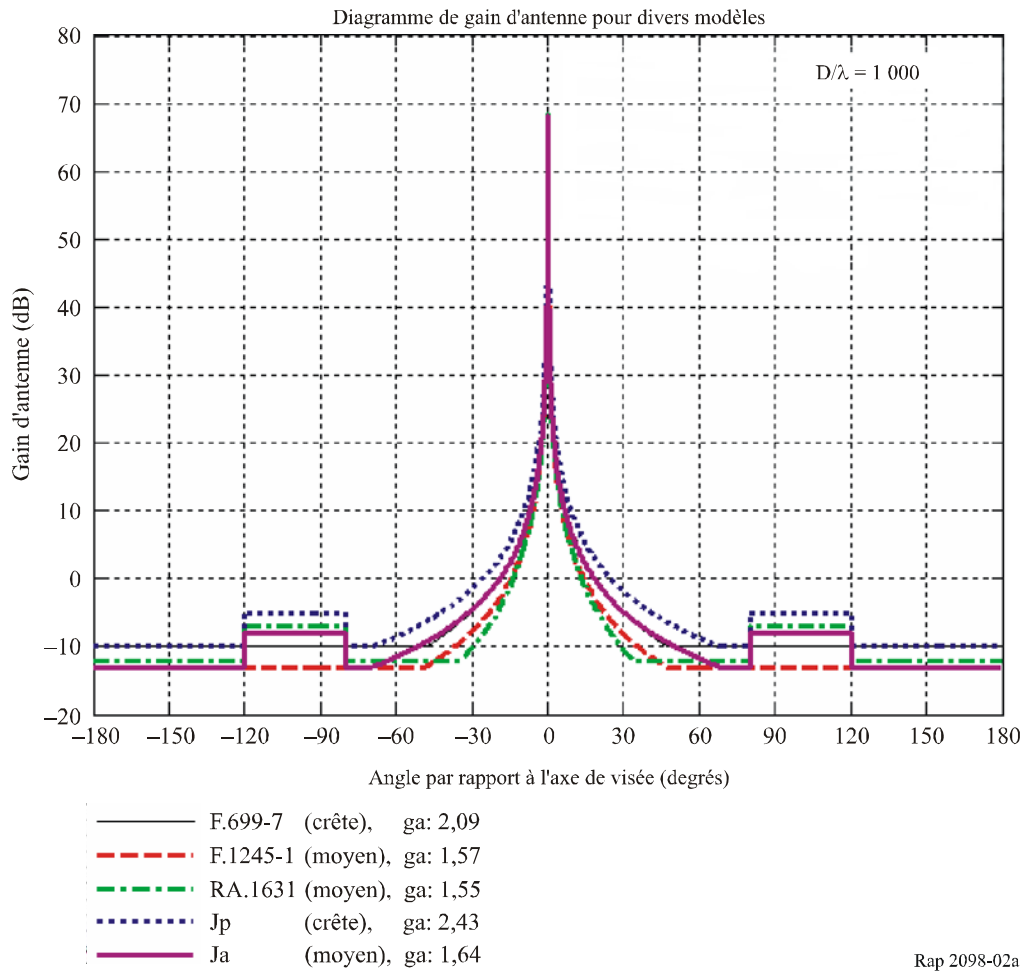


FIGURE 2a

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 1\,000 \lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «moyenne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/30) \lambda$
 (Echelle angulaire linéaire)



Rap 2098-02a

FIGURE 2b

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 1\,000\lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «moyenne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/30)\lambda$
 (Echelle angulaire linéaire étendue)

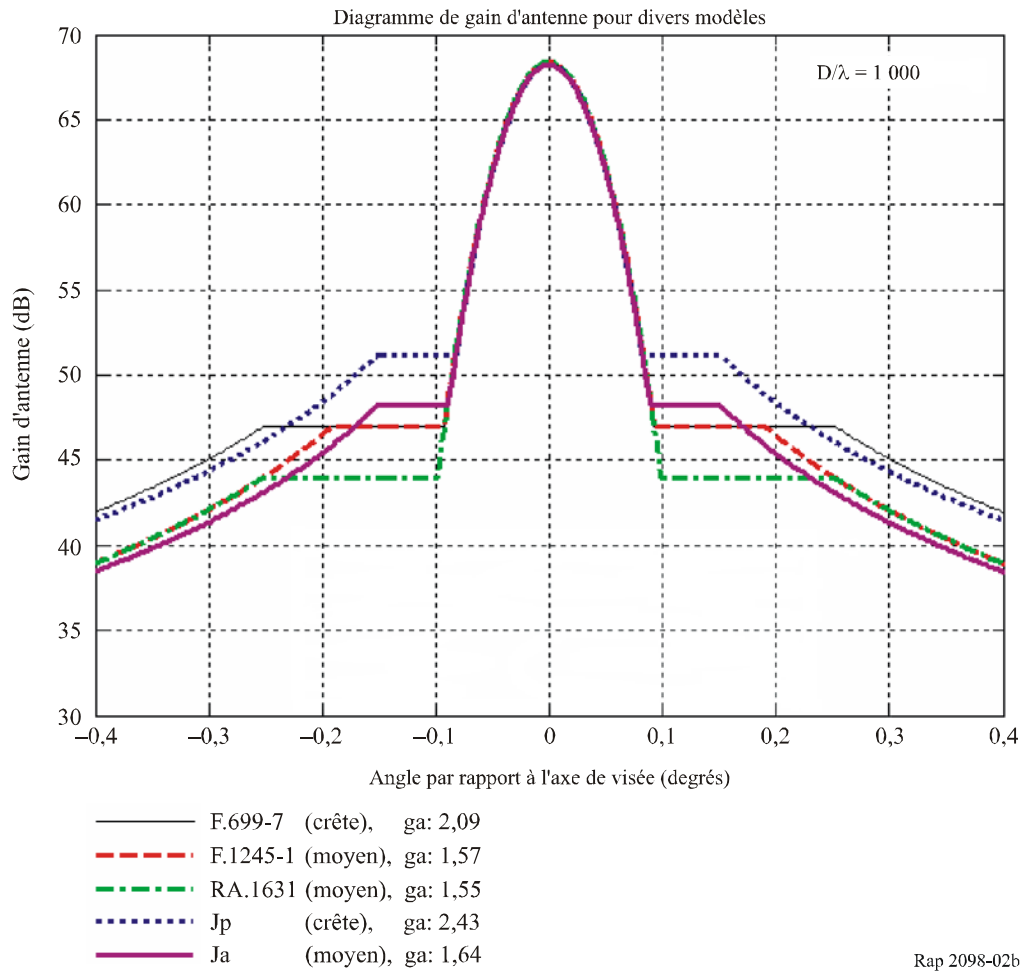
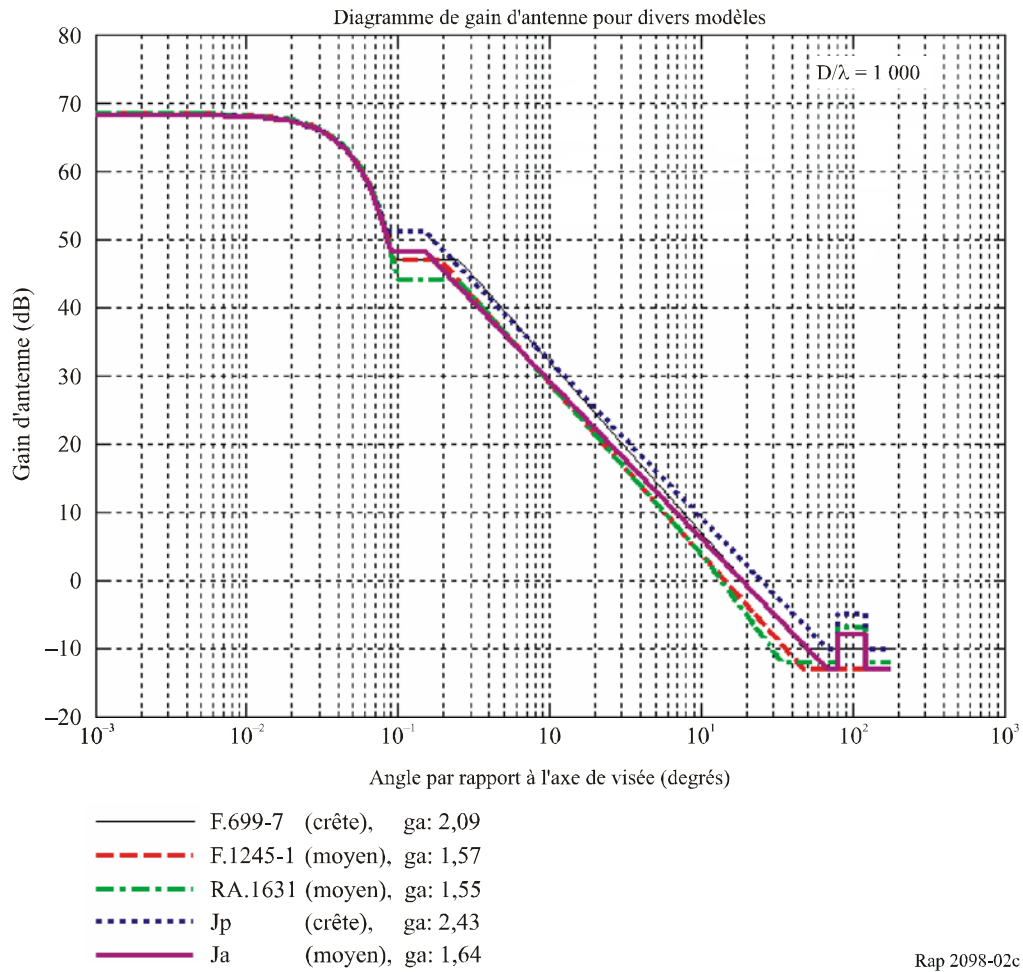


