

Recommandation UIT-R RS.2042-2

(12/2023)

Série RS: Systèmes de télédétection

**Caractéristiques techniques et
opérationnelles types des systèmes de
sondage radar spatioportés utilisant la
bande 40-50 MHz**

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 <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre 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

(Egalement 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	Systemes 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	Emissions 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, 2024

© UIT 2024

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 RS.2042-2

Caractéristiques techniques et opérationnelles types des systèmes de sondage radar spatioportés utilisant la bande 40-50 MHz

(2014-2018-2023)

Domaine d'application

La présente Recommandation donne les caractéristiques techniques et opérationnelles des sondeurs radar spatioportés qui fonctionneraient dans la gamme de fréquences 40-50 MHz. Ces informations sont destinées à être utilisées pour les études de compatibilité.

Mots clés

Service d'exploration de la Terre par satellite (active), capteur actif spatioporté, sondeur radar, surface du lit glaciaire, couches diffusantes de la subsurface, aquifères fossiles sur Terre dans des environnements désertiques, radar SHARAD (Shallow Radar Sounder).

Recommandations et Rapports de l'UIT-R connexes

Rapport UIT-R M.2234 – Possibilités de partage de certaines sous-bandes entre les radars océanographiques fonctionnant dans le service de radiolocalisation et les services fixe et mobile dans la bande de fréquences 3-50 MHz

Rapport UIT-R RS2536 – Études de partage et de compatibilité concernant les sondeurs radar spatioportés dans la bande de fréquences 40-50 MHz

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les sondeurs radar spatioportés permettent d'établir des cartes radar des couches diffusantes de la subsurface afin de localiser de l'eau/de la glace/des gisements grâce à la télédétection spatiale active;
- b) que les objectifs scientifiques des missions sont les suivants: 1) comprendre l'épaisseur globale, la structure interne et la stabilité thermique des inlandsis que l'on trouve sur Terre (par exemple au Groenland ou en Antarctique), qui sont des paramètres observables de l'évolution du climat sur Terre, et 2) comprendre la formation, la répartition et l'évolution des aquifères fossiles sur Terre dans des environnements désertiques (par exemple en Afrique du Nord et dans la péninsule arabique), qui sont des éléments essentiels pour comprendre les changements paléoclimatiques récents;
- c) qu'il est nécessaire de mesurer la réflectivité des couches diffusantes de la subsurface à des profondeurs comprises entre 10 et 100 m pour les aquifères et les conduits d'eau souterraine peu profonds, et de l'ordre de 5 km pour la topographie de l'interface basale et l'épaisseur des nappes glaciaires;
- d) que la profondeur de pénétration à partir des couches diffusantes de la subsurface à des longueurs d'onde correspondant aux hyperfréquences augmente approximativement de manière inversement proportionnelle à la fréquence;
- e) que, partout dans le monde, les mesures périodiques des nappes d'eau/dépôts de glace souterrains nécessitent l'utilisation de capteurs actifs spatioportés;
- f) qu'il est préférable d'utiliser la gamme de fréquences 40-50 MHz pour satisfaire à toutes les exigences des sondeurs radar spatioportés;

- g) que la bande 40-50 MHz est attribuée au service fixe, au service mobile et au service de radiodiffusion à titre primaire;
- h) que le service de recherche spatiale utilise la bande 40,98-41,015 MHz dans le cadre d'une attribution à titre secondaire;
- i) que des renvois relatifs à des pays du Tableau d'attribution des bandes de fréquences pour la gamme de fréquences 40-50 MHz prévoient des attributions à titre primaire ou secondaire aux services de radiodiffusion, fixe, mobile, de radionavigation aéronautique et de radiolocalisation dans certaines régions du monde;
- j) que le Tableau d'attribution des bandes de fréquences pour les bandes de fréquences adjacentes à la gamme des 40-50 MHz contient des attributions à titre primaire et secondaire au service d'amateur;
- k) que l'exploitation d'un sondeur radar spatioporté en dehors des attributions au service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) (active) devrait être conforme au numéro 4.4 du RR;
- l) qu'une largeur de bande de 10 MHz est suffisante pour les sondeurs radar spatioportés;
- m) que des restrictions d'exploitation ont été identifiées et sont décrites dans l'Annexe 1,
recommande

que les caractéristiques données dans le Tableau 1 de l'Annexe soient utilisées pour les études de compatibilité relatives aux sondeurs radar spatioportés dans la gamme de fréquences des 40-50 MHz.

