

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R BT.1893-1
(10/2015)

**Méthodes d'évaluation des dégradations
causées à la réception de télévision
numérique par une éolienne**

Série BT
Service de radiodiffusion télévisuelle



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 l'Annexe 1 de 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: <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	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, 2017

© UIT 2017

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 BT.1893-1

Méthodes d'évaluation des dégradations causées à la réception de télévision numérique par une éolienne

(Question UIT-R 69-1/6)

(2011-2015)

Domaine d'application

La présente Recommandation décrit des méthodes permettant d'évaluer les dégradations susceptibles d'être causées par une installation éolienne comprenant une ou plusieurs machines à la réception de télévision numérique.

NOTE 1 – La Recommandation UIT-R BT.805 traite de l'évaluation des dégradations de la réception de la télévision analogique dues aux éoliennes.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les réflexions sur des objets en mouvement, comme les pales d'une éolienne, risquent de dégrader sérieusement la réception de la télévision;
- b) que ce risque est particulièrement grave, car le défaut peut être quasi permanent et n'est atténué que lorsque l'éolienne ne fonctionne pas;
- c) qu'il est important de disposer d'une méthode simple pour calculer les dégradations éventuelles que peut provoquer l'installation d'une éolienne;
- d) que des techniques de suppression des réflexions sont à l'étude et qu'elles réduiront peut-être les dégradations causées par les éoliennes;
- e) que les signaux réfléchis peuvent avoir des effets différents sur les signaux de télévision numérique;
- f) que les signaux réfléchis peuvent avoir des effets différents en fonction du système de modulation numérique utilisé;
- g) que les pales des éoliennes sont généralement fabriquées en matériaux composites, qui ont des coefficients de réflexion différents de ceux des métaux;
- h) que les pales des éoliennes peuvent être conçues de manière à inclure d'autres éléments susceptibles d'avoir aussi une incidence sur les signaux de télévision;
- i) qu'il faut également tenir compte de la diffusion due aux mâts des éoliennes;
- j) que l'emplacement des éoliennes et leurs diagrammes de diffusion ont une incidence sur le niveau de dégradation causée dans les plans vertical et horizontal;
- k) que le nombre d'éoliennes en un emplacement donné aura une incidence sur les diagrammes de diffusion,

notant

- a) que le Rapport UIT-R BT.2142 présente une analyse approfondie des effets de la diffusion des signaux de télévision numérique par les éoliennes;
- b) que la méthode décrite dans l'Annexe 1 est une version simplifiée de l'analyse complète présentée dans la Partie A du Rapport UIT-R BT.2142;

c) que le Rapport UIT-R BT.2142 fournit une explication approfondie de la méthode décrite dans les Pièces jointes 2, 3 et 4, qui traite des questions identifiées dans le *recommande en outre* 1, 2 et 3 de la Recommandation UIT-R BT.1893-0 à savoir l'incidence de la diffusion par les mâts, l'effet de la rotation des pales, la composition des pales non métalliques et le diagramme en élévation applicable à la diffusion,

recommande

1 d'utiliser la méthode décrite dans l'Annexe 1 pour évaluer les risques de brouillages causés par une seule éolienne à la réception de télévision numérique;

2 d'utiliser la méthode décrite dans l'Annexe 2 pour obtenir un modèle de canal permettant de caractériser la propagation par trajets multiples en présence de plusieurs éoliennes¹ dans la bande de radiodiffusion en ondes décimétriques;

3 d'utiliser la méthode décrite dans l'Annexe 3 pour élaborer une évaluation des risques de brouillages causés par une éolienne à la réception de télévision numérique (DVB-T),

encourage

les administrations à appeler l'attention des autorités compétentes de leur pays sur la présente Recommandation.

Annexe 1

Modèle simplifié de la dégradation causée par une éolienne à la réception de la télévision

La Figure 1 donne une vue en plan du problème de rétrodiffusion dû à l'éolienne.

En un point de réception quelconque, R , le champ utile est FSR . A l'emplacement de l'éolienne, WT , le champ est $FSWT$. On suppose que le point de réception est situé à une distance r (m) de la pale² de l'éolienne. Un «coefficient de diffusion», ρ , qui comprend l'affaiblissement en espace libre sur le trajet entre l'emplacement de l'éolienne et le point de réception, peut être défini à l'aide de la formule:

$$\rho = \frac{A}{\lambda r} g(\theta)$$

où:

$$g(\theta) = \text{sinc}^2\left(\frac{\overline{W}}{\lambda}(\cos \theta - \cos \theta_0)\right) \sin \theta$$

¹ Les sites dotés de multiples éoliennes sont couramment appelés des «parcs éoliens».

