

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.833-10
(09/2021)

Affaiblissement dû à la végétation

Série P
Propagation des ondes radioélectriques



Union
internationale des
télécommunications

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 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: <http://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, 2022

© UIT 2022

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.833-10

Affaiblissement dû à la végétation

(Question UIT-R 202/3)

(1992-1994-1999-2001-2003-2005-2007-2012-2013-2016-2021)

Domaine d'application

La présente Recommandation décrit différents modèles qui permettent au lecteur d'évaluer l'effet de la végétation sur les signaux radioélectriques. Les modèles décrits sont applicables à divers types de végétation pour diverses géométries de trajet qui permettent de calculer l'affaiblissement du signal dû à la végétation. La présente Recommandation contient également des données mesurées sur la dynamique des évanouissements et sur les caractéristiques de l'étalement du temps de propagation dus à la végétation.

Mots clés

Affaiblissement, dynamique des évanouissements, étalement du temps de propagation, systèmes de Terre, systèmes Terre-espace, végétation

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

que la végétation peut causer un affaiblissement important dans plusieurs applications pratiques,

recommande

d'utiliser les données de l'Annexe 1 pour évaluer l'affaiblissement dû à la végétation grâce à différents modèles valables pour une gamme de fréquences comprises entre 30 MHz et 100 GHz.

Annexe 1**1 Introduction**

L'affaiblissement imputable à la végétation peut dans certaines circonstances être important aussi bien pour les systèmes de Terre que pour les systèmes Terre-espace. Toutefois, en raison de la grande diversité des configurations et des types de végétation, il est difficile d'établir une procédure de prévision d'application générale. Par ailleurs, on manque de données expérimentales convenablement regroupées.

Les modèles décrits dans les lignes qui suivent s'appliquent à certaines gammes de fréquences et à divers types de géométrie de trajet.

2 Obstruction par des zones boisées

2.1 Trajet de Terre, avec un équipement en zone boisée

Dans le cas d'un trajet radioélectrique de Terre avec un équipement situé en zone boisée ou dans une zone largement couverte par de la végétation, l'affaiblissement additionnel dû à la végétation peut être caractérisé par deux paramètres:

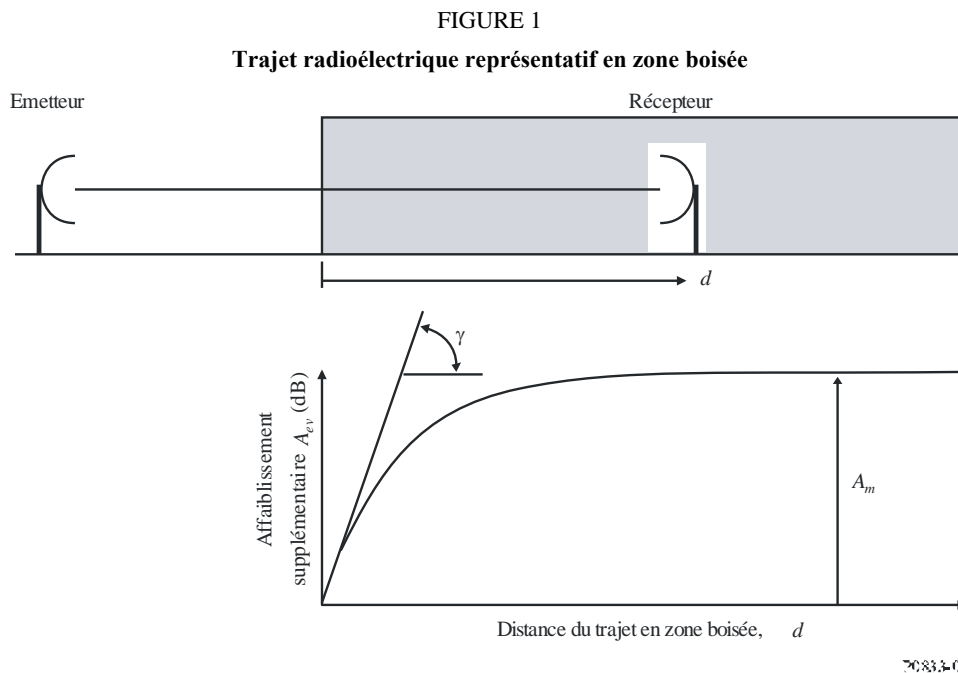
- le taux d'affaiblissement linéique (dB/m) résultant essentiellement de la dispersion de l'énergie sur le trajet radioélectrique, analogue à ce que l'on pourrait mesurer sur un trajet très court;
- l'affaiblissement supplémentaire maximal total dû à la végétation sur le trajet radioélectrique (dB) limité par l'effet d'autres phénomènes, notamment par la propagation de l'onde de surface au-dessus de la couverture végétale et la diffusion vers l'avant dans le milieu végétal.

Dans la Fig. 1, l'émetteur est extérieur à la zone boisée, et le récepteur est situé dans cette zone, à une certaine distance, d , par rapport au début de la zone. L'affaiblissement supplémentaire, A_{ev} , dû à la présence de la végétation est donné par:

$$A_{ev} = A_m [1 - \exp (- d \gamma / A_m)] \quad (1)$$

où:

- d : longueur du trajet à l'intérieur de la zone boisée (m)
- γ : affaiblissement linéique pour de très courts trajets dans le milieu végétal (dB/m)
- A_m : affaiblissement maximal pour un terminal, dans une végétation de type et de profondeur caractéristiques (dB).

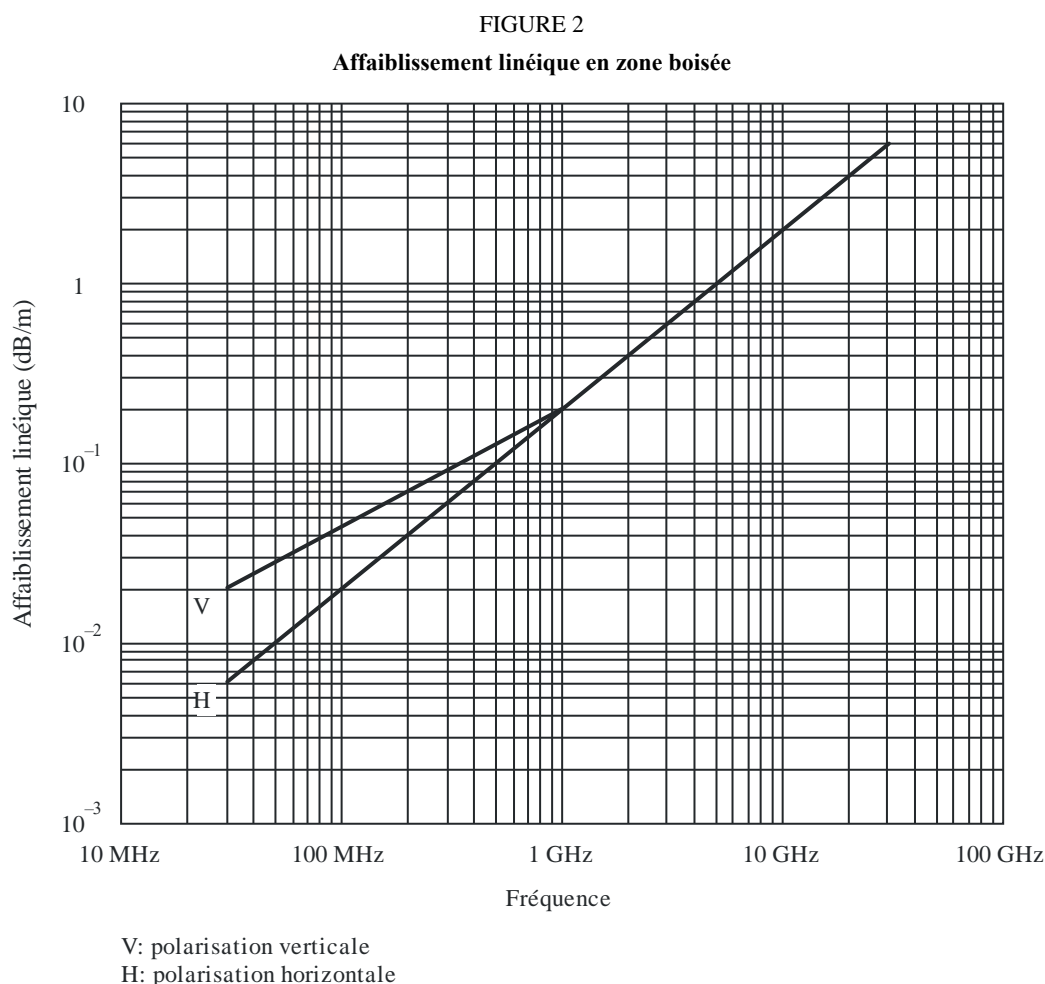


Il importe de noter que l'affaiblissement supplémentaire A_{ev} s'ajoute à toutes les autres composantes et non pas seulement à l'affaiblissement en espace libre. Ainsi, à supposer que la configuration géométrique du trajet radioélectrique de la Fig. 1 exclut un dégagement de Fresnel intégral, A_{ev} s'ajouterait à l'affaiblissement en espace libre et à l'affaiblissement de diffraction. De même, si la fréquence est suffisamment élevée pour rendre l'absorption gazeuse significative, A_{ev} s'ajoute à l'absorption gazeuse.

Notons également que A_m équivaut à l'affaiblissement dû aux signaux parasites que subit souvent un terminal en raison de la couverture de terrain.

La valeur de l'affaiblissement linéique dû à la végétation, γ dB/m, dépend des espèces végétales considérées et de leur densité. La Fig. 2 donne les valeurs approximatives de cet affaiblissement en fonction de la fréquence.

La Figure 2 donne les valeurs types de l'affaiblissement linéique, valeurs établies dans le cadre d'une série de mesures effectuées dans la gamme de fréquences allant de 30 MHz à environ 30 GHz, en zone boisée. Au-dessous d'environ 1 GHz, on observe que les signaux à polarisation verticale ont tendance à s'affaiblir davantage que les signaux à polarisation horizontale, phénomène que l'on attribue à la diffusion provoquée par les troncs d'arbre.



Soulignons que l'affaiblissement dû à la végétation est très variable, en raison de l'hétérogénéité du milieu, et de la grande diversité des essences, de la densité et de la teneur en eau observée dans la pratique. Les valeurs de la Fig. 2 sont simplement représentatives.

À des fréquences de l'ordre de 1 GHz, l'affaiblissement linéique en zone boisée semble augmenter de 20% (dB/m) lorsque les arbres sont en feuilles. On observe également que l'affaiblissement varie en fonction des mouvements du feuillage (vent).

La valeur de l'affaiblissement maximal A_m , limité par la diffusion de l'onde de surface, dépend des essences végétales et de la densité de la végétation ainsi que du diagramme de rayonnement de l'antenne du terminal situé dans la végétation et de la distance verticale entre l'antenne et le sommet de la couverture végétale.

