

LA MESURE DU VENT PAR RADARS

La force et la direction du vent à différentes altitudes peuvent être obtenues grâce aux mesures effectuées par radars : radar météorologique et radar strato-troposphérique, aussi appelé profileur de vent. Ces deux instruments de télédétection sont situés au sol et mesurent le vent par effet Doppler.

Qu'est ce qu'un radar ? Fonctionnement de l'instrument

Le terme radar est l'acronyme de « **radio detection and ranging** ». Les radars météorologiques ont vu le jour après la seconde guerre mondiale. Ils ont depuis connu plusieurs évolutions : par exemple, les radars Doppler permettent maintenant de restituer le champ de vent à partir de traceurs naturels (turbulence, précipitations).

Un radar envoie une onde et reçoit une onde réfléchie. Ceci permet de localiser les obstacles à la propagation de cette onde dans l'atmosphère et donc de connaître, à partir du temps aller-retour, la distance qui sépare le radar de la cible (zones précipitantes, par exemple).

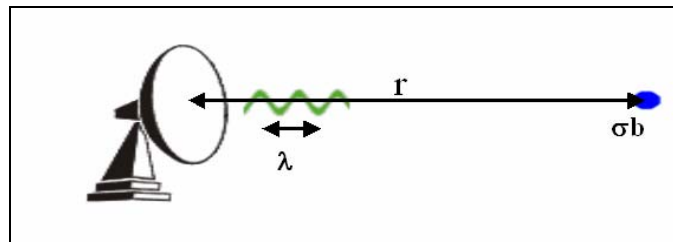


Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'un radar,
© Météo-France, extrait de cours de l'Ecole Nationale de la Météorologie

L'effet Doppler et le radar Doppler

L'effet Doppler (concernant les ondes lumineuses et sonores) a été présenté par Christian Doppler en 1842 et une expérience a confirmé sa théorie en 1845 ; il a également été proposé par Hippolyte Fizeau pour les ondes électromagnétiques en 1848.

Le radar Doppler envoie une onde d'une fréquence donnée dans l'atmosphère. Il mesure ensuite la différence de fréquence entre le signal émis et le signal reçu. Lorsque l'onde électromagnétique émise par le radar rencontre un obstacle qui bouge dans le sens longitudinal (précipitations, nuages en mouvement, zone de turbulence), l'écho qu'il reçoit subit au cours du temps une variation de phase qui se traduit par un changement de fréquence. Ce changement est proportionnel à la vitesse radiale projetée ; on a la relation mathématique :

$$\frac{df}{dt} = \frac{V_r}{\lambda}$$

avec V_r la vitesse radiale de déplacement de l'obstacle, composante de la vitesse dans la direction de visée du radar

f la fréquence

t le temps
 et λ la longueur d'onde.

Le schéma suivant illustre le principe du radar Doppler :

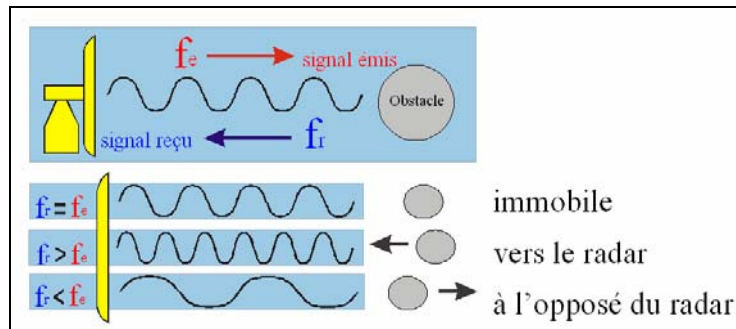


Figure 2 : Principe du radar Doppler © Météo-France

Définition du profil de vent obtenu par radar

Un profil de vent correspond à la valeur du vent en force et direction sur une hauteur verticale définie. Il est caractérisé par :

- Un lieu de mesure (lieu d'installation du profileur)
- Une date de mesure
- Une épaisseur verticale dans laquelle s'inscrivent les mesures. Elle est définie par une hauteur minimale (point de mesure le plus bas), une hauteur maximale (point de mesure le plus haut), une résolution verticale, un nombre de niveaux de mesure et pour chacun de ces niveaux, les trois composantes du vent accompagnées de leurs caractéristiques.
- Une durée représentative de la mesure, pendant laquelle on considère que le milieu sondé garde les mêmes caractéristiques.

