

26 septembre 2025

Étude de la CLA à Lannemezan au cours d'un cycle diurne

S9 IENM3 2025-2026



Plan

1. Contexte et objectifs
2. Analyse synoptique et contexte météorologique
3. Théorie sur la CLA
4. Radiosondages
5. Comparaison observations - modèles
6. Bilan d'énergie de surface
7. Apport des autres instruments et méthode
8. Conclusion
9. Annexe

Contexte

- Analyse de la couche limite atmosphérique et de son évolution sur le site de mesures de Lannemezan
- Prises de mesures avec des radiosondages
- Découverte des instruments présents sur site et leurs utilisations dans l'étude de la CLA
- Comparaison aux modèles

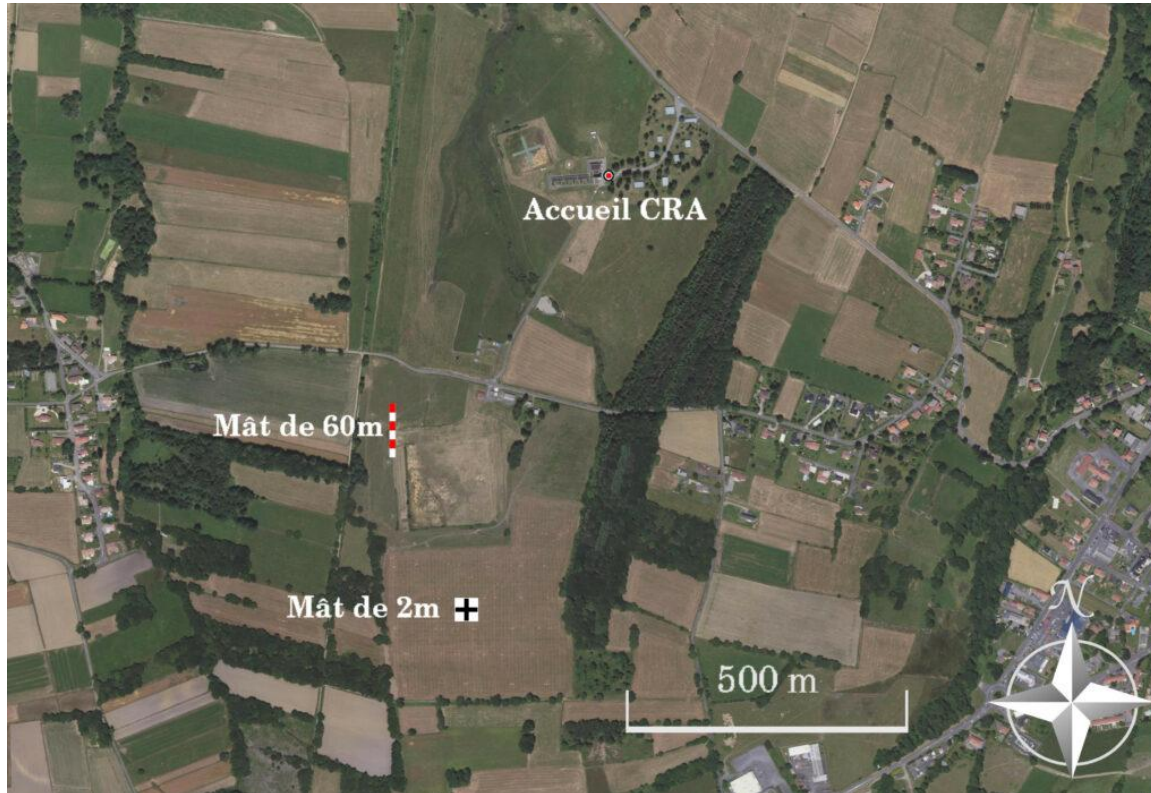
Produire les données d'observation météo-climatiques

Objectifs

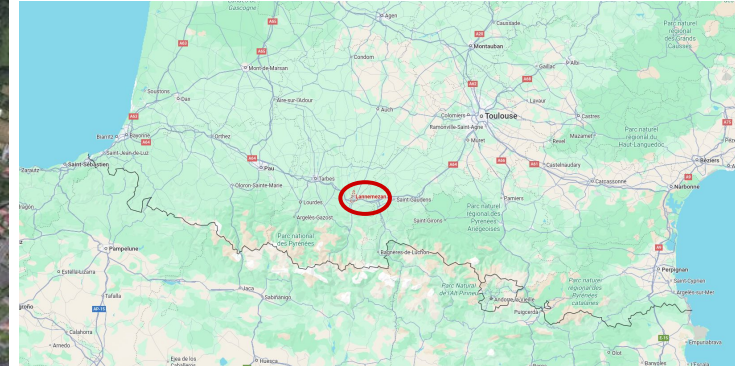
Comment évolue la CLA au cours de la journée ?

- Son épaisseur et sa nature
 - Son forçage au sol, bilan d'énergie de surface
- La théorie d'évolution temporelle de Z_i est-elle valide ?
 - Impact des nuages
- Évaluation des modèles et des différents instruments

Localisation CRA



Altitude du site : 596m

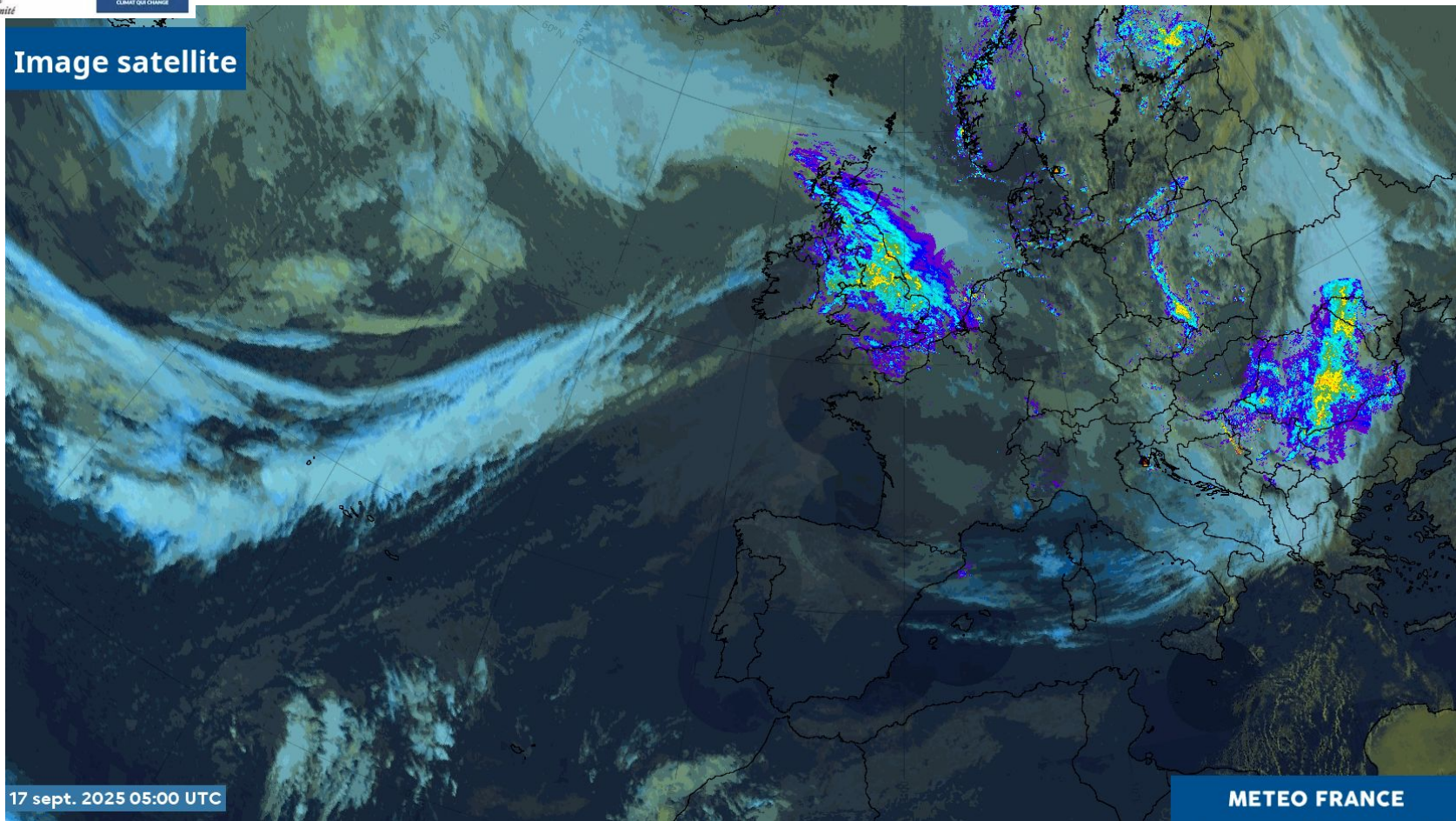


Plan

1. Contexte et objectifs
2. Analyse synoptique et contexte météorologique
3. Théorie sur la CLA
4. Radiosondages
5. Comparaison observations - modèles
6. Bilan d'énergie de surface
7. Apport des autres instruments et méthode
8. Conclusion
9. Annexe

Image satellite du 17 septembre de 7h00 à 17h00 locales

Image satellite

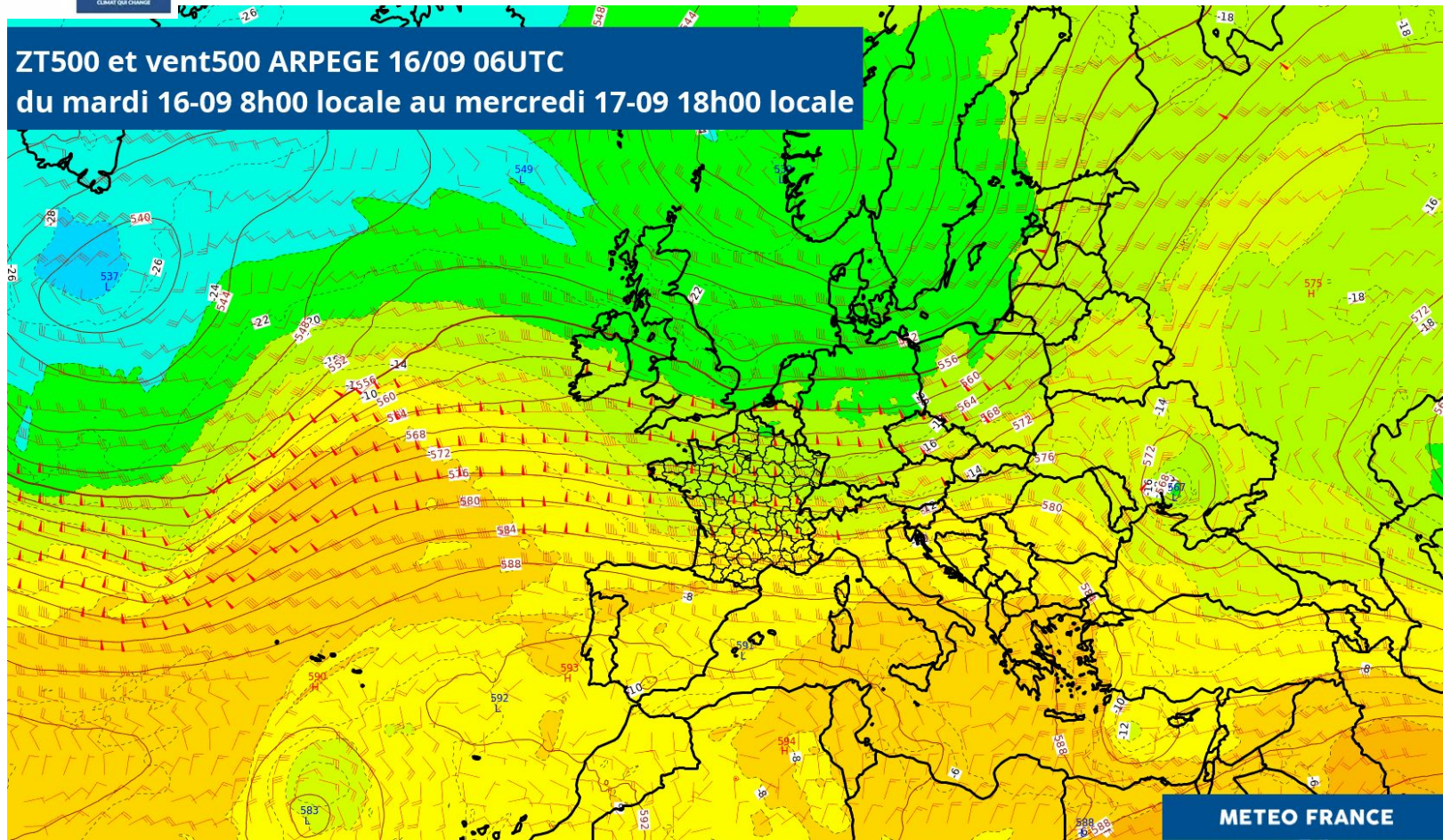


17 sept. 2025 05:00 UTC

METEO FRANCE

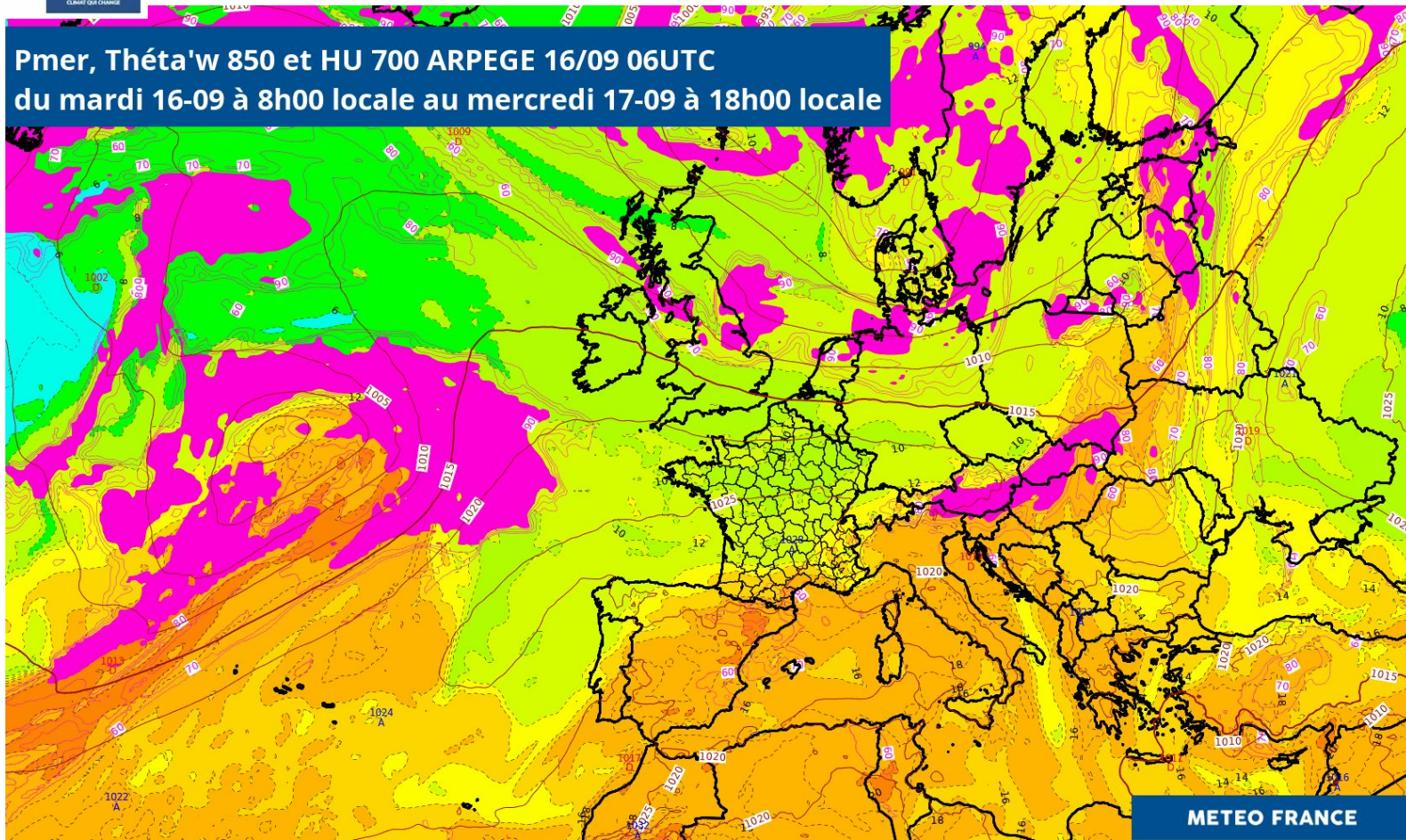
Situation synoptique ZT500

ZT500 et vent500 ARPEGE 16/09 06UTC
du mardi 16-09 8h00 locale au mercredi 17-09 18h00 locale

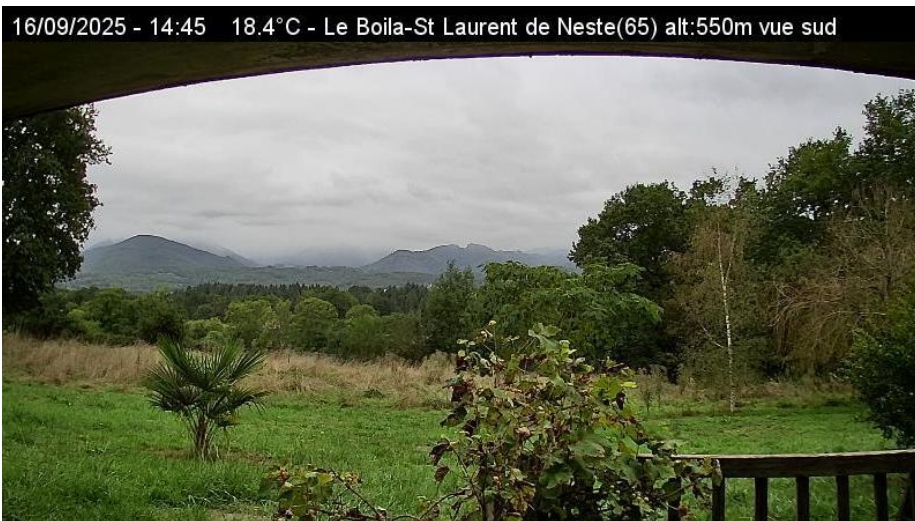


Pmer, Théta'w 850 et HU700

Pmer, Théta'w 850 et HU 700 ARPEGE 16/09 06UTC
du mardi 16-09 à 8h00 locale au mercredi 17-09 à 18h00 locale



