

RECOMMANDATION UIT-R BO.1506

Méthodologie permettant d'évaluer l'incidence du brouillage d'origine solaire sur la qualité de fonctionnement des liaisons géostationnaires (OSG) du service de radiodiffusion par satellite (SRS)

(Question UIT-R 220/11)

(2000)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) qu'il est possible d'optimiser les liaisons OSG pour des régions arides en prévoyant de très petites marges pour les liaisons, ce qui les rend sensibles aux brouillages;
- b) que le niveau de qualité de fonctionnement de ces liaisons OSG particulièrement sensibles aux brouillages sera influencé par des sources d'évanouissement ou de dégradation autres que la pluie;
- c) que les passages du Soleil dans le faisceau principal des antennes de réception sont une des causes de dégradation de la qualité de fonctionnement, laquelle pourrait être importante pour des liaisons avec de petites marges ou de grands diamètres d'antenne;
- d) qu'on utilise dans certaines méthodologies la qualité de fonctionnement des liaisons OSG pour déterminer les niveaux de brouillage acceptables entre systèmes,

recommande

1 d'utiliser, pour la conception des liaisons OSG du SRS, la méthodologie exposée dans l'Annexe 1 de la présente Recommandation afin d'évaluer le niveau de dégradation de la qualité de fonctionnement de ces liaisons imputable aux passages du Soleil dans le faisceau principal des antennes de réception.

NOTE 1 – On notera que certains systèmes OSG peuvent mettre en oeuvre diverses techniques (diversité de site ou de satellite) pour diminuer l'incidence des passages du Soleil sur leur qualité de fonctionnement.

ANNEXE 1

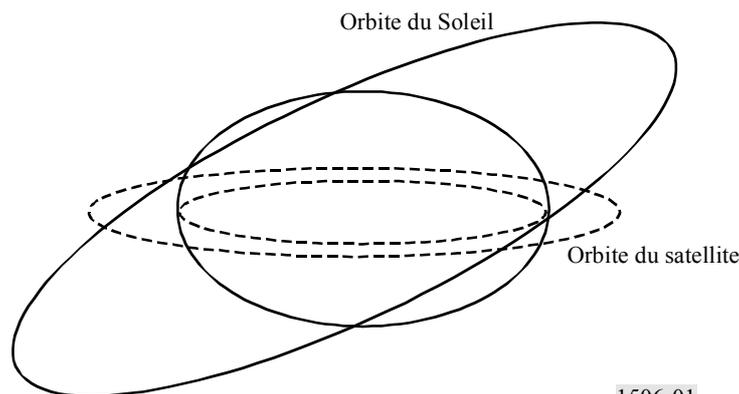
Méthodologie permettant d'évaluer l'incidence du brouillage d'origine solaire sur la qualité de fonctionnement des liaisons OSG du SRS**1 Méthode générale**

Le passage du Soleil dans le champ d'un récepteur OSG est un phénomène qui peut être facilement évalué car on en connaît bien la géométrie. La méthode proposée ci-après permet de décrire toutes les conséquences du passage du Soleil sur les bilans de liaisons OSG et ainsi d'évaluer correctement la qualité de fonctionnement de certaines liaisons qui n'ont pas besoin de marges de protection contre les évanouissements dus à la pluie. Le passage du Soleil ne se traduit pas par un évanouissement mais par une augmentation de la température de bruit du système qui peut être importante pour certaines liaisons OSG lorsque les marges sont petites et le niveau de bruit peu élevé.

La méthode proposée se fonde sur une géométrie bien définie, de la position du Soleil par rapport à un emplacement précis à la surface de la Terre: le Soleil est approximativement un disque de $0,53^\circ$ de diamètre vu depuis un point à la surface de la Terre. L'incidence du passage du Soleil est importante lorsque le disque du Soleil coupe le faisceau principal de l'antenne de réception du SRS. Pour la déterminer, on peut utiliser une méthode détaillée ou une méthode simplifiée. Dans la méthode détaillée, on fait varier le gain de l'antenne sur le disque optique du Soleil conformément au diagramme de gain supposé de l'antenne. Dans la méthode simplifiée, on suppose que le gain de l'antenne est constant sur le disque optique du Soleil et qu'il correspond au gain en direction du centre du disque du Soleil.

La configuration géométrique est présentée dans la Fig. 1. Le Soleil peut être assimilé à une source de bruit se déplaçant sur une trajectoire bien définie dans le ciel. Pendant l'équinoxe de printemps et l'équinoxe d'automne, il se trouve à l'intersection ou presque du plan de l'équateur et de l'écliptique. Pendant ces périodes, il est aligné sur l'antenne de réception du SRS et sur le satellite OSG du SRS. Il en résulte une augmentation de la température de bruit de l'antenne qui affecte le coefficient de qualité G/T du récepteur SRS de la liaison, ce qui se traduit par une dégradation du rapport porteuse/bruit (C/N). Selon la marge prévue par temps clair, la dégradation peut aller jusqu'à une interruption de la liaison pendant une brève période de temps.

FIGURE 1



1506-01

2 Méthodologie

La méthodologie est fondée sur le calcul de la position du Soleil par rapport à l'axe de visée de l'antenne de réception et donc sur l'estimation de l'augmentation de la température de bruit de l'antenne imputable au brouillage d'origine solaire.

Etape 1: On définit l'intervalle de temps pendant lequel on effectue les calculs par une date de début et une date de fin. On choisit l'incrément de temps en fonction des dimensions de l'antenne pour lesquelles les calculs sont faits.