² Aux fins de la présente analyse, on suppose que les pales de l'éolienne sont métalliques et à peu près triangulaires. Toutefois, étant donné que les pales sont généralement fabriquées en fibre de verre, ou avec d'autres matériaux composites, la diffusion est inférieure de 6 à 10 dB à celle due à des pales métalliques.

et:

\bar{W} : largeur moyenne de la pale (m)

λ : longueur d'onde (m)

A : superficie de la pale (m²)

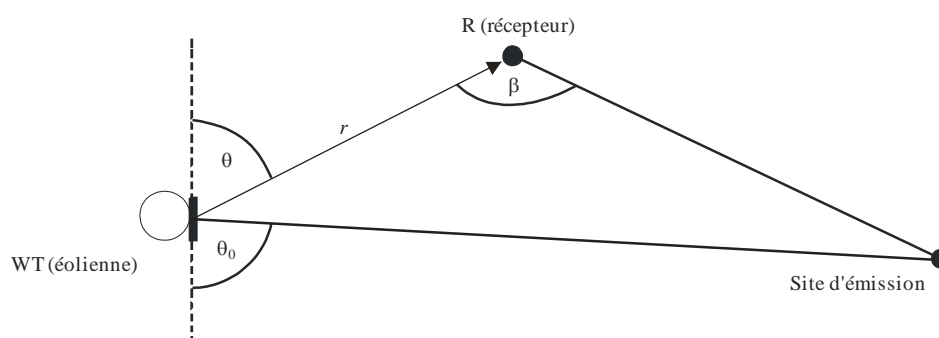
θ_0 : angle du signal incident sur la pale

θ : angle du signal de diffusion par rapport à la pale.

La valeur maximale de ce coefficient de diffusion due à une pale en position verticale est atteinte lorsque la direction d'incidence et la direction de diffusion sont perpendiculaires à la pale; et est donnée par la formule:

$$\rho_{max} = \frac{A}{\lambda r}$$

FIGURE 1



BT.18930

Dans le cas d'un trajet en espace libre, de longueur r (m), entre l'éolienne et le point de réception, le champ brouilleur peut se calculer par:

$$FSWT + 20 \log \rho$$

Le coefficient de diffusion ρ tient compte uniquement de la rétrodiffusion due aux pales. Il est à noter que le mât métallique de l'éolienne entraîne également une rétrodiffusion statique non négligeable. La diffusion vers l'avant due aux pales peut être significative, mais présente une amplitude moindre que la rétrodiffusion et est plus complexe à calculer. La diffusion vers l'avant due au mât est minime. Il convient également de noter que le diagramme de diffusion varie d'au moins 10 dB lorsque les pales sont en rotation. Pour une analyse complète, voir le Rapport UIT-R BT.2142.

La Recommandation UIT-R BT.419 indique, en fonction de β (voir la Fig. 1), la discrimination due à la directivité de l'antenne de réception; cette valeur devrait être utilisée pour déterminer le rapport signal utile sur signal brouilleur en un point de réception donné.

Un exemple d'utilisation de cette méthode est donné dans la Pièce jointe 1.

Pièce jointe 1 à l'Annexe 1

Exemple d'utilisation de la méthode d'évaluation simplifiée

Comme indiqué sur la Fig. 1 de l'Annexe 1, identifier le point d'un emplacement de réception quelconque à proximité de l'emplacement d'une éolienne en projet.

En premier lieu, on calculera ou, de préférence, on mesurera les valeurs du champ *FSR* aux divers points de réception.

Il ne sera sans doute pas nécessaire d'étudier ce qui se passera à plus de 10 km environ de l'emplacement envisagé pour l'éolienne (ou des emplacements s'il y a plusieurs éoliennes). Cependant, dans certains cas particuliers, par exemple lorsque des immeubles font écran à l'émetteur utile mais sont en vue directe de l'éolienne, il faudra peut-être augmenter cette distance.

Calculer, ou de préférence, mesurer le champ, *FSWT*, à l'emplacement de l'éolienne, au voisinage de l'axe de rotation des pales.

En chacun des points de réception, *R*:

- calculer le coefficient de diffusion, ρ , pour le trajet de l'éolienne au point de réception;
- calculer le champ brouilleur en prenant $FSWT + 20 \log \rho$;
- calculer le champ utile *FSR*;
- calculer le rapport signal utile sur signal brouilleur compte tenu de la discrimination due à la directivité de l'antenne de réception;
- à l'aide des informations figurant dans la Pièce jointe 2, évaluer les dégradations susceptibles d'être causées à la réception de télévision numérique, compte tenu du rapport signal utile sur signal brouilleur calculé au point de réception.

