
**Météorologie — Télédétection du vent
basée au sol — Profileur de vent radar**

*Meteorology — Ground-based remote sensing of wind — Radar wind
profiler*

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 23032:2022

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6e0d554a-7315-4091-821b-335cac336bfb/iso-23032-2022>



iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 23032:2022

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6e0d554a-7315-4091-821b-335cac336bfb/iso-23032-2022>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2022

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8
CH-1214 Vernier, Genève
Tél.: +41 22 749 01 11
E-mail: copyright@iso.org
Web: www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	v
Introduction	vi
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Symboles et termes abrégés	2
4.1 Symboles	2
4.2 Termes abrégés	3
5 Principe de mesurage	4
5.1 Paramètres spectraux de l'écho	4
5.2 Sources des signaux reçus	7
5.2.1 Dispersion turbulente et réflexion partielle	7
5.2.2 Écho en précipitations	9
5.2.3 Fouillis	9
5.2.4 Interférence provenant de sources d'ondes radio	10
5.3 Méthodes de mesurage de la vitesse du vent	11
5.3.1 Aspects généraux	11
5.3.2 Cadencement de faisceau Doppler (DBS)	11
5.3.3 Antennes espacées (SA)	17
6 Système RPV	20
6.1 Fréquence	20
6.2 Matériel et logiciels	21
6.2.1 Principaux composants	21
6.2.2 Traitement du signal	22
6.2.3 Antenne	24
6.2.4 Émetteur	30
6.2.5 Récepteur	35
6.2.6 Unité de traitement du signal	43
6.2.7 Unité de commande d'observation	47
6.2.8 Considérations relatives aux conditions environnementales	47
6.3 Amélioration de la résolution et réduction des fouillis grâce au traitement adaptatif du signal	48
6.3.1 Imagerie par télémétrie (interférométrie dans le domaine fréquentiel)	48
6.3.2 Radarphotographie cohérente (interférométrie dans le domaine spatial)	53
6.3.3 Système adaptatif d'élimination du fouillis (ACS)	56
7 Performance du système	60
7.1 Résolution	60
7.1.1 Résolution en portée	60
7.1.2 Résolution de volume	60
7.1.3 Résolution temporelle	61
7.1.4 Fréquence de Nyquist et résolution en fréquence du spectre Doppler	61
7.2 Échantillonnage en distance	62
7.3 Sensibilité du radar et plage de mesure	63
7.4 Précision des mesures	66
7.4.1 Exigences	66
7.4.2 Validation par d'autres moyens	67
8 Contrôle de la qualité (CQ) dans le traitement numérique du signal	68
9 Produits et format des données	69
9.1 Produits et niveaux de traitement des données	69
9.2 Format de données	70
9.2.1 Généralités	70

9.2.2	Format de données opérationnelles (OMM BUFR)	70
9.2.3	Format de données scientifiques (NetCDF)	70
9.2.4	Format de données défini par l'utilisateur et/ou le fournisseur	71
9.2.5	Autres recommandations	72
10	Installation	72
10.1	Aspects généraux	72
10.2	Terrain	72
10.3	Obtention de licence d'émission d'ondes radio	73
10.4	Infrastructure	73
10.5	Fouillis	73
10.6	Interférence provenant de sources d'ondes radio	74
11	Surveillance et maintenance du système	75
11.1	Aspects généraux	75
11.2	Surveillance de l'état opérationnel	75
11.3	Maintenance préventive	76
11.4	Maintenance corrective	78
11.5	Instruments de mesure	78
11.6	Politique relative aux pièces de rechange	79
11.7	Logiciels	79
	Annexe A (informative) Exemple de paramètres pouvant être configurés par un opérateur	80
	Annexe B (informative) Représentation générale de l'équation radar pour radar monostatique	83
	Annexe C (informative) Réflectivité de l'écho de précipitations	85
	Annexe D (informative) Impacts de l'assimilation des produits de vent obtenus par des RPV dans des modèles atmosphériques	86
	Annexe E (informative) Gestion de la qualité de WINDAS (Wind profiler Network and Data Acquisition System) de l'Agence météorologique du Japon	87
	Annexe F (informative) Exemple de niveaux de traitement des données autre que ceux généralement utilisés par les utilisateurs finaux	88
	Annexe G (informative) Format de données pour le profileur de vent de l'Agence météorologique du Japon (JMA) utilisant BUFR4	89
	Annexe H (informative) Format de données pour le profileur de vent du Deutscher Wetterdienst (DWD) utilisant netCDF4	93
	Bibliographie	98

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier, de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/brevets).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir www.iso.org/avant-propos.