Annexe

Caractéristiques techniques et opérationnelles types des systèmes de sondage radar spatioportés utilisant la bande 40-50 MHz

1 Introduction

Les climatologues s'intéressent à la télédétection au voisinage de 40-50 MHz afin d'effectuer des mesures à distance sous la surface de la Terre pour établir des cartes radar des couches diffusantes de la subsurface, l'objectif étant d'utiliser des capteurs actifs spatioportés pour localiser de l'eau/de la glace/des gisements et pour examiner la subsurface du lit glaciaire . La présente Annexe justifie le choix de la bande de fréquences à utiliser et donne des caractéristiques techniques et opérationnelles types.

On trouvera ci-après la description des caractéristiques techniques et opérationnelles des capteurs actifs spatioportés fonctionnant entre 40 et 50 MHz.

2 Justification du choix de la bande de fréquences

Le choix d'une attribution entre 40 MHz et 50 MHz pour un radar de sondage spatioporté repose sur les critères de sélection suivants: pénétration dans la surface, échelle de longueur d'observation, zone de validité du modèle de diffusion électromagnétique et travaux déjà réalisés.

2.1 Pénétration dans la surface

Normalement, la pénétration d'une onde radar incidente correspond à plusieurs dizaines de fois la longueur d'onde. Lorsque la longueur d'onde et la composition du milieu de diffusion sont propices, les ondes radioélectriques peuvent facilement pénétrer dans les matériaux diélectriques qui composent la surface et la couverture terrestres. On peut réaliser une estimation quantitative de cette profondeur δ_p comme suit:

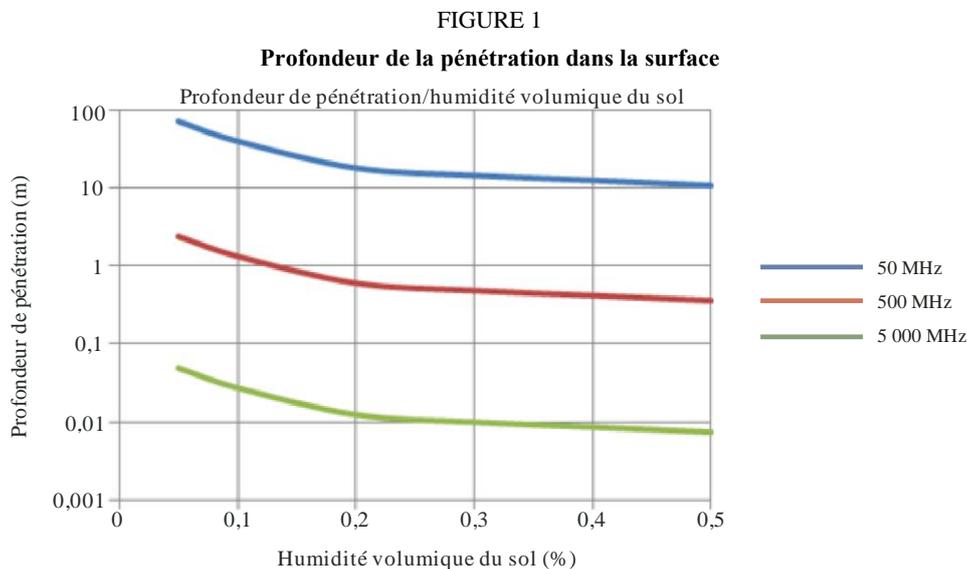
$$\delta_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{e'}}{2\pi e''} \quad (1)$$

où:

λ_0 : longueur d'onde

e' et e'' : parties réelle et imaginaire de la constante diélectrique de la surface.

