

# Mesure de turbulence dans la couche limite atmosphérique par lidar Doppler



Encadrants : Marie LOTHON (LAERO), Guylaine CANUT (CNRM), Matthieu VALLA (ONERA)

Nayl LOISEL

## Introduction

### Couche Limite Atmosphérique (CLA) :

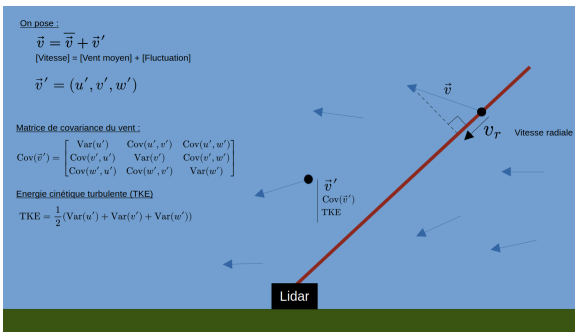
- Première couche de l'atmosphère en interaction directe avec la surface terrestre
- Hauteurs typiques de cette couche : 200m - 2 km
- Sa compréhension est essentielle : étude de la dispersion des polluants, énergie éolienne, prévision météorologique, modèles de climat...

### Lidar Doppler Atmosphérique :

- Un tir de Lidar Doppler Atmosphérique (qui peut durer 1 seconde) permet de mesurer la vitesse radiale de l'air (projection du vecteur vitesse) en plusieurs points du faisceau laser
- Permet l'observation des processus de fine échelle de la **couche limite**
- Accès à des variables clés de la couche limite : Energie cinétique turbulente (TKE), statistiques des composantes du vecteur vent.
- Plus de 3 faisceaux : Accès aux trois composantes du vent
- Résolution temporelle : environ 1 seconde
- Résolution spatiale : environ 30m
- Restitution fiable de la variance d'une composante donnée et unique, mais une **incertitude beaucoup plus grande** pour l'estimation de **plusieurs variances** et covariances simultanément.

### Intérêt de la mesure de la turbulence par lidar :

- Mesurer simultanément à plusieurs centaines de m de hauteurs
- Complémentaire des mesures in situ de référence (anémomètre sonique), montées sur avion, mât de mesure, ballon captif, drones



## Problématique et objectif

L'objectif de cette thèse est de trouver comment estimer des **paramètres turbulents** dans la **Couche Limite Atmosphérique** avec un **Lidar Doppler** :

- Quelle stratégie de balayage (séquences de tirs) effectuer ?
- Quel post-traitement des données issues du lidar faut-il effectuer ?

### Données utilisées pour cette thèse :

- Longues périodes de mesures lidar à la P2OA (Plateforme Pyrénéenne d'Observations Atmosphériques) en 2025
- Campagne de mesure lidar en Bretagne en 2026
- Future campagne de mesure en été 2026 qui permettra de tester différentes stratégies de balayage et d'obtenir des données pour tester des méthodes de post-traitement.

## Techniques existantes

### Variance de vecteurs vent

Il s'agit de réaliser des cycles entre 5 directions de tir (4 secondes par cycle environ), pour pouvoir obtenir, pour chaque altitude, un vecteur vent toutes les 4 secondes. Pour chaque hauteur, on peut ainsi estimer une covariance empirique avec la suite de vecteurs vent. [1]

### Technique 6 faisceaux

Si on suppose uniforme horizontalement la matrice de covariance, on peut tirer régulièrement dans 6 directions différentes et obtenir 6 variances radiales pour chaque altitude. On peut ensuite utiliser une relation mathématique entre ces variances et les composantes de la matrice de covariance. [1]