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 146, *Qualité de l'air*, sous-comité SC 5, *Météorologie*, en collaboration avec l'Organisation météorologique mondiale (OMM), en tant que norme commune ISO/OMM dans le cadre de l'Accord sur les arrangements de travail signé par l'OMM et l'ISO en 2008.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse www.iso.org/fr/members.html.

Introduction

Un profileur de vent radar, également appelé radar atmosphérique, ou radar Doppler en air clair (ci-après abrégé en RPV) est un instrument qui mesure les profils en altitude de la vitesse du vent en air clair. Le RPV détecte les échos générés par les variations d'indice de réfraction radioélectrique sur une échelle égale à la moitié de la longueur d'onde du radar (c'est-à-dire l'échelle de Bragg). Le mécanisme de diffusion d'ondes radio en air clair a été élucidé sur les plans théorique et pratique dans les années 1960. Des radars Doppler de grande taille conçus pour l'observation des vents et des turbulences dans la mésosphère, la stratosphère et la troposphère (radars MST) ont été développés depuis les années 1970. En raison de leur capacité à mesurer les vents et turbulences avec une excellente résolution temporelle et en altitude, ils ont été d'une grande utilité pour décrire et clarifier les processus dynamiques de l'atmosphère.

Les RPV ont été développés principalement depuis les années 1980 sur la base des radars MST. Les RPV sont conçus pour mesurer la vitesse des vents, particulièrement dans la troposphère, y compris la couche limite atmosphérique. Le principe de mesure des RPV est le même que celui qui est utilisé dans les radars MST, à ceci près qu'un RPV est souvent plus petit qu'un radar MST type. Un RPV peut mesurer les profils de vent à la fois en atmosphère claire ou nuageuse.

Des réseaux RPV opérationnels à l'échelon national ont été construits par des agences météorologiques dans le but de surveiller et de prévoir les phénomènes météorologiques. Les RPV opérationnels contribuent à améliorer la précision des prévisions météorologiques par l'intégration de leurs produits relatifs aux vents dans des modèles numériques de prévision météorologique utilisés par les agences météorologiques. Les produits relatifs aux vents obtenus par des RPV opérationnels sont distribués dans le monde entier. Les applications complémentaires des RPV comprennent le mesurage des profils du vent au voisinage des aéroports, permettant d'activer ou d'améliorer les systèmes d'alerte de cisaillement de vent. L'utilisation des RPV permet d'améliorer la sécurité d'un aéroport pendant les phases de décollage et d'atterrissage des avions. Les RPV permettent également d'analyser ou de prédire la diffusion des polluants. Les RPV sont en outre communément utilisés par des agences gouvernementales et différents secteurs industriels, y compris les usines de produits chimiques, les mines et les centrales électriques, pour gérer les niveaux d'émission ou pour calculer les prévisions immédiates des trajectoires en situations d'urgence. Les RPV fournissent des produits de vent haute qualité qui sont également utilisés dans le domaine de la recherche atmosphérique. Par conséquent, les RPV sont des moyens indispensables pour observer les profils de vent de façon continue dans le temps et en altitude. Si l'on utilise en plus un système de sondage radio-acoustique, les RPV peuvent mesurer les profils de température virtuelle en altitude.

Afin d'obtenir et de maintenir la qualité élevée des produits relatifs aux vents, les RPV nécessitent d'être conçus, fabriqués et entretenus avec une connaissance reflétant l'état de la technique et des capacités de mesurage éprouvées. Dans le but d'assurer la capacité de mesurage des RPV, le présent document fournit des lignes directrices pour la conception, la fabrication, l'installation et la maintenance des RPV.