FIGURE 2c

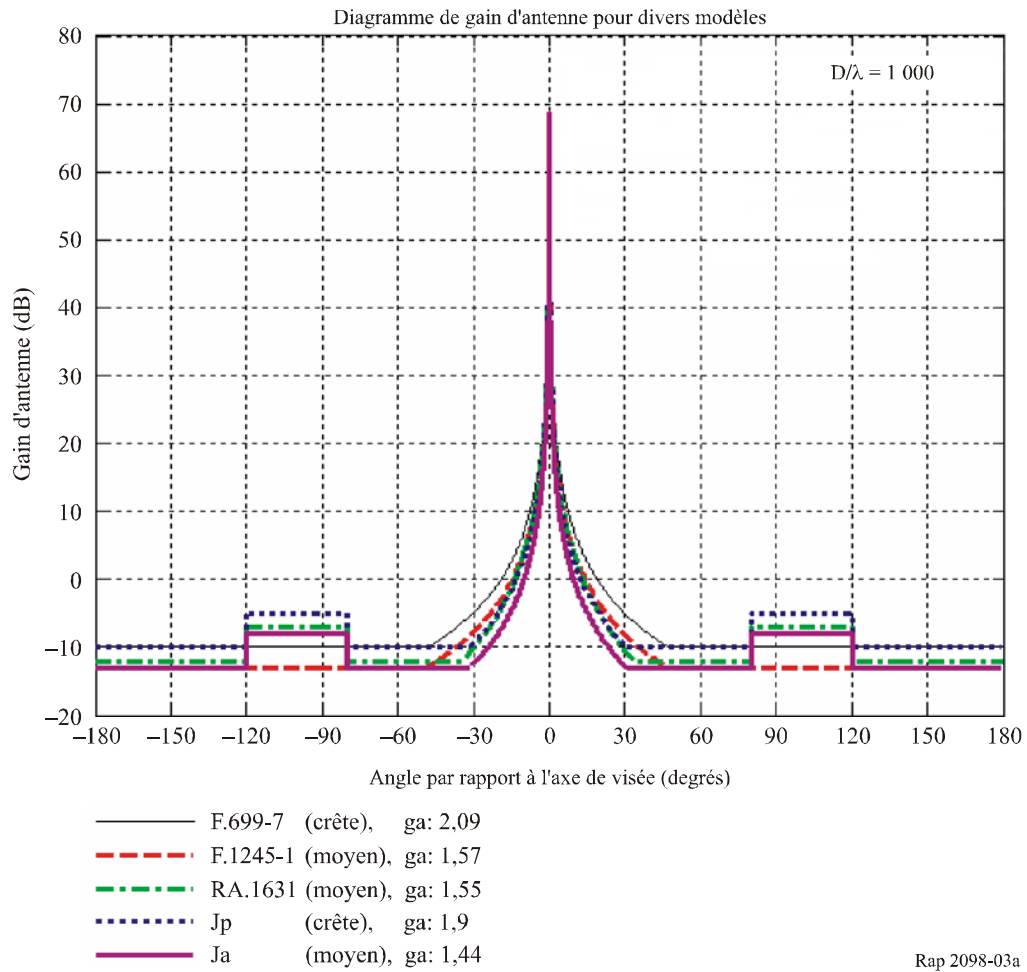
Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 1\,000 \lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «moyenne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/30) \lambda$
 (Echelle angulaire logarithmique)



Rap 2098-02c

FIGURE 3a

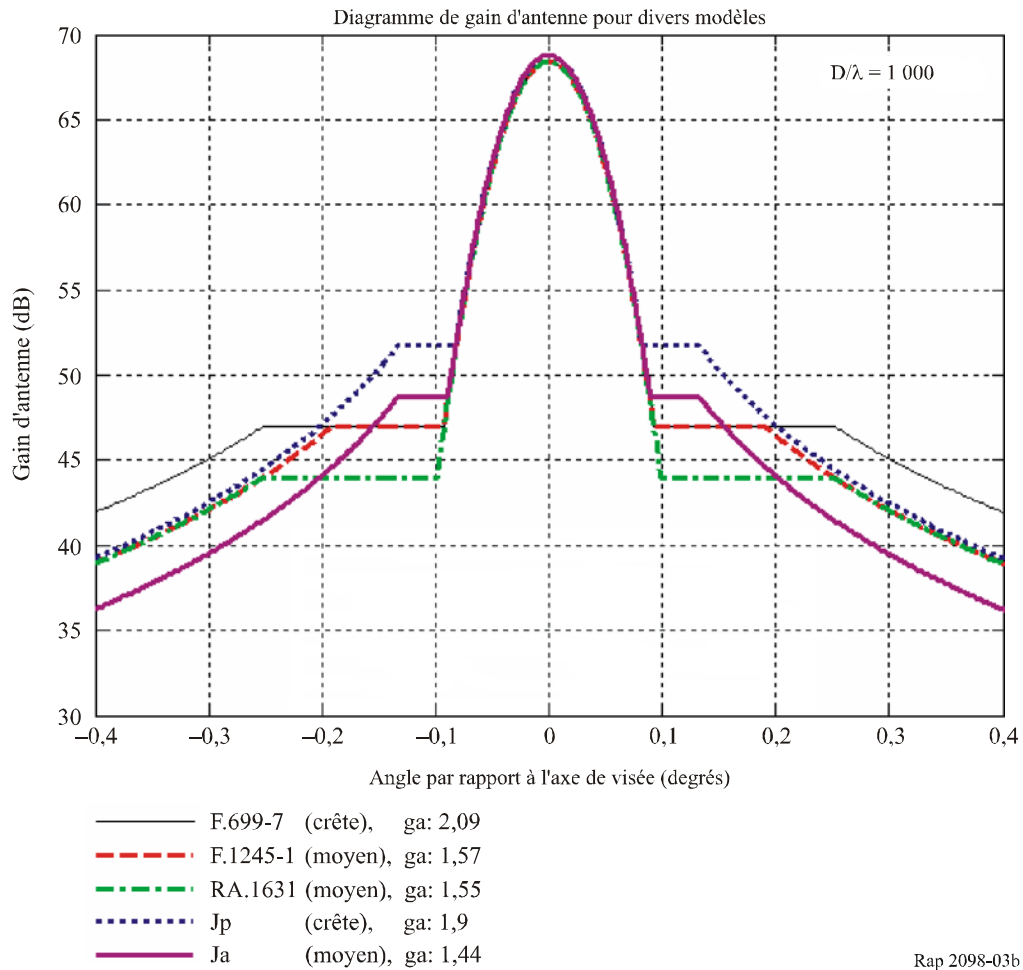
Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 1\,000\lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «bonne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/60)\lambda$
 (Echelle angulaire linéaire)



Rap 2098-03a

FIGURE 3b

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 1\,000\lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «bonne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/60)\lambda$
 (Echelle angulaire linéaire étendue)



Rap 2098-03b

FIGURE 3c

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 1\,000\lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «bonne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/60)\lambda$
 (Echelle angulaire logarithmique)

