

Recommandation UIT-R P.2170-0

(09/2025)

Série P: Propagation des ondes radioélectriques

**Méthodes et modèles pour la prévision
des caractéristiques de propagation des
ondes radioélectriques de
l'environnement lunaire**

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <https://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en œuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Également disponible en ligne: <https://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

***Note:** Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.*

Publication électronique
Genève, 2025

© UIT 2025

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R P.2170-0

Méthodes et modèles pour la prévision des caractéristiques de propagation des ondes radioélectriques de l'environnement lunaire

Question UIT-R 237/3

(2025)

Domaine d'application

La présente Recommandation propose des méthodes permettant de prévoir l'affaiblissement en espace libre¹ ainsi que d'autres caractéristiques de propagation des ondes décrites dans les parties C et D de l'Annexe, nécessaires à la planification des réseaux et des systèmes fonctionnant sur la surface lunaire ou à proximité de cette surface dans la gamme de fréquences 1 MHz à 37 GHz².

Mots clés

Exosphère, régolite, substrat rocheux, modèle lunaire irrégulier (ILM)

Abréviations/glossaire

LoS visibilité directe (*line-of-sight*)

Recommandations UIT-R connexes

Recommandation UIT-R P.341 – Notion d'affaiblissement de transmission pour les liaisons radioélectriques

Recommandation UIT-R P.525 – Calcul de la propagation en espace libre

Recommandation UIT-R P.618 – Méthode permettant de déterminer les objectifs de qualité de fonctionnement pour des systèmes des services d'exploration de la Terre par satellite et de météorologie par satellite

NOTE – Il convient d'utiliser l'édition la plus récente de la Recommandation en vigueur

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que l'environnement lunaire qui interagit avec les ondes radioélectriques comprend l'exosphère, le régolite et le substrat rocheux de la Lune;
- b) qu'aux fréquences supérieures à la fréquence du plasma de l'exosphère, qui sont au maximum d'environ 220 kHz à la surface de la Lune, l'exosphère lunaire peut être traitée comme un espace libre;
- c) que la connaissance des caractéristiques de la permittivité relative complexe du régolite et du substrat rocheux de la Lune est nécessaire afin de caractériser plusieurs mécanismes de propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement lunaire;
- d) que la connaissance de la propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement lunaire est nécessaire afin de caractériser plusieurs mécanismes de propagation des ondes radioélectriques, y compris la diffraction, la réflexion et la diffusion;

¹ L'affaiblissement de transmission de référence tel que défini au § 1.2 de la Recommandation UIT-R P.341 est la somme de: a) l'affaiblissement en espace libre tel que défini dans la présente Recommandation; et b) l'affaiblissement de transmission de référence en espace libre défini dans la Recommandation UIT-R P.525.

² Voir les § C.1.5 et C.1.6.

e) que la propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement lunaire peut être caractérisée par les statistiques d'affaiblissement en espace libre;

f) que les caractéristiques de propagation des systèmes point à zone et point à point sur la Lune sont des éléments nécessaires à la prévision de la propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement lunaire,

recommande

de tenir compte de l'Annexe à la présente Recommandation pour prévoir les statistiques concernant l'affaiblissement en espace libre pour les systèmes point à zone et point à point fonctionnant sur la surface lunaire ou à proximité de cette surface dans la gamme de fréquences 1 MHz à 37 GHz³.

Annexe

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
PARTIE A – Modèle lunaire irrégulier: mode point à zone	3
A.1 Introduction.....	3
A.2 Fonctions Gx , Fx , K , C1K et BK	12
PARTIE B – Modèle lunaire irrégulier: mode point à point.....	13
B.1 Introduction.....	13
B.2 Fonctions Gx , Fx , K , C1K , et BK	21
PARTIE C – Caractéristiques électriques de la surface de la Lune.....	22
C.1 Permittivité relative complexe du régolite.....	22
C.2 Permittivité relative complexe de la roche lunaire	27
C.3 Perméabilité relative complexe du régolite lunaire	27
C.4 Permittivité relative complexe du mélange de régolite et de roche	27
PARTIE D – Prévision d'autres affaiblissements de propagation	29
D.1 Affaiblissement de propagation en espace libre	29
D.2 Affaiblissement de propagation tenant compte de l'atmosphère terrestre	29

³ Voir les § C.1.5 et C.1.6.

Introduction

La présente Annexe est divisée selon les quatre parties suivantes:

- Partie A: Modèle lunaire irrégulier: mode point à zone
- Partie B: Modèle lunaire irrégulier: mode point à point
- Partie C: Caractéristiques électriques de la surface de la Lune
- Partie D: Prévion d'autres affaiblissements de propagation

Le modèle lunaire irrégulier prévoit l'affaiblissement médian et statistique pour les liaisons point à zone et point à point sur la surface lunaire ou à proximité de cette surface. La méthode de prévion du «mode point à zone» prévoit l'affaiblissement sur le trajet entre un émetteur et un récepteur dans une zone particulière, au moyen de caractéristiques topographiques générales ou statistiques. La méthode de prévion du «mode point à point» prévoit l'affaiblissement sur le trajet entre des emplacements spécifiques d'émetteurs et de récepteurs, au moyen de données et de caractéristiques topographiques précises spécifiques. Dans les deux cas, on considère que les antennes d'émission et de réception sont des antennes isotropes à polarisation rectiligne (horizontale ou verticale) sans perte, et on considère que l'antenne de réception correspond à la polarisation du signal incident. Selon l'ouverture de faisceau et la distance de l'antenne, l'affaiblissement pour les systèmes dotés d'antennes à faisceau étroit peut sortir du champ d'application de la présente Recommandation. L'affaiblissement pour les systèmes dotés d'antennes à polarisation circulaire n'entre pas dans le champ d'application de la présente Recommandation.

L'équation (a-18) calcule l'affaiblissement de trajet médian pour le mode point à zone en fonction de la distance, et l'équation (b-16) calcule l'affaiblissement de trajet médian pour le mode point à point en fonction de la distance.

L'affaiblissement en espace libre qui n'est pas dépassé pour la fraction de la zone considérée pour le mode point à zone est calculé au § A.1.7, et l'affaiblissement en espace libre qui n'est pas dépassé pour la fraction des profils de terrain équivalents pour le mode point à point est calculé au § B.1.7. La fonction $A_{ref}(p)$ est la fonction principale de prévion de l'affaiblissement en espace libre. D'autres fonctions telles que $A_{diff}(s)$, dont s indique l'argument, sont référencées par $A_{ref}(p)$ avec l'argument approprié.

L'affaiblissement de propagation entre: a) les systèmes sur la surface lunaire ou à proximité de cette surface et les systèmes en orbite lunaire, et b) les systèmes sur la surface lunaire ou à proximité de cette surface et les systèmes en orbite terrestre, lorsque le trajet en visibilité directe est sans obstacle et qu'il n'y a pas de réflexion spéculaire est décrit au § B.1.

PARTIE A

Modèle lunaire irrégulier: mode point à zone

A.1 Introduction

Le mode point à zone du modèle lunaire irrégulier est une méthode générale de prévion de la propagation des ondes qui prévoit $A_{ref}(p)$, l'affaiblissement en espace libre qui n'est pas dépassé pour la fraction de la zone considérée, p ($0 < p < 1$), pour les systèmes de radiocommunications lunaires dans la gamme de fréquences 20 MHz à 37 GHz.

Les paramètres d'entrée pour le mode point à zone du modèle lunaire irrégulier sont indiqués dans le Tableau 1.

TABLEAU 1

Paramètres d'entrée du modèle lunaire irrégulier pour le mode point à zone

f	Fréquence (MHz)
d	Distance horizontale de surface régulière entre les terminaux (m); $500 \text{ km} > d > 0,5 \text{ km}$
p	Fraction d'emplacement ($0 < p < 1$)
h_{g_1}, h_{g_2}	Hauteurs structurelles de l'antenne des terminaux (centre électrique) au-dessus d'une sphère de 1 737 400 m de rayon; $0,5 \text{ m} < h_{g_x} < 3 \text{ km}$, où l'angle d'élévation de l'antenne à l'horizon est $< 200 \text{ mrad}$.
Δh	Irrégularité du terrain (m)
Z_g	Impédance de transfert de la surface lunaire (régolite)
ψ_i	Angle d'élévation d'un terminal à l'autre
T_{pol}	Polarisation à l'émission (par exemple horizontale ou verticale)

Calculer le nombre d'ondes, k , à partir de la fréquence, f , comme suit:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} (\text{m}^{-1}) \quad (\text{a-1})$$

où la vitesse de la lumière dans le vide, $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$. L'unité de la fréquence, f , étant le MHz, le nombre d'ondes, k , est:

$$k = \frac{f}{f_0} (\text{m}^{-1}) \quad (\text{a-2})$$

où $f_0 = 47,713\,451\,59 \text{ MHz-m}$.

Le rayon physique de la Lune, a_e , est de 1 737 400 m, et la courbure équivalente de la Lune, γ_e , est $\frac{1}{a_e} \text{ m}^{-1}$.

L'impédance de transfert de la surface lunaire (régolite), Z_g , est une constante complexe sans dimension qui dépend de la permittivité relative de la surface lunaire, $\epsilon_r = \epsilon' + i\epsilon''$. La permittivité relative doit être calculée comme une valeur représentative compte tenu du profil du trajet. En l'absence de valeur représentative, il convient d'utiliser la valeur à mi-trajet. Si la teneur minérale locale en TiO_2 et en FeO est connue, on peut utiliser la méthode de prévision présentée dans la Partie C. En l'absence de données locales, on peut supposer que la partie réelle de la permittivité relative de la surface, ϵ' , est égale à 2,0. On peut supposer que la partie réelle de la permittivité relative de l'atmosphère lunaire, ϵ' , est égale à 1,0 pour les fréquences comprises dans la gamme de ce modèle.

La polarisation du vecteur champ électrique du signal radioélectrique s'écrit T_{pol} (c'est-à-dire horizontale, définie comme étant perpendiculaire au plan d'incidence au point de réflexion au sol, ou verticale, définie comme étant parallèle au plan d'incidence au point de réflexion au sol).