Webcam à 10 km au Sud-Est du CRA de Campistrous

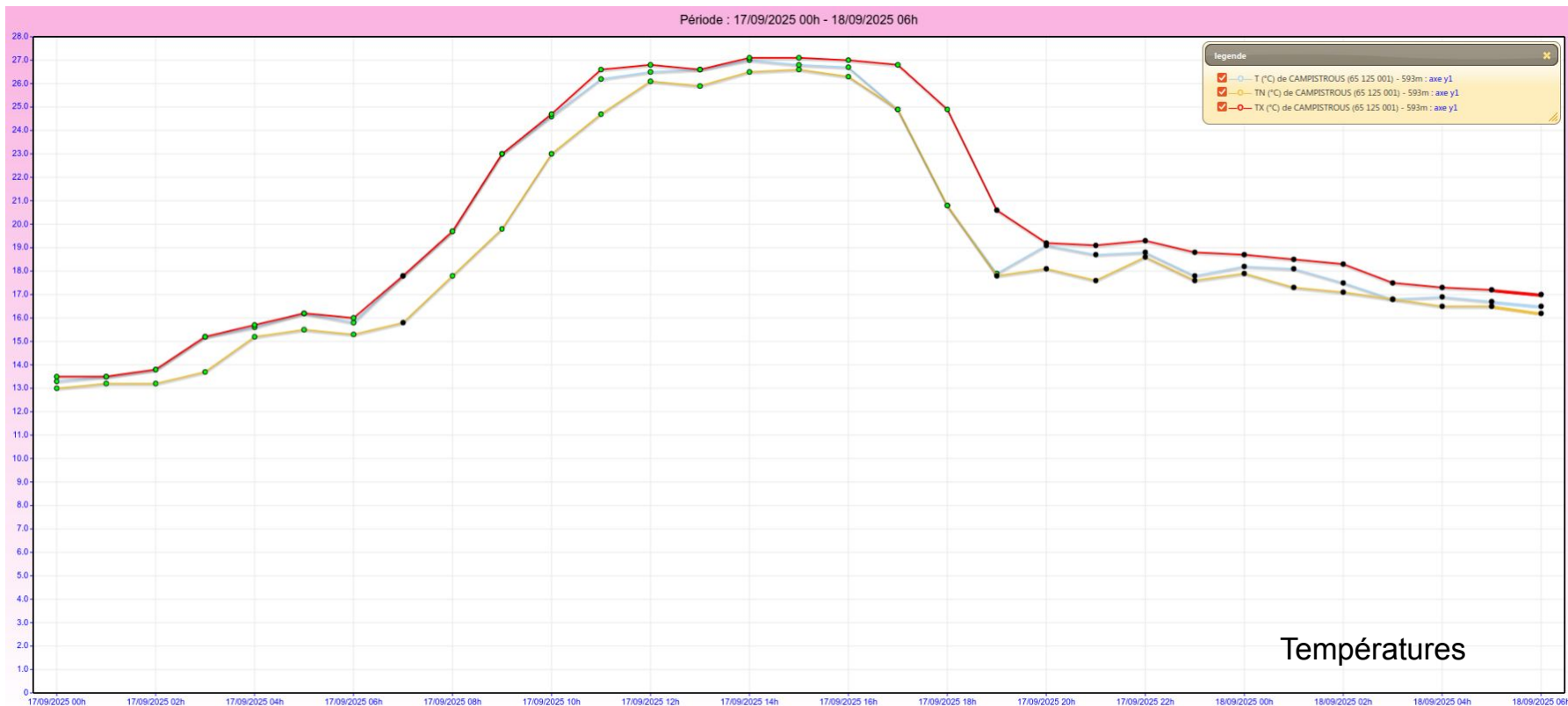


Webcam le mardi 16 septembre à 14h45



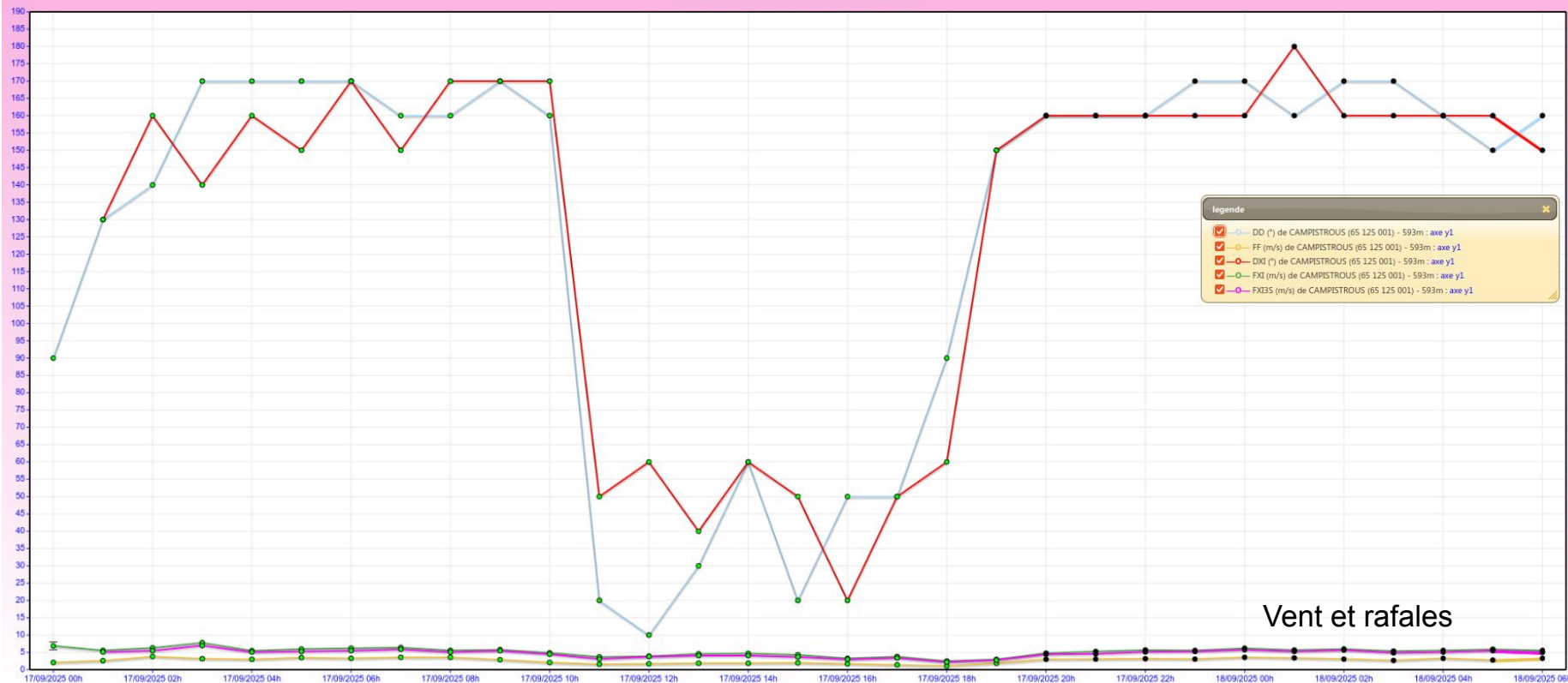
Webcam le mercredi 17 septembre à 13h00

Données Climsol : station réseau RADOME

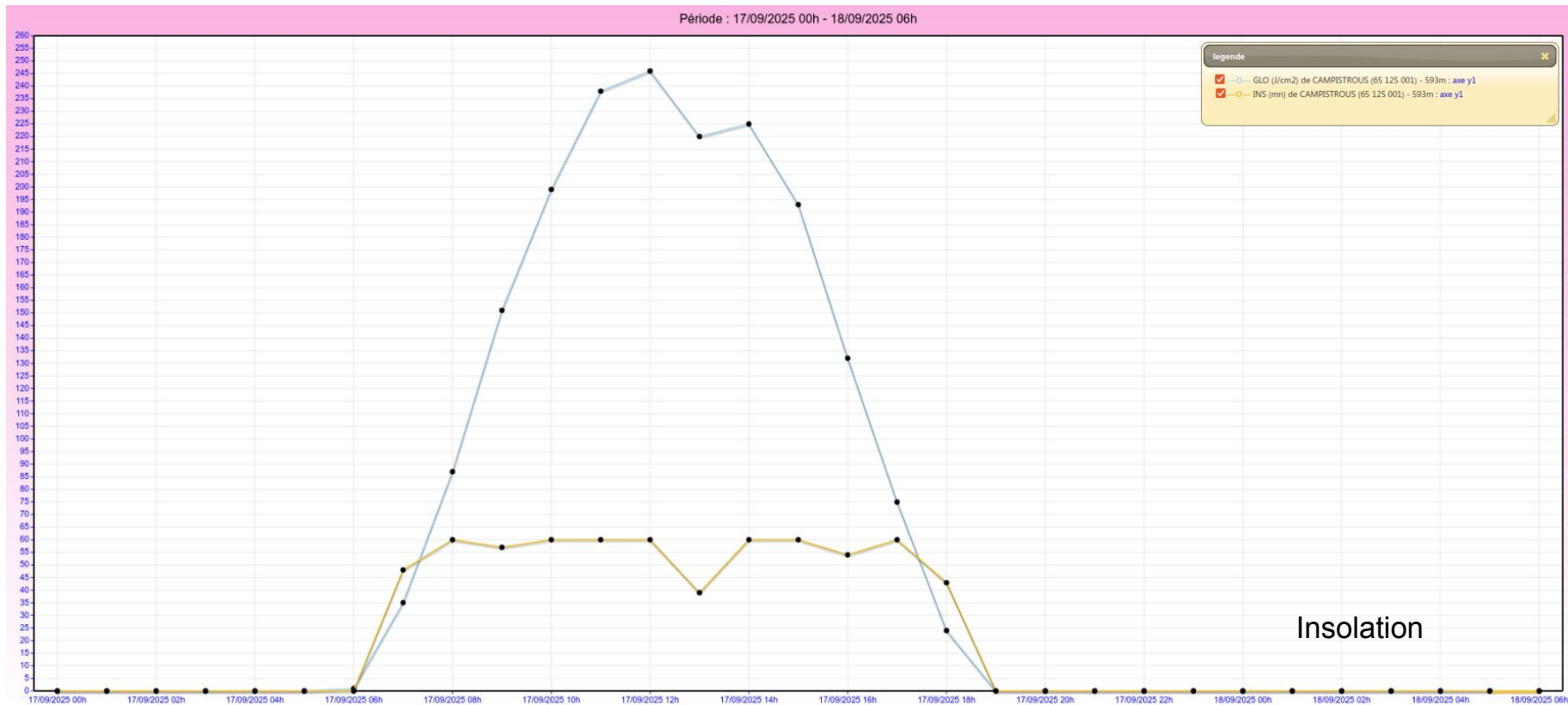


Données Climsol : station réseau RADOME

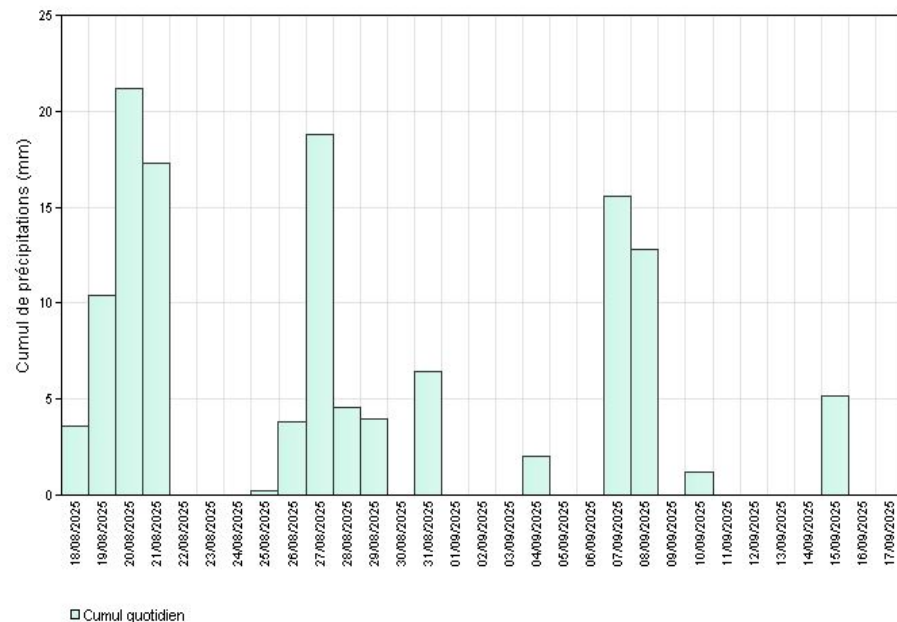
Période : 17/09/2025 00h - 18/09/2025 06h



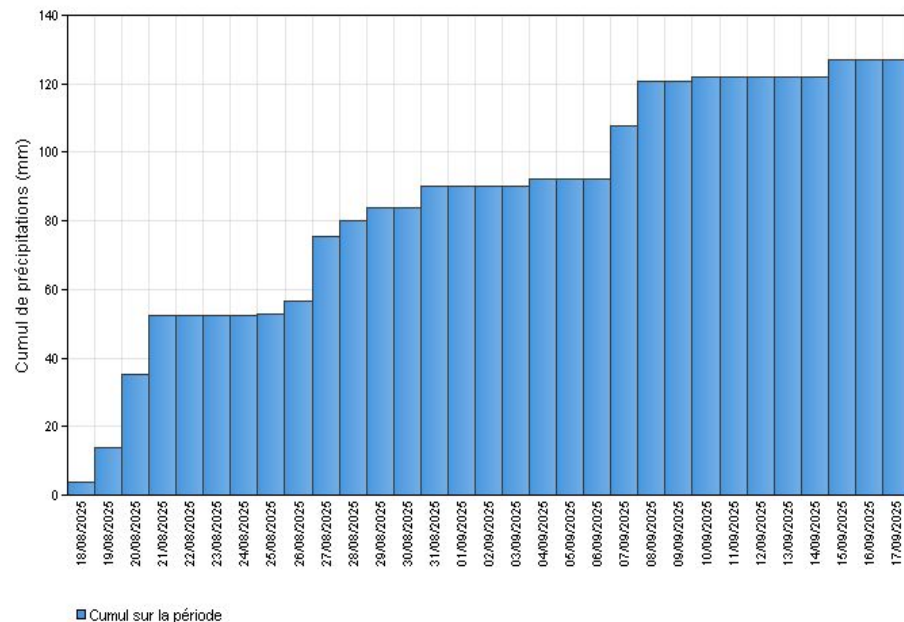
Données Climsol



Pluviométrie au CRA de Campistrous entre le 18 août et le 17 septembre 2025



Cumuls quotidiens de précipitations en mm
5,2 mm le 15 septembre 2025

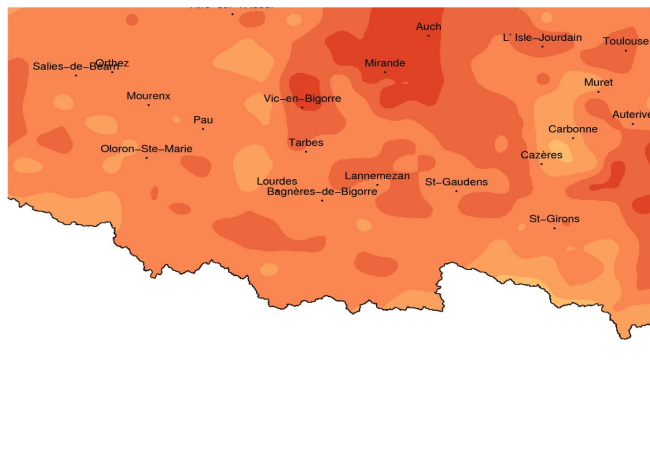


Cumul des précipitations en mm du 18/08 au 17/09
Plus de 120 mm en moins d'un mois
normales 1991/2020 : 70 mm en août, 74 mm en septembre

Evolution de l'indice d'humidité des sols du 18 août au 17 septembre sur le secteur de Lannemezan

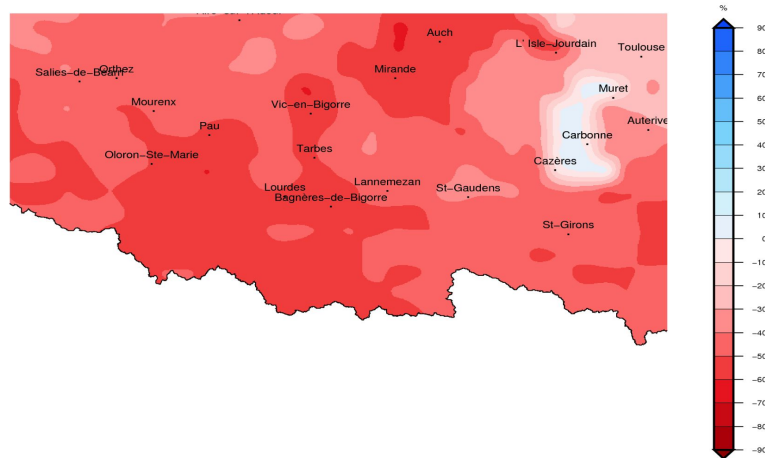
Indice d'humidité des sols
Zone climatique : 3118/5364/16932/18616

18 août 2025



Ecart pondéré à la moyenne quotidienne de référence 1991-2020 de l'indice d'humidité des sols
Zone climatique : 3118/5364/16932/18616

18 août 2025



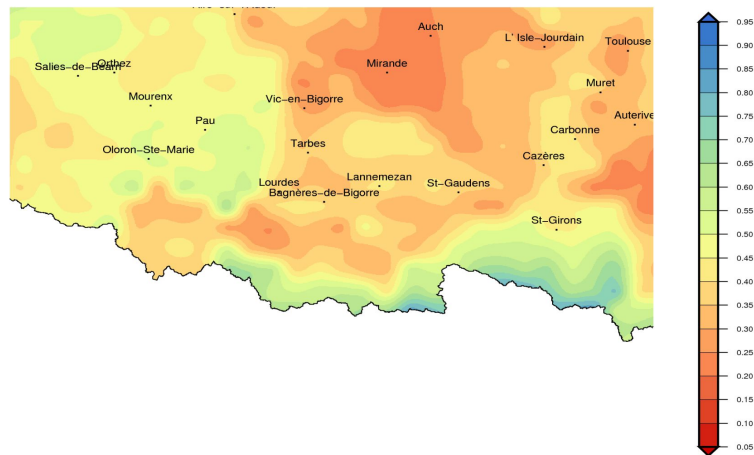
Edité le : 24/09/2025 - Produit élaboré avec les données
disponibles du : 24/09/2025 à 01:32 UTC

Edité le : 23/09/2025 - Produit élaboré avec les données
disponibles du : 21/08/2025 à 10:45 UTC

Evolution de l'indice d'humidité des sols du 18 août au 17 septembre sur le secteur de Lannemezan

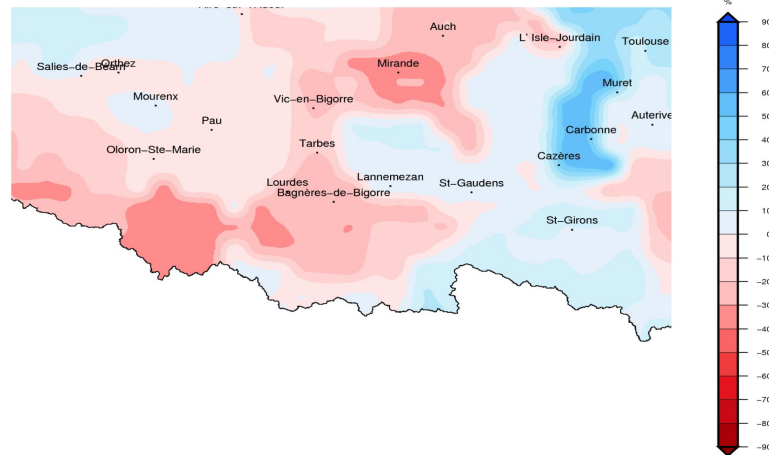
Indice d'humidité des sols
Zone climatique : 3118/5364/16932/18616

17 septembre 2025



Ecart pondéré à la moyenne quotidienne de référence 1991-2020 de l'indice d'humidité des sols
Zone climatique : 3118/5364/16932/18616

17 septembre 2025



Edité le : 23/09/2025 - Produit élaboré avec les données
disponibles du : 20/09/2025 à 10:45 UTC

Edité le : 23/09/2025 - Produit élaboré avec les données
disponibles du : 20/09/2025 à 10:45 UTC

Plan

1. Contexte et objectifs
2. Analyse synoptique et contexte météorologique
3. Théorie sur la CLA
4. Radiosondages
5. Comparaison observations - modèles
6. Bilan d'énergie de surface
7. Apport des autres instruments et méthode
8. Conclusion
9. Annexe

Couche limite atmosphérique

- **CLA** (Couche Limite Atmosphérique) : **partie inférieure** de l'atmosphère influencée par la **surface** via des **échanges turbulents** (flux de chaleur, humidité ...) sur des **échelles de temps courtes** (de l'ordre de l'heure)
- **Épaisseur** de quelques centaines de mètres à 2 km, en fonction des **conditions météo**, de la **nature de la surface**, de **l'heure du jour**, de la **saison...**
- **Hauteur**: transition avec la troposphère libre

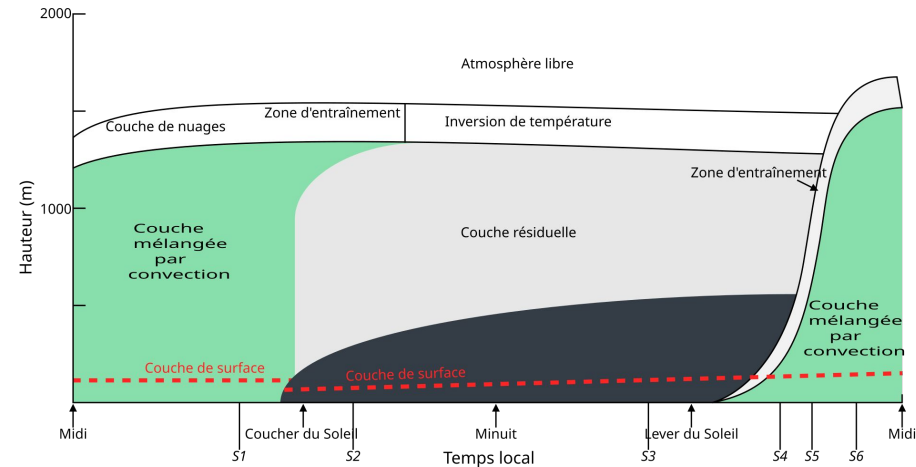


Schéma de la couche limite atmosphérique

Équation du bilan d'énergie en surface

Rayonnement net reçu à la surface (W/m^2)

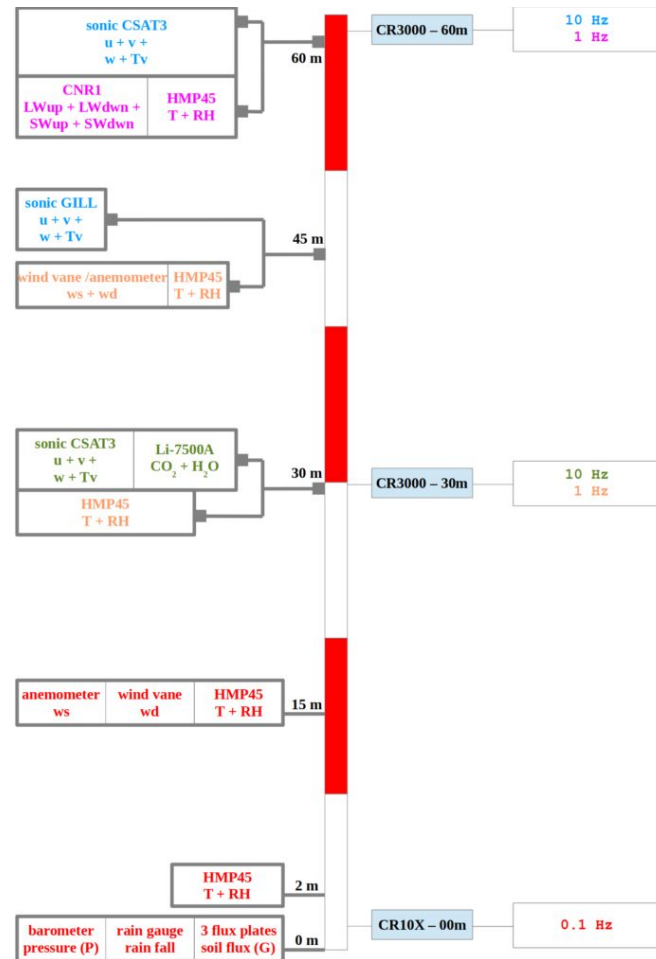
$$R_{net} = \underbrace{SW_d - SW_u}_{\text{Rayonnement solaire}} + \underbrace{LW_d - LW_u}_{\text{Rayonnement infrarouge}}$$

Rayonnement solaire incident (*shortwave down*)

Rayonnement solaire réfléchi (*shortwave up*)

Rayonnement thermique émis par la surface (*longwave up*)

Rayonnement infrarouge vers le sol (*longwave down*)



Équation de répartition du rayonnement net à la surface

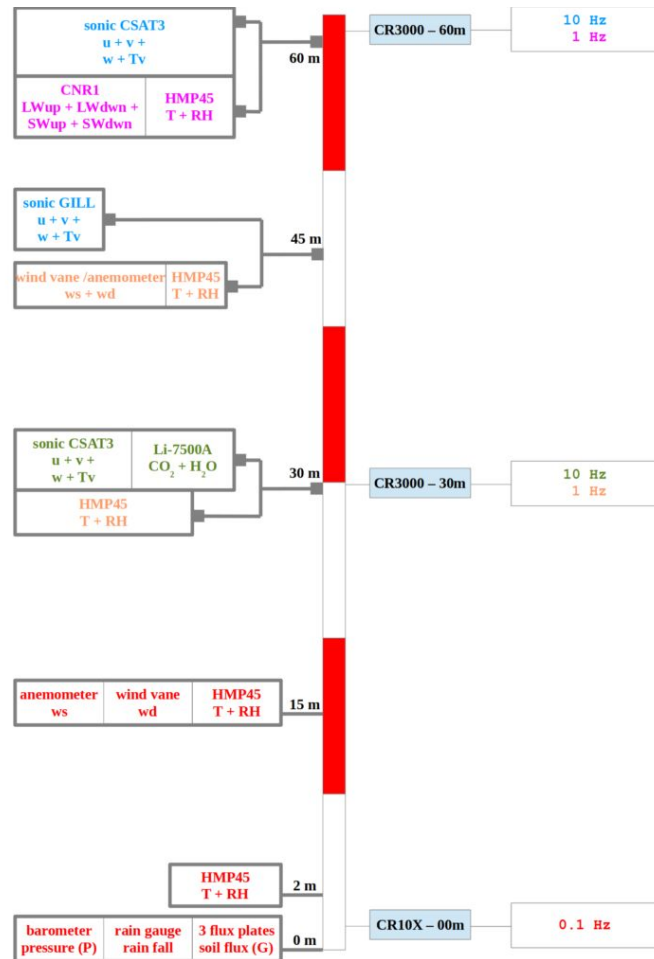
Rayonnement net reçu à la surface (W/m^2)

$$R_{net} = LE + SH + G$$

Flux de chaleur latente

Flux de chaleur sensible

Flux de conduction
dans le sol



Modèle de Tennekes : couche limite convective

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{1}{zi} * (1 - \beta) w' \theta' |_s$$

$$SH = \rho Cp w' \theta' |_s$$

θ_m : température potentielle moyenne dans la couche limite convective en K

t : temps en secondes

zi : hauteur de la couche limite convective en mètres

β : ratio d'entraînement sans unité (généralement compris entre 0,15 et 0,25)

$w' \theta' |_s$: flux de chaleur sensible en surface en K m s⁻¹

SH : flux de chaleur sensible en surface en W m⁻²

ρ : masse volumique de l'air en kg m⁻³

Cp : chaleur spécifique de l'air en J kg⁻¹ K⁻¹

Modèle de Tennekes : couche limite convective

Croissance de la couche limite convective, à l'ordre 0 :

$$\frac{dz_i}{dt} = \beta \frac{w' \theta'_s}{\Delta \theta} ;$$

$\Delta \theta$: Saut d'inversion de température potentielle entre l'atmosphère libre et la couche limite

