

RECOMMANDATION UIT-R S.1525

Effets des brouillages dus au soleil sur une liaison par satellites géostationnaires du service fixe par satellite

(Question UIT-R 236/4)

(2001)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que dans un réseau à satellite géostationnaire (OSG) du service fixe par satellite (SFS), le passage du Soleil dans le champ de l'antenne est un phénomène naturel qui se produit deux fois par an sur une période de trois à neuf jours, selon le diamètre de l'antenne;
- b) que les opérateurs et clients des stations terriennes des systèmes OSG du SFS tiennent compte de ces passages dans leurs plans et mettent en oeuvre des moyens appropriés pour en minimiser les effets;
- c) que les opérateurs de stations terriennes des systèmes OSG du SFS doivent pouvoir disposer d'une méthode d'analyse du niveau des brouillages ainsi causés par le Soleil et du profil chronologique de ce type de brouillage,

recommande

- 1 dans l'élaboration des liaisons des systèmes OSG du SFS, d'envisager d'utiliser les méthodes exposées à l'Annexe 1 pour évaluer le niveau de dégradation du rapport porteuse/bruit (C/N) d'une liaison de système OSG suite au phénomène de passage du Soleil dans le champ de l'antenne;
- 2 aux opérateurs de stations terriennes des systèmes OSG du SFS d'envisager d'utiliser la méthode exposée dans l'Annexe 2 pour prévoir les dates et heures de passage du Soleil dans le champ de l'antenne des stations terriennes.

ANNEXE 1

Calcul du niveau des brouillages dus au Soleil à une liaison de système OSG du SFS

Le phénomène de passage du Soleil dans le champ de l'antenne se produit deux fois par an au voisinage des équinoxes de printemps et d'automne, lorsque le Soleil passe à proximité du faisceau principal d'une station terrienne réceptrice de système OSG. Pendant ces passages, le rayonnement hyperfréquence du Soleil constitue une source de brouillage qui se traduit par une augmentation de la température de bruit effective de la liaison par satellite et donc par une dégradation de la qualité de fonctionnement de cette liaison. Lorsque le niveau de dégradation est supérieur à la marge de la liaison par temps clair, on observe une interruption de la liaison, que l'on désigne généralement par l'expression «interruption due au Soleil».

Pour les fréquences inférieures à environ 30 GHz, on peut considérer que les rayonnements solaires comportent trois composantes: le rayonnement thermique du Soleil «calme», une composante à variation lente qui dépend du nombre et du diamètre des taches solaires et enfin des salves

occasionnelles intenses dues aux éruptions solaires. Ces trois composantes varient dans le temps, de sorte qu'il est extrêmement difficile d'utiliser le Soleil comme source de référence pour évaluer avec précision le comportement qualitatif des antennes de station terrienne.

Dans les bandes utilisées pour les communications par satellite, le rayonnement thermique du Soleil calme varie en fonction inverse de la fréquence et ce type d'émission n'a généralement pas de polarisation.

Les taches solaires sont des zones magnétiques du Soleil, qui apparaissent sous forme de taches sombres à sa surface. Leur durée est généralement de plusieurs jours, mais les très grosses taches solaires peuvent durer plusieurs semaines. Le nombre des taches solaires varie beaucoup d'un jour à l'autre, et l'on observe une structure tendancielle qui se caractérise par une période d'environ 11 années. Toutes les 11 années, le Soleil présente une période d'activité nommée «maximale», suivie d'une période calme nommée activité solaire «minimale». Pendant les périodes d'activité solaire maximale, on observe de très nombreuses taches solaires, éruptions solaires et projections coronales de matière, tous phénomènes qui peuvent avoir une incidence sur les communications et le temps sur la Terre. Il existe une corrélation approximative entre le flux solaire total et le nombre de taches solaires. Du fait que l'augmentation du flux est associée à plusieurs petites zones de la surface du Soleil, il serait dangereux de supposer que la brillance de l'astre est uniformément répartie sur sa surface. En fait, lorsque l'ouverture d'antenne de la station terrienne du système OSG est inférieure au diamètre apparent du Soleil, on peut observer divers niveaux de brouillage pendant un seul passage du Soleil dans le champ de cette antenne. Les rayonnements d'une tache solaire présentent une vague polarisation circulaire, mais cet effet est dilué par la polarisation aléatoire des émissions thermiques du Soleil calme.

Les éruptions ou salves solaires peuvent doubler ou tripler le flux solaire, qui peut à l'occasion être 100 fois supérieur à la normale. Dans les bandes utilisées pour les communications par satellite, la plupart des événements sont relativement brefs - de cinq minutes à environ une heure. Les manifestations ne sont pas prévisibles, mais, comme nous l'avons déjà vu plus haut, sont plus fréquentes au voisinage de l'activité maximale. En général, il peut y avoir deux manifestations par jour.

Aux hyperfréquences, le diamètre apparent du Soleil est légèrement supérieur au diamètre observé dans le spectre visible. Par ailleurs, la distance Terre-Soleil varie légèrement tout au long de l'année, de sorte que le diamètre apparent du Soleil varie également, tout comme sa température de brillance apparente. Toutefois, ces effets sont peu importants comparés aux autres incertitudes (telles que le nombre de taches solaires), de sorte qu'on peut les négliger. On peut raisonnablement estimer le diamètre apparent du Soleil à l'équinoxe à $0,53^\circ$.

Ce qui précède peut donc donner à penser que le niveau effectif du flux solaire dans les bandes utilisées pour les communications par satellite varie de façon significative et imprévisible, mais un certain nombre de modèles simples ont été proposés pour la détermination d'un niveau moyen. Ces modèles permettent d'évaluer de façon adéquate les niveaux de brouillage type auxquels on peut s'attendre pendant les passages du Soleil. La température de brillance du Soleil calme aux hyperfréquences peut s'exprimer comme suit:

$$T_{Soleil} = 120\,000 \times \gamma \times f^{-0,75}$$

où:

T_{Soleil} : température de brillance équivalente (K)

f : fréquence (GHz)

γ : facteur qui permet de tenir compte de la polarisation des rayonnements solaires, auquel on peut donner la valeur 0,5 pour les raisons exposées plus haut.

Avec ce modèle, on obtient une valeur d'environ 21 000 K pour le Soleil calme à 4 GHz. A titre de comparaison, la valeur type correspondant à une période de «taches solaires» maximale serait de 90 000 K.

1 Méthode générale

Le passage du Soleil dans le champ de l'antenne de réception d'un système OSG est un phénomène facile à évaluer du fait que la géométrie en est bien connue. Nous proposons la méthode suivante pour décrire intégralement l'incidence de ce passage du Soleil sur les bilans des liaisons des systèmes OSG. L'effet du passage du Soleil n'est pas un évanouissement, mais une augmentation de la température de bruit du système, qui peut être significative dans le cas d'une liaison OSG à faible bruit et à faible marge.

La méthode proposée repose sur la géométrie bien définie de la position du Soleil par rapport à un point donné de la Terre: vu de ce point, le Soleil apparaît comme un disque d'environ $0,53^\circ$ de diamètre. L'effet du passage du Soleil est sensible lorsque le disque coupe le faisceau principal de l'antenne de réception. Dans l'approche détaillée (Etape 1 a) de la présente Annexe), le gain de l'antenne varie pendant le passage du disque optique du Soleil en fonction du diagramme de gain d'antenne supposé. Dans l'approche simplifiée (Etape 1 b) de la présente Annexe), on suppose que le gain de l'antenne est constant pendant tout le passage du disque optique du Soleil, et que cette valeur de gain constante est égale au gain en direction du centre du disque Soleil. L'approche détaillée donne une meilleure précision, mais l'analyse est plus complexe. En revanche, l'approche simplifiée est plus facile à appliquer.

