



Radars météorologiques

Vue d'ensemble et perspectives

Corentin LUBEIGT

Centre de Météorologie Radar / Développements, Études et Perspectives

24 février 2025

Avant propos



- Cette présentation a pour but d'introduire le radar météorologique et de présenter son fonctionnement global.

1. Introduction

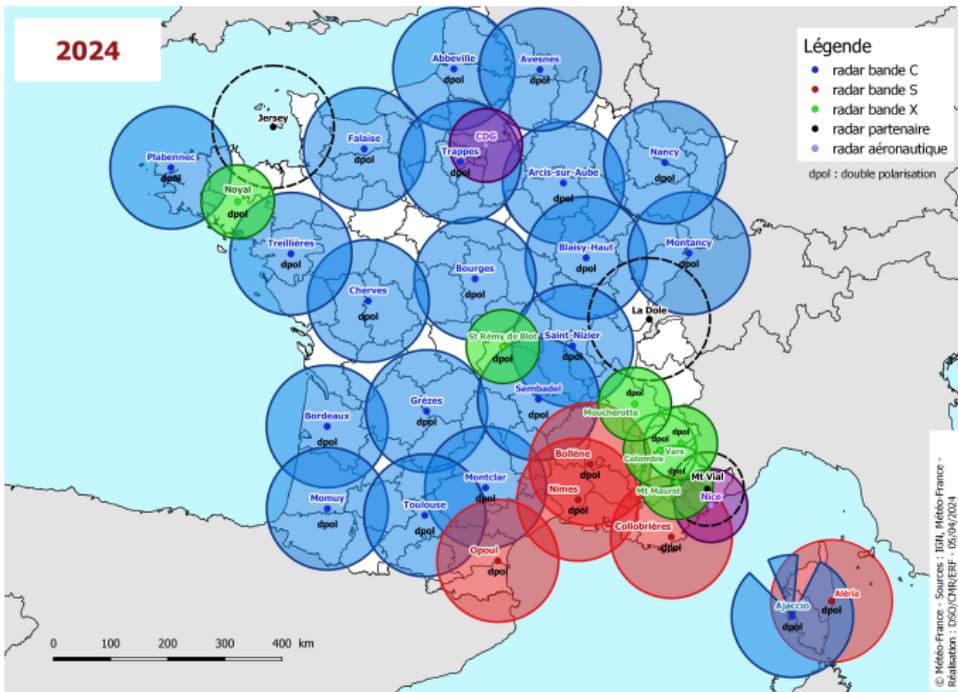
On s'intéresse à quoi ?



Réseau radar en métropole



METEO
FRANCE



Réseau radar en métropole



Réseau radar outre-mer



OPERA – Un réseau européen



Les radars météorologiques sont devenus incontournables pour :

- le suivi des systèmes précipitants,
- l'aéronautique (convection, cisaillement de vent),
- la prévision numérique (assimilation réflectivité et vent)
- la prévision des crues (lame d'eau),
- le suivi du manteau neigeux,
- le suivi de la migration avifaune.

2. Le radar météorologique

Principe du radar



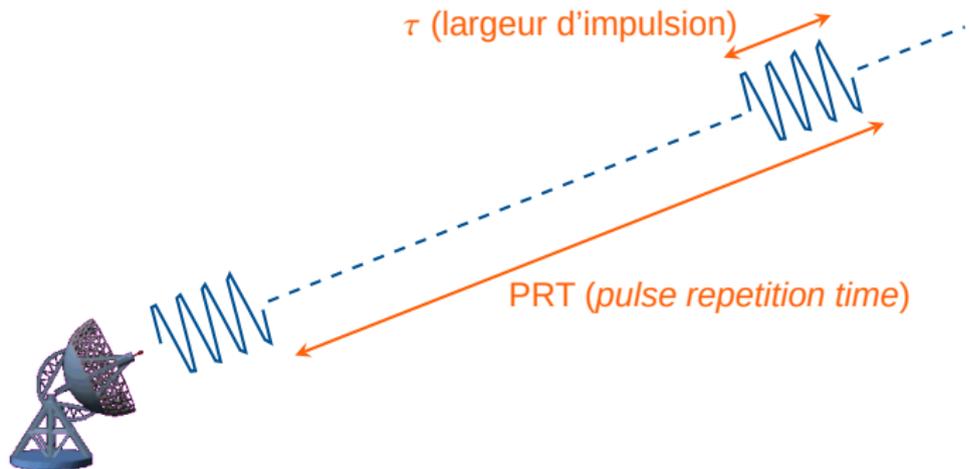
RADAR : **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging

Dispositif permettant de déterminer la **position** et la **vitesse** d'une cible (**hydrométéores ou autres**) par l'**émission d'ondes électromagnétiques** et par la **détection des ondes réfléchies** par ces cibles.



Figure – Radar bande X du Mont Maurel.

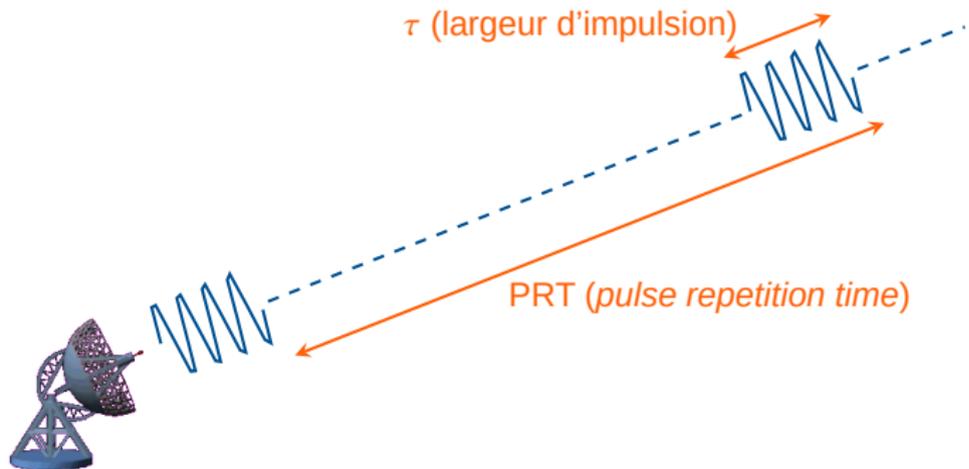
Principe du radar conventionnel



Toutes les **PRT**, le radar émet une onde électromagnétique pendant une durée τ , celle-ci se propage à la vitesse de la lumière. Entre chaque impulsion, le radar **écoute** les ondes réfléchies par les cibles.



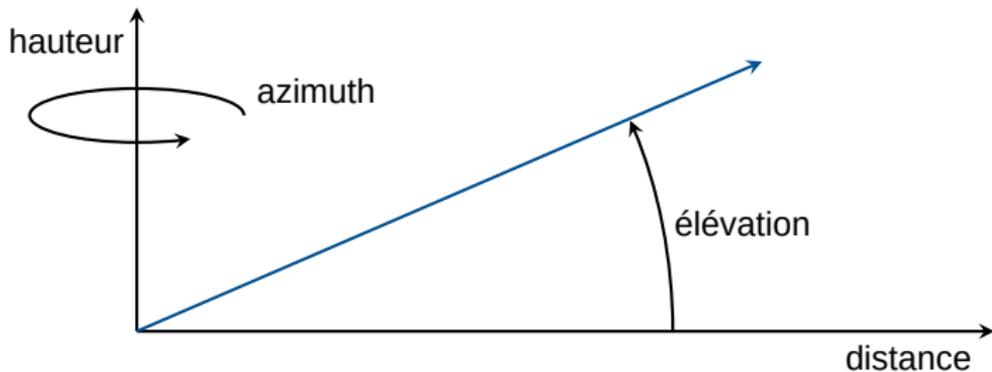
Principe du radar conventionnel

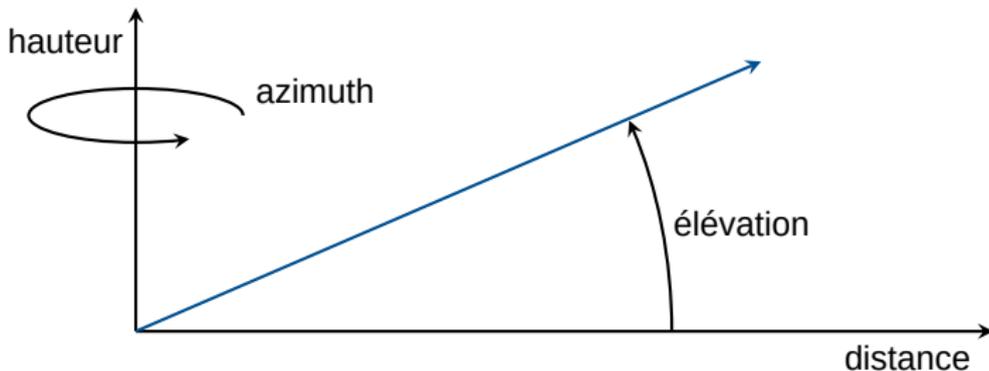


Toutes les **PRT**, le radar émet une onde électromagnétique pendant une durée τ , celle-ci se propage à la vitesse de la lumière. Entre chaque impulsion, le radar **écoute** les ondes réfléchies par les cibles.

La PRT fixe la **portée maximale** du radar : $R_{max} \approx \frac{cPRT}{2}$.

Exploration et observation





Les caractéristiques de l'onde réfléchi permettent de déterminer les propriétés de la cible :

- **azimuth** : direction
- **temps de parcours** : distance
- **puissance reçue** : réflectivité
- **variation de la phase entre deux impulsions** : vitesse

Volume de résolution

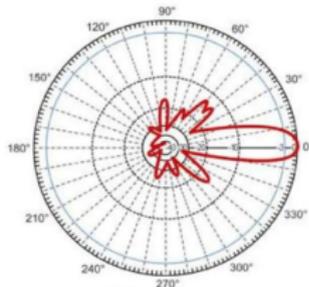


Figure – Diagramme d'antenne.

Volume de résolution

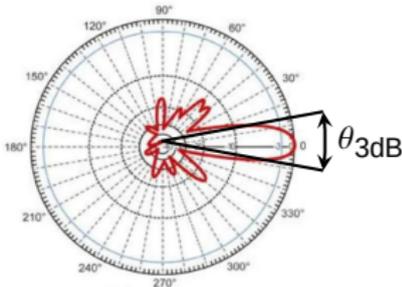
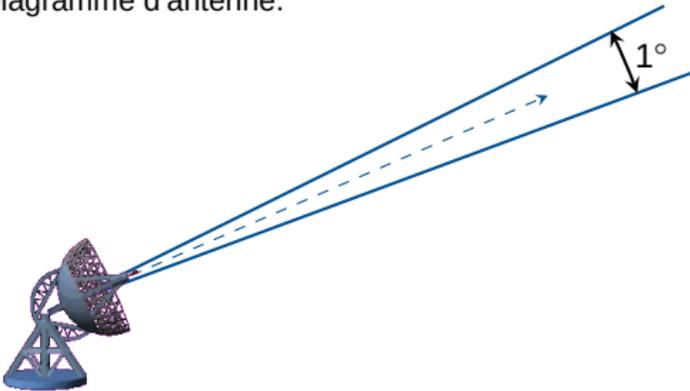


Figure – Diagramme d'antenne.



Volume de résolution

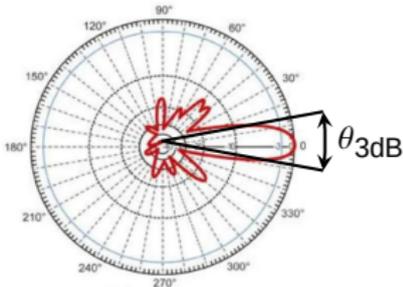
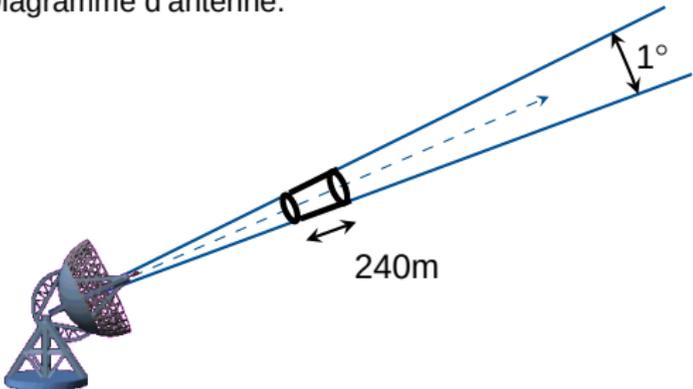
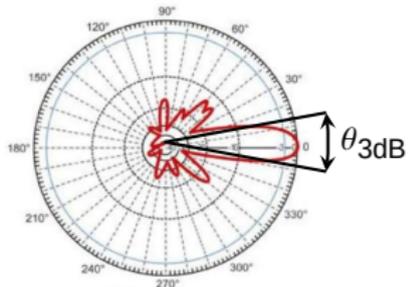


Figure – Diagramme d'antenne.