Etape 2: Pour chaque incrément de temps considéré, on détermine les paramètres orbitaux du Soleil:

$$w = 282,9404$$

$$e = 0,016709$$

$$M = 356,0470 + 0,98560 T$$

où:

w : argument du périhélie (degrés)

e : excentricité

M : anomalie moyenne (degrés)

T : temps (jours).

Etape 3: On convertit ces paramètres orbitaux en coordonnées équatoriales, rectangulaires et géocentriques (X_{Soleil} , Y_{Soleil} , Z_{Soleil}). L'anomalie d'excentricité E est définie par:

$$E = M + e \sin(M) (1,0 + e \cos(M))$$

alors:

$$X1 = D_{Soleil} (\cos(E) - e)$$

$$Y1 = D_{Soleil} \left(\sqrt{1 - e^2} \right) \sin(E)$$

et:

$$V = A \operatorname{tg} 2 (Y1, X1)$$

$$R = \sqrt{X1^2 + Y1^2}$$

avec:

D_{Soleil} : la distance entre le centre de la Terre et le centre du Soleil

$A \operatorname{tg} 2()$: une fonction qui fait correspondre deux coordonnées x, y à l'angle correct.

La longitude du Soleil, $\operatorname{lonSoleil}$, est ensuite déterminée par:

$$\operatorname{lonSoleil} = V + w$$

et enfin:

$$X_{Soleil} = R \cos(\operatorname{lonSoleil})$$

$$Y_{Soleil} = R \sin(\operatorname{lonSoleil}) \cos(\operatorname{ecl})$$

$$Z_{Soleil} = R \sin(\operatorname{lonSoleil}) \sin(\operatorname{ecl})$$

où ecl est l'obliquité de l'écliptique qui peut être estimée avec: $\operatorname{ecl} = 23,4393^\circ$

Etape 4: Déterminer les coordonnées équatoriales, rectangulaires et géocentriques (X_{ST} , Y_{ST} , Z_{ST}) de la station terrienne (ST) et du satellite OSG (SAT):

$$X_{ST} = R_{Terre} \cos(\operatorname{lat}_{ST}) \cos(\operatorname{lon}_{ST} + (\omega_{Terre} T))$$

$$Y_{ST} = R_{Terre} \cos(\operatorname{lat}_{ST}) \sin(\operatorname{lon}_{ST} + (\omega_{Terre} T))$$

$$Z_{ST} = R_{Terre} \sin(\operatorname{lat}_{ST})$$

où:

R_{Terre} : rayon de la Terre (6 378 km)

lat_{ST} , lon_{ST} : latitude et la longitude de la station terrienne

ω_{Terre} : vitesse angulaire de la Terre (rad/jour) ($2\pi = 6,2831$)

T : pas horaire considéré (jours).

et pour le satellite OSG:

$$X_{SAT} = (R_{Terre} + H) \cos(lat_{SAT}) \cos(lon_{SAT} + (\omega_{Terre} T)) = (R_{Terre} + H) \cos(lon_{SAT} + (\omega_{Terre} T))$$

$$Y_{SAT} = (R_{Terre} + H) \cos(lat_{SAT}) \sin(lon_{SAT} + (\omega_{Terre} T)) = (R_{Terre} + H) \sin(lon_{SAT} + (\omega_{Terre} T))$$

$$Z_{SAT} = (R_{Terre} + H) \sin(lat_{SAT}) = 0$$

avec:

$$lat_{SAT} = 0$$

H : altitude du satellite OSG (35 786 km).

Etape 5: On obtient l'angle α entre le Soleil, S , la station terrienne, E , et le satellite OSG, G , comme suit:

$$\vec{ES} \cdot \vec{EG} = \left| \vec{ES} \right| \left| \vec{EG} \right| \cos(\alpha)$$

ainsi:

$$\alpha = A \cos \left\{ \frac{(X_{Soleil} - X_{ST})(X_{SAT} - X_{ST}) + (Y_{Soleil} - Y_{ST})(Y_{SAT} - Y_{ST}) + (Z_{Soleil} - Z_{ES})(Z_{SAT} - Z_{ES})}{\sqrt{[(X_{Soleil} - X_{ST})^2 + (Y_{Soleil} - Y_{ST})^2 + (Z_{Soleil} - Z_{ES})^2] [(X_{SAT} - X_{ST})^2 + (Y_{SAT} - Y_{ST})^2 + (Z_{SAT} - Z_{ES})^2]}} \right\}$$

Cet angle est l'angle hors axe du Soleil vu depuis l'antenne.

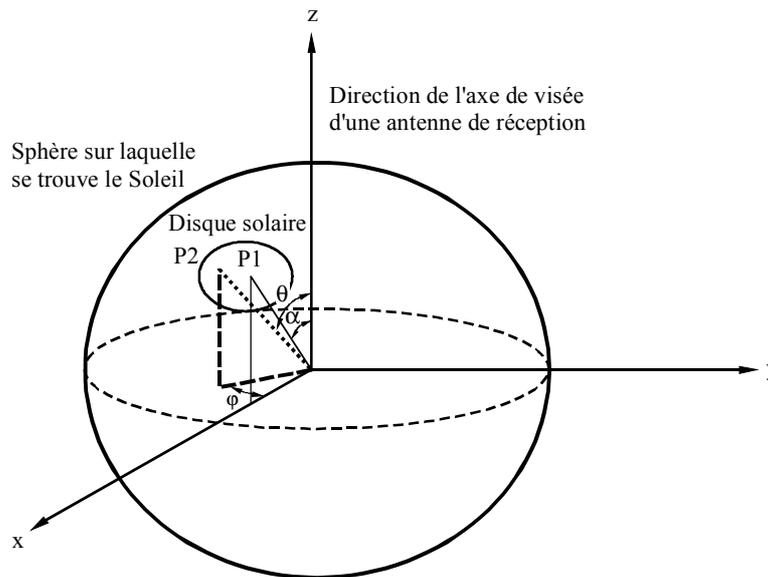
Etape 6: On détermine la valeur du gain de l'antenne sur le disque du Soleil: $\iint_{Soleil} G(\theta, \varphi) d\Omega$

où θ est l'angle hors axe et φ est l'angle d'azimut.