Météorologie — Télédétection du vent basée au sol — Profileur de vent radar

1 Domaine d'application

Le présent document fournit des lignes directrices pour la conception, la fabrication, l'installation et la maintenance des RPV. Il décrit les points suivants:

- principe de mesurage ([Article 5](#)). Les diffuseurs produisant les échos et les méthodes de mesure de la vitesse du vent sont décrits. La description du principe de mesurage a pour objet principal de fournir les informations nécessaires à la description des lignes directrices des [Articles 6 à 11](#);
- lignes directrices pour le système RPV ([Article 6](#)). La fréquence, le matériel, les logiciels et le traitement du signal sont décrits. Ceux-ci sont principalement appliqués dans le cadre de la conception et de la fabrication du matériel et des logiciels du RPV;
- lignes directrices pour les performances du système ([Article 7](#)). La résolution des mesures, l'échantillonnage en distance, l'évaluation de la sensibilité du radar et la précision des mesures sont décrits. Ceux-ci peuvent être utilisés pour estimer la performance de mesurage de la conception et du fonctionnement d'un système RPV;
- lignes directrices de contrôle de la qualité (CQ) dans le traitement numérique du signal ([Article 8](#));
- lignes directrices de produits de mesurage et de format de données ([Article 9](#)). Les produits de mesurage obtenus par un RPV et leurs niveaux de données sont définis. Les lignes directrices de formats de fichiers de données sont également décrites;
- lignes directrices d'installation ([Article 10](#)) et de maintenance ([Article 11](#)).

Le présent document n'a pas pour vocation de donner une description détaillée du principe de mesurage, des systèmes RPV et des applications RPV. Pour de plus amples informations sur ces points, il convient que les utilisateurs consultent les livrets techniques (par exemple, [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#)).

Les RPV sont appelés par différents noms (par exemple, profileur de vent radar, radar atmosphérique, ou radar Doppler en air clair). Il convient que les noms conventionnels des RPV soient autorisés.

2 Références normatives

Le présent document ne contient aucune référence normative.

3 Termes et définitions

Aucun terme n'est défini dans le présent document.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>

4 Symboles et termes abrégés

4.1 Symboles

c	vitesse de la lumière ($\approx 3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$)
C_n^2	constante de structure d'indice de réfraction
f_{Nyq}	fréquence de Nyquist
f_r	décalage Doppler moyen de l'écho
G_{ant}	gain d'antenne en décibels
L_p	facteur de perte causé par la forme d'impulsion
n	indice de réfraction radioélectrique
N_{beam}	nombre de directions de faisceau d'antenne
N_{coh}	nombre d'intégrations cohérentes. Dans le présent document, N_{coh} est défini comme étant le nombre qui exclut N_{pseq}
N_{data}	nombre d'éléments dans les séries temporelles I et Q (I/Q) après des intégrations cohérentes. N_{data} est également le nombre d'éléments dans le spectre Doppler
N_{freq}	nombre de fréquences émises
N_{incoh}	nombre d'intégrations incohérentes
N_{pseq}	nombre de séquences d'impulsions
N_{subp}	nombre de sous-impulsions utilisées en compression d'impulsion modulée en phase
T_{IPP}	période interimpulsion
P_{echo}	puissance d'écho
P_N	puissance de bruit du récepteur
P_n	puissance de bruit du spectre Doppler
p_n	puissance de bruit du spectre Doppler par cellule de vitesse Doppler
P_p	puissance crête en sortie au niveau de l'émetteur
P_t	puissance crête en sortie au niveau de l'antenne
u	vitesse du vent zonal
v	vitesse du vent méridien
V_{pp}	tension crête à crête
V_r	vitesse Doppler radiale
V_s	volume échantillon
V_{wind}	vecteur vent
w	vitesse du vent vertical
Δr	résolution en portée
η	réflectivité du volume
λ	longueur d'onde du radar
$\sigma_{3\text{dB}}$	largeur spectrale définie comme la pleine largeur à mi-puissance
σ_{std}	largeur spectrale définie comme l'écart-type

τ_{3dB}	largeur temporelle entre les deux points de chute à 3-dB à partir du point de crête
τ_d	durée pendant laquelle le signal d'émission est généré
τ_p	largeur d'impulsion émise
H	opérateur hermitien (transposition complexe)
T	exposant qui indique la transposition de matrice
*	conjugaison complexe