Volume de résolution



à 100km,

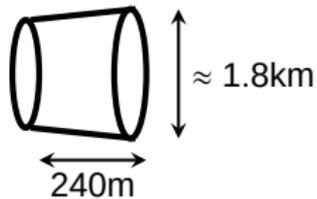
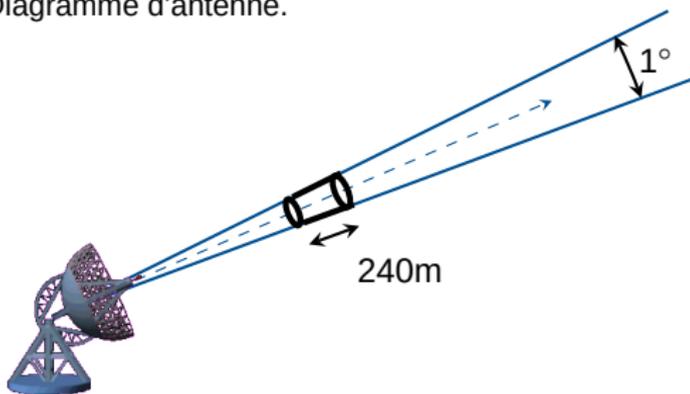
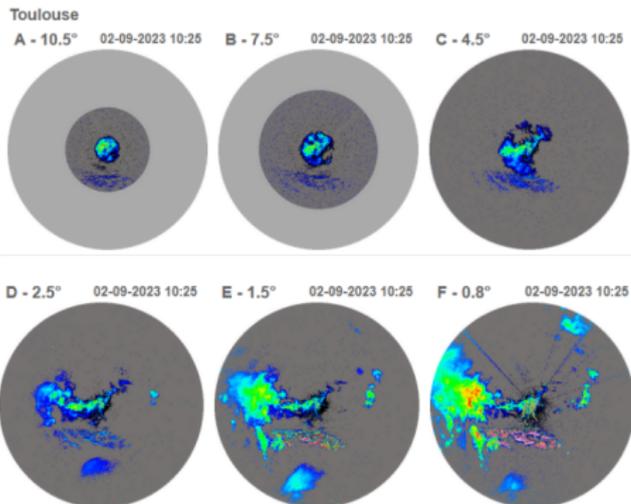


Figure – Diagramme d'antenne.



La réflectivité

La réflectivité représente la densité d'**hydrométéores** dans le volume de résolution en supposant une répartition uniforme d'une taille donnée.



Intérêt : Estimation du **taux de précipitation R** (mm/h) :

$$Z_H = aR^b$$

Loi de Marshall-Palmer :

$$a = 200, b = 1.6$$

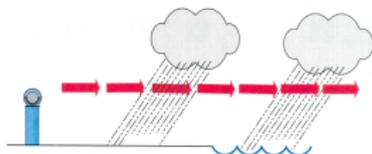
Limites :

- atténuation,
- masques partiels,
- étalonnage du radar.



METEO
FRANCE

Effet de la longueur d'onde

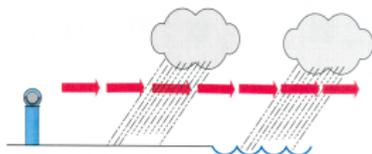


Les longueurs d'onde grandes par rapport à la taille des gouttes **traversent** les précipitations sans que le signal renvoyé soit mesurable.

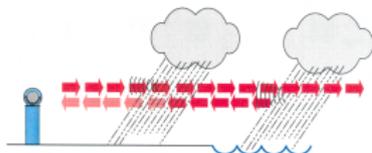


METEO
FRANCE

Effet de la longueur d'onde



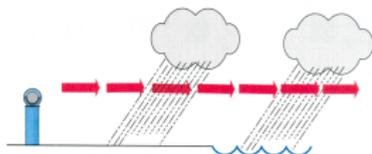
Les longueurs d'onde grandes par rapport à la taille des gouttes **traversent** les précipitations sans que le signal renvoyé soit mesurable.



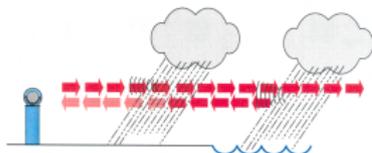
Les longueurs d'onde appropriées **interagissent** avec les précipitations et le signal est mesurable.



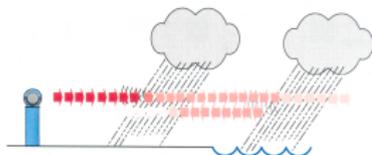
Effet de la longueur d'onde



Les longueurs d'onde grandes par rapport à la taille des gouttes **traversent** les précipitations sans que le signal renvoyé soit mesurable.



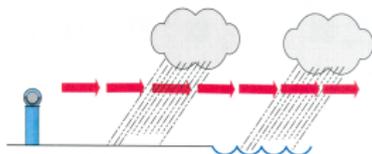
Les longueurs d'onde appropriées **interagissent** avec les précipitations et le signal est mesurable.



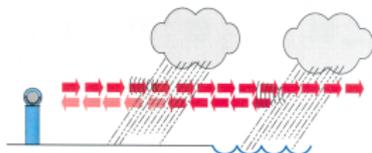
Les longueurs d'onde petites par rapport à la taille des gouttes **sont absorbées** par les précipitations, ce qui implique une forte atténuation.



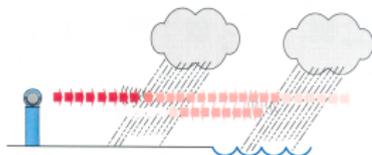
Effet de la longueur d'onde



Les longueurs d'onde grandes par rapport à la taille des gouttes **traversent** les précipitations sans que le signal renvoyé soit mesurable.



Les longueurs d'onde appropriées **interagissent** avec les précipitations et le signal est mesurable.



Les longueurs d'onde petites par rapport à la taille des gouttes **sont absorbées** par les précipitations, ce qui implique une forte atténuation.

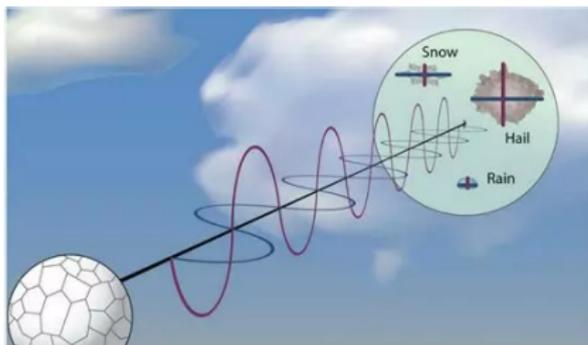
| Bande | K | X | C | S | L |
|----------------------|--------|----------------|---|-----------|-----|
| Longueur d'onde (cm) | 30 | 10 | 6 | 3 | 1.5 |
| Fréquence (GHz) | 1 | 3 | 5 | 10 | 20 |
| Usage | nuages | précipitations | | aéro/GNSS | |



Principe de la double-polarisation

Radars à double-polarisation

- standards dans les réseaux opérationnels,
- deux ondes sont émises simultanément : polarisation horizontale et verticale,
- informations sur les propriétés microphysiques des hydrométéores en moyenne dans le volume de résolution (1km^3)



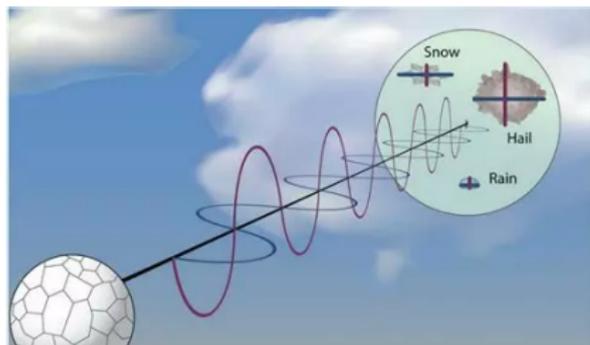
- taille,
- forme,
- orientation,
- composition.



Principe de la double-polarisation

Radars à double-polarisation

- standards dans les réseaux opérationnels,
- deux ondes sont émises simultanément : polarisation horizontale et verticale,
- informations sur les propriétés microphysiques des hydrométéores en moyenne dans le volume de résolution (1km^3)

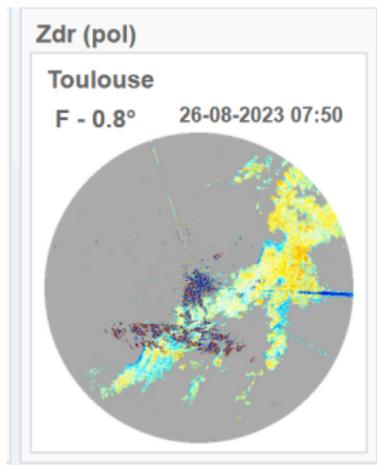


- taille,
 - forme,
 - orientation,
 - composition.
- ⇒ **typage** des objets !



Les produits la double-polarisation

- Z_{DR} : le rapport de réflectivités entre la voie H et la voie V (ex : aplatissement des gouttes),





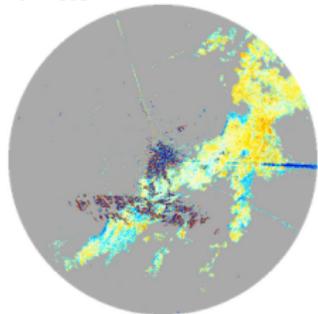
Les produits la double-polarisation

- Z_{DR} : le rapport de réflectivités entre la voie H et la voie V (ex : aplatissement des gouttes),
- ρ_{HV} : le coefficient de corrélation copolaire (ex : homogénéité dans le volume),

Zdr (pol)

Toulouse

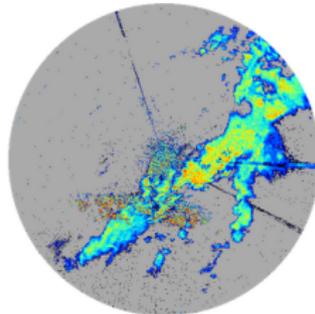
F - 0.8° 26-08-2023 07:50



RhoHV (pol)

Toulouse

F - 0.8° 26-08-2023 07:50





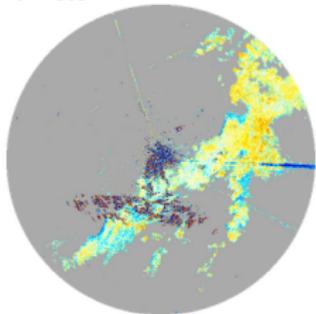
Les produits la double-polarisation

- Z_{DR} : le rapport de réflectivités entre la voie H et la voie V (ex : aplatissement des gouttes),
- ρ_{HV} : le coefficient de corrélation copolaire (ex : homogénéité dans le volume),
- ϕ_{DP} : la phase différentielle entre les deux voies (ex : atténuation),

Zdr (pol)

Toulouse

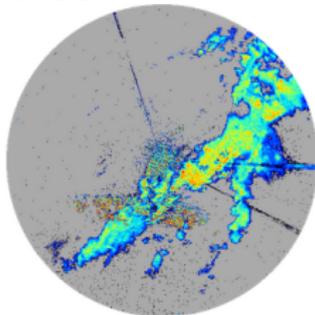
F - 0.8° 26-08-2023 07:50



RhoHV (pol)