Des mesures ont été réalisées pour la gamme de fréquences 105-2 200 MHz dans un milieu végétal mixte conifères-arbres à feuilles caduques (forêt mixte) à proximité de Saint-Pétersbourg (Russie) sur des trajets dont la longueur variait de quelques centaines de mètres à 7 km et pour différentes essences d'arbres d'une hauteur moyenne de 16 m.

On a constaté que ces mesures concordaient, en moyenne, avec l'équation (1) avec les constantes données dans le Tableau 1 pour l'affaiblissement linéique et l'affaiblissement maximal.

TABLEAU 1

Paramètre	Fréquence (MHz) et polarisation				
Fréquence, MHz	105,9 Horizontal	466,475 Oblique	949,0 Oblique	1852,2 Oblique	2117,5 Oblique
γ (dB/m)	0,04	0,12	0,17	0,30	0,34
A_m (dB)	9,4	18,0	26,5	29,0	34,1

La relation entre A_m (dB) et la fréquence de la forme:

$$A_m = A_1 f^\alpha \quad (2)$$

où f est la fréquence (MHz) a été calculée grâce à diverses expériences:

- des mesures effectuées dans la gamme de fréquences 900-1 800 MHz, dans un parc planté d'arbres tropicaux d'une hauteur moyenne de 15 m à Rio de Janeiro (Brésil) ont permis d'établir une valeur de 0,18 dB pour A_1 et de 0,752 pour α . La hauteur de l'antenne de réception était de 2,4 m;
- des mesures effectuées dans la gamme de fréquences 900-2 200 MHz, dans une forêt à proximité de Mulhouse (France) sur des trajets dont la longueur variait de quelques centaines de mètres à 6 km au milieu de différentes essences d'arbres d'une hauteur moyenne de 15 m ont permis d'établir une valeur de 1,15 dB pour A_1 et de 0,43 pour α . L'antenne de réception en zone boisée était une antenne unipolaire $\lambda/4$ d'une hauteur de 1,6 m placée sur un véhicule et l'antenne de transmission était un doublet $\lambda/2$ d'une hauteur de 25 m. L'écart type des mesures était de 8,7 dB. On a observé des variations saisonnières de 2 dB à 900 MHz et de 8,5 dB à 2 200 MHz;
- des mesures effectuées dans la gamme de fréquences 105,9-2 117,5 MHz dans deux parcs-forêts plantés de conifères et d'arbres à feuilles caduques (forêt mixte) à Saint-Pétersbourg (Russie), pour des arbres d'une hauteur comprise entre 12 et 16 m et espacés d'environ 2 à 3 m, ce qui correspond à une densité de 20-10 arbres/100 m² ont permis d'établir une valeur de 1,37 dB pour A_1 et de 0,42 pour α . Pour recevoir le signal, on a utilisé une antenne doublet quart d'onde à 1,5 m au-dessus du sol. La distance entre l'antenne du récepteur et l'antenne de l'émetteur variait entre 0,4 et 7 km et les trajets retenus pour les mesures étaient en visibilité directe entre ces antennes, sans obstacles autres que les zones boisées. Différentes étapes de l'expérience ont été réalisées dans des conditions météorologiques analogues: temps sec, vitesse du vent comprise entre 0 et 7 m/s;
- des mesures effectuées dans le sud de l'Angleterre à une profondeur de 200 m à l'intérieur d'une zone boisée mixte de conifères et d'arbres à feuilles caduques ont permis d'obtenir une

valeur de A_m égale à 46 dB pour une fréquence de 3 605 MHz. Ces mesures ont été faites à l'aide d'antennes directives à 2 m et à 10 m au-dessus du sol. Les effets de la propagation par trajets multiples ont été moyennés sur plusieurs centaines de mesures individuelles recueillies pour cinq trajets différents. Les mesures ont été effectuées en été et en hiver, mais aucune variation saisonnière substantielle n'a été constatée.

2.2 Trajets obliques d'un satellite, d'un aéronef ou d'une autre plate-forme au-dessus de la surface de la Terre

2.2.1 Modèle adapté au site

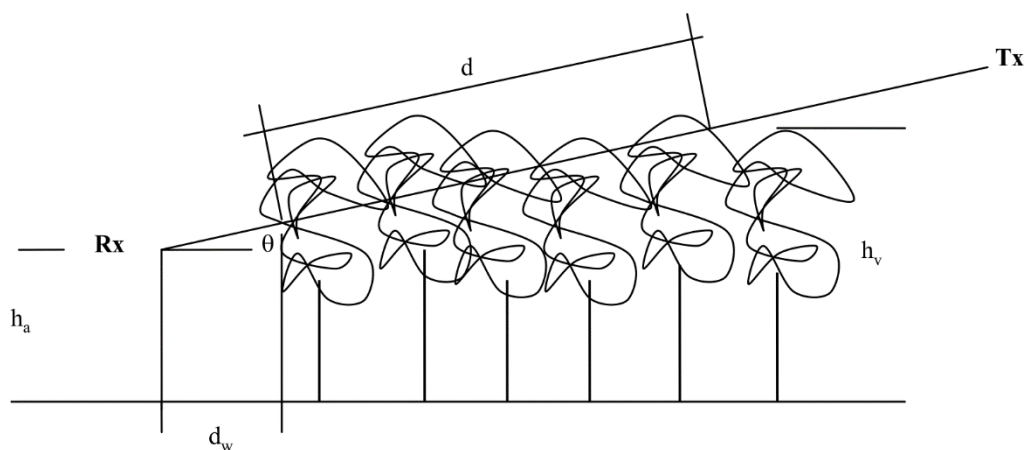
Trajet radioélectrique représentatif en zone boisée:

Dans la Fig. 3, l'émetteur (Tx) et le récepteur (Rx) sont situés en dehors de la zone boisée. Les paramètres sont les suivants:

- d : longueur du trajet dans le milieu végétal;
- h_v : hauteur moyenne des arbres;
- h_a : hauteur de l'antenne du récepteur au-dessus du sol;
- θ : élévation du trajet radioélectrique;
- d_w : distance de l'antenne jusqu'à la zone boisée au bord de la route.

FIGURE 3

Trajet radioélectrique représentatif en zone boisée avec: d , longueur du trajet dans le milieu végétal, h_v , hauteur moyenne des arbres, h_a , hauteur de l'antenne du récepteur au-dessus du sol, θ , élévation du trajet radioélectrique, d_w , distance de l'antenne jusqu'à la zone boisée au bord de la route



P.0833-03

Pour décrire la perte due à l'affaiblissement L le long d'un trajet de propagation dans le milieu végétal horizontal ou oblique, le modèle suivant est proposé:

$$L(\text{dB}) = A f^B d^C (\theta + E)^G \quad (3)$$

où:

- f : fréquence (MHz)
- d : profondeur de la végétation (m)
- θ : élévation (degrés)

A , B , C , E et G : paramètres empiriques.

Des mesures effectuées dans une zone boisée (pins) en Autriche ont donné les résultats suivants:

$$L(\text{dB}) = 0,25 f^{0,39} d^{0,25} \theta^{0,05} \quad (4)$$

TABLEAU 2

Essence d'arbres	A	B	C	E	G
Pin noir	0,25	0,39	0,25	0	0,05

La végétation est différente selon la saison. Le modèle ci-après donne l'affaiblissement dû à la végétation en fonction des caractéristiques saisonnières.

$$L_{\text{veg}}(\text{dB}) = A f^B \log_{10}(d) (\theta + E)^G - 4 \quad (5)$$

où:

f : fréquence (MHz)

d : profondeur de la végétation (m)

θ : élévation (degrés)

kh : $|Mois - 6,5|$ (Dans l'hémisphère sud, on utilise l'équation $kh = 6 - |Mois - 6,5|$ à la place de la précédente.)

$Mois$: mois (1,2,3,...,12)

B : $(0,30281 - 0,003624kh)(f / 1000)^{(0,0013118 - 0,026236kh)}$

A, E et G : paramètres empiriques.

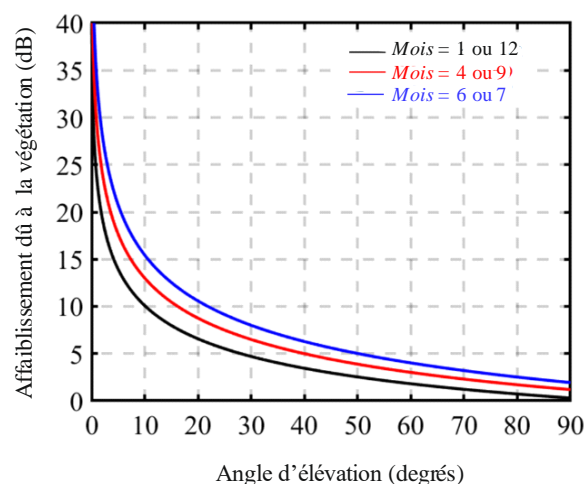
TABLEAU 3

Essence d'arbres	A	E	G
Cèdre du Japon	1,87	0,01	-0,12
Genévrier d'Afrique	1,5	0,01	-0,12

On trouvera dans la Fig. 4 un exemple d'affaiblissement dû à la végétation en fonction des caractéristiques saisonnières pour différents mois pour une fréquence de 2 GHz.

FIGURE 4

Affaiblissement dû à la végétation en fonction des caractéristiques saisonnières pour une fréquence de 2 GHz



2.2.2 Modèle indépendant du site

Le modèle statistique suivant peut être utilisé comme modèle indépendant du site:

$$L(\text{dB}) = A \cdot f^B \cdot \log_{10}(d) \cdot (\theta + E)^G - 4 \cdot (p / 100) + 0,4 \quad (6)$$

où:

f : fréquence (MHz)

θ : angle d'élévation (degrés)

d : $243(p/100)(\theta + 1)^{-0,93047} + 1$

kh : $5,5 - 5p/100$ [Note: Cette fonction est déterminée par le type de végétation, par exemple une forêt de feuillus à feuilles caduques.]

B : $(0,30281 - 0,003624kh)(f/1000)^{(0,0013118 - 0,026236kh)}$

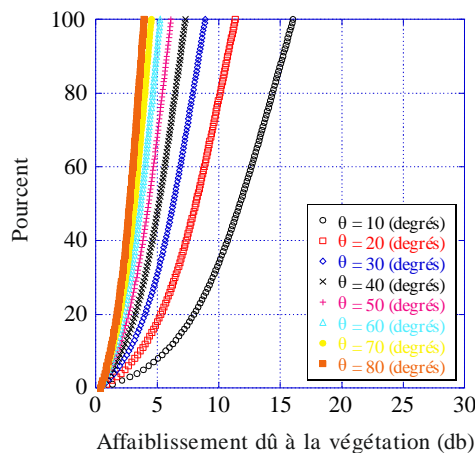
A, E et G : paramètres empiriques.

A, E et G sont déterminés pour chaque zone. Par exemple, les valeurs données pour des cèdres du Japon figurant dans le Tableau 3 peuvent être utilisées pour une forêt de feuillus à feuilles caduques telle qu'on en trouve au Japon.