4.2 Termes abrégés

A/N	analogique/numérique
ACS	système adaptatif d'élimination du fouillis [adaptive clutter suppression]
AFB	amplificateur à faible bruit
BUFR	forme universelle de représentation binaire des données météorologiques [binary universal form for the representation of meteorological data]
CAN	convertisseur A/N
COHO	oscillateur cohérent [coherent oscillator]
CQ	contrôle de la qualité
CRI	radarphotographie cohérente [coherent radar imaging]
DAV	représentation de la vitesse en fonction de l'azimut
DBS	cadencement de faisceau Doppler [Doppler beam swinging]
DCMP	minimisation de puissance sous contrainte linéaire [directionally constrained minimization of power]
DSP	processeur de signal numérique [digital signal processor]
E/S	entrée/sortie
FCA	analyse de corrélation complète [full correlation analysis]
FDI	interférométrie dans le domaine fréquentiel [frequency domain interferometry]
FI	fréquence intermédiaire
FMCW	onde continue à fréquence modulée [frequency modulated continuous wave]
FPGA	contrôleur programmable de type «field programmable gate array»
I/Q	en phase (I)/en quadrature de phase (Q)
IPP	période interimpulsion [inter pulse period]
JMA	Agence météorologique du Japon [Japan Meteorological Agency]
MTBF	temps moyen entre défaillances
MTTF	temps moyen de fonctionnement avant défaillance
N/A	numérique/analogique
NC-DCMP	DCMP sujette aux normes [norm-constrained DCMP]
NF	facteur de bruit [noise figure]
OMM	Organisation météorologique mondiale
RF	radio fréquence
RIM	imagerie par télémétrie [range imaging]
RL	perte de retour d'antenne [antenna return loss]
RPV	profileur de vent radar, radar atmosphérique, ou radar Doppler en air clair
SA	antennes espacées [spaced antenna]
SNR	rapport signal/bruit [signal to noise ratio]

STALO	oscillateur local stabilisé [stable (stabilized) local oscillator]
TOS	taux d'ondes stationnaires
UHF	ultra haute fréquence
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UPS	alimentation sans interruption [uninterruptible power supply]
VHF	très haute fréquence [very high frequency]

5 Principe de mesurage

5.1 Paramètres spectraux de l'écho

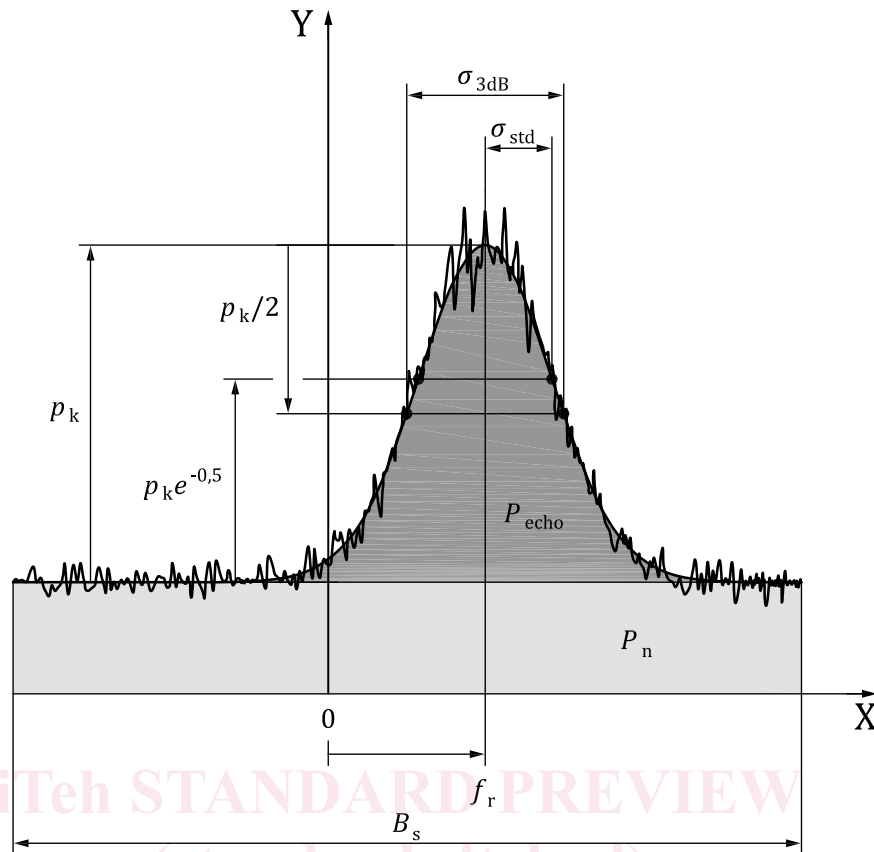
Les propriétés de tous les échos du RPV sont généralement estimées à partir des propriétés du spectre Doppler. L'analyse spectrale est ordinairement appliquée pour estimer un ensemble fini de paramètres tels que le rapport signal/bruit (SNR), le décalage Doppler et la largeur spectrale. L'écho généré par la dispersion en air clair (écho en air clair) revêt une importance particulière pour un RPV. Pour plus de détails sur l'écho en air clair, voir [5.2.1](#).