Toulouse

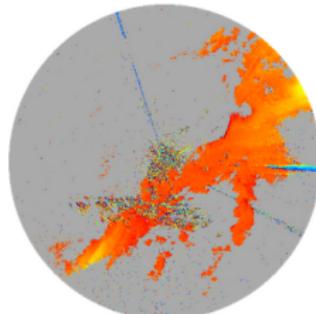
F - 0.8° 26-08-2023 07:50



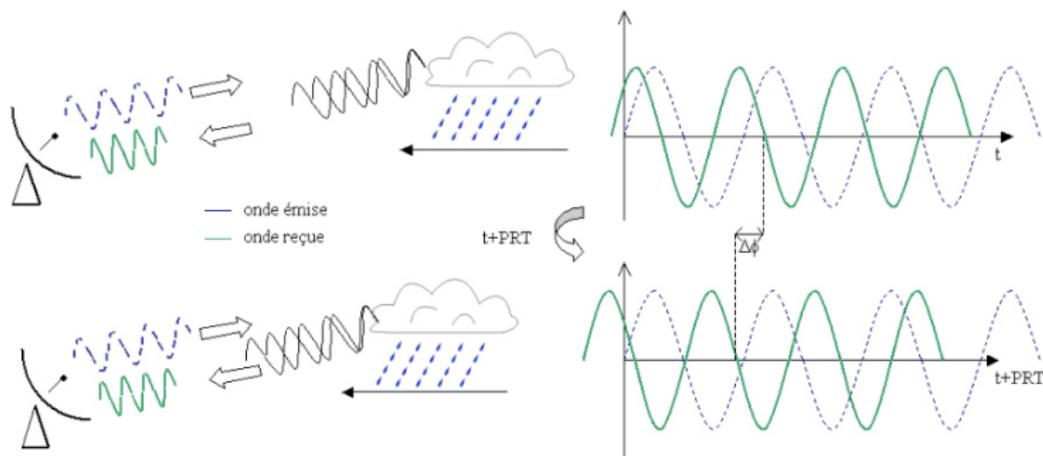
PhiDP (pol)

Toulouse

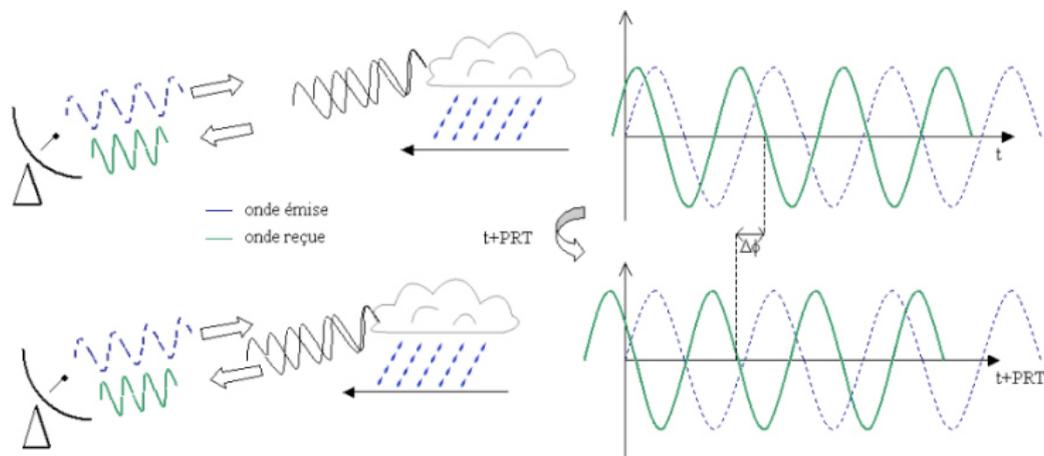
F - 0.8° 26-08-2023 07:50



Principe de mesure



Principe de mesure



Le déplacement des cibles entraîne une variation de phase entre deux impulsions séparées de PRT (*Pulse Repetition Time*).

$$\hat{v}_r = \frac{\lambda}{4\pi\text{PRT}} \Delta\Phi$$

Ambiguïté de la mesure



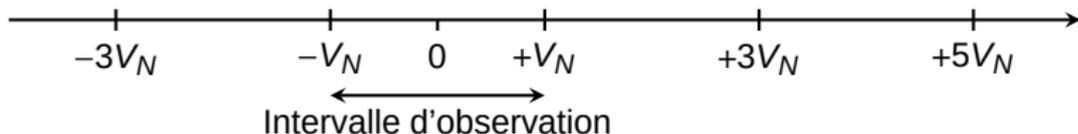
Le décalage de phase mesuré est nécessairement compris entre $-\pi$ et π . La vitesse mesurée est donc dans un intervalle de Nyquist : $\pm V_N = \frac{\lambda}{4PRT}$.

Ambiguïté de la mesure



Le décalage de phase mesuré est nécessairement compris entre $-\pi$ et π . La vitesse mesurée est donc dans un intervalle de Nyquist : $\pm V_N = \frac{\lambda}{4PRF}$.

Exemple : radar de Toulouse (bande C), PRF = 550 Hz $\rightarrow V_N = 7.3\text{m/s}$.

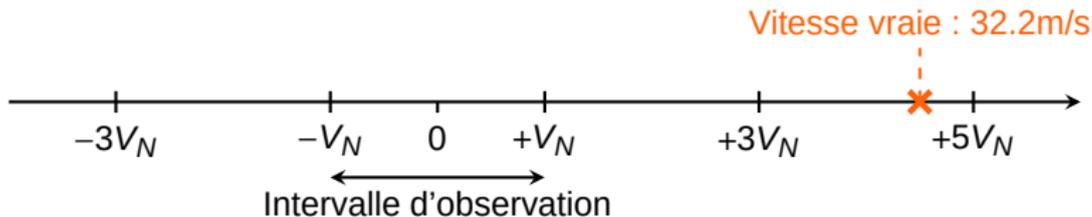


Ambiguïté de la mesure



Le décalage de phase mesuré est nécessairement compris entre $-\pi$ et π . La vitesse mesurée est donc dans un intervalle de Nyquist : $\pm V_N = \frac{\lambda}{4PRT}$.

Exemple : radar de Toulouse (bande C), PRF = 550 Hz $\rightarrow V_N = 7.3\text{m/s}$.

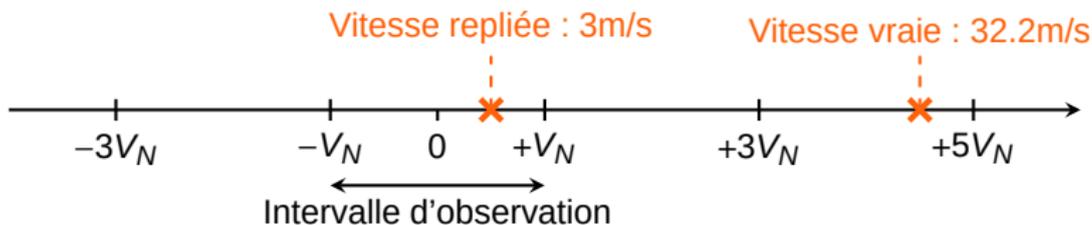




Ambiguïté de la mesure

Le décalage de phase mesuré est nécessairement compris entre $-\pi$ et π . La vitesse mesurée est donc dans un intervalle de Nyquist : $\pm V_N = \frac{\lambda}{4PRT}$.

Exemple : radar de Toulouse (bande C), PRF = 550 Hz $\rightarrow V_N = 7.3\text{m/s}$.



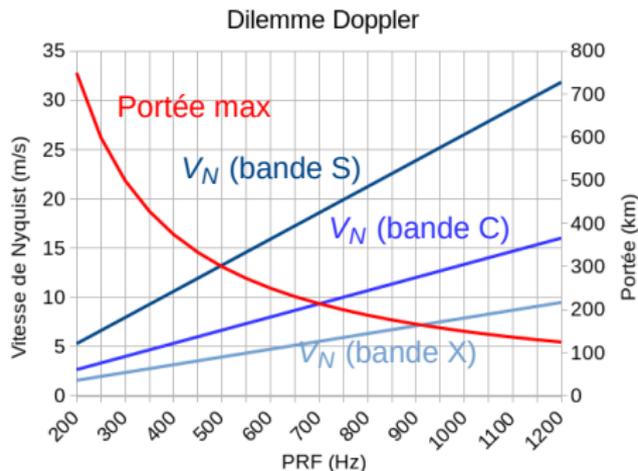
On parle d'**ambiguïté de la mesure**, la vitesse vraie est repliée dans l'intervalle de Nyquist. Pour la retrouver il faut **déplier** la vitesse mesurée.

Le schéma triple PRT



$$V_N = \frac{\lambda}{4PRT}, \quad R_{max} = \frac{cPRT}{2},$$

Pour lever l'ambiguïté, on pourrait simplement diminuer la PRT mais cela diminuerait la portée du radar. C'est le dilemme Doppler.



Le schéma triple PRT



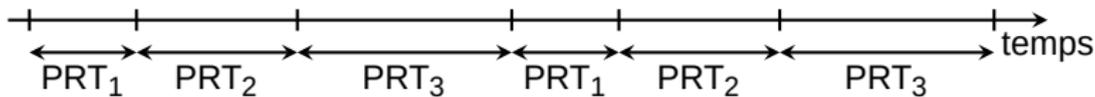
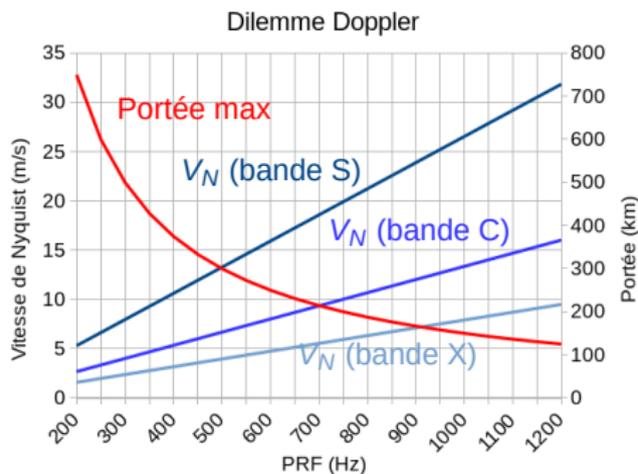
$$V_N = \frac{\lambda}{4PRT}, \quad R_{max} = \frac{cPRT}{2},$$

Pour lever l'ambiguïté, on pourrait simplement diminuer la PRT mais cela diminuerait la portée du radar. C'est le **dilemne Doppler**.

Pour étendre l'intervalle de Nyquist, on utilise la méthode *staggered-PRT*.

Météo-Franc utilise la triple-PRT :

$$V_N = \pm 60\text{m/s}.$$



Les trois PRT ont chacune leur propre intervalle de Nyquist (V_{N1} , V_{N2} , V_{N3}) et donnent trois mesures repliée différentes (\hat{v}_1 , \hat{v}_2 , \hat{v}_3).

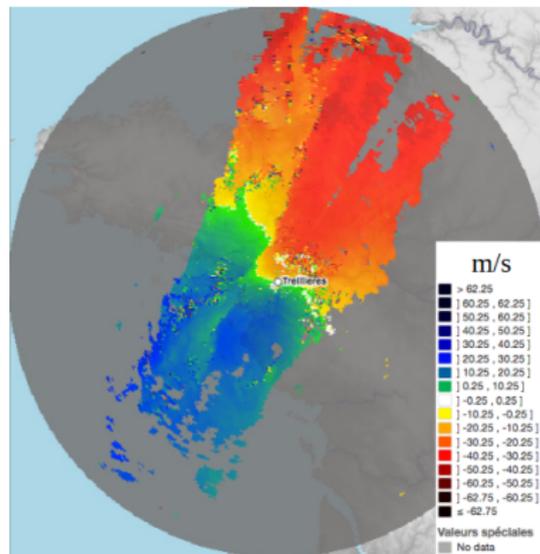
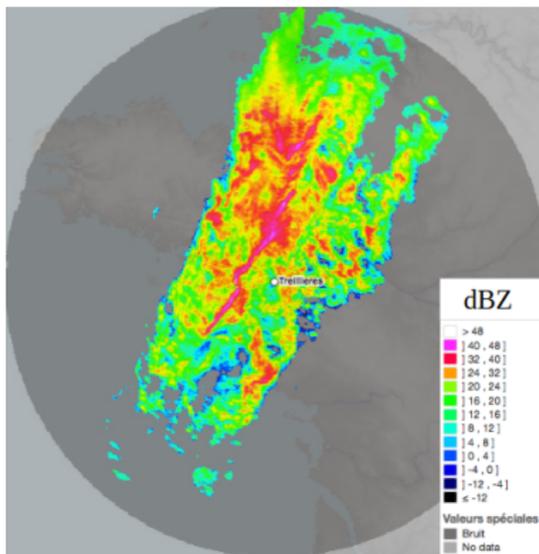


La mesure Doppler – chose à retenir

- La mesure Doppler permet d'avoir une estimation du **vent radial** (selon l'axe du faisceau)./
- La vitesse mesurée n'est pas celle du vent mais celle des **cibles** (précipitations).
- Elle permet d'identifier d'estimer l'intensité de certains phénomènes météorologiques (fronts de rafales, mésocyclones, etc.).
- En combinant les données sur l'ensemble du domaine radar, il est possible de produire des **profils verticaux de vent** (VAD : *Velocity-Azimuth Display*) et une **mosaïque 3D de vent**.
- Entre autres applications, la donnée de vitesse radiale est utilisée pour l'identification des échos fixes et la mosaïque de cisaillement.

