

## RECOMMANDATION UIT-R P.833-5

**Affaiblissement dû à la végétation**

(Question UIT-R 202/3)

(1992-1994-1999-2001-2003-2005)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

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

*recommande*

**1** d'utiliser les données de l'Annexe 1 pour évaluer l'affaiblissement dû à la végétation entre 30 MHz et 60 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 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:

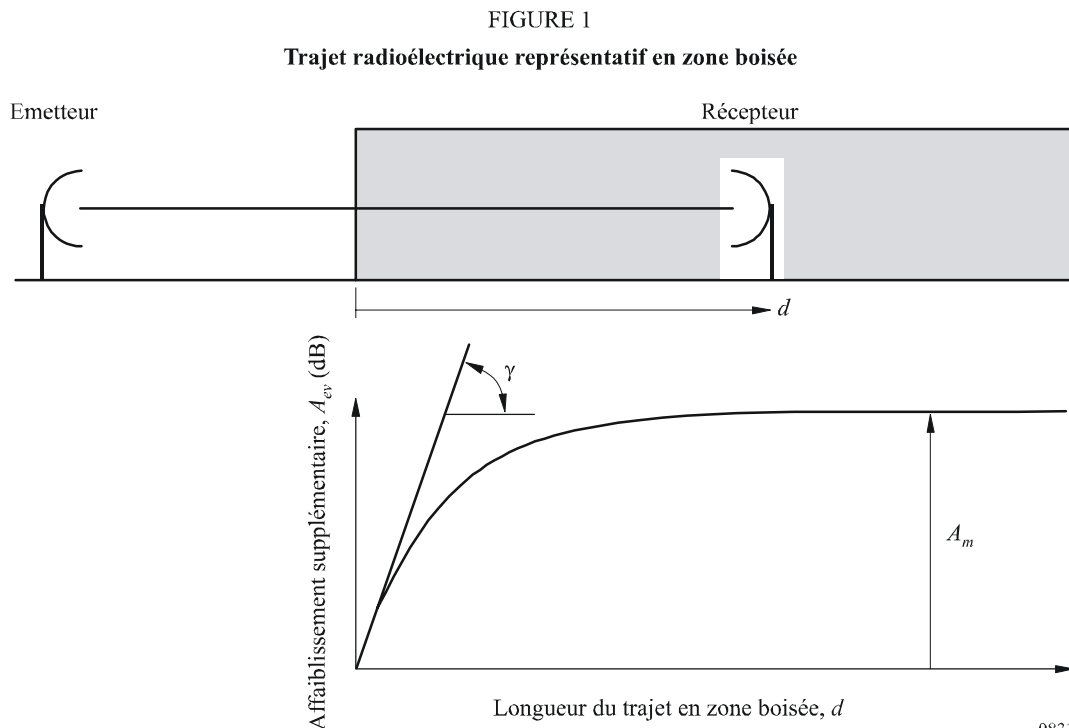
- le taux d'affaiblissement linéique (dB/m) résultant essentiellement de la dispersion de l'énergie sur le trajet radioélectrique, analogue à ce que l'on pourrait mesurer sur un trajet très court;
- l'affaiblissement supplémentaire maximal total dû à la végétation sur le trajet radioélectrique (dB) limité 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)
- $\gamma$ : 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).