TKE : Turbulent Kinetic Energy

$$TKE = \frac{1}{2} (\overline{u'^2 + v'^2 + w'^2})$$

Utilisée pour **quantifier** les **mouvements turbulents** et évaluer l'intensité des **échanges** au sein de la CLA

Liée aux processus de **production**, **transport** et **dissipation de l'énergie** par la turbulence atmosphérique

Plan

1. Contexte et objectifs
2. Analyse synoptique et contexte météorologique
3. Théorie sur la CLA
4. Radiosondages
5. Comparaison observations - modèles
6. Bilan d'énergie de surface
7. Apport des autres instruments et méthode
8. Conclusion
9. Annexe

Préparation des radiosondages par les étudiants le 17 septembre 2025 à Campistrous



08h39



12h05

Instruments / CRA



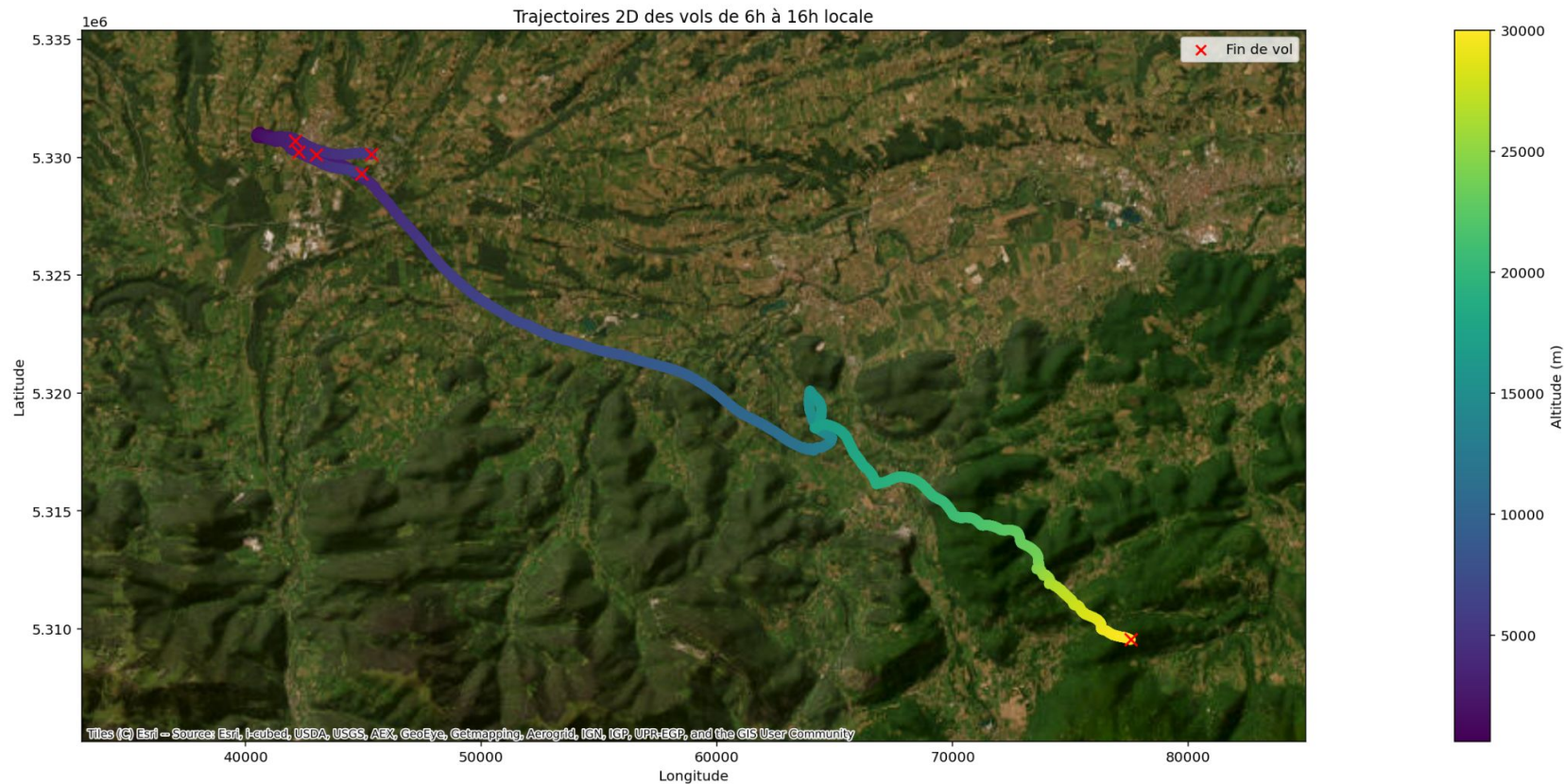
Glider



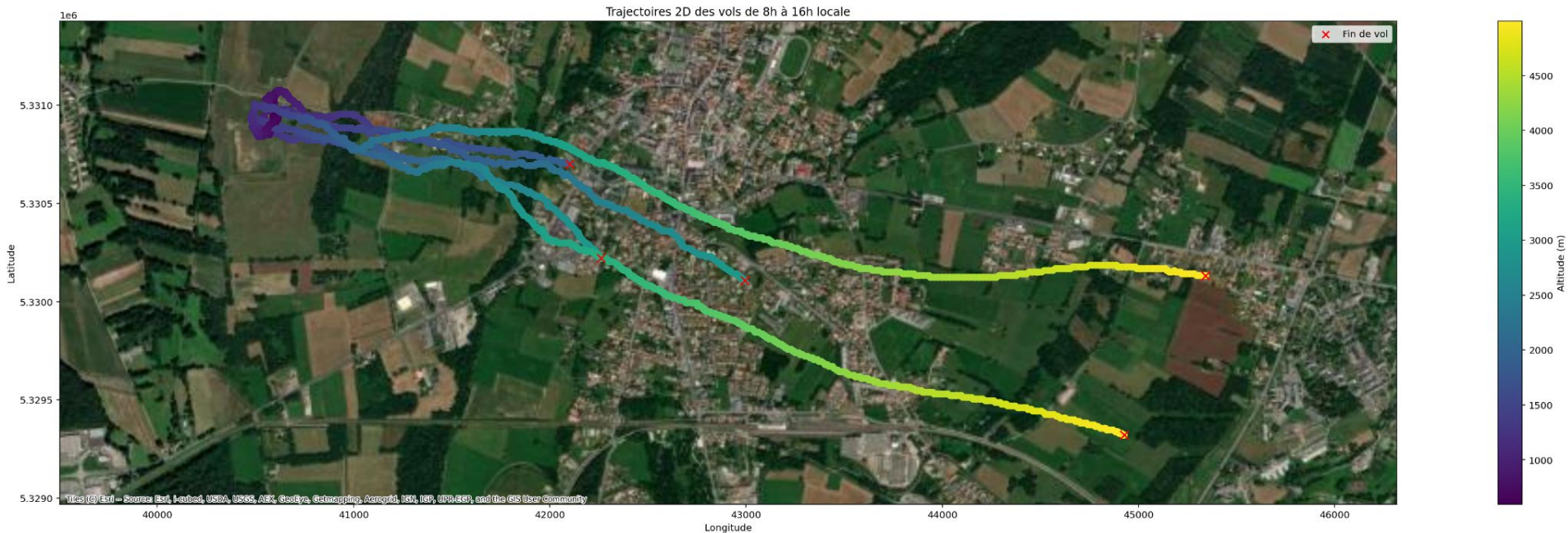
Radiosondage

Température, Humidité, pression, coordonnées GPS → vent horizontal

Trajectoire des 6 vols



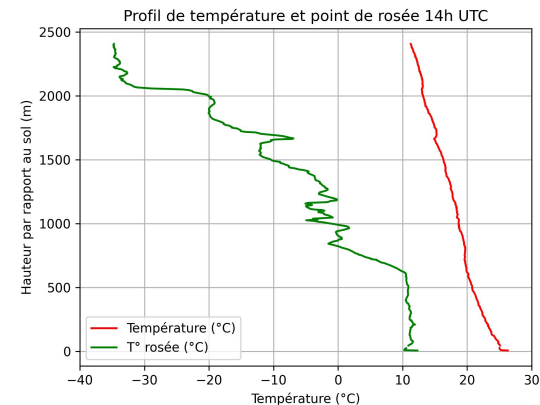
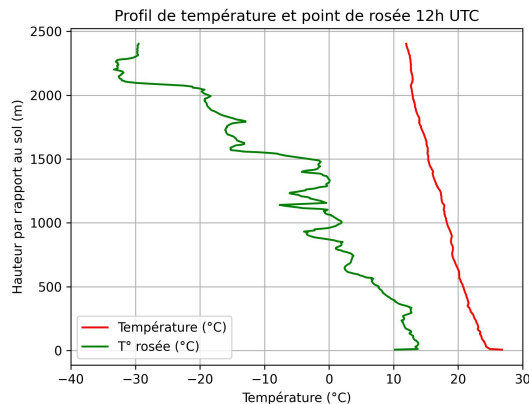
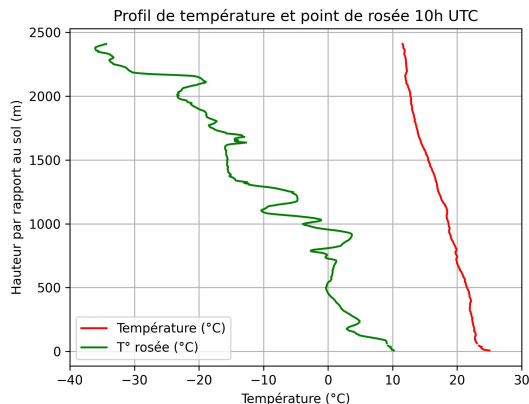
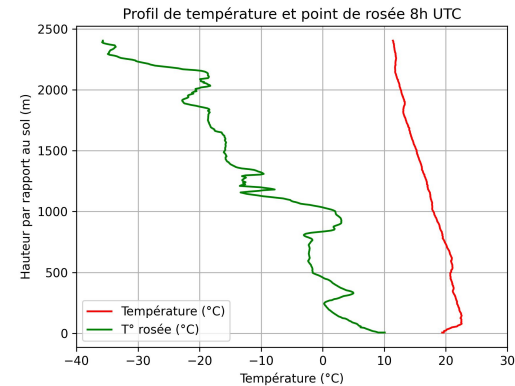
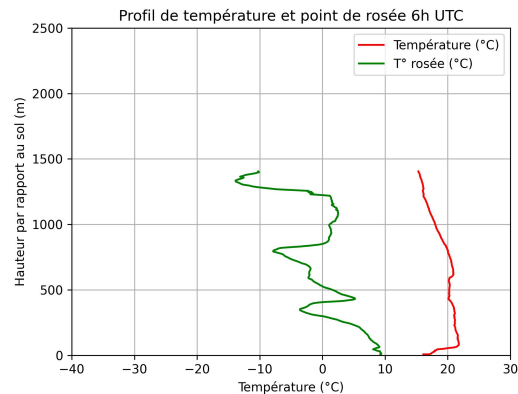
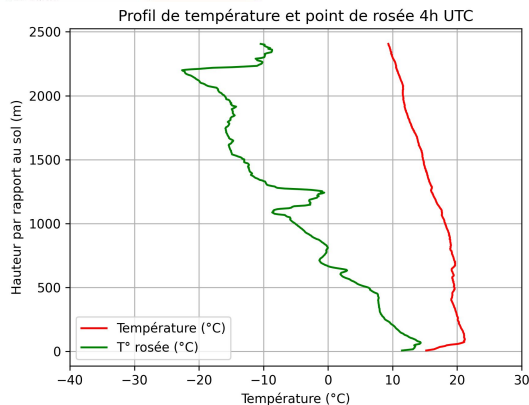
Trajectoire des 5 derniers vols



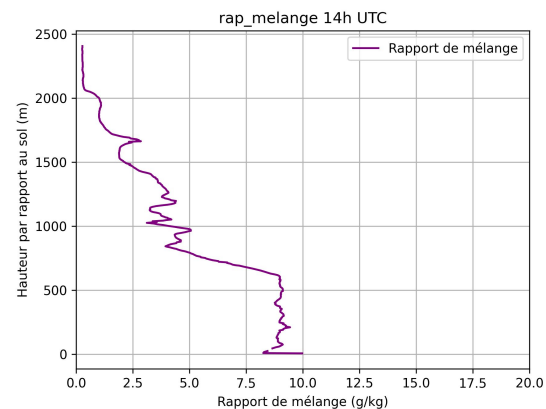
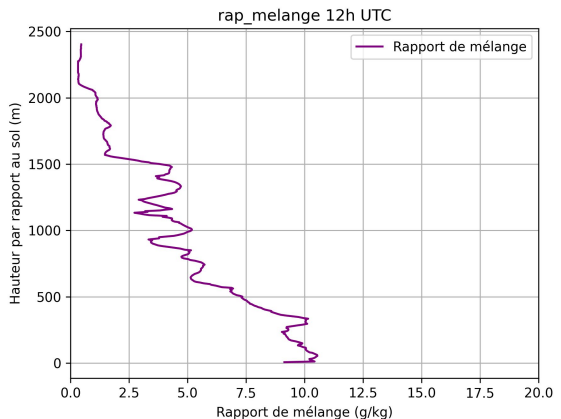
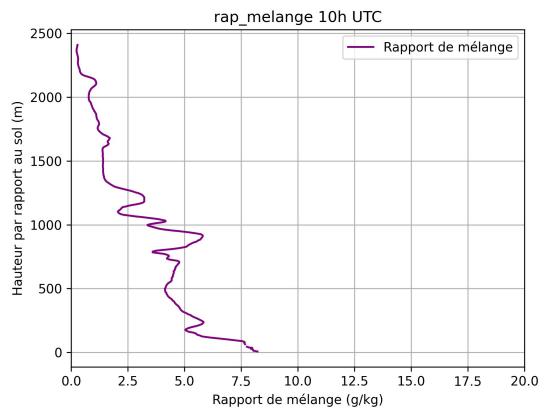
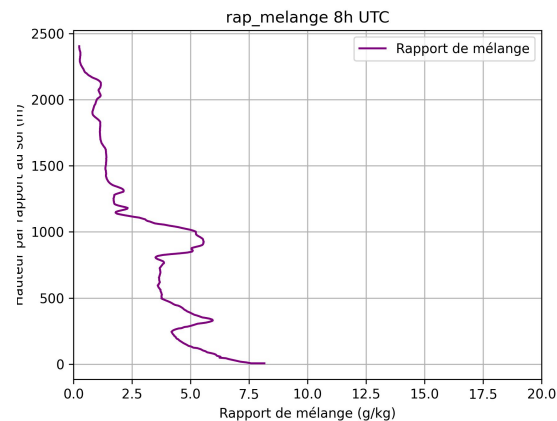
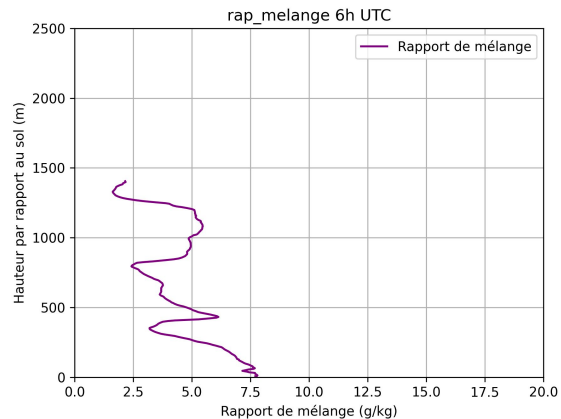
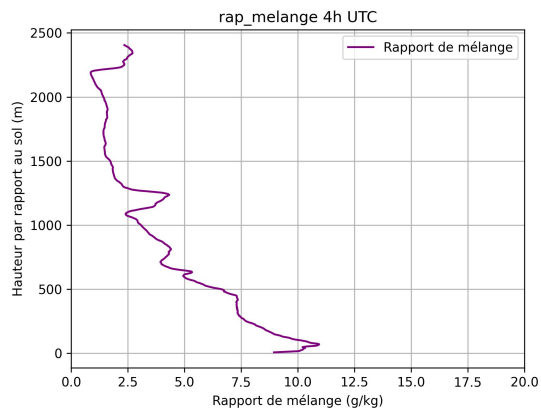
Planeur descendant (10:11 UTC)



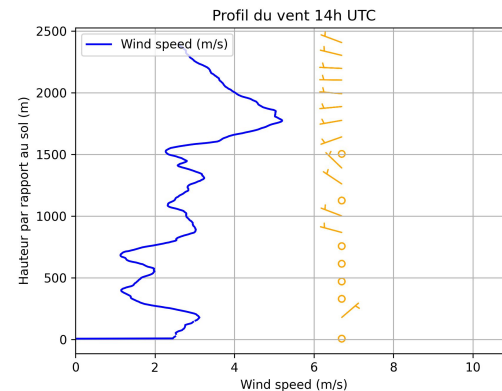
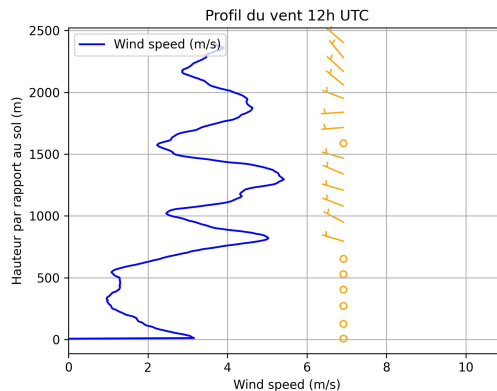
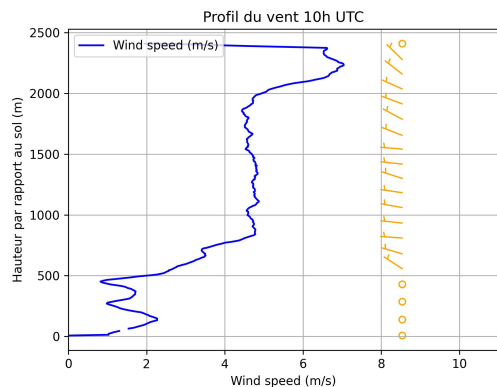
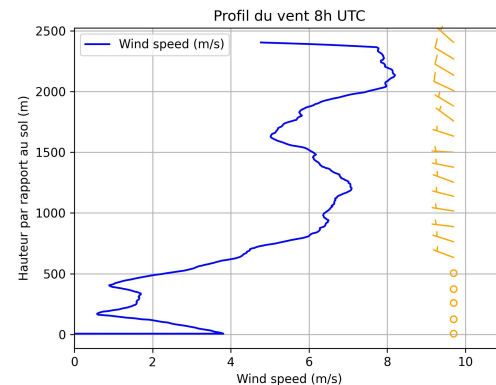
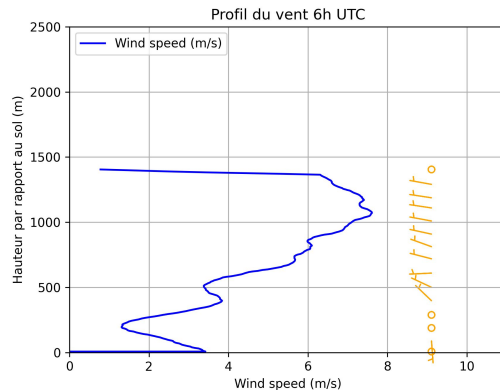
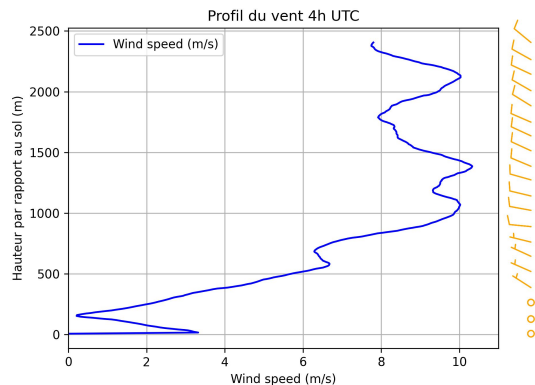
Observation des températures mesurées



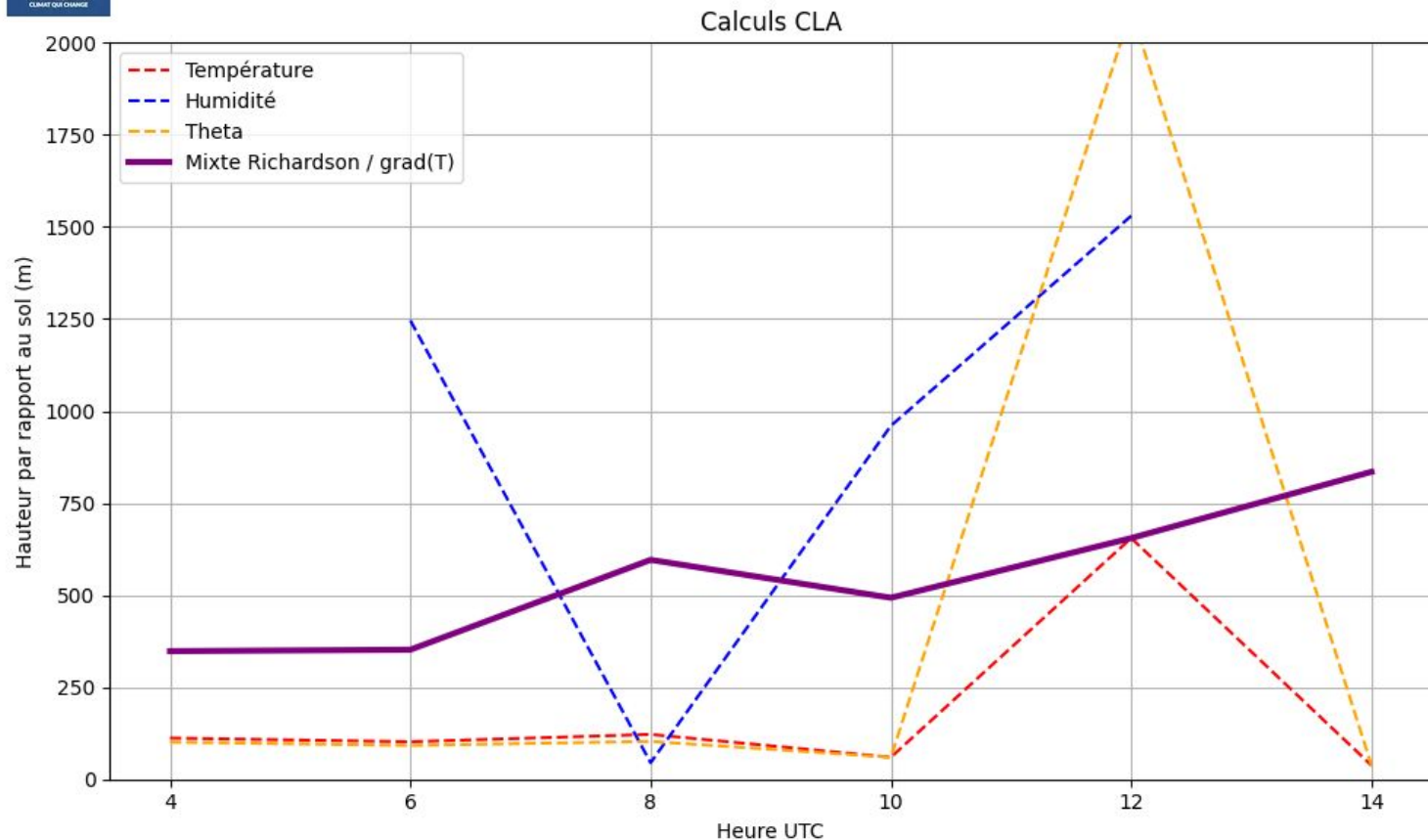
Observation du rapport de mélange



Observation des vents mesurés



Calculs par méthodes numériques de la CLA



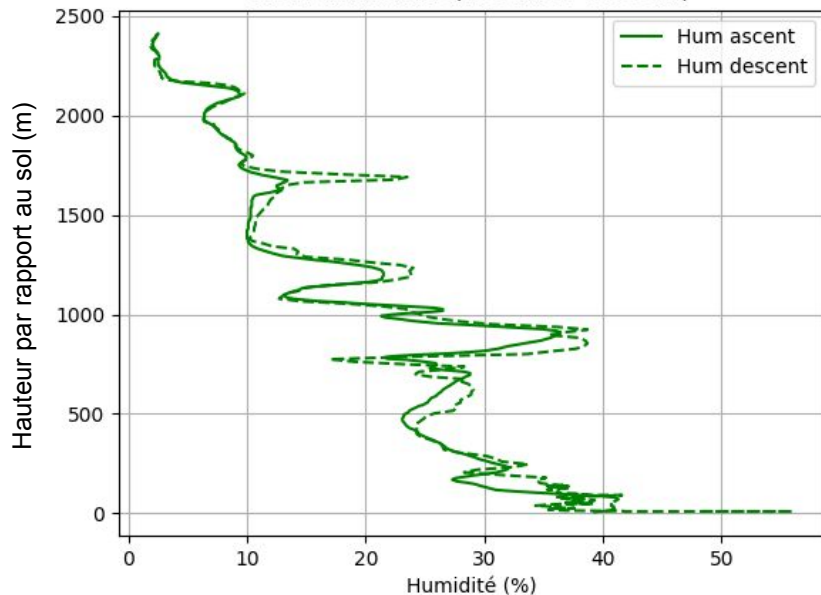
Plan

1. Contexte et objectifs
2. Analyse synoptique et contexte météorologique
3. Théorie sur la CLA
4. Radiosondages
5. Comparaison observations - modèles
6. Bilan d'énergie de surface
7. Apport des autres instruments et méthode
8. Conclusion
9. Annexe