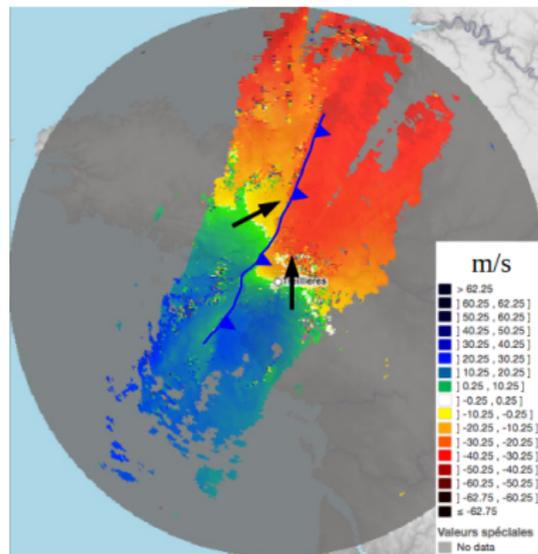
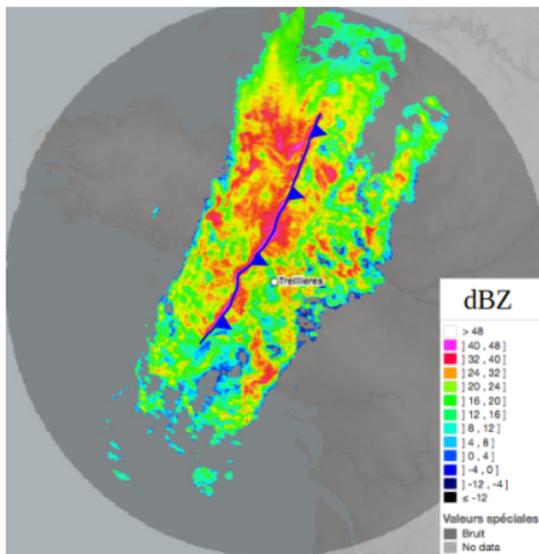
Exemple : front froid à Treillières

Réflectivité (gauche) et vitesses radiales (droite) de l'élévation 0.4° du radar de Treillières (44) le 31/10/2021 à 9:00 UTC.



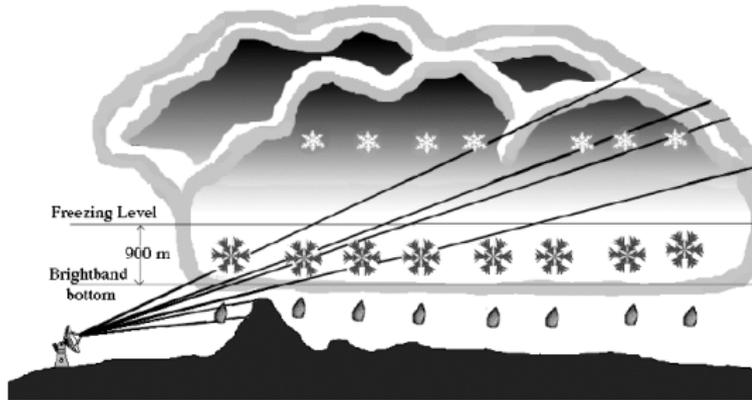
Exemple : front froid à Treillières

Réflectivité (gauche) et vitesse radiales (droite) de l'élévation 0.4° du radar de Treillières (44) le 31/10/2021 à 9:00 UTC.