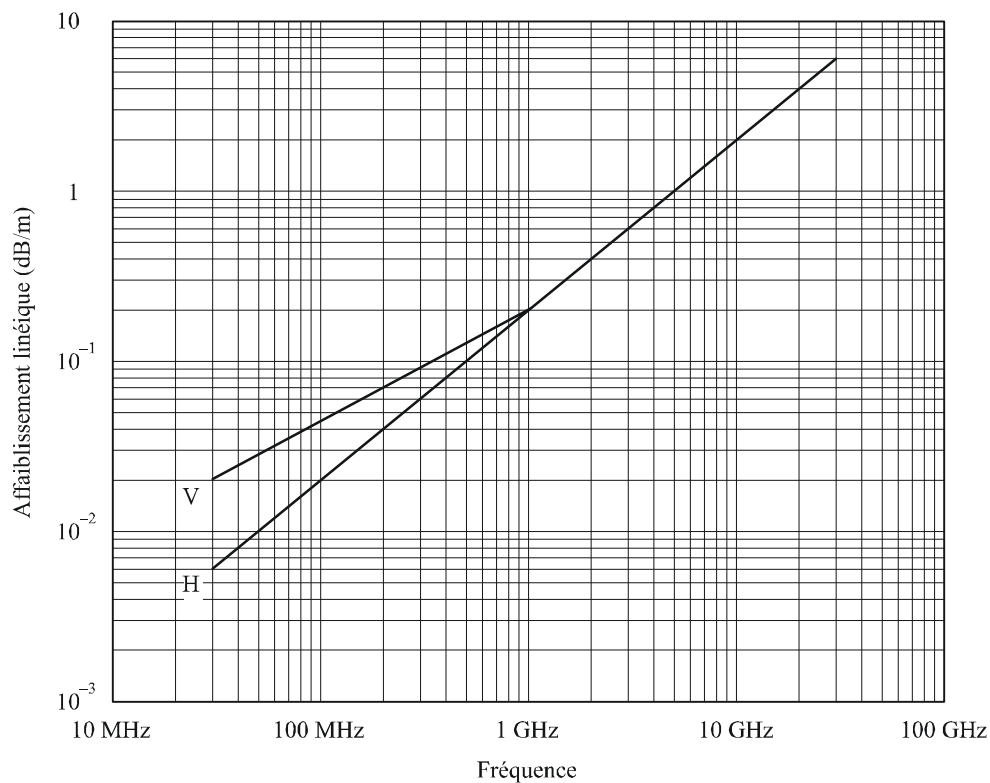
Il importe de noter que l'affaiblissement supplémentaire  $A_{ev}$  s'ajoute à toutes les autres composantes et non pas seulement à l'affaiblissement en espace libre. Ainsi, à supposer que la configuration géométrique du trajet radioélectrique de la Fig. 1 exclut un dégagement de Fresnel intégral,  $A_{ev}$  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,  $\gamma$  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 Fig. 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.

FIGURE 2  
Affaiblissement linéique en zone boisée



V: polarisation verticale  
H: polarisation horizontale

0833-02

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.

A 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.

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  $\alpha$ . 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  $\alpha$ . 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.

### 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:

$$A_{et} = d \gamma \quad (3)$$

où:

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

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

et  $A_{et} \leq$  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 (3) 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.

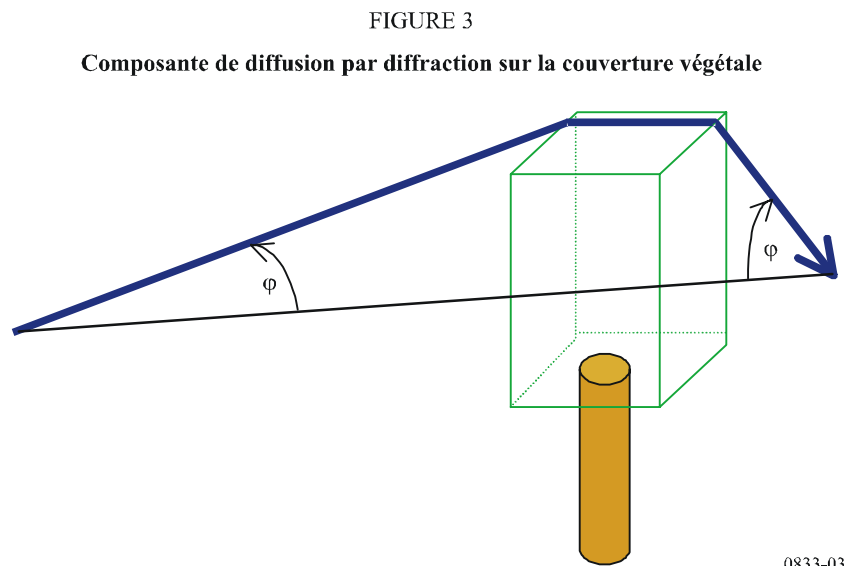
### 3.2 Au-dessus de 1 GHz

Pour 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 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. 3.