Toutes ces informations apparaissent sur un profil de vent issu de la mesure, comme l'exemple suivant, pris le 15 novembre 1999 lors d'une campagne de mesures à Lonate sur une période de 24 heures. L'axe des ordonnées à gauche du profil indique la hauteur, en kilomètres. L'axe des abscisses correspond au temps de mesure (ici, 24 heures). La force du vent (en m/s) est en correspondance avec la couleur de la barbule (barre avec un triangle ou un trait à l'arrière) ; l'échelle est à droite du profil. La direction du vent est indiquée par l'orientation de la barbule :

vent de Nord : ; vent de Sud : ...

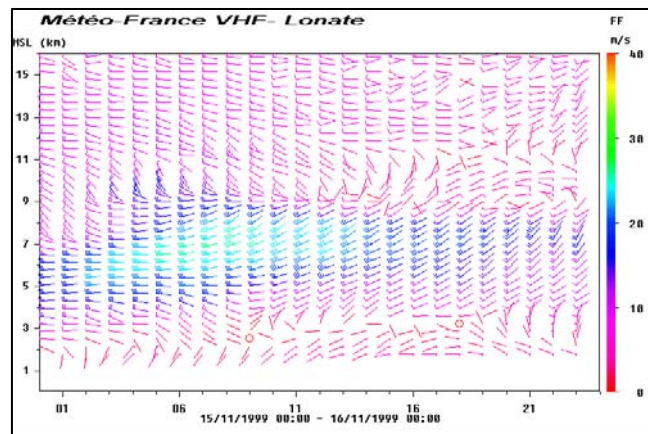


Figure 3 : Exemple de profil de vent obtenu par un radar strato-troposphérique,
 © Météo-France, Centre National de Recherches en Météorologie (CNRM)

Mesure par radar strato-troposphérique

Historique de l'instrument de mesure

Dans les années 1970, les progrès réalisés dans la mesure des précipitations par radar ont conduit à la détection d'échos « fantômes », ne correspondant pas à des zones de précipitations. Ces échos observés sont dus à la présence de zones turbulentes notamment. Ce phénomène a été étudié et précisé à partir du milieu des années 1970. La possibilité d'obtenir des échos, sur quasiment tout le profil vertical entre quelques kilomètres et 100 km d'altitude, a conduit rapidement à la construction de radars spécialisés pour cette couche de l'atmosphère. Si l'on mesure l'effet Doppler de ces échos, la vitesse du vent peut ainsi être obtenue.

Les radars spécialisés mesurant le profil de vent sont aussi appelés profileurs de vent. En météorologie, ces radars couvrent une gamme d'altitude allant jusqu'à une quinzaine de kilomètres.

Longtemps, ils n'ont servi qu'à la recherche, lors de campagne de mesures. Les profils de vent étaient obtenus en temps différé, après dépouillement des données mesurées. A partir des années 1990, les mesures ont pu être totalement automatisées, permettant ainsi aux profileurs d'entrer dans le réseau opérationnel de mesures. Aujourd'hui, ces instruments sont capables de fournir automatiquement et en temps réel les profils de vent intégrés sur des périodes pouvant descendre jusqu'à quelques minutes.

Fonctionnement du radar strato-troposphérique

Principe de la mesure

Les profileurs de vent sont des radars émettant des ondes dans les bandes de fréquences VHF et UHF. Un profileur VHF a une bande de fréquence allant de 30 à 300 MHz, soit une longueur d'onde comprise entre 1 m et 10 m. Un profileur UHF a une bande de fréquence allant de 300 à 3000 MHz, soit une longueur d'onde comprise entre 10 cm et 1 m.

Un radar strato-troposphérique détermine le profil de vent grâce à la turbulence atmosphérique. En effet, la turbulence étant déplacée par le vent, elle constitue un bon traceur pour les radars strato-troposphériques. Cette turbulence se crée par frottements de deux couches d'air se déplaçant à deux vitesses différentes ; sur le schéma suivant, les deux vitesses sont matérialisées par les flèches bleue et verte.