Au voisinage des équinoxes de printemps et d'automne, il y a alignement du Soleil, de l'antenne de réception de la station terrienne du système SFS et du satellite OSG. Il en résulte une augmentation de la température de bruit de l'antenne, qui se répercute sur le facteur de qualité du récepteur du SFS, ce qui occasionne une dégradation du rapport C/N . La méthode exposée ci-après peut servir à évaluer le niveau de dégradation de la qualité de fonctionnement de la liaison.

Etape 1: Déterminer la valeur du gain d'antenne sur l'ensemble du disque solaire:

$$\iint_{\text{Soleil}} G(\theta, \varphi) d\Omega$$

où:

θ : angle hors axe

φ : angle d'azimut.

a) Approche détaillée

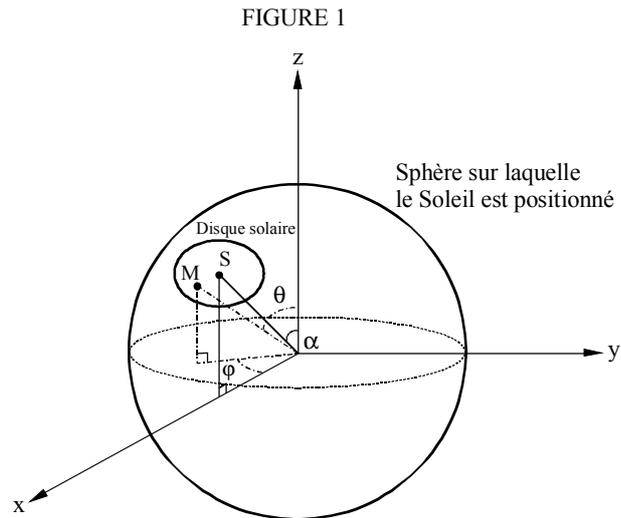
Comme illustré à la Fig. 1, le Soleil est représenté par un disque positionné sur une sphère centrée sur la station terrienne de réception. La sphère représente l'espace vu de l'antenne, par exemple, le point M sur le soleil est déterminé par les angles θ et φ .

Pour faciliter le calcul, le centre du Soleil, S, est dans le plan qui contient la station terrienne, l'axe x et l'axe z. Par conséquent, la position du point S est donnée par l'angle solide α .

L'axe z correspond à la direction de pointage de l'antenne de réception.

Pour le calcul, on peut tirer parti de la symétrie axiale de la configuration: les ensembles de points présentant les mêmes valeurs de gain forment des arcs qui résultent de l'intersection d'un plan perpendiculaire à l'axe de l'antenne z et de la partie de la sphère qui comprend le Soleil.

La valeur de l'intégrale est calculée par la sommation des différentes longueurs des arcs isogains, puis multiplication par la valeur de gain caractéristique de l'arc considéré.

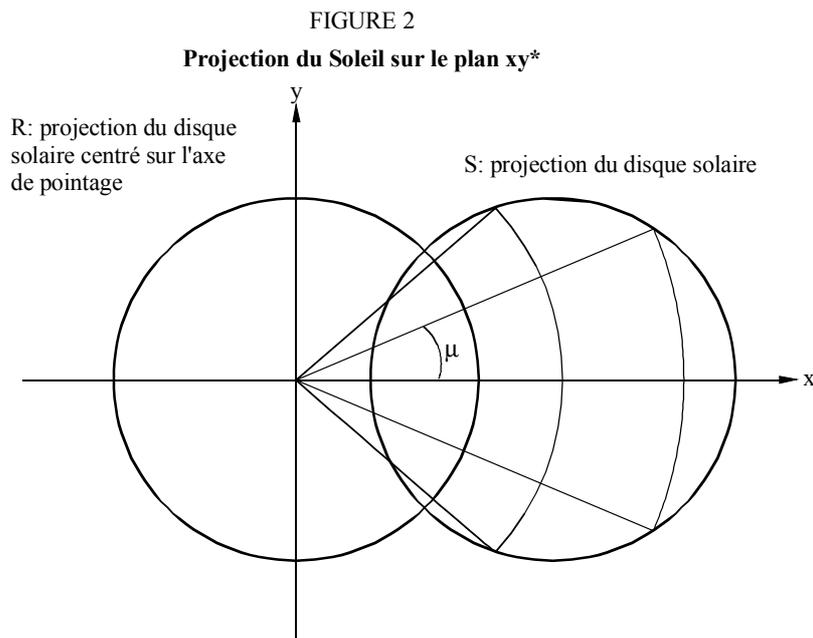


φ : angle d'azimut
 θ : angle hors axe
 α : angle d'élévation (entre le centre du Soleil et l'axe z)
 S: centre du Soleil
 M: un point quelconque sur le disque solaire

1525-01

Soit β le demi-angle de visibilité du Soleil; on distingue deux cas:

Lorsque $\alpha > \beta$:



* Pour simplifier, le disque solaire est représenté par un cercle alors qu'en réalité il n'est pas circulaire.

1525-02

Le disque R est la projection du Soleil centré sur l'axe z. Lorsque le Soleil n'est pas sur l'axe z, les calculs du gain d'antenne de réception en direction du Soleil se font par intégration sur les arcs isogains, dont la demi-ouverture μ peut varier de 0 à π . Pour déterminer le gain d'ensemble dans la direction du disque solaire, $\iint_{\text{Soleil}} G(\theta, \varphi) d\Omega$, on peut utiliser l'équation suivante pour $\mu < \pi$.

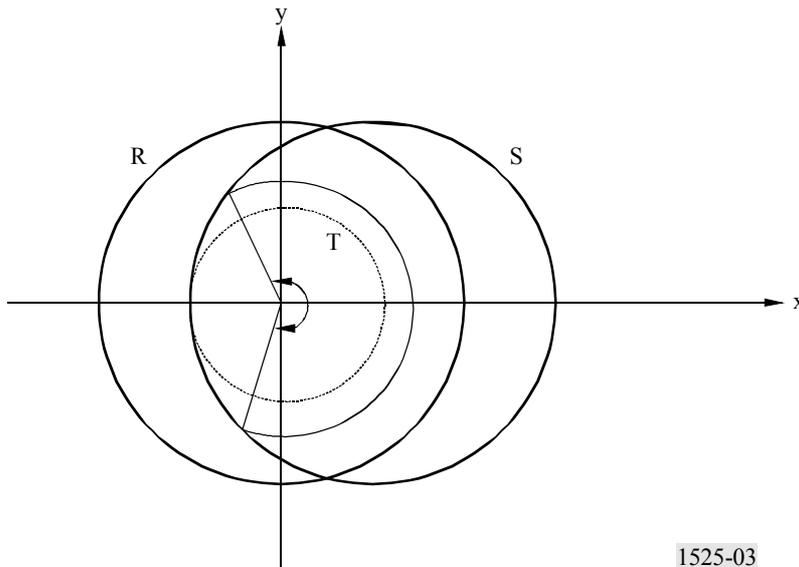
$$\iint_{\text{Soleil}} G(\theta, \varphi) d\Omega = \sum_{\theta=\alpha-\beta}^{\theta=\alpha+\beta} 2\mu \cdot \sin(\theta) \cdot G(\theta) \cdot \Delta\theta$$

avec:

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

Pour $\alpha < \beta$:

FIGURE 3



1525-03

Le calcul est le même pour tous les arcs correspondant aux segments iso- $\theta < (\beta - \alpha)$ (dont l'ensemble constitue le cercle T tracé en pointillé). Pour les petites valeurs de θ , le calcul du gain sur la partie du disque solaire est simplifié par la symétrie axiale par rapport à z:

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

avec:

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

$\Delta\theta$: incrément angulaire.

b) Approche simplifiée

Le Soleil ne sous-tend qu'un petit angle, θ_{Soleil} , vu de la Terre, et si nous supposons que dans les limites circonscrites par l'angle, θ_{Soleil} , le gain normalisé de l'antenne, G_n , tendra en moyenne à la valeur G_n vers le centre du Soleil, $G_{nSoleil}$, alors l'expression $\iint_{Soleil} G(\theta, \varphi) d\Omega$ a pour équivalent approximatif:

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

Etape 2: Déterminer la valeur de gain sur la totalité de l'espace:

$$\iint_{Espace} G(\theta, \varphi) d\Omega$$

Compte tenu de l'axe z des diagrammes d'antenne des Recommandations UIT-R, les calculs sont simples:

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

avec:

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

$\Delta\theta$: incrément angulaire.

Etape 3: Déterminer la température du Soleil:

$$T_{Soleil} = 120\,000 \times \gamma \times f^{-0,75}$$

où:

T_{Soleil} : température de brillance équivalente (K)

f : fréquence (GHz)

γ : facteur de polarisation, la valeur choisie étant en l'occurrence 0,5 puisque l'on suppose que le rayonnement solaire présente une polarisation aléatoire.

Etape 4: Déterminer l'augmentation de température à l'antenne de réception:

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

Etape 5: Déterminer la dégradation du rapport C/N au niveau du récepteur:

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

dans laquelle T_0 correspond à la température de bruit totale de la liaison.

2 Application de la méthode à différents diamètres d'antenne

L'approche détaillée décrite dans les sections précédentes a été appliquée pour différentes valeurs de diamètre d'antenne.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour obtenir les valeurs de l'angle hors axe θ et de l'angle d'azimut φ :

- Simulation intégrale du mouvement du Soleil, par exemple avec l'algorithme défini dans l'Annexe 2.
- Approche simplifiée reposant sur le fait que l'angle de déclinaison du Soleil varie d'environ $0,4^\circ$ par jour au moment des équinoxes tandis que la variation angulaire horaire est d'environ $0,25^\circ$ par minute.

Dans tous les cas, on adopte pour la température de bruit initiale la valeur de 150 K et on utilise les diagrammes d'antenne définis dans la Recommandation UIT-T-R S.465 pour 11 GHz.

L'incidence sur la qualité de fonctionnement de la liaison dépend du diamètre de l'antenne et de la température de bruit initiale de la liaison. Dans le cas de grandes antennes à gain élevé, la dégradation du rapport C/N peut atteindre 15 dB (Fig. 5), mais s'observe moins souvent que dans le cas de petites antennes à faisceaux plus largement ouverts (Fig. 9).

Comme on pouvait s'y attendre, les résultats font apparaître que le niveau de dégradation du rapport C/N est fonction du diamètre de l'antenne et que la durée du passage solaire augmente lorsque le diamètre d'antenne diminue.

FIGURE 4

Augmentation journalière maximale de la température de bruit du ciel: antenne de 10 m

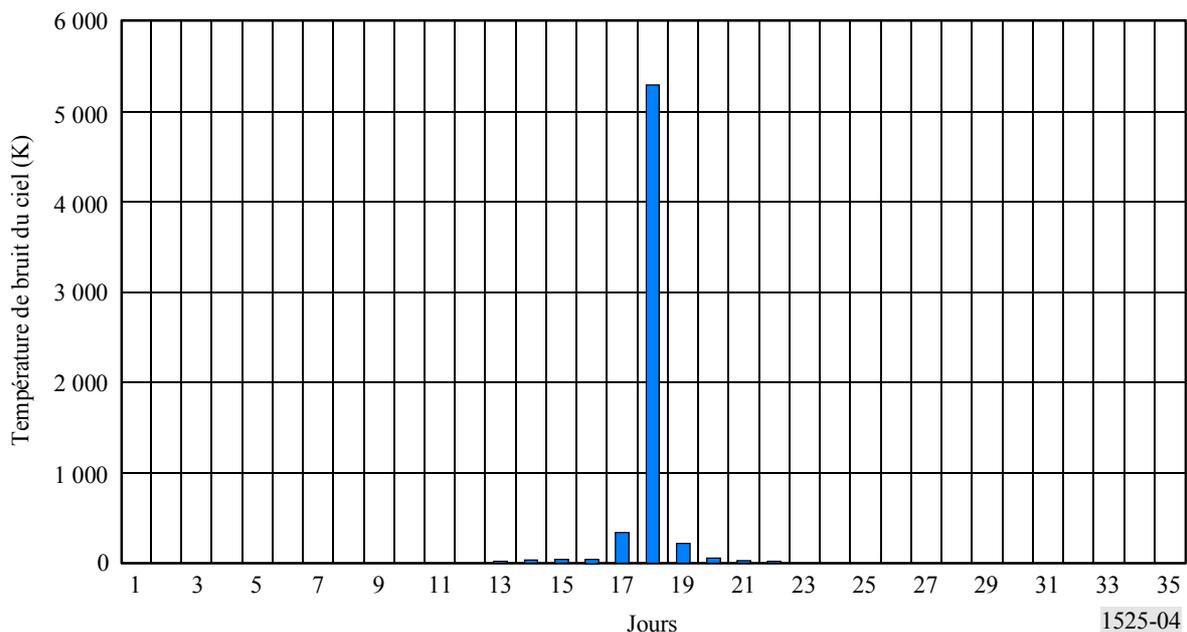
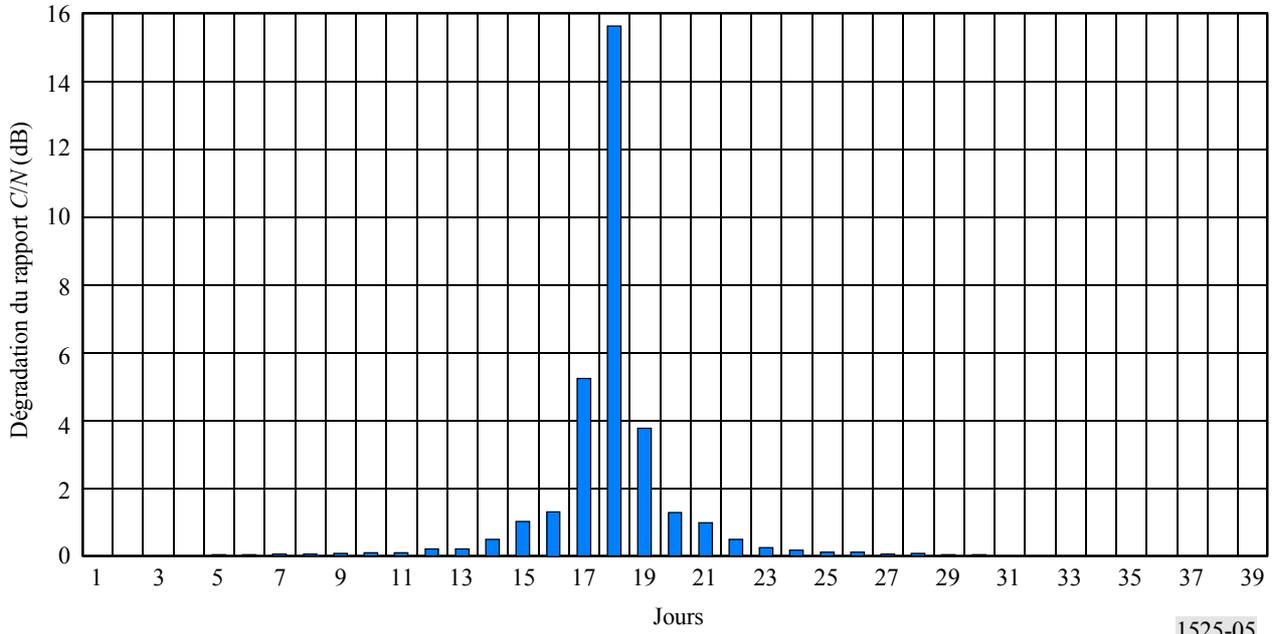