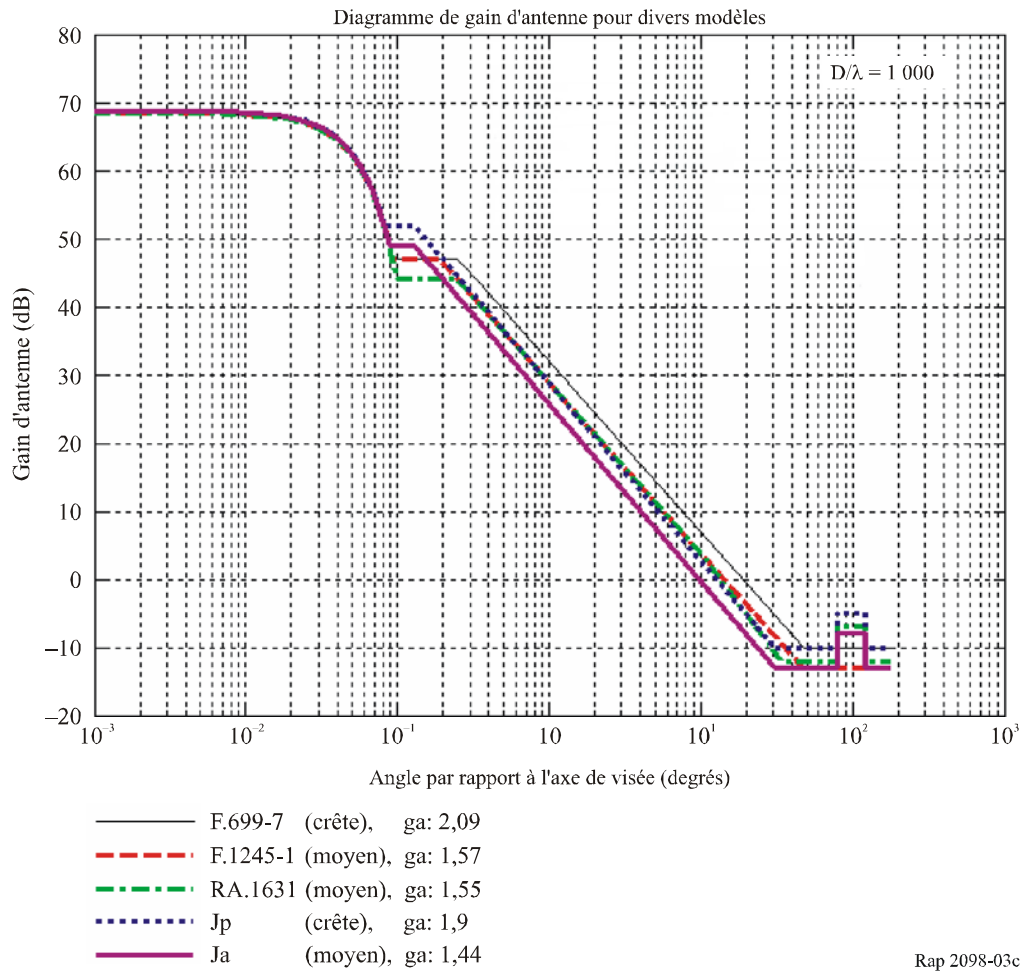
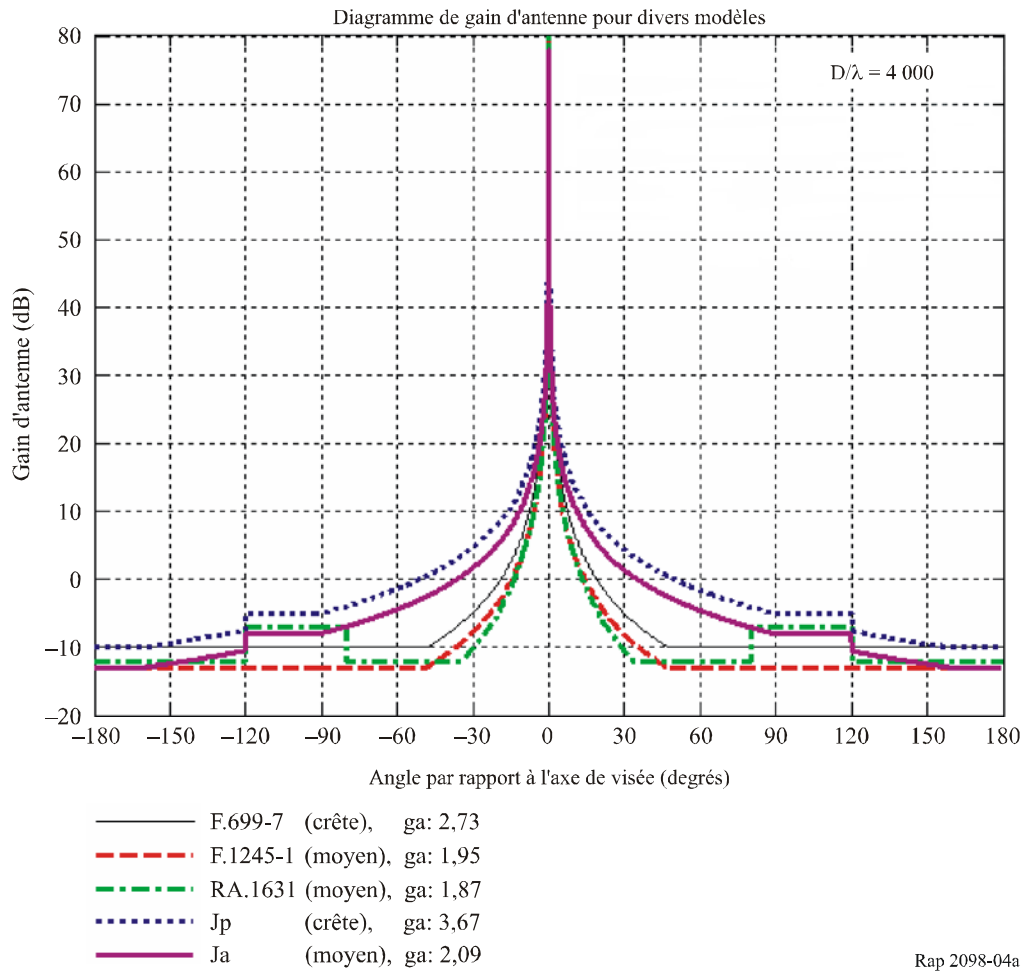


FIGURE 4a

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 4\,000\lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «médiocre»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/15)\lambda$
 (Echelle angulaire linéaire)



Rap 2098-04a

FIGURE 4b

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 4\,000\lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «médiocre»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/15)\lambda$
 (Echelle angulaire linéaire étendue)

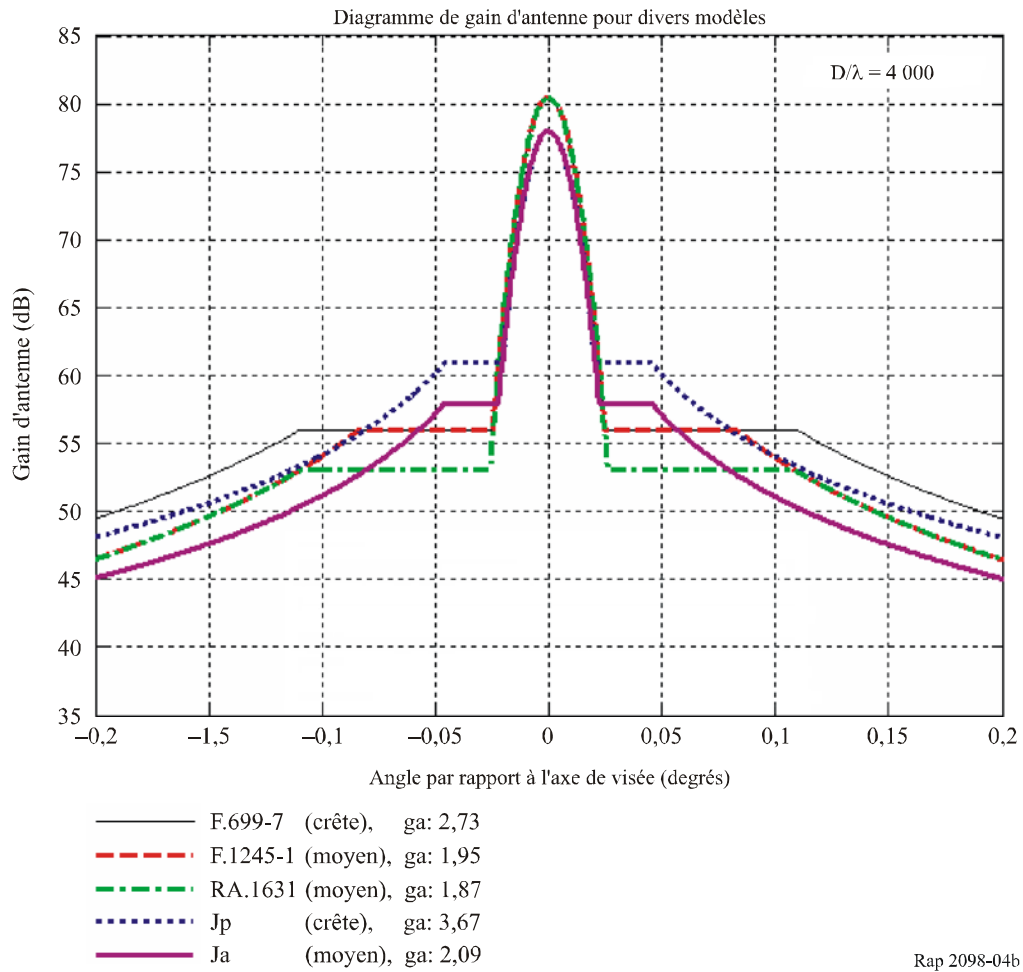


FIGURE 4c

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 4\,000\lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «médiocre»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/15)\lambda$
 (Echelle angulaire logarithmique)