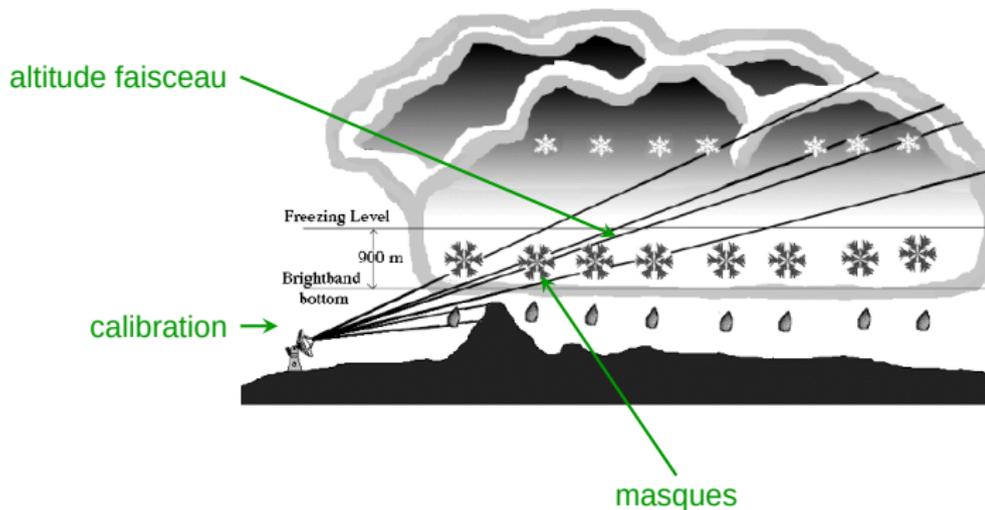


3. Sources d'erreur

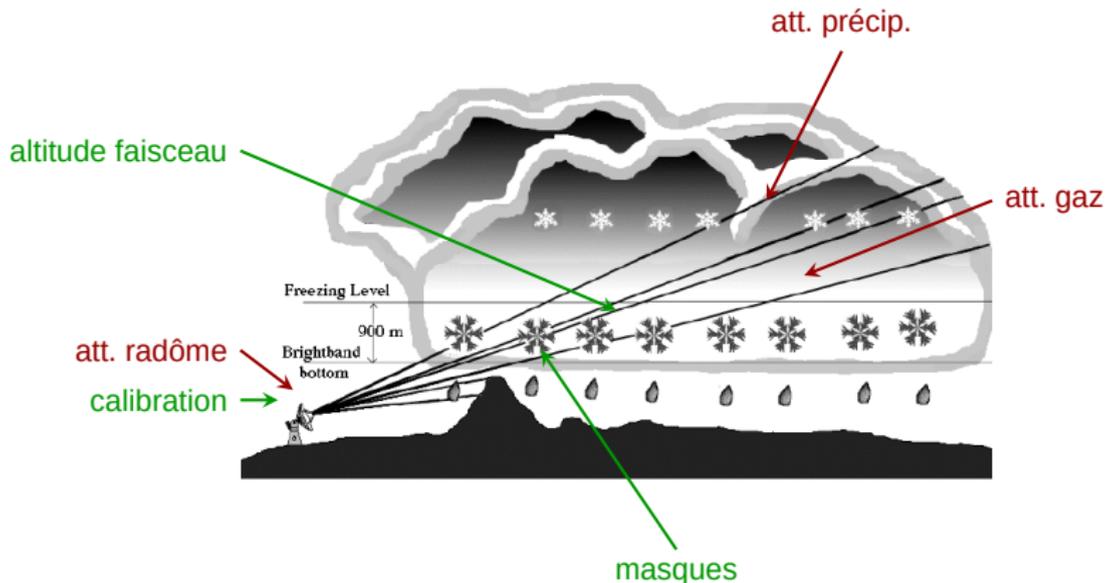
Les sources d'erreur



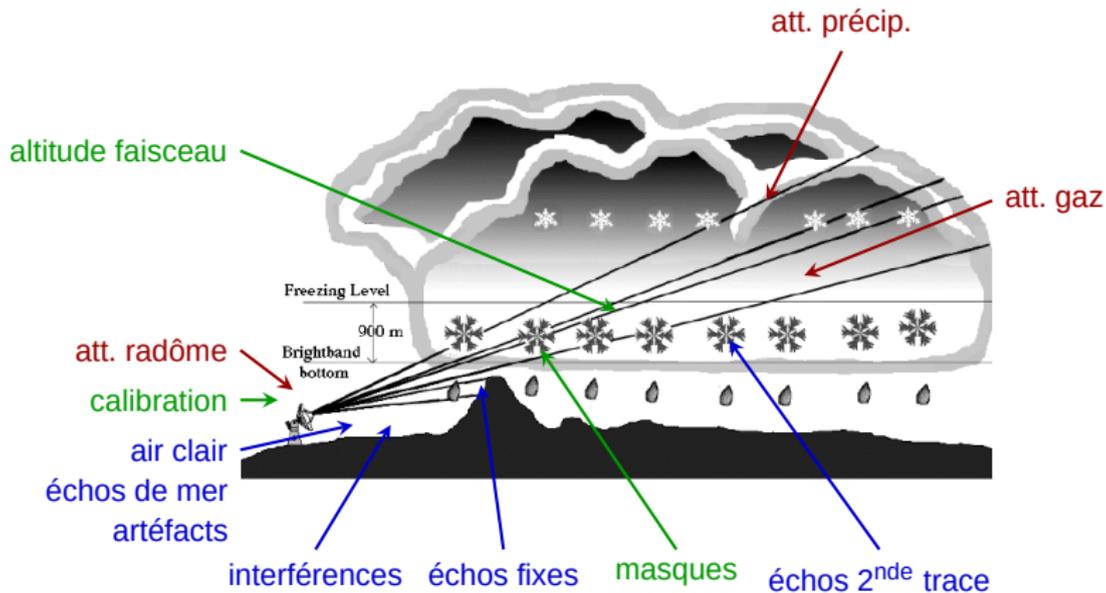
Les sources d'erreur



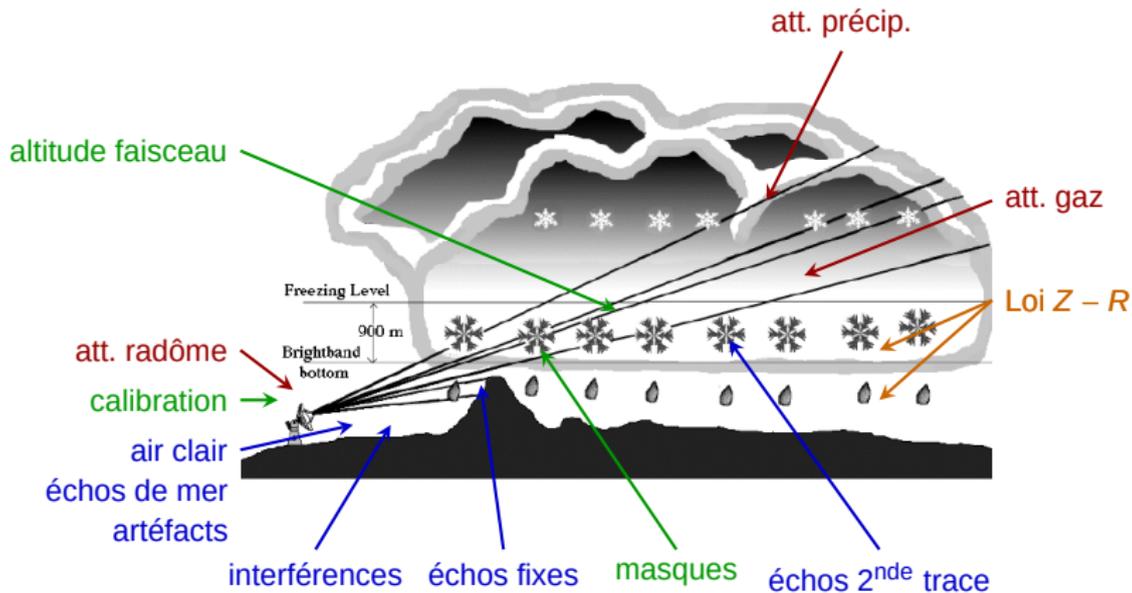
Les sources d'erreur



Les sources d'erreur

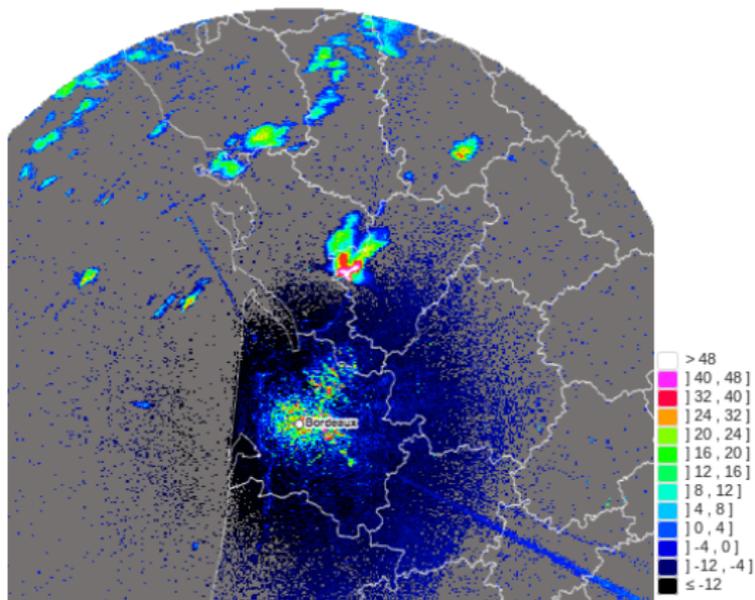


Les sources d'erreur



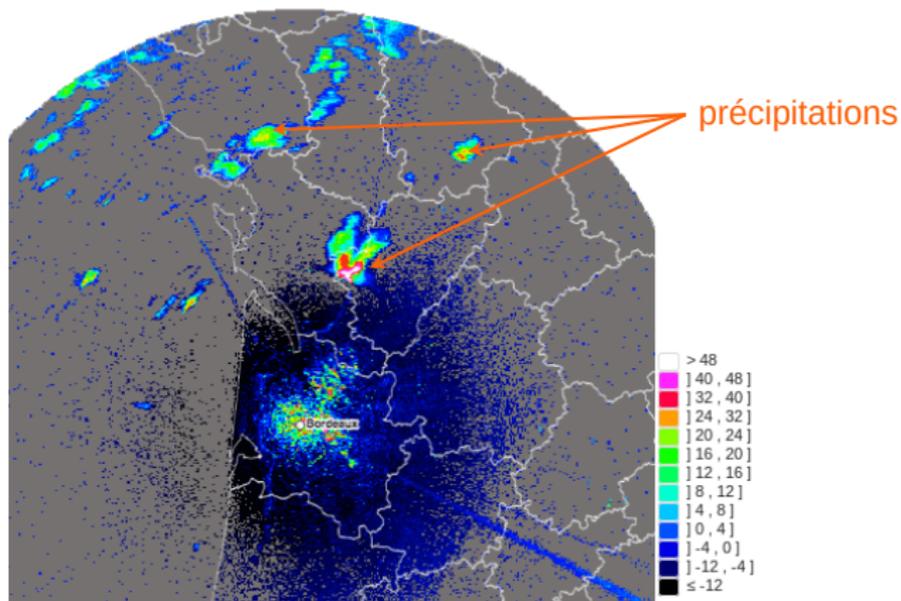
Exemples air clair

Image de réflectivité brute à Bordeaux (33) le 27/05/2018 à 14:40 UTC.



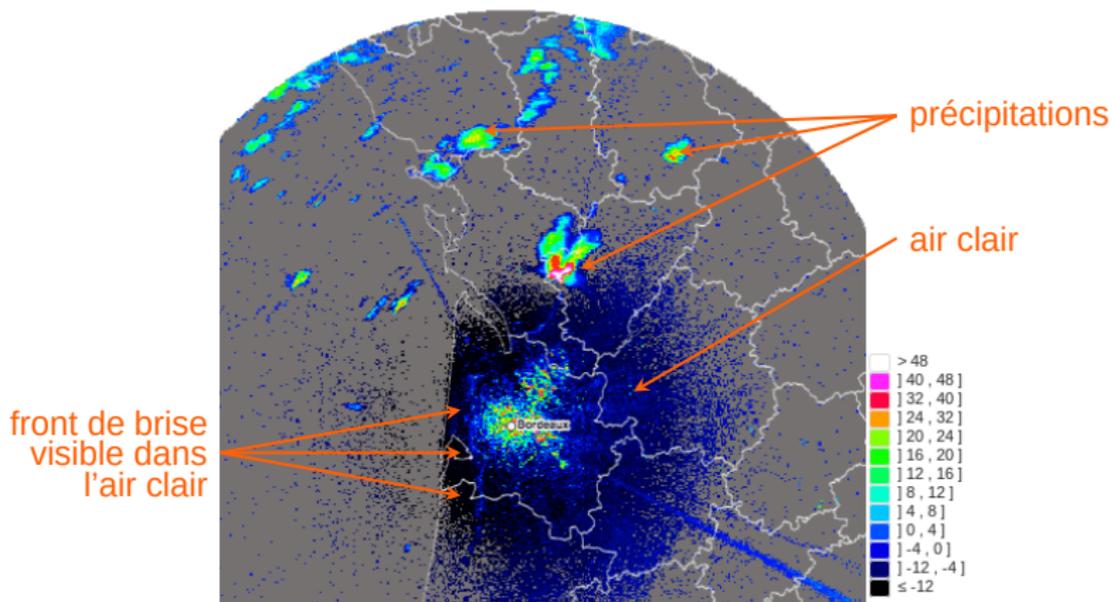
Exemples air clair

Image de réflectivité brute à Bordeaux (33) le 27/05/2018 à 14:40 UTC.



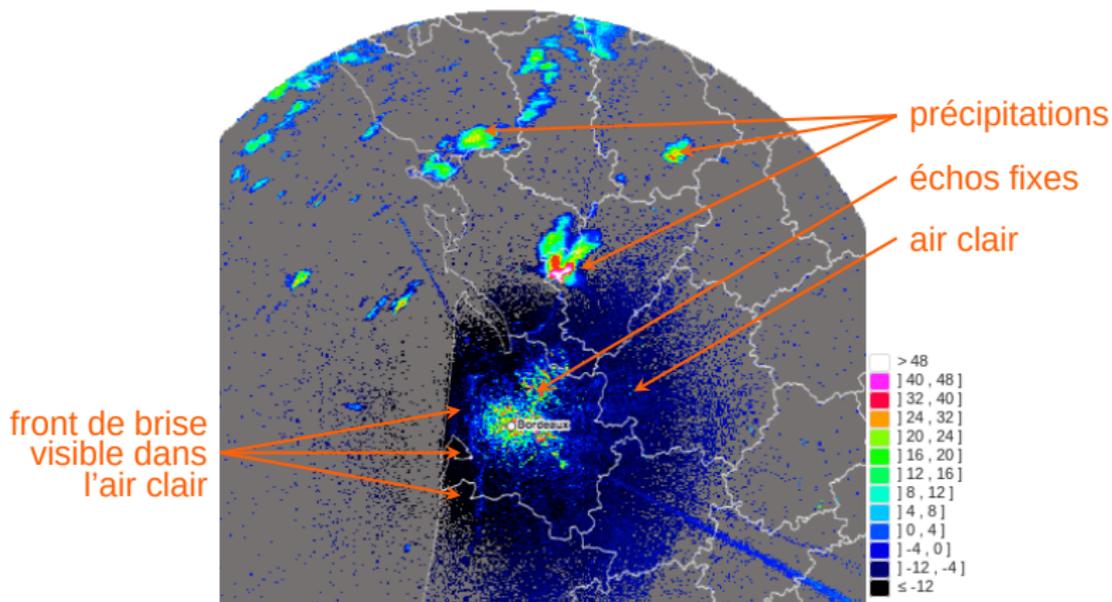
Exemples air clair

Image de réflectivité brute à Bordeaux (33) le 27/05/2018 à 14:40 UTC.



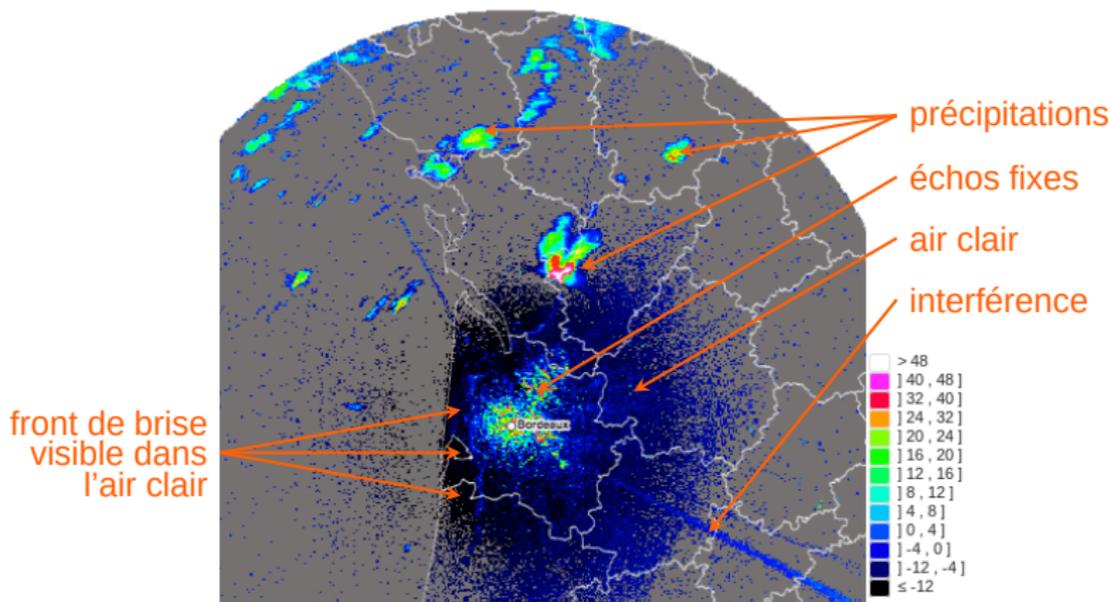
Exemples air clair

Image de réflectivité brute à Bordeaux (33) le 27/05/2018 à 14:40 UTC.



Exemples air clair

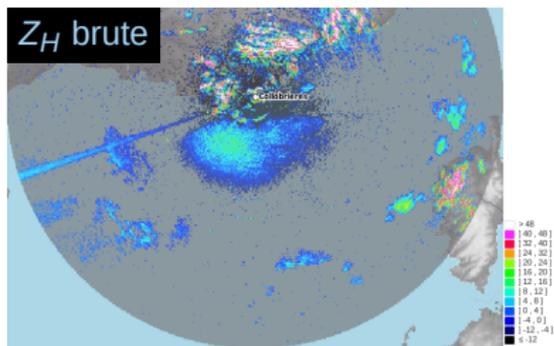
Image de réflectivité brute à Bordeaux (33) le 27/05/2018 à 14:40 UTC.





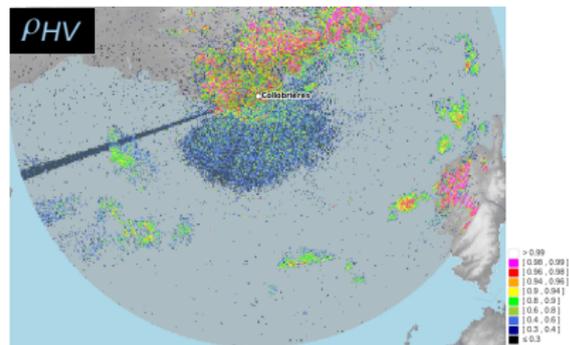
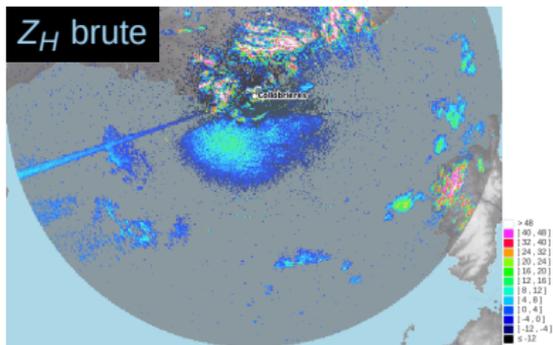
Exemple échos de mer

Collobrières (83) le 30/10/2018 à 16:30 UTC.