On trouvera dans la Figure 5 un exemple de l'affaiblissement dû à la végétation calculé au moyen du modèle statistique pour différents angles d'élévation et pour une fréquence de 2 GHz.

FIGURE 5

Affaiblissement dû à la végétation calculé au moyen du modèle statistique pour une fréquence de 2 GHz



P.0833-05

3 Obstruction unique due à la végétation

3.1 Jusqu'à 1 GHz

L'équation (1) ne s'applique pas à un trajet radioélectrique obstrué par un obstacle végétal unique lorsque les deux terminaux sont en dehors de la couverture végétale (cas d'un trajet traversant le feuillage d'un arbre unique). Aux ondes métriques et décimétriques, domaine dans lequel on observe des valeurs d'affaiblissement linéique relativement faibles, et tout particulièrement lorsque la couverture végétale n'occupe qu'une partie relativement peu importante du trajet radioélectrique, cette situation peut être représentée de façon approximative par un modèle fondé d'une part sur l'affaiblissement linéique et d'autre part sur une limite maximale de l'affaiblissement supplémentaire total:

$$A_{et} = d \gamma \quad (7)$$

où:

d : longueur du trajet occupé par la zone végétale (m)

γ : affaiblissement linéique pour de très courts trajets en milieu végétal (dB/m)

$A_{et} \leq$: affaiblissement supplémentaire pour d'autres trajets (dB).

La restriction concernant une valeur maximale de A_{et} est nécessaire du fait que, lorsque l'affaiblissement linéique est suffisamment important, il existe un trajet de moindre affaiblissement qui contourne la végétation. On peut calculer la valeur approximative de l'affaiblissement minimal pour d'autres trajets en supposant que la voûte végétale constituée par les arbres constitue un écran de diffraction fin, de largeur finie, avec la méthode de la Recommandation UIT-R P.526.

Soulignons que l'équation (7) ainsi que la limite maximale de A_{et} qui lui est associée, ne représente qu'une approximation. Cette formule donnera en général des valeurs surestimées du surcroît d'affaiblissement dû à la végétation. Elle est donc surtout utile lorsqu'il s'agit de procéder à des évaluations approximatives de l'affaiblissement supplémentaire, lors de la planification d'un service. Utilisée pour les signaux brouilleurs, elle peut conduire à d'importantes sous-estimations des brouillages résultants.

3.2 Au-dessus de 1 GHz

Pour les trajets de Terre, il convient d'appliquer la méthode reposant sur la théorie du transfert radiatif (RET) décrite au § 3.2.1 pour calculer les effets de l'obstruction due à un arbre unique.

Pour les trajets obliques, il convient d'appliquer la méthode reposant sur la théorie de la diffusion multiple décrite au § 3.2.2 pour calculer les effets de l'obstruction due à un arbre unique.

3.2.1 Trajet de Terre

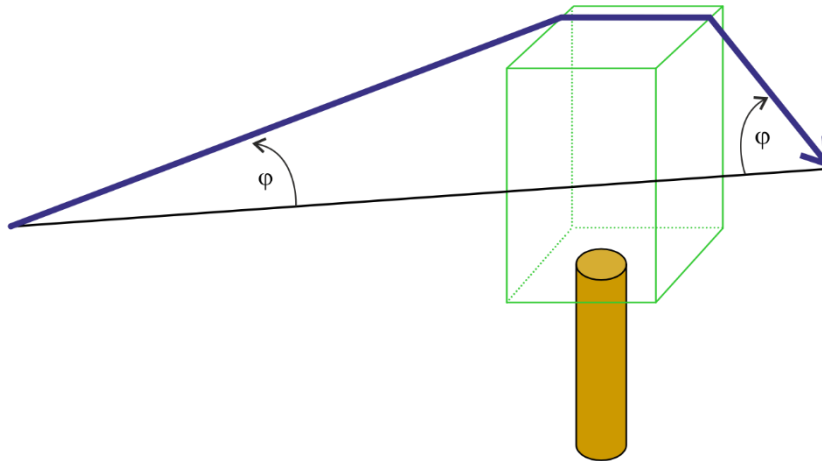
Pour évaluer le champ total, on calcule tout d'abord la composante de diffusion par diffraction, la composante de diffusion par réflexion sur le sol et la composante de diffusion par la végétation puis on les combine.

Les composantes de diffusion par diffraction comprennent la diffraction sur la couverture végétale et la diffraction de part et d'autre de celle-ci. Ces composantes de diffusion et la composante de diffusion par réflexion sur le sol sont calculées à l'aide des Recommandations de l'UIT-R. La composante de diffusion à travers la végétation est calculée à l'aide d'un modèle basé sur la théorie du transfert radiatif (RET, *radiative energy transfer*).

3.2.1.1 Calcul de la composante de diffusion par diffraction sur la couverture végétale

L'affaiblissement de diffraction, L_{top} , que subit le signal diffracté sur la couverture végétale peut être considéré comme une diffraction par des obstacles en arête en lame de couteau isolés doubles pour la géométrie définie à la Fig. 6.

FIGURE 6
Composante de diffusion par diffraction sur la couverture végétale



P.0833-06

Cette composante est calculée comme suit:

$$L_{top} = L_{top_diff} + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad (8)$$

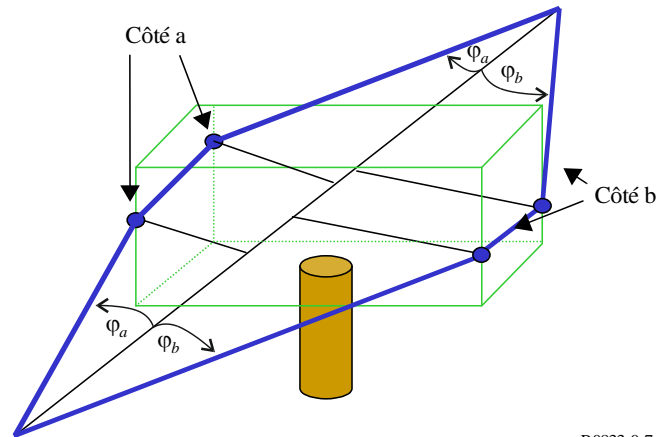
où $G_{Tx}(\varphi)$ et $G_{Rx}(\varphi)$ sont, respectivement, les affaiblissements dus aux angles de l'onde diffractée quittant l'antenne de l'émetteur et arrivant dans celle du récepteur. L_{top_diff} est l'affaiblissement de diffraction total calculé selon la méthode de la Recommandation UIT-R P.526 pour des obstacles isolés doubles.

3.2.1.2 Calcul de la composante de diffusion par diffraction de part et d'autre de la couverture végétale

L'affaiblissement de diffraction, L_{sidea} et L_{sideb} , que subit le signal diffracté autour de la couverture végétale peut là aussi être considéré comme une diffraction par des obstacles isolés doubles en arête en lame de couteau, pour la géométrie définie dans la Fig. 7.

FIGURE 7

Composante de diffusion par diffraction autour de la couverture végétale



P0833-0 7

Les affaiblissements sont calculés à l'aide des équations (9) et (10).

$$L_{sidea} = L_{diff_sidea} + G_{Tx}(\varphi_a) + G_{Rx}(\varphi_a) \quad (9)$$

et

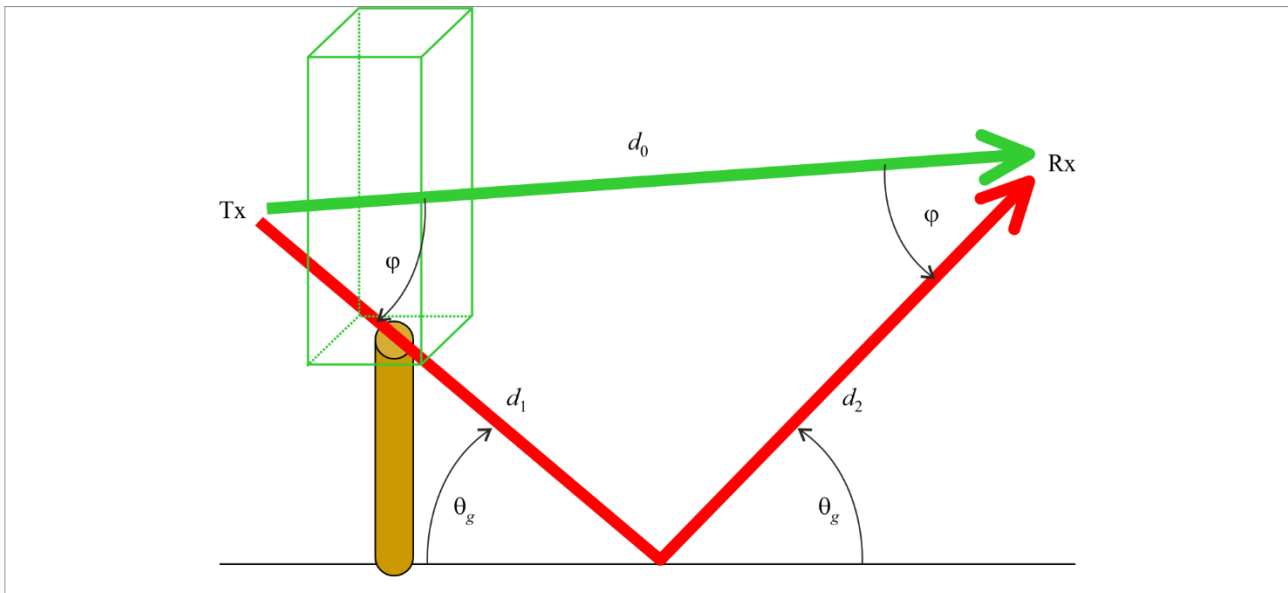
$$L_{sideb} = L_{diff_sideb} + G_{Tx}(\varphi_b) + G_{Rx}(\varphi_b) \quad (10)$$

où $G_{Tx}(\varphi_{a,b})$ et $G_{Rx}(\varphi_{a,b})$ sont les affaiblissements dus aux angles de l'onde diffractée quittant l'antenne de l'émetteur et arrivant sur celle du récepteur, respectivement pour les côtés a et b. L_{diff_sidea} et L_{diff_sideb} représentent l'affaiblissement de diffraction total sur chaque côté et ces valeurs sont calculées selon la méthode de la Recommandation UIT-R P.526 pour des obstacles isolés doubles.

3.2.1.3 Calcul de la composante réfléchie sur le sol

On suppose que le trajet est suffisamment court pour que l'onde réfléchie sur le sol puisse être modélisée selon la géométrie illustrée à la Fig. 8.

FIGURE 8
Composante réfléchi sur le sol



P.0833-08

Pour calculer l'affaiblissement que subit l'onde réfléchi sur le sol au niveau du récepteur, on peut calculer le coefficient de réflexion, R_0 , du signal réfléchi sur le sol avec un angle rasant θ_g donné. Il s'agit d'une méthode standard qui est décrite dans la Recommandation UIT-R P.1238. Les valeurs de la permittivité et de la conductivité sont données dans la Recommandation UIT-R P.527.