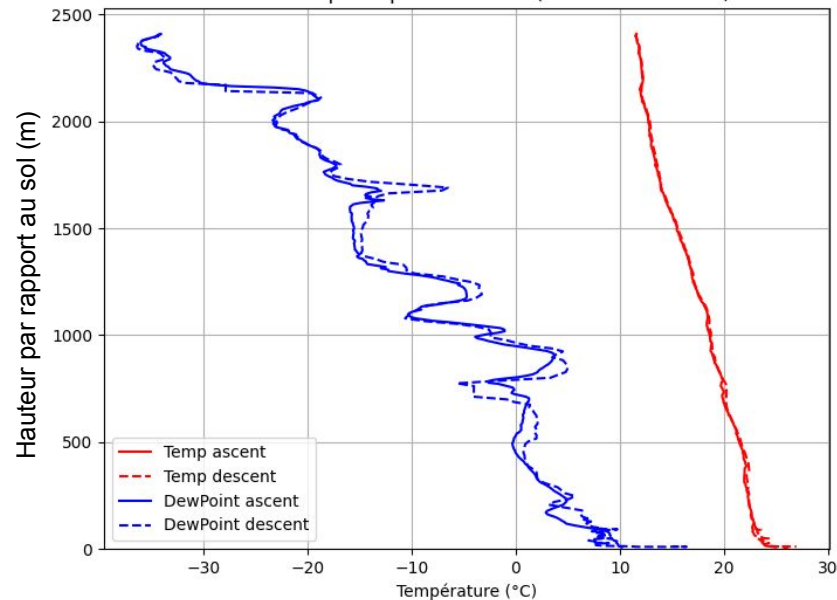
Comparaison ascendant / descendant

Radiosondage de 10h UTC

Profil d'humidité (Ascent vs Descent)



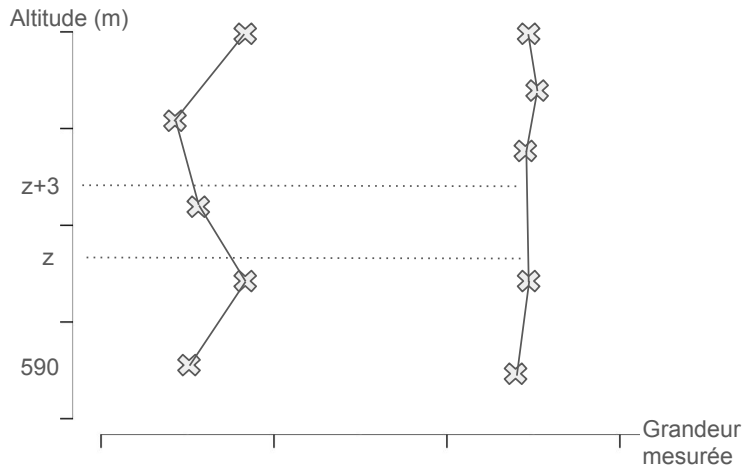
Profil thermique et point de rosée (Ascent vs Descent)



Comparaison ascendant / descendant

Radiosondage de 10h UTC

Schéma interpolation au premier degré

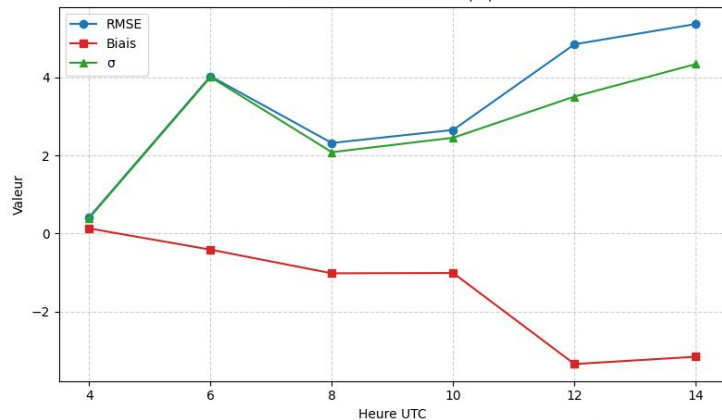


Interpolation de 1000 points de 0 à 2400m

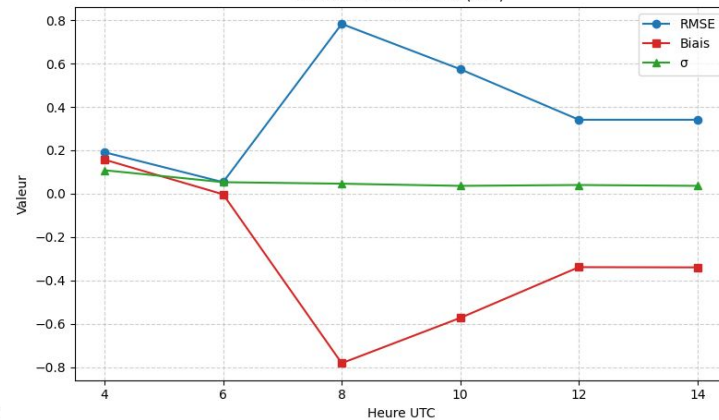
| | RMSE | σ | Biais |
|-----------------|-------|----------|--------|
| Pression (hPa) | 0.096 | 0.066 | 0.070 |
| Température (K) | 0.159 | 0.110 | -0.116 |
| Humidité (%) | 2.625 | 2.409 | -1.044 |

Comparaison ascendant / descendant

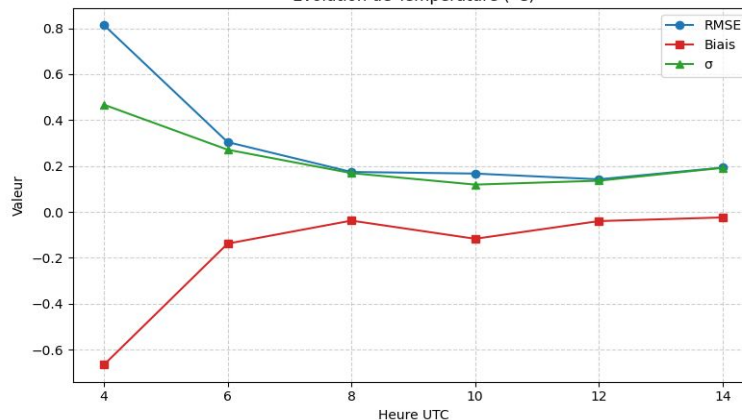
Évolution de Humidité (%)



Évolution de Pression (hPa)



Évolution de Température (°C)



Comparaison avec ARPEGE

Grille du modèle ARPEGE



Résolutions horizontales :

- 5 km sur la France
- 24 km aux antipodes

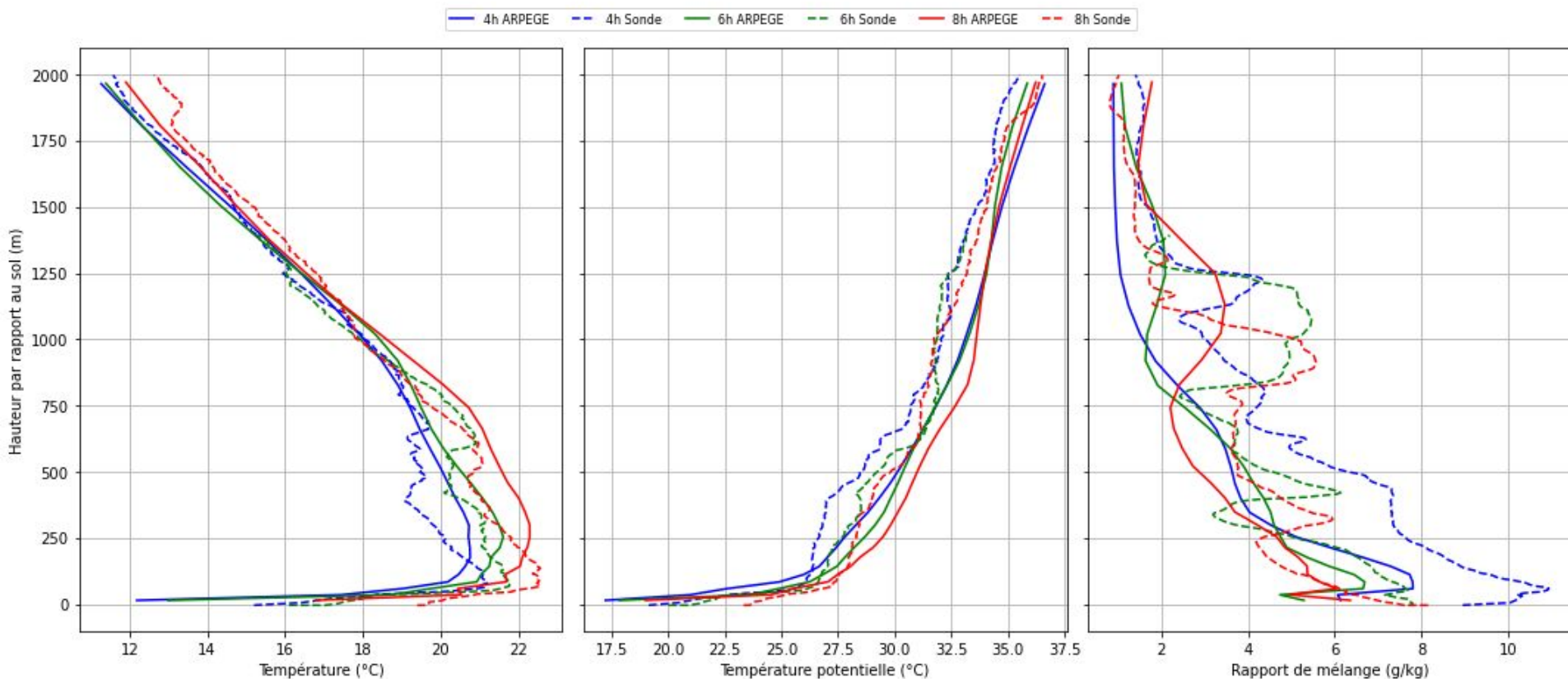
Résolution verticale :

- 105 niveaux verticaux

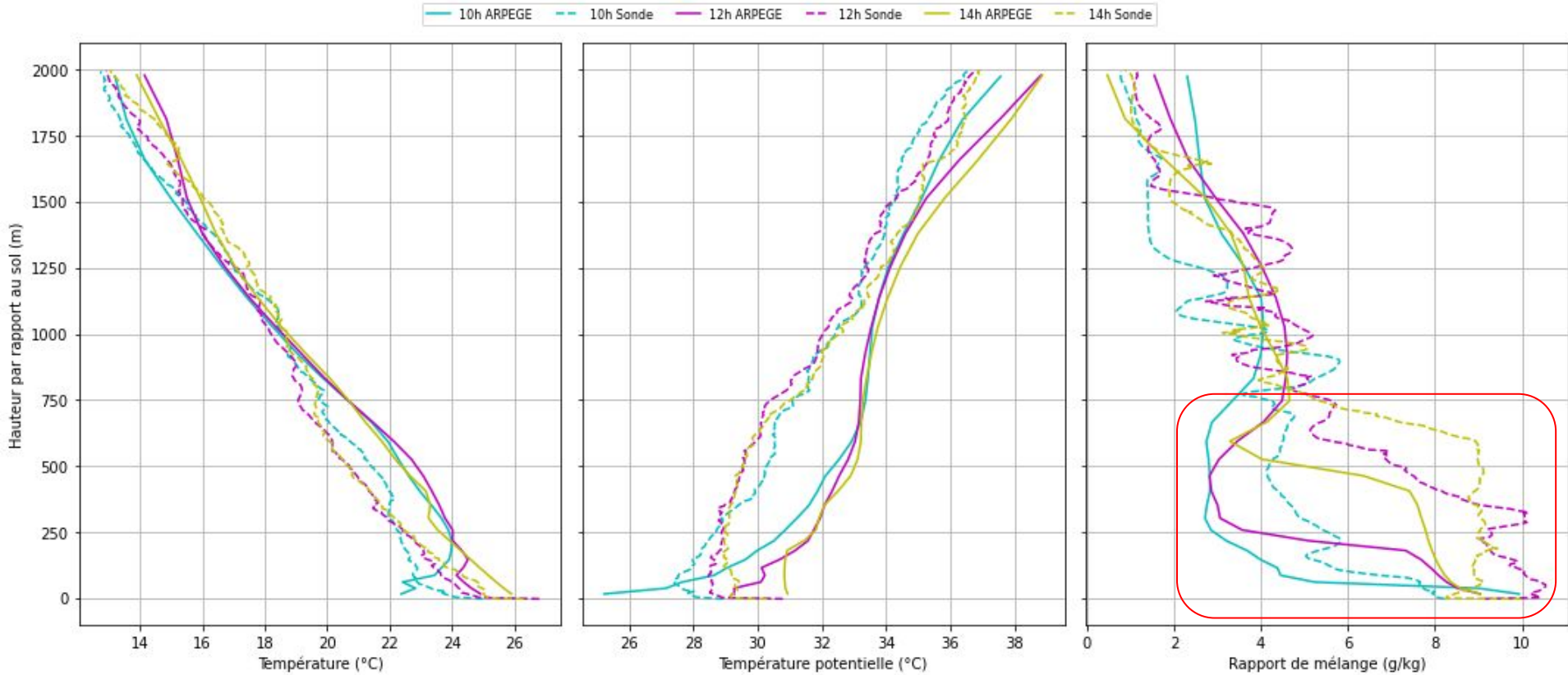
3 réseaux :

- 09-16-00h00 UTC
- 09-16-12h00 UTC
- 09-17-00h00 UTC

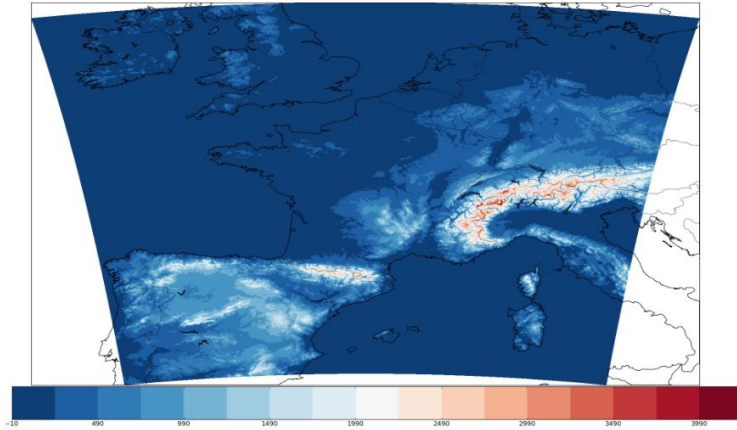
Profils ARPEGE 1700 vs sondes (heures UTC) (matin)



Profils ARPEGE 1700 vs sondes (heures UTC) (aprem)



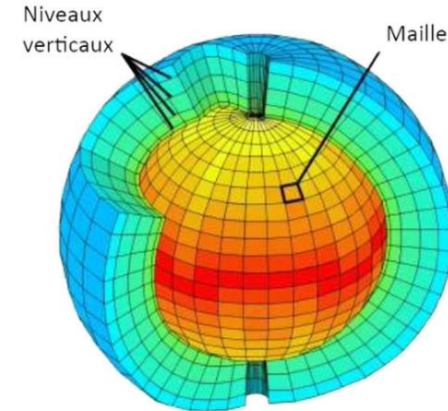
Comparaison avec AROME



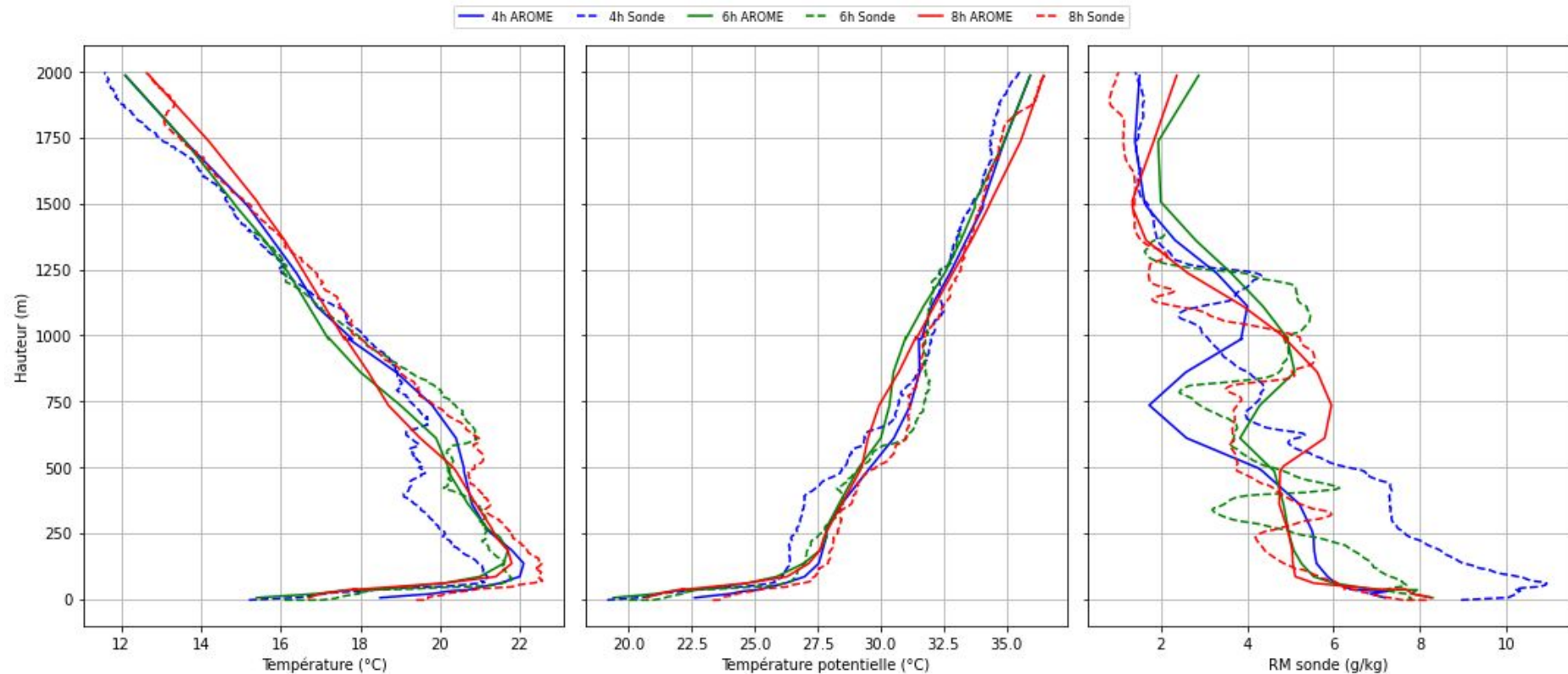
3 réseaux :

- 09-17-00h00 UTC (4-6-8-10-12-14)
- 09-17-03h00 UTC (8-10-12-14)
- 09-17-06h00 UTC (10-12-14)

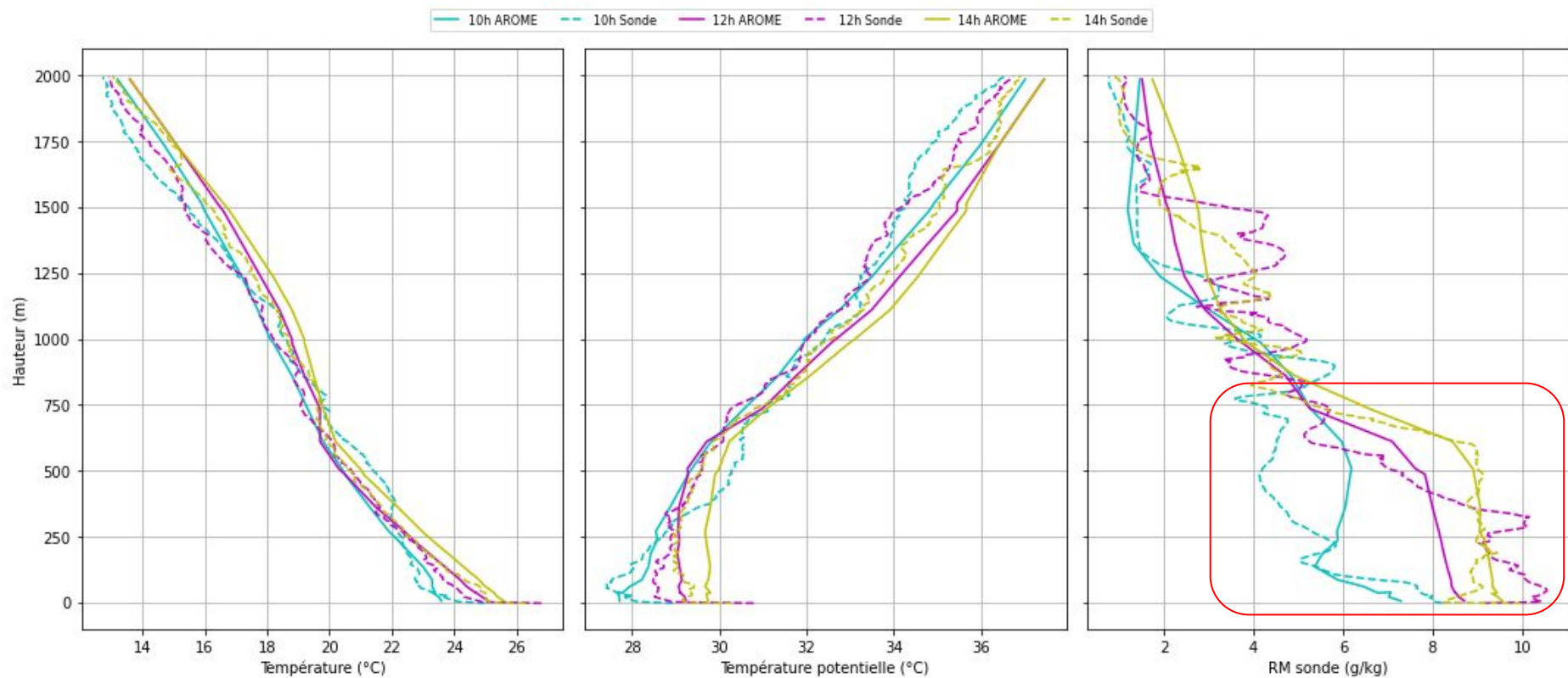
Maille : 1.3km * 90 niveaux (ici 47)