NOTE 1 Pour le traitement du signal en temps réel en vue d'obtenir le spectre Doppler, voir [6.2.2](#) et [6.2.6](#).

NOTE 2 La largeur de spectre, qui est interchangeable avec la largeur spectrale, est aussi fréquemment utilisée. Ces deux termes revêtent la même signification.

La distribution de fréquence de l'écho comporte des informations sur la vitesse Doppler radiale (V_r) et sur la variance du vent causée par des turbulences. La [Figure 1](#) propose un exemple du spectre Doppler. Le spectre Doppler de l'écho (S_{echo}) et le bruit représenté à la [Figure 1](#) ont été produits par une simulation numérique. C'est dans la simulation numérique que les spectres Doppler composés de S_{echo} et du bruit blanc ont été produits. La puissance de bruit du spectre Doppler est exprimée par P_n . On suppose que S_{echo} suit une répartition gaussienne et que chaque point du spectre de S_{echo} suit la répartition de χ^2 avec 2 degrés de liberté. La largeur de bande de fréquence du spectre Doppler est exprimée par B_s . Les spectres Doppler produits sont intégrés, et le spectre Doppler après intégration (c'est-à-dire intégration incohérente) est tracé. Ainsi, la variance de bruit sur B_s est plus faible que le carré de la puissance de bruit par cellule de vitesse Doppler (p_n^2). La variance de bruit est l'un des principaux facteurs qui déterminent la sensibilité d'un récepteur RPV. Voir [6.2.2](#) et [7.3](#) pour plus de détails sur, respectivement, l'intégration incohérente et la sensibilité du radar.

On suppose d'une manière générale que S_{echo} suit une répartition gaussienne. Cette hypothèse est normalement appliquée à l'écho en air clair. Dans cette hypothèse, seuls les moments d'ordre zéro, un et deux de l'écho sont pris en compte pour la détermination des paramètres spectraux. Cette hypothèse doit être soigneusement différenciée de celle selon laquelle le signal reçu est la réalisation d'un ou de plusieurs processus stochastiques gaussiens, qui incluent ceux de la dispersion d'ondes radio et, naturellement, le bruit (blanc) non corrélé. En cas d'écarts par rapport à cette hypothèse, des moments d'ordre plus élevé peuvent être envisagés. Le bruit produit dans le récepteur (bruit de récepteur) peut généralement être considéré comme du bruit blanc. Pour plus de détails sur le bruit de récepteur, voir [6.2.5.4](#).



Légende

X vitesse Doppler
Y intensité

NOTE

- Pour la définition des symboles non répertoriés dans les légendes se reporter au texte.
- La courbe en trait plein fin est un exemple de spectre Doppler qui contient le spectre Doppler de S_{echo} et le bruit blanc. La courbe en trait plein épais correspond à la somme de P_n et du S_{echo} idéal qui suit une répartition gaussienne et est exempt de perturbations. Les S_{echo} et P_n idéaux sont représentés en gris sombre et gris clair, respectivement. La puissance du S_{echo} idéal est exprimée par $P_{\text{echo}} \cdot f_r$, σ_{std} , $\sigma_{3\text{dB}}$ et l'intensité du pic du S_{echo} (p_k) idéal sont indiqués par des flèches.

Figure 1 — Exemple de spectre Doppler et de paramètres spectraux

La puissance d'écho (P_{echo}), V_r et la largeur spectrale sont les principaux paramètres qui caractérisent l'écho. Ils sont appelés paramètres spectraux. V_r est calculé à partir du décalage Doppler moyen de l'écho (f_r). P_{echo} et f_r sont également les moments d'ordre zéro et un de S_{echo} , respectivement. La largeur spectrale définie comme l'écart-type (σ_{std}) est la racine carrée du moment de second ordre de S_{echo} (voir [Figure 1](#)). P_{echo} , f_r et σ_{std} sont exprimés par les [Formules \(1\)](#), [\(2\)](#) et [\(3\)](#):

$$P_{\text{echo}} = \int S_{\text{echo}}(f) df \quad (1)$$

$$f_r = \frac{\int f S_{\text{echo}}(f) df}{\int S_{\text{echo}}(f) df} \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{std}} = \sqrt{\frac{\int (f - f_r)^2 S_{\text{echo}}(f) df}{\int S_{\text{echo}}(f) df}} \quad (3)$$

où f est la fréquence Doppler.