Cette formule est utilisée avec les constantes diélectriques du sol et la Fig. 1 montre la profondeur de pénétration dans la surface à 50 MHz, à 500 MHz et à 5 000 MHz. Cette Figure fait apparaître que la pénétration dans la surface est de 20 à 30 fois plus profonde à 50 MHz qu'à 500 MHz et qu'il est donc souhaitable d'utiliser une fréquence de 50 MHz pour les études relatives à la pénétration dans la Terre. L'objectif serait d'établir des cartes radar des couches diffusantes de la subsurface en vue de localiser de l'eau/de la glace/des gisements en utilisant des capteurs actifs spatioportés.



RS.2042-01

2.2 Échelle de longueur des observations

L'ajout d'une attribution à 50 MHz en plus des attributions à 435 MHz et à 1 250 MHz existantes permettrait d'étendre l'intervalle des échelles de longueur auxquelles la rugosité de la surface est observée. Pour de nombreuses surfaces géologiques, la rétrodiffusion est due principalement à la composante harmonique de la surface dont la longueur d'onde est proche de la longueur d'onde projetée par le radar ou supérieure, tandis que les autres composantes de la surface n'y contribuent que par des effets d'importance secondaire. Par conséquent, la réalisation de mesures radar à un nombre de fréquences aussi grand que possible pour des angles d'incidence aussi nombreux que possible accroît la possibilité de décrire précisément la surface.

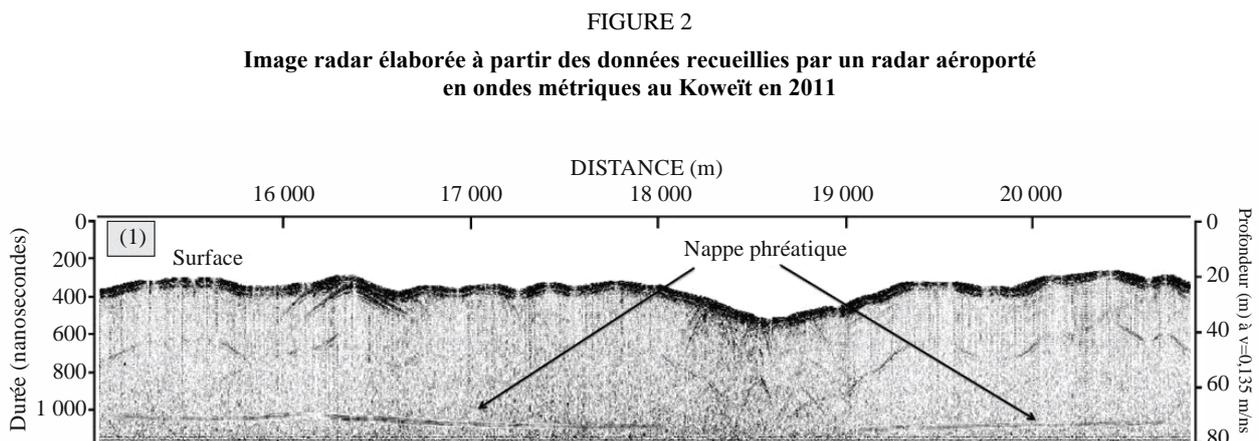
2.3 Zone de validité du modèle de diffusion électromagnétique

L'ajout d'une attribution à 50 MHz en plus des attributions à 435 MHz et à 1 250 MHz existantes permettrait d'étendre la zone de validité des modèles de diffusion électromagnétique. Un radar qui fonctionne à 50 MHz est plus sensible à la morphologie de la subsurface, car la hauteur quadratique moyenne de la surface correspond à une plus petite fraction de la longueur d'onde, ce qui se traduit par une rétrodiffusion radar mesurée plus faible. Le fait que les radars fonctionnant à 50 MHz soient plus sensibles à la morphologie de la subsurface, associé au fait que les signaux à 50 MHz pénètrent plus profondément dans le sol font que le volume en subsurface dans lequel la diffusion intervient est plus important, ce qui se traduit par un rapport puissance reçue depuis la subsurface/puissance reçue depuis la surface beaucoup plus élevé qu'à des longueurs d'onde plus courtes. Par ailleurs, les éléments diffuseurs contenus dans le couvert alluvial seront plus petits à 50 MHz qu'à 435 MHz ou à 1 250 MHz.