À l'angle d'élévation ψ_i , polarisation p , on peut écrire l'impédance de transfert du régolite comme suit:

$$Z_g = \left\{ \frac{1 - \mathcal{R}_0^p(\psi_i)}{1 + \mathcal{R}_0^p(\psi_i)} \right\} \sin \psi_i, \quad T_{pol} = v, h \quad (\text{a-3})$$

Pour un régolite homogène, les coefficients de réflexion $\mathcal{R}_0^{Tpol}(\psi_i)$ de l'équation (a-3) peuvent être remplacés par les coefficients de réflexion de Fresnel correspondants suivants:

$$\mathcal{R}_0^{Tpol}(\psi_i) = \begin{cases} \frac{\varepsilon_r \sin \psi_i - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \psi_i}}{\varepsilon_r \sin \psi_i + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \psi_i}}, & T_{pol} = v \\ \frac{\sin \psi_i - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \psi_i}}{\sin \psi_i + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \psi_i}}, & T_{pol} = h \end{cases} \quad (a-4)$$

Ce qui donne:

$$Z_g = \begin{cases} \frac{\sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \psi_i}}{\varepsilon_r}, & T_{pol} = v \\ \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \psi_i}, & T_{pol} = h \end{cases} \quad (a-5)$$

On peut donner l'approximation suivante de $\psi_i \sim 0_i$, Z_g pour une incidence quasi rasante:

$$Z_g = \begin{cases} \frac{\sqrt{\varepsilon_r - 1}}{\varepsilon_r}, & T_{pol} = v \\ \sqrt{\varepsilon_r - 1}, & T_{pol} = h \end{cases} \quad (a-6)$$

Il existe deux cas pour l'installation des terminaux, à savoir 1) les terminaux mobiles et 2) les terminaux fixes.

Si la topographie locale du terrain lunaire est connue, le paramètre d'irrégularité du terrain, Δh , pour un ensemble de trajets représentatifs entre l'antenne d'émission et les antennes de réception représentatives peut être déterminé comme suit.

Pour chaque trajet représentatif:

- 1) pour un trajet en visibilité directe, déterminer $d_{tx,horizon}$ (m), la distance entre le centre électrique de l'antenne d'émission et l'horizon défini par la visibilité directe entre le centre électrique de l'antenne d'émission et le centre électrique de l'antenne de réception; et pour un trajet sans visibilité directe, déterminer $d_{tx,horizon}$ (m), la distance entre le centre électrique de l'antenne d'émission et l'horizon défini par l'intersection a) de la visibilité directe du centre électrique de l'antenne d'émission au centre électrique de l'antenne de réception et b) de l'obstacle intermédiaire;
- 2) pour un trajet en visibilité directe, déterminer $d_{rx,horizon}$ (m), la distance entre le centre électrique de l'antenne de réception et l'horizon défini par la visibilité directe entre le centre électrique de l'antenne de réception et le centre électrique de l'antenne d'émission; et pour un trajet sans visibilité directe, déterminer $d_{rx,horizon}$ (m), la distance entre le centre électrique de l'antenne de réception et l'horizon défini par l'intersection a) de la visibilité directe du centre électrique de l'antenne de réception au centre électrique de l'antenne d'émission et b) de l'obstacle intermédiaire;
- 3) déterminer l'altitude de la surface lunaire par rapport à une sphère de rayon 1 737 400 m pour un ensemble de points équidistants sur la surface lunaire le long du trajet de l'antenne d'émission à l'antenne de réception, à l'exclusion de la région de rayon $\min(15 h_{g_1}, 0,1 d_{tx,horizon})$ m autour de l'antenne d'émission et de la région de rayon $\min(15 h_{g_2}, 0,1 d_{rx,horizon})$ m autour de l'antenne de réception;
- 4) calculer $d_x = d - \min(15 h_{g_1}, 0,1 d_{tx,horizon}) - \min(15 h_{g_2}, 0,1 d_{rx,horizon})$;
- 5) effectuer un ajustement linéaire par les moindres carrés à l'ensemble de points équidistants le long du trajet de longueur d_x ;
- 6) calculer les différences résiduelles entre l'ensemble de points équidistants le long du trajet de longueur d_x et l'ajustement linéaire par les moindres carrés;

- 7) trier l'ensemble des différences résiduelles par ordre croissant ou décroissant;
- 8) supprimer les 10% supérieurs et les 10% inférieurs de l'ensemble trié des différences;
- 9) $\Delta h(d_x)$ est égal à la différence entre les valeurs maximale et minimale des différences résiduelles triées;
- 10) on obtient alors Δh pour chaque trajet représentatif: $\Delta h = \frac{\Delta h(d_x)}{\left(1 - 0,8 e^{-\frac{d_x}{5 \times 10^4}}\right)}$ (m).

La valeur nette de Δh est égale à la valeur Δh moyenne pour l'ensemble de trajets représentatifs.

En l'absence de données topographiques lunaires locales, on peut prendre pour hypothèse une valeur tirée du Tableau 2.

TABLEAU 2

Valeurs suggérées pour le paramètre d'irrégularité du terrain lunaire, Δh (m)

Surface lunaire	Δh (m)
Régulière	0-1 500
Champ de cratères moyen	1 500-3 500
Champ de cratères important	3 500-5 000
Champ de cratères extrêmement accidenté	> 5 000
Pour une surface lunaire moyenne, utiliser $\Delta h = 3\,000$ m.	

A.1.1 Calculs préparatoires

Définir le terminal d'émission comme $j = 1$ et le terminal de réception comme $j = 2$. Si un terminal est un terminal mobile, alors:

$$h_{ej} = h_{gj} \text{ (m)} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{a-7})$$

et, s'il s'agit d'un terminal fixe:

$$B_j = 10 \text{ (m)} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{a-8})$$

auquel cas,

$$B'_j = (B_j - 1) \sin \left(\frac{\pi}{2} \min \left(\frac{h_{gj}}{5}, 1 \right) \right) + 1 \quad (\text{a-9})$$

$B'_j = B_j$ si $h_{gj} \geq 5 \text{ m}$. La hauteur équivalente du $j^{\text{ème}}$ terminal, h_{ej} ($j = 1$ ou 2), est alors:

$$h_{ej} = h_{gj} + B'_j e^{-\frac{2h_{gj}}{\Delta h}} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{a-10})$$

Calculer les distances de l'horizon pour une Lune régulière, d_{lsj} :

$$d_{lsj} = \sqrt{2h_{ej}a_e} \quad \text{pour } j = 1, 2 \text{ (m)} \quad (\text{a-11})$$

Les distances de l'horizon radioélectrique des terminaux, d_{lj} , et les angles d'élévation, θ_{ej} ⁴, sont alors les suivants:

$$d_{lj} = d_{lsj} e^{-0,07 \sqrt{\frac{\Delta h}{\max(h_{ej}, 5)}}} \quad \text{pour } j = 1, 2 \text{ (m)} \quad (\text{a-12})$$

et

$$\theta_{ej} = -\frac{[2h_{ej} + 0,65\Delta h(d_{lsj}/d_{lj} - 1)]}{d_{lsj}} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{a-13})$$

La distance combinée de l'horizon radioélectrique de la Lune régulière, d_{ls} , la distance combinée de l'horizon radioélectrique du terrain irrégulier, d_l , et les angles d'élévation combinés de l'horizon radioélectrique du terrain irrégulier, θ_e , sont alors:

$$d_{ls} = d_{ls1} + d_{ls2} \quad (\text{a-14})$$

$$d_l = d_{l1} + d_{l2} \quad (\text{a-15})$$

$$\theta_e = \max(\theta_{e1} + \theta_{e2}, -d_l \gamma_e) \quad (\text{a-16})$$

et $\Delta h(s)$, qui est fonction de la distance, s , est:

$$\Delta h(s) = \Delta h \left(1 - 0,8 e^{-\frac{s}{5 \times 10^4}} \right) \quad (\text{m}) \quad (\text{a-17})$$

A.1.2 Affaiblissement de référence

L'affaiblissement de référence, A_{ref} , est l'affaiblissement médian prévu par rapport à l'espace libre qui serait observé sur des trajets similaires. A_{ref} est la fonction par morceaux suivante de la distance horizontale du trajet, d :

$$A_{ref}(d) = \begin{cases} \max \left[0, A_{el} + K_1 d + K_2 \ln \left(\frac{d}{d_{ls}} \right) \right] & \text{pour } d \leq d_{ls} \\ A_{ed} + m_d d & \text{pour } d > d_{ls} \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-18})$$

où A_{el} est défini dans l'équation (a-76), A_{ed} est défini dans l'équation (a-25), et les coefficients K_1 , K_2 , et m_d sont calculés dans les paragraphes suivants. La portée $d \leq d_{ls}$ est définie comme étant la distance en visibilité directe, et la portée $d \geq d_{ls}$ est définie comme étant la gamme de diffraction. Il convient de noter que A_{ref} est continu à $d = d_{ls}$.

A.1.3 Coefficients pour la gamme de diffraction

Les coefficients pour la gamme de diffraction sont calculés en évaluant l'affaiblissement de diffraction, $A_{diff}(d)$, à deux distances, d_3 et d_4 , qui sont au-delà de la visibilité directe. Calculer:

$$d_3 = \max(d_{ls}, d_l + 1,3787X_{ae}) \quad (\text{a-19})$$

$$d_4 = d_3 + 2,7574X_{ae} \quad (\text{a-20})$$

$$A_3 = A_{diff}(d_3) \quad (\text{a-21})$$

$$A_4 = A_{diff}(d_4) \quad (\text{a-22})$$

⁴ Dans cette partie, les unités des angles, θ , sont des radians.

où:

$$X_{ae} = (k\gamma_e^2)^{-\frac{1}{3}} = a_e \left(\frac{2\pi a_e}{\lambda} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (\text{a-23})$$

et la fonction A_{diff} est définie par l'équation (a-26).