On peut présenter les résultats de cette étude sous la forme d'une carte faisant apparaître les régions ou les points où l'on s'attend à une dégradation de la réception.

On notera que cette méthode est plus compliquée s'il y a plus d'une éolienne en un emplacement donné, car il existera alors plusieurs sources de dégradation pour chaque point de réception. On trouvera dans le Rapport UIT-R BT.2142 des exemples de prévisions pour un grand parc éolien.

Annexe 2

Modèle de canal servant à caractériser la propagation des signaux en présence d'un parc éolien dans les bandes de radiodiffusion en ondes décimétriques

Introduction

Il convient de noter que le modèle de canal est indépendant de la norme télévisuelle et qu'il peut par conséquent être utilisé pour estimer les effets éventuels d'un parc éolien sur tout service de télévision occupant la bande des ondes décimétriques.

Le modèle de canal applicable à la propagation en présence d'éoliennes est un modèle avec ligne à retard à prises présentant plusieurs trajets et:

- les retards correspondants;
- les amplitudes moyennes; et
- un spectre Doppler associé à chaque trajet pour tenir compte de la variabilité causée par la rotation des pales.

Dans le modèle de canal, toutes ces composantes peuvent être adaptées aux caractéristiques du cas à l'étude. Plus précisément, ces paramètres sont spécifiés pour chaque emplacement de réception situé dans la zone de couverture d'un émetteur susceptible d'être affecté.

Pour ce faire, il est possible d'utiliser une base de données topographique numérique pour diviser la zone de couverture en petites parcelles de taille donnée (pixel). Pour chacun des points centraux de ces pixels, on déterminera, comme indiqué ci-dessous, les paramètres du modèle de canal pour ces conditions particulières. Ce processus, qui sera facilement mis en oeuvre dans des outils de planification, donne rapidement une vue générale des dégradations éventuellement causées par le parc éolien.

Pour adapter le modèle de canal aux caractéristiques du cas à l'étude, il est nécessaire de fournir en entrée les quelques données figurant dans le Tableau 1. Les paramètres nécessaires qui sont obtenus à partir des données d'entrée du Tableau 1 sont énumérés dans le Tableau 2.

TABLEAU 1

Données en entrée visant à adapter le modèle de canal aux spécificités du cas à l'étude

	Type	Description
Pour chaque éolienne	Position	Coordonnées géographiques, hauteur du terrain (m)
	Dimension du mât	Dimension verticale du mât (m) Diamètres supérieur et inférieur du mât (m); diamètre de l'extrémité supérieure du mât (juste sous la nacelle) et diamètre de la base du mât (au niveau du sol)
	Longueur des pales l	Dimension longitudinale des pales (m)
	Vitesse de rotation maximale, ω_{max}	Vitesse de rotation maximale des pales (rpm)
Émetteur	Position	Coordonnées géographiques, y compris la hauteur du terrain (m)
	Diagramme d'antenne de l'émetteur	Diagramme de rayonnement de l'antenne de l'émetteur
	Hauteur de l'antenne	Hauteur au-dessus du sol du centre géométrique de l'antenne dans la tour de télécommunication où elle est installée (m)
	Fréquence, f	Fréquence de travail dans la bande des ondes décimétriques (Hz)
	Puissance, P_t	Puissance maximale de l'émetteur (W)
Récepteur	Position	Coordonnées géographiques, y compris la hauteur du terrain (m)
	Diagramme d'antenne du récepteur	Diagramme d'antenne du récepteur
	Hauteur de l'antenne de réception	Hauteur au-dessus du niveau du sol (m)

TABLEAU 2

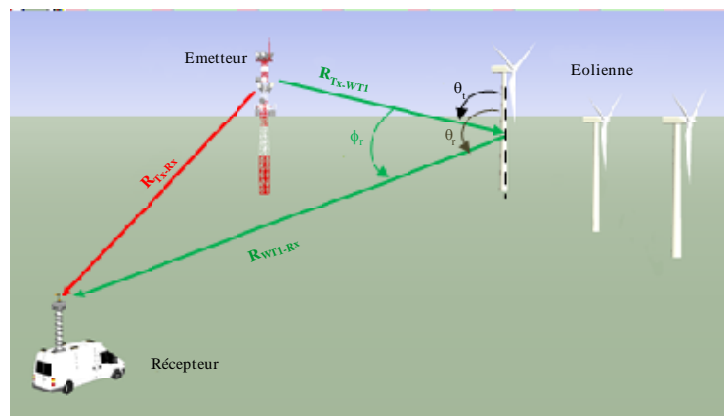
Données calculées à partir des données d'entrée figurant dans le Tableau 1