Profils AROME run 202509170000 vs sondes (matin)

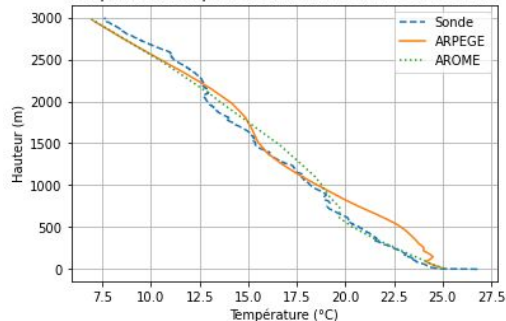


Profils AROME run 202509170000 vs sondes (aprem)

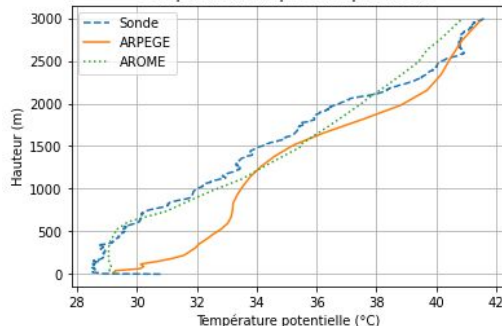


Comparaison des modèles AROME et ARPEGE sur le radiosondage de 12:00 UTC (run du 17-00:00)

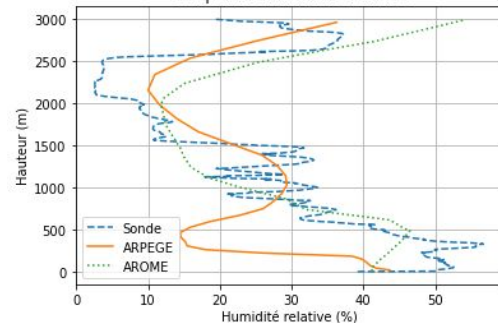
Comparaison température (AROME vs ARPEGE vs Sonde)



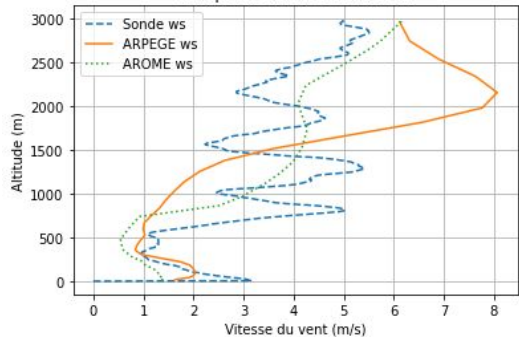
Comparaison température potentielle



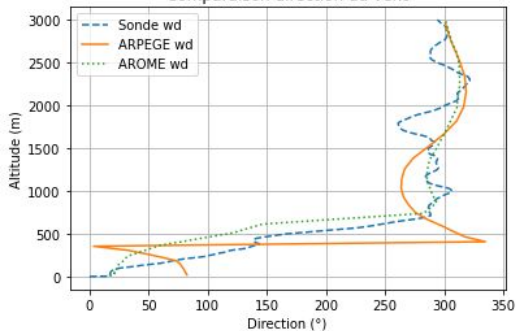
Comparaison humidité relative



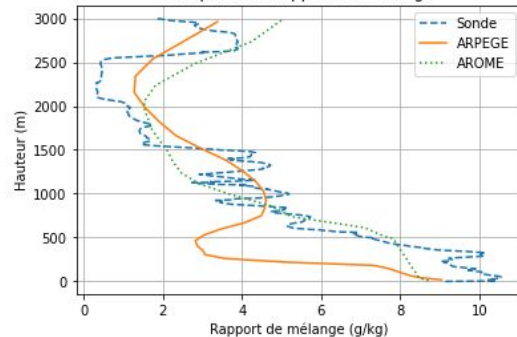
Comparaison vitesse du vent



Comparaison direction du vent



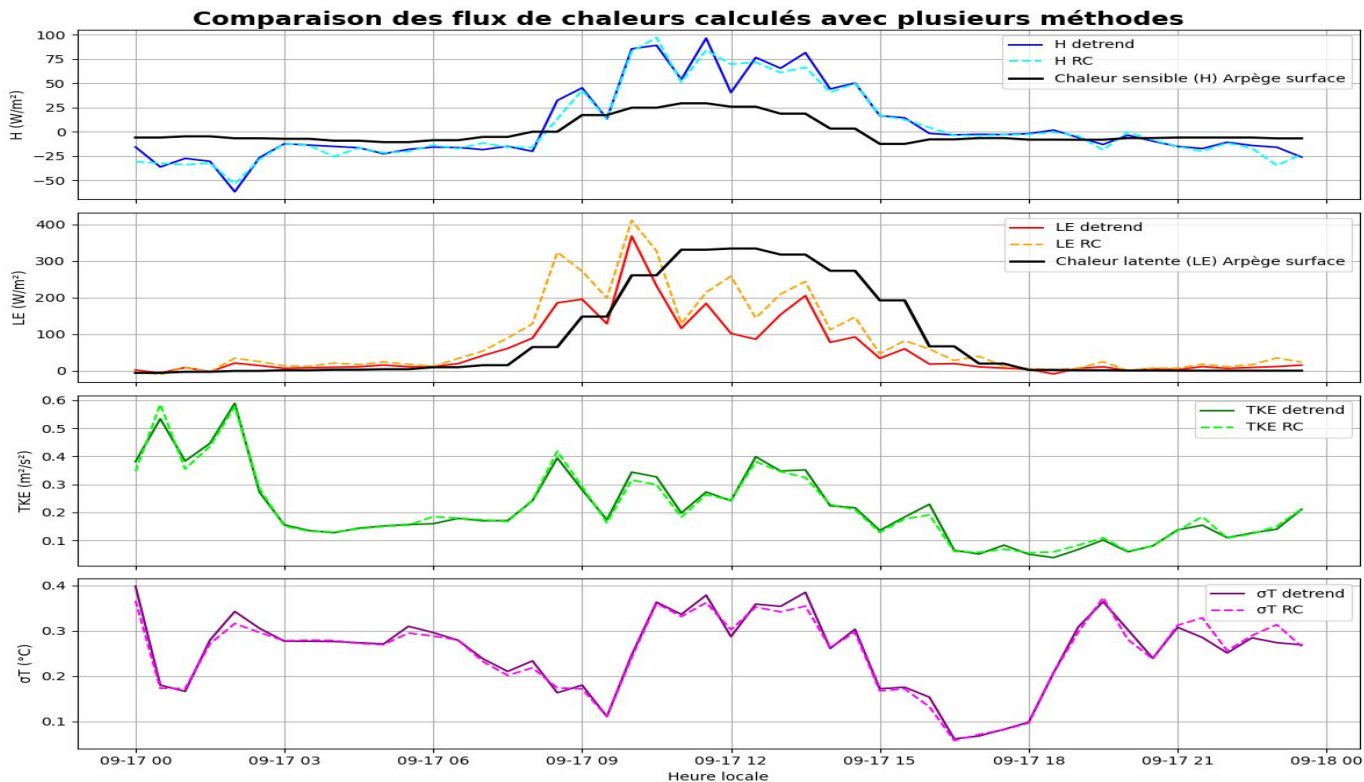
Comparaison rapport de mélange



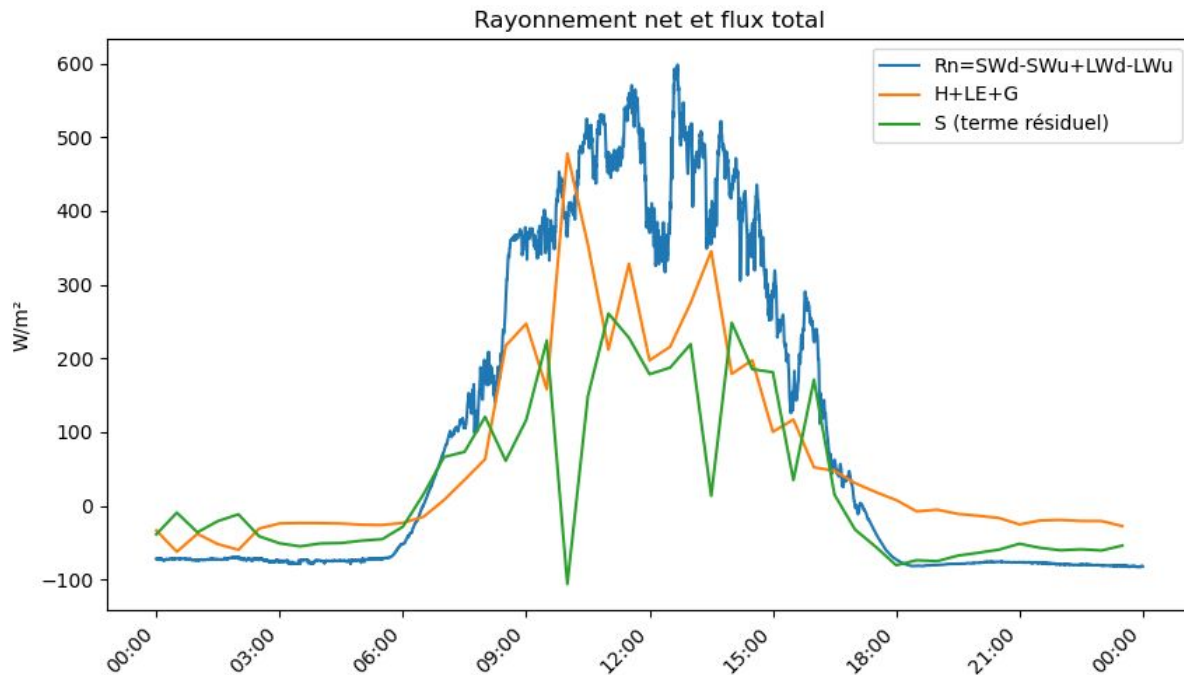
Plan

1. Contexte et objectifs
2. Analyse synoptique et contexte météorologique
3. Théorie sur la CLA
4. Radiosondages
5. Comparaison observations - modèles
6. Bilan d'énergie de surface
7. Apport des autres instruments et méthode
8. Conclusion
9. Annexe

Comparaison des flux : à partir des obs vs Arpège

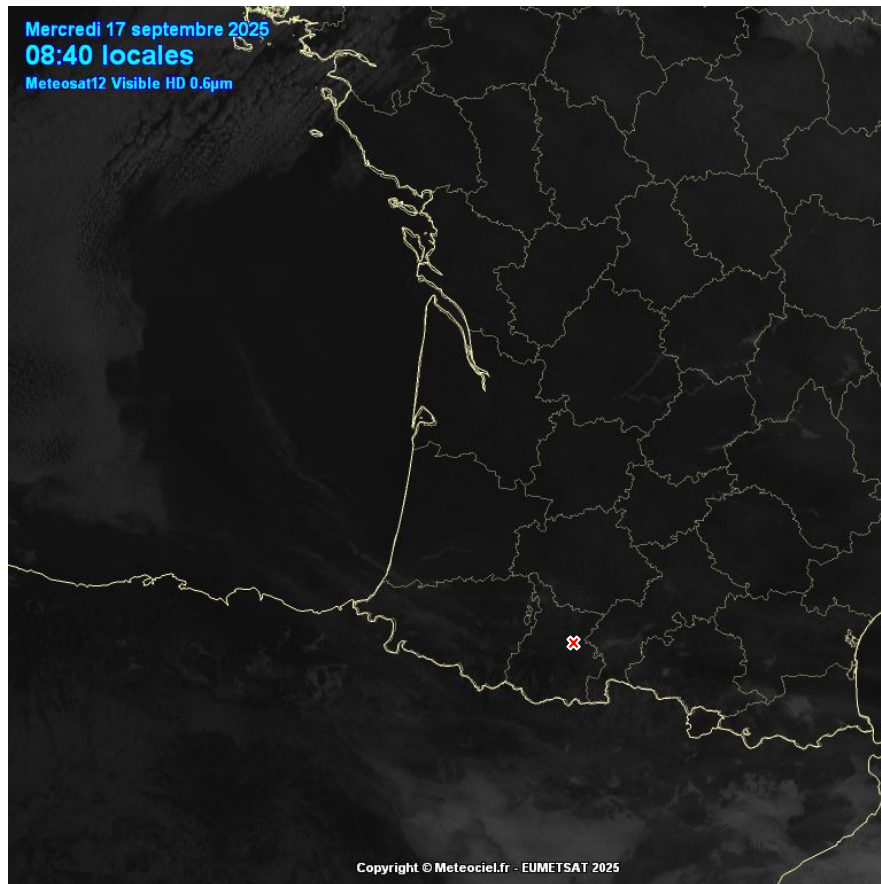


Rayonnement net

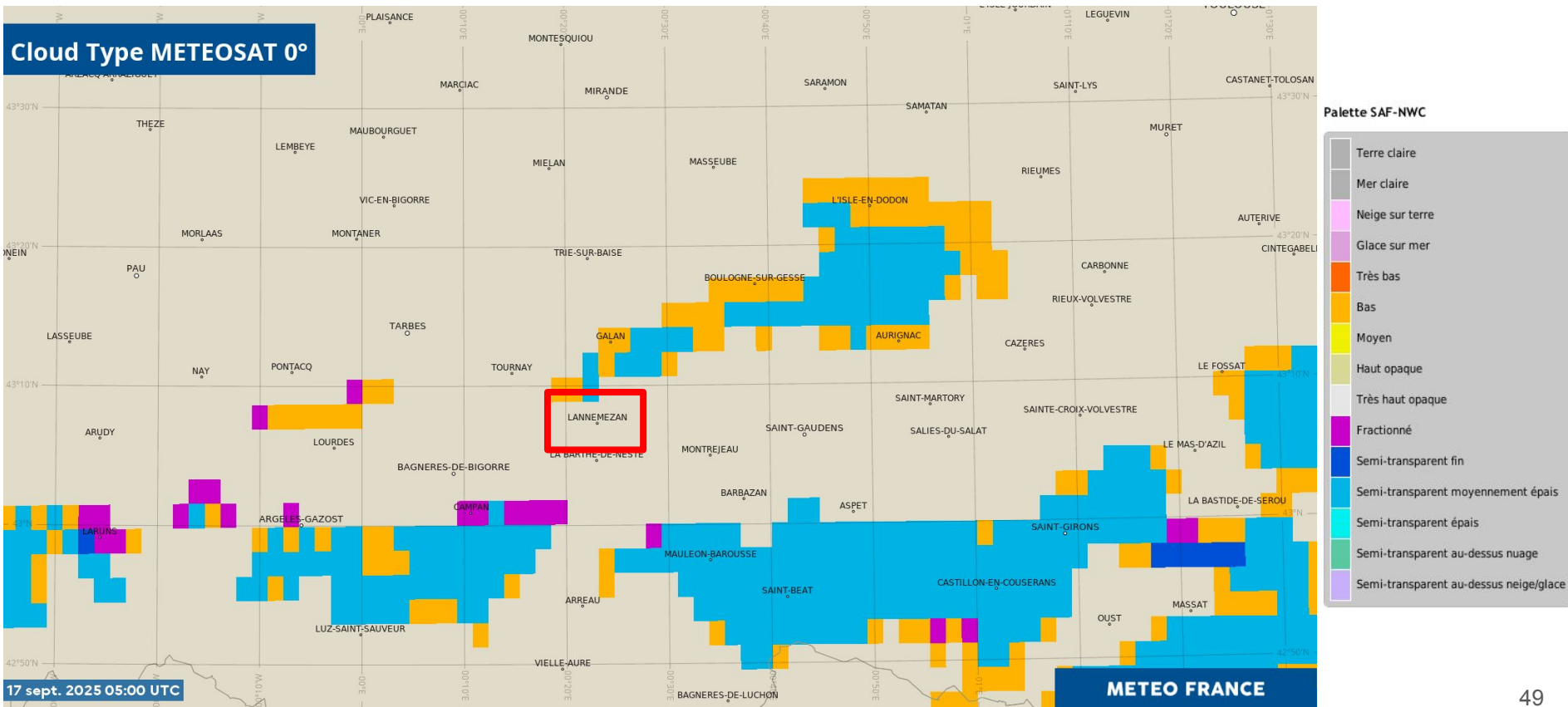


- Différence entre les 2 courbes due au résidu S , représentant en moyenne 20% du rayonnement net
- Possibles erreurs instrumentales ou sources d'énergie additionnelles

Vue satellite Meteosat 12 - 8h30 à 16h30



Type de nuages MTG pour la journée du 17 septembre de 7h00 à 20h00 locales



Instruments / CRA

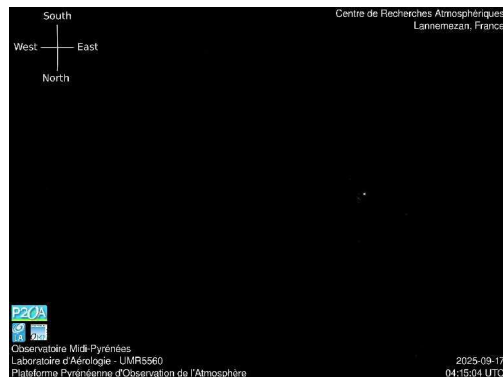
RAPACE (Récepteur Automatique Pour l'Acquisition du Ciel Entier) constitué de :

- un appareil photo numérique à grand angle
- un dôme en plexiglas
- un thermostat qui maintient la température de la lentille à 10°C afin d'éviter la condensation



Ciel entier

6h15



8h40



10h15



12h10



14h15



16h05



Photos du voile de cirrostratus au CRA de Campistrous le 17 septembre 2025



10h39



14h45



14h45

Plan

1. Contexte et objectifs
2. Analyse synoptique et contexte météorologique
3. Théorie sur la CLA
4. Radiosondages
5. Comparaison observations - modèles
6. Bilan d'énergie de surface
7. Apport des autres instruments et méthode
8. Conclusion
9. Annexe

Instruments / CRA

Radar de profilage de vent UHF (Ultra High Frequency) :

- sondages de la dynamique/thermodynamique en continu
- en air clair ou précipitant
- ouverture verticale : de 75 m à 3-6 km
- résolution radiale : 75 m

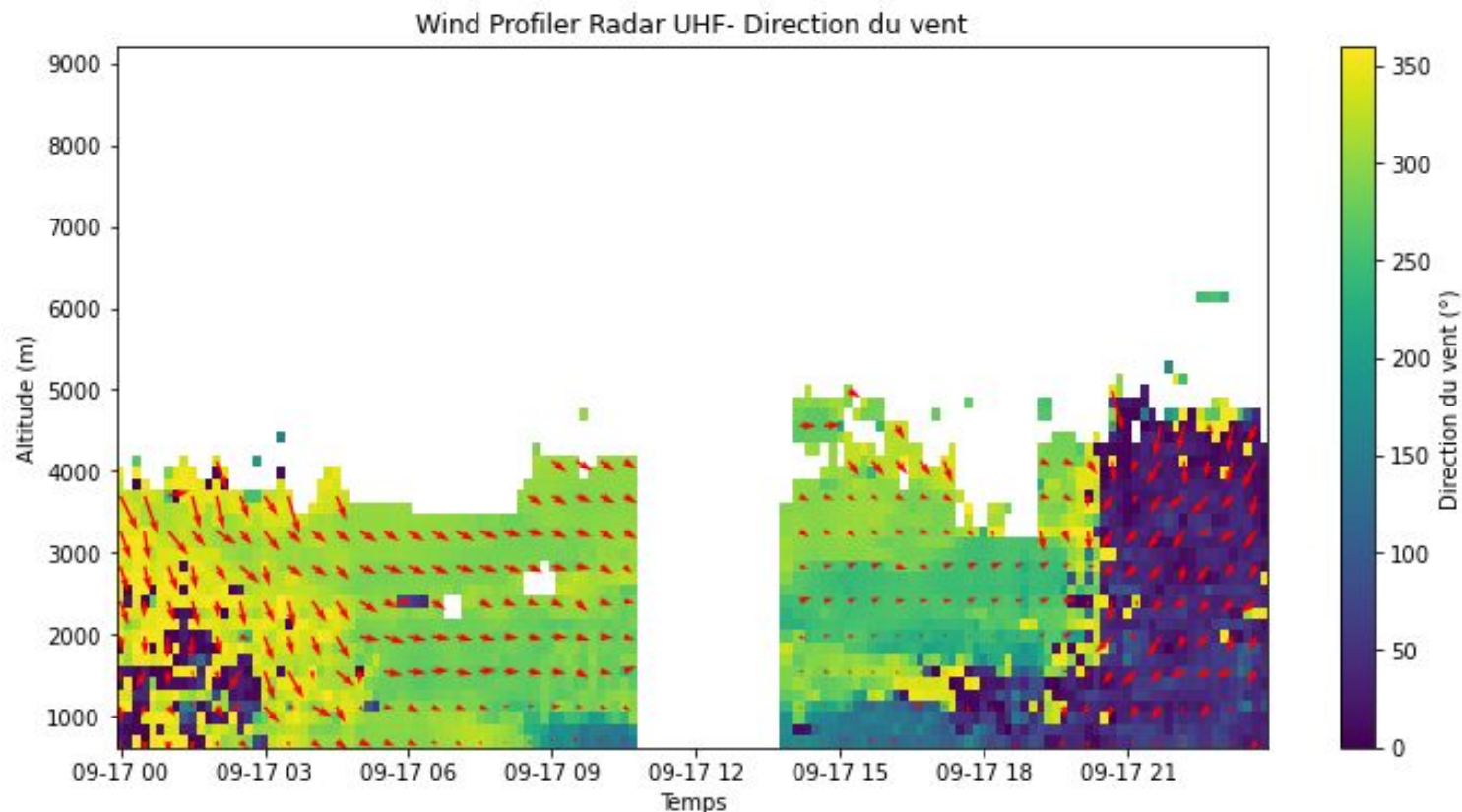
Adapté à l'étude et la surveillance de la couche limite
atmosphérique



Objectifs :

- 3 composantes du vent
- réflectivité → sommet CLA

Radar UHF



Instruments / CRA

Radar VHF (very high frequency) :

- gamme d'altitudes : 1.5 km à 16 km
- résolutions : 375 m (verticale) - 15 minutes