Les paramètres m_d et A_{ed} sont:

$$m_d = \frac{A_4 - A_3}{d_4 - d_3} \quad \left(\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right) \quad (\text{a-24})$$

$$A_{ed} = A_3 - m_d d_3 = \frac{A_3 d_4 - A_4 d_3}{d_4 - d_3} \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-25})$$

A.1.4 Fonction d'affaiblissement dû à la diffraction

La fonction d'affaiblissement dû à la diffraction, $A_{diff}(s)$, est une combinaison pondérée de l'affaiblissement «par double arête en lame de couteau», $A_k(s)$, et de l'affaiblissement de diffraction «pour une Lune arrondie», $A_r(s)$:

$$A_{diff}(s) = (1 - w(s))A_k(s) + w(s)A_r(s) \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-26})$$

$A_k(s)$ est défini dans l'équation (a-29), $A_r(s)$ est défini dans l'équation (a-41), et le facteur de pondération, $w(s)$, est défini comme suit:

$$w(s) = \frac{1}{1 + 0,1\sqrt{Q(s)}} \quad (\text{a-27})$$

où:

$$Q(s) = \min\left(\frac{\Delta h(s)}{\lambda}, 1\,000\right) \left[\sqrt{\frac{h_{e1}h_{e2}+C}{h_{g1}h_{g2}+C}} + \frac{d_l + a_e \theta_e}{s} \right] \quad (\text{a-28})$$

et $C = 0$.

L'affaiblissement de diffraction «par double arête en lame de couteau» médian pour les deux horizons radioélectriques lunaires irréguliers, $A_k(s)$, est:

$$A_k(s) = Fn(v_1(s)) + Fn(v_2(s)) \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-29})$$

où:

$$Fn(z) = -20 \log_{10} \left(\left| \frac{1}{\sqrt{2i}} \int_z^\infty e^{i\frac{\pi}{2}u^2} du \right| \right) \quad (\text{a-30})$$

$$= -20 \log_{10} \left(\left| \left[\frac{1+i}{2\sqrt{2i}} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} (1-i)z \right) \right] \right| \right) \quad (\text{a-31})$$

$$= -20 \log_{10} \left(\left| \left[\frac{1+i}{\sqrt{2i}} Q \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} (1-i)z \right) \right] \right| \right) \quad (\text{a-32})$$

$$v_j(s) = \frac{\theta(s)}{2} \sqrt{\frac{2d_{lj}(s-d_l)}{\lambda(s-d_l+d_{lj})}} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{a-33})$$

et:

$$\theta(s) = \theta_e + s\gamma_e \quad (\text{a-34})$$

L'affaiblissement de diffraction «pour une Lune arrondie» est fondé sur la méthode des «trois rayons» appliquée à la solution du problème de diffraction sphérique régulière. Calculer γ_0 , γ_1 et γ_2 comme suit:

$$\Gamma_0 = \frac{\theta(s)}{s-d_l} \quad (\text{a-35})$$

$$\Gamma_j = \frac{2h_{ej}}{d_{lj}^2} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{a-36})$$

Poser:

$$A_j = \left(\frac{k}{\gamma_j}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{pour } j = 0, 1, 2 \quad (\text{a-37})$$

et:

$$K_j = \frac{1}{i\alpha_j Z_g} \quad \text{pour } j = 0, 1, 2 \quad (\text{a-38})$$

Définir les distances sans dimension:

$$x_0 = AB(K_0) \alpha_0 \theta(s) + x_1 + x_2 \quad (\text{a-39})$$

et:

$$x_j = AB(K_j) \alpha_j \gamma_j d_{lj} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{a-40})$$

où $A = 63,798$. Notez que seulement x_0 dépend de s . L'affaiblissement de diffraction «pour une Lune arrondie», $A_r(s)$, est:

$$A_r(s) = G(x_0) - F(x_1, K_1) - F(x_2, K_2) - C_1(K_0) \quad (\text{a-41})$$

où les fonctions $G(x)$, $F(x, K)$, $C_1(K)$ et $B(K)$ sont définies au § A.2.

A.1.5 Coefficients pour la portée en visibilité directe

Poser:

$$d_2 = d_{ls} \quad (\text{a-42})$$

et:

$$A_2 = A_{ed} + m_d d_2 \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-43})$$

Il existe deux cas généraux, selon le signe de A_{ed} .

Cas 1: Si $A_{ed} \geq 0$, poser:

$$d_0 = \min\left(\frac{d_l}{2}, 1,908kh_{e1}h_{e2}\right) \quad (\text{a-44})$$

$$d_1 = \frac{3}{4}d_0 + \frac{d_l}{4} \quad (\text{a-45})$$

$$A_0 = A_{los}(d_0) \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-46})$$

$$A_1 = A_{los}(d_1) \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-47})$$

Calculer:

$$K'_2 = \max\left(0, \frac{(A_1 - A_0)(d_2 - d_0) - (A_2 - A_0)(d_1 - d_0)}{(d_2 - d_0) \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) - (d_1 - d_0) \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)}\right) \quad (\text{a-48})$$

et:

$$K'_1 = \frac{A_2 - A_0 - K'_2 \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)}{d_2 - d_0} \quad (\text{a-49})$$

Si $K'_1 \geq 0$, poser:

$$K_1 = K'_1 \quad (\text{a-50})$$

$$K_2 = K'_2 \quad (\text{a-51})$$

cependant, si $K'_1 < 0$, poser:

$$K_2'' = \frac{A_2 - A_0}{\ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)} \quad (\text{a-52})$$

Si $K_2'' \geq 0$, poser:

$$K_1 = 0 \quad (\text{a-53})$$

$$K_2 = K_2'' \quad (\text{a-54})$$

Cependant, si $K_2'' < 0$, poser:

$$K_1 = m_d \quad (\text{a-55})$$

$$K_2 = 0 \quad (\text{a-56})$$

Cas 2: Si $A_{ed} < 0$, poser:

$$d_0 = 1,908 k h_{e1} h_{e2} \quad (\text{a-57})$$

$$d_1 = \max\left(-\frac{A_{ed}}{m_d}, \frac{d_l}{4}\right) \quad (\text{a-58})$$

Si $d_0 < d_1$, poser:

$$A_0 = A_{los}(d_0) \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-59})$$

$$A_1 = A_{los}(d_1) \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-60})$$

et:

$$K'_2 = \max\left(0, \frac{(A_1 - A_0)(d_2 - d_0) - (A_2 - A_0)(d_1 - d_0)}{(d_2 - d_0) \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) - (d_1 - d_0) \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)}\right) \quad (\text{a-61})$$

Si $K'_2 \neq 0$, calculer:

$$K'_1 = \frac{A_2 - A_0 - K'_2 \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)}{d_2 - d_0} \quad (\text{a-62})$$

Si $K'_1 \geq 0$, poser:

$$K_1 = K'_1 \quad (\text{a-63})$$

$$K_2 = K'_2 \quad (\text{a-64})$$

Si $K'_1 < 0$, poser:

$$K_2'' = \frac{A_2 - A_0}{\ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)} \quad (\text{a-65})$$

Si $K_2'' \geq 0$, alors:

$$K_1 = 0 \quad (\text{a-66})$$

$$K_2 = K_2'' \quad (\text{a-67})$$

Si $K_2'' < 0$, alors:

$$K_1 = m_d \quad (\text{a-68})$$

$$K_2 = 0 \quad (\text{a-69})$$

Si $d_0 \geq d_1$ ou $K_2' = 0$, alors:

$$A_1 = A_{los}(d_1) \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-70})$$

$$K_1'' = \frac{A_2 - A_1}{d_2 - d_1} \quad (\text{a-71})$$

Si $K_1'' > 0$, alors:

$$K_1 = K_1'' \quad (\text{a-72})$$

$$K_2 = 0 \quad (\text{a-73})$$

Sinon, poser:

$$K_1 = m_d \quad (\text{a-74})$$

$$K_2 = 0 \quad (\text{a-75})$$

Enfin, poser:

$$A_{el} = A_2 - K_1 d_2 \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-76})$$

A.1.6 Fonction d'affaiblissement en visibilité directe

La fonction d'affaiblissement en visibilité directe, $A_{los}(s)$, est la combinaison pondérée de l'affaiblissement de la «portée de diffraction extrapolée/étendue», $A_d(s)$, et de l'affaiblissement «à deux rayons», $A_t(s)$:

$$A_{los}(s) = (1 - w)A_d(s) + wA_t(s) \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-77})$$

$A_d(s)$ est défini dans l'équation (a-79), $A_t(s)$ est défini dans l'équation (a-86), et la fonction de pondération, w , est:

$$w = \frac{1}{1 + \frac{D_1 k \Delta h}{\max(D_2, d_{ls})}} \quad (\text{a-78})$$

où $D_1 = 47,7$ m, et $D_2 = 10$ km. L'affaiblissement de la «portée de diffraction étendue» est:

$$A_d(s) = A_{ed} + m_d s \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-79})$$

Pour l'affaiblissement «à deux rayons», poser:

$$\sin \psi(s) = \frac{h_{e1} + h_{e2}}{\sqrt{s^2 + (h_{e1} + h_{e2})^2}} \quad (\text{a-80})$$

et:

$$R_e'(s) = \frac{\sin \psi(s) - Z_g}{\sin \psi(s) + Z_g} e^{-k \sigma_h(s) \sin \psi(s)} \quad (\text{a-81})$$

où:

$$\sigma_h(s) = \frac{\Delta h(s)}{1,282} e^{-\frac{4\sqrt{\Delta h(s)}}{2}} \quad (\text{a-82})$$

Poser:

$$\Delta'(s) = 2 \frac{k h_{e1} h_{e2}}{s} \quad (\text{a-83})$$

Le coefficient de réflexion équivalent, $R_e(s)$, est:

$$R_e(s) = \begin{cases} R'_e(s) & \text{pour } |R'_e(s)| \geq \max(0,5, \sqrt{\sin \psi(s)}) \\ \frac{R'_e(s)}{|R'_e(s)|} \sqrt{\sin \psi(s)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{a-84})$$

La différence de phase, $\delta(s)$, est:

$$\Delta(s) = \begin{cases} \delta'(s) & \text{pour } \delta'(s) \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \frac{(\frac{\pi}{2})^2}{\delta'(s)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{a-85})$$

L'affaiblissement «à deux rayons», $A_t(s)$, est alors:

$$A_t(s) = -20 \log_{10} |1 + R_e(s) e^{i\delta(s)}| \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-86})$$

A.1.7 Variabilité en fonction de l'emplacement

$A_{ref}(p)$, l'affaiblissement en espace libre qui n'est pas dépassé pour la fraction de la zone considérée, p ($0 < p < 1$) est calculé comme suit:

Calculer $\Delta h(d)$, σ , et z comme suit, où d est la longueur totale du trajet:

$$\Delta h(d) = \Delta h \left(1 - 0,8 e^{-\frac{d_x}{5 \times 10^4}} \right) \quad (\text{a-87})$$

$$\Sigma = 10 k \frac{\Delta h(d)}{k \Delta h(d) + 13} \quad (\text{a-88})$$

$$z = Q^{-1}(p) \quad (\text{a-89})$$

où d est la longueur totale du trajet.