Symbole	Description
R_{Tx-WTi}	Distance entre l'émetteur et l'éolienne (m) pour l'éolienne WT
R_{WTi-Rx}	Eolienne WT, distance entre l'éolienne et le récepteur (m)
R_{Tx-Rx}	Distance émetteur-récepteur (m)
G_{Tx-WTi}	Gain du diagramme de rayonnement de l'émetteur en direction de la i ème éolienne (numérique par rapport à une antenne isotrope)
G_{Rx-WTi}	Gain du diagramme de rayonnement du récepteur en direction de la i ème éolienne (numérique par rapport à une antenne isotrope)
G_{Tx-Rx}	Gain du diagramme de rayonnement de l'émetteur en direction du récepteur (numérique par rapport à une antenne isotrope)
G_{Rx-Tx}	Gain maximal de l'antenne de réception (numérique par rapport à une antenne isotrope)
r	Rayon moyen du mât (m), calculé en effectuant la moyenne arithmétique du rayon supérieur et du rayon inférieur
L	Longueur de la surface inclinée du mât, qui est un cône circulaire droit tronqué (m); on peut prendre la hauteur verticale du mât pour valeur approchée
ϕ_r	Angle bistatique dans le plan horizontal (antenne d'émission-éolienne-antenne de réception) mesuré comme dans une vue en plan, pour chaque turbine (radians)
θ_t	Position angulaire de l'antenne d'émission télévisuelle dans le plan vertical mesurée par rapport au zénith, pour chaque éolienne, en prenant pour points de référence la hauteur de l'antenne d'émission et le point à mi-hauteur du mât (radians)
θ_r	Position angulaire de l'antenne de réception télévisuelle dans le plan vertical mesurée par rapport au zénith, pour chaque éolienne, en prenant pour points de référence le point à mi-hauteur du mât et la hauteur de l'antenne de réception (radians)

La Figure 2 donne une vue générale de la situation de brouillage dans le parc éolien.

FIGURE 2

Vue générale de la situation de brouillage dans le parc éolien



Nombre de trajets

En première approche, le nombre de trajets est égal au nombre total d'éoliennes dans le parc, plus un trajet statique correspondant au signal sortant de l'émetteur. Le nombre de trajets peut être réduit, en fonction des résultats obtenus concernant leurs retards et leurs amplitudes, comme indiqué dans les sous-sections suivantes.

Retards relatifs des trajets

Pour chaque éolienne, le retard relatif τ_i (s) du signal diffusé est calculé en fonction de la différence de distance entre le trajet direct (antenne d'émission de télévision – antenne de réception de télévision) et le trajet du signal diffusé (antenne d'émission de télévision – éolienne – antenne de réception de télévision) conformément à l'Equation (1).

$$\tau_i = \frac{(R_{Tx-WTi} + R_{WTi-Rx} - R_{Tx-Rx})}{c} \quad (1)$$

où:

- R_{Tx-WTi} : distance entre l'antenne d'émission et la i ème éolienne (m)
- R_{WTi-Rx} : distance entre la i ème éolienne et l'antenne de réception (m)
- R_{Tx-Rx} : distance entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception (m)
- c : vitesse de la lumière (m/s).

Amplitude moyenne des trajets

Le trajet statique associé à un retard relatif nul (c'est-à-dire le trajet direct entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception) est pris comme référence, de sorte que son amplitude moyenne est égale à 0 dB. Alors, l'amplitude relative moyenne de chacun des trajets variables dans le temps est donnée par le rapport entre la puissance du signal diffusé par l'éolienne correspondante $P_{Tx-WTi-Rx}$ et la puissance du signal direct provenant de l'émetteur P_{Tx-Rx} .

La puissance directe émise par l'antenne d'émission à l'emplacement de réception, P_{Tx-Rx} , est calculée en fonction de la distance entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception, R_{Tx-Rx} , du gain de l'antenne d'émission à l'antenne de réception dans la direction de l'antenne de réception, G_{Tx-Rx} , du gain maximum de l'antenne de réception, G_{Rx-Tx} , et de la longueur d'onde, λ , ainsi que des affaiblissements de propagation supplémentaires correspondants, L_{prop} (par exemple les affaiblissements par diffraction dus aux particularités du relief), comme indiqué dans l'Equation (2).

$$P_{Tx-Rx} = \frac{P_t G_{Tx-Rx} G_{Rx-Tx} \lambda^2 L_{prop}}{(4\pi)^2 R_{Tx-Rx}^2} \quad (2)$$

où:

- P_t : puissance maximale de l'émetteur (W)
- G_{Tx-Rx} : gain de l'antenne d'émission dans la direction de l'antenne de réception (sans dimension)
- G_{Rx-Tx} : gain maximal de l'antenne de réception (sans dimension)
- L_{prop} : affaiblissements de propagation (sans dimension)
- R_{Tx-Rx} : distance émetteur-récepteur (m)
- λ : longueur d'onde (m).

