

Quantifier les erreurs systématiques d'ARPEGE-Climat grâce à la modélisation à résolution kilométrique

Wahiba Lfarh¹, Romain Roehrig¹, Hannah Christensen²

¹*CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France*

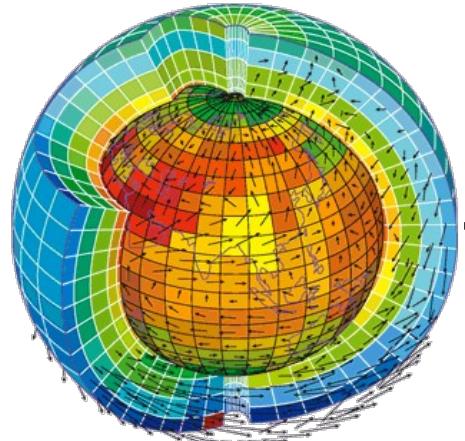
²*Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics, University of Oxford, UK*

Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère

Vendredi 21 mars 2025

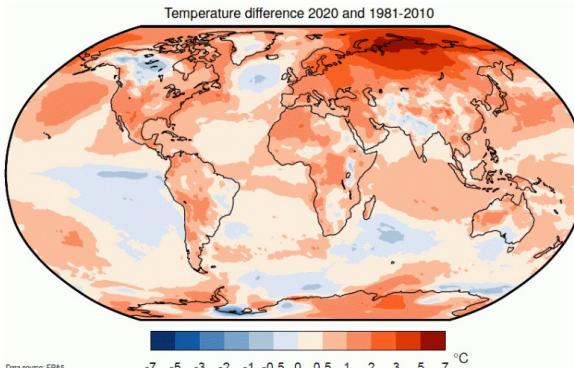


Modèle de Circulation Générale

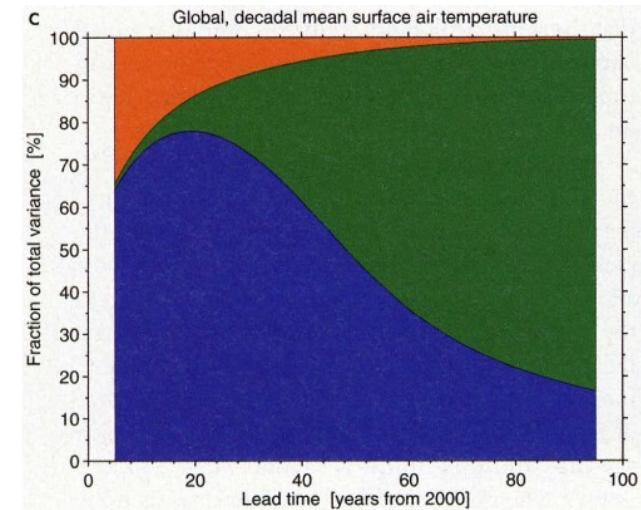


- Conditions initiales
- Résolution
- Paramétrisations

Projection climatique



Erreurs / Incertitudes



Hawkins & Sutton 2009

Sources d'erreurs/incertitudes dans les modèles de prévision de temps et climat :

- Approximations/simplification dans la conception des modèles (*Hawkins & Sutton 2009*)
- Représentation des processus non résolus (paramétrisations) (*Christensen 2019*)
- Conditions initiales / limites

Quantification des erreurs :

- Simulations 3D
 - Caractérisation/analyse des biais régionaux
- SCM/LES
 - Analyse des erreurs à l'échelle des processus physiques (*Couvreux et al., 2020*)



MUMIP : Model Uncertainty - Model Intercomparison Project

<https://mumip.web.ox.ac.uk/>

MU-MIP : Un projet international pour étudier les erreurs des modèles atmosphériques à l'échelle des paramétrisations physiques

- ◆ Pourquoi ?

Quantifier et analyser les erreurs systématiques et aléatoires dans les modèles à l'échelle des processus physiques, afin d'améliorer leur représentation et leur prise en compte dans les systèmes de modélisation

- ◆ Comment ?