a) Méthode détaillée

Le Soleil est modélisé par un disque positionné sur une sphère centrée sur la station terrienne de réception. La sphère représente l'espace vu par l'antenne utilisant les angles sphériques θ et φ .

FIGURE 2



- φ : angle d'azimuth
- θ : angle hors axe de visée (l'angle de visée étant défini par l'axe z)
- α : angle d'élévation entre le centre du Soleil et l'axe z
- axe z: direction de l'axe de visée d'une station de réception
- P1: centre du Soleil
- P2: point quelconque du disque solaire

1506-02

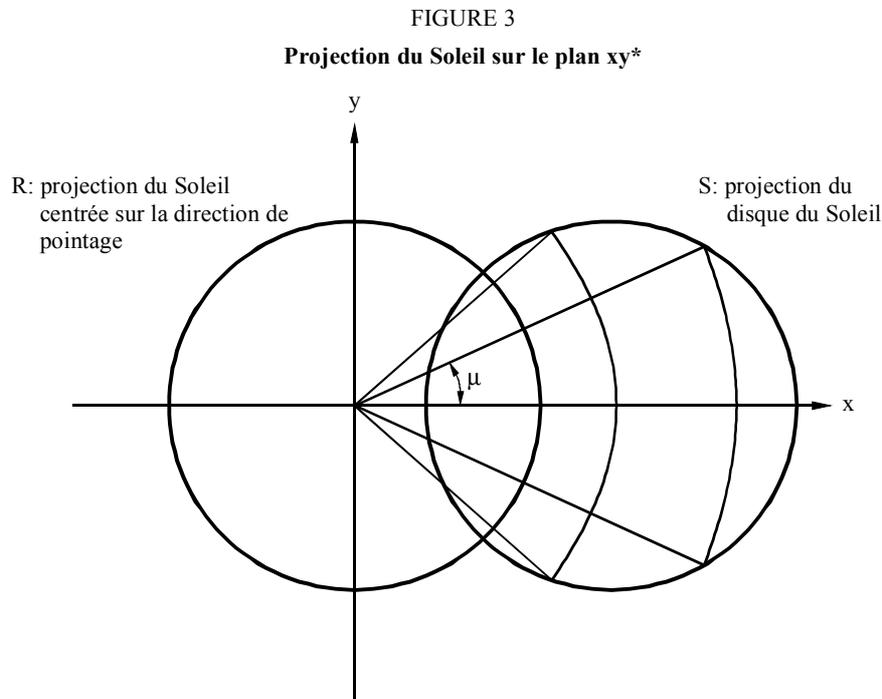
L'axe z est dans la direction de pointage de l'antenne de réception.

On peut utiliser pour les calculs la symétrie axiale de la géométrie: les points de même gain forment des arcs. Ils résultent de l'intersection d'un plan perpendiculaire à l'axe de l'antenne z avec une portion de sphère contenant le Soleil.

La valeur de l'intégrale est ainsi déterminée par adjonction des différentes longueurs des arcs de même gain multiplié par la valeur du gain de l'arc.

Si β est le demi-angle de visibilité du Soleil ($0,266^\circ$), il y a deux cas:

Cas 1: Si $\alpha > \beta$:



* Dans un souci de simplification, la figure représente une projection du disque du Soleil qui est circulaire. Dans la réalité, ce disque n'est pas circulaire. 1506-03

Le disque R est la projection du Soleil lorsque celui-ci est centré sur l'axe z. Dans le cas contraire, on calcule le gain de l'antenne de réception dans la direction du Soleil par intégration sur les arcs de même gain qui ont une demi-ouverture μ qui peut varier de 0 à π . Pour déterminer le gain total dans la direction du disque du Soleil $\iint_{\text{Soleil}} G(\theta, \varphi) d\Omega$, on applique la formule suivante lorsque μ est plus petit que π .

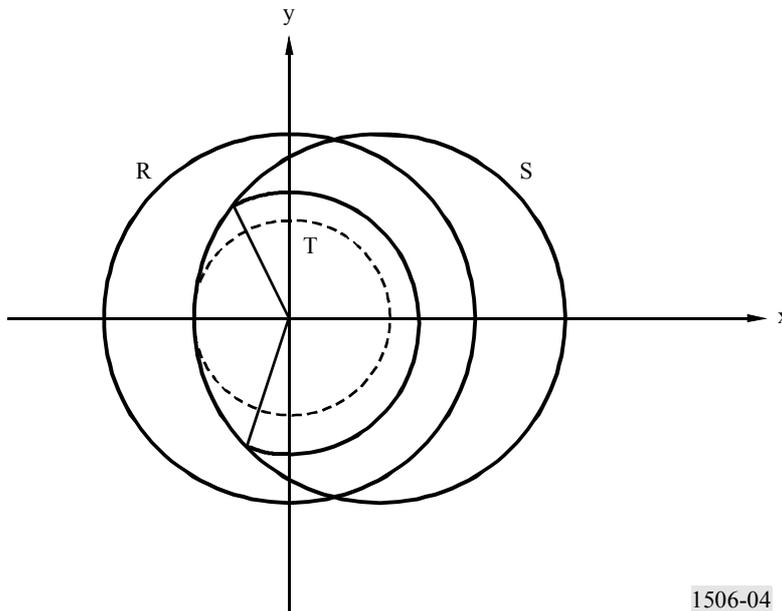
$$\iint_{\text{Soleil}} G(\theta, \varphi) d\Omega = \sum_{\theta=\alpha-\beta}^{\theta=\alpha+\beta} 2 \mu \sin(\theta) G(\theta) \Delta\theta$$