Alors:

$$A_{ref}(p) = A_{ref} + \sigma z \quad (\text{dB}) \quad (\text{a-90})$$

A.2 Fonctions $G(x)$, $F(x, K)$, $C_1(K)$ et $B(K)$

$$F(x, K) = \begin{cases} F_2(x, K) & \text{pour } 0 < x \leq 200 \\ G(x) + 0,013 x e^{-\frac{x}{200}} [F_1(x) - G(x)] & \text{pour } 200 < x < 2\,000 \\ G(x) & \text{pour } x \geq 2\,000 \end{cases} \quad (\text{a-91})$$

où:

$$G(x) = 0,05751 x - 10 \log_{10} x \quad (\text{a-92})$$

$$F_1(x) = 40 \log_{10}(\max(x, 1)) - 117 \quad (\text{a-93})$$

$$F_2(x, K) = \begin{cases} F_1(x) & \text{pour } |K| < 10^{-5} \text{ ou } x (-\log_{10}|K|)^3 > 450 \\ 2,5 x \frac{10^{-5} x^2}{|K|} + 20 \log_{10}(|K|) - 15 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{a-94})$$

$$C_1(K) = 20 \quad (\text{a-95})$$

$$B(K) = 1,607 - |K| \quad (\text{a-96})$$

PARTIE B

Modèle lunaire irrégulier: mode point à point**B.1 Introduction**

Le mode point à point du modèle lunaire irrégulier est une méthode générale de prévision de la propagation des ondes radioélectriques qui permet de prévoir $A_{ref}(p)$, l'affaiblissement en espace libre qui n'est pas dépassé pour la fraction des profils de terrain équivalents, p ($0 < p < 1$), pour les systèmes de radiocommunication lunaires dans la gamme de fréquences comprise entre 20 MHz et 37 GHz.

Les paramètres d'entrée pour le mode point à point du modèle lunaire irrégulier sont indiqués dans le Tableau 3.

TABLEAU 3

Paramètres d'entrée pour le mode point à point du modèle lunaire irrégulier

f	Fréquence (MHz).
h_i	Vecteur de distances horizontales régulièrement espacées entre terminaux (m); $h_i < 100$ m. Distance minimale/maximale entre les terminaux sur surface régulière en km $500 \text{ km} > d > 0,1 \text{ km}$
p	Fractions d'emplacement ($0 < p < 1$)
h_{g_1}, h_{g_2}	Hauteurs structurelles (centre électrique) de l'antenne des terminaux au-dessus d'une sphère de 1 737 400 m de rayon; $0,5 \text{ m} < h_{g_x} < 3 \text{ km}$, où l'angle d'élévation entre l'antenne et l'horizon $< 200 \text{ mrad}$
h_i	Élévations du terrain lunaire à des distances horizontales régulièrement espacées entre les terminaux (m)
d	Distance le long du grand cercle entre le terminal d'émission et le terminal de réception
Z_g	Impédance de transfert de la surface lunaire (régolite)
ψ_i	Angle d'élévation d'un terminal à l'autre
T_{pol}	Polarisation à l'émission (par exemple horizontale ou verticale)

Calculer le nombre d'ondes, k , à partir de la fréquence, f , comme suit:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (\text{b-1})$$

où la vitesse de la lumière dans le vide, $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$. L'unité de la fréquence, f , étant le MHz, le nombre d'ondes, k , est:

$$k = \frac{f}{f_0} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (\text{b-2})$$

où $f_0 = 47,713\,451\,59 \text{ MHz-m}$.

Le rayon physique de la Lune, a_e , est de 1 737 400 m, et la courbure équivalente de la Lune, γ_e , est $\frac{1}{a_e} \text{ m}^{-1}$.

L'impédance de transfert de la surface lunaire (régolite), Z_g , est une constante complexe sans dimension, qui dépend de la permittivité relative de la surface lunaire, $\epsilon_r = \epsilon' + i \epsilon''$. La permittivité relative doit être calculée comme une valeur représentative compte tenu du profil du trajet. En

l'absence de valeur représentative, il convient d'utiliser la valeur à mi-trajet. Si la teneur minérale locale en TiO_2 et en FeO est connue, on peut utiliser la méthode de prévision présentée dans la Partie B. En l'absence de données locales, on peut supposer que la partie réelle de la permittivité relative de la surface, ϵ' , est égale à 2,0. On peut supposer que la partie réelle de la permittivité relative de l'atmosphère lunaire, ϵ' , est égale à 1,0 pour les fréquences comprises dans la gamme de ce modèle.

La polarisation du vecteur champ électrique du signal radioélectrique s'écrit T_{pol} , (c'est-à-dire horizontale, définie comme étant perpendiculaire au plan d'incidence au point de réflexion au sol, ou verticale, définie comme étant parallèle au plan d'incidence au point de réflexion au sol). L'impédance de transfert à la surface de la Lune, Z_g , est:

À l'angle d'élévation ψ_i , polarisation p , on peut écrire l'impédance de transfert du régolite comme suit:

$$Z_g = \left\{ \frac{1 - \mathcal{R}_0^p(\psi_i)}{1 + \mathcal{R}_0^p(\psi_i)} \right\} \sin \psi_i, \quad T_{pol} = v, h \quad (\text{b-3})$$

Pour un régolite homogène, les coefficients de réflexion $\mathcal{R}_0^{Tpol}(\psi_i)$'s dans l'équation (a-3) peuvent être remplacés par les coefficients de réflexion de Fresnel correspondants suivants:

$$\mathcal{R}_0^{Tpol}(\psi_i) = \begin{cases} \frac{\epsilon_r \sin \psi_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi_i}}{\epsilon_r \sin \psi_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi_i}}, & T_{pol} = v \\ \frac{\sin \psi_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi_i}}{\sin \psi_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi_i}}, & T_{pol} = h \end{cases} \quad (\text{b-4})$$

Ce qui donne:

$$Z_g = \begin{cases} \frac{\sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi_i}}{\epsilon_r}, & T_{pol} = v \\ \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi_i}, & T_{pol} = h \end{cases} \quad (\text{b-5})$$

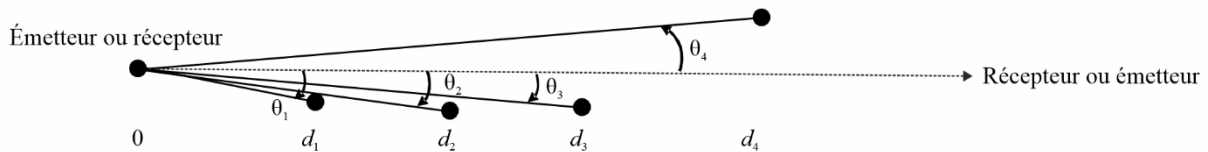
On peut donner l'approximation suivante de $\psi_i \sim 0_i$, Z_g pour une incidence quasi rasante:

$$Z_g = \begin{cases} \frac{\sqrt{\epsilon_r - 1}}{\epsilon_r}, & T_{pol} = v \\ \sqrt{\epsilon_r - 1}, & T_{pol} = h \end{cases} \quad (\text{b-6})$$

Il existe deux cas pour l'installation des terminaux, à savoir 1) les terminaux mobiles et 2) les terminaux fixes.

Le paramètre d'irrégularité du terrain, Δh , pour le trajet entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception peut être déterminé comme suit.

FIGURE 1
Exemples de distances et d'angles de l'horizon



Pour chaque trajet représentatif:

- 1) en se référant à la Fig. 1, déterminer d_{l1} (m) et θ_{l1} ⁵, la distance de l'horizon du terminal de réception et l'angle d'élévation correspondant à d_i et θ_i avec la valeur maximale de θ_i sur tous les points équidistants entre l'émetteur et le récepteur;
- 2) en se référant à la Fig. 1, déterminer d_{l2} (m) et θ_{l2} , la distance de l'horizon du terminal émetteur et l'angle d'élévation correspondant à d_i et θ_i avec la valeur maximale de θ_i sur tous les points équidistants entre le récepteur et l'émetteur;
- 3) déterminer l'altitude de la surface lunaire par rapport à une sphère de rayon 1 737 400 m pour un ensemble de points équidistants sur la surface lunaire le long du trajet de l'antenne d'émission à l'antenne de réception, à l'exclusion de la région de rayon $\min(15 h_{g1}, 0,1 d_{l1})$ m autour de l'antenne d'émission et de la région de rayon $\min(15 h_{g2}, 0,1 d_{l2})$ m autour de l'antenne de réception;
- 4) calculer $d_x = d - d_{l1} - d_{l2}$;
- 5) on obtient alors Δh pour chaque trajet représentatif: $\Delta h = \frac{\Delta h(d_x)}{\left(1 - 0,8 e^{-\frac{d_x}{5 \times 10^4}}\right)}$ (m).