Exploiter des simulations à résolution kilométrique pour forcer des versions uni-colonnes des modèles à convection paramétrée, via des approches de coarse-graining

5 modèles atmosphériques : ARPEGE-Climat, IFS, MetUM, GFS et RAP

- ◆ Qui ?

Soutenu par le WCRP et WWRP-PDEF
projet regroupe plusieurs universités/instituts : Oxford, Exeter, MetOffice, CEPMMT, Météo-France,...



Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand





Protocole du MUMIP

1 : Simulation à haute résolution

Modèle : Icon ($dx=2.5$ km)

Domaine : océan indien

Conditions initiales : CEPMMT

2 : Coarse-graining

Réduire la résolution en effectuant des moyennes spatio-temporelles sur les données à haute résolution, pour être adaptées à la grille du modèle à basse résolution (20 km)

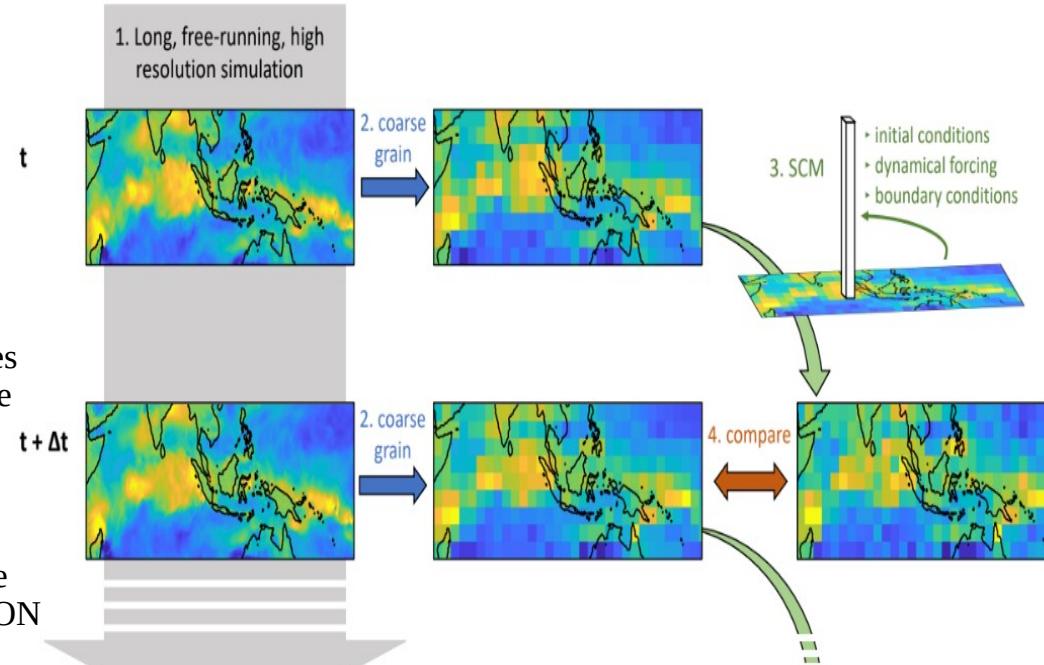
3 : Modèle uni-colonne (SCM)

Le SCM est initialisé et forcé par les champs issus de la simulation à haute résolution (coarse-grained). Le SCM reçoit les forçages dynamiques d'ICON qui permettent de cibler l'incertitude dans les paramétrisations

4 : Comparaison des résultats

Le SCM est comparé avec la simulation haute résolution

- Identifier des erreurs liées aux paramétrisations physiques
- Améliorer les paramétrisations