Figure 4 : *Naissance de la turbulence* © Météo-France, CNRM

Ces frottements créent une sorte de rouleaux ayant un diamètre supérieur à 10 m. La turbulence a ensuite des mouvements de taille de plus en plus petite au cours du temps (voir rubrique « En savoir plus », en fin de fiche).

La mesure par un profileur de vent repose sur l'émission d'une onde électromagnétique de haute fréquence. En traversant une zone de turbulence, cette onde subit une diffusion dans toutes les directions à cause de la variation de l'indice de réfraction.

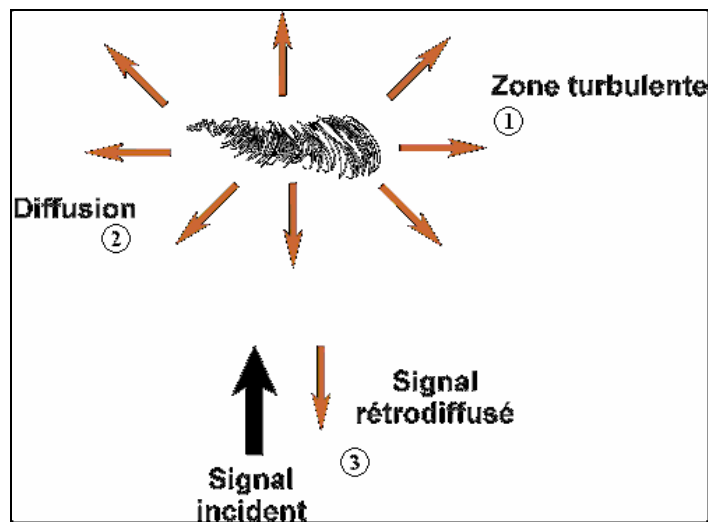


Figure 5 : *Schéma de fonctionnement d'un profileur de vent* © Météo-France, CNRM

Les propriétés des ondes électromagnétiques rétro-diffusées vers le radar sont modifiées. La différence de fréquence entre l'onde émise et l'onde reçue (ou effet Doppler) permet de calculer la vitesse et la direction du vent sur la verticale. Pour cela, le profileur capte les échos rétro-diffusés, fait une analyse spectrale de la réflectivité radar reçue et en déduit le vent à différentes altitudes.

L'onde émise par le radar est envoyée dans cinq directions, une verticale et quatre latérales inclinées à 11 degrés (dans le cas d'un profileur VHF, Very High Frequency) ou à 17 degrés (dans le cas d'un profileur UHF, Ultra High Frequency) par rapport à la verticale. C'est ainsi que l'on obtient les trois composantes de la vitesse du vent (voir figure 6).

Caractéristiques techniques

Avec un profileur UHF, on obtient des profils de vent allant de 100 m à 6 km d'altitude environ. La cadence de délivrance d'un profil complet du vent est de 5 à 15 minutes par profil.

Avec un profileur VHF, les profils de vent couvrent 1,5 à 16 km d'altitude environ. La cadence de délivrance d'un profil complet du vent est de 15 minutes à 1 heure.

Composition d'un radar strato-troposphérique

Un radar strato-troposphérique se décompose en plusieurs parties :

- des antennes qui permettent l'émission et la réception du signal,
- un sous-ensemble de traitement du signal,
- un sous-ensemble de production des données élaborées et de diffusion vers un centre de traitement distant,
- un sous-ensemble permettant le contrôle des opérations.

Le schéma suivant représente un profileur de vent VHF :