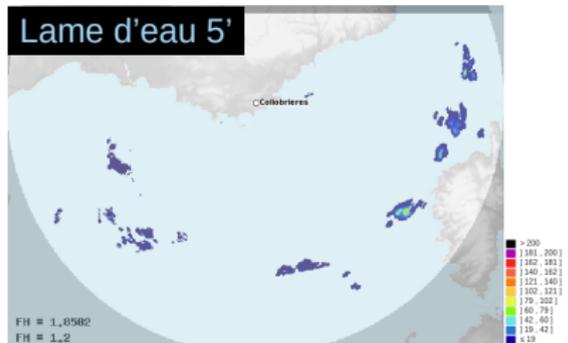
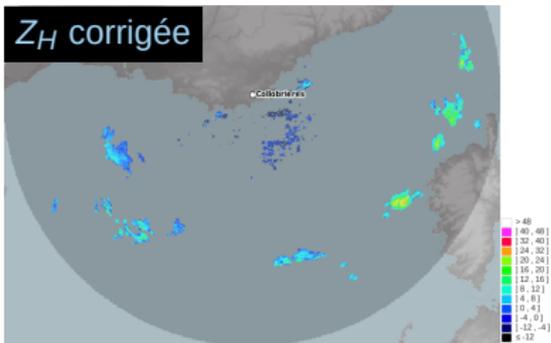
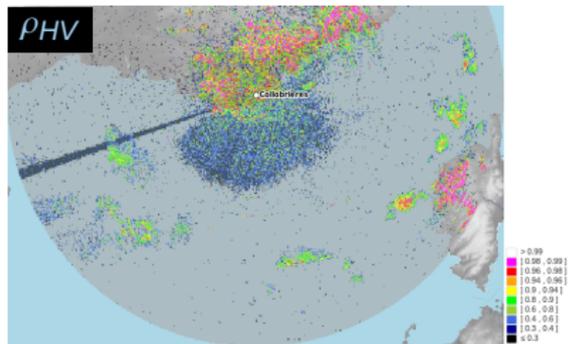
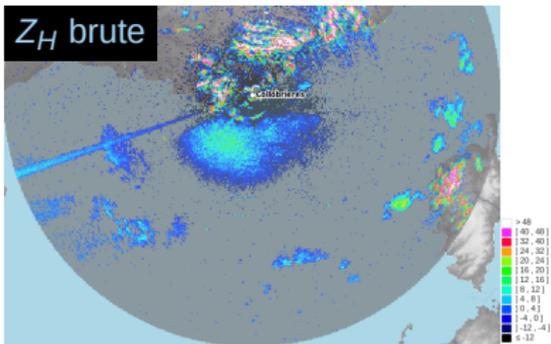
Exemple échos de mer

Collobrières (83) le 30/10/2018 à 16:30 UTC.



Exemple échos de mer

Collobrières (83) le 30/10/2018 à 16:30 UTC.



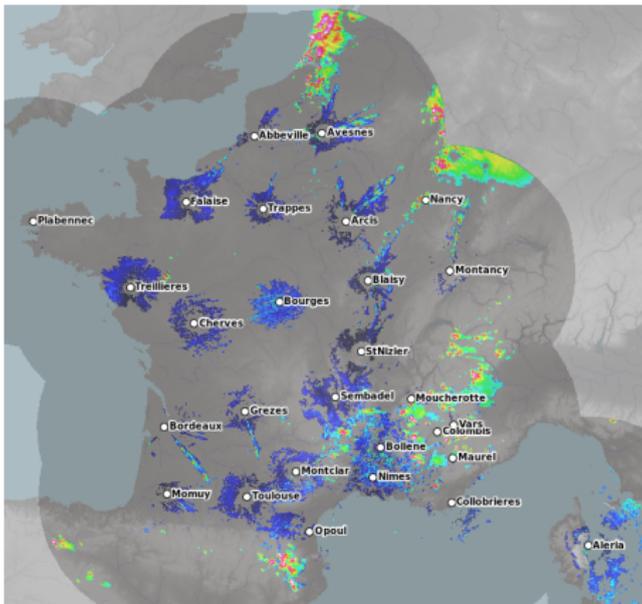
Exemple radôme mouillé



Toulouse (31) le 15/05/2008.

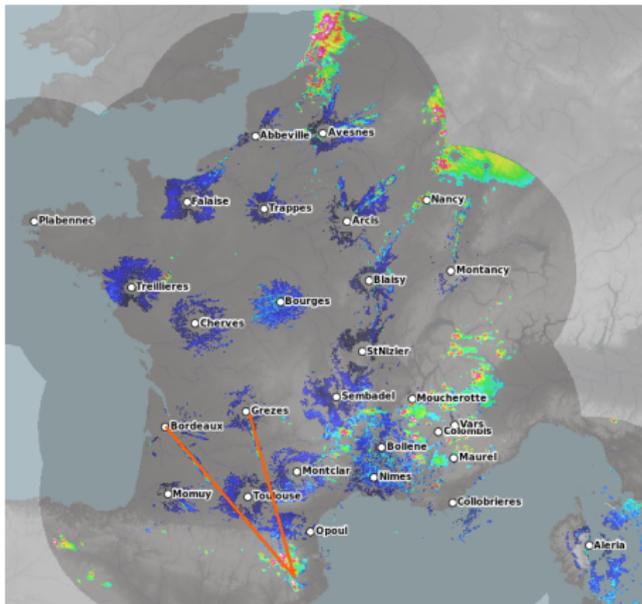
Exemple écho de 2nde trace

Le 22/06/2017 à 14:25 UTC.



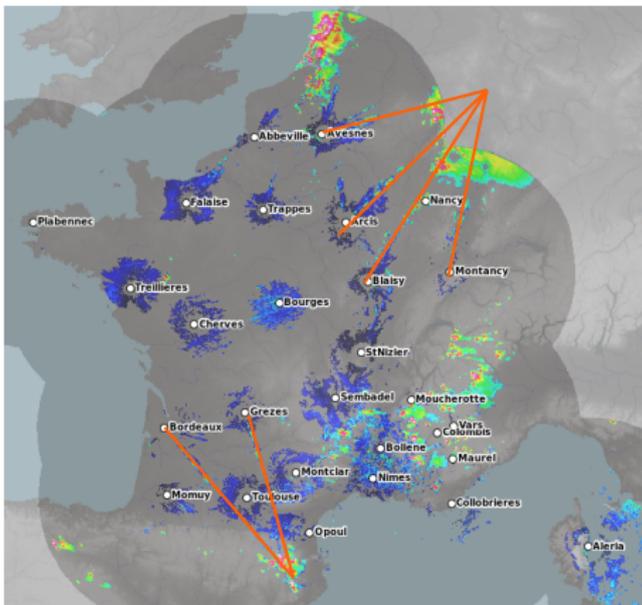
Exemple écho de 2^{nde} trace

Le 22/06/2017 à 14:25 UTC.



Exemple écho de 2nde trace

Le 22/06/2017 à 14:25 UTC.



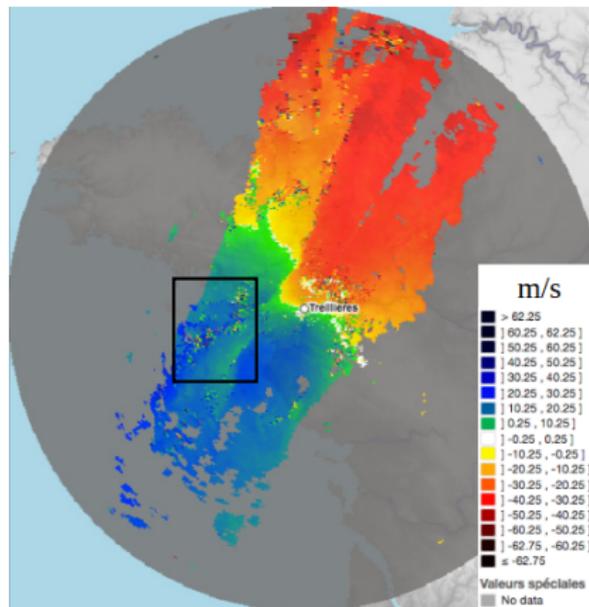
Exemple radôme mouillé

Paillettes (*chaff*) : petites pièces d'aluminium rejetées par les avions pour tromper les missiles.





Exemple dépliement des vitesses



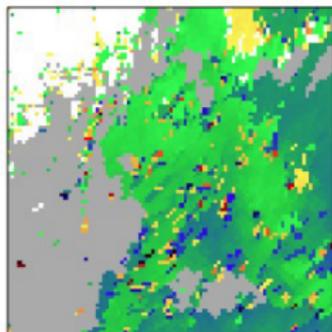
Causes possibles : faible rapport signal à bruit, *non-uniform beam filling*, contamination par des échos fixes, etc.



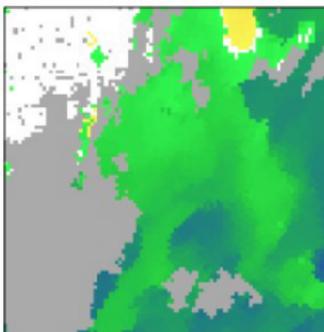
Exemple dépliement des vitesses

Méthode d'identification et de correction des erreurs de dépliement :

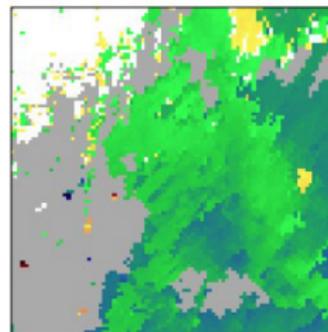
- Identification : comparaison des pixels avec un champ de référence (filtre médian 7kmx7km).
- Correction : incrémentation de la vitesse d'une valeur $2kV_N$ pour minimiser l'écart avec le champ de référence.



Vitesses brutes



Filtre médian



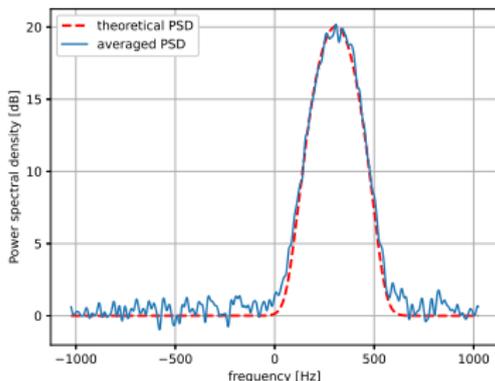
Vitesses corrigées

4. R&D à Météo-France



Estimation du spectre Doppler

Le spectre de puissance des signaux radar contient de l'information sur ce qui se passe dans le volume de résolution.



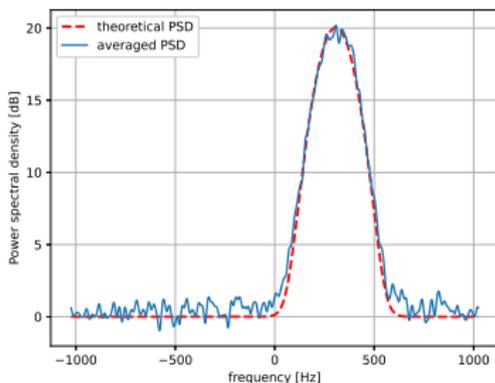
Sous hypothèse de spectre gaussien,

- moment 0 : **puissance moyenne** P_0 → réflectivité,
- moment 1 : **fréquence Doppler moyenne** f_0 → vitesse radiale moyenne des gouttes,
- moment 2 : **largeur spectrale** σ_0 → dispersion des vitesses radiales (peu utilisée à Météo-France).



Estimation du spectre Doppler

Le spectre de puissance des signaux radar contient de l'information sur ce qui se passe dans le volume de résolution.