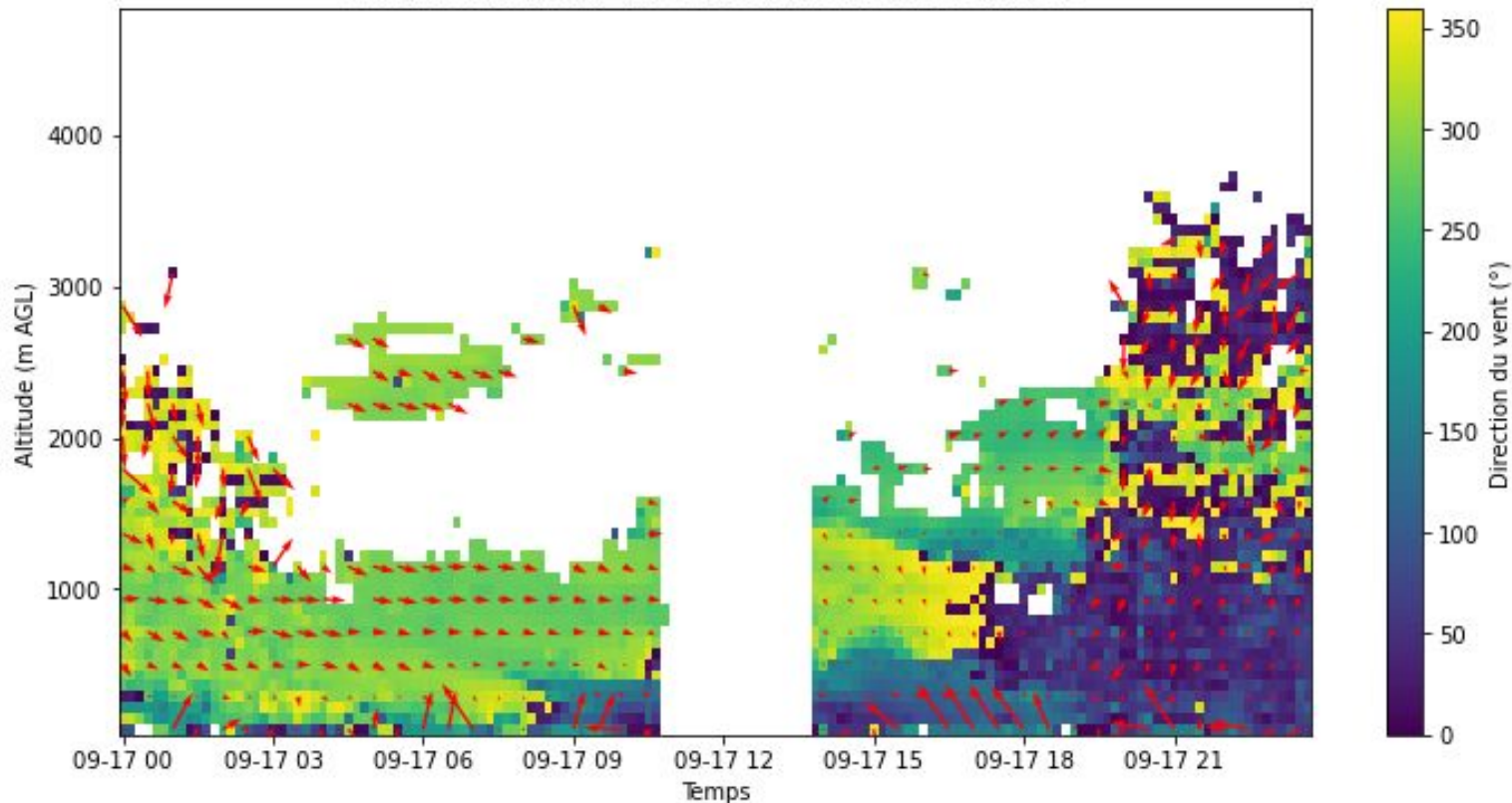
Objectifs :

- 3 composantes du vent
- réflectivité → sommet CLA



Radar VHF

Wind Profiler Radar VHF- Direction et intensité du vent



Instruments / CRA

Ceilomètre (VAISALA CL61) : détection et télémétrie lumineuse (LiDAR) avec mesure de dépolarisation.

Deux **LiDAR** (Halo Photonics VS+, VAISALA Windcube) : mesure du vent horizontal, vertical et de la TKE

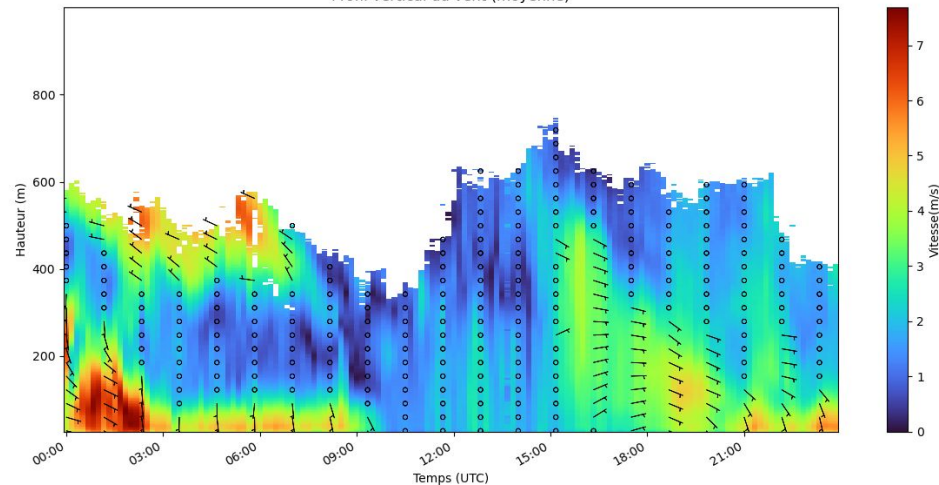


Impulsions laser à diode courte dans une direction proche-verticale.

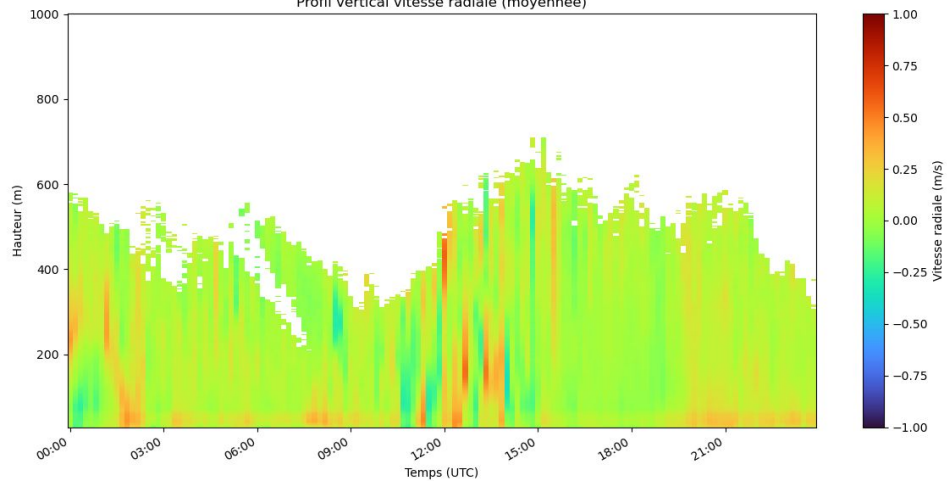
Permet de mesurer les hauteurs de base en nuage à partir des profils mesurés de la rétrodiffusion.

Profils verticaux LiDAR VS+

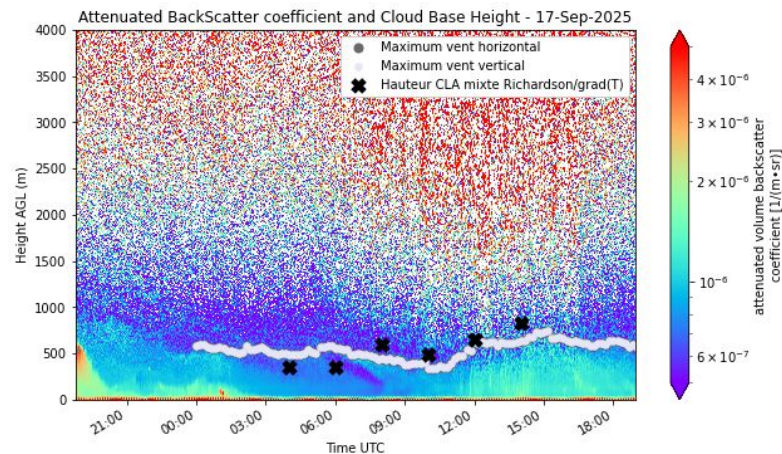
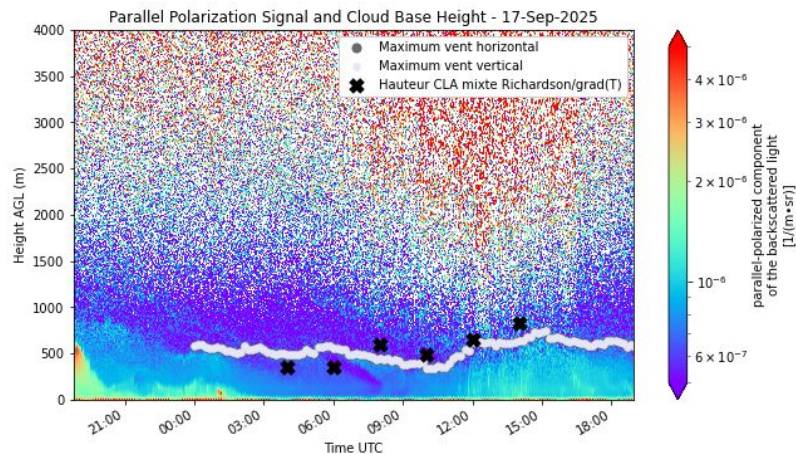
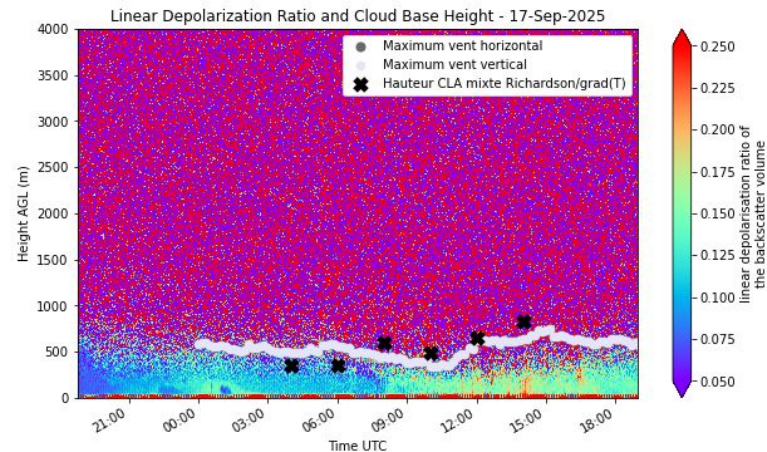
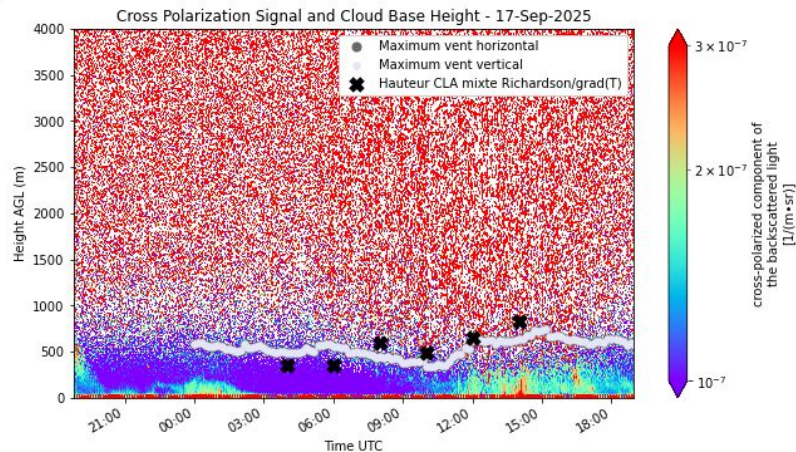
Profil vertical du vent (moyenné)



Profil vertical vitesse radiale (moyennée)



Ceilomètre, LIDAR et hauteur de CLA numérique



Modèle de Tennekes : couche limite convective

Épaisseur de la couche limite

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{1}{zi} * (1 - \beta) w' \theta' |_s \qquad SH = \rho Cp w' \theta' |_s$$

En prenant :

$$\frac{d\theta_m}{dt} = + 0,5 \text{ K toutes les 2 heures en cours d'après-midi}$$

$$\beta = 0,2 \text{ (valeur moyenne)}$$

$$SH = 50 \text{ W m}^{-2} \text{ entre 11h00 et 17h00 locales}$$

$$\rho = 1,3 \text{ kg m}^{-3} \text{ (valeur moyenne)}$$

$$Cp = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{On obtient : } w' \theta' |_s = 0,038 \text{ K m s}^{-1} \text{ et } zi = 440 \text{ m}$$

Modèle de Tennekes : couche limite convective

Épaisseur de la couche limite

Croissance de la couche limite convective, à l'ordre 0 :

$$\frac{dz_i}{dt} = \beta \frac{w' \theta'_s}{\Delta \theta} = 0,2 \cdot \frac{50}{0,5 \cdot 1,3 \cdot 1005} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$$

Croissance verticale de la couche limite convective de **54 mètres par heure**

Plan

1. Contexte et objectifs
2. Analyse synoptique et contexte météorologique
3. Théorie sur la CLA
4. Radiosondages
5. Comparaison observations - modèles
6. Bilan d'énergie de surface
7. Apport des autres instruments et méthode
8. Conclusion
9. Annexe

Conclusion

Comment évolue la CLA au cours de la journée ?

- L'épaisseur selon les méthodes
 - Son forçage au sol, bilan d'énergie de surface
- La théorie d'évolution temporelle de Z_i est-elle valide ?
- Évaluation des modèles et des différents instruments

Conclusion : Épaisseur CLA selon les méthodes

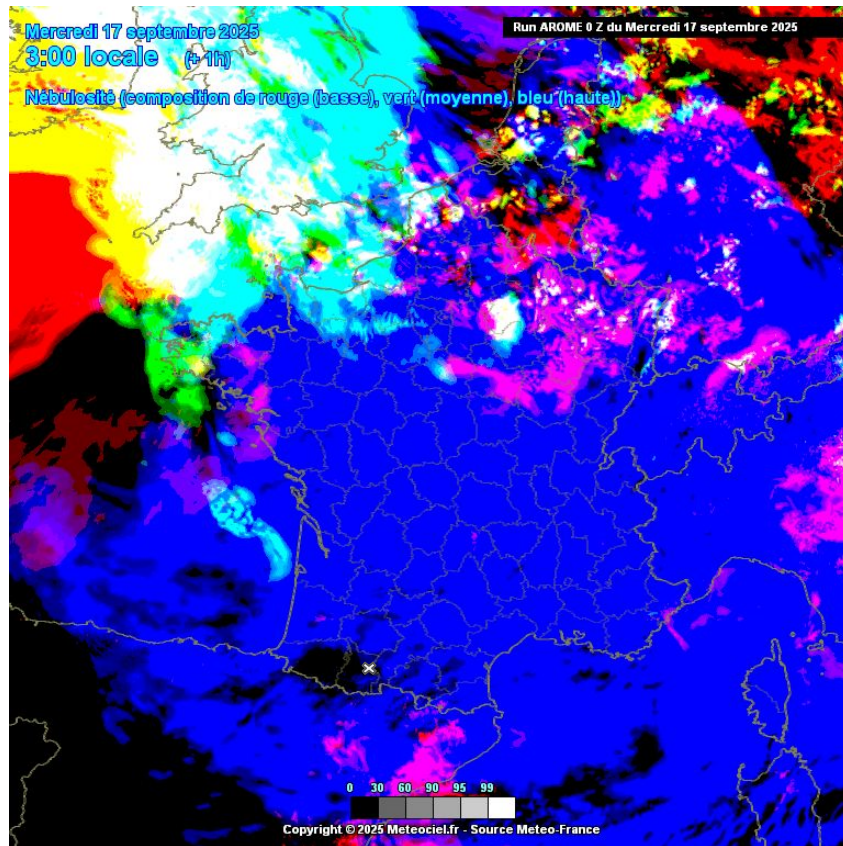
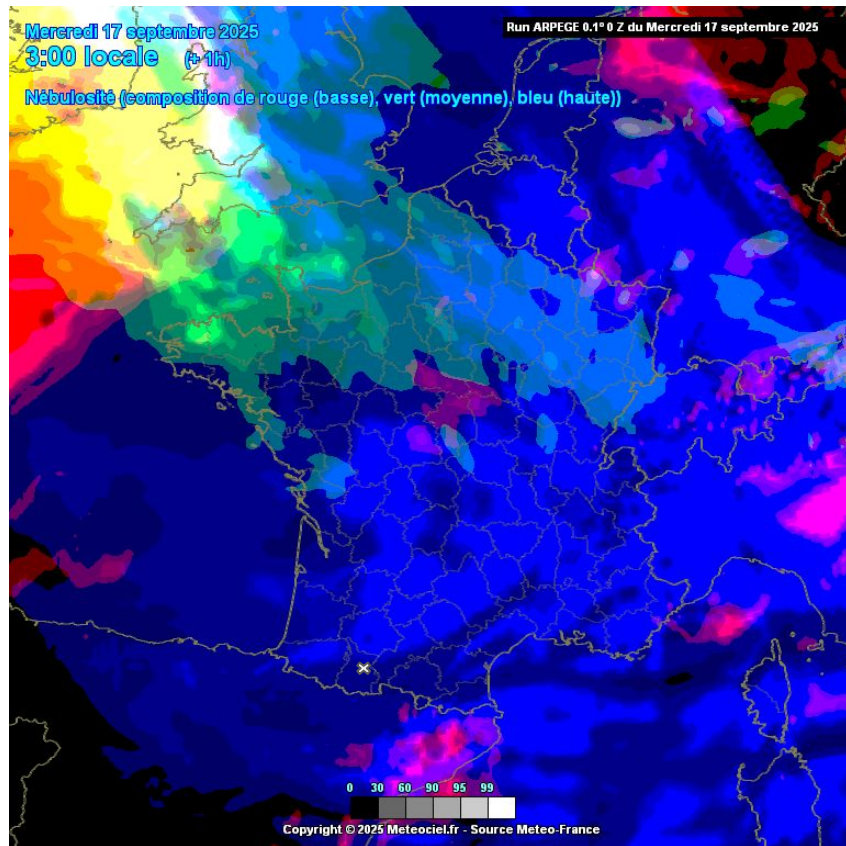
RS

| Méthodes / Heures (UTC) | 04:00 | 06:00 | 08:00 | 10:00 | 12:00 | 14:00 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Température potentielle | / | / | / | / | 450 | 700 |
| Rapport de mélange | / | / | / | / | 350 | 600 |
| Vent | 200 | 200 | 300 | 400 | 500 | 700 |
| LIDAR | 485 | 550 | 445 | 330 | 627 | 630 |
| Ceilomètre | 300 | 300 | 500 | 400 | 500 | 700 |
| Radar UHF | / | / | 800 | / | 800 | 1000 |
| Radar VHF | / | / | 500 | / | 600 | 700 |
| Richardson | 345 | 345 | 595 | 492 | 654 | 830 |
| Tennekes | / | / | / | 340 | 440 | 540 |

Conclusion : Comparaison des modèles vs RS

| | | 10:00 | 12:00 | 14:00 |
|---------------|--------------------------------|-------|-------|-------|
| RS | Température potentielle | / | 450 | 700 |
| | Rapport de mélange | / | 350 | 600 |
| | Vent | 400 | 500 | 700 |
| ARPEGE | Température potentielle | / | 150 | 200 |
| | Rapport de mélange | / | 200 | 400 |
| | Vent | / | 200 | 400 |
| AROME | Température potentielle | / | 500 | 600 |
| | Rapport de mélange | / | 500 | 600 |
| | Vent | 600 | 600 | 600 |

Conclusion : Comparaison des modèles vs RS



MERCI POUR VOTRE ATTENTION



Plan

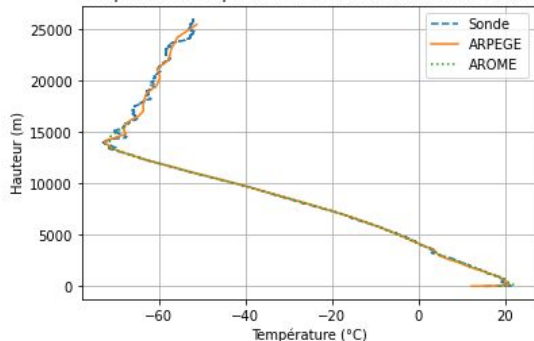
1. Contexte et objectifs
2. Analyse synoptique et contexte météorologique
3. Théorie sur la CLA
4. Radiosondages
5. Comparaison observations - modèles
6. Bilan d'énergie de surface
7. Apport des autres instruments et méthode
8. Conclusion
9. Annexe

Conclusion : Comparaison des modèles vs RS

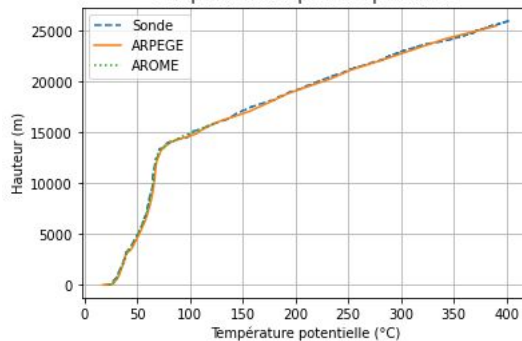
| | | 10:00 | 12:00 | 14:00 |
|--------|-------------------------|-------|-------|-------|
| RS | Température potentielle | / | 450 | 700 |
| | Rapport de mélange | / | 350 | 600 |
| | Vent | 400 | 500 | 700 |
| ARPEGE | Température potentielle | / | 150 | 200 |
| | Rapport de mélange | / | 200 | 400 |
| | Vent | 300 | 200 | 400 |
| AROME | Température potentielle | / | 500 | 600 |
| | Rapport de mélange | / | 500 | 600 |
| | Vent | 600 | 600 | 600 |

Comparaison des modèles AROME et ARPEGE sur le radiosondage de 04:00 UTC (run du 17-00:00)

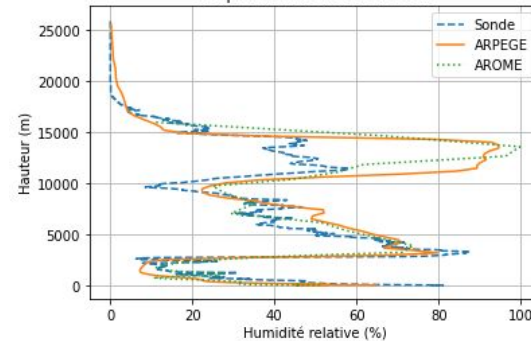
Comparaison température (AROME vs ARPEGE vs Sonde)