FIGURE 5

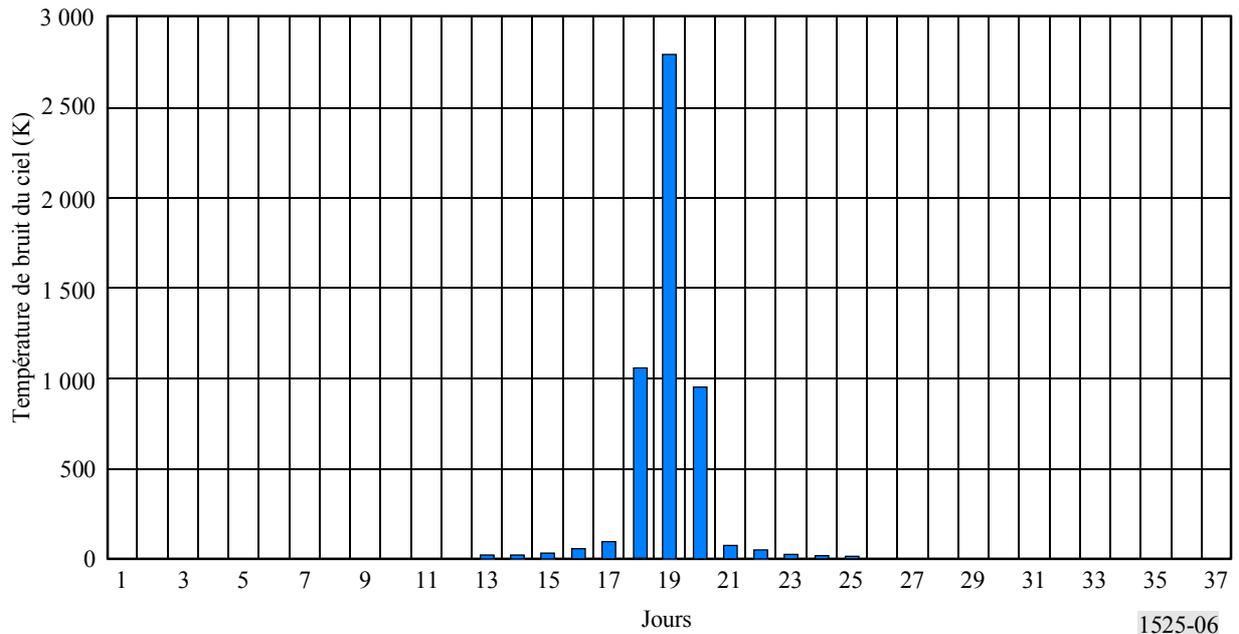
Dégradation journalière maximale du rapport C/N à la réception: antenne de 10 m



1525-05

FIGURE 6

Augmentation journalière maximale de la température de bruit du ciel: antenne de 3 m



1525-06

FIGURE 7
 Dégradation journalière maximale du rapport C/N à la réception: antenne de 3 m

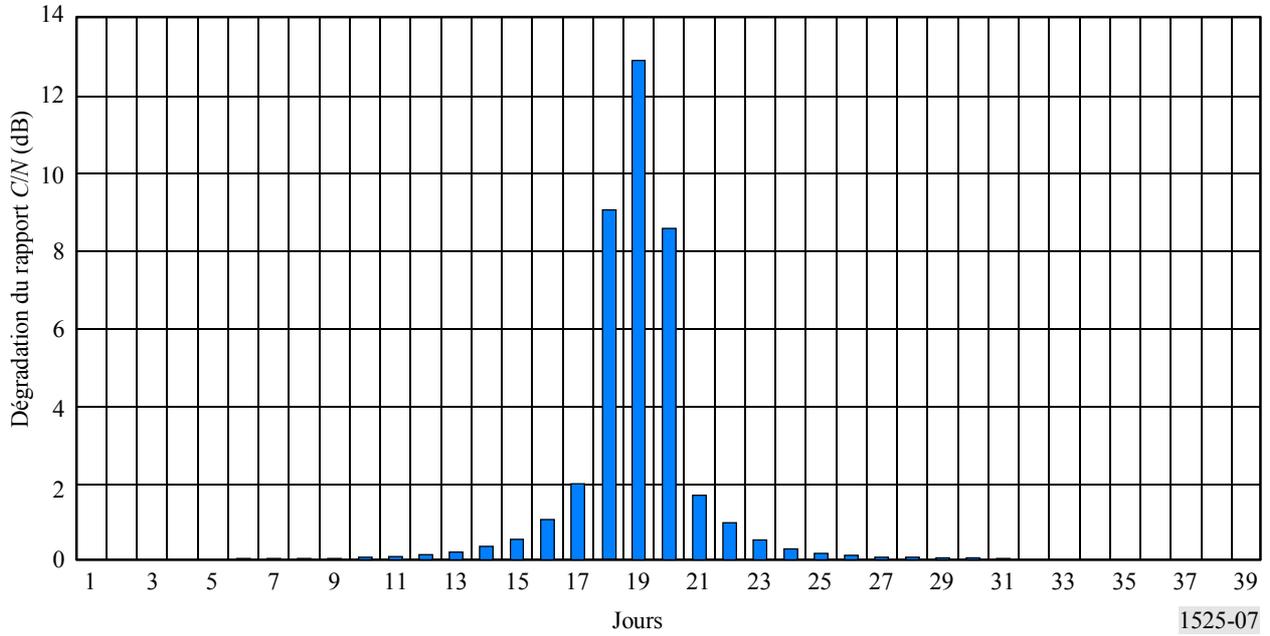


FIGURE 8
 Augmentation journalière maximale de la température de bruit du ciel: antenne de 0,6 m