B.1.1 Calculs préparatoires

Définir le terminal d'émission comme $j = 1$ et le terminal de réception comme $j = 2$. Si un terminal est un terminal mobile, alors:

$$h_{ej} = h_{gj} \text{ (m)} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{b-7})$$

et, s'il s'agit d'un terminal fixe:

$$B_j = 10 \text{ (m)} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{b-8})$$

Auquel cas,

$$B'_j = (B_j - 1) \sin\left(\frac{\pi}{2} \min\left(\frac{h_{gj}}{5}, 1\right)\right) + 1 \quad (\text{b-9})$$

$B'_j = B_j$ if $h_{gj} \geq 5 \text{ m}$. La hauteur équivalente du j ème terminal, h_{ej} ($j = 1$ ou 2), est alors:

$$h_{ej} = h_{gj} + B'_j e^{-\frac{2h_{gj}}{\Delta h}} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{b-10})$$

Calculer les distances de l'horizon pour une Lune régulière, d_{lsj} :

$$d_{lsj} = \sqrt{2h_{ej} a_e} \quad \text{pour } j = 1, 2 \text{ (m)} \quad (\text{b-11})$$

La distance combinée de l'horizon radioélectrique de la Lune régulière, d_{ls} , la distance combinée de l'horizon radioélectrique du terrain irrégulier, d_l , et les angles d'élévation combinés de l'horizon radioélectrique du terrain irrégulier, θ_e , sont alors:

$$d_{ls} = d_{ls1} + d_{ls2} \quad (\text{b-12})$$

$$d_l = d_{l1} + d_{l2} \quad (\text{b-13})$$

$$\theta_e = \max(\theta_{e1} + \theta_{e2}, -d_l \gamma_e) \quad (\text{b-14})$$

⁵ Dans cette partie, les unités des angles, θ , sont des radians.

et $\Delta h(s)$, qui est fonction de la distance, s , est:

$$\Delta h(s) = \Delta h \left(1 - 0,8 e^{-\frac{s}{5 \times 10^4}} \right) \quad (\text{m}) \quad (\text{b-15})$$

B.1.2 Affaiblissement de référence

L'affaiblissement de référence, A_{ref} , est l'affaiblissement médian prévu par rapport à l'espace libre qui serait observé sur des trajets similaires. A_{ref} est la fonction par morceaux suivante de la distance horizontale du trajet, d :

$$A_{ref}(d) = \begin{cases} \max \left[0, A_{el} + K_1 d + K_2 \ln \left(\frac{d}{d_{ls}} \right) \right] & \text{pour } d \leq d_{ls} \\ A_{ed} + m_d d & \text{pour } d > d_{ls} \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (\text{b-16})$$

où A_{el} est défini dans l'équation (b-72), A_{ed} est défini dans l'équation (b-23), et les coefficients K_1 , K_2 , et m_d sont calculés dans les paragraphes suivants. La portée $d \leq d_{ls}$ est définie comme étant la distance en visibilité directe, et la portée $d \geq d_{ls}$ est définie comme étant la gamme de diffraction. Il convient de noter que A_{ref} est continu à $d = d_{ls}$.

B.1.3 Coefficients pour la gamme de diffraction

Les coefficients pour la gamme de diffraction sont calculés en évaluant l'affaiblissement de diffraction, $A_{diff}(d)$, à deux distances, d_3 et d_4 , qui sont au-delà de la visibilité directe. Calculer:

$$d_3 = \max(d_{ls}, d_l + 1,3787 X_{ae}) \quad (\text{b-17})$$

$$d_4 = d_3 + 2,7574 X_{ae} \quad (\text{b-18})$$

$$A_3 = A_{diff}(d_3) \quad (\text{b-19})$$

$$A_4 = A_{diff}(d_4) \quad (\text{b-20})$$

où:

$$X_{ae} = (k\gamma_e^2)^{-\frac{1}{3}} = a_e \left(\frac{2\pi a_e}{\lambda} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (\text{b-21})$$

et la fonction A_{diff} est définie par l'équation (b-24).

Les paramètres m_d et A_{ed} sont:

$$m_d = \frac{A_4 - A_3}{d_4 - d_3} \quad \left(\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right) \quad (\text{b-22})$$

$$A_{ed} = A_3 - m_d d_3 = \frac{A_3 d_4 - A_4 d_3}{d_4 - d_3} \quad (\text{dB}) \quad (\text{b-23})$$

B.1.4 Fonction d'affaiblissement dû à la diffraction

La fonction d'affaiblissement dû à la diffraction, $A_{diff}(s)$, est une combinaison pondérée de l'affaiblissement «par double arête en lame de couteau», $A_k(s)$, et de l'affaiblissement de diffraction «pour une Lune arrondie», $A_r(s)$:

$$A_{diff}(s) = (1 - w(s))A_k(s) + w(s)A_r(s) \quad (\text{dB}) \quad (\text{b-24})$$

$A_k(s)$ est défini dans l'équation (b-27), $A_r(s)$ est défini dans l'équation (b-37), et le facteur de pondération, $w(s)$, est défini comme suit:

$$w(s) = \frac{1}{1 + 0,1\sqrt{Q(s)}} \quad (\text{b-25})$$

où:

$$Q(s) = \min\left(\frac{\Delta h(s)}{\lambda}, 1000\right) \left[\sqrt{\frac{h_{e1}h_{e2}+C}{h_{g1}h_{g2}+C}} + \frac{d_l+a_e\theta_e}{s} \right] \quad (\text{b-26})$$

et $C = 0$.

L'affaiblissement de diffraction «par double arête en lame de couteau» médian pour les deux horizons radioélectriques lunaires irréguliers, $A_k(s)$, est:

$$A_k(s) = Fn(v_1(s)) + Fn(v_2(s)) \quad (\text{dB}) \quad (\text{b-27})$$

où:

$$\begin{aligned} Fn(z) &= -20 \log_{10} \left(\left| \frac{1}{\sqrt{2i}} \int_z^\infty e^{i\frac{\pi}{2}u^2} du \right| \right) \\ &= -20 \log_{10} \left(\left| \left[\frac{1+i}{2\sqrt{2i}} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} (1-i)z \right) \right] \right| \right) \\ &= -20 \log_{10} \left(\left| \left[\frac{1+i}{\sqrt{2i}} Q \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} (1-i)z \right) \right] \right| \right) \end{aligned} \quad (\text{b-28})$$

$$v_j(s) = \frac{\theta(s)}{2} \sqrt{\frac{2d_{lj}(s-d_l)}{\lambda(s-d_l+d_{lj})}} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{b-29})$$

et:

$$\theta(s) = \theta_e + s\gamma_e \quad (\text{b-30})$$

L'affaiblissement de diffraction «pour une Lune arrondie» est fondé sur une méthode des «trois rayons» appliquée à la solution du problème de diffraction sphérique régulière. Calculer γ_0 , γ_1 , et γ_2 comme suit:

$$\gamma_0 = \frac{\theta(s)}{s-d_l} \quad (\text{b-31})$$

$$\gamma_j = \frac{2h_{ej}}{d_{lj}^2} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{b-32})$$

Poser:

$$\alpha_j = \left(\frac{k}{\gamma_j} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{pour } j = 0, 1, 2 \quad (\text{b-33})$$

et:

$$K_j = \frac{1}{i\alpha_j z_g} \quad \text{pour } j = 0, 1, 2 \quad (\text{b-34})$$

Définir les distances sans dimension:

$$x_0 = AB(K_0) \alpha_0 \theta(s) + x_1 + x_2 \quad (\text{b-35})$$

et:

$$x_j = AB(K_j) \alpha_j \gamma_j d_{lj} \quad \text{pour } j = 1, 2 \quad (\text{b-36})$$

où $A = 63,798$. Notez que seulement x_0 dépend de s . L'affaiblissement de diffraction «pour une Lune arrondie», $A_r(s)$, est:

$$A_r(s) = G(x_0) - F(x_1, K_1) - F(x_2, K_2) - C_1(K_0) \quad (\text{dB}) \quad (\text{b-37})$$

où les fonctions $G(x)$, $F(x, K)$, $C_1(K)$ et $B(K)$ sont définies au § B.2.

B.1.5 Coefficients pour la portée en visibilité directe

Poser:

$$d_2 = d_{ls} \quad (b-38)$$

et:

$$A_2 = A_{ed} + m_d d_2 \quad (\text{dB}) \quad (b-39)$$

Il existe deux cas généraux, selon le signe de A_{ed} .

Cas 1: Si $A_{ed} \geq 0$, poser:

$$d_0 = \min\left(\frac{d_l}{2}, 1,908kh_{e1}h_{e2}\right) \quad (b-40)$$

$$d_1 = \frac{3}{4}d_0 + \frac{d_l}{4} \quad (b-41)$$

$$A_0 = A_{los}(d_0) \quad (\text{dB}) \quad (b-42)$$

$$A_1 = A_{los}(d_1) \quad (\text{dB}) \quad (b-43)$$

Calculer:

$$K'_2 = \max\left(0, \frac{(A_1 - A_0)(d_2 - d_0) - (A_2 - A_0)(d_1 - d_0)}{(d_2 - d_0) \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) - (d_1 - d_0) \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)}\right) \quad (b-44)$$

et:

$$K'_1 = \frac{A_2 - A_0 - K'_2 \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)}{d_2 - d_0} \quad (b-45)$$

Si $K'_1 \geq 0$, poser:

$$K_1 = K'_1 \quad (b-46)$$

$$K_2 = K'_2 \quad (b-47)$$

Cependant, si $K'_1 < 0$, poser:

$$K''_2 = \frac{A_2 - A_0}{\ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)} \quad (b-48)$$