2.4 Travaux déjà réalisés et statut réglementaire dans la bande 40-44 MHz

D'importants travaux ont déjà été réalisés pour les fréquences comprises entre 3 et 50 MHz et ont consisté à mettre au point des systèmes de radars au sol et aéroportés et à collecter des données. Outre la mise au point de matériel, des travaux de calculs ont été menés en vue d'étudier la profondeur de pénétration dans la surface en fonction de l'humidité du sol entre 3 et 50 MHz et à analyser les mesures de l'écho renvoyé par les océans effectuées par des radars océanographiques.

Des mesures ont été faites avec des radars aéroportés au voisinage de 50 MHz dans les zones désertiques de la péninsule arabique et de l'Antarctique. La Figure 2 est une image radar des variations de la profondeur de la nappe phréatique (de 49 à 52 mètres) élaborée à partir des données recueillies par un radar aéroporté en ondes métriques au Koweït en 2011.



RS.2042-02

Au titre du point 1.15 de l'ordre du jour de la CMR-12, on a étudié les possibilités d'utilisation de la gamme 3-50 MHz par les radars océanographiques le long des côtes (dans le service de radiolocalisation) et les études de partage correspondantes ont été consignées dans le Rapport UIT-R M.2234. La CMR-12 a décidé de faire des attributions à titre primaire et secondaire au service de radiolocalisation au niveau régional et dans certains pays, moyennant l'adoption de renvois portant sur des bandes entre 4 et 44 MHz (la bande 43,35-44 MHz étant la plus élevée attribuée au service de radiolocalisation au titre d'un renvoi relatif à des pays (deux pays)) et de renvois destinés à protéger les services fixe et mobile ayant déjà des attributions dans ces bandes. Les applications du service de radiolocalisation se limitent aux radars océanographiques exploités

conformément à la Résolution **612 (Rév.CMR-12)**. Cette Résolution contient en outre d'autres restrictions applicables aux radars océanographiques, comme l'obligation de ne pas dépasser une p.i.r.e. de 25 dBW et d'émettre une identification de station (indicatif d'appel) sur la fréquence assignée. Le Règlement des radiocommunications ne contient aucune attribution au service d'exploration de la Terre par satellite (active) dans la gamme 3-50 MHz. Si les fréquences choisies pour le système spatioporté se situaient dans des bandes au-dessus ou au-dessous de cette gamme, il faudrait de nouveau effectuer le travail de conception de matériel et de calcul pour les campagnes de cartographie par radar aéroporté dans les zones désertiques.

3 Caractéristiques techniques d'un radar de sondage spatioporté fonctionnant entre 40 et 50 MHz

Le radar de sondage spatioporté fonctionnera à une fréquence centrale de 45 MHz avec une largeur de bande de 10 MHz. Les données qu'il aura recueillies serviront à étudier la subsurface de la Terre grâce à une cartographie radar des couches diffusantes de la subsurface pour localiser de l'eau/de la glace/des gisements. Les caractéristiques d'un radar de sondage spatioporté fonctionnant à 45 MHz figurent dans le Tableau 1.