Cette composante est calculée comme suit:

$$L_{top} = L_{top\_diff} + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad (4)$$

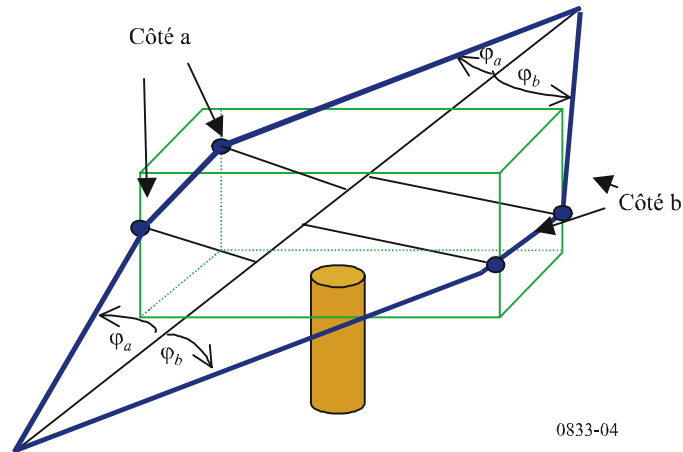
où  $G_{Tx}(\varphi)$  et  $G_{Rx}(\varphi)$  sont, respectivement, les affaiblissements dus aux angles de l'onde diffractée quittant l'antenne de l'émetteur et arrivant dans celle du récepteur.  $L_{top\_diff}$  est l'affaiblissement de diffraction total calculé selon la méthode de la Recommandation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

#### 3.2.2 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. 4.

FIGURE 4

Composantes de diffusion par diffraction autour de la couverture végétale



Les affaiblissements sont calculés à l'aide des équations (5) et (6).

$$L_{sidea} = L_{diff\_sidea} + G_{Tx}(\varphi_a) + G_{Rx}(\varphi_a) \quad (5)$$

et

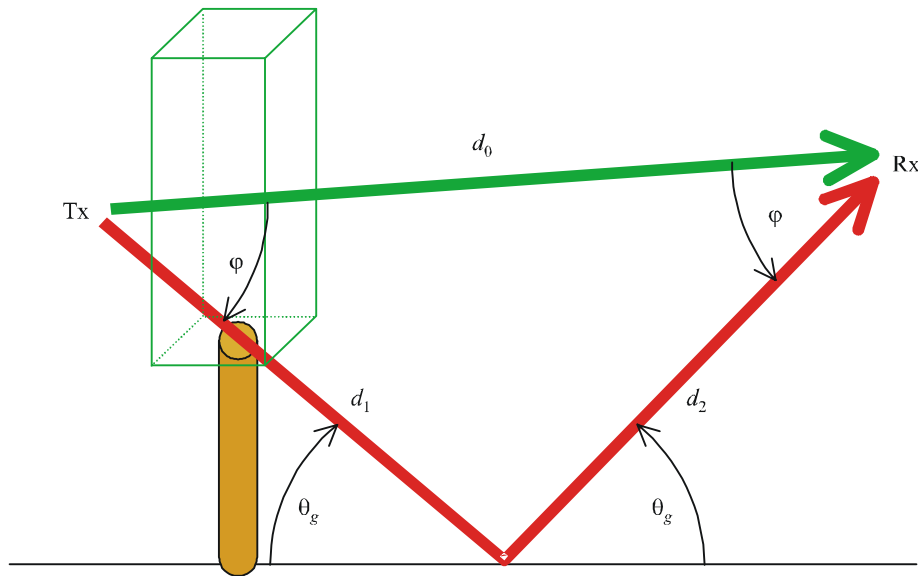
$$L_{sideb} = L_{diff\_sideb} + G_{Tx}(\varphi_b) + G_{Rx}(\varphi_b) \quad (6)$$

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.