Si $K''_2 \geq 0$, poser:

$$K_1 = 0 \quad (b-49)$$

$$K_2 = K''_2 \quad (b-50)$$

Cependant, si $K''_2 < 0$, poser:

$$K_1 = m_d \quad (b-51)$$

$$K_2 = 0 \quad (b-52)$$

Cas 2: Si $A_{ed} < 0$, poser:

$$d_0 = 1,908kh_{e1}h_{e2} \quad (b-53)$$

$$d_1 = \max\left(-\frac{A_{ed}}{m_d}, \frac{d_l}{4}\right) \quad (b-54)$$

Si $d_0 < d_1$, poser:

$$A_0 = A_{los}(d_0) \quad (\text{dB}) \quad (b-55)$$

$$A_1 = A_{los}(d_1) \quad (\text{dB}) \quad (b-56)$$

et:

$$K'_2 = \max\left(0, \frac{(A_1 - A_0)(d_2 - d_0) - (A_2 - A_0)(d_1 - d_0)}{(d_2 - d_0) \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) - (d_1 - d_0) \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)}\right) \quad (\text{b-57})$$

Si $K'_2 \neq 0$, calculer:

$$K'_1 = \frac{A_2 - A_0 - K'_2 \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)}{d_2 - d_0} \quad (\text{b-58})$$

Si $K'_1 \geq 0$, poser:

$$K_1 = K'_1 \quad (\text{b-59})$$

$$K_2 = K'_2 \quad (\text{b-60})$$

Si $K'_1 < 0$, poser:

$$K''_2 = \frac{A_2 - A_0}{\ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)} \quad (\text{b-61})$$

Si $K''_2 \geq 0$, alors:

$$K_1 = 0 \quad (\text{b-62})$$

$$K_2 = K''_2 \quad (\text{b-63})$$

Si $K''_2 < 0$, alors:

$$K_1 = m_d \quad (\text{b-64})$$

$$K_2 = 0 \quad (\text{b-65})$$

Si $d_0 \geq d_1$ ou $K'_2 = 0$, alors:

$$A_1 = A_{los}(d_1) \quad (\text{dB}) \quad (\text{b-66})$$

$$K''_1 = \frac{A_2 - A_1}{d_2 - d_1} \quad (\text{b-67})$$

Si $K''_1 > 0$, alors:

$$K_1 = K''_1 \quad (\text{b-68})$$

$$K_2 = 0 \quad (\text{b-69})$$

Sinon, poser:

$$K_1 = m_d \quad (\text{b-70})$$

$$K_2 = 0 \quad (\text{b-71})$$

Enfin, poser:

$$A_{el} = A_2 - K_1 d_2 \quad (\text{dB}) \quad (\text{b-72})$$

B.1.6 Fonction d'affaiblissement en visibilité directe

La fonction d'affaiblissement en visibilité directe, $A_{los}(s)$, est la combinaison pondérée de l'affaiblissement de la «portée de diffraction extrapolée/étendue», $A_d(s)$, et de l'affaiblissement «à deux rayons», $A_t(s)$:

$$A_{los}(s) = (1 - w)A_d(s) + wA_t(s) \quad (\text{dB}) \quad (\text{b-73})$$

$A_d(s)$ est défini dans l'équation (b-75), $A_t(s)$ est défini dans l'équation (b-82), et la fonction de pondération, w , est:

$$w = \frac{1}{1 + \frac{D_1 k \Delta h}{\max(D_2, d_{ls})}} \quad (\text{b-74})$$

où $D_1 = 47,7$ m, et $D_2 = 10$ km. L'affaiblissement de la «portée de diffraction étendue» est:

$$A_d(s) = A_{ed} + m_d s \quad (\text{b-75})$$

Pour l'affaiblissement «à deux rayons», poser:

$$\sin \psi(s) = \frac{h_{e1} + h_{e2}}{\sqrt{s^2 + (h_{e1} + h_{e2})^2}} \quad (\text{b-76})$$

et:

$$R'_e(s) = \frac{\sin \psi(s) - Z_g}{\sin \psi(s) + Z_g} e^{-k \sigma_h(s) \sin \psi(s)} \quad (\text{b-77})$$

où:

$$\sigma_h(s) = \frac{\Delta h(s)}{1.282} e^{-\frac{4\sqrt{\Delta h(s)}}{2}} \quad (\text{b-78})$$

Poser:

$$\delta'(s) = 2 \frac{k h_{e1} h_{e2}}{s} \quad (\text{b-79})$$

Le coefficient de réflexion équivalent, $R_e(s)$, est:

$$R_e(s) = \begin{cases} R'_e(s) & \text{pour } |R'_e(s)| \geq \max(0,5, \sqrt{\sin \psi(s)}) \\ \frac{R'_e(s)}{|R'_e(s)|} \sqrt{\sin \psi(s)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{b-80})$$

La différence de phase, $\delta(s)$, est:

$$\delta(s) = \begin{cases} \delta'(s) & \text{pour } \delta'(s) \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \frac{(\frac{\pi}{2})^2}{\delta'(s)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{b-81})$$

L'affaiblissement à «deux rayons», $A_t(s)$, est alors:

$$A_t(s) = -20 \log_{10} |1 + R_e(s) e^{i\delta(s)}| \quad (\text{dB}) \quad (\text{b-82})$$

B.1.7 Variabilité en fonction de l'emplacement

$A_{ref}(p)$, l'affaiblissement en espace libre qui n'est pas dépassé pour la fraction de profils de terrain équivalents, p ($0 < p < 1$), est calculé comme suit:

Calculer $\Delta h(d)$, σ , et z comme suit, où d est la longueur totale du trajet:

$$\Delta h(d) = \Delta h \left(1 - 0,8 e^{-\frac{d_x}{5 \times 10^4}} \right) \quad (\text{b-83})$$

$$\sigma = 10 k \frac{\Delta h(d)}{k \Delta h(d) + 13} \quad (\text{b-84})$$

$$z = Q^{-1}(p) \quad (\text{b-85})$$

où d est la longueur totale du trajet.

Alors:

$$A_{ref}(p) = A_{ref} + \sigma z \quad (\text{dB}) \quad (\text{b-86})$$

B.2 Fonctions $G(x)$, $F(x, K)$, $C_1(K)$, et $B(K)$

$$F(x, K) = \begin{cases} F_2(x, K), & \text{pour } 0 < x \leq 200 \\ G(x) + 0,013x e^{-\frac{x}{200}}[F_1(x) - G(x)], & \text{pour } 200 < x < 2\,000 \\ G(x), & \text{pour } x \geq 2\,000 \end{cases} \quad (\text{b-87})$$

où:

$$G(x) = 0,05751 x - 10 \log_{10} x \quad (\text{b-88})$$

$$F_1(x) = 40 \log_{10}(\max(x, 1)) - 117 \quad (\text{b-89})$$

$$F_2(x, K) = \begin{cases} F_1(x) & \text{pour } |K| < 10^{-5} \text{ ou } x (-\log_{10}|K|)^3 > 450 \\ 2,5 x \frac{10^{-5}x^2}{|K|} + 20 \log_{10}(|K|) - 15 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{b-90})$$

$$C_1(K) = 20 \quad (\text{b-91})$$

$$B(K) = 1,607 - |K| \quad (\text{b-92})$$

PARTIE C

Caractéristiques électriques de la surface de la Lune**C.1 Permittivité relative complexe du régolite****C.1.1 Paramètres d'entrée de la permittivité relative complexe du régolite**

La permittivité relative complexe du régolite nécessite les paramètres suivants:

- Profondeur du régolite
- Teneur du régolite en dioxyde de titane (TiO₂) et en oxyde ferreux (FeO)
- Densité apparente du régolite (densité relative, porosité, taux de vide)
- Température du régolite
- Fréquence radioélectrique

C.1.2 Profondeur du régolite

La profondeur du régolite, d , est calculée comme suit:

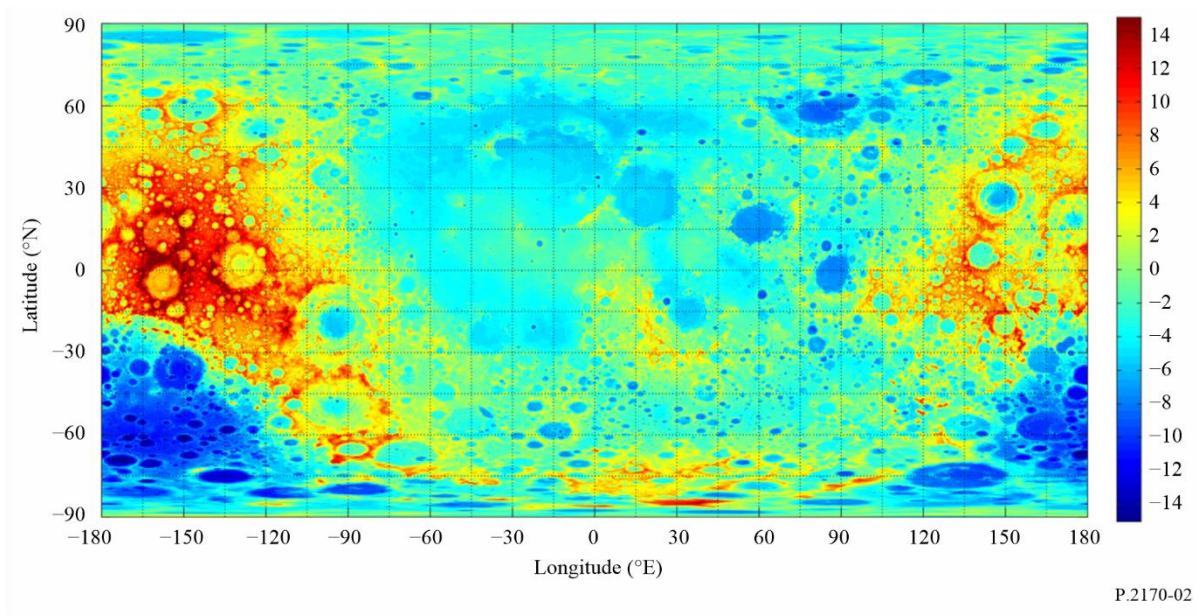
$$d = 9,5 + 8,5 \tanh\left(\frac{H+1200}{1632,5}\right) \quad (\text{m}) \quad (\text{c-1})$$

où H est l'altitude en mètres. À titre de référence, l'altitude numérisée de la surface lunaire est représentée dans la Fig. 2. Des cartes numériques de l'altitude de la Lune avec différentes projections, résolutions et différents formats sont disponibles à l'adresse suivante:

https://imbrium.mit.edu/DATA/LOLA_GDR/

La latitude et la longitude lunaires sont définies dans le système de coordonnées sélénographiques Terre moyenne/axe polaire (ME). L'axe Z de la Lune est l'axe de rotation moyen de la Lune, et l'axe +Z pointe vers le pôle Nord de la Lune; l'équateur lunaire, défini par le plan XY, est perpendiculaire à l'axe Z et coupe l'axe Z au centre de masse de la Lune; le méridien d'origine de la Lune, défini par l'axe X, pointe dans la direction moyenne de la Terre vue de la Lune (c'est-à-dire le point moyen sub-Terre à la surface de la Lune); et l'axe des Y complète le système de coordonnées droit.