La relation entre f_r et V_r est exprimée par la [Formule \(4\)](#):

$$V_r \approx -\frac{\lambda}{2} f_r \quad (4)$$

Dans la [Formule \(4\)](#), V_r est définie comme positive lorsqu'elle s'éloigne de l'antenne. Toutefois, si l'on préfère utiliser la définition de signe de V_r comme celle de f_r , V_r peut être définie comme positive lorsqu'elle s'approche de l'antenne. Dans tous les cas, la direction de V_r doit être clairement définie dans la conception et la fabrication du RPV afin d'éviter des erreurs possibles dans la conception, la fabrication, l'exploitation et la maintenance du RPV. Dans le présent document, V_r est définie comme positive lorsqu'elle s'éloigne de l'antenne.

La largeur spectrale peut également être définie comme étant la pleine largeur à mi-puissance ($\sigma_{3\text{dB}}$) ou la demi-largeur à mi-puissance de l'écho (c'est-à-dire, $\frac{\sigma_{3\text{dB}}}{2}$). Quand S_{echo} est supposé suivre une répartition gaussienne, $\sigma_{3\text{dB}}$ peut être calculé par la relation de la [Formule \(5\)](#):

$$\sigma_{3\text{dB}} = 2\sqrt{2\ln 2} \sigma_{\text{std}} \quad (5)$$

Étant donné que la largeur spectrale peut être exprimée d'après les définitions ci-dessus, la définition de cette largeur spectrale doit être donnée explicitement. Il doit être noté que la largeur spectrale n'est pas uniquement déterminée par les perturbations du vent causées par des turbulences, mais englobe également les effets d'élargissement dus à l'extension angulaire et verticale du volume échantillon.^[4] Le volume échantillon est décrit en détail en [7.1.2](#).

L'estimation des paramètres spectraux comprend également l'estimation de la P_n . Le SNR est exprimé par la [Formule \(6\)](#):

$$SNR = \frac{P_{\text{echo}}}{P_n} \quad (6)$$

Dans le traitement numérique du signal pour estimation des paramètres spectraux et de P_n , la puissance de bruit par cellule de vitesse Doppler (p_n) est généralement utilisée. p_n est exprimé par la [Formule \(7\)](#):

$$p_n = P_n \frac{\Delta f}{B_s} \quad (7)$$

où Δf est la résolution en fréquence du spectre Doppler (c'est-à-dire l'intervalle des cellules de fréquence Doppler). Il est à noter que l'interférence d'autres sources d'ondes radio qui contaminent le signal reçu a généralement une dépendance en fréquence. La contamination due aux interférences radio peut donc produire une dépendance en fréquence du bruit. Une description détaillée des interférences provenant de sources d'ondes radio est donnée en [5.2.4](#) et [10.6](#).

Lorsqu'il est supposé que S_{echo} suit une répartition gaussienne et que le SNR est infini, l'erreur d'estimation de la vitesse Doppler ou de la largeur spectrale, ε_v , peut être donnée par la [Formule \(8\)](#):

$$\varepsilon_v = K_v \left(\frac{\sigma_v}{T_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

où

K_v est le coefficient;

σ_v est la largeur spectrale définie comme l'écart-type en m s^{-1} ;

T_c est la période de mesurage en s.

Lorsque la direction du faisceau d'antenne change après l'acquisition d'un spectre Doppler (c'est-à-dire après $N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}}$ émissions et réceptions) ou après le recueil de tous les spectres Doppler utilisés en intégration incohérente (c'est-à-dire après $N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}} N_{\text{incoh}}$ émissions et réceptions), $T_c = T_{\text{IPP}} N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}} N_{\text{incoh}}$. Lorsque la direction de faisceau d'antenne change sur une base d'impulsion à impulsion, $T_c = T_{\text{IPP}} N_{\text{beam}} N_{\text{pseq}} N_{\text{coh}} N_{\text{data}} N_{\text{incoh}}$. Voir [6.2.3.2.5](#) pour plus de détails sur le changement de temporisation de la direction de faisceau d'antenne.