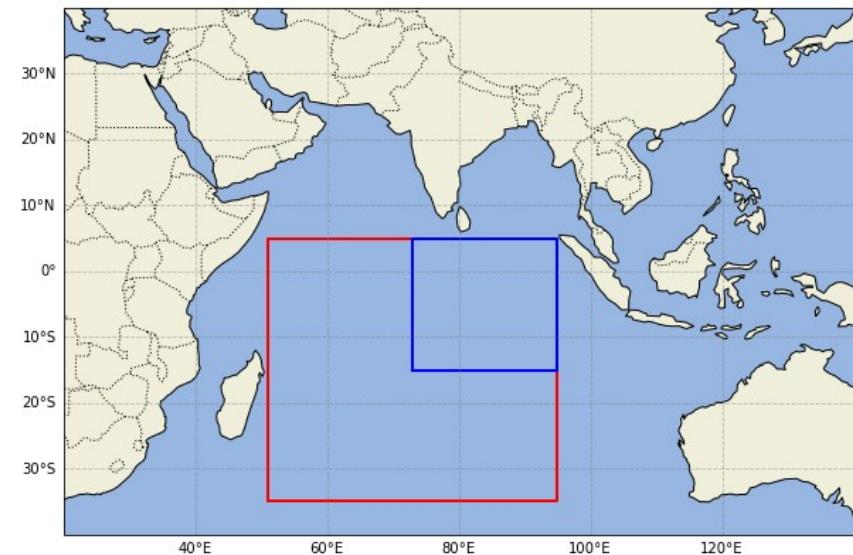
Christensen et al. 2018

ARPEGE-Climat (6.3) dans MU-MIP :

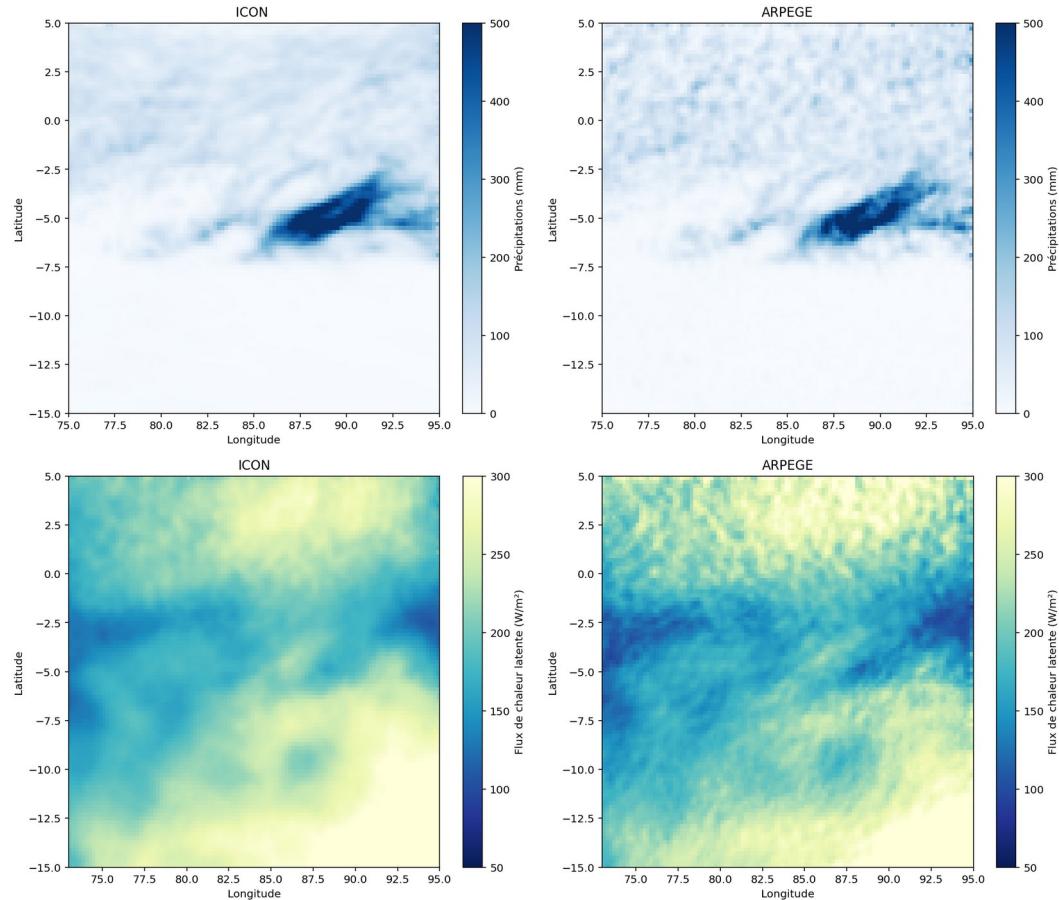
Objectif : Quantifier les différences systématiques liées à la convection dans les tropiques