Pour chaque éolienne, la puissance du signal diffusé à l'emplacement du récepteur $P_{Tx-WTi-Rx}$ est calculée au moyen de l'équation radar bistatique, conformément à l'Equation (3).

$$P_{T_x-WT_i-Rx} = \frac{P_t G_{T_x-WT_i} G_{R_x-WT_i} \lambda^2 \sigma_i}{(4\pi)^3 R_{T_x-WT_i}^2 R_{WT_i-Rx}^2} \quad (3)$$

où:

- P_t : puissance maximale de l'émetteur (W)
- $G_{T_x-WT_i}$: gain de l'antenne d'émission dans la direction de l'éolienne i (sans dimension)
- $G_{R_x-WT_i}$: gain de l'antenne de réception dans la direction de l'éolienne i (sans dimension)
- σ_i : section équivalente radar bistatique du mât dans la direction de l'antenne de réception (m^2)
- $R_{T_x-WT_i}$: distance entre l'antenne d'émission et la $i^{\text{ème}}$ éolienne (m)
- R_{WT_i-Rx} : distance entre la $i^{\text{ème}}$ éolienne et l'antenne de réception (m)
- λ : longueur d'onde (m).

La section équivalente radar du mât dans la direction de l'antenne de réception σ_i (m^2) est calculée au moyen de la formule suivante:

$$\sigma_i(\phi_r, \theta_t) = kr L_{nf}^2 \sqrt{\frac{1 + \cos \phi_r}{2}} \sin \theta_t \quad (4)$$

où:

- k : nombre d'onde $k=2\pi/\lambda$ (m^{-1})
- r : rayon de la tour (m)³
- σ_i : section équivalente radar bistatique du mât dans la direction de l'antenne de réception (m^2)
- ϕ_r : position angulaire de l'antenne de réception dans le plan horizontal mesurée au niveau de l'éolienne considérée, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, par rapport à la direction de l'antenne d'émission (voir la Fig. 2)
- θ_t : position angulaire de l'antenne d'émission dans le plan vertical (voir la Fig. 2)
- λ : longueur d'onde (m).

Pour les distances auxquelles l'effet des éoliennes peut être non négligeable, la condition de champ lointain dans le contexte de la diffusion du signal n'est généralement pas remplie, car normalement

$$R_{T_x-WT_i} < \frac{2L^2}{\lambda} \quad (5)$$

où:

- $R_{T_x-WT_i}$: distance entre l'antenne d'émission et la $i^{\text{ème}}$ éolienne (m)
- L : longueur de la tour (m)⁴.

Dans ces cas de figure, les effets de champ proche de la diffusion du signal peuvent être pris en compte en prenant une longueur de tour en champ proche L_{nf} (m), donnée par:

$$L_{nf} = \sqrt{\frac{\lambda R_{T_x-WT_i}}{2}} \quad (6)$$

³ Si le mât est un cône circulaire droit tronqué, son rayon r est calculé comme étant le rayon moyen du cône, et sa longueur L comme étant la longueur de la surface inclinée du cône tronqué.

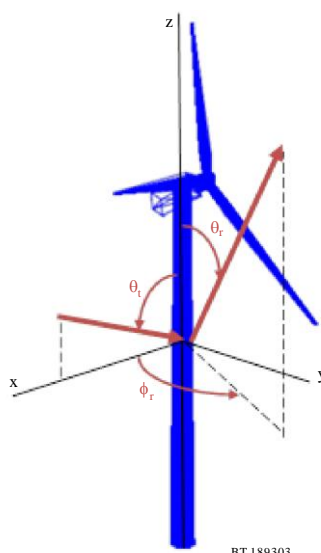
où:

R_{Tx-WTi} : distance entre l'antenne d'émission et la $i^{\text{ème}}$ éolienne (m)

λ : longueur d'onde (m).

La position relative de l'antenne d'émission, de l'éolienne et de l'antenne de réception est calculée (en prenant comme référence le point à mi-hauteur du mât) en fonction de l'angle d'incidence dans le plan vertical (θ_i) ainsi que des angles de réception dans les plans horizontal et vertical (ϕ_r, θ_r). A noter que le système de coordonnées considéré ne dépend pas de la position de la pale ni de son orientation, car il est référencé par rapport à la position horizontale de l'antenne d'émission ($\phi_i = 0^\circ$), comme indiqué à la Fig. 3.