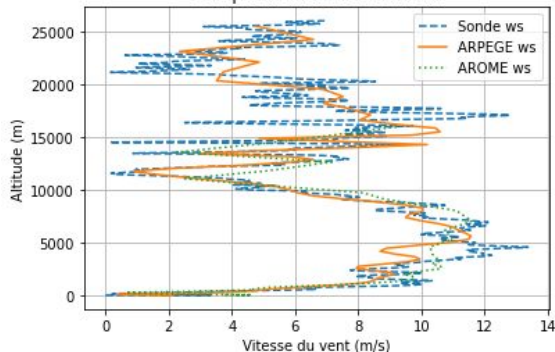
Comparaison température potentielle



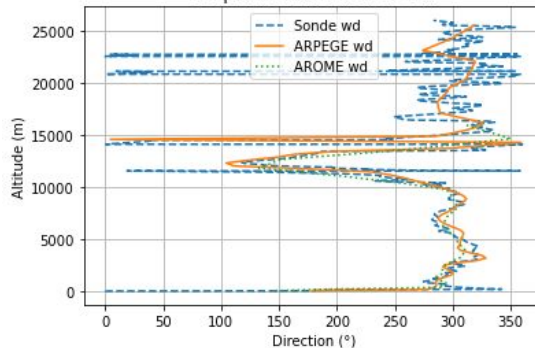
Comparaison humidité relative



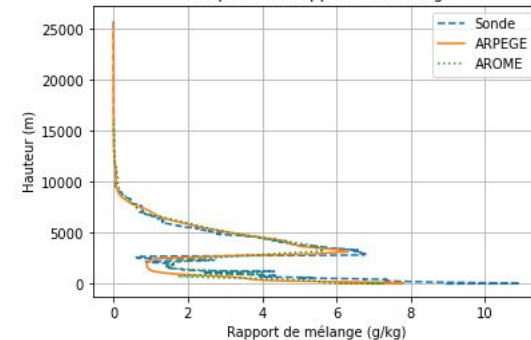
Comparaison vitesse du vent



Comparaison direction du vent

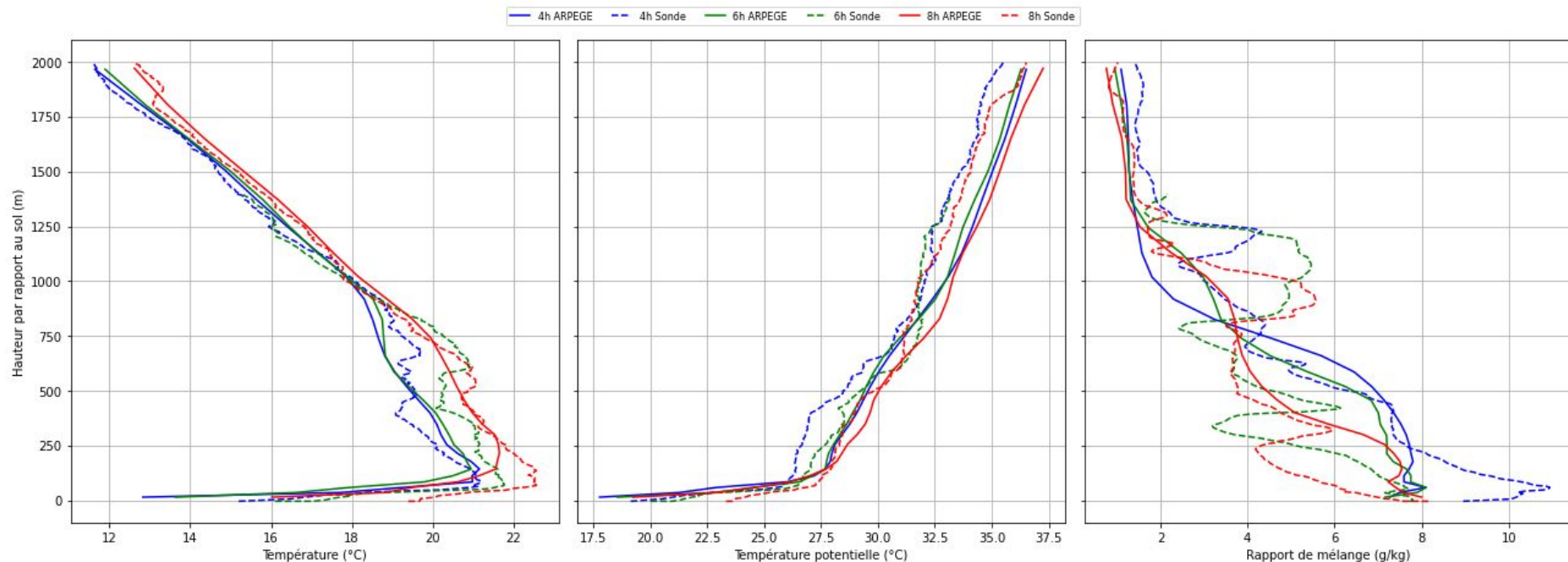


Comparaison rapport de mélange



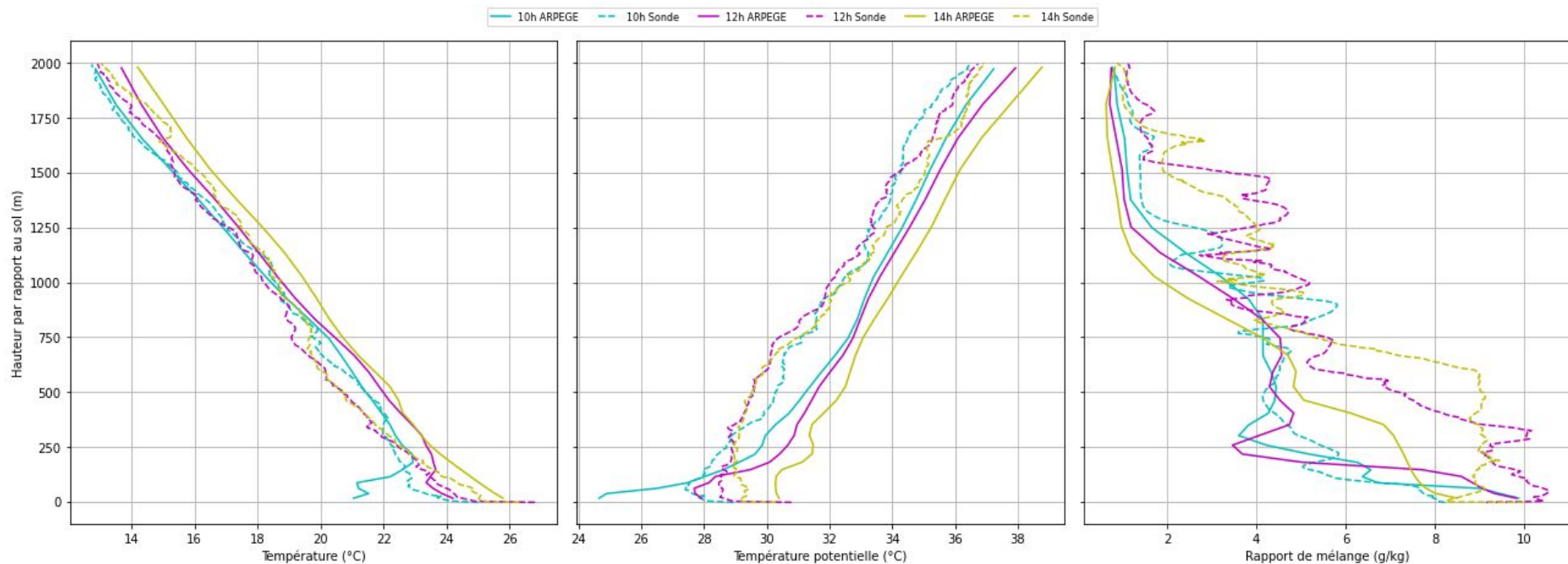
Annexe : ARPEGE

Profils ARPEGE 1600 vs sondes (heures UTC)



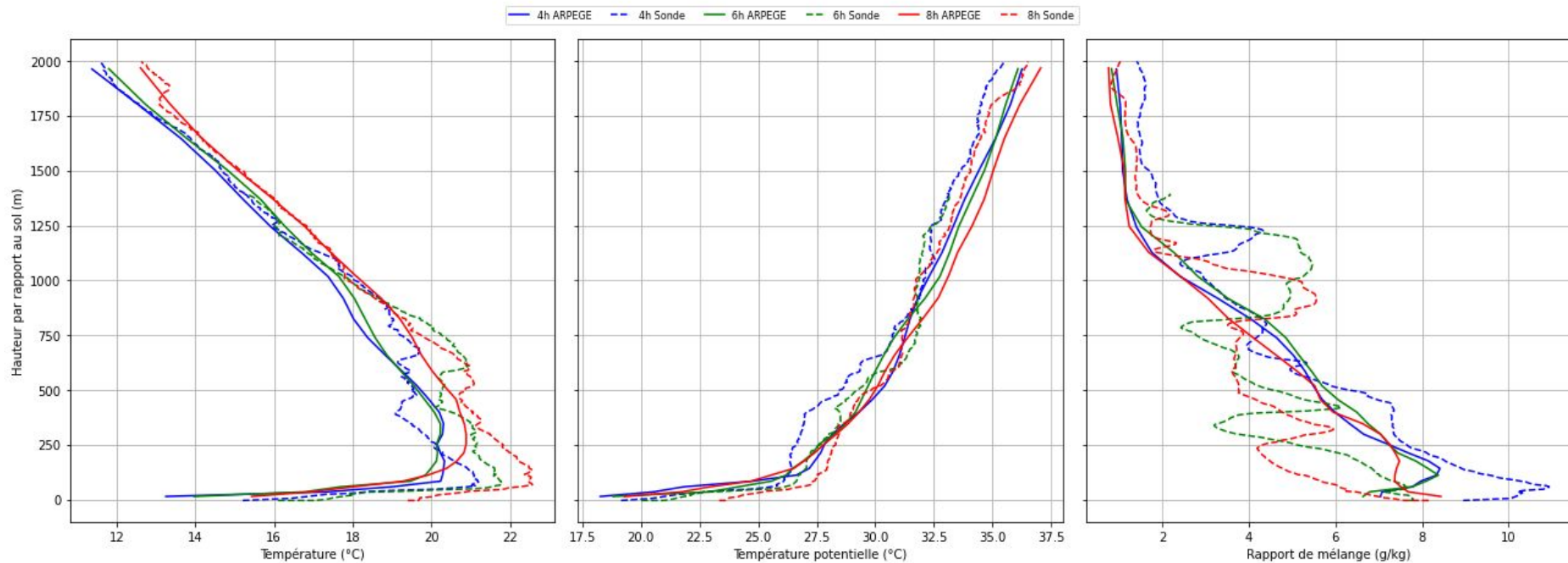
Annexe : ARPEGE

Profils ARPEGE 1600 vs sondes (heures UTC)



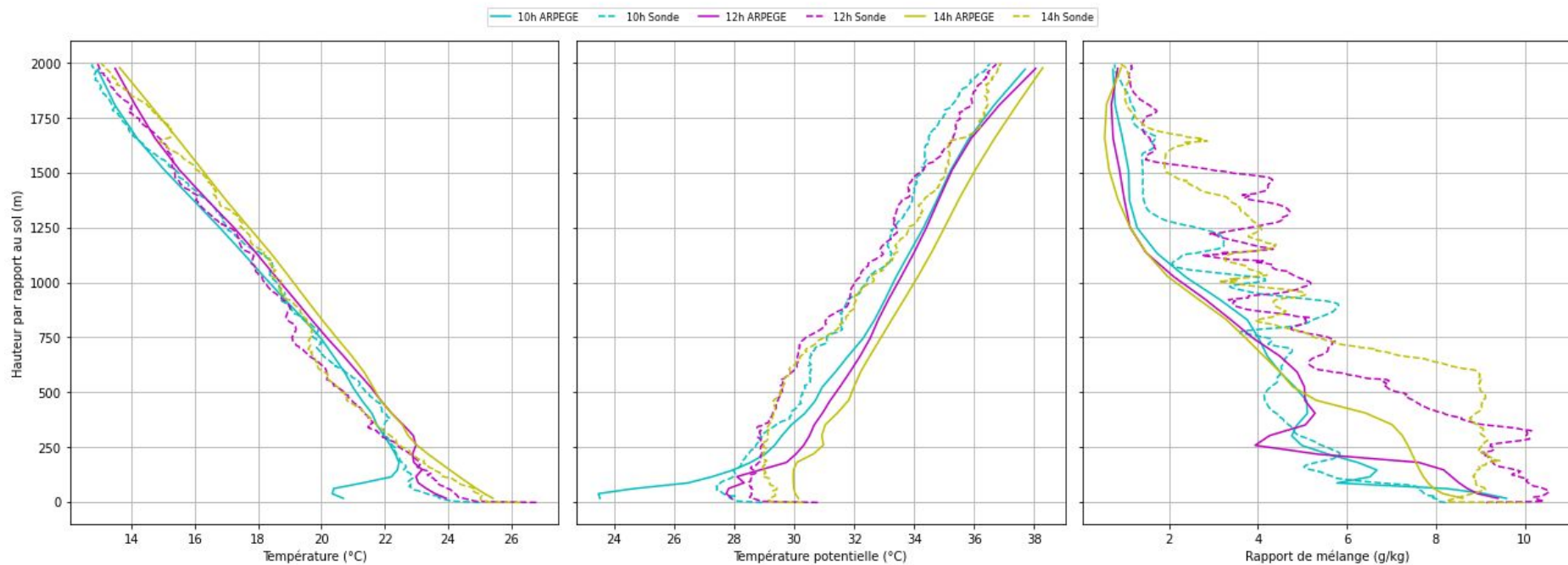
Annexe : ARPEGE

Profils ARPEGE 1612 vs sondes (heures UTC)



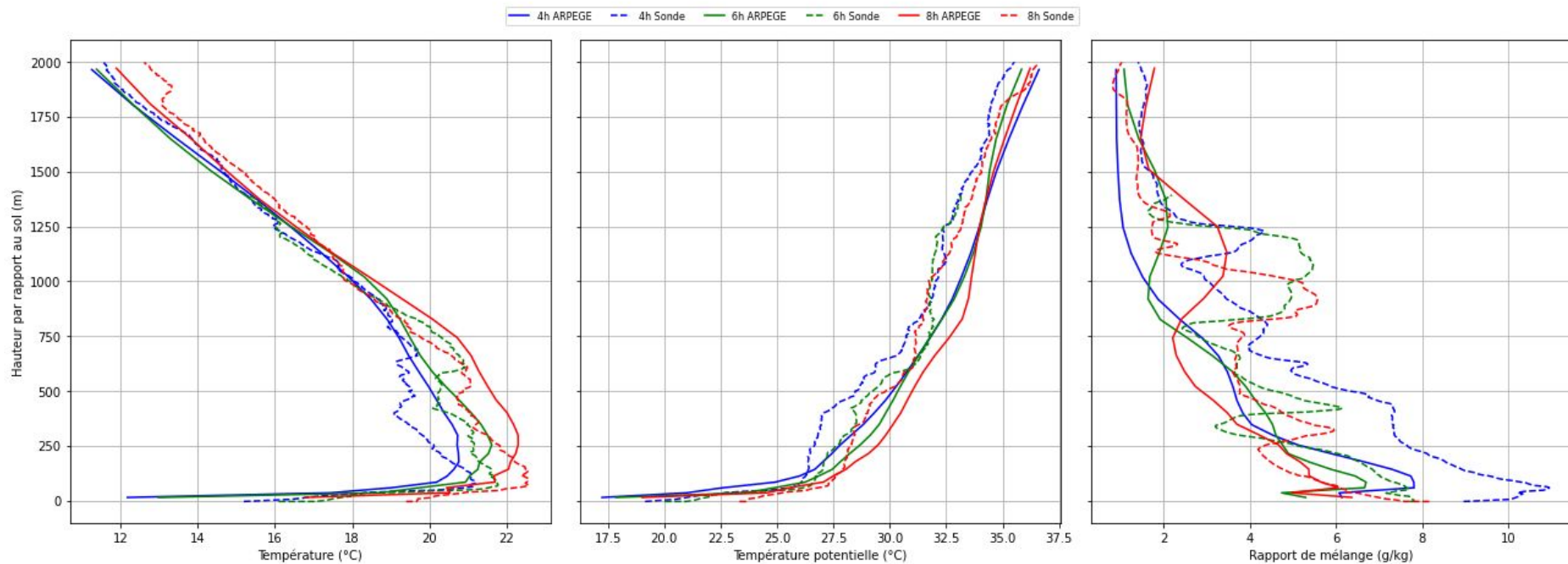
Annexe : ARPEGE

Profils ARPEGE 1612 vs sondes (heures UTC)



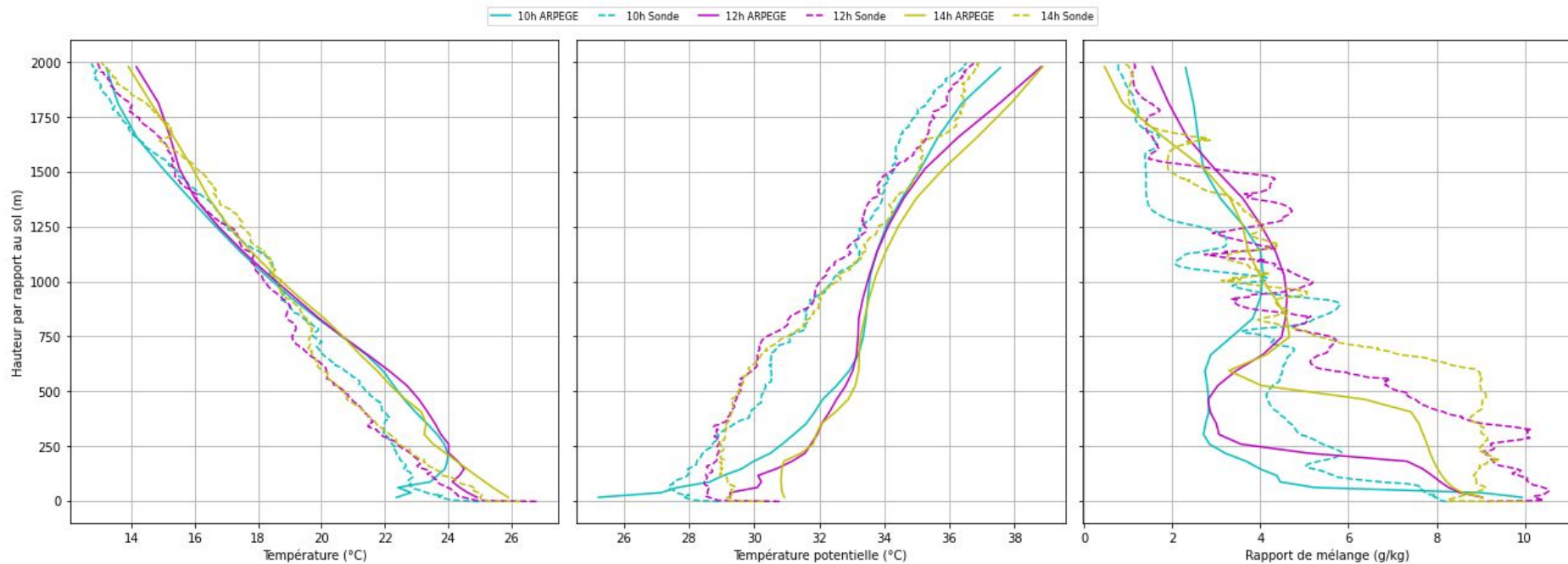
Annexe : ARPEGE

Profils ARPEGE 1700 vs sondes (heures UTC)



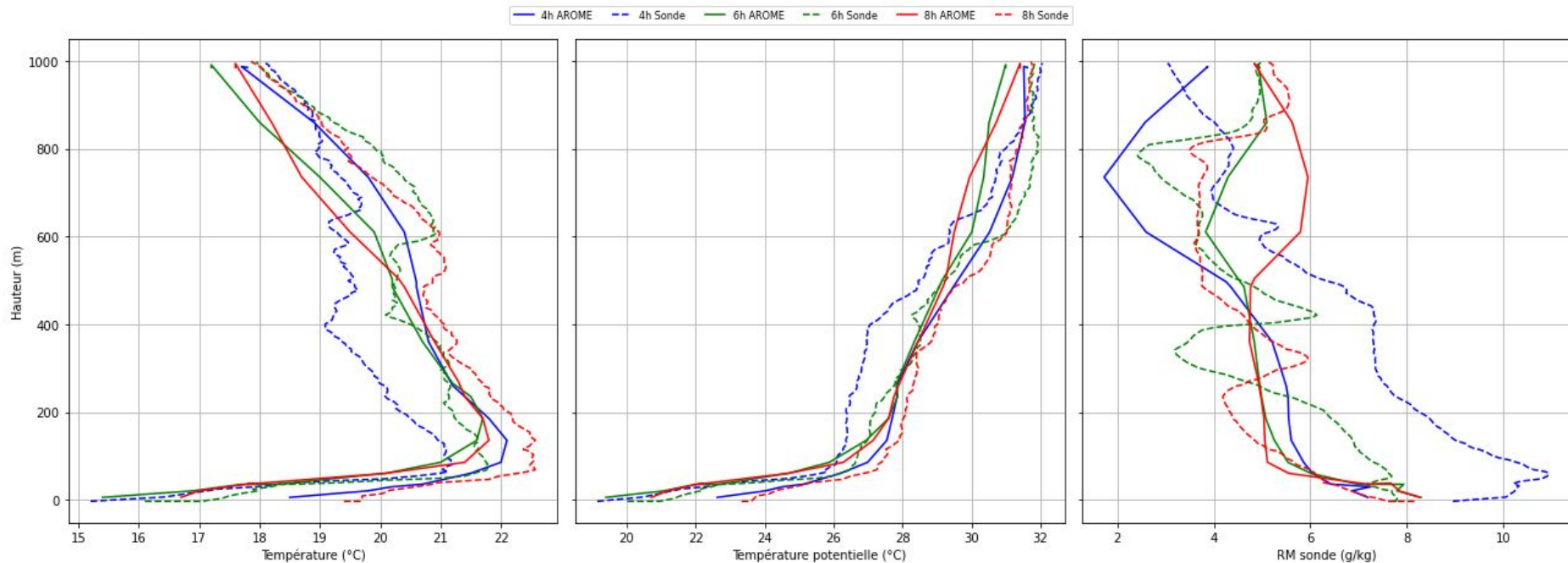
Annexe : ARPEGE

Profils ARPEGE 1700 vs sondes (heures UTC)