Configuration SCM :

- **Résolution** : $dx = 20 \text{ km}$, $dt = 300\text{s}$
- **Domaine** : océan indien (200×220)
- **Période** : 11/08/2016 – 10/09/2016
- **Conditions initiales** : pression, vent, température, humidité
- **Conditions aux bords** : température de surface
- **Forçage** : pression, vent géostrophique, vitesse verticale, advections
- **Simulations** :
 - Une simulation est initialisée en chaque point toutes les 3h
 - Chaque simulation dure 6h → 44 000 simulations 1D → assemblage



Préparation des fichiers selon le format DEPHY

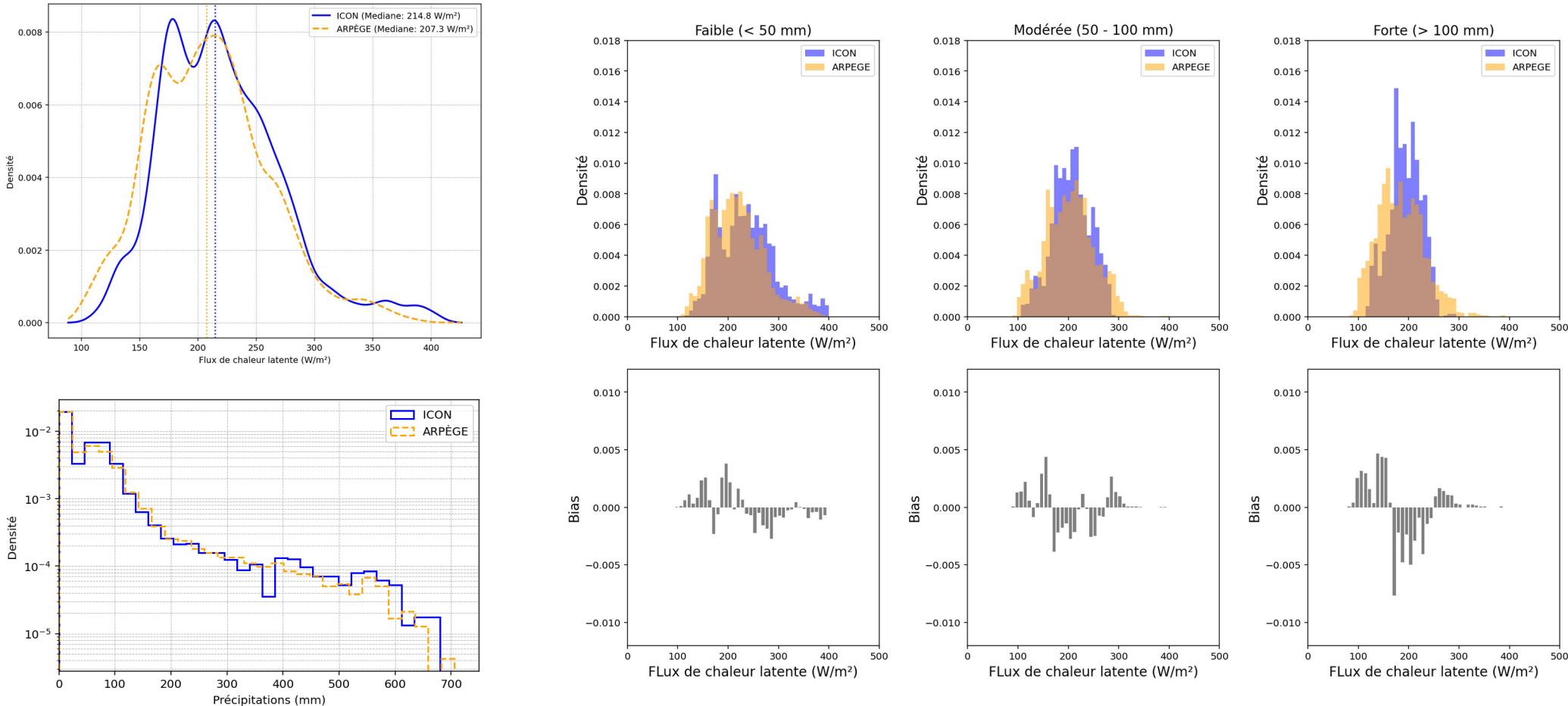


ARPEGE reproduit globalement bien les champs d'ICON

ICON : distribution plus lisse, avec des valeurs maximales plus marquées

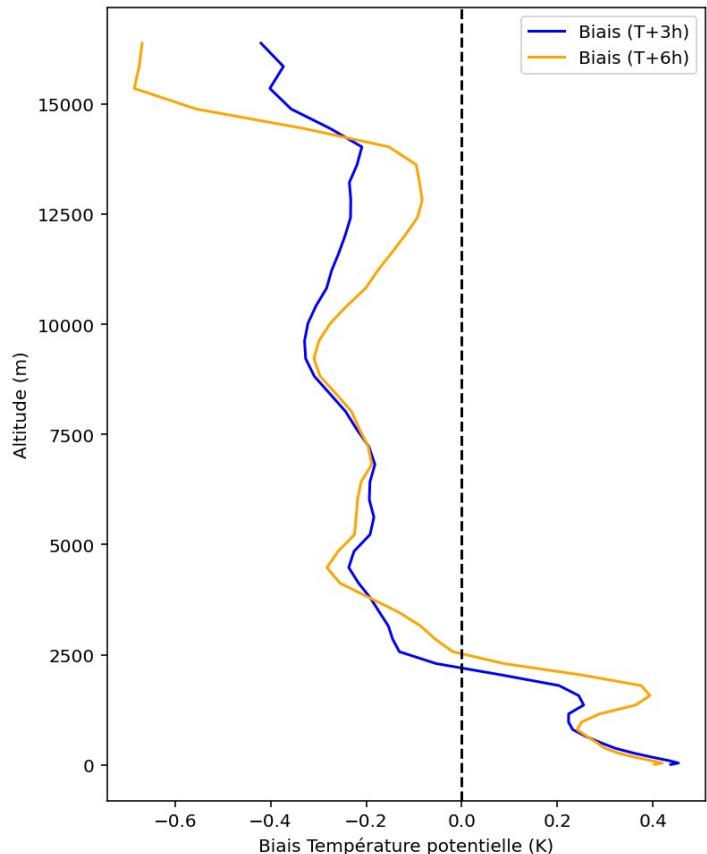
ARPEGE : distribution plus fragmentée et plus contrastée
→ colonnes indépendantes

→ Les deux modèles simulent des structures similaires, mais avec des différences notables en intensité et en variabilité spatiale