K_v est défini par la [Formule \(9\)](#):

$$K_v = k_{\text{err}} \left(\frac{\lambda}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

où

k_{err} est le coefficient;

λ est la longueur d'onde du radar.

Les [Formules \(8\)](#) et [\(9\)](#) dérivent, respectivement, des Formules (13) et (14) de la Référence [5]. La valeur de k_{err} (voir Référence [5]) est donnée dans le [Tableau 1](#).

Tableau 1 — Valeur de k_{err}

Paramètre	Méthode des moindres carrés	Méthode des moments
Vitesse Doppler	0,63	0,38
Largeur spectrale	0,60	0,24

Les estimations d'erreur des paramètres spectraux lorsque l'on considère le SNR sont décrites en 6.3, 6.4 et 6.5 de la Référence [2].

5.2 Sources des signaux reçus

5.2.1 Dispersion turbulente et réflexion partielle

La capacité à détecter l'écho en air clair est la caractéristique la plus importante d'un RPV. Elle permet à un RPV de déterminer les profils résolus verticalement du vecteur vent à partir du décalage Doppler mesuré de l'écho en air clair. Il existe deux mécanismes essentiels qui produisent des échos en air clair: la dispersion turbulente provenant de turbulences atmosphériques et la réflexion partielle provenant d'une atmosphère stratifiée horizontalement. La réflexion partielle est également appelée dispersion de Fresnel. Les turbulences atmosphériques produisent des perturbations de n , et les perturbations de

n sur une échelle égale à la moitié de λ (c'est-à-dire l'échelle de Bragg) sont une source de dispersion d'ondes radio en air clair.

NOTE L'écho en air clair est un retour de la dispersion d'ondes radio causé par des variations de l'indice de réfraction radioélectrique n , et ne comprend pas la dispersion provenant de cibles dures dans l'air (par exemple, hydrométéores, insectes, oiseaux et avions).

n en atmosphère neutre (c'est-à-dire non ionisée) est donné par la [Formule \(10\)](#):

$$n = 1 + 7,76 \times 10^{-5} \frac{p}{T} + 3,73 \times 10^{-1} \frac{e}{T^2} \quad (10)$$

où

p est la pression atmosphérique en hPa;

T est la température atmosphérique, en K;

e est la pression partielle de la vapeur d'eau en hPa.

Lorsque les perturbations de n sont isotropes, la dispersion turbulente est également isotrope.

La constante de structure d'indice de réfraction C_n^2 est définie selon la [Formule \(11\)](#):

$$\overline{[n(r+\delta r) - n(r)]^2} = C_n^2 |\delta r|^{2/3} \quad (11)$$

où r est une position arbitraire et δr est une courte distance entre deux emplacements espacés respectivement. Étant donné que T et e sont perturbés par des turbulences et que n dépend d'eux, C_n^2 varie de manière importante en raison des conditions atmosphériques qui déterminent T et e (voir [Formule \(10\)](#)).

La fréquence d'un RPV est généralement choisie de manière à ce que la dispersion turbulente se produise dans le sous-domaine inertiel des turbulences. Les fréquences de 50 MHz à 3 GHz sont généralement utilisées pour les RPV.

Dans le sous-domaine inertiel, l'énergie se transmet des tourbillons les plus grands aux plus petits à travers un mécanisme inertiel (et non visqueux). Le sous-domaine inertiel existe entre l'échelle de structure des turbulences (l_0) et l'échelle de longueur de flottabilité (L_B). l_0 est l'échelle servant à déterminer la région de transition entre les sous-domaines visqueux et inertiel, et L_B est l'échelle servant à déterminer la région de transition entre les sous-domaines inertiel et de flottabilité. Dans le sous-domaine de flottabilité, les tourbillons turbulents s'aplatissent et deviennent anisotropes. Dans le sous-domaine visqueux, le plus petit tourbillon est fortement influencé par la viscosité, et l'énergie cinétique est convertie en chaleur. La transition du domaine inertiel au domaine visqueux explique pourquoi la couverture en altitude maximale réalisable pour les RPV diminue à mesure que l'on s'approche des longueurs d'onde courtes. Le sous-domaine visqueux est également appelé sous-domaine dissipatif. Les grandes longueurs d'onde (c'est-à-dire les basses fréquences) dont l'échelle de Bragg est située dans le sous-domaine de flottabilité, et les longueurs d'onde courtes (c'est-à-dire les hautes fréquences) dont l'échelle de Bragg est située dans le sous-domaine visqueux, ne sont pas préférables du point de vue de la sensibilité du radar. Voir 3.4.2 et 7.3.3 de la Référence [1] pour plus de détails sur le sous-domaine inertiel.