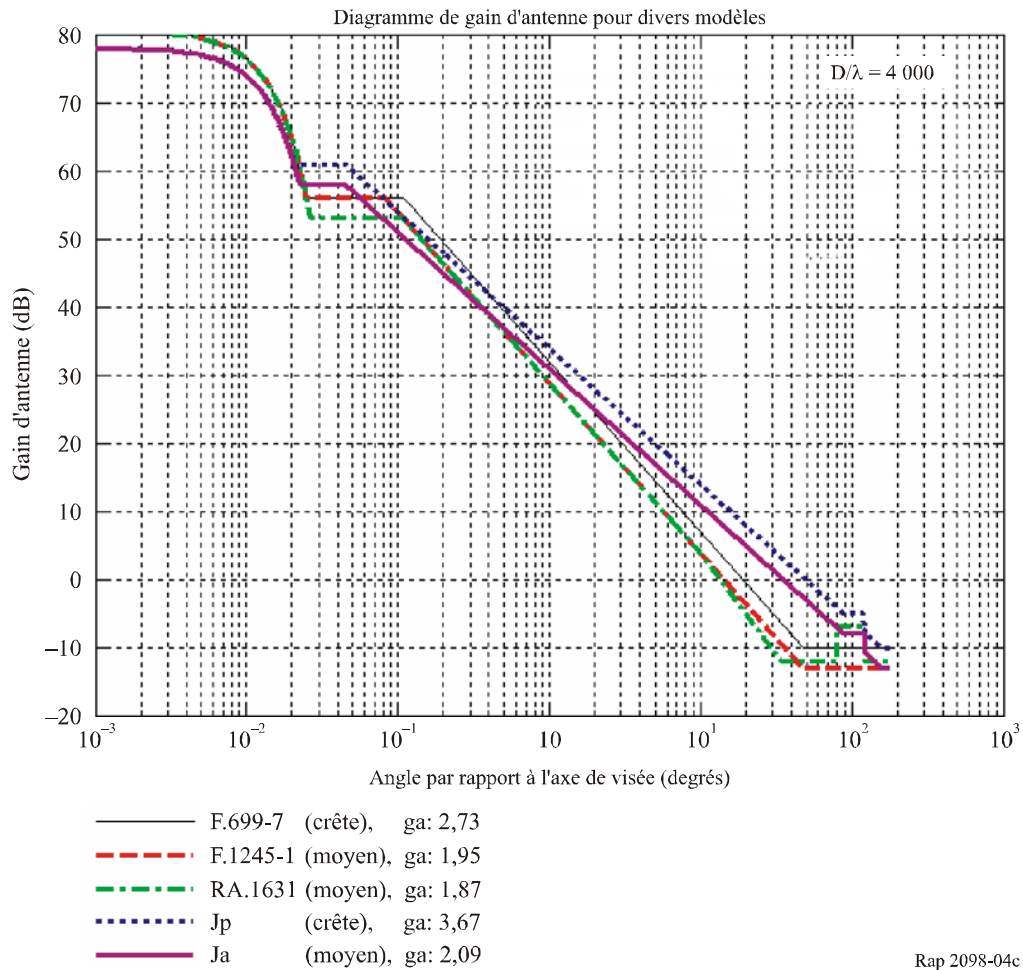
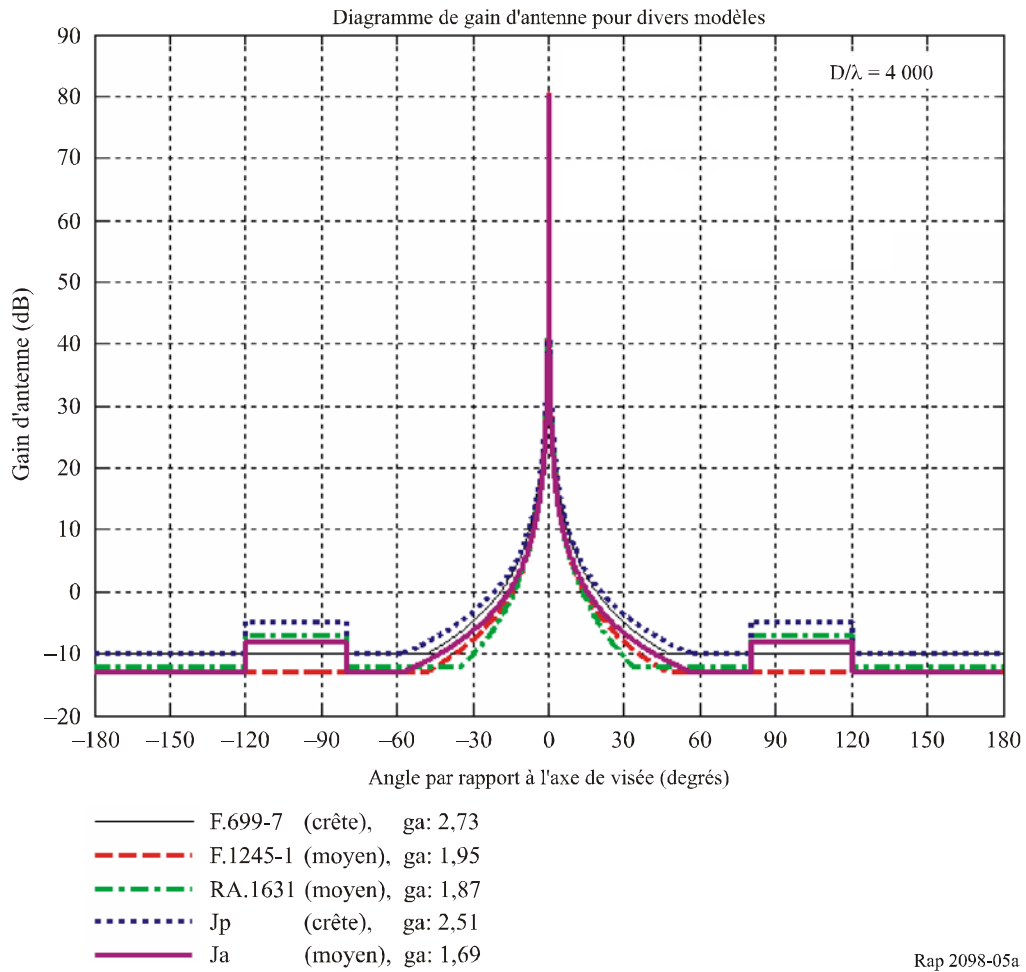


FIGURE 5a

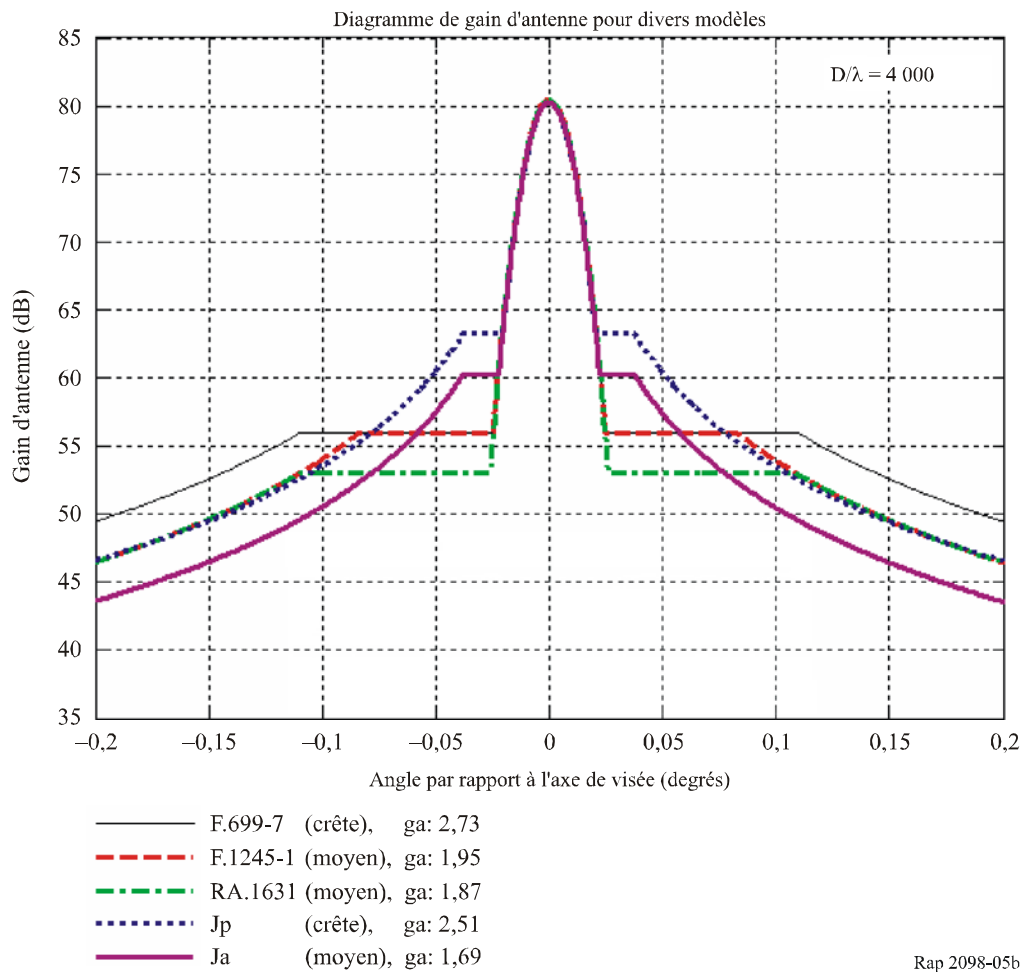
Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 4\,000\lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «moyenne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/30)\lambda$
 (Echelle angulaire linéaire)



Rap 2098-05a

FIGURE 5b

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 4\,000\lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «moyenne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/30)\lambda$
 (Echelle angulaire linéaire étendue)



Rap 2098-05b

FIGURE 5c

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 4\ 000\ \lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «moyenne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/30)\ \lambda$
 (Echelle angulaire logarithmique)

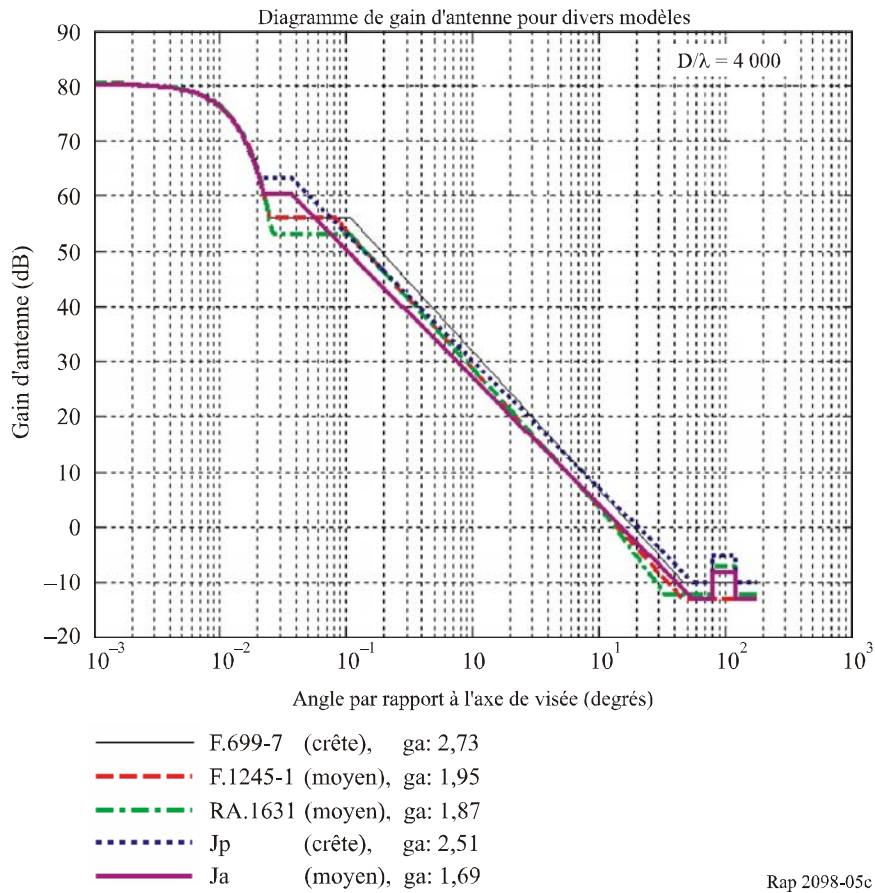


FIGURE 6a

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 4\,000 \lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «bonne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/60) \lambda$
 (Echelle angulaire linéaire)