FIGURE 2
Carte d'altitude de la surface lunaire (km)



C.1.3 Teneur en minéraux

La permittivité du régolite lunaire est fonction des pourcentages de dioxyde de titane (TiO_2) et d'oxyde ferreux (FeO). À titre de référence, les pourcentages lunaires de FeO et TiO_2 entre 60° N et 60° S sont indiqués dans les Fig. 3 et 4. Des cartes à haute résolution indiquant les teneurs en FeO et en TiO_2 sont disponibles aux adresses <https://zenodo.org/records/7263426> et <https://zenodo.org/records/7264329>, respectivement.

FIGURE 3
Carte de la teneur en FeO de la Lune entre les latitudes 60° N et 60° S

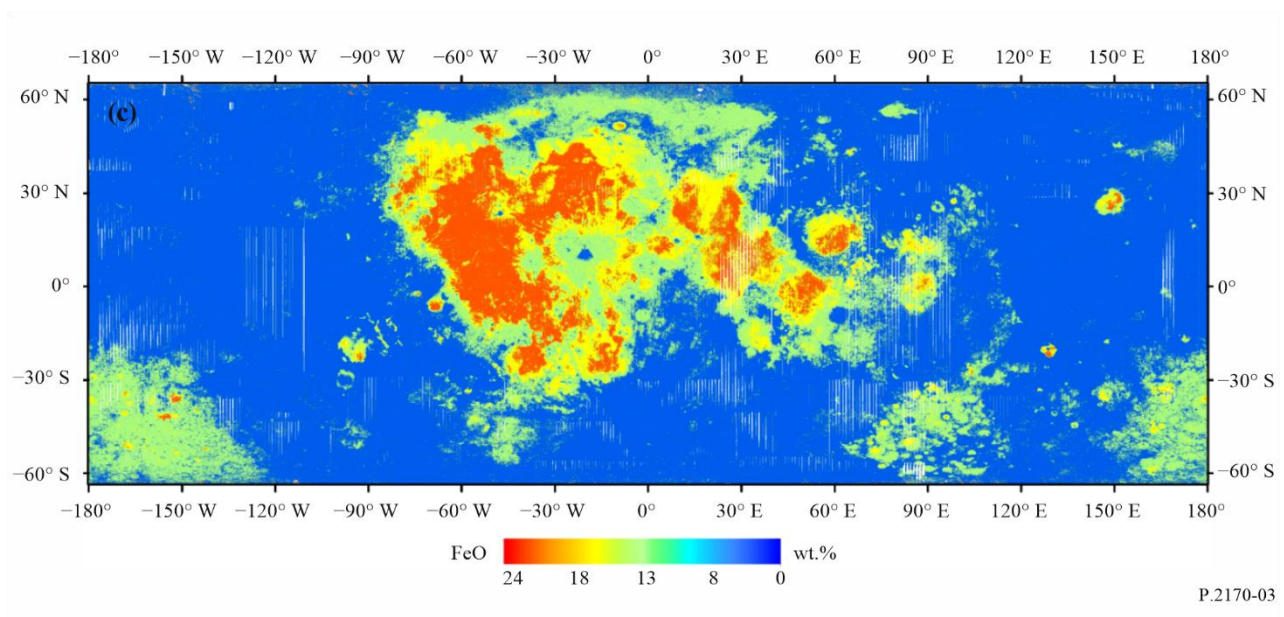
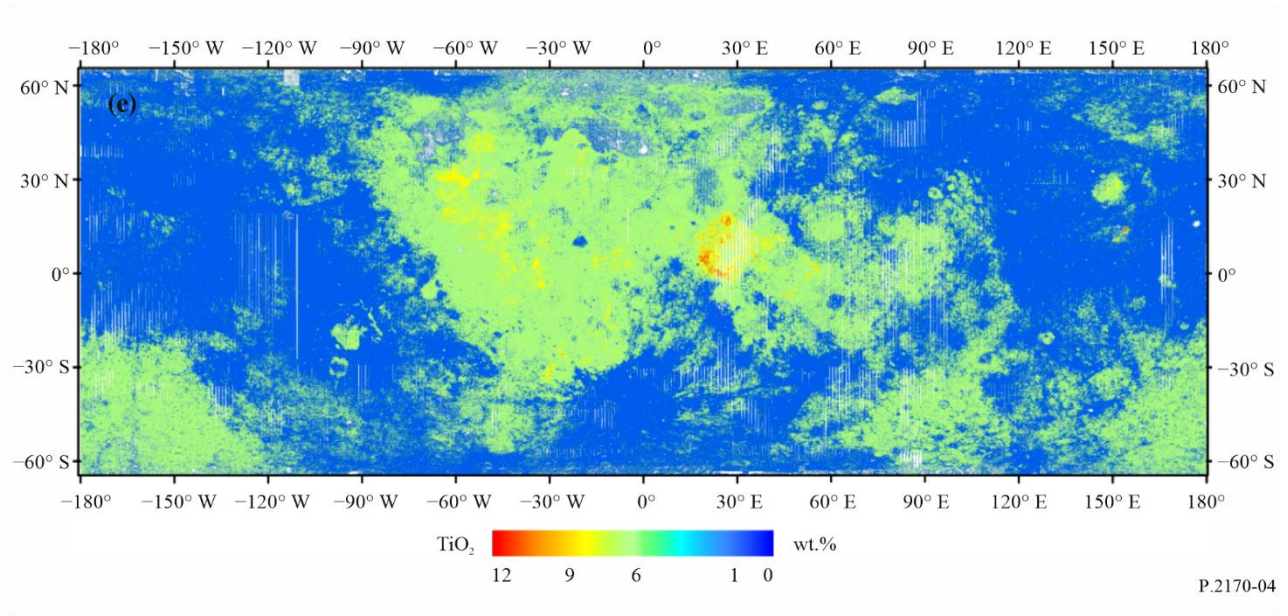


FIGURE 4

Carte de la teneur en TiO_2 de la Lune entre les latitudes 60° N et 60° S 

C.1.4 Densité apparente

La densité apparente, ρ , d'un matériau est la masse du matériau contenue dans un volume donné, généralement exprimée en grammes par centimètre cube (g/cm^3). La porosité et la densité relative sont d'autres paramètres liés à la densité apparente. La porosité, ϕ , est définie comme le volume de vide entre les particules divisé par le volume total. La densité relative, G , d'une particule de sol est le rapport de sa masse à la masse d'un volume égal d'eau à 4°C . De nombreux sols lunaires ont une densité relative de 2,7; c'est-à-dire que la densité des particules individuelles est de $2,7 \text{ g/cm}^3$, soit 2,7 fois celle de l'eau ρ_w (1 g/cm^3). La fraction volumique, V , est le rapport entre le volume de particules de sol et le volume total. La densité apparente, la porosité, la densité relative et la fraction volumique sont interdépendantes comme suit:

$$\rho_{reg} = G \rho_w (1 - \phi) \quad (\text{c-2})$$

$$V = 1 - \phi \quad (\text{c-3})$$

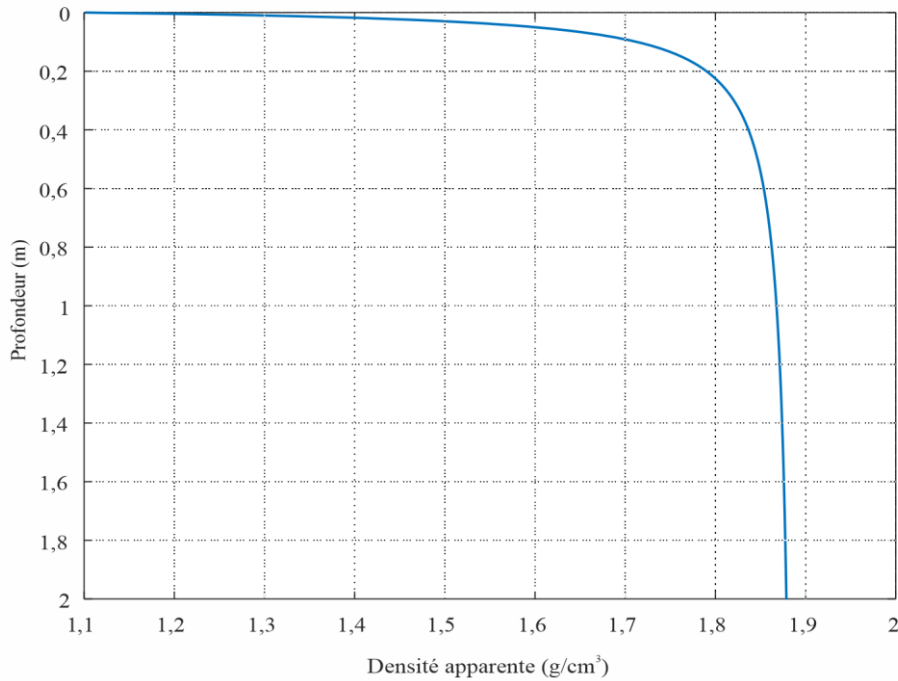
La densité apparente du régolite, $\rho_{reg}(z)$, varie en fonction de la profondeur du régolite, z (m) comme suit:

$$\rho_{reg}(z) = 1,890 \frac{0,0169 - z}{0,0290 - z}, \quad \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad (\text{c-4})$$

où le signe moins sur l'axe de la profondeur n'apparaît pas. La Figure 5 montre la tendance de la densité apparente en fonction de la profondeur du régolite.