Les couches stratifiées horizontalement ayant des gradients verticaux importants de n sont réputées produire des réflexions partielles. L'intensité de l'écho provenant de la réflexion partielle présente une dépendance élevée à l'angle zénithal. Elle atteint son maximum près du zénith, puis diminue rapidement à mesure que l'angle zénithal augmente.

Le coefficient de réflexion partielle ρ est donné par la [Formule \(12\)](#):

$$|\rho|^2 = \frac{1}{4} \left| \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{1}{n} \frac{dn}{dz} e^{-j\kappa z} dz \right|^2 \quad (12)$$

où

- l est l'épaisseur de la couche stratifiée;
- z est l'altitude;
- κ est le nombre d'onde donné par $\kappa = 4\pi/\lambda$.

Voir le paragraphe 3.4.3 de la Référence [1] pour plus de détails sur la réflexion partielle. Aucune réflexion partielle n'est observée aux bandes UHF et micro-ondes[1].

L'intensité de l'écho en air clair est déterminée par la force de n perturbations causées par les turbulences ou par la force du gradient vertical de n causé par les couches stratifiées horizontales.

5.2.2 Écho en précipitations

Les gouttes de pluie, les grêlons, les cristaux de neige et de glace, et les particules de phase-mixte en précipitations (écho de précipitations) sont aussi des sources d'échos. L'intensité de l'écho de précipitations est souvent comparable à celle de l'écho d'air clair pour la bande VHF, et est généralement supérieure à celle de l'écho en air clair pour la bande UHF.

Si l'écho de précipitations et l'écho en air clair sont tous deux présents dans le spectre Doppler, la vitesse Doppler mesurée peut être une combinaison de la vitesse du vent (vitesse d'air clair) et de la vitesse limite de chute des hydrométéores par rapport au sol. Dans ce cas, le vent vertical ne peut pas être estimé correctement quand les deux apports de dispersion ne peuvent pas être séparés. Néanmoins, le vent horizontal peut généralement être dérivé avec précision, puisque la vitesse de déplacement horizontal d'hydrométéores relativement petits est une bonne approximation pour le vent horizontal. Les RPV qui utilisent la bande UHF mesurent généralement la vitesse du vent horizontal à une altitude plus élevée dans les précipitations que dans l'air clair.

5.2.3 Fouillis

Les échos indésirables sont appelés fouillis. Les fouillis contaminent le spectre Doppler, et peuvent donc réduire de manière importante la qualité des produits de mesurage obtenus par le RPV.

Les sources de fouillis sont les suivantes:

- les fouillis provenant de sources fixes au sol, appelés fouillis de sol: les terrains, l'herbe, les arbres sur les collines et les montagnes, et les structures métalliques élevées (par exemple pylônes, bâtiments et lignes électriques) sont les principales sources de fouillis de sol. Un fouillis de sol peut être réparti sur une zone étendue. Même si la fréquence Doppler moyenne de fouillis de sol est égale à zéro, l'oscillation de la source de fouillis peut élargir le spectre Doppler du fouillis de sol. Le pic de fouillis de sol dans le spectre Doppler peut être nettement élargi par un fort vent de surface, particulièrement quand la source du fouillis de sol est sujette aux oscillations (par exemple, herbe, arbres ou lignes électriques);
- les fouillis causés par des objets en rotation: les éoliennes et les antennes rotatives en sont les sources principales. Les fouillis qui en proviennent s'étendent considérablement sur une large plage de fréquences du spectre Doppler reçu;
- les fouillis provenant de la surface de la mer, appelés fouillis de mer: étant donné qu'un fouillis de mer est réparti sur une large zone, il s'étend généralement sur le spectre Doppler reçu, en distance et en fréquence. L'intensité et la diffusion Doppler d'un fouillis de mer dépendent du vent de surface;