### 3.2.3 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. 5.

FIGURE 5  
Composante réfléchi sur le sol



0833-05

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  $\theta_g$  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:

$$L_{ground} = 20 \log_{10} \left( \frac{d_1 + d_2}{d_0} \right) - 20 \log_{10}(R_0) + G_{Tx}(\varphi) + G_{Rx}(\varphi) \quad (7)$$

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.

### 3.2.4 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 (8)):

- $\alpha$ : rapport entre la puissance diffusée vers l'avant et la puissance diffusée totale
- $\beta$ : ouverture de faisceau de la fonction de phase (degrés)
- $\sigma_\tau$ : 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).

Etant donné les paramètres d'entrée: fréquence (GHz), taille typique des feuilles de la végétation à modéliser et l'indice de surface foliaire (LAI, *leaf area index*) des essences d'arbres, on peut obtenir la valeur la plus proche de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $W$  et  $\sigma_\tau$  à partir des tableaux de paramètres RET (Tableaux 1 à 4).

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 d'arbres 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,  $L_{\text{scat}}$ , est donné par la formule:

$$L_{\text{scat}} = -10 \log_{10} \left( \begin{aligned} & e^{-\tau} + \frac{\Delta\gamma_R^2}{4} \cdot \{ [e^{-\hat{\tau}} - e^{-\tau}] \cdot \bar{q}_M + e^{-\tau} \cdot \sum_{m=1}^M \frac{1}{m!} (\alpha W \tau)^m [\bar{q}_m - \bar{q}_M] \} \\ & + \frac{\Delta\gamma_R^2}{2} \cdot \left\{ e^{-\tau} \cdot \frac{1}{P_N} + \sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N [A_k e^{-\frac{\hat{\tau}}{s_k}} \cdot \sum_{n=0}^N \frac{1}{1 - \frac{\mu_n}{s_k}}] \right\} \end{aligned} \right) \quad (8)$$

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  $\tau$  en fonction de la distance  $z$

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

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

$$\mu_n = -\cos\left(\frac{n\pi}{N}\right) \quad (9)$$

$$P_n = \sin^2\left(\frac{\pi}{2N}\right)$$

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

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:

$$P_n = \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{N}\right) \text{ et } \hat{W} = \frac{(1 - \alpha)W}{1 - \alpha W} \quad (10)$$



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 (10) 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:

$$\sum_{k=\frac{N+1}{2}}^N \frac{A_k}{1 - \frac{\mu_n}{s_k}} = \frac{\delta_n}{P_N} \quad \text{pour} \quad n = \frac{N+1}{2} \dots N \quad (11)$$

où:

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

et

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

### 3.2.5 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:

$$L_{total} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{\left(\frac{-L_{sidea}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{sideb}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{top}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{ground}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{scat}}{10}\right)} \right\} \quad (12)$$

TABLEAU 1

Valeurs ajustées de  $\alpha$  en fonction de la fréquence/de l'essence d'arbre

	Châtaignier	Erable	Erable	Platane de Londres	Platane de Londres	Tilleul commun	Tilleul commun	Sycomore	Sycomore
	En feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles
LAI		1,691		1,93		1,475		1,631	0,483
Taille des feuilles	0,300	0,15		0,250		0,100		0,15	
Fréquence (GHz)	$\alpha$								
1,3	0,9	0,95	0,9	0,95	0,9	0,9	0,95		0,95
2	0,75		0,95	0,95			0,95		0,95
2,2			0,95	0,5					
11	0,85	0,9		0,7	0,95	0,95	0,95		0,95
37				0,95					
61,5		0,8		0,25				0,9	

TABLEAU 2

Valeurs ajustées de  $\beta$  en fonction de la fréquence/de l'essence d'arbre

	Châtaignier	Erable	Erable	Platane de Londres	Platane de Londres	Tilleul commun	Tilleul commun	Sycomore	Sycomore
	En feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles
LAI		1,691		1,93		1,475		1,631	0,483
Taille des feuilles	0,300	0,15		0,250		0,100		0,15	
Fréquence (GHz)	$\beta$								
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	