FIGURE 5

Tendance de la densité apparente en fonction de la profondeur du régolite



P.2170-05

C.1.5 Température

La température du régolite lunaire varie avec la latitude et la longitude lunaires, ainsi qu'avec le temps lunaire. Toutefois, la permittivité relative complexe du régolite lunaire est indépendante de la température aux fréquences comprises entre 1 MHz et 37 GHz.

C.1.6 Permittivité relative complexe du régolite aux fréquences comprises entre 1 MHz et 37 GHz

Aux fréquences comprises entre 1 MHz et 37 GHz, la permittivité relative complexe du régolite, ϵ_{reg} , est:

$$\epsilon_{reg} = \epsilon'_{reg} - i \epsilon''_{reg} = \epsilon'_{reg} - i \epsilon'_{reg} \tan \delta \quad (c-5)$$

La partie réelle de la permittivité relative complexe du régolite, ϵ'_{reg} , est fonction de la densité apparente, ρ_{reg} , et est indépendante de la fréquence et de la température:

$$\epsilon'_{reg} = 1,919 \rho_{reg} \quad (c-6)$$

Le facteur de dissipation, $\tan \delta_{reg}$, est fonction de la fréquence (GHz), de la densité apparente et des pourcentages de TiO_2 et de FeO :

$$\tan \delta_{reg} = 10^{\{(a_1 f_{\text{GHz}} + a_2) \rho_{reg} + b_1 S - b_2\}} \quad (c-7)$$

où les coefficients a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , et S sont les suivants:

$$a_1 = 0,0272 \text{ GHz}^{-1}$$

$$a_2 = 0,2967$$

$$b_1 = 0,027$$

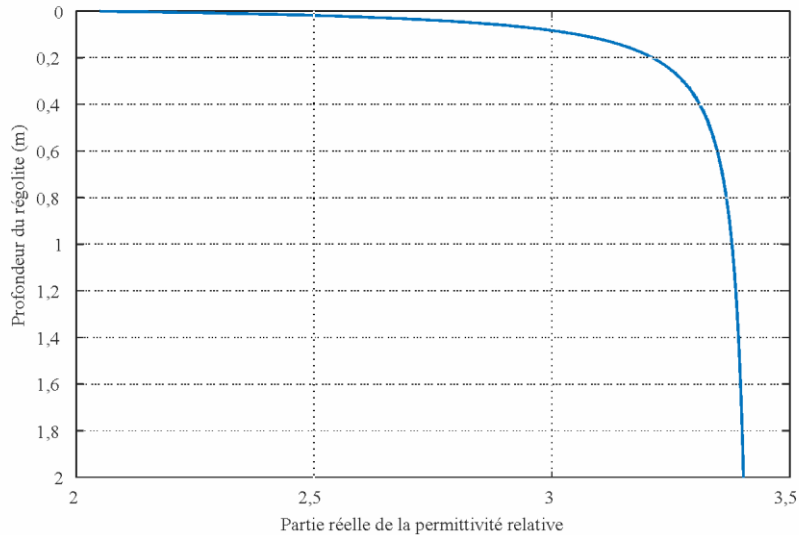
$$b_2 = 3,058$$

$$S = \% \text{TiO}_2 + \% \text{FeO}.$$

Comme la densité, ρ , est fonction de l'épaisseur du régolite (voir l'équation (c-1)), la permittivité relative complexe du régolite est également fonction de la profondeur du régolite. Les Figures 6 et 7 donnent des exemples de la partie réelle de la permittivité relative complexe et du facteur de dissipation en fonction de la profondeur du régolite pour des teneurs de TiO_2 et de FeO de 4% et 15%, respectivement, et une épaisseur type du régolite de 2 m.

FIGURE 6

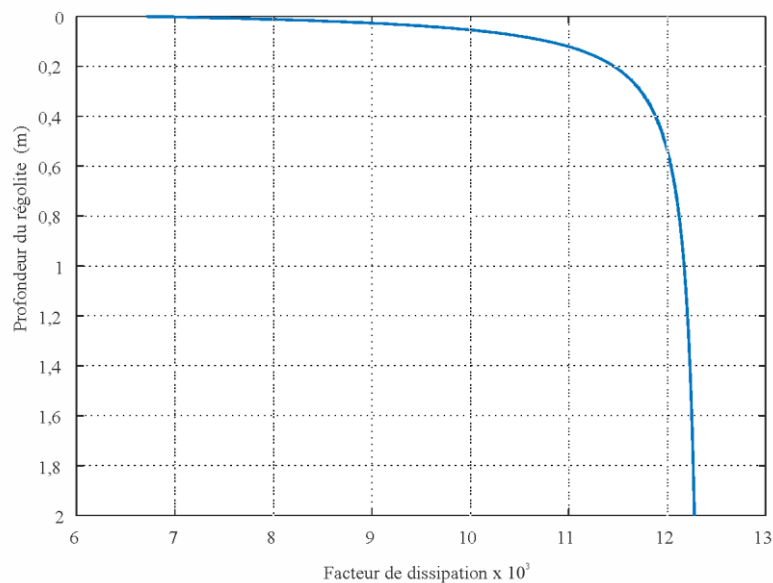
Partie réelle de la permittivité du régolite pour les fréquences supérieures à 1 MHz en fonction de la profondeur du régolite ($d = 2$ m)



P.2170-06

FIGURE 7

Facteur de dissipation du régolite à 1,5 GHz en fonction de la profondeur du régolite ($\text{TiO}_2 = 4\%$ et $\text{FeO} = 15\%$, $d = 2$ m)



P.2170-07

C.2 Permittivité relative complexe de la roche lunaire

Comme pour la permittivité relative complexe du régolite, la permittivité relative complexe de la roche lunaire ϵ_{rock} est:

$$\epsilon_{rock} = \epsilon'_{rock} - i \epsilon'_{rock} \tan \delta_{rock} \quad (c-8)$$

Comme pour la permittivité relative complexe du régolite, la partie réelle de la permittivité complexe de la roche lunaire est:

$$\epsilon'_{rock} = 1,919 \rho_{rock} \quad (c-9)$$

Bien qu'il n'existe pas de modèle empirique ou théorique actuel de la densité de roche lunaire, les densités typiques de roche se situent entre 2 et 3,3 g cm⁻³, auquel cas ϵ'_{rock} varie entre 3,6826 et 8,5931.

Le facteur de dissipation, $\tan \delta_{rock}$, est fonction de la fréquence (GHz), de la densité apparente, des pourcentages de TiO₂ et FeO, de la conductivité continue, σ_{rock} , et de la partie réelle de la permittivité relative complexe de la roche lunaire, comme suit:

$$\tan \delta_{rock} = 10^{\{(a_1 f_{GHz} + a_2) \rho_{rock} + b_1 S - b_2\}} + \frac{17,984 \sigma_{rock}}{\epsilon'_{rock} f_{GHz}} \quad (c-10)$$

où:

$$\sigma_{rock} = 3 \times 10^{-14} e^{0,0230T}, \frac{\text{mho}}{\text{m}} \quad (c-11)$$

et les coefficients a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , et c sont:

$$a_1 = 0,0086 \text{ GHz}^{-1}$$

$$a_2 = 0,1833$$

$$b_1 = 0,038$$

$$b_2 = 3,26$$

$$S = 11\%$$

C.3 Perméabilité relative complexe du régolite lunaire

Les parties réelle et imaginaire de la perméabilité magnétique du régolite lunaire aux fréquences supérieures à 300 MHz sont:

$$\mu'_r = 1 \quad (c-12)$$

$$\mu''_r = 0 \quad (c-13)$$

C.4 Permittivité relative complexe du mélange de régolite et de roche

Lorsqu'il y a un mélange de roche et de régolite, en traitant les particules de roche comme des particules sphériques, la permittivité relative complexe équivalente du mélange, $\epsilon_{mixture}$, est:

$$\epsilon_{mixture} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (c-14)$$

où:

$$A = 2 \quad (c-15)$$

$$B = -2(1 - V_{rock})\epsilon_{reg} + (1 - 3V_{rock})\epsilon_{rock} \quad (c-16)$$

$$C = -\epsilon_{reg}\epsilon_{rock} \quad (c-17)$$

et V_{rock} est la fraction volumique de la roche. En l'absence de données locales, on peut supposer que $V_{rock} = 0$, auquel cas $\varepsilon_{mixed} = \varepsilon_{reg}$.

PARTIE D

Prévision d'autres affaiblissements de propagation

D.1 Affaiblissement de propagation en espace libre

Il est recommandé d'utiliser l'affaiblissement de propagation en espace libre spécifié au § 2.3 de la Recommandation UIT-R P.525 entre: a) les systèmes à la surface de la Lune ou à proximité de cette surface et les systèmes en orbite lunaire; b) les systèmes à la surface de la Lune ou à proximité de cette surface et les systèmes en orbite autour de la Terre; et c) les systèmes en orbite lunaire et les systèmes en orbite autour de la Terre, où le trajet en visibilité directe n'est pas obstrué et où il n'y a pas de réflexion.

D.2 Affaiblissement de propagation tenant compte de l'atmosphère terrestre

L'affaiblissement de propagation entre: a) les systèmes à la surface de la Lune ou à proximité de cette surface ou en orbite lunaire; et b) les systèmes à la surface de la Terre ou à proximité de cette surface ou en orbite terrestre, lorsque le trajet en visibilité directe n'est pas obstrué et qu'il n'y a pas de réflexion, doit être calculé comme étant la somme de a) l'affaiblissement de propagation en espace libre spécifié au § 2.3 de la Recommandation UIT-R P.525, et b) des affaiblissements de propagation atmosphérique applicables spécifiés au § 2 de la Recommandation UIT-R P. 618.