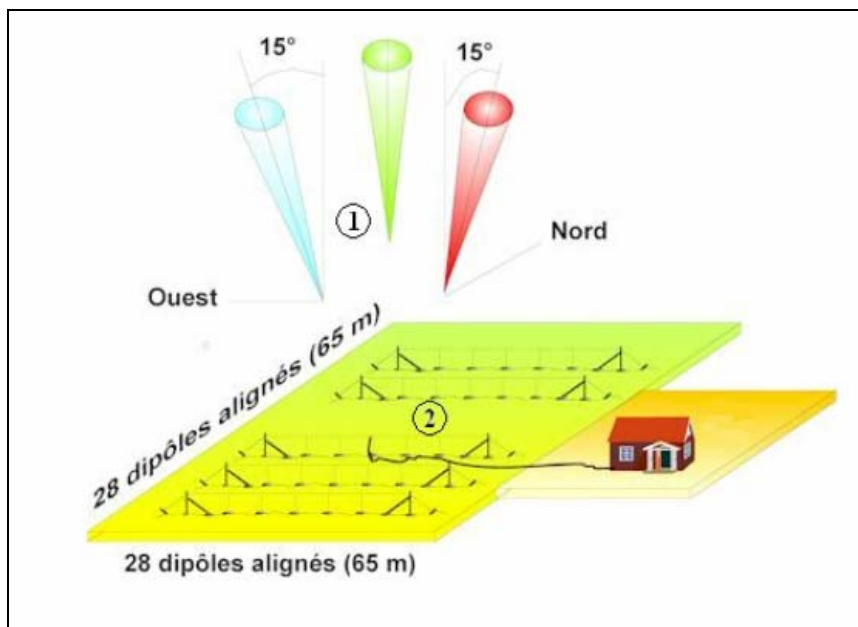


Figure 6 : Schéma d'un profileur VHF © Météo-France, CNRM

Pour mesurer le vent en altitude, il faut envoyer des ondes dans au moins trois directions de tirs indépendantes : la verticale, vers le Nord et vers l'Ouest, les tirs obliques étant inclinés de 15° par rapport au zénith. Ceci est représenté par les trois cônes de la partie 1 du schéma ; chaque couleur représentant une direction différente.

La partie 2 correspond aux antennes du profileur qui envoient et reçoivent les signaux. La surface d'antenne détermine la largeur du lobe principal, c'est-à-dire la finesse du faisceau.

Pour obtenir des mesures précises, la largeur de ces faisceaux doit être de l'ordre de 5 à 10°. Il faut pour cela des antennes d'environ 60x60m en VHF (50 MHz) et 3x3m en UHF (1 GHz).

Pour le radar VHF, on utilisera soit un réseau de câbles colinéaires coaxiaux, soit des antennes de type YAGI. Les antennes YAGI sont des antennes du même type que celles utilisées pour la réception de la télévision hertzienne.

Pour un profileur UHF, la surface d'antennes varie de 2 à 200 m de coté. Les petits modèles sont constitués d'un ensemble de cinq panneaux plats (1 vertical, 2 Nord-Sud et 2 Ouest-Est), montés sur une remorque qui facilite le transport lors des campagnes de mesures.

La hauteur maximale du profil vertical obtenue par un profileur dépend essentiellement du produit de la surface d'antenne par la puissance du signal émis par l'instrument. Ainsi, pour atteindre une hauteur de 30 km, le profileur doit émettre une centaine de kW avec une antenne d'au moins 50x50m, ce qui correspond aux possibilités du radar VHF, pour une hauteur de 16 km, à surface d'antenne égale, la puissance doit s'établir à une dizaine de kW et pour une hauteur de 5 km il suffit d'une puissance de quelques kW et d'une surface d'antenne de 2,5x2,5m, ce qui est particulièrement adapté au radar UHF .

Les radars strato-troposphériques à Météo-France :

Météo-France dispose de trois profileurs de vent fixes localisés à La Ferté Vidame, à Marignane et à Nice. Deux profileurs destinés à la recherche sont également à Toulouse et sont utilisés lors de campagne de mesures comme AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) en 2006 / 2007.

Voici les caractéristiques techniques de chacun de des instruments fixes :

Lieu	La Ferté Vidame	Marignane	Nice
Latitude (°)	48.62 N	43.44 N	43.65 N
Longitude (°)	0.88 E	5.23 E	7.20 E
Altitude (m)	245	7	4
Fréquence (MHz)	52.05	1238	1274
Longueur d'onde (m)	5.76	0.24	0.24
Puissance crête (kW)	18	3.5	3.5
Portée (m)	1300 à 21000	50 à 8000	50 à 8000
Résolution (m)	510	75 à 375	75 à 375
Inclinaison des tirs obliques (°)	11	17	17



Photo 1 : Profileur de la ferté Vidame © Météo-France, CNRM



Photo 2 : Professeur du CNRM © Météo-France, CNRM

Mesure par radar météorologique du réseau de Météo-France, bénéficiant de l'effet Doppler