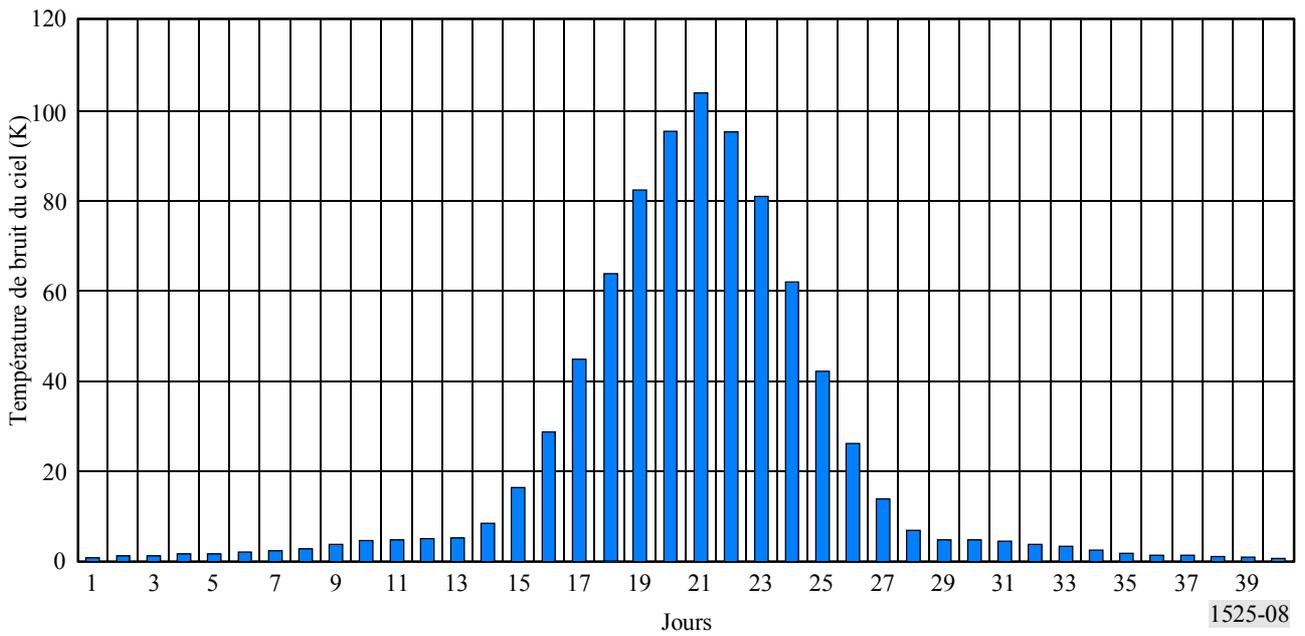
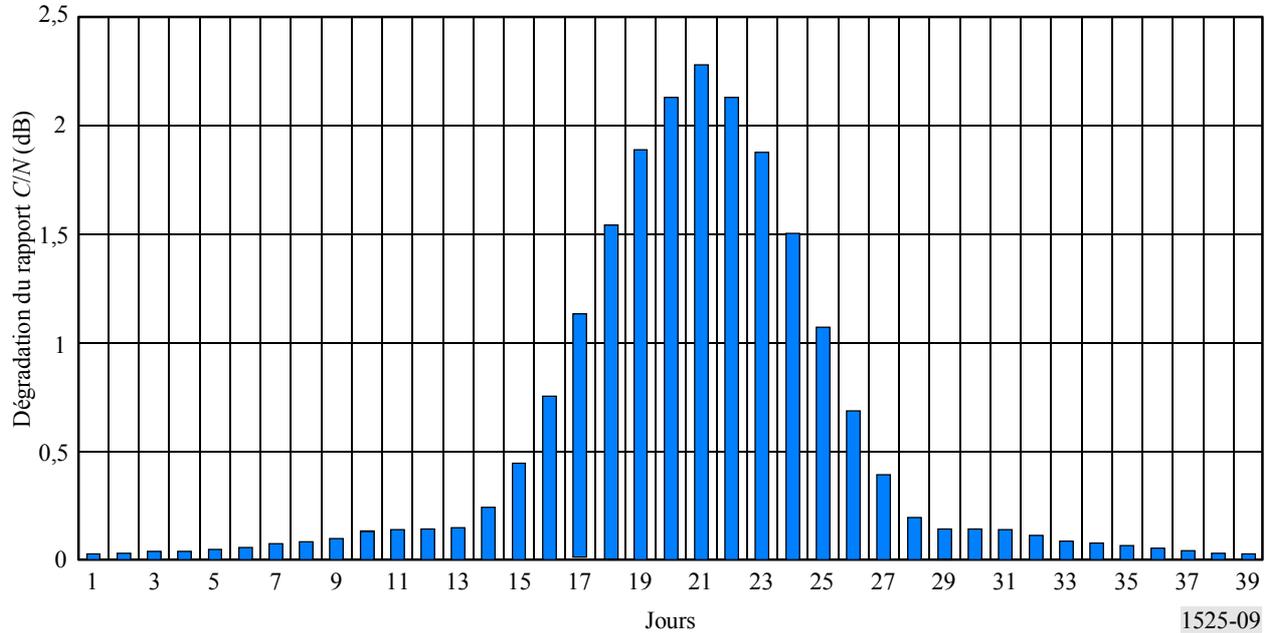


FIGURE 9

Dégradation journalière maximale du rapport C/N à la réception: antenne de 0,6 m



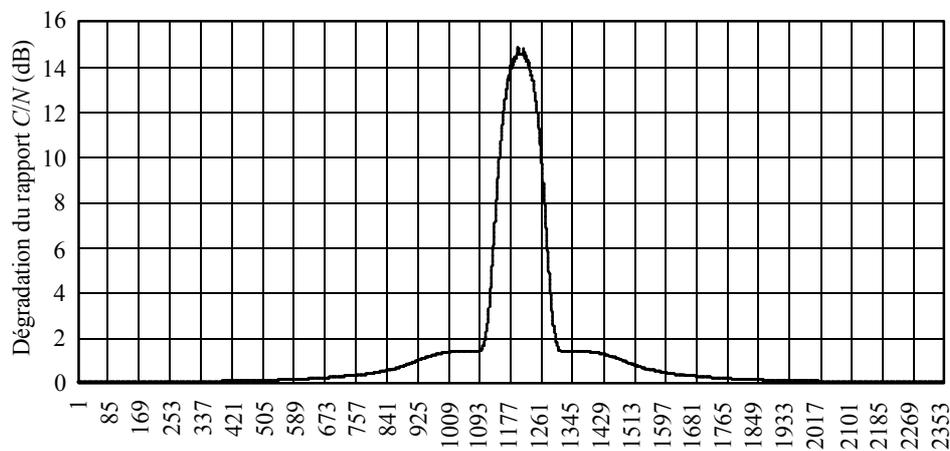
1525-09

3 Variation pendant la journée

Des calculs ont permis d'établir le profil temporel de la dégradation du rapport C/N en fonction de l'heure de la journée au voisinage des équinoxes. Le pas temporel choisi est de 1 seconde.