Sous hypothèse de spectre gaussien,

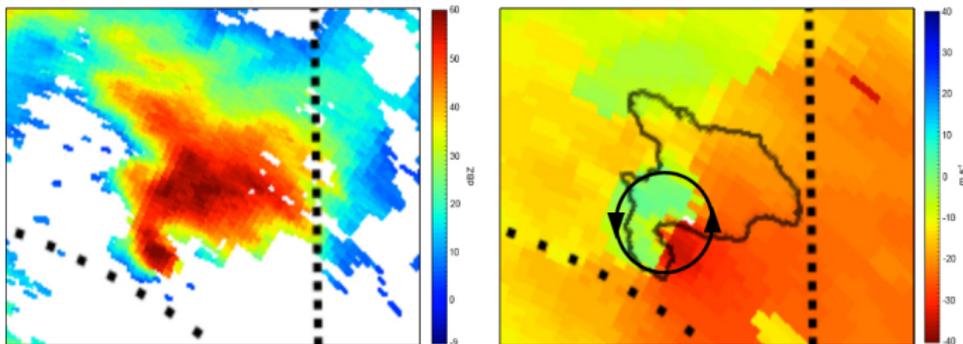
- moment 0 : **puissance moyenne** P_0 → réflectivité,
- moment 1 : **fréquence Doppler moyenne** f_0 → vitesse radiale moyenne des gouttes,
- moment 2 : **largeur spectrale** σ_0 → dispersion des vitesses radiales (peu utilisée à Météo-France).



- échantillonnage non uniforme et modèle de signal,
- bornes de Cramér-Rao et estimation optimale,
- contrainte temps-réel.

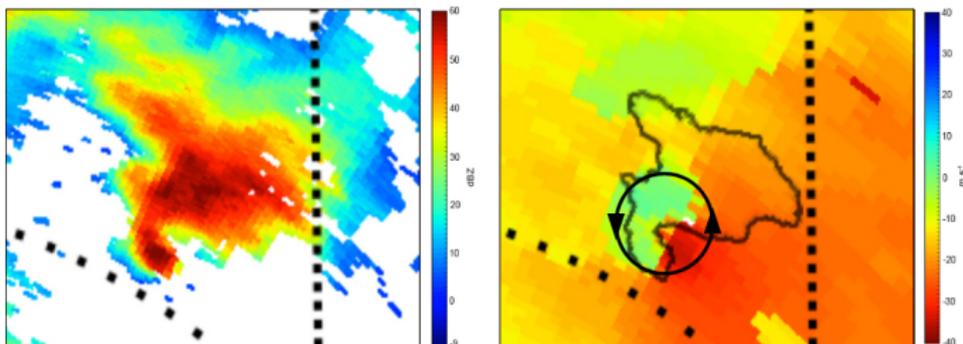
Détection de mésocyclones

Supercellules orageuses (grêle, fortes rafales) caractérisées par une circulation d'un diamètre de 5 à 10 km et une durée de plusieurs heures.
Exemple du radar de Montancy (25) le 13/05/2025 à 17:55 UTC (Z_H 0.4° à gauche et V_r 1.2° à droite).



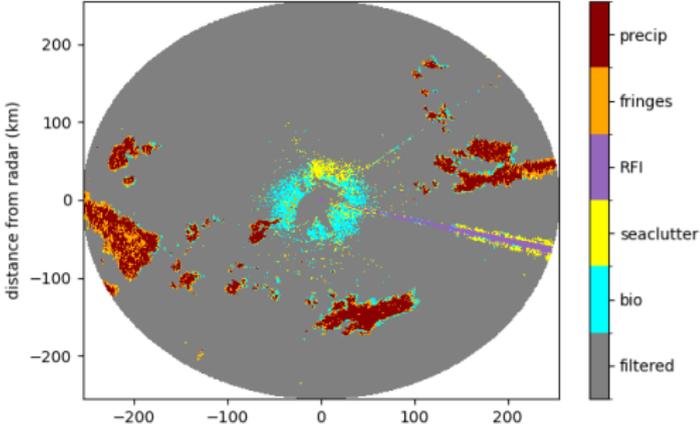
Détection de mésocyclones

Supercellules orageuses (grêle, fortes rafales) caractérisées par une circulation d'un diamètre de 5 à 10 km et une durée de plusieurs heures. Exemple du radar de Montancy (25) le 13/05/20215 à 17:55 UTC (Z_H 0.4° à gauche et V_r 1.2° à droite).

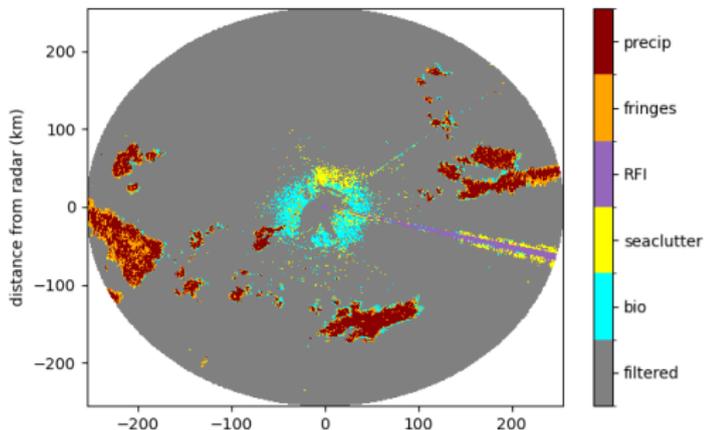


- résolution spatiale des données Doppler ($1^\circ \times 1\text{km}$),
- erreur de dépliement,
- algorithme de détection (PFA, PD).

Typage d'échos

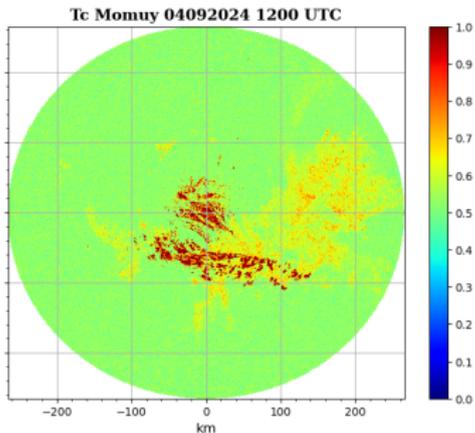
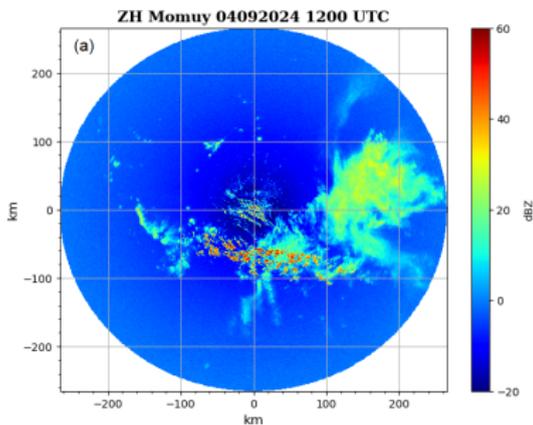


Typage d'échos



- préparation des jeux de données,
- approche pixel par pixel ou cohérence spatiale,
- algorithmes de classification (logique floue, bayésien, réseaux de neurones).

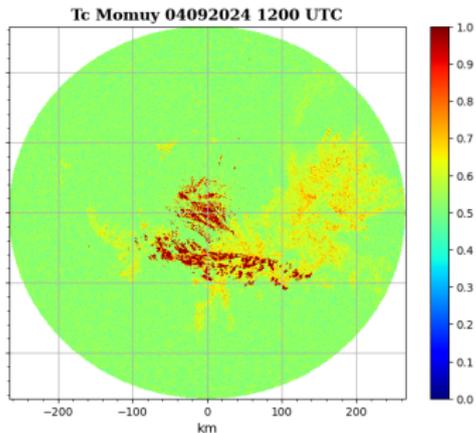
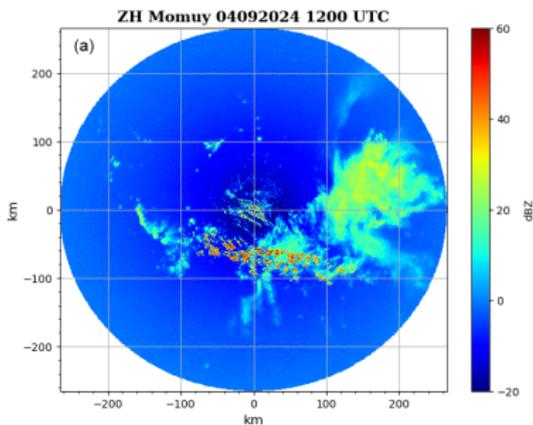
En combinant les coefficients de la fonction d'auto-corrélation des signaux reçus, on peut construire des paramètres qui discriminent certains échos.



Échos fixes

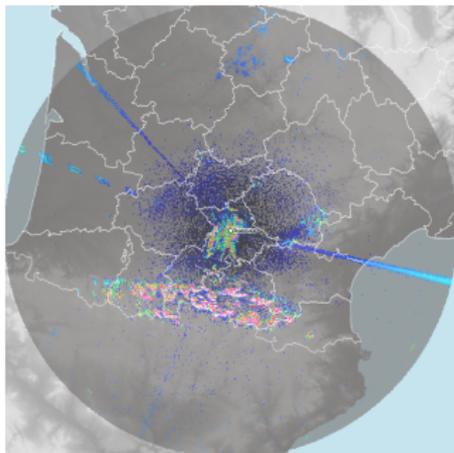


En combinant les coefficients de la fonction d'auto-corrélation des signaux reçus, on peut construire des paramètres qui discriminent certains échos.



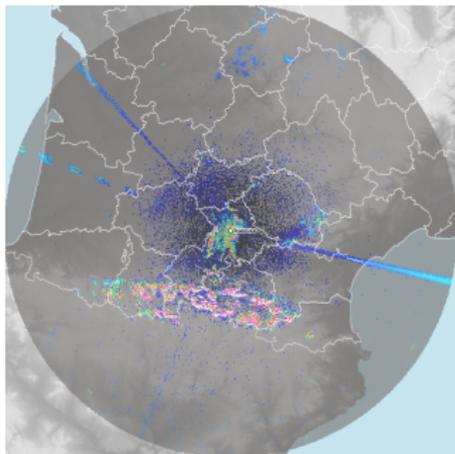
- échantillonnage non uniforme,
- choix des triplets PRT,
- pertes d'information des données filtrées.

Interférences



Les radars bande C partagent une bande de fréquence utilisée par les RLAN (*Radio Local Area Networks*), ceux-ci brouillent parfois les radars, noyant l'information sur toute une radiale.

A gauche : exemple de données de réflectivité brutes avec trois interférences à Toulouse (31) le 24/02/2025 à 6:45 UTC.



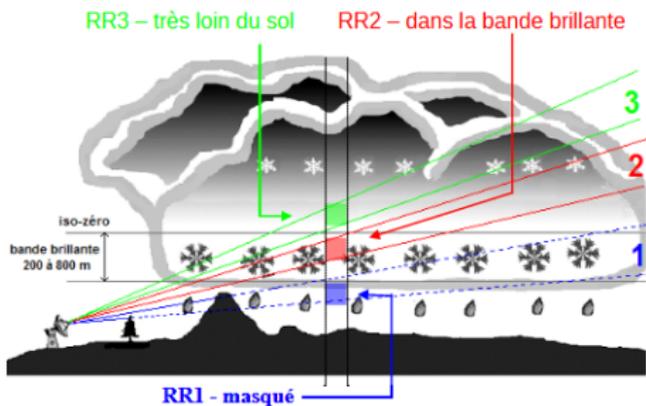
Les radars bande C partagent une bande de fréquence utilisée par les RLAN (*Radio Local Area Networks*), ceux-ci brouillent parfois les radars, noyant l'information sur toute une radiale.

A gauche : exemple de données de réflectivité brutes avec trois interférences à Toulouse (31) le 24/02/2025 à 6:45 UTC.

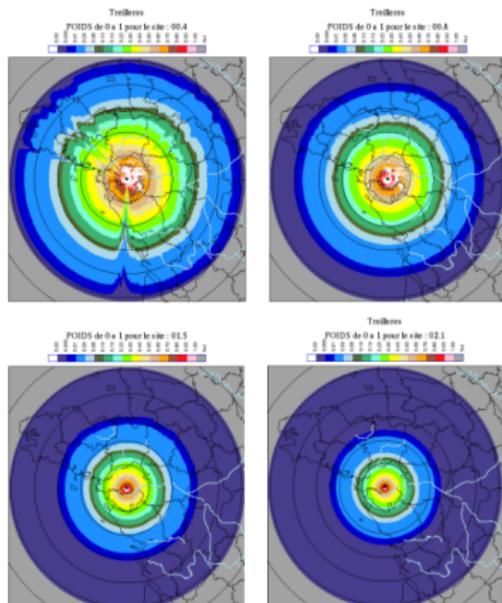


- modélisation du signal,
- pertes d'information des données filtrées.