où:

$$\mu = A \cos \left\{ \frac{[\cos(\beta) - \cos(\theta) \cos(\alpha)]}{\sin(\theta) \sin(\alpha)} \right\}$$

Cas 2: Si $\alpha < \beta$:

FIGURE 4



Les calculs ci-dessus sont valables pour tous les arcs qui correspondent aux isocourbes θ inférieures à $(\beta - \alpha)$ (cercle T en pointillé ci-dessus). Pour des valeurs inférieures de θ , le calcul du gain sur la portion du disque du Soleil est simplifié par la symétrie axiale z de la géométrie:

$$\iint G(\theta, \varphi) d\Omega = \sum_{\theta=0}^{\theta=\beta-\alpha} 2\pi \sin(\theta) G(\theta) \Delta\theta$$

où

$G(\theta)$: gain d'antenne isotrope linéaire (fonction de l'angle hors axe θ)

$\Delta\theta$: incrément angulaire.

b) Méthode simplifiée

Le Soleil ne sous-tend approximativement qu'un angle de $0,53^\circ$ (θ_{Soleil}) vu depuis la Terre; si on suppose que le gain d'antenne normalisé (G_n) moyenné sur θ_{Soleil} est égal à G_n en direction du centre du Soleil ($G_{n_{Soleil}}$), on peut avoir une approximation de $\iint_{Soleil} G(\theta, \varphi) d\Omega$:

$$\iint_{Soleil} G(\theta, \varphi) d\Omega = 2\pi G_{n_{Soleil}} \left[1 - \cos\left(\frac{\theta_{Soleil}}{2}\right) \right]$$

Etape 7: On détermine la valeur du gain sur la totalité de l'espace: $\iint_{Espace} G(\theta, \varphi) d\Omega$

En raison de l'axe z des diagrammes d'antenne (voir les Recommandations UIT-R), les calculs sont simples:

$$\iint_{\text{Espace}} G(\theta, \varphi) d\Omega = \sum_{\theta=0}^{\theta=\pi} 2\pi \sin(\theta) G(\theta) \Delta\theta$$

où:

$G(\theta)$: gain d'antenne isotrope linéaire qui ne dépend que de l'angle hors axe θ

$\Delta\theta$: incrément angulaire.

Etape 8: On détermine la température du Soleil: $T_{\text{Soleil}} = 120\,000 \times \gamma \times f^{-0,75}$

où f est la fréquence et γ est le facteur de polarisation, fixé ici à 0,5, en raison de la polarisation fixe de l'antenne et de la polarisation aléatoire du Soleil.

Etape 9: On détermine l'augmentation de température de l'antenne de réception:

$$\Delta T = \frac{\iint_{\text{Soleil}} T_{\text{Soleil}} \times G(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_{\text{Espace}} G(\theta, \varphi) d\Omega} = \frac{T_{\text{Soleil}} \times \iint_{\text{Soleil}} G(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_{\text{Espace}} G(\theta, \varphi) d\Omega}$$

Etape 10: On détermine comme suit la dégradation du rapport C/N du récepteur:

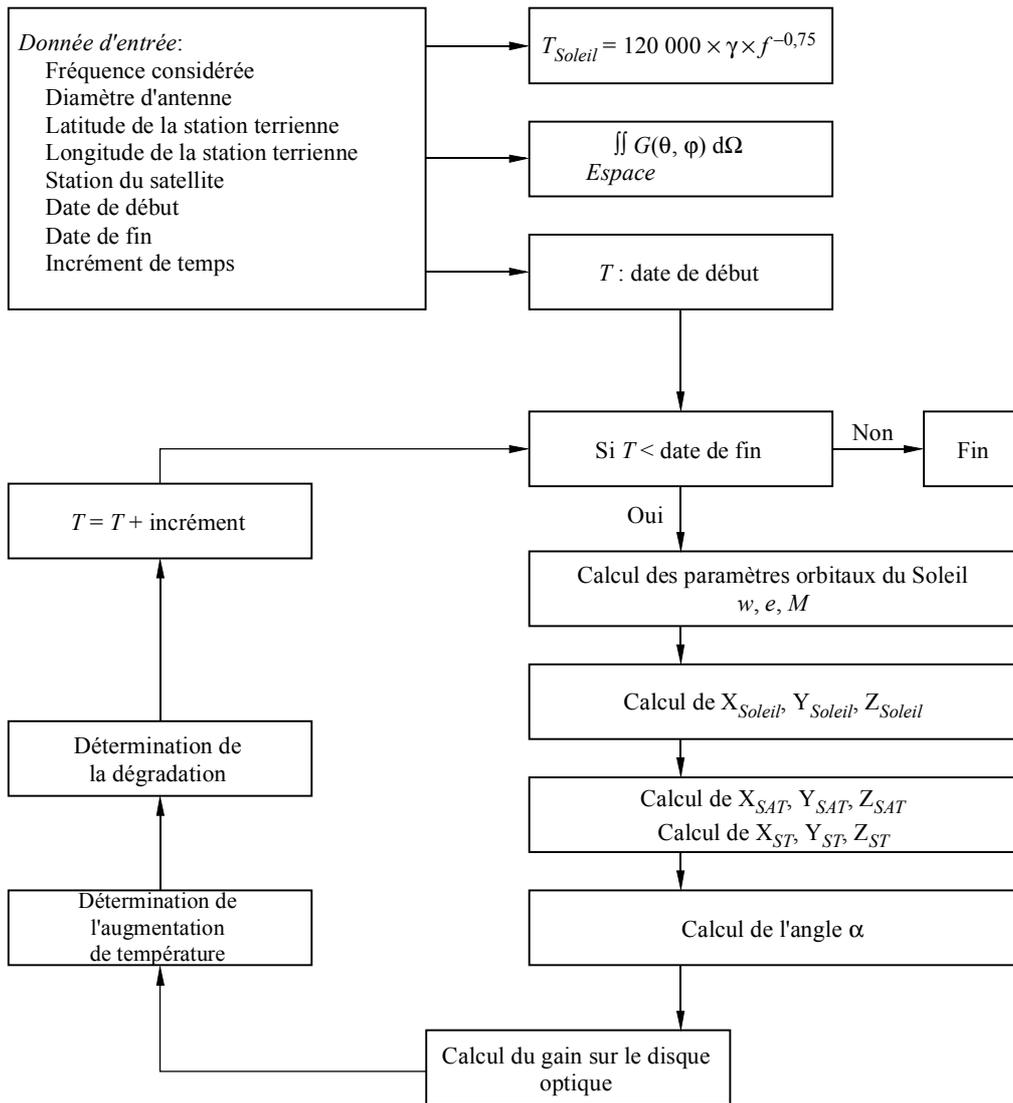
$$\Delta(C/N) = 10 \log \left(\frac{T_0 + \Delta T}{T_0} \right)$$

où T_0 est la température de bruit initiale du système.

3 Algorithme permettant de tenir compte, dans les bilans de liaison, des passages du Soleil

Lorsqu'on utilise des bilans de liaison dynamiques pour analyser les scénarios de brouillage non OSG/OSG, le brouillage d'origine solaire peut être pris en compte dans les bilans de liaison avec l'algorithme suivant. Cet algorithme permet de prévoir l'incidence du brouillage d'origine solaire sur la qualité de fonctionnement (pourcentage de temps pendant lequel le niveau du rapport C/N est respecté) des liaisons analysées. Il peut également servir à calculer la durée et les occurrences de la dégradation.

FIGURE 5

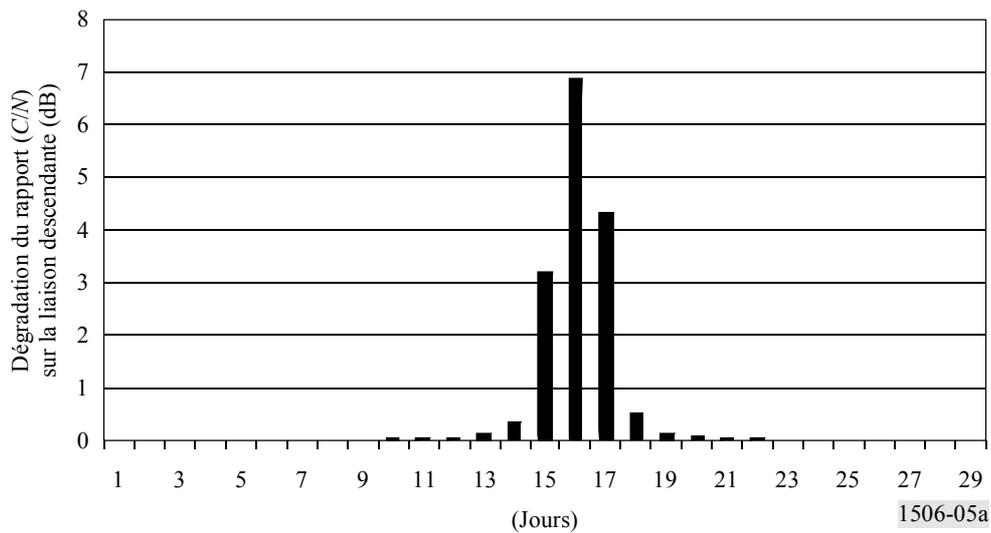
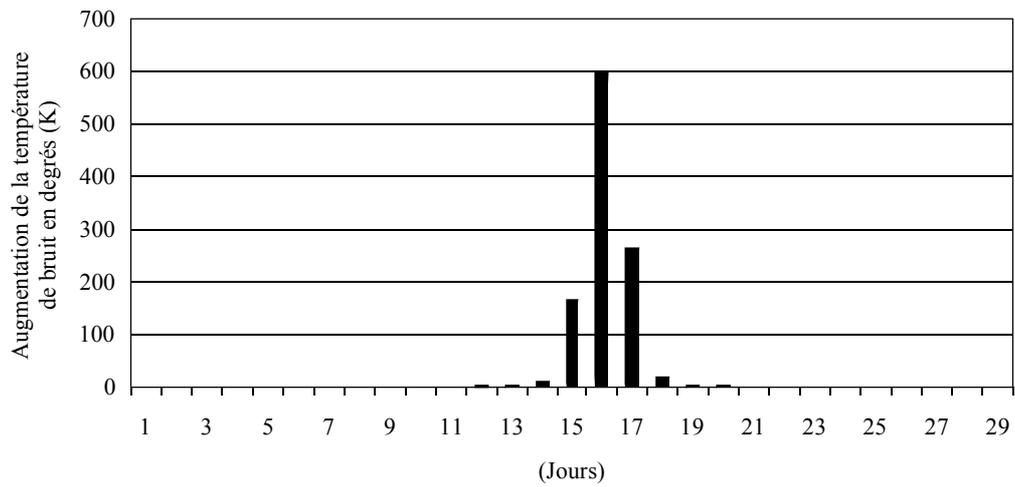