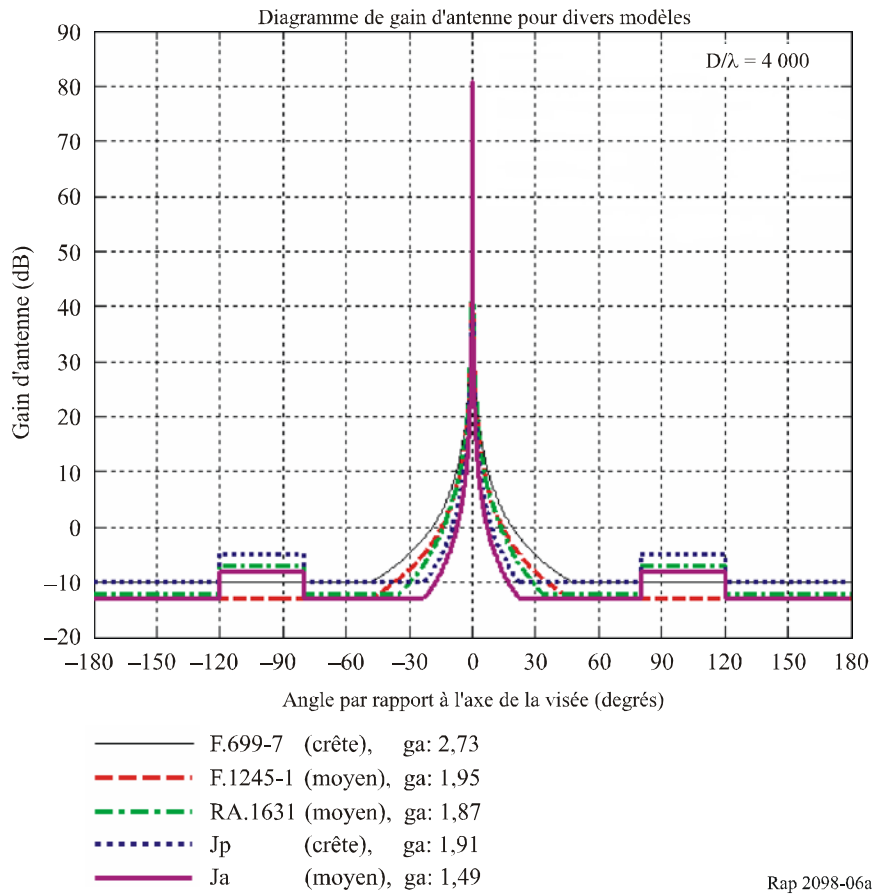


FIGURE 6b

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 4\,000\lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «bonne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/60)\lambda$
 (Echelle angulaire linéaire étendue)

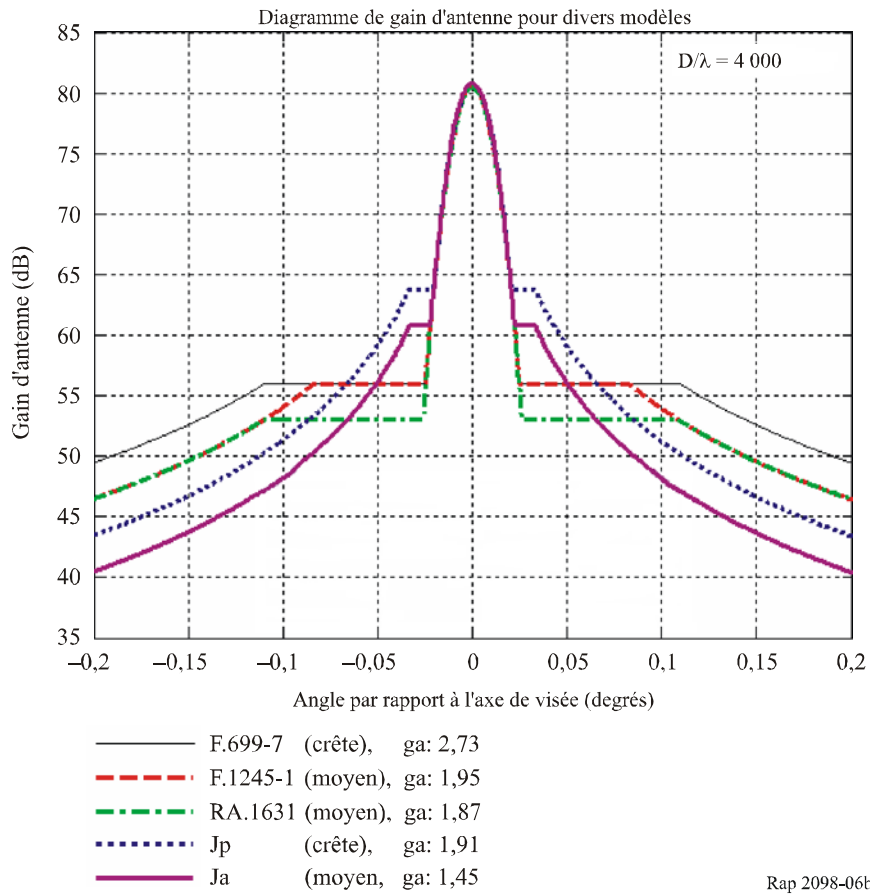
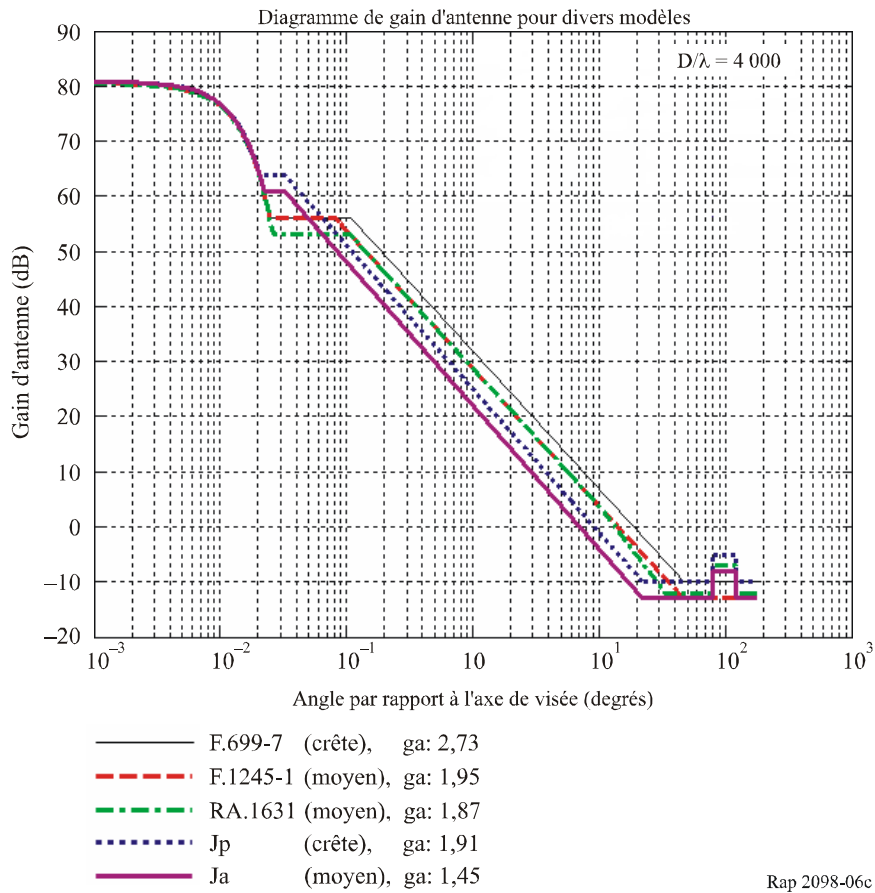


FIGURE 6c

Comparaison de modèles de diagramme de gain, diamètre d'antenne $D = 4\,000\lambda$.
 Les modèles Jp et Ja correspondent à une antenne «bonne»,
 caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/60)\lambda$
 (Echelle angulaire logarithmique)



Rap 2098-06c

FIGURE 7a

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne «médiocre» caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/15) \lambda$
(Gain moyen calculé (dB))