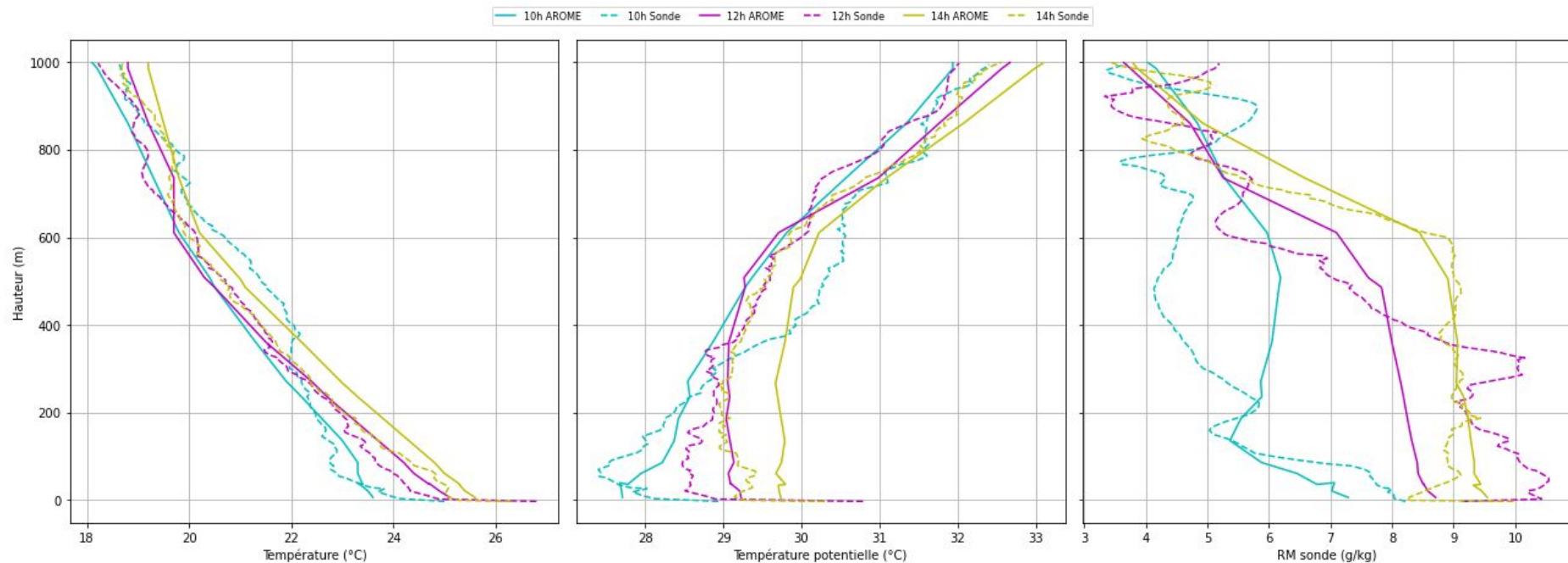
Annexe : AROME

Profils AROME run 202509170000 vs sondes (matin)



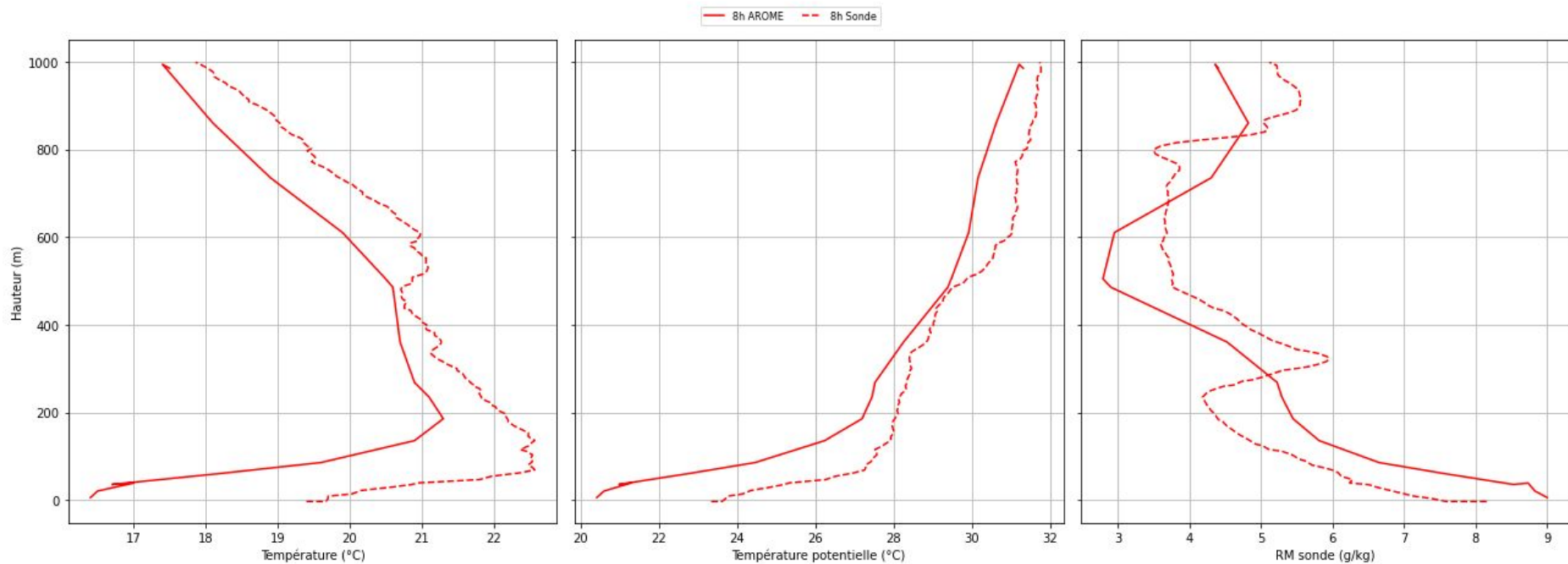
Annexe : AROME

Profils AROME run 202509170000 vs sondes (aprem)



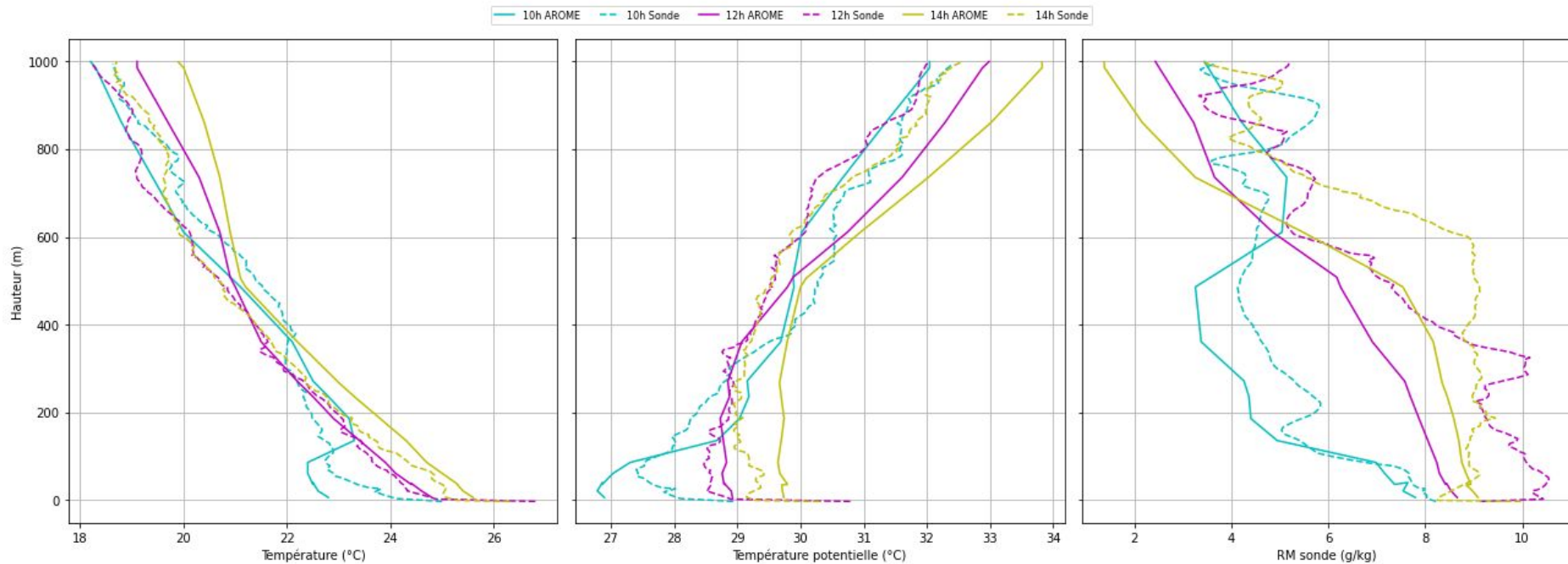
Annexe : AROME

Profils AROME run 202509170300 vs sondes (matin)



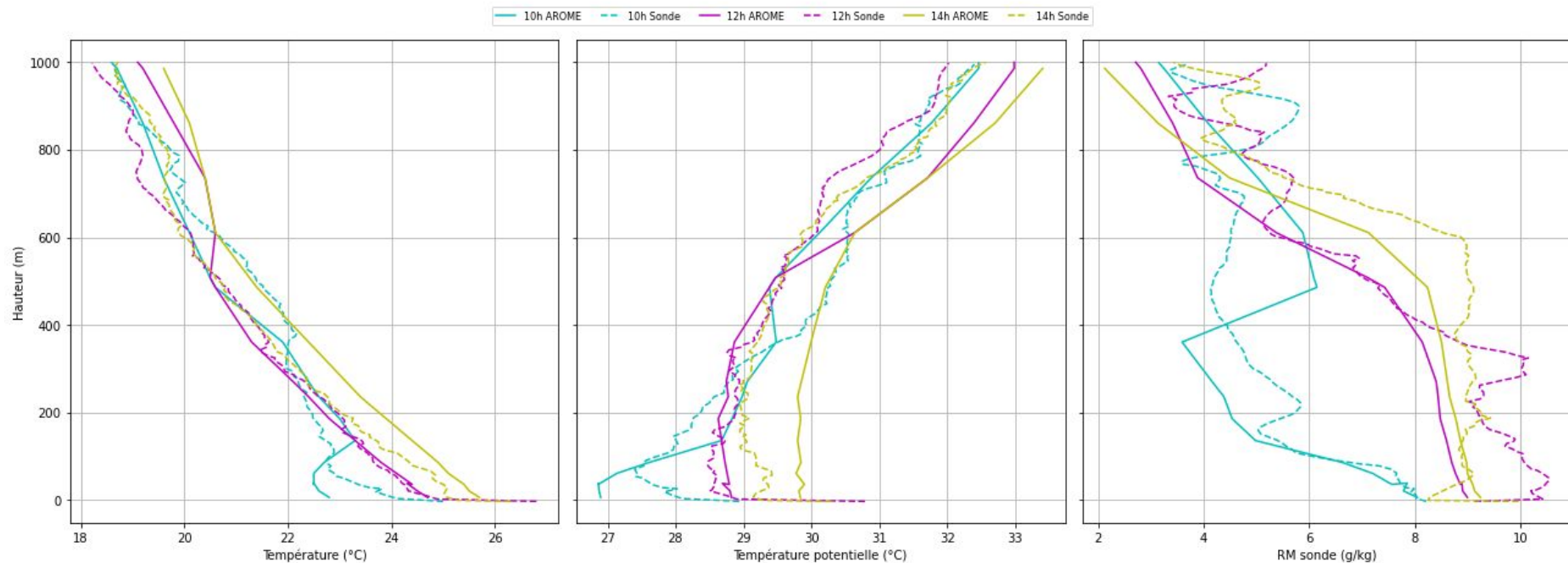
Annexe : AROME

Profils AROME run 202509170300 vs sondes (aprem)

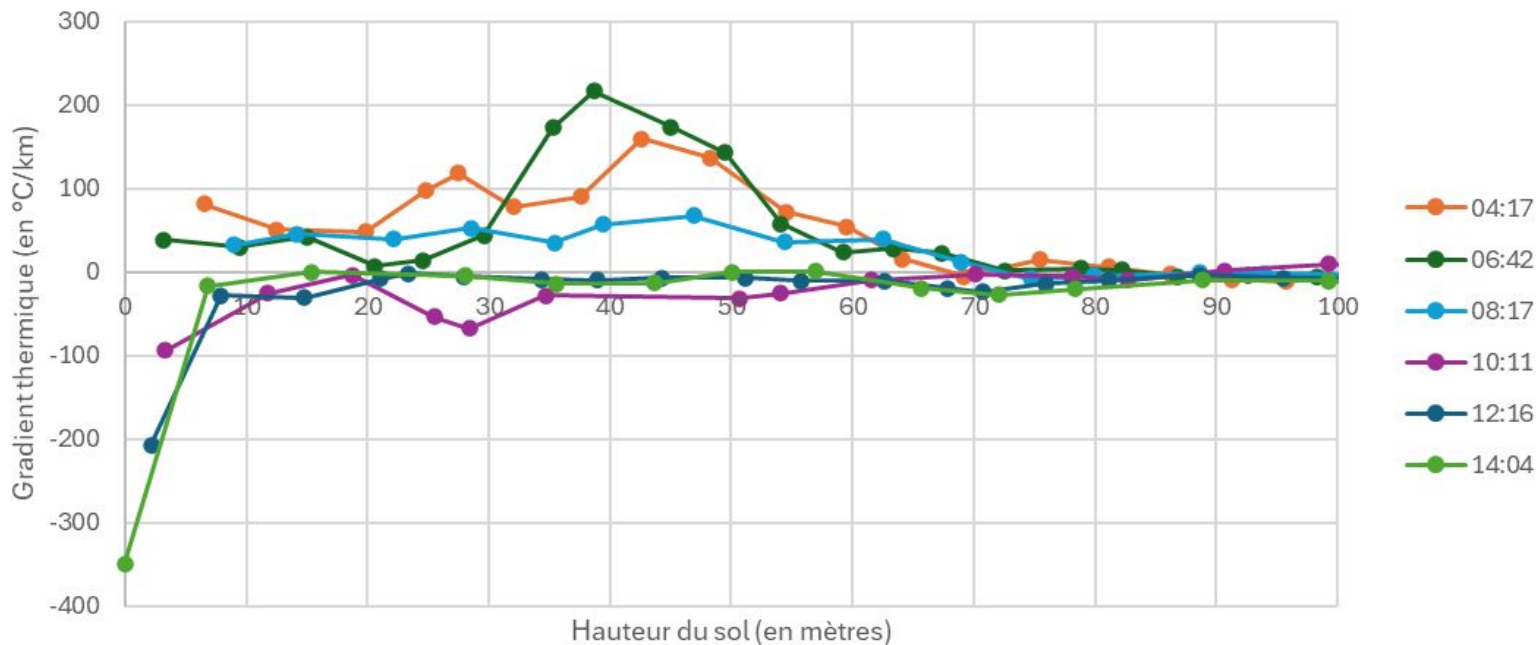


Annexe : AROME

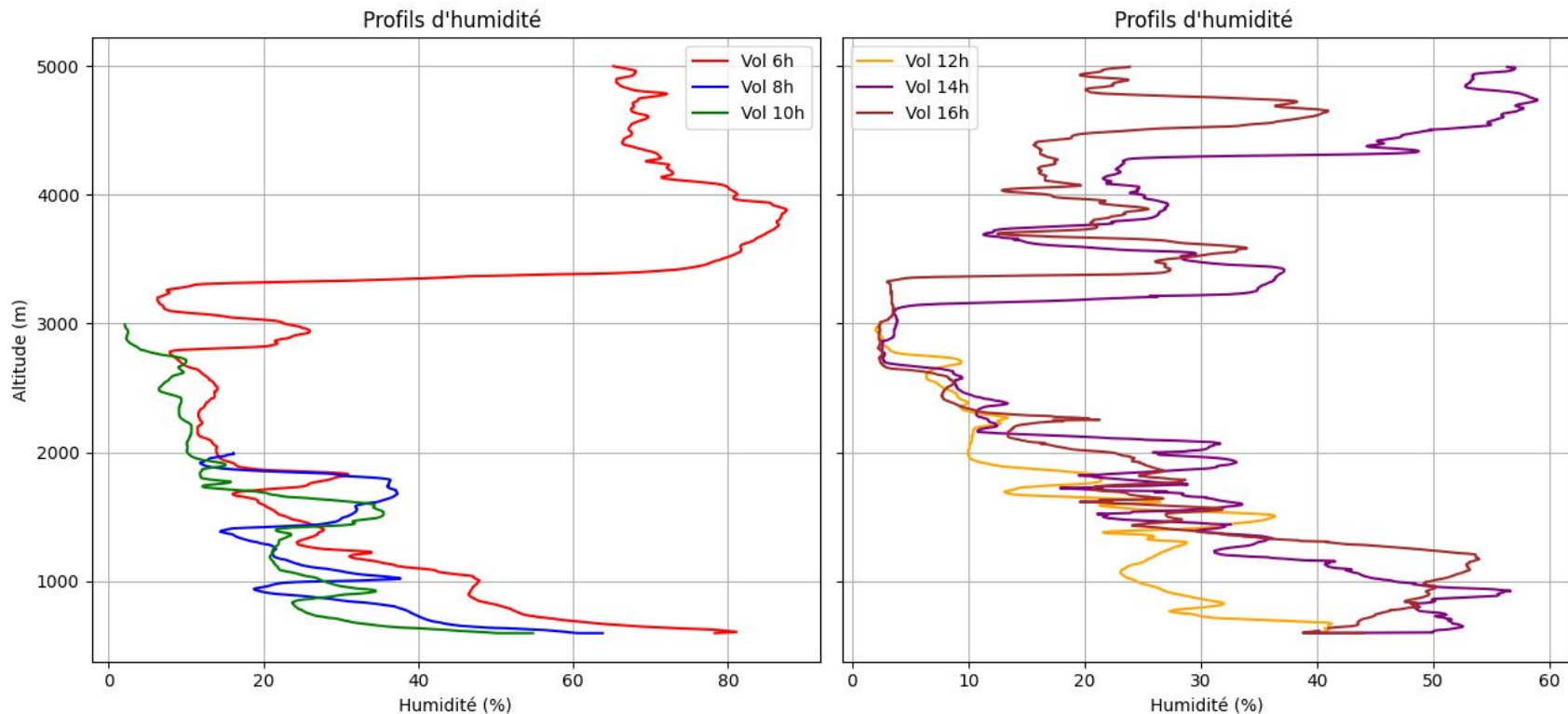
Profils AROME run 202509170600 vs sondes (aprem)



Annexe : Gradient des températures mesurées



Annexe : Observation des humidités mesurées



Annexe : Tour d'horizon station de Campistrous pour la journée du 17 septembre 2025

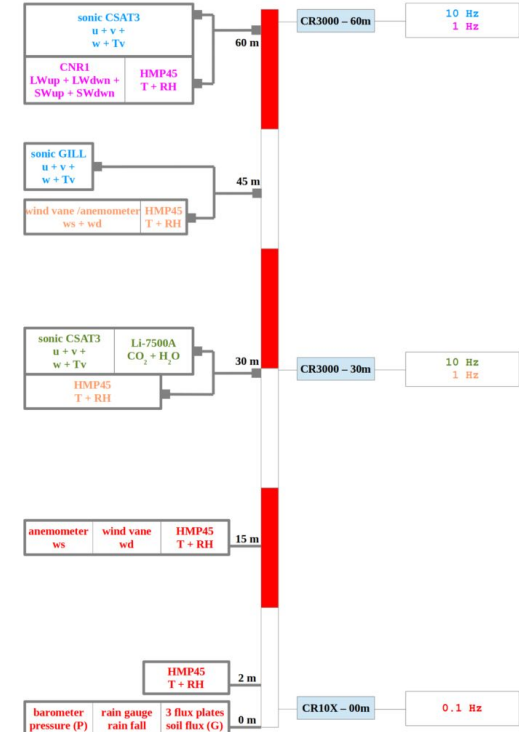
| CAMPISTROUS | T (°C): [13.3/27.0] | Td (°C): [9.9/15.6] | Vent |
|------------------|---------------------|---------------------|------|
| 2025 09 17 00:00 | 13.3 | 12.7 | ↖ |
| 2025 09 17 01:00 | 13.5 | 12.9 | ↘ |
| 2025 09 17 02:00 | 13.8 | 12.7 | ↘ |
| 2025 09 17 03:00 | 15.2 | 12.1 | ↓ |
| 2025 09 17 04:00 | 15.6 | 11.6 | ↓ |
| 2025 09 17 05:00 | 16.2 | 10.9 | ↓ |
| 2025 09 17 06:00 | 15.8 | 9.9 | ↓ |
| 2025 09 17 07:00 | 17.8 | 9.9 | ↓ |
| 2025 09 17 08:00 | 19.7 | 10.4 | ↓ |
| 2025 09 17 09:00 | 23.0 | 11.4 | ↓ |
| 2025 09 17 10:00 | 24.6 | 12.2 | ↓ |
| 2025 09 17 11:00 | 26.2 | 9.9 | ↖ |
| 2025 09 17 12:00 | 26.5 | 14.6 | ↖ |

| | | | |
|------------------|---------------------|---------------------|------|
| 2025 09 17 13:00 | 26.6 | 15.6 | ↖ |
| 2025 09 17 14:00 | 27.0 | 14.1 | ↖ |
| 2025 09 17 15:00 | 26.8 | 13.9 | ↖ |
| 2025 09 17 16:00 | 26.7 | 14.5 | ↖ |
| 2025 09 17 17:00 | 24.9 | 15.2 | ↖ |
| 2025 09 17 18:00 | 20.8 | 15.6 | ○ |
| 2025 09 17 19:00 | 17.9 | 14.4 | ↘ |
| 2025 09 17 20:00 | 19.1 | 13.7 | ↘ |
| 2025 09 17 21:00 | 18.7 | 12.9 | ↘ |
| 2025 09 17 22:00 | 18.8 | 12.1 | ↘ |
| 2025 09 17 23:00 | 17.8 | 11.6 | ↓ |
| 2025 09 18 00:00 | 18.2 | 10.8 | ↓ |
| CAMPISTROUS | T (°C): [13.3/27.0] | Td (°C): [9.9/15.6] | Vent |

Annexe : Équation du bilan d'énergie en surface

$$R_{net} = SW_d - SW_u + LW_d - LW_u$$

$$R_{net} = LE + SH + G \quad H = \alpha Z_i$$



Annexe : Instruments / CRA

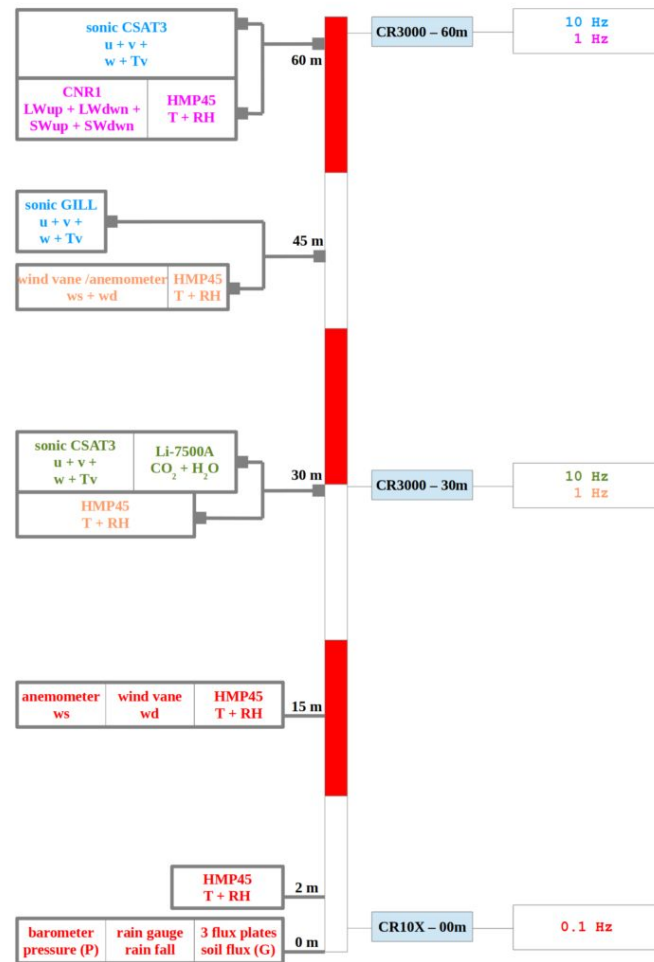
Mât de 60 mètres

Anémomètre sonique
et hygromètre



Mât permettant des :

- études de la turbulence dans la couche de surface
- mesures long-terme des flux d'énergie
- campagnes de validation d'autres instruments de mesure



Comparaison température potentielle