FIGURE 3
Système de coordonnées du modèle de diffusion



Il convient de noter que le modèle de propagation est valide pour la rétrodiffusion dans les intervalles d'angle suivant:

$-120^\circ < \phi_r < 120^\circ$, qui définit l'intervalle d'angle bistatique dans le plan horizontal qui délimite la région de rétrodiffusion (à savoir que la diffusion vers l'avant se produit à $\pm 60^\circ$ derrière l'éolienne)

$70^\circ < \theta_i < 110^\circ$ et $160^\circ - \theta_i < \theta_r < 200^\circ - \theta_i$, qui impose une limite verticale liée à la théorie de l'optique physique, l'erreur sur la précision des estimations de la section équivalente radar étant plus grande à mesure que la direction d'observation s'éloigne de la direction spéculaire.

Il convient de noter que le modèle de diffusion est valide lorsqu'au minimum une partie significative du mât est éclairée par le signal émis. Par conséquent, il convient d'analyser le diagramme d'antenne d'émission et, dans le cas où cette condition est remplie, il est recommandé de prendre pour paramètre G_{Tx-WTi} le gain maximal de la section du diagramme d'antenne qui rencontre le mât.

Quant au gain du récepteur, on considérera que l'antenne est normalement orientée dans la direction de l'émetteur et qu'en conséquence, d'une manière générale, G_{Rx-WTi} sera inférieur à l'antenne de réception, à moins que l'éolienne ne se trouve sur un trajet reliant les antennes d'émission et de réception de télévision. On trouvera dans la Recommandation UIT-R BT.419 les caractéristiques de directivité et de polarisation des antennes de réception en radiodiffusion télévisuelle.

L'amplitude moyenne de chaque trajet est donnée par le rapport des deux puissances exprimées en dB, comme indiqué dans l'Equation (7):

$$P_i = 10 \log \left(\frac{P_{Tx-WTi-Rx}}{P_{Tx-Rx}} \right) \quad (7)$$

Les trajets présentant des rapports de puissance inférieurs à -45 dB sont ignorés.

Spectres Doppler

Pour caractériser les spectres Doppler, trois cas représentatifs de densité spectrale de puissance (DSP) sont fournis. Ils permettent de caractériser les situations éventuelles de variabilité temporelle élevée, moyenne et faible, qui correspondent à différentes vitesses de rotation et différentes orientations du rotor.

Ces spectres Doppler sont adaptés à chaque emplacement de réception au moyen de la fréquence Doppler bistatique maximale, f_{B_max} (Hz), qui dépend de la position relative de l'antenne d'émission, de l'éolienne et de l'antenne de réception, ϕ_r , de la fréquence maximale de rotation de l'éolienne, ω_{max} (rad/s), et de la longueur des pales, l , conformément à l'Equation (8).

$$f_{B_max} = \frac{2\omega_{max}l}{\lambda} \cos(\phi_r / 2) \quad (8)$$

Dans le cas des éoliennes, f_{B_max} correspond à $\phi_r = 0^\circ$ et les pales tournent dans le plan *antenne d'émission-éolienne-antenne de réception*.

Pour tenir compte des différentes conditions de vent qui se présenteront probablement en un emplacement de réception donné, il est recommandé d'analyser l'ensemble des DSP fournis dans le Tableau 3 pour le système à l'étude. En procédant ainsi, l'utilisateur du modèle de canal obtient une vue générale des différentes situations susceptibles de se présenter sans qu'il soit besoin d'estimer précisément les conditions de vent spécifiques où les vitesses des vents. Si l'on veut se placer dans le cas le plus défavorable, il convient d'effectuer les calculs en utilisant la formule correspondant à la «haute variabilité».

TABLEAU 3

DSP Doppler pour le modèle de canal (exprimées en dB/Hz), en fonction de la fréquence Doppler (f), où $\delta(f)$ est la fonction delta de Dirac

Haute variabilité	
$S_{high}(f) = \begin{cases} 19.7 \exp(4.5 \cdot f / f_{B_max}) - 38.0 & -0.9 \cdot f_{B_max} \leq f < 0 \\ \delta(f) & f = 0 \\ 21.4 \exp(-4.8 \cdot f / f_{B_max}) - 38.1 & 0 < f \leq 0.9 \cdot f_{B_max} \end{cases}$	
Variabilité moyenne	
$S_{medium}(f) = \begin{cases} 22.0 \exp(6.1 \cdot f / f_{B_max}) - 30.4 & -0.7 \cdot f_{B_max} \leq f < 0 \\ \delta(f) & f = 0 \\ 25.1 \exp(-8.7 \cdot f / f_{B_max}) - 29.5 & 0 < f \leq 0.6 \cdot f_{B_max} \end{cases}$	
Faible variabilité	
$S_{low}(f) = \begin{cases} 22.9 \exp(17.9 \cdot f / f_{B_max}) - 24.9 & -0.3 \cdot f_{B_max} \leq f < 0 \\ \delta(f) & f = 0 \\ 23.2 \exp(-17.6 \cdot f / f_{B_max}) - 25.0 & 0 < f \leq 0.3 \cdot f_{B_max} \end{cases}$	