3.1 Objectifs des missions

Un capteur actif spatioporté fonctionnant dans la gamme 40-50 MHz produira des données relatives à la subsurface avec une résolution verticale comprise entre 5 et 7 m et aura un rapport signal/bruit de 66 dB environ. Les objectifs scientifiques des missions sont les suivants:

- 1) comprendre l'épaisseur globale, la structure interne et la stabilité thermique des inlandsis que l'on trouve sur Terre (par exemple au Groenland ou en Antarctique), qui sont des paramètres observables de l'évolution du climat sur Terre; et
- 2) comprendre la formation, la répartition et l'évolution des aquifères fossiles sur Terre dans des environnements désertiques (par exemple en Afrique du Nord et dans la péninsule arabique), qui sont des éléments essentiels pour comprendre les changements paléoclimatiques récents.

Il convient de noter que, compte tenu du montant élevé des investissements associés à ce type d'observations par des capteurs dans la bande 40-50 MHz, les missions simultanées de sondage radar spatioporté devraient être très peu nombreuses.

3.2 Paramètres orbitaux

Les capteurs actifs spatioportés de ce type devraient être déployés à bord d'un satellite en orbite terrestre basse, avec une inclinaison optimisée pour une orbite héliosynchrone et une excentricité inférieure à 0,001. On trouvera les paramètres orbitaux du système proposé dans le Tableau 1.

3.3 Paramètres de conception

Le système proposé pour le radar de sondage en orbite terrestre est une version terrestre améliorée du radar SHARAD (Shallow Radar Sounder), qui était un radar de sondage en orbite autour de Mars fonctionnant dans la gamme de fréquences 15-25 MHz. Le radar de sondage spatioporté émet une impulsion modulée en fréquence centrée à 45 MHz d'une largeur de bande de 10 MHz à une fréquence de répétition de l'impulsion de 1 200 Hz. Chaque impulsion a une durée de 85 μ s. La puissance radioélectrique de crête est de 100 W et le radar émet un signal à polarisation circulaire. Ces paramètres de conception sont présentés dans le Tableau 1.

TABLEAU 1

Caractéristiques des radars de sondage spatioportés fonctionnant dans la gamme de fréquences 40-50 MHz

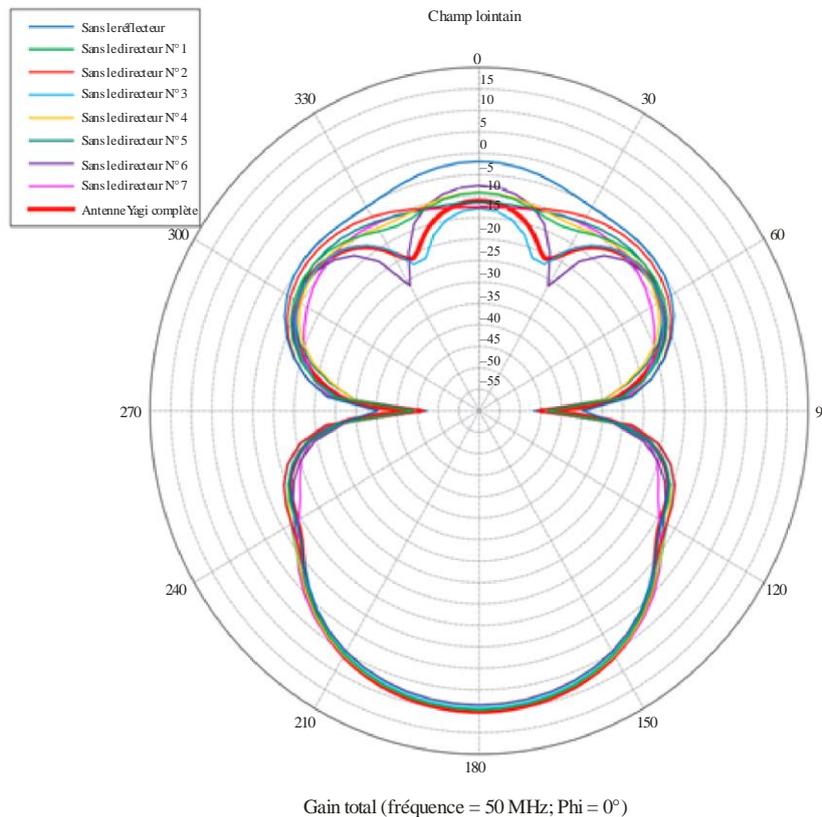
Caractéristiques du radar	
Paramètre	Valeur
Type	Radar de sondage
Caractéristiques de l'orbite	
Type d'orbite	Circulaire, héliosynchrone
Altitude (km)	400 km
Inclinaison (degrés)	97
Heure solaire locale du nœud ascendant	04 h 00
Excentricité (degrés)	0
Orbites par jour	15,8
Période de répétition (jours)	548
Caractéristiques de l'antenne	
Type d'antenne	Yagi croisée à 9 éléments
Nombre de faisceaux	1
Gain de crête de l'antenne (émission et réception – dBi)	10
Polarisation	Circulaire
Ouverture de faisceau à –3 dB (degrés)	40
Angle de visée du faisceau d'antenne (degrés)	Nadir
Angle d'azimut du faisceau d'antenne (degrés)	Nadir
Ouverture de faisceau d'antenne en élévation (degrés)	40
Ouverture du faisceau d'antenne en azimut (degrés)	40
Diagramme d'antenne du capteur	Voir la Fig. 3
Caractéristiques de l'émetteur	
Fréquence centrale RF (MHz)	45
Largeur de bande RF à 3 dB (MHz)	8
Largeur de bande RF à 20 dB (MHz)	10
Puissance de crête à l'émission (dBW)	20
Largeur de l'impulsion (µs)	85
Fréquence de répétition des impulsions (Hz)	1 200
Modulation des impulsions	MF linéaire
Caractéristiques du récepteur	
Fréquence centrale RF (MHz)	45
Gain (dB)	40-50