FIGURE 10

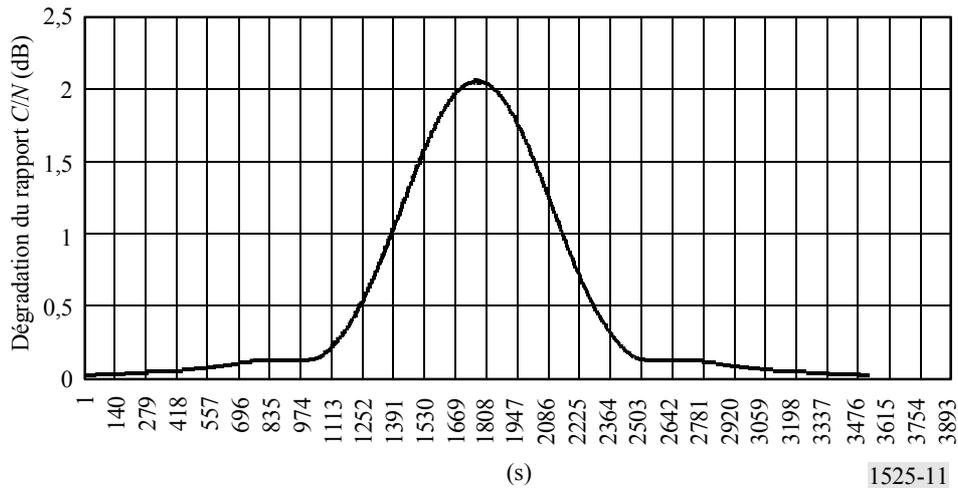
Dégradation du rapport C/N à la réception pendant la journée: antenne de 10 m



(s)

1525-10

FIGURE 11

Dégradation du rapport C/N à la réception pendant la journée: antenne de 0,6 m

ANNEXE 2

Méthode simplifiée de calcul de la période de passage du Soleil pour une station terrienne de système OSG

1 Introduction

Les opérateurs de stations terriennes des systèmes OSG du SFS savent que les brouillages dus au Soleil sont un phénomène naturel qui se produit pendant une brève période jusqu'à 21 jours avant ou après les équinoxes, selon que la station considérée est située dans l'hémisphère Nord ou dans l'hémisphère Sud.

La plupart des opérateurs utilisent des algorithmes simplifiés tels que l'algorithme spécifié ci-après, qui ne font pas intervenir de valeurs spécifiques de bilan de liaison porteuse pour estimer les jours et heures de passage du Soleil dans le champ de l'antenne. Avec ces informations, ils peuvent adopter des mesures préventives pour atténuer les effets des brouillages dus au Soleil.

2 Données d'éphéméride concernant les satellites

Les opérateurs de systèmes à satellites ont recours à un certain nombre de modèles mathématiques différents pour représenter le mouvement d'un satellite. Un opérateur de satellite OSG a mis au point une approche simplifiée dans laquelle, au lieu de calculer tous les phénomènes physiques qui agissent sur le satellite, on définit ces effets par trois équations, dans une approximation à 11 paramètres, dont le profil, en quelque sorte, correspond à une courbe des moindres carrés. On a pu démontrer que ce modèle simplifié donne une précision d'approximation des résultats réels meilleure que $0,01^\circ$ pour une période pouvant atteindre sept jours.

Dans cette méthode, les trois équations qui permettent de prévoir la position des satellites en un instant relatif, t , défini à partir du lancement de la phase du programme sont:

Longitude est du satellite:

$$L = L_0 + L_1 t + L_2 t^2 + (L_c + L_{c1} t) \cos(Wt) + (L_s + L_{s1} t) \sin(Wt) + (K/2) (l_{c2} - l_{s2}) \sin(2Wt) - K l_c l_s \cos(2Wt)$$

Latitude géocentrique du satellite:

$$l = (l_c + l_{c1} t) \cos(Wt) + (l_s + l_{s1} t) \sin(Wt)$$

Rayon du satellite:

$$r_{sat} = r_g (1 - 2L_1/3(W - L_1)) (1 + KL_c \sin(Wt) - KL_s \cos(Wt))$$

avec:

$$W = L_1 + 360,98564 \text{ degrés/jour}$$

$$r_g = 42\,164,57 \text{ km}$$

$$K = \pi/360$$

t : temps, en jours

et les onze paramètres sont:

L_0 : longitude moyenne (à l'Est du méridien de Greenwich) (degrés)

L_1 : taux de dérive (degrés/jour)

L_2 : accélération de la dérive (degrés/jour/jour)

L_c : amplitude d'oscillation de longitude, en cosinus (degrés)

L_{c1} : taux de variation de la longitude, en cosinus (degrés/jour)

L_s : amplitude d'oscillation de longitude, en sinus (degrés)

L_{s1} : taux de variation de la longitude, en sinus (degrés/jour)

l_c : amplitude d'oscillation de latitude, en cosinus (degrés)

l_{c1} : taux de variation de la latitude, en cosinus (degrés/jour)

l_s : amplitude d'oscillation de latitude, en sinus (degrés)

l_{s1} : taux de variation de la latitude, en sinus (degrés/jour).

La position du satellite étant définie en fonction du temps dans un système géocentrique aligné sur le méridien de Greenwich, la position du satellite par rapport à la station terrienne et les angles de pointage appropriés sont calculés comme suit:

$$\Delta r = r_{sat} - r_{sta}$$

$$\Delta r_x = r_{sat} \cos(\varphi_{sat}) \cos(\theta_{sat} - \theta_{sta}) - R_a$$

$$\Delta r_y = r_{sat} \cos(\varphi_{sat}) \sin(\theta_{sat} - \theta_{sta})$$

$$\Delta r_z = r_{sat} \sin(\varphi_{sat}) - R_z$$

avec:

φ_{sat} : latitude du satellite (géocentrique)

θ_{sat} : longitude du satellite

θ_{sta} : longitude de la station à l'Est du méridien de Greenwich

R_a : distance radiale de la station par rapport à l'axe de rotation de la Terre

R_z : distance axiale de la station par rapport au plan équatorial de la Terre.

A partir des équations qui précèdent, on détermine comme suit le pointage en azimut et en élévation:

Angle d'azimut de la station terrienne:

$$AZ = \text{arctg} (\Delta r_y / \Delta r_{nord})$$

Angle d'élévation de la station terrienne:

$$EL_{\text{géométrique}} = \text{arctg} (\Delta r_{z\text{énith}} / (\Delta r_{nord}^2 + \Delta r_y^2)^{1/2})$$

avec:

$$\Delta r_{nord} = \Delta r_x \sin(\varphi_{sta}) + \Delta r_z \cos(\varphi_{sta})$$

$$\Delta r_{z\text{énith}} = \Delta r_x \cos(\varphi_{sta}) + \Delta r_z \sin(\varphi_{sta})$$

3 Prévision des périodes de passage du Soleil

Pour calculer les périodes de brouillage dû au Soleil, il faut déterminer les angles de pointage de la station terrienne dans le système de coordonnées équatoriales, procédure que nous allons décrire de façon plus détaillée dans le paragraphe suivant.