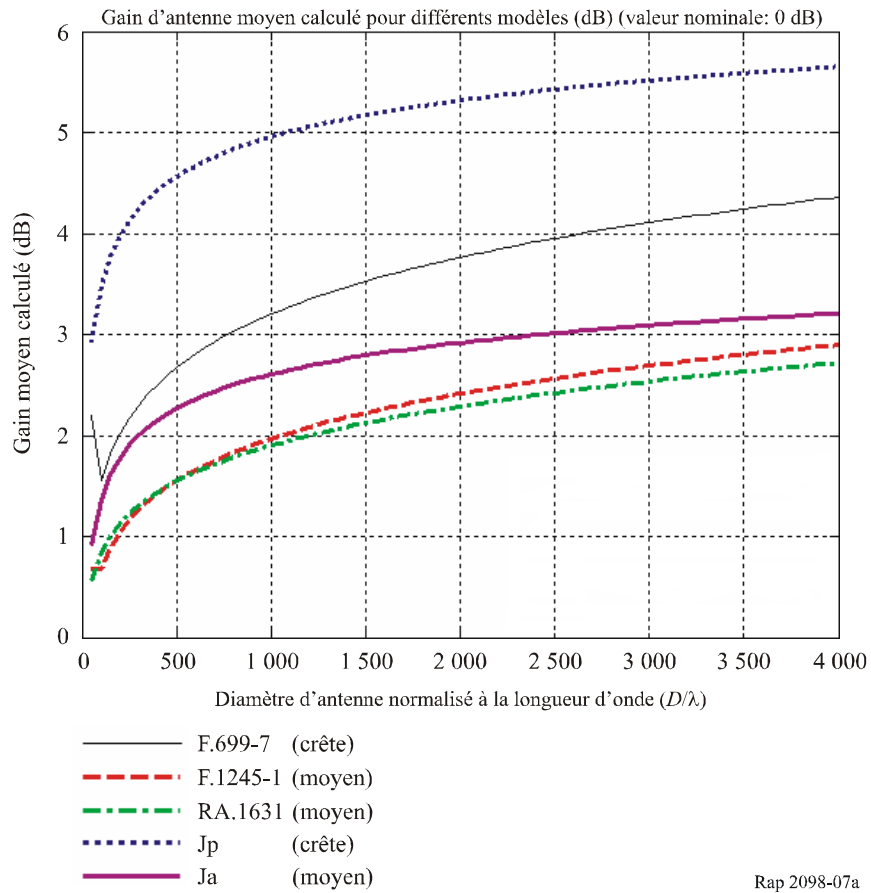
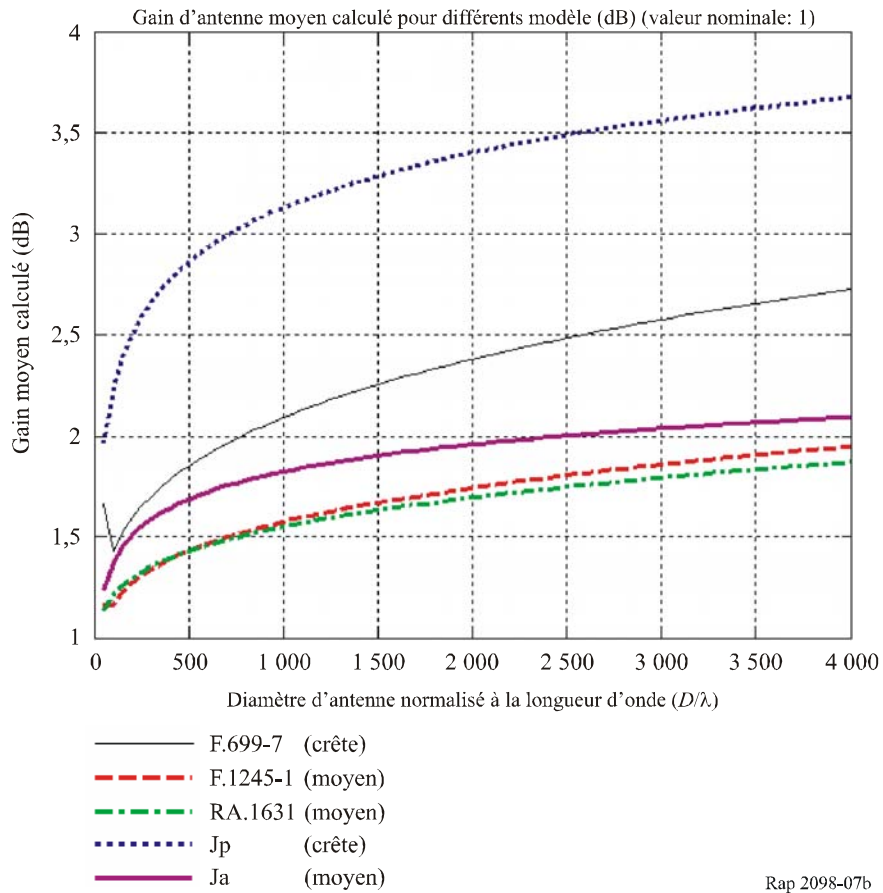


FIGURE 7b

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne «médiocre» caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/15) \lambda$
(Gain linéaire moyen calculé)



Rap 2098-07b

FIGURE 8a

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne «moyenne» caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/30) \lambda$
(Gain moyen calculé (dB))

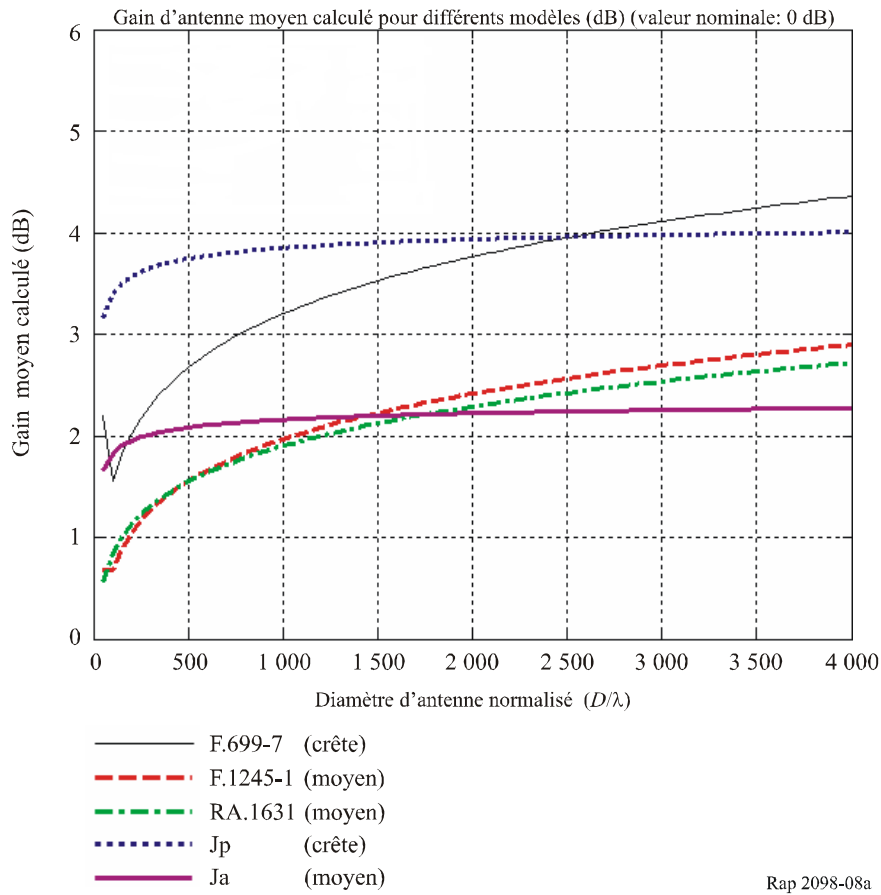
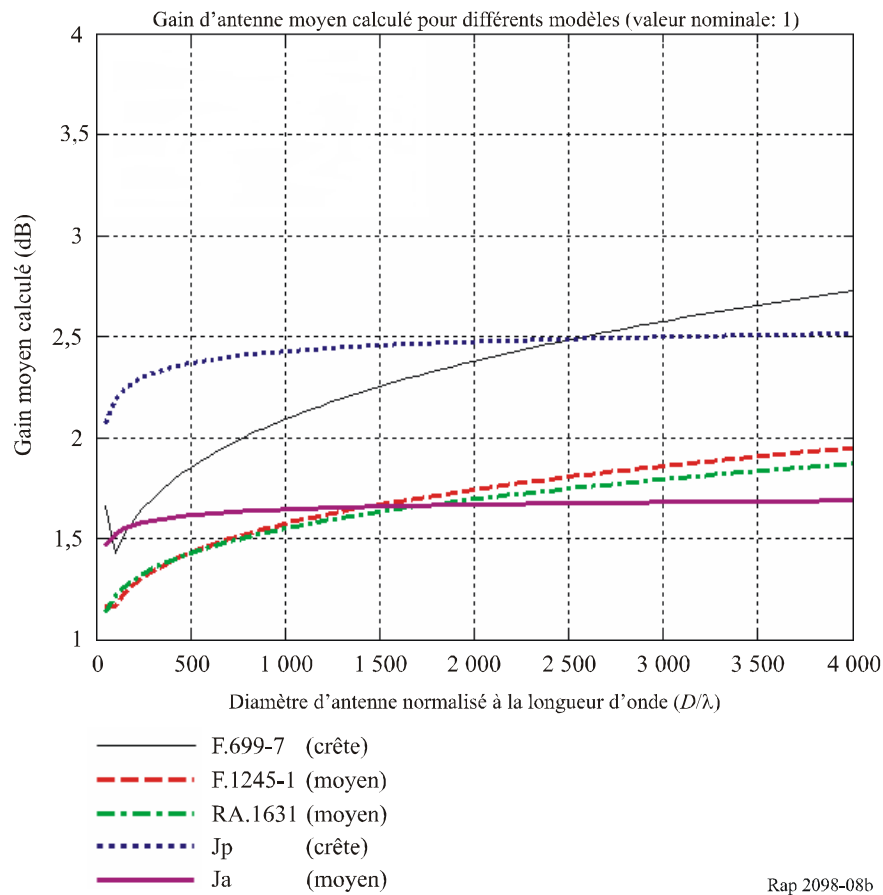


FIGURE 8b

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne «moyenne» caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/30) \lambda$ (Gain linéaire moyen calculé)



Rap 2098-08b

FIGURE 9a

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne «bonne» caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/60) \lambda$
(Gain moyen calculé (dB))

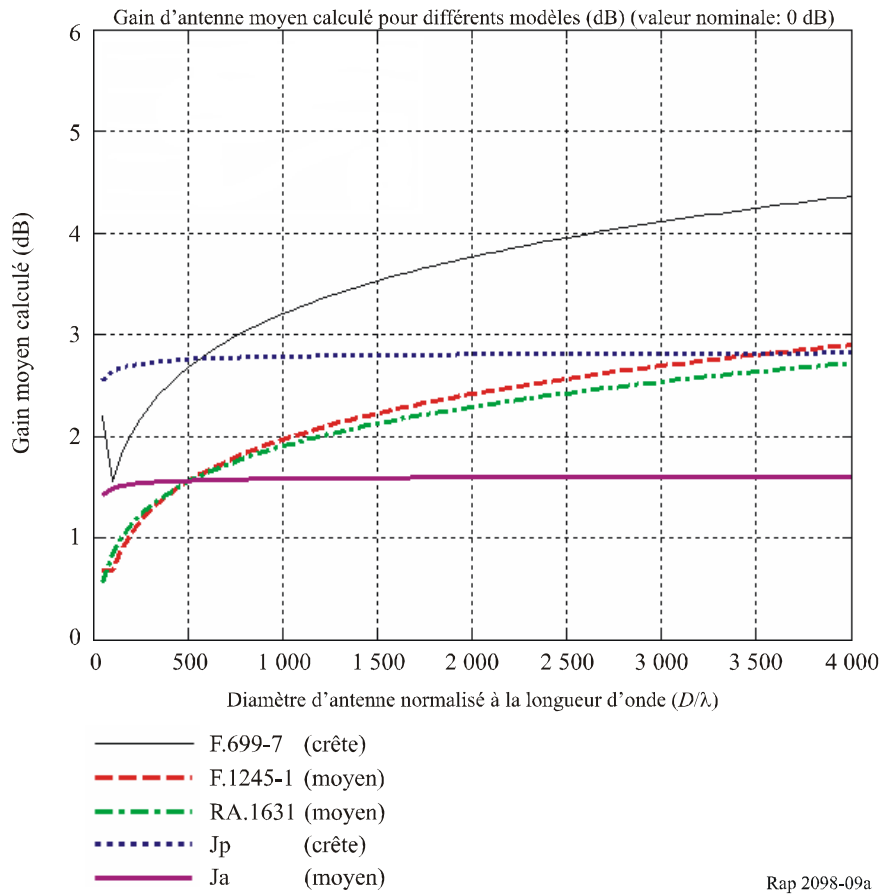


FIGURE 9b

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne «bonne» caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = (1/60) \lambda$ (Gain linéaire moyen calculé)