TABLEAU 3

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

	Châtaignier	Erable	Erable	Platane de Londres	Platane de Londres	Tilleul commun	Tilleul commun	Sycomore	Sycomore
	En feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles
LAI		1,691		1,93		1,475		1,631	0,483
Taille des feuilles	0,300	0,15		0,250		0,100		0,15	
Fréquence (GHz)					<i>W</i>				
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		0,8		0,5				0,9	

TABLEAU 4

Valeurs ajustées de  $\sigma_{\tau}$  en fonction de la fréquence/de l'essence d'arbre

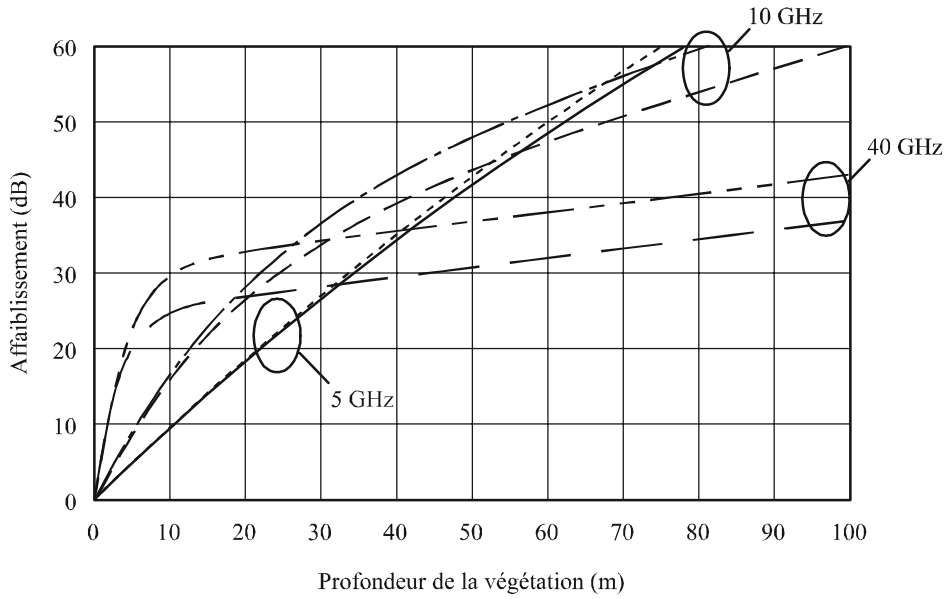
	Châtaignier	Erable	Erable	Platane de Londres	Platane de Londres	Tilleul commun	Tilleul commun	Sycomore	Sycomore
	En feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles	En feuilles	Sans feuilles
LAI		1,691		1,93		1,475		1,631	0,483
Taille des feuilles	0,300	0,15		0,250		0,100		0,15	
Fréquence (GHz)					$\sigma_{\tau}$				
1,3	0,772	0,241	0,139	0,147	0,221	0,22	0,591		0,36
2	0,091		0,176	0,203			0,692		0,249
2,2			0,377	0,244					
11	0,124	0,321		0,75	0,459	0,56	0,757		0,179
37				0,441					
61,5		0,567		0,498				0,647	