Le système de coordonnées est le même que le système utilisé pour les montures d'antennes polaires. L'angle horaire et la déclinaison y sont calculés à partir des expressions AZ et EL définies plus haut comme suit:

$$\text{Angle horaire} = \text{arctg} \left(\frac{-\cos(EL) \cdot \sin(AZ)}{\sin(EL) \cdot \cos(\varphi_{sta}) - \cos(EL) \cdot \sin(\varphi_{sta}) \cdot \cos(AZ)} \right)$$

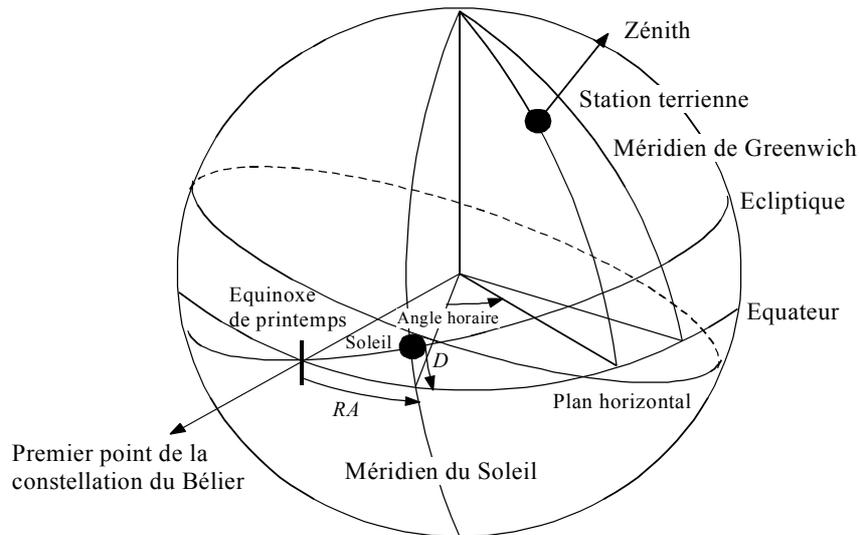
$$\text{Déclinaison} = \arcsin(\sin(EL) \cdot \sin(\varphi_{sta}) + \cos(EL) \cdot \cos(\varphi_{sta}) \cdot \cos(AZ))$$

3.1 Système de coordonnées pour le calcul du passage du Soleil

Les calculs de brouillage dû au Soleil se font dans le système de coordonnées équatoriales, dans lequel l'équateur de la Terre est le plan de référence tandis que l'équinoxe de printemps est la direction de référence. L'équinoxe de printemps ou le premier point de la constellation du Bélier est l'intersection de l'écliptique (plan moyen de l'orbite de la Terre) et de l'équateur céleste, lieu de passage de l'équateur par le Soleil dans le sens sud-nord. Le centre de la Terre est l'origine du système, comme on le voit à la Fig. 12.

La déclinaison et l'ascension droite donnent les coordonnées du Soleil. La déclinaison est l'angle formé par le plan équatorial et le Soleil. L'ascension droite est l'angle, mesuré dans le sens trigonométrique par rapport au nord céleste dans le plan équatorial, inscrit entre l'équinoxe de printemps et la position actuelle du Soleil. L'angle horaire est la différence angulaire entre la longitude de l'observateur et la longitude du Soleil.

FIGURE 12
Sphère céleste



D: déclinaison par rapport à l'équateur
RA: ascension droite du Soleil

1525-12

3.2 Calcul des coordonnées du Soleil

Le temps est mesuré par référence à la période de rotation de la Terre en jours solaires, un jour solaire étant par définition la période entre deux passages successifs du Soleil dans le méridien de l'observateur. Comme la Terre tourne également autour du Soleil en une année, le jour solaire ne correspond pas à la période vraie de la rotation de la Terre. La Terre parcourt 1/365 de son orbite en une journée, mais la planète doit tourner un peu plus d'un tour complet par rapport à une étoile fixe pendant cet intervalle.

Le temps sidéral est déterminé par référence à la rotation de la Terre et par rapport à une étoile fixe. Les variations de la rotation de la Terre, qui procèdent de la précession et de la nutation, ont une incidence sur la longueur du jour sidéral. La précession est le mouvement circulaire du pôle Nord de la Terre par rapport au pôle de l'écliptique. Le rayon du cercle est d'environ $23,5^\circ$ et la période (temps nécessaire pour accomplir une révolution) est de 26 000 ans. La nutation est une oscillation complexe du pôle Nord de la Terre par rapport au pôle Nord moyen. La différence entre le temps sidéral moyen et le temps sidéral apparent est l'équation de l'équinoxe.

L'ascension droite et la déclinaison du Soleil, ainsi que la rotation de la Terre par rapport à l'équinoxe de printemps, sont liées au temps universel (UT). Le temps universel, base de détermination de l'heure civile, est étroitement lié au mouvement diurne moyen du Soleil et directement lié au temps sidéral. Le temps sidéral local apparent (LAST, *Local apparent sidereal time*) est l'angle horaire de l'équinoxe vrai, intersection de l'équateur vrai et de l'écliptique correspondant à la date considérée, lié à la nutation de l'axe de la Terre. Le temps sidéral local moyen est l'angle horaire de l'équinoxe moyen ou l'intersection de l'équateur moyen et de l'écliptique correspondant à la date considérée, lié à la précession de l'axe de la Terre.

L'ascension droite et la déclinaison du Soleil peuvent être obtenues à partir de l'obliquité de l'écliptique, Ω , et de la longitude de l'écliptique, L_{Soleil} , (Fig. 13):

$$L_{\text{Soleil}} = L_{\text{moyen}} + 1,915^\circ \sin(M_e) + 0,020^\circ \sin(2 \times M_e)$$

la longitude moyenne du Soleil, L_{moyen} étant donnée par:

$$L_{\text{moyen}} = 280,460^\circ + 0,9856474^\circ \times d$$

tandis que l'anomalie moyenne de l'orbite de la Terre s'écrit:

$$M_e = 357,528^\circ + 0,9856003^\circ \times d$$

Le temps d est exprimé dans le calendrier Julien (JD, *Julian day*) avec pour référence le 1er janvier 2000 à 12 00 h UT, qui correspond dans le calendrier Julien au jour 2 451 545; $d = JD - 2\,451\,545$.

L'obliquité de l'écliptique (angle entre l'écliptique et l'équateur) est pour ainsi dire constante:

$$\Omega = 23,439^\circ$$

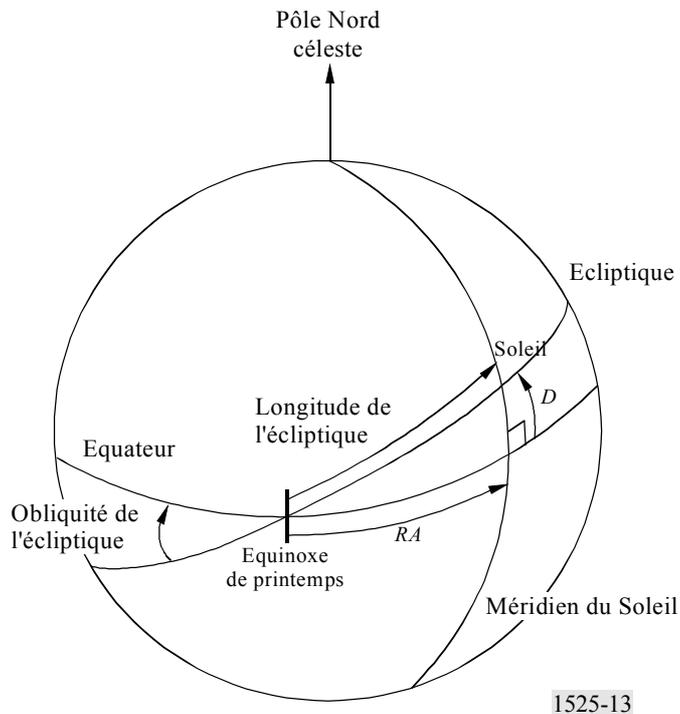
D'après les lois de la trigonométrie sphérique, la déclinaison, D , est donnée par l'équation suivante:

$$D = \arcsin(\sin(\Omega) \cdot \sin(L_{\text{Soleil}}))$$

et l'ascension droite, RA , par:

$$RA = \arctg(\cos(\Omega) \cdot \text{tg}(L_{\text{Soleil}}))$$

FIGURE 13
Le système de coordonnées équatoriales



1525-13

A cette fin, la formule suivante donne une approximation de la déclinaison du Soleil:

$$D_{\text{Soleil}} = 23,5^\circ \sin(360(p - x)/365)$$

dans laquelle la valeur de $23,5^\circ$ correspond à l'obliquité approximative de l'écliptique, p représente le jour de l'année et la valeur de x est de 80 pour l'équinoxe de printemps et de 83,5 pour la période voisine de l'équinoxe d'automne. Le nombre de jours entre l'équinoxe de printemps et l'équinoxe d'automne n'étant pas constant, la valeur de x varie également.