TABLEAU 1 (fin)

Caractéristiques du radar	
Rapport signal/bruit (dB)	30
Largeur de bande de l'amplificateur à faible bruit (MHz)	>100
Largeur de bande du dernier filtre FI (MHz)	12
Facteur de bruit (dB)	5
Niveau minimal de détection du signal (dBm)	-132
Plage dynamique (dB)	<20

Le diagramme d'antenne du système proposé a un gain de crête de 10 dBi et une ouverture de faisceau de 40 degrés en élévation et en azimut (voir la Fig. 3).

FIGURE 3
Diagramme de l'antenne Yagi croisée à neuf éléments

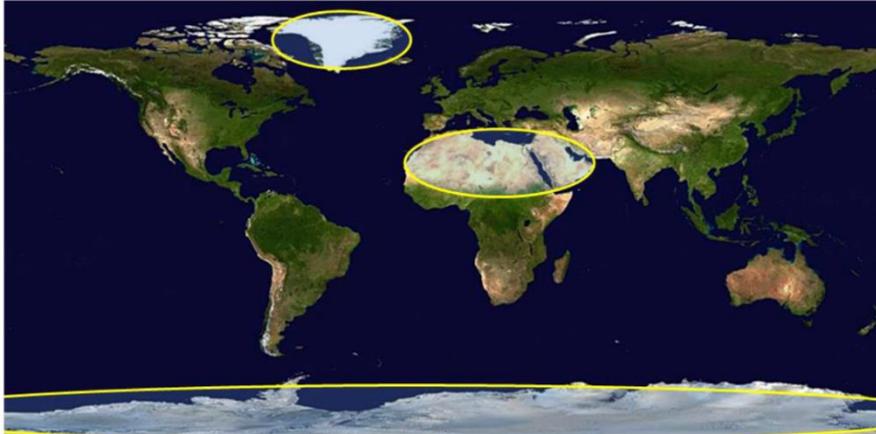


3.4 Restrictions d'exploitation sur le plan géographique

Les radars de sondage fonctionnant dans la gamme de fréquences 40-50 MHz sont conçus en vue d'être exploités dans des zones inhabitées ou peu peuplées de l'inlandsis (par exemple au Groenland et en Antarctique) et dans des déserts (par exemple en Afrique du Nord et dans la péninsule arabique), et pendant une durée limitée. Par exemple, l'exploitation pour la mission proposée ne devrait pas dépasser 10 minutes par orbite de 92,7 minutes.