L'affaiblissement que subit l'onde réfléchi sur le sol, L_{ground} , est donné par l'équation suivante:

$$L_{ground} = 20 \log_{10} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_0} \right) - 20 \log_{10}(R_0) + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad (11)$$

où $G_{Rx}(\varphi)$ et $G_{Tx}(\varphi)$ sont respectivement les affaiblissements dus aux angles de l'onde réfléchi quittant l'antenne de l'émetteur et arrivant sur celle du récepteur.

3.2.1.4 Calcul de la composante de diffusion à travers la végétation

Pour prévoir avec précision l'affaiblissement supplémentaire dû à la végétation, l'utilisateur a besoin d'introduire les paramètres suivants dans l'équation RET (équation (12)):

- α : rapport entre la puissance diffusée vers l'avant et la puissance diffusée totale
- β : ouverture de faisceau de la fonction de phase (degrés)
- σ_τ : coefficient d'absorption et de diffusion combiné
- W : albedo
- $\Delta\gamma_R$: ouverture de faisceau de l'antenne de réception (degrés)
- d : distance dans la végétation (m).

Étant donné les paramètres d'entrée: fréquence (GHz), taille typique des feuilles de la végétation à modéliser et indice de surface foliaire (LAI, *leaf area index*) des essences, on peut obtenir la valeur la plus proche de α , β , W et σ_τ à partir des tableaux de paramètres RET (Tableaux 5 à 8). Au cas où ces paramètres ne seraient pas disponibles, il convient de prendre pour hypothèse la valeur correspondante la meilleure possible en choisissant parmi les essences énumérées dans les tableaux.

Ces quatre paramètres présentés sous forme de tableaux, ainsi que la fréquence, et $\Delta\gamma_{3\text{dB}}$, l'ouverture de faisceau à 3 dB de l'antenne de réception, sont ensuite utilisés dans le modèle RET.

L'affaiblissement dû à la diffusion à travers la couverture végétale, L_{scat} , est donné par la formule:

$$L_{\text{scat}} = -10 \log_{10} \left(\begin{array}{l} e^{-\tau} + \frac{\Delta\gamma_R^2}{4} \cdot \{ [e^{-\hat{\tau}} - e^{-\tau}] \cdot \bar{q}_M + e^{-\tau} \cdot \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha W \tau)^m [\bar{q}_m - \bar{q}_M] \} \\ + \frac{\Delta\gamma_R^2}{2} \cdot \left\{ -e^{-\hat{\tau}} \cdot \frac{1}{P_N} + \sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N [A_k e^{-\frac{\hat{\tau}}{s_k}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\mu_N}{s_k}}] \right\} \end{array} \right) \quad (12)$$

où:

$\Delta\gamma_R = 0,6 \cdot \Delta\gamma_{3\text{dB}}$: ouverture de faisceau à 3 dB de l'antenne de réception

m : l'ordre du premier terme I_1 ne changera pas de façon significative pour $m > 10$ (par conséquent dans la plupart des cas, $M = 10$)

$\tau = (\sigma_a + \sigma_s) \cdot z$: densité optique τ en fonction de la distance z .

$$\bar{q}_m = \frac{4}{\Delta\gamma_R^2 + m\beta_S^2}$$

$$\beta_S = 0,6 \cdot \beta$$

$$P_N = \sin^2 \left(\frac{\pi}{2N} \right) \quad (13)$$

$$\hat{\tau} = (1 - \alpha W) \tau$$

Les coefficients d'affaiblissement s_k sont déterminés à l'aide de l'équation caractéristique suivante:

$$\frac{\hat{W}}{2} \cdot \sum_{n=0}^N \frac{P_n}{1 - \frac{\mu_n}{s}} = 1$$

où:

$$P_n = \sin \left(\frac{\pi}{N} \right) \sin \left(\frac{n\pi}{N} \right), \quad (n = 1, \dots, N-1), \quad \text{et } \hat{W} = \frac{(1 - \alpha)W}{1 - \alpha W} \quad (14)$$

où N est un entier impair choisi comme compromis pour le temps de calcul. Lorsque les valeurs de N sont grandes, le temps de calcul augmentera de façon importante. La fourchette des valeurs raisonnables de N est $11 \leq N \leq 21$. Le côté gauche de l'équation (12) sera égal à 1 pour des valeurs de s , qui représentent les racines de cette équation. On obtiendra $N + 1$ racines pour lesquelles s'applique ce qui suit:

$$S_{0, \dots, \frac{N}{2}} = -S_{N, \dots, \frac{N+1}{2}}$$

Les facteurs d'amplitude A_k sont déterminés par un système d'équations linéaires donné par:

$$\sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N \frac{A_k}{1 - \frac{\mu_n}{s_k}} = \frac{\delta_n}{P_N} \text{ pour } n = \frac{N+1}{2} \dots N \quad (15)$$

où:

$$\mu_n = -\cos\left(\frac{n\pi}{N}\right)$$

$$\delta_n = 0 \quad \text{pour } n \neq N$$

et

$$\delta_n = 1 \quad \text{pour } n = N.$$

3.2.1.5 Combinaison des différentes composantes

L'affaiblissement total, L_{total} , subi par un signal se propageant à travers les arbres, est donné par la combinaison des différents termes d'affaiblissement:

$$L_{total} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{\left(\frac{-L_{sidea}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{sideb}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{top}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{ground}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{scat}}{10}\right)} \right\} \quad (16)$$

TABLEAU 4

Paramètres de la végétation

	Marronnier d'Inde	Érable		Platane de Londres		Tilleul commun		Érable sycomore	
	En feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles
LAI		1,691		1,930		1,475		1,631	0,483
Taille des feuilles (m)	0,300	0,150		0,250		0,100		0,150	

	Ginkgo	Cerisier du Japon	Érable trident	Pin coréen	Cèdre de l'Himalaya	Platane américain	Metasequoia glyptostroboides
	En feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles
LAI	2,08	1,45	1,95				
Taille des feuilles (m)	0,1 × 0,055	0,05 × 0,08	0,07 × 0,085	0,001 × 0,1	0,001 × 0,046	0,22 × 0,16	0,035 × 0,078

Cerisier du Japon: *Prunus serrulata* var. *spontanea*
 Tilleul commun: *Tilia x. Europaea*
 Metasequoia glyptostroboides: *Metasequoia glyptostroboides*
 Ginkgo: *Ginkgo biloba*
 Marronnier d'Inde: *Aesculus hippocastanum* L.
 Cèdre de l'Himalaya: *Cedrus deodara*
 Platane de Londres: *Platanus hispanica muenchh*
 Pin coréen: *Pinus koraiensis*
 Platane américain: *Platanus occidentalis*
 Érable: *Acer saccharinum* L.
 Érable sycomore: *Acer pseudoplatanus* L.
 Érable trident: *Acer buergerianum*

TABLEAU 5

Valeurs ajustées de α en fonction de la fréquence/de l'essence d'arbre

Fréquence (GHz)	Marronnier d'Inde	Érable		Platane de Londres		Tilleul commun		Érable sycomore	
	En feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles
1,3	0,90	0,95	0,90	0,95	0,90	0,90	0,95		0,95
2	0,75		0,95	0,95			0,95		0,95
2,2			0,95	0,50					
11	0,85	0,90		0,70	0,95	0,95	0,95		0,95
37				0,95					
61,5		0,80		0,25				0,90	

Fréquence (GHz)	Ginkgo	Cerisier du Japon	Érable trident	Pin coréen	Cèdre de l'Himalaya	Platane américain	Metasequoia glyptostroboides
	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles
1,5	0,90	0,95	0,95	0,70	0,48	0,95	0,93
2,5	0,90	0,93	0,95	0,82	0,74	0,74	0,82
3,5	0,30	0,90	0,95	0,74	0,92	0,85	0,85
4,5	0,40	0,90	0,90	0,72	0,91	0,75	0,89
5,5	0,40	0,95	0,90	0,73	0,96	0,70	0,82
12,5	0,20	0,16	0,25	0,23	0,27	0,71	0,21

Note – Taille des feuilles en mètres.

TABLEAU 6

Valeurs ajustées de β en fonction de la fréquence/de l'essence d'arbre

Fréquence (GHz)	Marronnier d'Inde	Érable		Platane de Londres		Tilleul commun		Érable sycomore	
	En feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles
1,3	21	14	43	42	16	76	50		70
2	80		31	49			60		62
2,2			25	13					
11	69	58		100	19	78	48		44
37				18					
61,5		48		2				59	

Fréquence (GHz)	Ginkgo	Cerisier du Japon	Érable trident	Pin coréen	Cèdre de l'Himalaya	Platane américain	Metasequoia glyptostroboides
	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles
1,5	28,65	57,30	18,47	70	51,5	61	44
2,5	36,89	57,30	45,34	55	77,5	23	71
3,5	57,30	114,59	13,43	72	103	105	65
4,5	28,65	114,59	57,30	71	94	65	34
5,5	28,65	229,18	114,59	75	100	77	77
12,5	3,58	3,38	4,25	4,37	3,54	2,36	2,57

Note – Taille des feuilles en mètres.

TABLEAU 7

Valeurs ajustées de l'albédo en fonction de la fréquence/de l'essence d'arbre

Fréquence (GHz)	Marronnier d'Inde	Érable		Platane de Londres		Tilleul commun		Érable sycomore	
	En feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles
1,3	0,25	0,95	0,25	0,95	0,95	0,95	0,95		0,85
2	0,55		0,95	0,95			0,95		0,95
2,2			0,95	0,45					
11	0,95	0,95		0,95	0,95	0,75	0,95		0,95
37				0,95					
61,5		0,80		0,50				0,90	

Fréquence (GHz)	Ginkgo	Cerisier du Japon	Érable trident	Pin coréen	Cèdre de l'Himalaya	Platane américain	Metasequoia glyptostroboides
	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles
1,5	0,95	0,95	0,96	0,78	0,43	0,88	0,98
2,5	0,92	0,95	0,95	0,92	0,71	0,71	0,97
3,5	0,10	0,95	0,95	0,71	0,87	0,84	0,93
4,5	0,83	0,30	0,95	0,87	0,92	0,95	0,99
5,5	0,90	0,90	0,95	0,75	0,97	0,96	0,94
12,5	0,97	0,90	0,94	0,98	0,98	0,25	0,99

Note – Taille des feuilles en mètres.