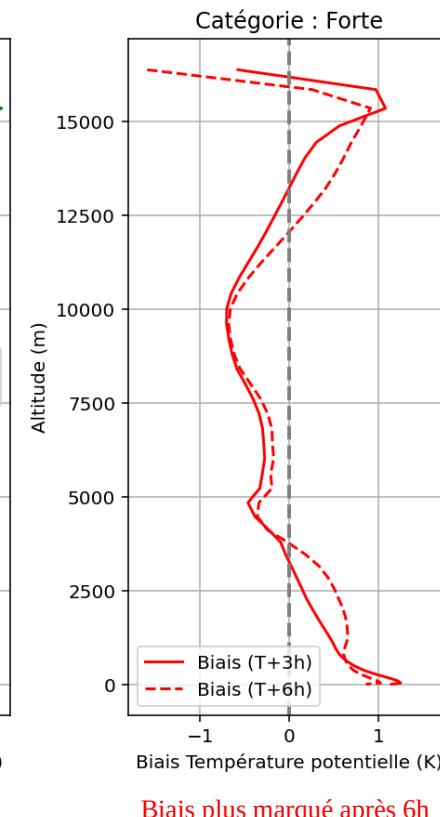
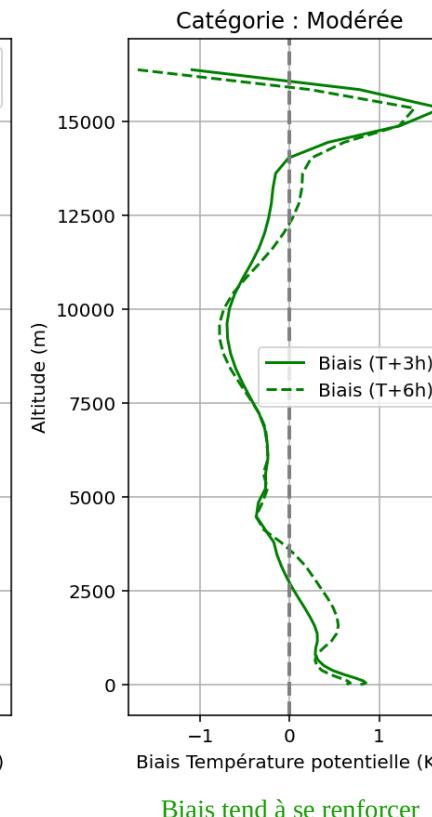
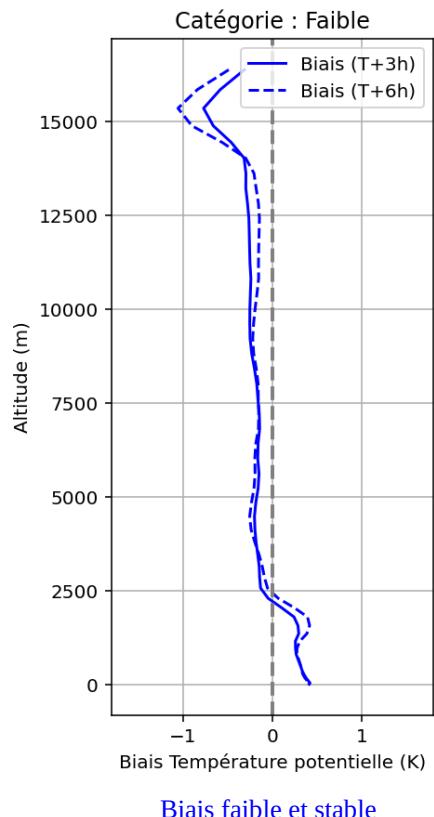


- Les différences entre ARPEGE et ICON augmentent avec l'intensité des précipitations
- ARPEGE sous-estime les valeurs élevées du flux de chaleur latente, en particulier lors de fortes précipitations