Composition d'un radar météorologique bénéficiant du système Doppler

Un radar Doppler, comme tout radar météorologique détectant les précipitations, est constitué d'une antenne parabolique, d'un émetteur, d'un récepteur et d'un système d'acquisition de données (aussi nommé calculateur) :

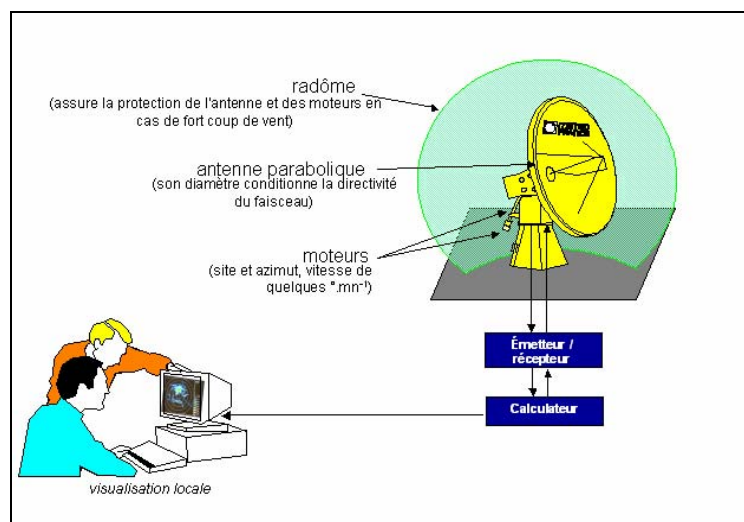


Figure 7 : Composition d'un radar Doppler,

© Météo-France, extrait de cours de l'Ecole Nationale de la Météorologie

Fonctionnement du radar bénéficiant du système Doppler

Principe de la mesure

Contrairement au radar strato-troposphérique, le radar météorologique de précipitation opère à des fréquences plus élevées (3 à 5 GHz, soit 5 à 10 cm de longueur d'onde). Il est particulièrement sensible aux précipitations. Comme celles-ci se déplacent avec le vent, il peut aisément mesurer ce paramètre. Les vitesses radiales détectées sont positives lorsque les cellules de précipitations s'approchent du radar, négatives lorsqu'elles s'en éloignent et nulles quand leur vitesse de déplacement est orthogonale à la direction de visée (azimut). Le radar

peut également mesurer le vent par ciel clair, en se servant de la turbulence ou des échos d'insectes.

Un radar météorologique bénéficiant du système Doppler fonctionne de la même manière qu'un radar strato-troposphérique (voir paragraphe ci-dessus). Il envoie une onde et reçoit une onde rétro-diffusée. Le traitement se fait de manière similaire à celle du radar strato-troposphérique.

Enfin, le radar météorologique doppler balaye tout l'azimut avec un angle fixe (VAD ou Velocity Azimuth Display), noté θ sur le schéma suivant, ce qui lui permet d'obtenir le vent dans les trois dimensions de l'espace.

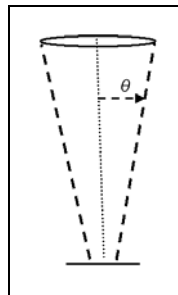


Figure 8 : Schéma de balayage d'un radar météorologique
© Météo-France, Mylène Civiato et Flavie Mandel

Caractéristiques techniques

On obtient un profil toutes les 15 minutes. Chaque profil est représentatif d'une zone de 30 km de rayon centrée sur le radar. Les mesures de vent à chaque niveau sont indépendantes les unes des autres dans l'espace et dans le temps.

Exemple de profil de vent obtenu par radar météorologique :

Voici un profil vertical obtenu par mesure entre 0h00 et 12h00 TU à Trappes le 03/03/2005.