TABLEAU 8

Valeurs ajustées de σ_τ en fonction de la fréquence/de l'essence d'arbre

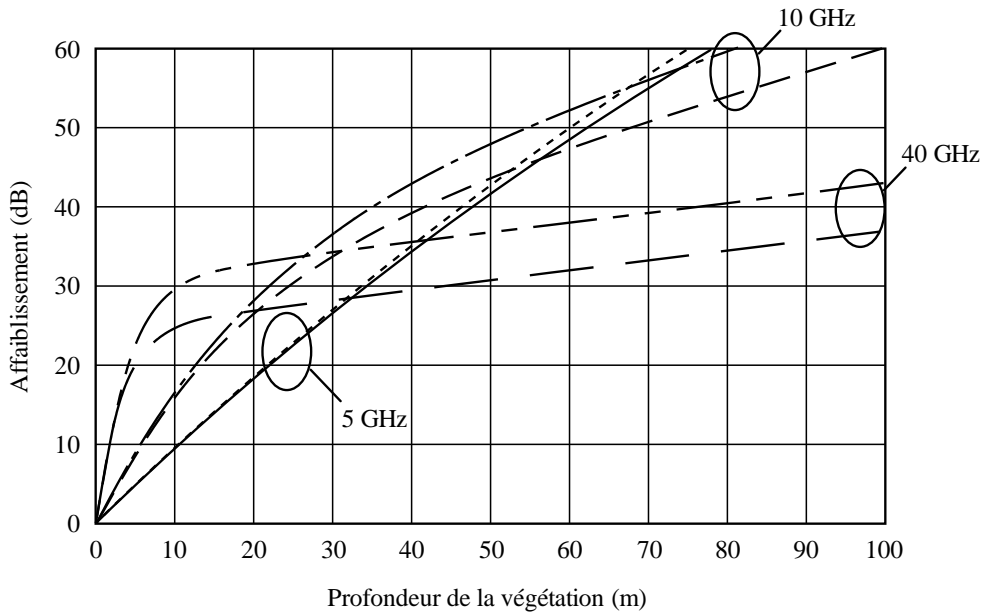
Fréquence (GHz)	Marronnier d'Inde	Érable		Platane de Londres		Tilleul commun		Érable sycomore	
	En feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles
1,3	0,772	0,241	0,139	0,147	0,221	0,22	0,591		0,360
2	0,091		0,176	0,203			0,692		0,249
2,2			0,377	0,244					
11	0,124	0,321		0,750	0,459	0,56	0,757		0,179
37				0,441					
61,5		0,567		0,498				0,647	

Fréquence (GHz)	Ginkgo	Cerisier du Japon	Érable trident	Pin coréen	Cèdre de l'Himalaya	Platane américain	Metasequoia glyptostroboides
	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles
1,5	0,40	0,30	0,47	0,215	0,271	0,490	0,261
2,5	1,10	0,49	0,73	0,617	0,402	0,486	0,350
3,5	0,30	0,21	0,73	0,334	0,603	0,513	0,370
4,5	0,46	0,20	0,27	0,545	0,540	0,691	0,266
5,5	0,48	0,24	0,31	0,310	0,502	0,558	0,200
12,5	0,74	0,18	0,47	0,500	0,900	0,170	0,440

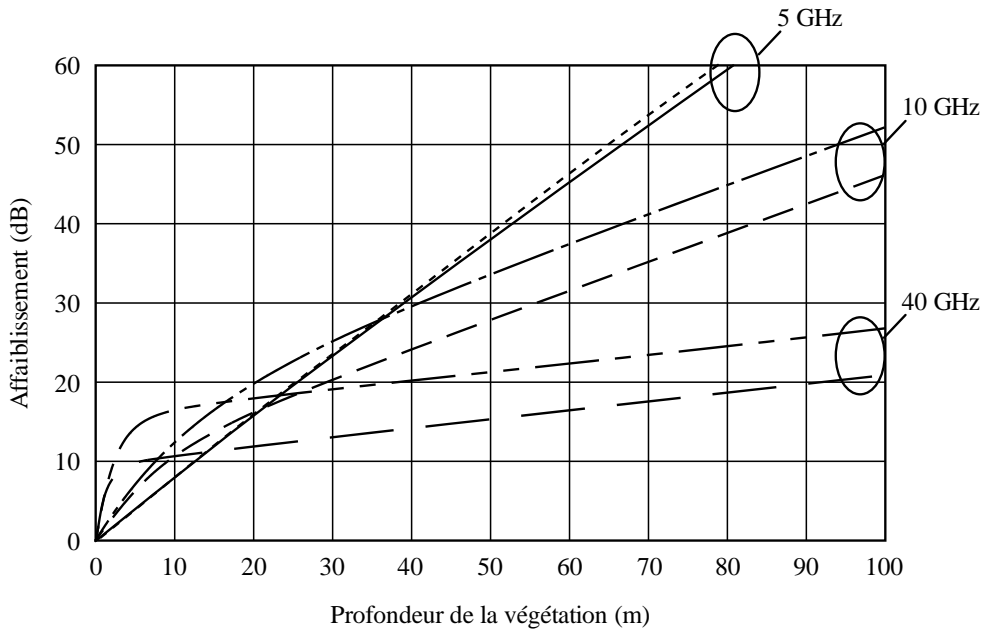
NOTE – Taille des feuilles en mètres.

FIGURE 9

Affaiblissement pour des zone d'illumination de 0,5 m² et 2 m², a) arbres avec feuilles, b) arbres sans feuilles*



a)



b)

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| - 5 GHz, 0,5 m ² | - 10 GHz, 2 m ² |
| — 5 GHz, 2 m ² | - 40 GHz, 0,5 m ² |
| — 10 GHz, 0,5 m ² | - 40 GHz, 2 m ² |

P0833-09

Note relative à la Figure 9: Les courbes illustrent le surcroît d'affaiblissement dû à la présence d'une masse de végétation qui sera perçue par le signal la traversant. Dans des situations concrètes, le signal reçu au-delà de cette masse subira un affaiblissement imputable à la fois à la propagation à travers la végétation et à la diffraction. Le mécanisme de propagation dominant limitera alors l'affaiblissement total.

3.2.2 Trajet oblique

Pour un trajet oblique traversant le feuillage d'un arbre unique, on recommande d'appliquer deux méthodes selon que la fréquence est supérieure ou inférieure à 30 GHz.

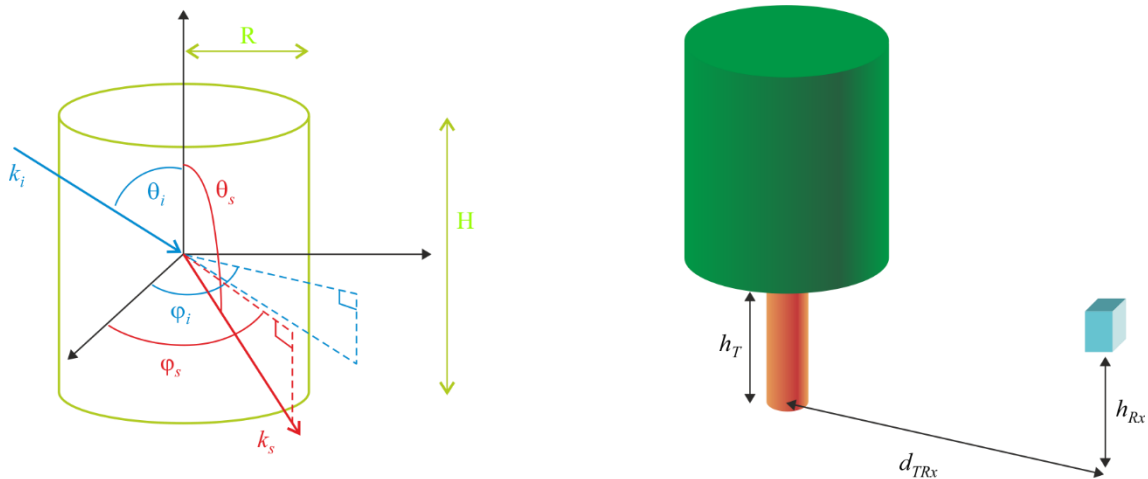
3.2.2.1 De 1 à 30 GHz

Pour les fréquences strictement inférieures à 30 GHz, il est recommandé d'appliquer la méthode par étapes ci-après pour calculer l'affaiblissement total dû aux arbres, le facteur de Rice et la distribution cumulative à petite échelle de la puissance reçue.

Les paramètres d'entrée du modèle sont les suivants (voir la Fig. 10 pour la définition de la géométrie):

- R : rayon de la couverture végétale (mètres)
- H : hauteur de la couverture végétale (mètres)
- θ_i : angle d'élévation incident par rapport à la couverture végétale (radians)
- φ_i : angle d'azimut incident par rapport à la couverture végétale (radians)
- φ_s : angle de diffusion en azimut (radians)
- f : fréquence (GHz, comprise entre 1 et 30 GHz)
- d_{TRx} : distance horizontale entre l'antenne de réception et l'arbre (mètres)
- h_T : hauteur de la base de la couverture végétale (mètres)
- h_{Rx} : hauteur de l'antenne de réception (mètres, doit être inférieure à $h_T + H/2$); polarisation de la liaison (horizontale, verticale, dextrogyre ou lévogyre).

FIGURE 10
Définition de la géométrie



P.0833-10

Étape 1 Calculer θ_s , l'angle de diffusion de l'élévation (en radian):

$$\theta_s = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(h_{Rx} - \left(h_T + \frac{H}{2} \right), d_{TRx} \right) \quad (17)$$

Étape 2 Définir les caractéristiques des branches et des feuilles

- a : rayon (m)

- h : longueur (m)
 ε_r : constante diélectrique
 ρ : densité (m^{-3}).

Si a , h et ρ ne sont pas connus, utiliser les valeurs correspondant à un chêne type indiquées dans le Tableau 9.

TABLEAU 9

Taille et densité mesurées des branches et du feuillage d'un chêne à Boxtel (Pays-Bas)

Type de diffuseur	Rayon (cm)	Longueur et épaisseur (cm)	Densité volumique (m^{-3})
Branche (1)	11,4	131	0,013
Branche (2)	6,0	99	0,073
Branche (3)	2,8	82	0,41
Branche (4)	0,7	54	5,1
Branche (5)	0,2	12	56
Feuilles	3,7	0,02	420

Si la constante diélectrique des branches et des feuilles n'est pas connue, on peut la calculer de la façon suivante:

– feuilles:

$$\varepsilon_l = 3,1686 + \frac{28,938}{1 + j \frac{f}{18}} - j \frac{0,5672}{f} \quad (18)$$

– branches:

$$\varepsilon_b = \varepsilon'_b (1 + j \tan \delta_b) \quad (19)$$

où ε'_b et $\tan \delta_b$ sont calculés à la fréquence f par interpolation linéaire des valeurs indiquées dans le Tableau 10.