Biais moyen de température potentielle

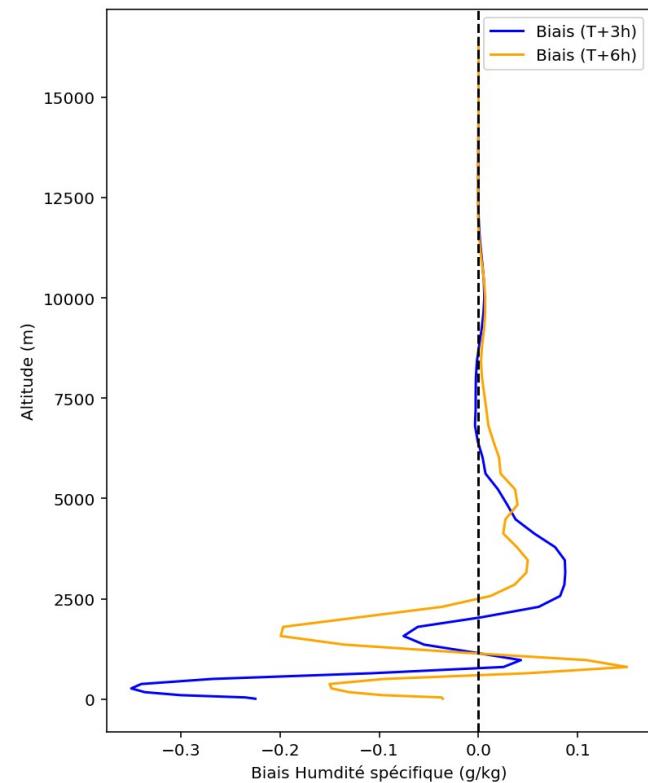
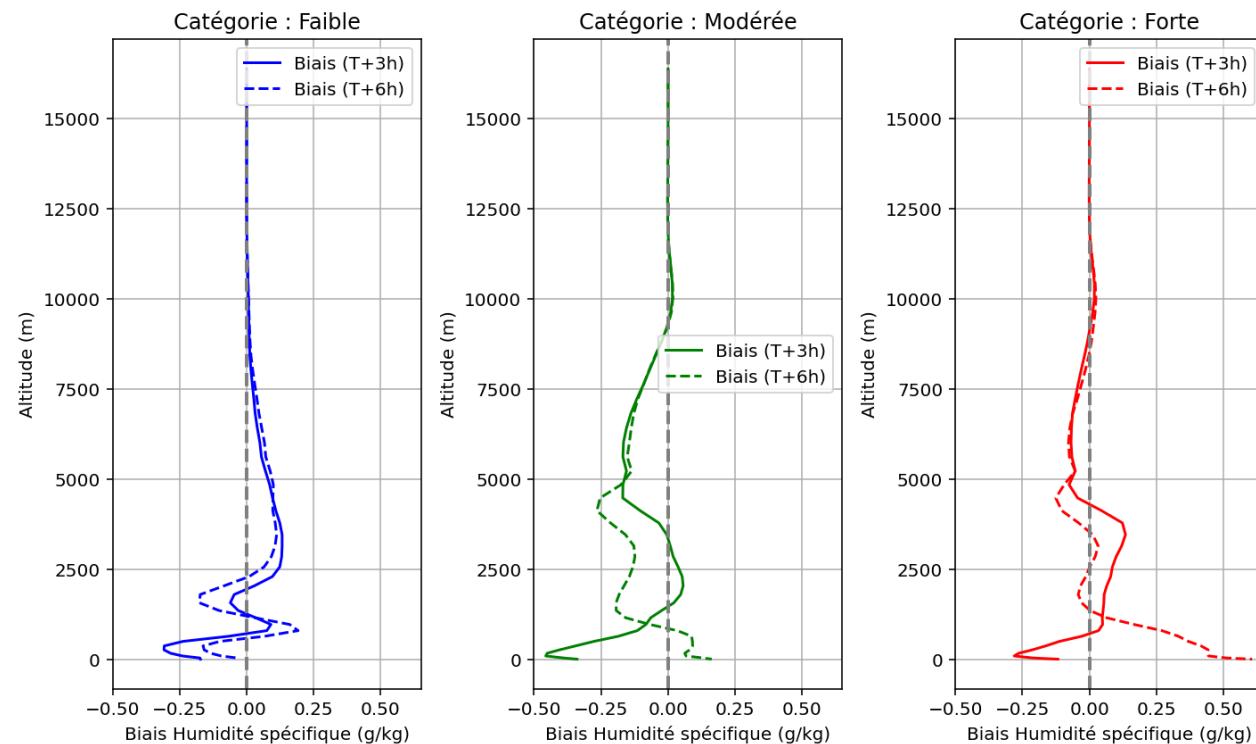