Il ne sera sans doute pas nécessaire d'étudier ce qui se passera à plus de 15 km environ de l'emplacement envisagé pour l'éolienne (ou des emplacements s'il y a plusieurs éoliennes). Cependant, dans certains cas particuliers, par exemple lorsque des antennes de réception sont

empêchées de voir l'antenne d'émission utile par effet d'écran, mais sont en vue directe de l'éolienne, il faudra peut-être augmenter cette distance.

Une fois le modèle de canal adapté aux conditions particulières du cas à l'étude, la façon la plus complète d'estimer les effets sur un service donné est d'effectuer des simulations de l'effet du modèle de canal variable dans le temps sur le seuil de réception correspondant. Pour cela, il est nécessaire d'obtenir des réalisations du modèle de canal, autrement dit d'obtenir les réponses impulsionnelles successives du canal qui caractérisent la propagation du signal en présence d'une éolienne. Les trajets complexes variables qui correspondent à la diffusion du signal par chaque éolienne peuvent être obtenus en générant un ensemble de processus blancs gaussiens dont les densités spectrales de puissance sont modélées par un filtre de conformation dont la fonction de transfert en amplitude est égale à $H(f) = \sqrt{S(f)}$ où $S(f)$ désigne le spectre de puissance Doppler.

Le filtre résultant doit avoir une puissance normalisée égale à 1, de sorte qu'individuellement, les gains pour le trajet soient correctement mis à l'échelle pour prendre en compte les différentes puissances des générateurs en fonction de l'amplitude moyenne calculée.

Annexe 3

Estimation de l'incidence sur la réception DVB-T

L'incidence éventuelle d'un parc éolien sur la qualité de réception DVB-T peut s'exprimer au moyen des valeurs de seuil des rapports porteuse/bruit (C/N) nécessaires pour fonctionner dans des conditions quasi exemptes d'erreur, en fonction des caractéristiques de propagation du canal.

Dans la plupart des cas où l'incidence d'un parc éolien sur la qualité de réception d'un système DVB-T a été analysée, les valeurs de seuil du rapport C/N obtenues étaient analogues aux valeurs escomptées dans les environnements sans parcs éoliens.

Plus précisément, dans la zone de diffusion vers l'avant des éoliennes, où l'antenne d'émission, une ou plusieurs éoliennes et l'antenne de réception sont alignées ($\pm 60^\circ$ derrière l'éolienne), la qualité de réception DVB-T n'est peut-être pas dégradée; cela étant, des études complémentaires seraient nécessaires pour confirmer ce point, en particulier au voisinage de 0° .

Dans le cas d'une région de rétrodiffusion, les conditions de propagation peuvent être caractérisées par un modèle de canal à trajets multiples (voir la Pièce jointe 2). Dans ces conditions, une augmentation de la valeur de seuil du rapport C/N est plus probable lorsque les éoliennes sont situées à proximité de l'antenne de réception ou au voisinage (moins de 2 km) de l'antenne d'émission de télévision. Dans les cas où l'amplitude et la variabilité des signaux diffusés par les éoliennes sont importantes, la valeur de seuil du rapport C/N nécessaire pour une transmission quasiment sans erreur (QEF) est plus élevée. La valeur de seuil du rapport C/N tend à augmenter avec l'amplitude et la variabilité dans le temps des trajets multiples dus aux éoliennes.

Pour caractériser le canal à trajets multiples dans la zone de rétrodiffusion et mettre en relation ces caractéristiques avec la dégradation éventuelle du service de télévision, deux paramètres sont définis: *l'énergie à trajets multiples* et *l'écart-type moyen*. Ces paramètres peuvent être calculés à partir de données estimées en fonction du modèle de canal décrit à l'Annexe 2 et, de façon plus spécifique, en calculant les gains complexes sur chaque trajet comme décrit ci-dessus, ou en utilisant des signaux de diffusion empiriques (voir le Rapport UIT-R BT.2142 pour de plus amples informations).