TABLEAU 10

Constante diélectrique et tangente de perte du bois pour une teneur en humidité = 40% et une température = 20°C

Fréquence (GHz)	1	2,4	5,8	30
ε'_b	7,2	6,2	6,0	5,3
$\tan \delta_b$	0,29	0,30	0,37	0,43

Étape 3 Définir la longueur d'onde λ (en mètres):

$$\lambda = \frac{0,3}{f} \quad (20)$$

Étape 4 Pour chaque catégorie de branche et pour la catégorie de feuilles considérée, calculer les tenseurs d'amplitude de la diffusion pour les valeurs ci-après de l'orientation en azimut et en élévation sur des branches et des feuilles:

$$\text{Azimut: } \varphi_{sc}(i_\varphi) = i_\varphi \frac{2\pi}{5} \text{ pour } 0 \leq i_\varphi \leq 5$$

Élévation: $\theta_{sc}(i_\theta) = i_\theta \frac{\beta_{\max}}{5}$ pour $0 \leq i_\theta \leq 5$ ou $\beta_{\max} = \pi/4$ pour les branches des catégories (1) et (2) et $\beta_{\max} = \pi/2$ pour les branches des catégories (3), (4), (5) et les feuilles.

Étape 4.1 Calculer les angles d'incidence et de départ dans le système local du diffuseur $\theta_{i,sc}$, $\varphi_{s,sc}$, $\theta_{s,sc}$ et $\varphi_{i,sc}$.

$$\begin{cases} \theta_{i,sc} = \cos^{-1}(\cos \theta_{sc} \cos \theta_i - \sin \theta_{sc} \cos(\varphi_{sc} - \varphi_i) \sin \theta_i) \\ \varphi_{i,sc} = \tan^{-1}(\sin \theta_i \sin(\varphi_i - \varphi_{sc}), \sin \theta_i \cos \theta_{sc} \cos(\varphi_{sc} - \varphi_i) + \sin \theta_{sc} \cos \theta_i) \\ \theta_{s,sc} = \pi - \cos^{-1}(-\cos \theta_{sc} \cos \theta_s - \sin \theta_{sc} \cos(\varphi_{sc} - \varphi_s) \sin \theta_s) \\ \varphi_{s,sc} = \tan^{-1}(\sin \theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_{sc}), \sin \theta_s \cos \theta_{sc} \cos(\varphi_{sc} - \varphi_s) + \sin \theta_{sc} \cos \theta_s) \end{cases} \quad (21)$$

Étape 4.2 Calculer les tenseurs de diffusion d'amplitude du système local f_{vv} , f_{vh} , f_{hv} et f_{hh} pour chaque catégorie de branches et de feuilles

– Branches pour lesquelles $\left| \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{\varepsilon_r} - 1 \right| < 1$ et feuilles:

$$\begin{cases} f_{vv} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon_r - 1)}{2} (a_N \sin \theta_{i,sc} \sin \theta_{s,sc} - a_T \cos \theta_{i,sc} \cos \theta_{s,sc} \cos(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \mu \\ f_{hv} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon_r - 1)}{2} a_T \cos \theta_{i,sc} \sin(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc}) \mu \\ f_{hh} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon_r - 1)}{2} a_T \cos(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc}) \mu \\ f_{vh} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon_r - 1)}{2} a_T \cos \theta_{s,sc} \sin(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc}) \mu \end{cases} \quad (22)$$

pour:

$$\begin{cases} a_T = \frac{1}{(\varepsilon_r - 1)g_t + 1} \\ a_N = \frac{1}{(\varepsilon_r - 1)g_n + 1} \end{cases} \quad (23)$$

où:

– Branches:

$$\left\{ \begin{array}{l} b = \sqrt{1 - \left(\frac{2a}{h}\right)^2} \\ g_t = \frac{b(b^2 - 1)}{2} \left(\frac{b}{b^2 - 1} + \frac{\log_{10} \frac{b-1}{b+1}}{2} \right) \\ g_n = -(b^2 - 1) \left(\frac{b \log_{10} \frac{b-1}{b+1}}{2} + 1 \right) \end{array} \right. \quad (24)$$

– Feuilles:

$$\left\{ \begin{array}{l} m = \frac{2a}{h} \\ g_t = \frac{1}{2(m^2 - 1)} \left(\frac{m^2}{\sqrt{m^2 - 1}} \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{m^2 - 1}}{m} \right) - 1 \right) \\ g_n = \frac{m^2}{m^2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{m^2 - 1}} \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{m^2 - 1}}{m} \right) \right) \end{array} \right. \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \mu = \sum_{n=5}^5 \sum_{l=0}^{50} \sum_{p=0}^{50} \left[l \frac{a}{50} J_n \left(\frac{2\pi}{\lambda} l \frac{a}{50} \sin \theta_{i,sc} \right) J_n \left(\frac{2\pi}{\lambda} l \frac{a}{50} \sin \theta_{s,sc} \right) \right. \\ \left. \times \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} h \left(\frac{l}{50} - \frac{1}{2} \right) \right) (\cos \theta_{i,sc} + \cos \theta_{s,sc}) \frac{a}{50} \frac{h}{50} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

– Branches pour lesquelles $\left| \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{\epsilon_r} - 1 \right| > 1$:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{vv} = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\epsilon_r - 1) h \mu \left(\frac{E_v(0)(Z(-1) + Z(1)) \cos \theta_{i,sc} \cos \theta_{s,sc}}{2\sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} - Z(0) \sin \theta_{s,sc} + G_{vv} \right) \\ f_{vh} = 2j \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\epsilon_r - 1) h \mu \left(\frac{E_v(0)(Z(-1) + Z(1)) \cos \theta_{i,sc} \cos \theta_{s,sc}}{2\sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} - Z(0) \sin \theta_{s,sc} + G_{vh} \right) \\ f_{hh} = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\epsilon_r - 1) h \mu \left(\frac{H_h(0)(Z(-1) + Z(1))}{2\sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} + G_{hh} \right) \\ f_{hv} = j \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\epsilon_r - 1) h \mu G_{hv} \end{array} \right. \quad (27)$$

pour:

$$\mu = \frac{\sin \frac{2\pi}{\lambda} h (\cos \theta_{i,sc} + \cos \theta_{s,sc})}{\frac{2\pi}{\lambda} h (\cos \theta_{i,sc} + \cos \theta_{s,sc})} \quad (28)$$

$$Z(n) = \frac{a^2}{u^2 - v_s^2} (u J_n(v_s) J_{n+1}(u) - v_s J_n(u) J_{n+1}(v_s)) \quad (29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{vv} = 2 \sum_{n=1}^{20} (\beta(n) E_v(n) \cos \theta_{i,sc} - j\alpha(n) H_v(n) \cos \theta_{s,sc} - Z(n) E_v(n) \sin \theta_{s,sc}) \cos(n(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \\ G_{vh} = 2 \sum_{n=1}^{20} (\beta(n) E_h(n) \cos \theta_{i,sc} - j\alpha(n) H_h(n) \cos \theta_{s,sc} - Z(n) E_v(n) \sin \theta_{s,sc}) \sin(n(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \\ G_{hh} = 2 \sum_{n=1}^{20} (\beta(n) H_h(n) + j\alpha(n) E_h(n) \cos \theta_{i,sc}) \cos(n(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \\ G_{vv} = 2 \sum_{n=1}^{20} (\beta(n) H_v(n) + j\alpha(n) E_v(n) \cos \theta_{i,sc}) \sin(n(\varphi_{s,sc} - \varphi_{i,sc})) \end{array} \right. \quad (30)$$

où:

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}} \\ v_i = \max\left(10^{-5}, \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta_{i,sc}\right) \\ v_s = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta_{s,sc} \end{array} \right. \quad (31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha(n) = \frac{Z(n-1) - Z(n+1)}{2\sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} \\ \beta(n) = \frac{Z(n-1) + Z(n+1)}{2\sqrt{\varepsilon_r - \cos^2 \theta_{i,sc}}} \end{array} \right. \quad (32)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_v(n) = \frac{j \sin \theta_{i,sc}}{R(n) J_n(u)} \left(\frac{H'(n)}{v_i H_n^{(2)}(v_i)} - \frac{J'(n)}{u J_n(u)} \right) \\ E_h(n) = \frac{-\sin \theta_{i,sc}}{R(n) J_n(u)} \left(\frac{1}{v_i^2} - \frac{1}{u^2} \right) n \cos \theta_{i,sc} \\ H_v(n) = \frac{\sin \theta_{i,sc}}{R(n) J_n(u)} \left(\frac{1}{v_i^2} - \frac{1}{u^2} \right) n \cos \theta_{i,sc} \\ H_h(n) = \frac{j \sin \theta_{i,sc}}{R(n) J_n(u)} \left(\frac{H'(n)}{v_i H_n^{(2)}(v_i)} - \varepsilon_r \frac{J'(n)}{u J_n(u)} \right) \end{array} \right. \quad (33)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} J'(n) = \frac{J_{n-1}(u) - J_{n+1}(u)}{2} \\ H'(n) = \frac{H_{n-1}^{(2)}(v_i) - H_{n+1}^{(2)}(v_i)}{2} \\ R(n) = \frac{\pi v_i^2 H_n^{(2)}(v_i)}{2} \left(\left(\frac{H'(n)}{v_i H_n^{(2)}(v_i)} - \frac{J'(n)}{u J_n(u)} \right) \left(\frac{H'(n)}{v_i H_n^{(2)}(v_i)} - \epsilon_r \frac{J'(n)}{u J_n(u)} \right) - \left(\frac{1}{u^2} - \frac{1}{v_i^2} \right) n \cos \theta_{i,sc} \right) \end{array} \right. \quad (34)$$

$J_n(\cdot)$ étant la fonction de Bessel de première espèce d'ordre n

$H_n^{(2)}(\cdot)$ étant la fonction de Hankel d'ordre n

Étape 4.3 Calculer les facteurs de rotation du système:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{vi} = -(\sin \theta_{sc} \cos \theta_i \cos(\varphi_{sc} - \varphi_i) + \cos \theta_{sc} \sin \theta_i) \\ t_{hi} = \sin \theta_{sc} \sin(\varphi_{sc} - \varphi_i) \\ t_{vs} = \sin \theta_{sc} \cos \theta_s \cos(\varphi_{sc} - \varphi_s) - \cos \theta_{sc} \sin \theta_s \\ t_{hs} = \sin \theta_{sc} \sin(\varphi_{sc} - \varphi_s) \end{array} \right. \quad (35)$$

Étape 4.4 Calculer la matrice des tenseurs de diffusion du système de référence F_{VV} , F_{VH} , F_{HV} et F_{HH} pour chaque catégorie de branches et de feuilles:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{VV} = \frac{1}{\sqrt{(t_{vi}^2 + t_{hi}^2)(t_{vs}^2 + t_{hs}^2)}} [t_{vs}(f_{vv}t_{vi} - f_{vh}t_{hi}) - t_{hs}(f_{hv}t_{vi} - f_{hh}t_{hi})] \\ F_{HH} = \frac{1}{\sqrt{(t_{vi}^2 + t_{hi}^2)(t_{vs}^2 + t_{hs}^2)}} [t_{hs}(f_{vv}t_{hi} + f_{vh}t_{vi}) + t_{vs}(f_{hv}t_{hi} + f_{hh}t_{vi})] \\ F_{HV} = \frac{1}{\sqrt{(t_{vi}^2 + t_{hi}^2)(t_{vs}^2 + t_{hs}^2)}} [t_{hs}(f_{vv}t_{vi} - f_{vh}t_{hi}) + t_{vs}(f_{hv}t_{vi} - f_{hh}t_{hi})] \\ F_{VH} = \frac{1}{\sqrt{(t_{vi}^2 + t_{hi}^2)(t_{vs}^2 + t_{hs}^2)}} [t_{vs}(f_{vv}t_{hi} + f_{vh}t_{vi}) - t_{hs}(f_{hv}t_{hi} + f_{hh}t_{vi})] \end{array} \right. \quad (36)$$