Les zones de couverture des régions d'exploitation proposées correspondant aux zones géographiques de propagation du signal transmis sont illustrées sur la Fig. 4.

FIGURE 4
Couverture du radar de sondage spatioporté



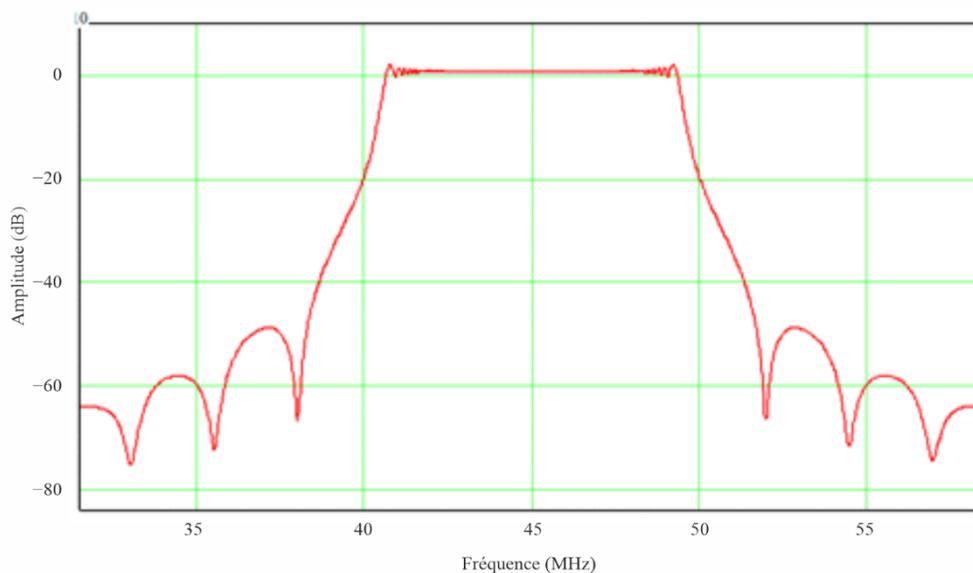
RS.2042-04

Les radars de sondage sont conçus en vue d'être exploités la nuit uniquement pendant une fenêtre de quelques heures centrée approximativement autour de 4 h 00, heure locale. Ce choix tient au fait que c'est la période où les perturbations ionosphériques du signal radar sont les plus minimales et où l'utilisation du spectre par d'autres services devrait être la plus faible.

3.5 Spectre des émissions

La Figure 5 montre la forme d'onde d'émission à compression d'impulsion qui devrait être celle du sondeur radar fonctionnant dans la gamme de fréquences 40-50 MHz. Dans la pratique, un filtrage passe-bande est souvent appliqué pour atténuer la puissance hors bande.