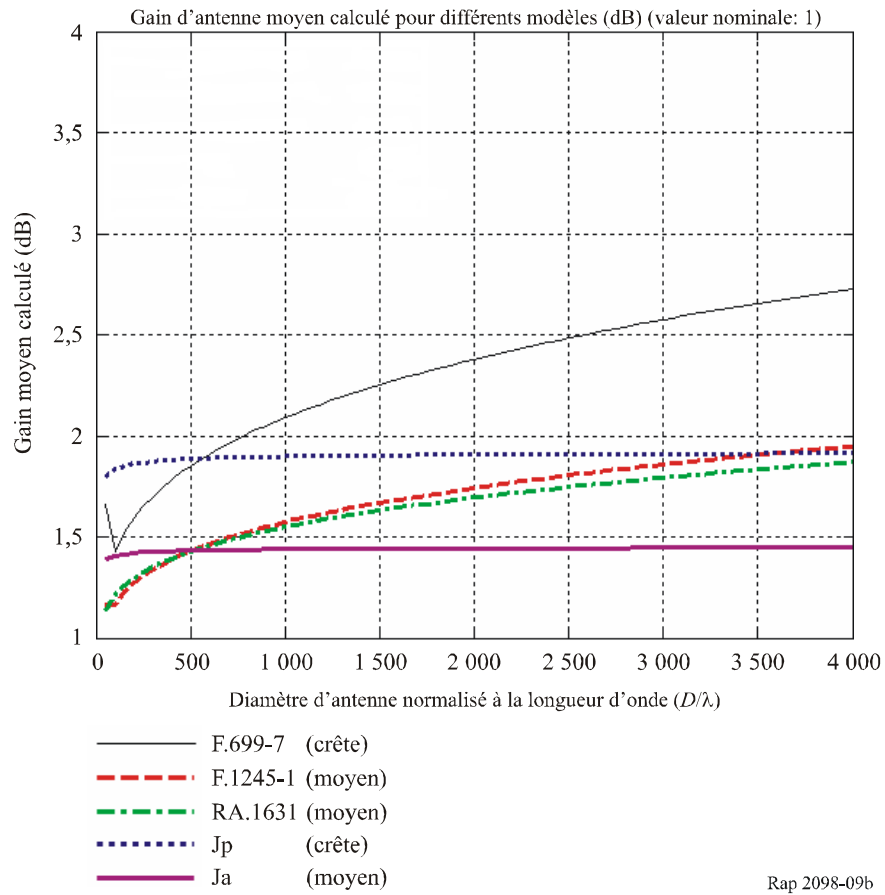


FIGURE 10a

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne de 34 m caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = 0,25$ mm (Gain moyen calculé (dB))

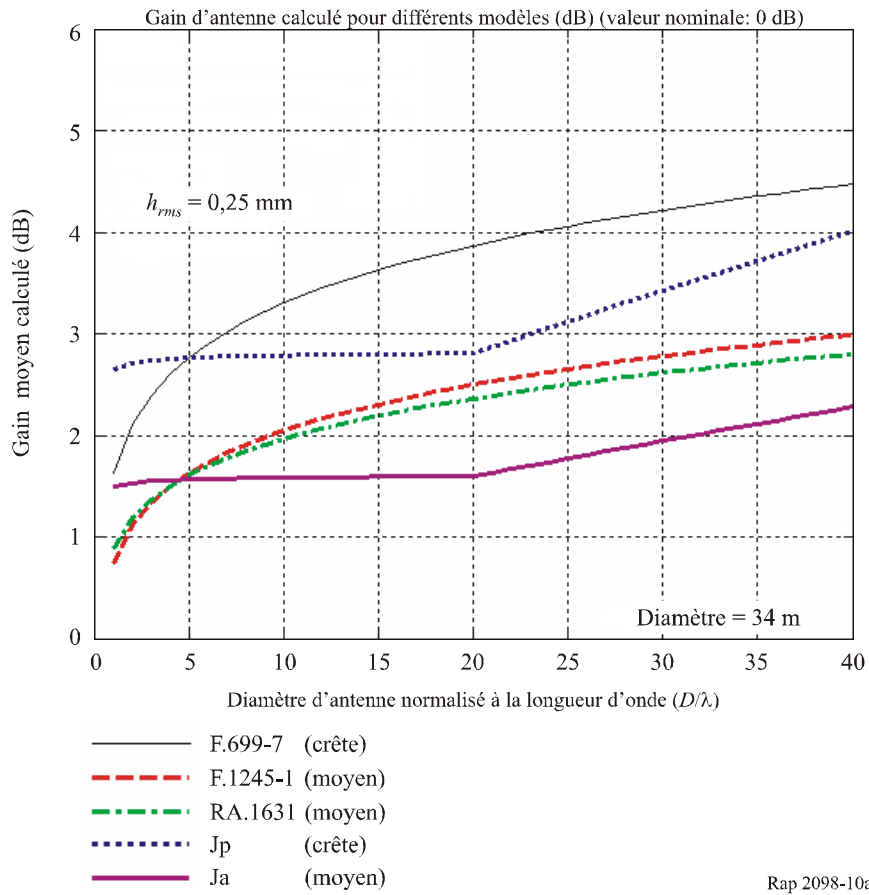


FIGURE 10b

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne de 34 m caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = 0,25$ mm (Gain linéaire moyen calculé)

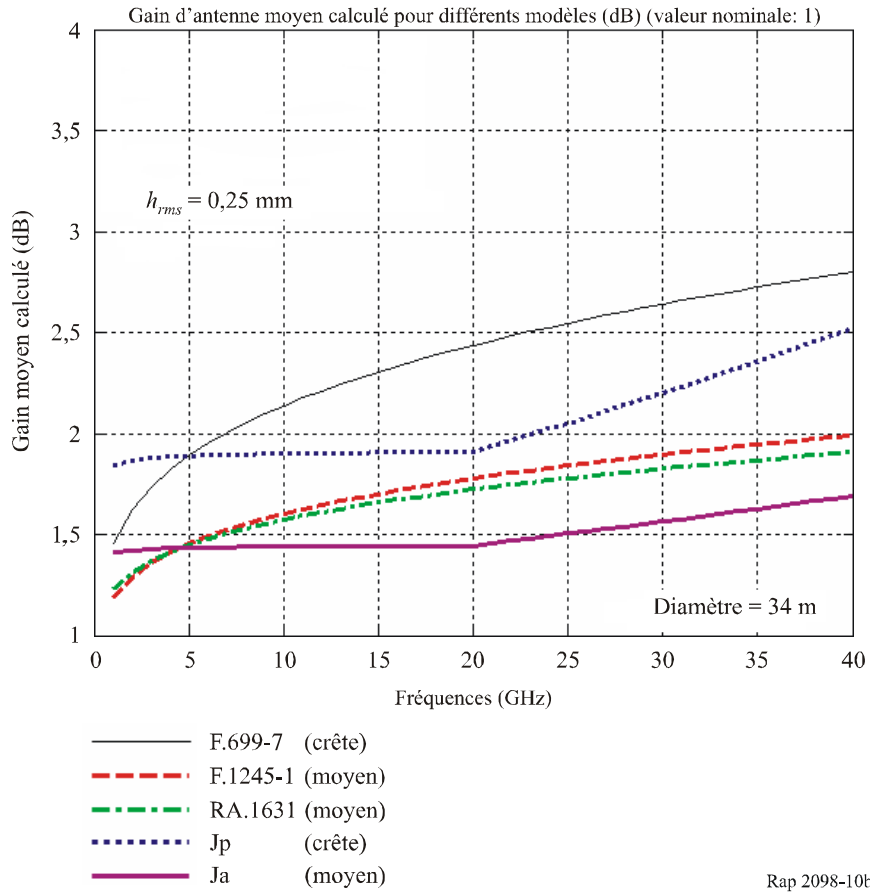


FIGURE 11a

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne de 70 m caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = 0,60$ mm (Gain moyen calculé (dB))