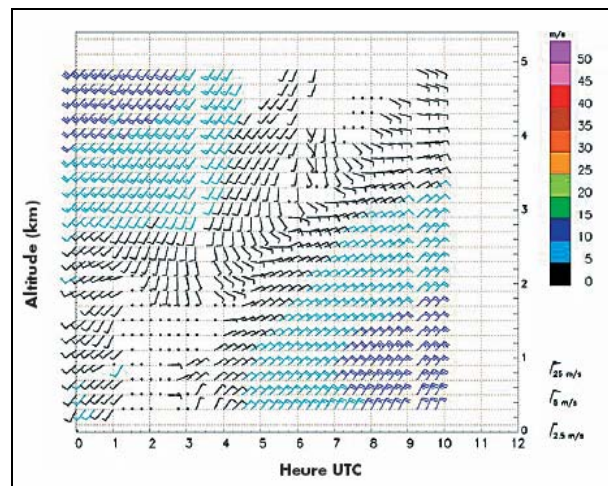


Figure 9 : Exemple de profil vertical © Météo-France

Les radars Doppler à Météo-France



Figure 10 : Réseau des radars de Météo France © Météo-France



Photo 3 : Radar de Trappes © Météo-France

En savoir plus :

Le schéma suivant illustre l'évolution de la turbulence, de sa naissance à sa dissipation.

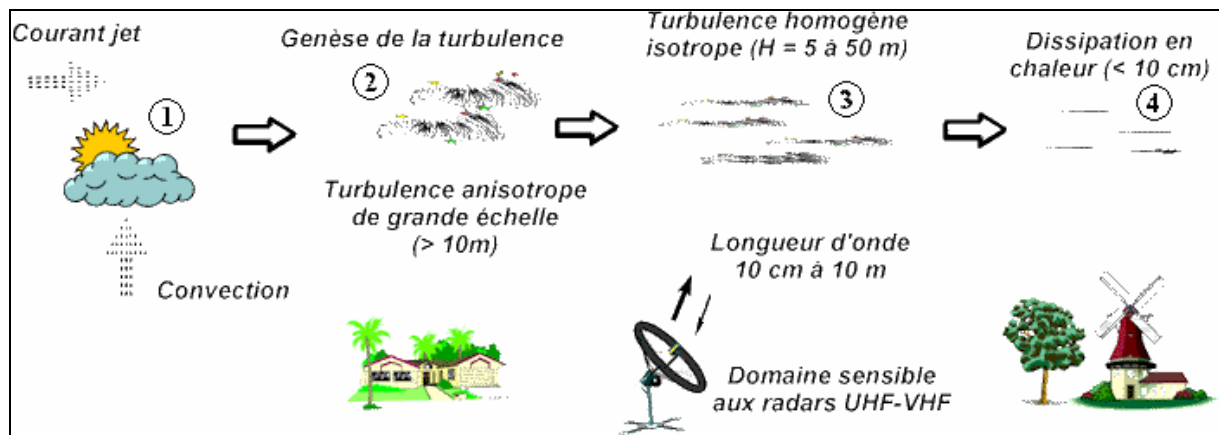


Figure 11 : Evolution temporelle de la turbulence © Météo-France, CNRM

La turbulence naît lorsque deux couches d'air se déplaçant à deux vitesses différentes se rencontrent. La convection crée des mouvements verticaux alors qu'un courant jet entraîne un déplacement horizontal rapide. La turbulence peut commencer dans la zone 1, située entre le courant jet et la convection.

Après sa naissance, la turbulence a lieu sur une échelle spatiale assez grande (> 10 m) ; elle ne renvoie pas les ondes de la même manière dans toutes les directions ce qui lui vaut le qualificatif d'anisotrope : zone 2.

Plus tard dans son évolution, en zone 3, l'échelle spatiale diminue (de 5 à 50 m) et la turbulence devient homogène (identique en tout endroit) et isotrope ; la diffusion des ondes est égale dans toutes les directions.

Enfin, la turbulence se dissipe en chaleur, c'est la zone 4, avant de disparaître complètement. Elle ne peut alors plus être mesurée.

Bibliographie :

MAUPRIVEZ, Michel, SANDRA, Jean-Pierre. Les profileurs de vent à vocation opérationnelle. *La météorologie*, Société Météorologique de France, novembre 2002, Spécial Observation Vol. 1, 8^e série, n°39. p. 71 – 75.

Webographie :

METEO France CNRM/GMEI/STM. *Bienvenue sur le site de l'équipe STM de CNRM/GMEI, dédié au radar ST*. Toulouse : CNRM, 2008. Fichier informatique.

URL <http://intra.cnrn.meteo.fr/stm/index.html>.