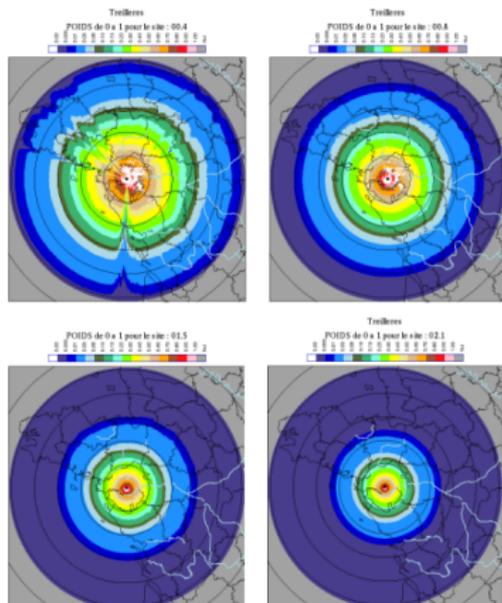
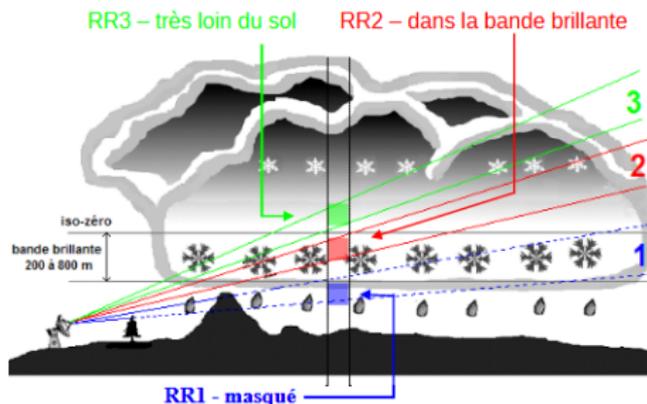
Code qualité



Chaque pixel est doté d'une valeur entre 0 et 100 appelée **code qualité**. Utilisé pour combiner les élévations et les radars.



Code qualité



Chaque pixel est doté d'une valeur entre 0 et 100 appelée **code qualité**. Utilisé pour combiner les élévations et les radars.

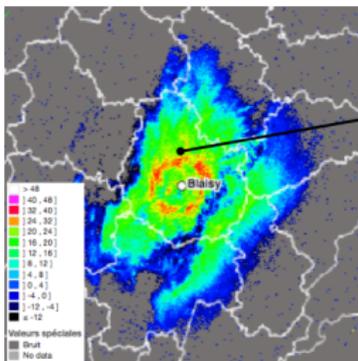


- choix des paramètres et de leur poids,
- validation des nouvelles approches (scores, experts, etc.).

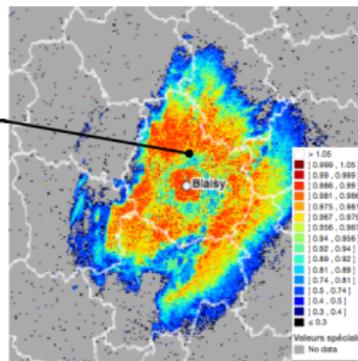
Bande brillante



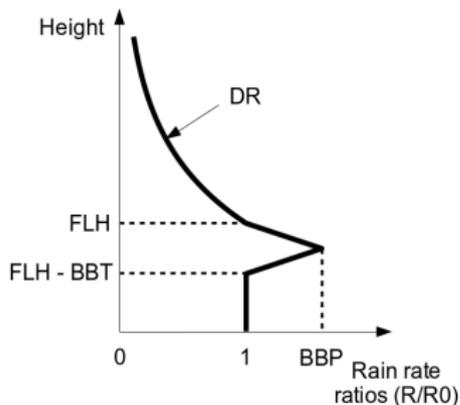
La **bande brillante** est une zone dans laquelle les hydrométéores sont un mélange d'eau liquide et de glace. Elle est positionnée en dessous de l'isotherme 0°C et est importante en traitement radar dans le cadre de la correction PVR (voir ci-après).



Sommet bande brillante



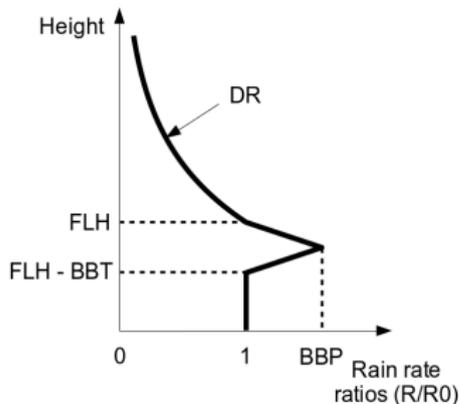
Correction PVR



La correction PVR (Profil Vertical de Réflectivité) vise à déduire d'observation d'altitude la réflectivité équivalente au sol pour le calcul du taux de précipitation.

- **FLH** : altitude de l'isotherme 0°C ,
- **BBT** : épaisseur de la bande brillante,
- **BBP** : intensité de la bande brillante,
- **DR** : taux de décroissance dans la phase de neige sèche.

Correction PVR



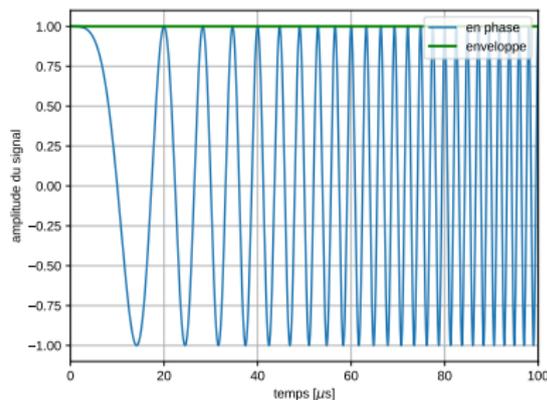
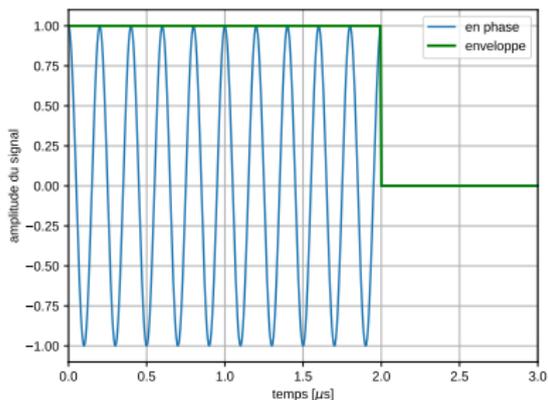
La correction PVR (Profil Vertical de Réflectivité) vise à déduire d'observation d'altitude la réflectivité équivalente au sol pour le calcul du taux de précipitation.

- **FLH** : altitude de l'isotherme 0°C ,
- **BBT** : épaisseur de la bande brillante,
- **BBP** : intensité de la bande brillante,
- **DR** : taux de décroissance dans la phase de neige sèche.

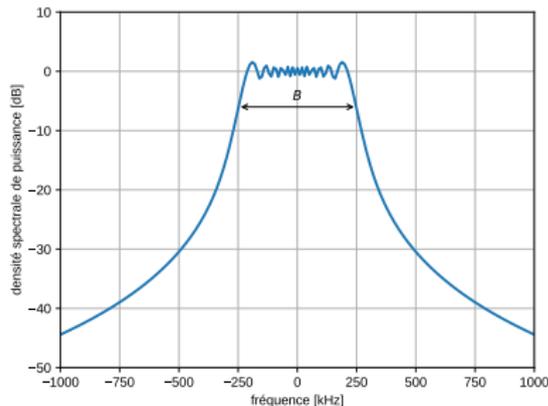
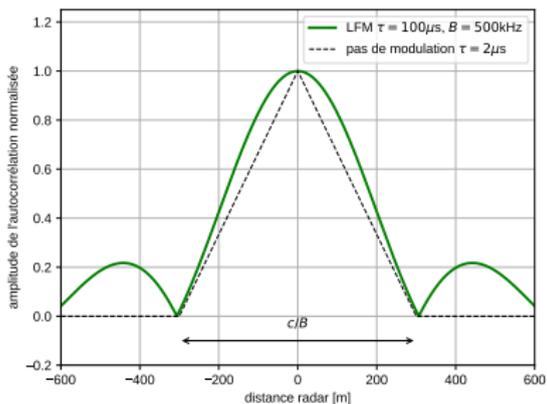


- modèles de PVR (simplifié, spatialisé, etc.),
- estimation des paramètres du PVR,
- maîtrise de l'erreur.

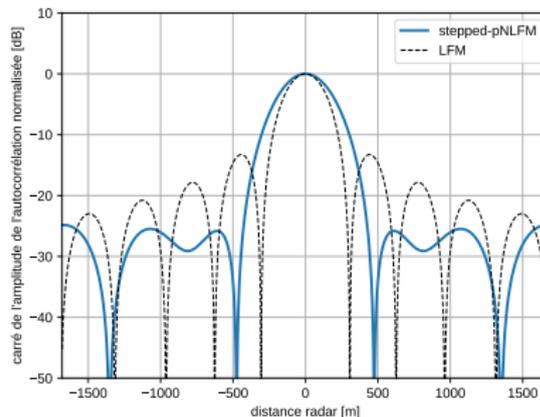
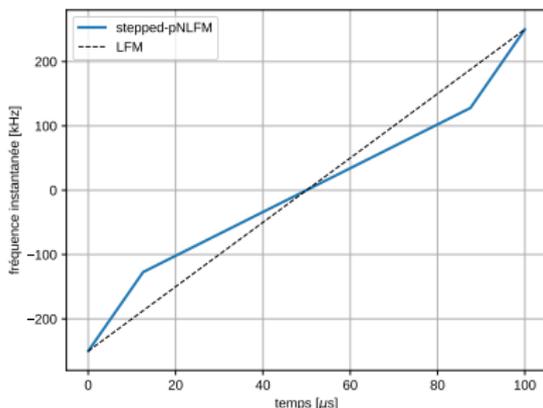
Depuis une dizaine d'années, une "nouvelle" technologie de radars météorologiques est en train d'émerger : **les radars à émetteurs état-solide.**



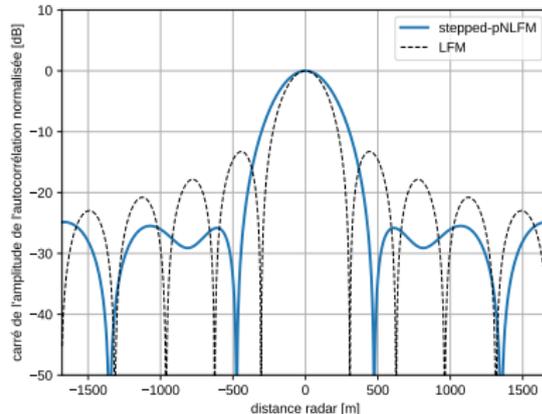
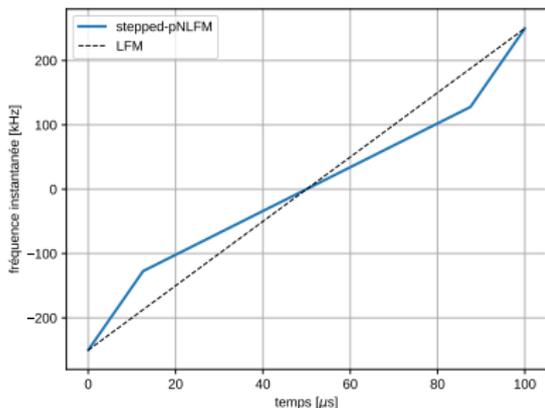
Depuis une dizaine d'années, une "nouvelle" technologie de radars météorologiques est en train d'émerger : les radars à émetteurs état-solide.



Depuis une dizaine d'années, une "nouvelle" technologie de radars météorologiques est en train d'émerger : **les radars à émetteurs état-solide**.



Depuis une dizaine d'années, une "nouvelle" technologie de radars météorologiques est en train d'émerger : **les radars à émetteurs état-solide**.



- conception de forme d'onde optimale,
- zone aveugle.



Depuis le mois de janvier 2025, Météo-France a un radar état-solide.

- 6 mois d'expérimentation,
- à 200m du radar de Toulouse (inter-comparaison, directe),
- contrôle fin du système (modulation, filtres, schéma d'exploration, etc.),
- radar de test.