Il y a passage du Soleil dans le champ de l'antenne lorsque la déclinaison du Soleil est très voisine de la déclinaison du satellite, calculée comme expliqué plus haut, dans le système de coordonnées équatoriales. La date approximative du passage du Soleil, P_0 , peut être calculée au plus petit nombre entier près de p , par remplacement du paramètre D_{Soleil} , dans l'équation ci-dessus, par l'angle de déclinaison.

3.3 Calcul de l'ascension droite du Soleil

En utilisant la valeur de P_0 comme point de départ dans le calcul itératif effectué par l'incrément de la date du calendrier Julien, on obtient:

$$|D_{Soleil} - \text{déclinaison}| \leq 0,17^\circ$$

où:

$$D_{Soleil} = \arcsin(\sin(\Omega_i) \cdot \sin(L_{Soleil_i}))$$

Lorsque la valeur de la déclinaison du Soleil et la valeur de l'angle de déclinaison de la station terrienne sont très voisines, l'équation suivante donne la valeur de l'ascension droite du Soleil:

$$RA_i = \arctg(\cos(\Omega_i) \cdot \text{tg}(L_{Soleil_i}))$$

3.4 Calcul de l'heure du passage du Soleil

Une autre condition à remplir pour qu'il y ait passage du Soleil dans le champ de l'antenne est la coïncidence de l'ascension droite du Soleil et du satellite. La déclinaison de l'angle de vue du satellite est une valeur fixe; toutefois, l'ascension droite équivalente du satellite varie dans le temps comme suit:

$$RA_{sat} = LAST - \text{angle horaire}$$

ou

$$LAST = RA_{sat} + \text{angle horaire}$$

l'angle horaire étant calculé ici comme précédemment. Rapporté au temps sidéral apparent de Greenwich (GAST, *Greenwich apparent sidereal time*), on a:

$$GAST = LAST - \theta_{sta}$$

de sorte que, puisque $RA_{sat} = RA_{Soleil}$, en donnant à RA la valeur obtenue précédemment:

$$GAST = RA + \text{angle horaire} - \theta_{sta} = -351,774^\circ$$

On calcule alors l'heure en temps universel coordonné (UTC):

$$GAST = 100,4602346 + 0,985647348 \times (JDO_{sat} - 2451545) + 15,041068 \times UT$$

ou:

$$TU = \left[\frac{GAST - 100,4602346 - 0,985647348 \times (JDO_{sat} - 2451545)}{15,0410} \right]$$

dans lequel JDO_{sat} est la date dans le calendrier Julien à minuit (qui doit donc être représenté par un demi-nombre entier).

Des mesures effectuées au niveau d'une station terrienne en exploitation ont fait apparaître que cette méthode permet d'obtenir une précision d'estimation du point de culmination du passage du Soleil de ± 15 s.

3.5 Valeurs approximatives

Cette méthode de calcul permet d'obtenir une estimation précise de l'heure du passage du Soleil pour une station terrienne, mais le nombre effectif de jours pendant lesquels on observera au niveau d'une station terrienne donnée des niveaux significatifs de brouillage dûs au Soleil ainsi que la

longueur de ces périodes de brouillage dépendent nécessairement des caractéristiques du signal, des objectifs de qualité de fonctionnement et de la marge de liaison de chaque porteuse. Les sections suivantes expliquent la méthode de calcul de valeurs approximatives correspondant au nombre de jours pendant lesquels on observe le phénomène, à la durée maximale du phénomène pendant un jour donné et à la durée totale des effets du passage du Soleil à chaque équinoxe.

3.5.1 Nombre de jours pendant lesquels le phénomène est observé

Du fait que l'angle de déclinaison du Soleil varie d'environ $0,4^\circ$ par jour aux équinoxes, le nombre de jours pendant lequel le phénomène est observé à chaque équinoxe peut être calculé approximativement comme suit:

$$\text{Nombre de jours} = \frac{\theta_{3\text{dB}} + 0,48^\circ}{0,4^\circ}$$

ici, la valeur de $0,48^\circ$ correspond au diamètre optique approximatif du Soleil et l'ouverture à mi-puissance du faisceau de l'antenne de la station terrienne, $\theta_{3\text{dB}}$, (degrés), peut être estimée comme suit:

$$\theta_{3\text{dB}} = 70 \times \lambda / d_{\text{ant}}$$

où:

d_{ant} : diamètre de l'antenne

λ : longueur d'onde, exprimées dans les mêmes unités.

Pour une antenne de 11 m et une fréquence de 11 GHz, $\theta_{3\text{dB}} = 0,17^\circ$, de sorte que le passage du Soleil dans le faisceau de l'antenne à 3 dB se produirait typiquement pendant 1 jour ou 2 jours successifs à chaque équinoxe.

3.5.2 Durée maximale

Du fait que l'angle horaire du Soleil varie d'environ $0,25^\circ$ par minute, la durée maximale d'un passage du Soleil peut être calculée approximativement comme suit:

$$\text{Durée du phénomène en minutes} = \frac{\theta_{3\text{dB}} + 0,48^\circ}{0,25^\circ}$$

Dans le cas de notre antenne de 11 m, $\theta_{3\text{dB}} = 0,17^\circ$, de sorte que la durée maximale d'un passage du Soleil dans le faisceau de l'antenne à 3 dB serait approximativement de 2,5 min.

3.5.3 Durée totale à chaque équinoxe

Lorsqu'il y a intersection d'un grand nombre de droites parallèles et d'un cercle, la longueur moyenne de l'intersection est de $\pi D/4$, D étant le diamètre du cercle. La longueur totale de l'intersection est de $\pi D^2/4p$, p étant la distance entre ces droites parallèles.

A partir de cette expression, et compte tenu de ce que l'angle de déclinaison du Soleil varie d'environ $0,4^\circ$ par jour aux équinoxes, tandis que son angle horaire varie d'environ $0,25^\circ$ par minute, la durée totale des passages du Soleil à chaque équinoxe peut être calculée approximativement comme suit:

$$\pi \times (\theta_{3\text{dB}} + 0,48^\circ)^2 / (4 \times 0,4^\circ \times 0,25^\circ)$$

Dans le cas de l'antenne de 11 m, $\theta_{3\text{dB}} = 0,17^\circ$, de sorte que la durée totale des passages du Soleil dans le faisceau de l'antenne à 3 dB serait d'environ 3,5 min à chaque équinoxe.