### Technique TVP (Turbulent Velocity Processing)

Il s'agit d'une technique testée dans une étude avec un RADAR doppler (qui utilise des ondes-radio au lieu de la lumière), qui utilise les mêmes équations que la méthode 6-faisceaux mais en exploitant des **hypothèses de régularité sur les variations spatiales** du vent moyen et des variances [2]

$$\begin{bmatrix} \text{Var}(u') \\ \text{Var}(v') \\ \text{Var}(w') \\ \text{Cov}(u', v') \\ \text{Cov}(u', w') \\ \text{Cov}(v', w') \end{bmatrix} = M \times \begin{bmatrix} \text{Var}(v_{r,1}) \\ \text{Var}(v_{r,2}) \\ \text{Var}(v_{r,3}) \\ \text{Var}(v_{r,4}) \\ \text{Var}(v_{r,5}) \\ \text{Var}(v_{r,6}) \end{bmatrix}$$

Relation entre les variances radiales et les composantes de la matrice de covariance

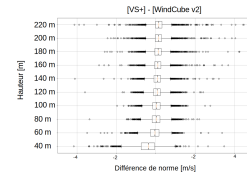
La matrice M dépend seulement de l'ensemble de directions

[1] Newman et al. 2016 <https://doi.org/10.5194/amt-9-1993-2016>  
[2] Campitron et al. 1991 [https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/8/4/1520-0426\\_1991\\_008\\_0491\\_amortp\\_2\\_0\\_co\\_2.pdf](https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/8/4/1520-0426_1991_008_0491_amortp_2_0_co_2.pdf)

## Premiers résultats

### Qualification des profils de vent moyen du lidar VS+

Comparaison entre lidars VS+ et WindCube v2 (un petit lidar de référence)  
Données de juin-septembre 2025 à la P2OA  
Configuration : 5 tirs (1 vertical, 4 obliques)



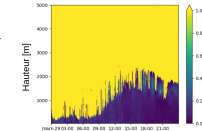
Diagrammes en boîtes de la différence entre les normes des vents moyens (sur 30 min) au CRA (Lannemezan) mesurés par les Lidars Halo Streamline VSP+ et WindCube v2 (3 mois de mesure)

- Les différences systématiques s'expliquent par :
- La non fiabilité du VS+ en-dessous de 60 m
  - Différences de résolutions spatiales entre les instruments

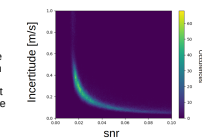
### Qualification du bruit dans le signal de vitesse radiale du lidar VS+

Données du lidar VS+ en mars-avril 2025 (1 mois environ) en tir vertical uniquement (résolution temporelle : 1s)

Présentation pour une journée donnée, du bruit de mesure du lidar sur la vitesse radiale, en fonction de la hauteur et du temps.  
Ce bruit de mesure est estimé à partir de la densité spectrale de puissance du signal temporel en supprimant le bruit blanc.



Distribution des valeurs de vitesses radiales mesurées lorsque le bruit est supérieur à 10 m/s.  
Cette courbe forme une signature de l'exemplaire du lidar.



Une relation entre le bruit en vitesse radiale et une valeur de « snr » donnée par le lidar a été mise en évidence.  
Ce graphique est un histogramme 2D représentant cette relation, en utilisant les données d'une journée

## La campagne LATER : Lidar Atmospheric Turbulence Estimation Retrieval

Lieu : P2OA - Centre de Recherches Atmosphériques (Lannemezan)

Dates : 10 juin – 25 septembre 2026

### Lidars

#### Lidar VS+ (CNRM, LAERO)

faisceaux obliques à élévation relativement forte (18° max du zénith),  
Séquence de tirs configurable

#### Lidar WindCube v2 (CNRM)

mode unique possible (4 oblique, 1 vertical) et faible portée (~200m)

#### Lidar LLP (ONERA)

Construit à l'ONERA,  
forte puissance (longue portée), polyvalent et configurable

#### Lidar WindCube 200S (ONERA)

Très polyvalent et configurable

## Instruments de référence

### Turbulence :

- Anémomètres soniques à 60m (mât de mesures)
- Anémomètres soniques jusqu'à 600m (ballon captif)

### Base de nuages, quantité d'aérosols :

- Ceilomètre
- Profil de vent par tout temps, autres paramètres turbulents, **sommet de couche limite**
- Radar UHF

Photo d'un ballon captif avec sonde de turbulence



Photo du Lidar VS+