1506-05

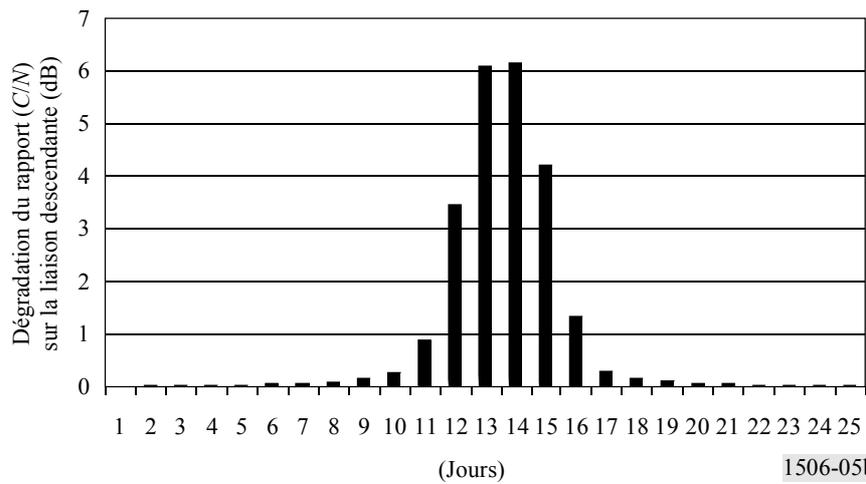
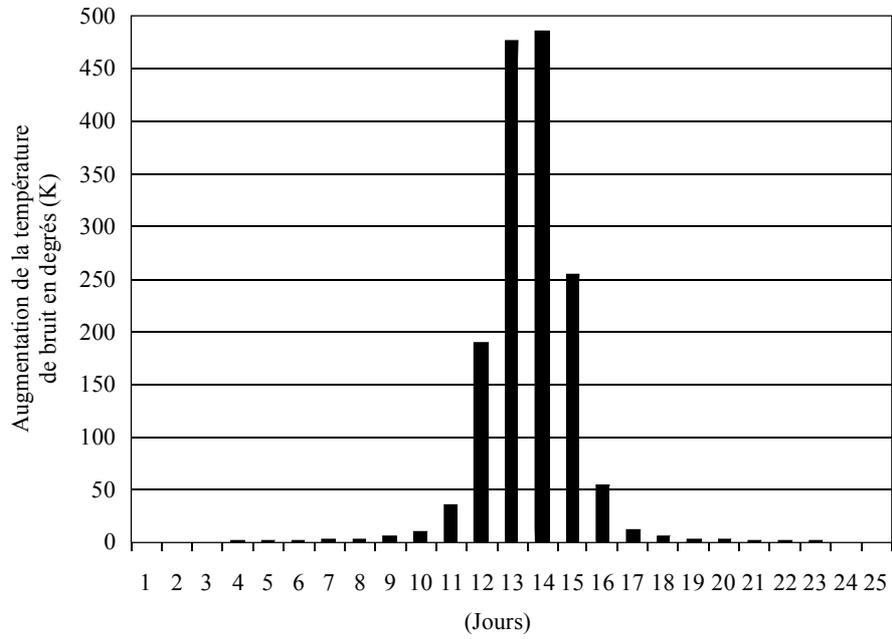
4 Utilisation de la méthodologie pour des antennes de différentes dimensions

On a utilisé la méthode détaillée décrite dans les paragraphes précédents pour des antennes de différentes dimensions. Dans tous les cas, la température de bruit initiale utilisée était de 155 K, à 12,5 GHz et les diagrammes d'antenne étaient ceux reproduits à la Fig. 8 de l'Annexe 5 de l'Appendice S30 du RR.

Pour une antenne de 3 m:

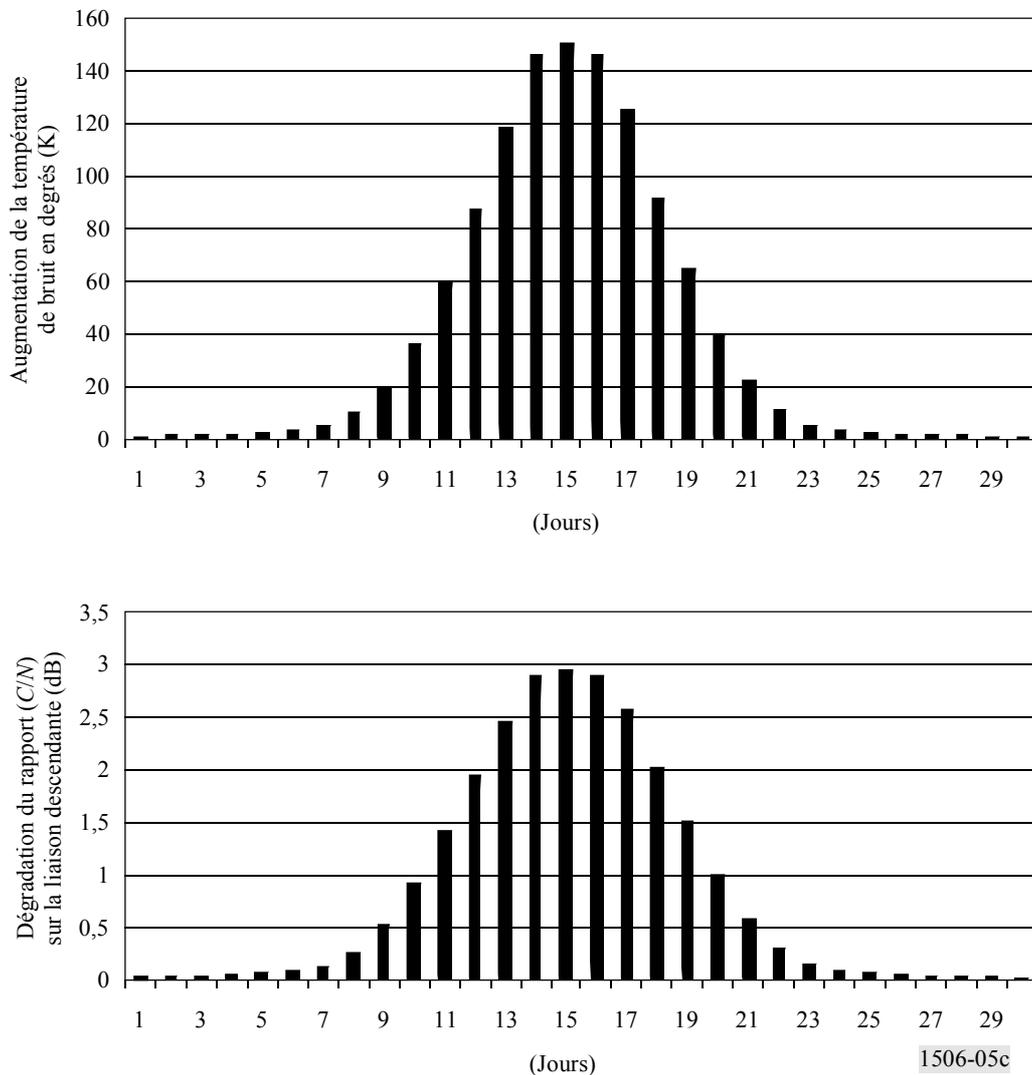


Pour une antenne de 1,8 m:



1506-05b

Pour une antenne de 0,6 m:

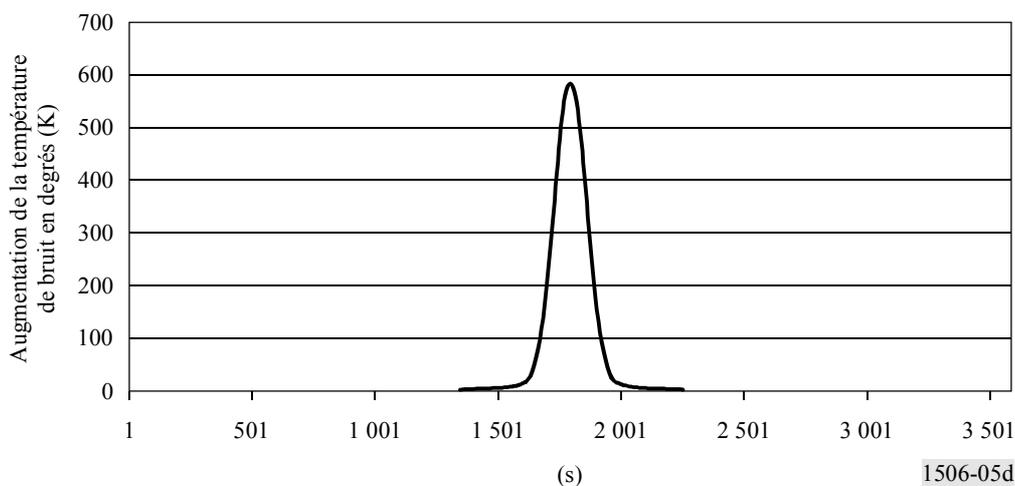


Comme on pouvait s'y attendre, les résultats font apparaître que l'importance de la dégradation du rapport C/N est fonction de la taille de l'antenne et que la durée des passages du Soleil augmente avec la diminution du diamètre de l'antenne.