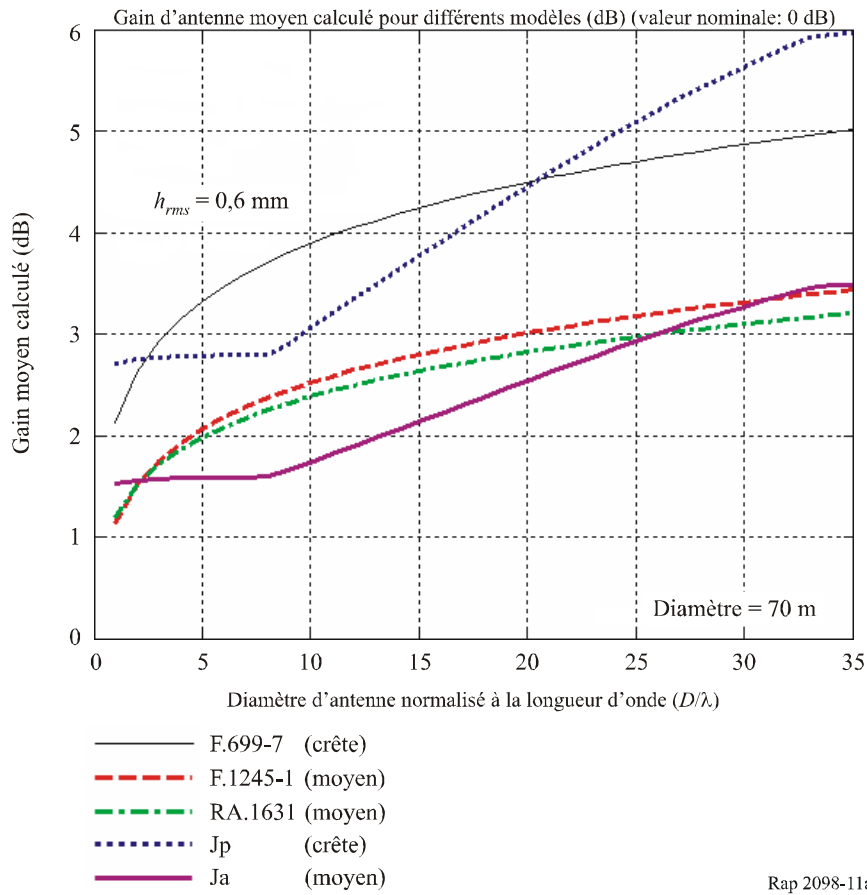


FIGURE 11b

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne de 70 m caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = 0,60$ mm (Gain linéaire moyen calculé)

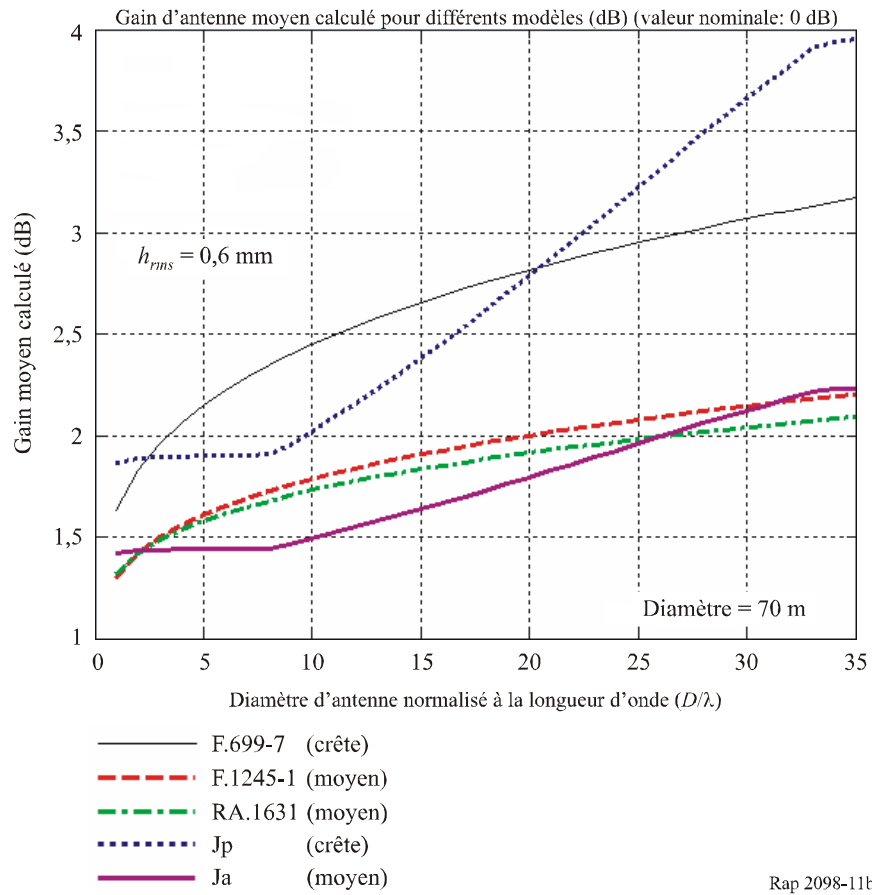


FIGURE 12a

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne «médiocre» caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = 1/15 \lambda$.
 Comprend le diagramme théorique calculé pour différentes longueurs de corrélation ($c/\lambda = 2,5; 5; 10; 20; 40; 80; 160$)

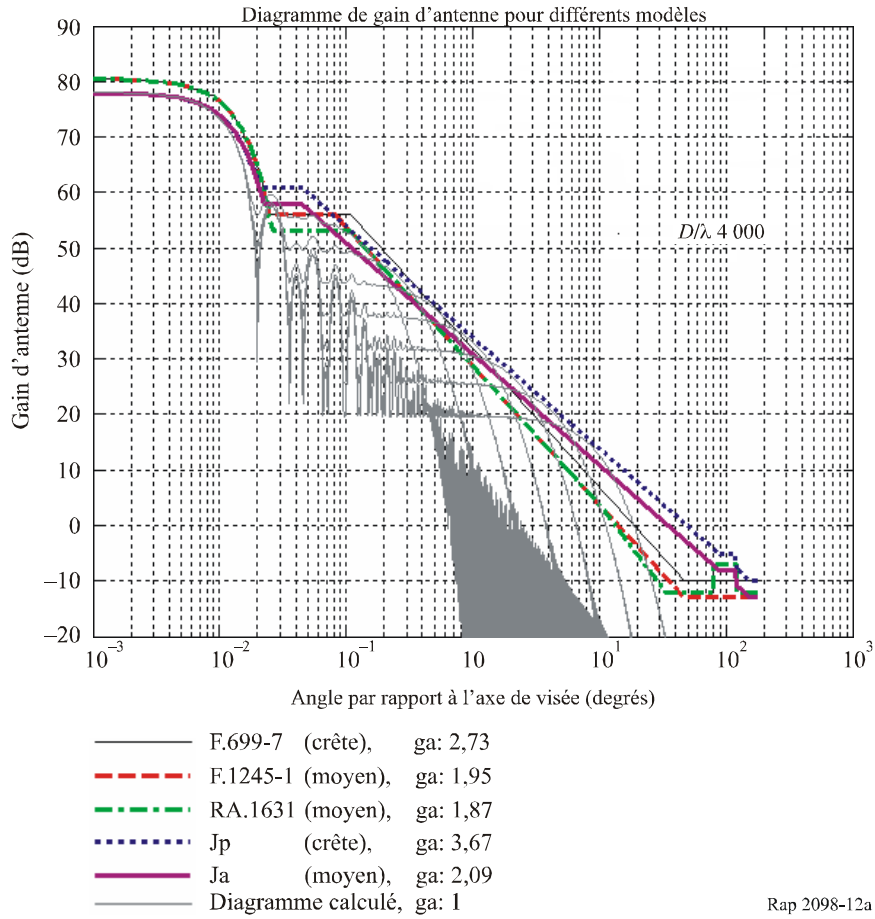


FIGURE 12b

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne «moyenne» caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = 1/30 \lambda$.
Comprend le diagramme théorique calculé pour différentes longueurs de corrélation ($c/\lambda = 2,5; 5; 10; 20; 40; 80; 160$)

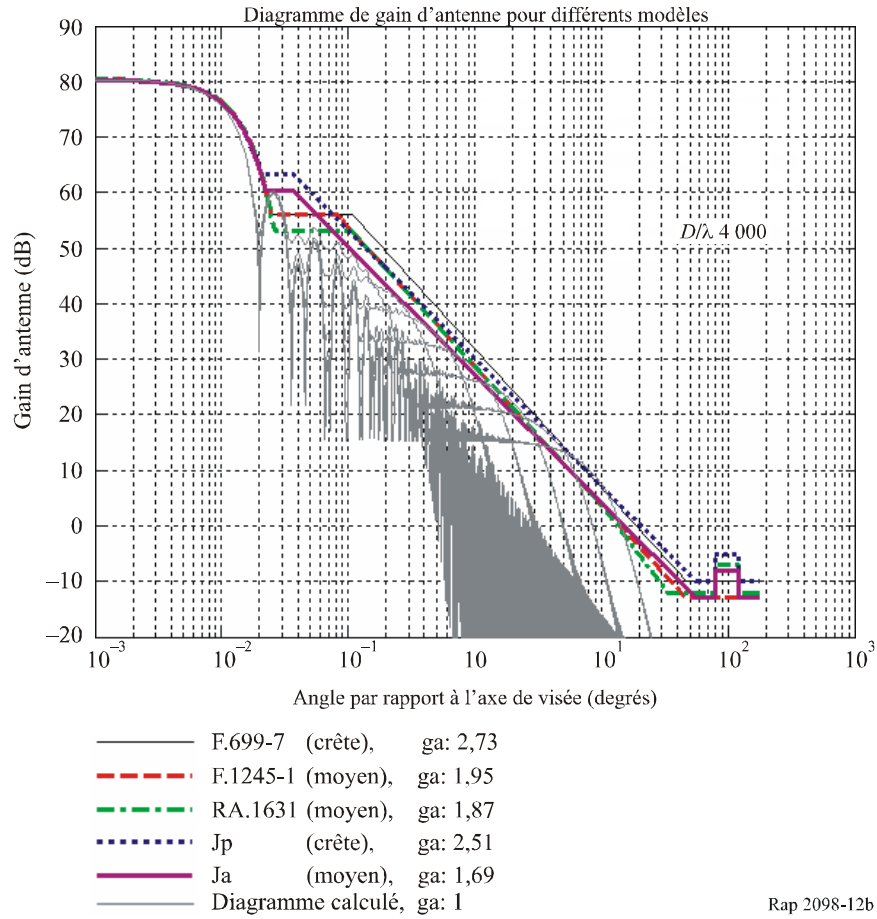


FIGURE 12c

Comparaison des valeurs de gain moyen calculées avec différents modèles, les modèles Jp et Ja correspondant à une antenne «bonne» caractérisée par une erreur de surface $h_{rms} = 1/60 \lambda$.
 Comprend le diagramme théorique calculé pour différentes longueurs de corrélation ($c/\lambda = 2,5; 5; 10; 20; 40; 80; 160$)