Étape 4.5 Calculer la matrice des tenseurs de diffusion en amplitude du système de référence $F_{scat}(i_\theta, i_\varphi)$ pour la polarisation de la liaison pour chaque catégorie de branches et de feuilles:

$$\begin{array}{ll} \text{Polarisation verticale} & F_{scat}(i_\theta, i_\varphi) = F_{VV} \\ \text{Polarisation horizontale} & F_{scat}(i_\theta, i_\varphi) = F_{HH} \\ \text{Polarisation circulaire dextrogyre} & F_{scat}(i_\theta, i_\varphi) = \frac{1}{2} [F_{VV} + F_{HH} + j(-F_{VH} + F_{HV})] \\ \text{Polarisation circulaire lévogyre} & F_{scat}(i_\theta, i_\varphi) = \frac{1}{2} [F_{VV} + F_{HH} + j(F_{VH} - F_{HV})] \end{array} \quad (37)$$

Étape 5 Pour chaque catégorie de branches et de feuilles, calculer les premier et second moments de l'amplitude de la diffusion:

$$E \left[\left| F_{scat} \right|_{b,l}^2 \right] = \int_0^{2\pi} \int_0^{\beta_{\max}} |F_{scat}(\theta, \varphi)|^2 \frac{\sin \theta}{1 - \cos \beta_{\max}} d\theta d\varphi \quad (38)$$

où $\int_0^{2\pi\beta_{\max}} \int_0^{\beta_{\max}} f(\theta, \varphi) d\theta d\varphi$ est calculé à l'aide de la règle trapézoïdale sachant que:

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{\Delta x}{2} \sum_{k=1}^{N-1} (f(x_{k+1}) + f(x_k))$$

$$F_{scat}(\theta, \varphi) = F_{scat}(i_\theta, i_\varphi)$$

$$\Delta\theta = \frac{\beta_{\max}}{N_\theta - 1}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{N_\varphi - 1}$$

$$N_\theta = N_\varphi = 20$$

Étape 6 Répéter les *Étapes 4.1* à *4.5* en utilisant $\theta_s = \pi - \theta_i$ et $\varphi_s = \varphi_i$ pour calculer

$$E[F_{scat}]_{b,l} = \int_0^{2\pi\beta_{\max}} \int_0^{\beta_{\max}} F_{scat}(\theta, \varphi) \frac{\sin\theta}{1 - \cos\beta_{\max}} d\theta d\varphi \quad (39)$$

Étape 7 Calculer l'amplitude de la diffusion équivalente et la section efficace de diffusion équivalente, par unité de volume de la couverture végétale:

$$F^{eq} = \sum_{branches \& leaves} \rho_{b,l} E[F_{scat}]_{b,l} \quad (40)$$

$$\sigma^{eq} = \sum_{branches \& leaves} 4\pi\rho_{b,l} E\left[|F_{scat}|^2\right]_{b,l} \quad (41)$$

Étape 8 Calculer la partie imaginaire de la constante de propagation équivalente à l'intérieur de la couverture végétale, K_c''

$$K_c'' = -imag\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta_i + \frac{\lambda}{\sin\theta_i} F^{eq}\right) \quad (42)$$

Étape 9 Calculer l'affaiblissement linéique dû à la voûte végétale constituée par les arbres en décibels par mètre (dB/m):

$$\alpha_c = 20K_c'' \log_{10} e = 8.686K_c'' \quad (43)$$

Étape 10 Calculer la puissance diffusée par trajets multiples par rapport au signal en visibilité directe, $mp = 2\sigma^2$:

$$mp = 2\sigma^2 = \frac{\sigma^{eq}}{4\pi\omega^2} \int_{-H/2}^{H/2} \int_{-R}^R \int_{-R}^R \exp(-2K_c''(s_1(x, y, z) + s_2(x, y, z))) dx dy dz \quad (44)$$

où $\int_{-H/2}^{H/2} \int_{-R}^R \int_{-R}^R f(x, y, z) dx dy dz$ est calculé à l'aide de la règle trapézoïdale sachant que:

$$\begin{cases} s_1(x, y, z) = s_{1,0}(x, y, z) \times \min \left(1, \frac{\frac{H}{2} - z}{s_{1,0}(x, y, z) \cos \theta_i} \right) & \text{si } x^2 + y^2 \leq R^2 \\ s_1(x, y, z) = 0 & \text{si } x^2 + y^2 > R^2 \end{cases} \quad (45)$$

$$\text{pour } s_{1,0}(x, y, z) = \frac{(y \sin \varphi_i - x \cos \varphi_i) + \sqrt{(y \sin \varphi_i - x \cos \varphi_i)^2 - (x^2 + y^2 - R^2)}}{\sin \theta_i} \quad (46)$$

$$\begin{cases} s_2(x, y, z) = s_{2,0}(x, y, z) \times \min \left(1, \frac{-\left(\frac{H}{2} + z\right)}{s_{2,0}(x, y, z) \cos \theta_s} \right) & \text{si } x^2 + y^2 \leq R^2 \\ s_2(x, y, z) = 0 & \text{si } x^2 + y^2 > R^2 \end{cases} \quad (47)$$

$$\text{pour } s_{2,0}(x, y, z) = \frac{(-y \sin \varphi_s + x \cos \varphi_s) + \sqrt{(y \sin \varphi_s - x \cos \varphi_s)^2 - (x^2 + y^2 - R^2)}}{\sin \theta_s} \quad (48)$$

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z = \frac{\lambda}{4}$$

Étape 11 Calculer la longueur du trajet géométrique à travers l'arbre, l_{tree} (m)

Étape 11.1 Calculer δ :

$$\delta = R^2 - d_{TRx}^2 \sin^2(\varphi_i - \varphi_s) \quad (49)$$

Étape 11.2 Calculer l_{tree} :

- si $\delta \leq 0$: $l_{tree} = 0$
- si $\delta > 0$:

$$l_{tree} = \max \left(0, \min \left(\frac{d_{TRx} \cos(\varphi_i - \varphi_s) + \sqrt{\delta}}{\sin \theta_i}, \frac{h_T - h_{Rx} + H}{\cos \theta_i} \right) - \max \left(\frac{d_{TRx} \cos(\varphi_i - \varphi_s) - \sqrt{\delta}}{\sin \theta_i}, \frac{h_T - h_{Rx}}{\cos \theta_i} \right) \right) \quad (50)$$

Étape 12 Calculer la puissance de trajet direct par rapport au signal en visibilité directe, a^2 :

$$a^2 = 10^{\frac{-\alpha_c \times l_{tree}}{10}} \quad (51)$$

Étape 13 Calculer la puissance de trajet totale par rapport au signal en visibilité directe, p_{tot} :

$$p_{tot} = a^2 + 2\sigma^2 \quad (52)$$

Étape 14 Calculer le facteur de Rice K (dB):

$$K = 10 \log_{10} \left(\frac{a^2}{2\sigma^2} \right) \quad (53)$$

Étape 15 Calculer la distribution cumulative de la puissance à petite échelle au moyen de la distribution de Nakagami-Rice définie dans la Recommandation UIT-R P.1057:

$$\text{Prob}(X > x) = 2 \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right) \int_{x/\sigma\sqrt{2}}^{\infty} v \exp(-v^2) I_0\left(\frac{2va}{\sigma\sqrt{2}}\right) dv \quad (54)$$

3.2.2.2 De 30 GHz à 100 GHz

Entre 30 GHz et 100 GHz, il est recommandé d'appliquer la méthode qui suit, laquelle utilise une modélisation quasi-optique:

Étape 1 Modéliser explicitement l'arbre conformément au Tableau 9, y compris tous les éléments (branches et feuilles) dont le rayon est supérieur à $\lambda/2$, λ correspondant à la longueur d'onde.

Étape 2 Pour tout élément dont le rayon est inférieur à $\lambda/2$, calculer les paramètres liés à la couverture végétale selon la méthode utilisée entre 1 GHz et 30 GHz.

Étape 3 Déterminer les éléments de l'arbre explicitement modélisés à l'étape 1 qui croisent le rayon.

Étape 4:

- si aucun élément ne croise le rayon, utiliser les paramètres liés à la couverture végétale calculés à l'étape 2;
- dans le cas contraire, il convient d'ajouter un affaiblissement de 40 dB à l'affaiblissement en espace libre.

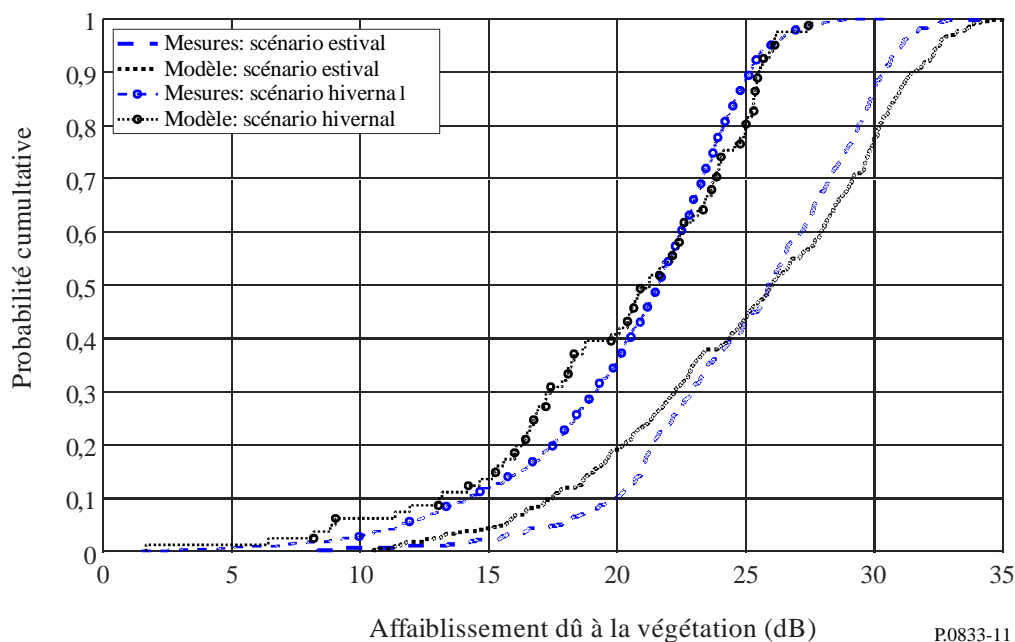
3.2.3 Effets des saisons pour un arbre unique et pour une fréquence de 60,5 GHz

L'affaiblissement dû à la végétation dépend de la saison. L'affaiblissement dû à une végétation dense en été est plus important que l'affaiblissement en hiver, en raison de la chute des feuilles.