FIGURE 5
Spectre d'émission à compression d'impulsion type



RS.2042-05

4 Niveaux de puissance surfacique et de densité spectrale de puissance surfacique à la surface de la Terre

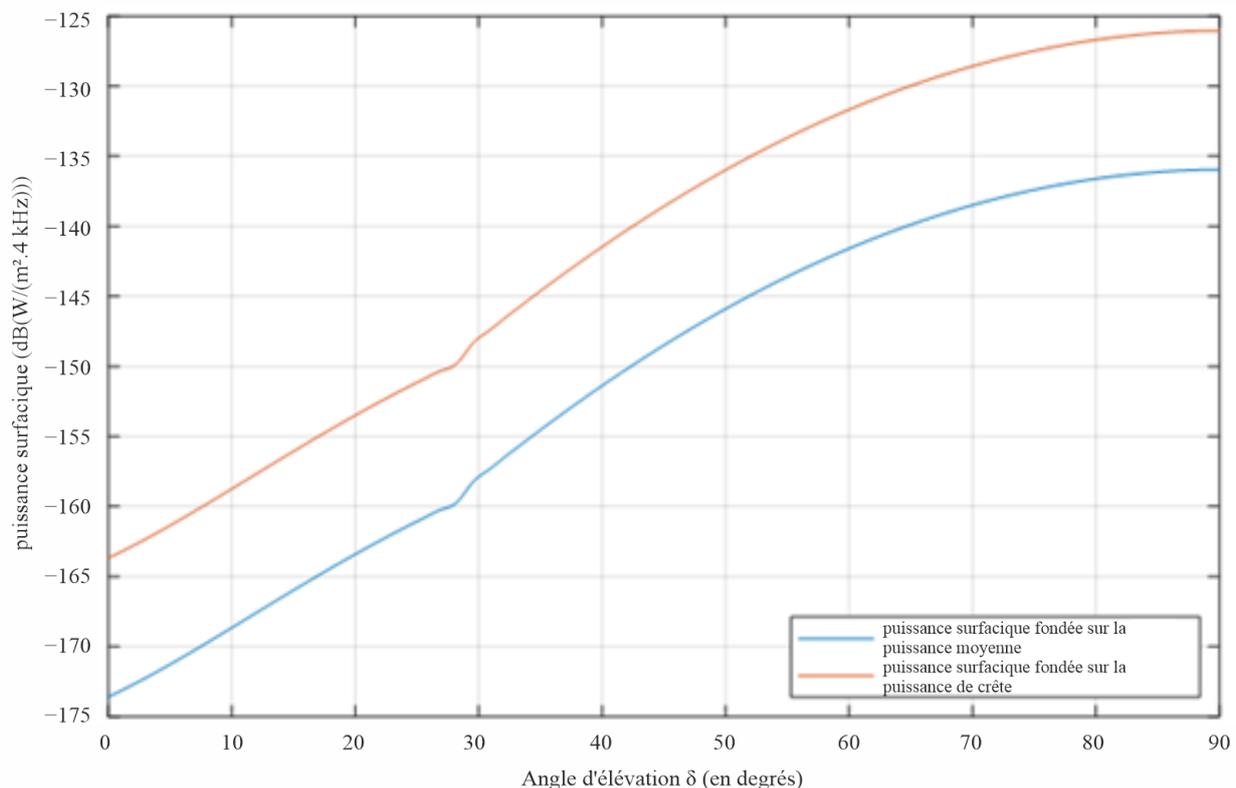
La puissance surfacique moyenne à la surface de la Terre est calculé à l'aide de la formule figurant dans le numéro **21.16.8** du RR (édition de 2020).

De même, la valeur de la puissance surfacique de crête peut être obtenue en retirant le facteur d'utilisation de la formule utilisée pour le calcul de la valeur de la puissance surfacique moyenne.

Pour les paramètres des sondeurs radar donnés dans le Tableau 1, les valeurs de puissance surfacique moyenne à la surface de la Terre sont données dans la Fig. 6. Comme indiqué dans cette Figure, la valeur maximale de la puissance surfacique moyenne est de $-135,96 \text{ dB(W/m}^2 \text{ 4kHz)}$ et la valeur maximale de la puissance surfacique de crête qui en résulte est de $-126,05 \text{ dB (W/m}^2 \text{ 4kHz)}$.

FIGURE 6

Puissance surfacique en fonction de l'angle d'élévation δ pour le sondeur radar spatioporté en ondes métriques décrit dans le Tableau 1 (largeur de bande de référence de 4 kHz)



RS.2042-06

5 Conclusion

On constate un intérêt certain pour la télédétection au voisinage de 40-50 MHz afin d'effectuer des mesures à distance de la subsurface de la Terre pour établir des cartes radar des couches diffusantes de la subsurface, l'objectif étant d'utiliser des capteurs actifs spatioportés pour localiser de l'eau/de la glace/des gisements. La présente Annexe justifie le choix de la bande de fréquences à utiliser et donne les caractéristiques techniques et opérationnelles types d'un instrument pouvant être utilisé dans les études de partage et de compatibilité.