L'énergie du canal à trajets multiples, P_{mult} (adim.), est définie comme étant la somme des moyennes normalisées des puissances reçues en provenance de chaque éolienne. La valeur moyenne de chaque trajet est calculée en prenant une valeur centrale représentative (valeur médiane) du trajet, car les signaux de diffusion varient avec la rotation des pales. Ainsi, l'énergie à trajets multiples de la réponse impulsionnelle est donnée par l'Equation (9).

$$P_{mult} = \sum_{i=1}^N \text{mean}(P(\tau_i, t)) \quad (9)$$

où:

$i = 1$ et $i = N$: indices des premier et dernier trajets au-dessus d'un niveau de seuil de puissance relative de -45 dB par rapport au trajet direct

$P(\tau_i, t)$: puissance variable reçue du trajet i normalisée par rapport au trajet principal.

L'écart-type moyen, std_{mean} , (sans dimension) est déterminé en calculant la moyenne des écarts-types des signaux variables diffusés par chaque éolienne pour une mesure ou une simulation donnée. Il fournit donc une mesure de la variabilité temporelle du canal. L'écart-type moyen est donné par l'Equation (10).

$$std_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^N std_i}{N} \quad (10)$$

où:

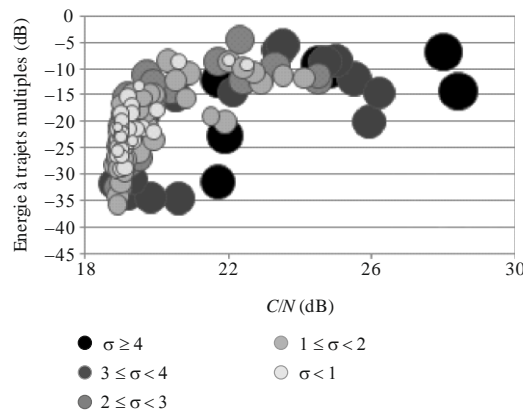
$i = 1$ et $i = N$: indices des premier et dernier trajets au-dessus d'un niveau de seuil de puissance relative de -45 dB par rapport au trajet direct

std_i : écart-type de la puissance normalisée variable reçue du trajet I (dB).

La Fig. 4 présente quelques valeurs de seuil empiriques du rapport C/N en fonction de l'énergie à trajets multiples (en dB), qui ont été obtenues par des mesures dans la zone d'influence du parc éolien. Ces observations ont été effectuées avec un système DVB-T fonctionnant en mode 8k, avec une modulation MAQ-64 et un taux de codage CED 2/3.

La valeur de l'écart-type moyen détermine la taille des bulles. Pour faciliter la lecture, les bulles sont représentées en couleur, du gris clair au noir, en fonction de l'écart-type moyen.

FIGURE 4
Région de rétrodiffusion. Rapports C/N requis en fonction des caractéristiques du canal à trajets multiples



Résultat important: toutes les mesures présentant des niveaux d'énergie à trajets multiples supérieurs à -15 dB présentent des valeurs de seuil de C/N supérieures à $19,3$ dB (seuil théorique pour un canal de Rice), même dans les configurations où les pales étaient immobiles et donc où l'écart-type moyen était faible. D'une manière générale, les mesures présentant des niveaux d'énergie à trajets multiples inférieurs à -15 dB présentent des valeurs de seuil de rapport C/N plus élevées pour des valeurs supérieures d'écart-type moyen. Le Tableau 4 récapitule les incréments maximum des valeurs de seuil des rapports C/N par rapport à la valeur de seuil C/N de Rice, en fonction de l'énergie à trajets multiples.

TABLEAU 4
**Incrément maximum des valeurs de seuil de C/N au-dessus de la valeur
de seuil C/N théorique de Rice**

Energie à trajets multiples P_{mult} (dB)	Augmentation maximale en (dB) du rapport C/N requis pour un canal de Rice
$P_{mult} \geq -15$	9,1
$-15 > P_{mult} \geq -25$	6,6
$-25 > P_{mult} \geq -35$	2,4
$P_{mult} < -35$	0

En conclusion, le fait que la propagation par trajets multiples due aux éoliennes varie en fonction du temps risque de poser des problèmes de réception DVB-T dans les cas présentés ci-dessus, en particulier lorsque le point de réception n'est pas en visibilité directe de l'émetteur, mais est en visibilité directe du parc éolien. Ces résultats peuvent servir de guide pour évaluer le risque de dégradation du service DVB-T par un parc éolien.

Il convient de noter que l'énergie à trajets multiples et l'écart-type moyen décrivent le canal à trajets multiples en présence d'un parc éolien indépendamment de la norme télévisuelle. En conséquence, ces paramètres peuvent être utilisés pour mettre en relation les caractéristiques du canal de propagation et l'incidence sur un quelconque service de télévision numérique fourni dans la bande des ondes décimétriques, si une étude analogue à celle menée pour le service DVB-T était envisagée.

On trouvera des explications détaillées sur cette question dans le Rapport UIT-R BT.2142 (Pièce jointe 4).