Les fonctions de distribution cumulatives pour l'affaiblissement dû à un même arbre avec une végétation dense en été (courbes sans symboles) et une végétation appauvrie en hiver (courbes avec symboles) pour une fréquence de 60,5 GHz sont représentées dans la Fig. 11: les courbes en traits discontinus correspondent aux données mesurées et les courbes en pointillés correspondent aux données de la simulation.

FIGURE 11

Affaiblissement dû à un même arbre en été et en hiver pour une fréquence de 60,5 GHz



Le Tableau 11 indique les coefficients *a* et *b* de la distribution de Weibull caractérisant l'affaiblissement dû à la végétation mesuré à 60,5 GHz pour sept essences d'arbres ayant une végétation dense pendant l'été ainsi que pour un sous-ensemble de trois arbres après la chute de leurs feuilles en hiver.

TABLEAU 11

Affaiblissement dû à la végétation dans les scénarios estival et hivernal à 60,5 GHz

Scénario	Essence d'arbres	Diamètre (m)	Coefficients d'affaiblissement	
			a	b
Été	Micocoulier de Provence	4,5	27,05	7,13
	Bouleau	5,5	27,53	7,16
	Chêne pédonculé	12	27,92	14,91
	Magnolia à grandes fleurs	5	27,34	7,92
	Santa Maria	6	28,37	6,54
	Frêne blanc	8	24	4,66
	Épicéa de Serbie	5	35,31	11,8
Hiver	Micocoulier de Provence	4,5	22,23	5,9
	Bouleau	5,5	22,11	3,41
	Chêne pédonculé	12	25,77	5,78

La fonction de distribution cumulative pour la distribution de Weibull est donnée par l'équation suivante:

$$F(x|a, b) = \int_0^x ba^{-b}t^{b-1}e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} dt = 1 - e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} \quad (55)$$

Les paramètres a et b de la distribution de Weibull représentent respectivement la forme et l'échelle.

Les observations ont montré que la diffusion de l'angle d'arrivée dépend aussi de la saison. En l'absence de feuilles, la distribution présente un étalement angulaire plus étroit.

Le Tableau 12 indique les coefficients μ et σ de la distribution normale caractérisant la diffusion de l'angle d'arrivée due à la végétation mesurée à 60,5 GHz pour sept essences d'arbres dans des conditions estivales de végétation dense ainsi que pour un sous-ensemble de trois arbres dans des conditions hivernales de végétation appauvrie suite à la chute des feuilles.

TABLEAU 12

Coefficients de diffusion de l'angle d'arrivée dans les scénarios estival et hivernal à 60,5 GHz

Scénario	Essence d'arbres	Diamètre (m)	Coefficients de diffusion de l'angle d'arrivée (degrés)	
			μ	σ
Été	Micocoulier de Provence	4,5	0,45	4,91
	Bouleau	5,5	0,32	4,05
	Chêne pédonculé	12	1,31	4,37
	Magnolia à grandes fleurs	5	0,45	3,98
	Santa Maria	6	-1,18	4,31
	Frêne blanc	8	-1,89	3,18
	Épicéa de Serbie	5	-0,24	3,7
Hiver	Micocoulier de Provence	4,5	-3,03	3,49
	Bouleau	5,5	-1,02	3,91
	Chêne pédonculé	12	-2,61	4,43

La fonction de distribution cumulative pour la distribution normale est donnée par l'équation suivante:

$$F(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt, \quad x \in \mathbb{R}. \quad (56)$$

Les paramètres de la distribution normale μ et σ représentent respectivement la moyenne et l'écart type.

4 Dépolarisation

Des mesures précédemment effectuées à 38 GHz donnent à penser que le phénomène de dépolarisation dans la végétation peut être assez important, c'est-à-dire que le signal contrapolaire émis peut être de même ordre que le signal copolaire. Toutefois, pour les profondeurs importantes de végétation requises pour que ce phénomène se produise, le phénomène d'affaiblissement serait si important que les deux composantes – copolaire et contrapolaire – seraient situées au-dessous de la dynamique du récepteur.

5 Effets dynamiques

On a observé que sur une liaison traversant une masse végétale, l'amplitude du signal reçu varie rapidement lorsqu'il y a des mouvements dans la végétation. Ceux-ci sont essentiellement dus au vent et les mesures effectuées à 38 GHz et à 42 GHz ont montré qu'il existe une forte corrélation entre les fluctuations de l'amplitude et la vitesse du vent.

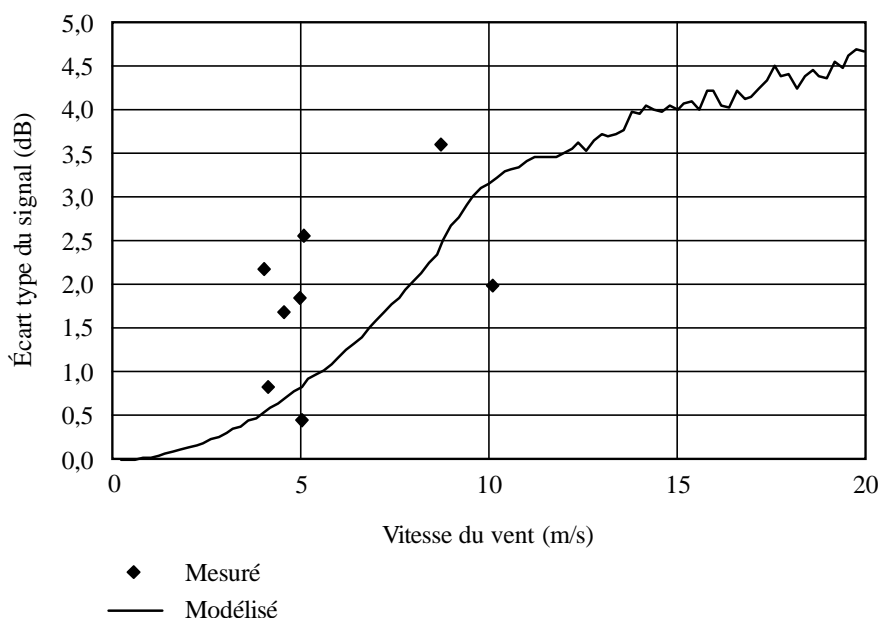
Lorsque l'on tient compte des effets de la végétation, il est évident que l'environnement ne restera pas statique. Sur un site de réception, il se peut qu'il y ait un ou plusieurs arbres le long du trajet du signal mais l'affaiblissement moyen n'est pas suffisant pour que le niveau du signal reçu tombe au-dessous de la marge du système. Toutefois, on a constaté que lorsque les feuilles des arbres bougent, le niveau du signal varie de façon dynamique dans des proportions importantes, ce qui rend impossible la fourniture du service. Plusieurs mesures du niveau du signal traversant des arbres, en fonction du temps, ont été faites et elles font apparaître une réduction moyenne du niveau du signal d'environ 20 dB par arbre. On a constaté que le niveau du signal varie dans des proportions considérables, avec des pertes fréquentes du signal (affaiblissement pouvant aller jusqu'à 50 dB) durant environ 10 ms.

On note que la structure des pertes du signal observée dans les mesures chronologiques ne peut être due qu'à l'interaction d'un certain nombre de composantes de diffusion à travers la végétation. Pour simuler ce mécanisme de propagation, on a calculé la somme des champs d'un certain nombre de sources de diffusion positionnées de façon aléatoire le long d'une droite tangente au trajet. Pour que la variabilité du signal résultant en fonction du temps soit satisfaisante, on a fait varier la position de chaque source de diffusion de façon sinusoïdale afin de simuler le mouvement des branches des arbres dans le vent. On a fait augmenter la fréquence et l'importance de la variabilité de la position en fonction de l'augmentation de la vitesse du vent. On a observé une bonne concordance entre le modèle et les observations.

Les séries chronologiques modélisées et les écarts types de l'amplitude du signal, pour des vitesses du vent comprises entre 0 et 20 m/s, sont présentées dans la Fig. 12 par comparaison aux données mesurées.

FIGURE 12

Écart type des séries chronologiques mesurées et modélisées à 40 GHz en fonction de la vitesse du vent



Pour une approximation linéaire simple, l'écart type σ est modélisé comme suit:

$$\sigma = v/4 \quad \text{dB} \quad (57)$$

où v est la vitesse du vent (m/s).

Il convient de noter que même si ce type de modèle est, par nature, fonction de la fréquence, les différences de longueur du trajet à travers les arbres sont petites et l'affaiblissement sur une largeur de bande type de 40 MHz apparaîtra comme uniforme. L'affaiblissement rapide est dû à la variabilité du milieu en fonction du temps.

Le Tableau 13 donne des données types pour l'écart moyen et l'écart type de l'affaiblissement mesuré à 38 GHz pour trois types d'arbres dans des conditions calmes et en présence de vent fort.

TABLEAU 13

Dynamique des évanouissements dus à la végétation mesurés à 38 GHz

Type d'arbre		Buisson d'églantier (diamètre de 2 m)	Pommier (diamètre de 2,8 m)	Pin (diamètre de 1,5 m)
Pas de vent	Affaiblissement moyen (dB)	8,6	17,4	7,7
	Écart type (dB)	2,0	2,8	2,2
Vent fort	Affaiblissement moyen (dB)	11,7	17,8	12,1
	Écart type (dB)	4,4	4,2	4,3

6 Caractéristiques de l'étalement du temps de propagation dû à la végétation

Un signal qui traverse la végétation se propage par trajets multiples en raison de la diffusion. Un signal d'entrée fait l'objet d'un étalement du temps de propagation. Ce dernier peut avoir des incidences significatives sur les systèmes numériques large bande et il est donc important de pouvoir prévoir les caractéristiques de l'étalement du temps de propagation dû à la végétation.

Les données présentées dans le Tableau 14s sont fondées sur les données de mesure de fréquences large bande fournies par la République de Corée. Les caractéristiques temporelles ont été obtenues pour un signal sur porteuse de 3,5 GHz, modulé par une impulsion de 1,5 ns. La largeur de bande à 3 dB du signal ainsi obtenu, modulé par impulsions, est de 0,78 GHz.

TABLEAU 14

Caractéristiques de l'étalement du temps de propagation dû à la végétation

Paramètres	Ginkgo	Cerisier du Japon	Érable trident	Pin coréen	Cèdre de l'Himalaya	Platane américain	Metasequoia glyptostroboides
	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles	En feuilles
Profondeur de la végétation (m)	5,4	6,2	4,3	5,2	4,7	6,5	4,7
Étalement du temps de propagation (ns)	7,27	8,23	5,89	6,62	6,39	2,56	6,56