#### **4      Dépolarisation**

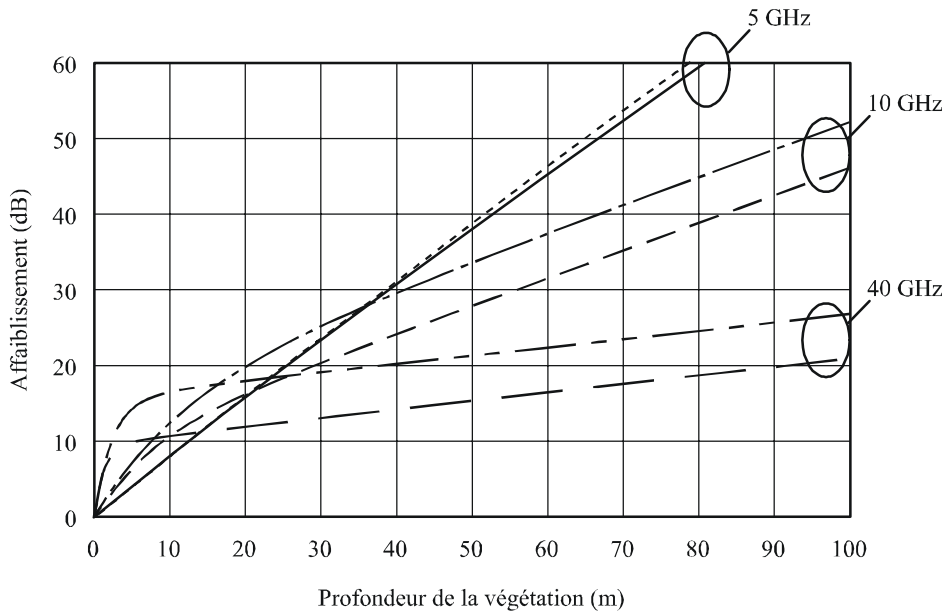
Des mesures précédemment effectuées à 38 GHz donnent à penser que le phénomène de dépolarisation dans la végétation peut être assez important, c'est-à-dire que le signal contrapolaire émis peut être de même ordre que le signal copolaire. Toutefois, pour les profondeurs importantes de végétation requises 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.

FIGURE 6

Affaiblissement pour des zones d'illumination de 0,5 m<sup>2</sup> et 2 m<sup>2</sup>, a) arbres avec feuilles, b) arbres sans feuilles\*



a)



b)



\* 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.

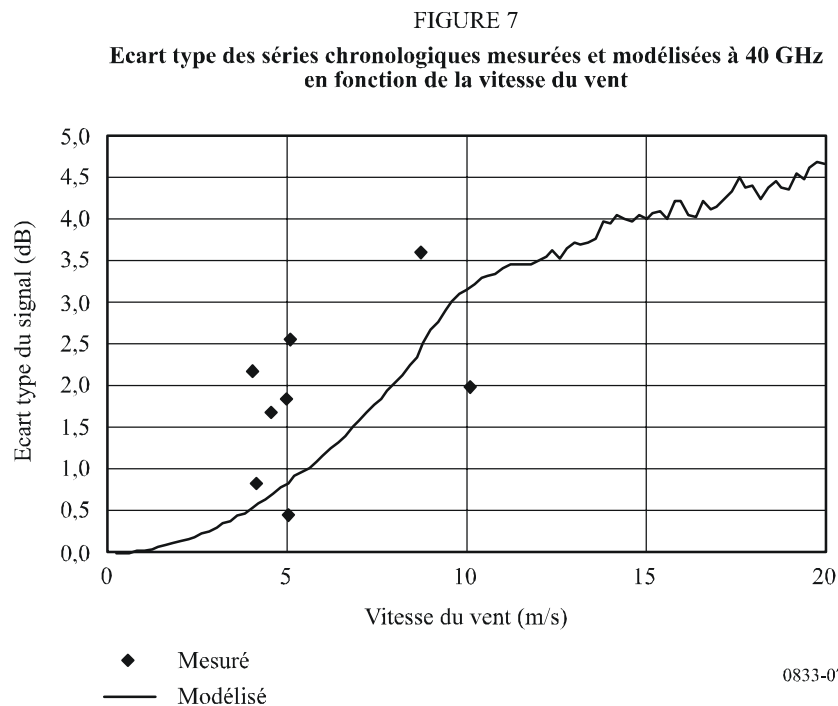
## 5 Effets dynamiques

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. 7 par comparaison aux données mesurées.



Pour une approximation linéaire simple, l'écart type  $\sigma$  est modélisé comme suit:

$$\sigma = v/4 \quad \text{dB} \quad (13)$$

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 5 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 fort vent.

TABLEAU 5

**Dynamique des évanouissements dus à la végétation mesurés à 38 GHz**

Type d'arbre		Buisson d'égantier (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
	Ecart type (dB)	2,0	2,8	2,2
Vent fort	Affaiblissement moyen (dB)	11,7	17,8	12,1
	Ecart type (dB)	4,4	4,2	4,3