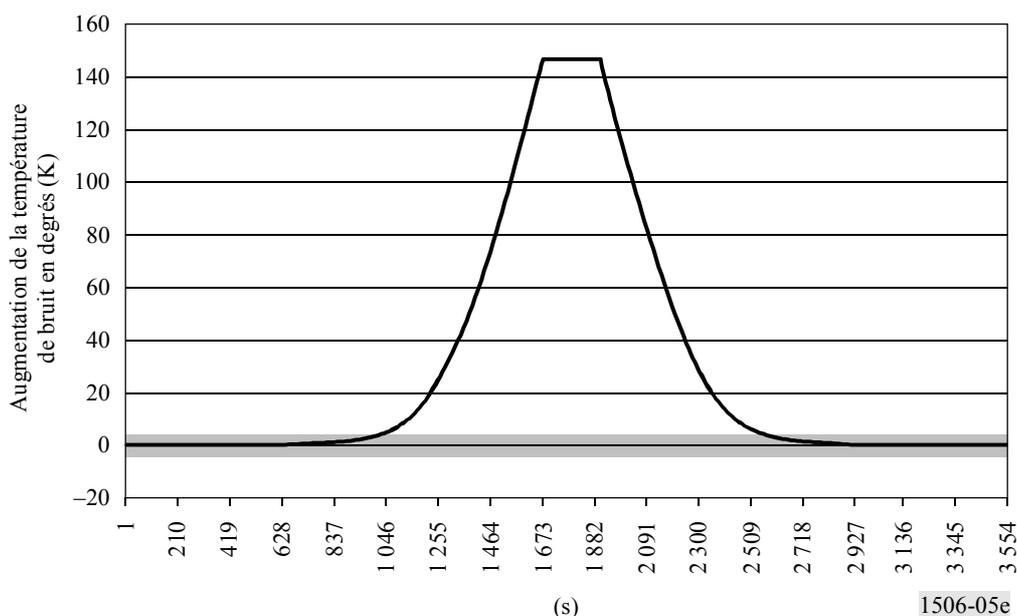
5 Variation pendant un jour

Des calculs ont été faits avec la méthode détaillée pour obtenir un profil temporel de la dégradation du rapport C/N en fonction de l'heure de la journée à proximité de l'équinoxe. L'incrément de temps a été fixé à 1 s.

Pour une antenne de 3 m:



Pour une antenne de 0,6 m:



6 Comparaison des deux méthodes pour différentes dimensions d'antenne

Les exemples ci-dessous illustrent les résultats que l'on a obtenus en utilisant les deux méthodes d'évaluation du brouillage d'origine solaire causé aux liaisons OSG du SRS. Le Tableau 1 donne les valeurs estimatives de l'augmentation de la température de bruit de l'antenne obtenues avec les deux méthodes. Dans la méthode simplifiée, on suppose que le gain de l'antenne sur le disque optique du Soleil est constant et correspond au gain en direction du centre du disque du Soleil. Il en résulte généralement que la valeur estimée de l'augmentation maximale de la température est supérieure à celle obtenue avec la méthode détaillée. Comme le montre la Fig. 6, pour de petites ouvertures d'antennes comme celles qu'on utilise généralement avec les systèmes du SRS (par exemple $\leq 1,8$ m), il y a une différence maximum d'environ 5% mais cette différence augmente rapidement pour atteindre 30% dans le cas d'une antenne de 3 m.

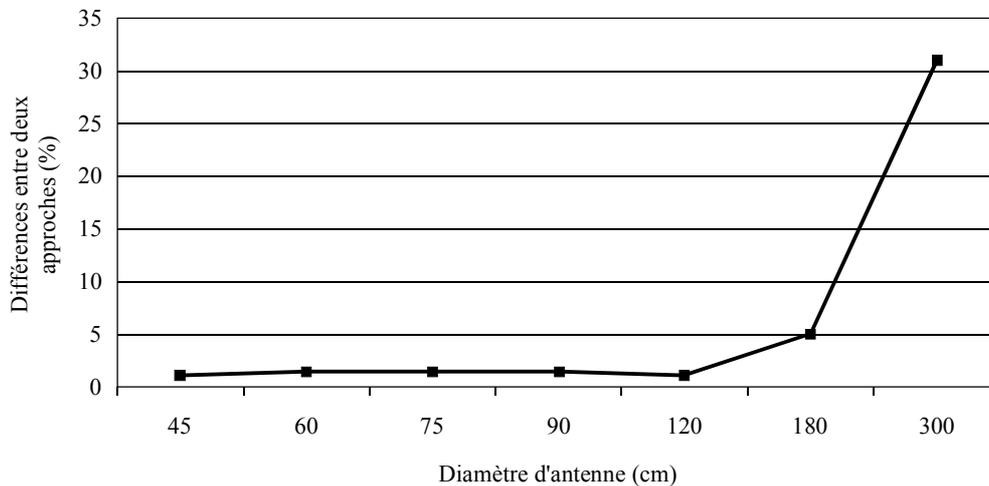
TABLEAU 1

Augmentation maximum de la température pour différents diamètres d'antenne

Diamètre d'antenne	Augmentation maximum de la température (méthode détaillée) (K)	Augmentation maximum de la température (méthode simplifiée) (K)
45 cm	91,8	93,0
60 cm	146,6	148,8
75 cm	200,1	202,9
90 cm	254,2	257,6
1,8 m	529,0	557,1
3,0 m	594,6	780,5

FIGURE 6

Différences en pourcentage de température entre les deux méthodes



1506-06

7 Conclusion

Les passages du Soleil peuvent être à l'origine d'une dégradation importante d'une liaison OSG du SRS pendant l'équinoxe de printemps et l'équinoxe d'automne, périodes pendant lesquelles le Soleil est de façon épisodique aligné ou presque sur la direction de pointage des antennes de stations terriennes de réception OSG.

Les conséquences sur la qualité de fonctionnement des liaisons dépendent des dimensions de l'antenne et de la température de bruit initiale de la liaison. Pour de grandes antennes à gain élevé, la dégradation du rapport C/N peut aller jusqu'à 7 dB environ (pour une liaison dont la température de bruit initiale est de 155 K) mais cette dégradation est plus faible pour de petites antennes à grands faisceaux.

La méthode détaillée est plus précise et plus exacte, mais elle accroît la complexité de l'analyse, alors que la méthode simplifiée est plus facile à mettre en œuvre. Pour de petites ouvertures d'antenne qu'on utilise généralement avec les systèmes du SRS ($\leq 1,8$ m), on peut utiliser l'une et l'autre méthodes pour évaluer, avec une erreur de moins de 0,1 dB, le brouillage d'origine solaire causé à une liaison OSG du SRS.