La température θ conditionnée aux précipitations

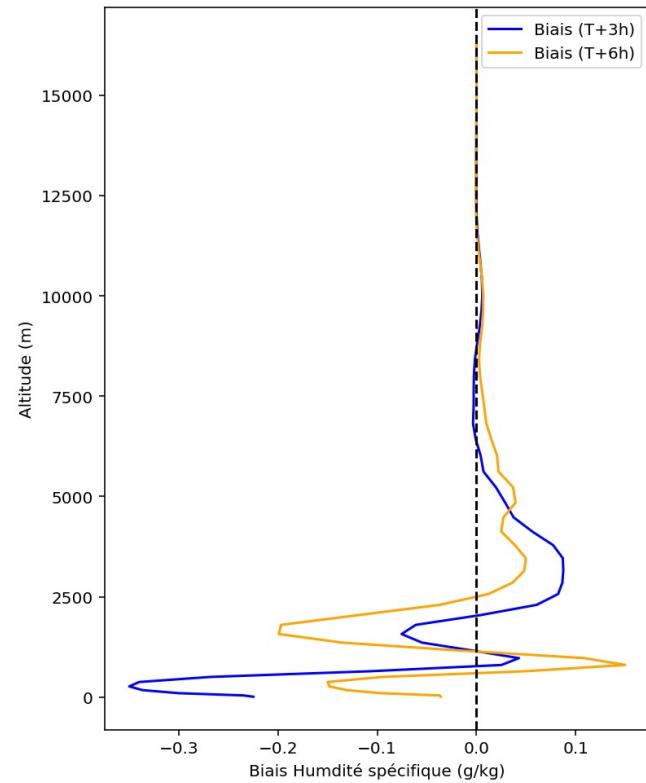


Bais plus marqué après 6h
→ effet spin-up marqué

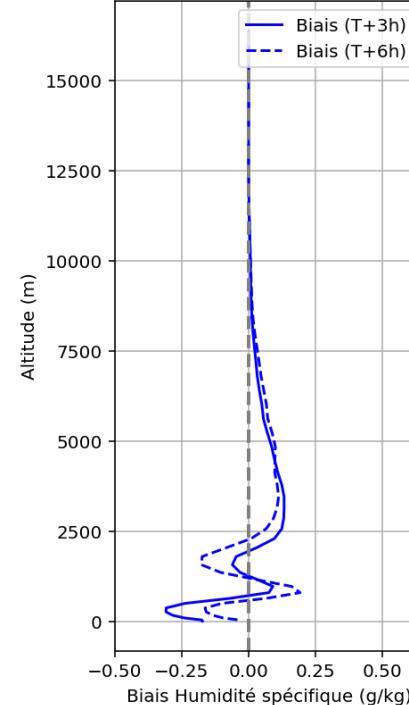
ARPEGE est plus chaud qu'ICON en basses couches, avec un biais stable entre 3h 6h
 - Au-dessous de 10 km : les différences restent faibles → stabilisation rapide
 - Au-dessus de 10 km : le biais évolue encore → ajustement progressif du modèle

Biais moyen d'humidité**L'humidité conditionnée aux précipitations**

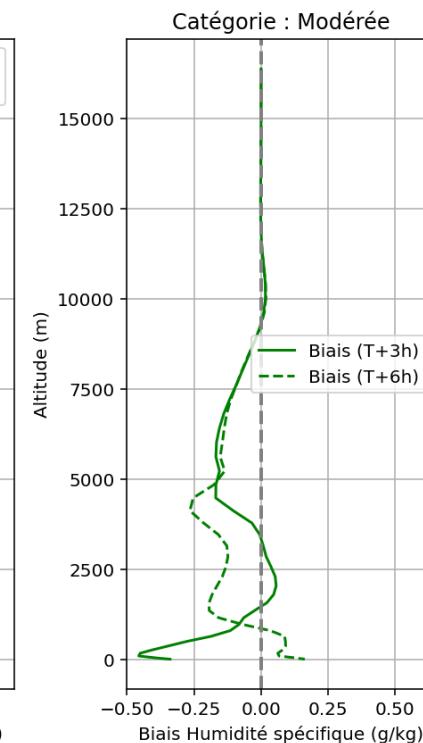
- Les 3 premières heures sont marquées par un fort spin-up → fort assèchement de la couche limite par ARPEGE
- Au bout de 6h, ARPEGE s'ajuste rapidement en évacuant l'humidité excédentaire pour retrouver son équilibre
- Au-dessus de 5 km, l'humidité évolue peu, suggérant que les ajustements se concentrent sur les basses couches

Biais moyen d'humidité**L'humidité conditionnée aux précipitations**

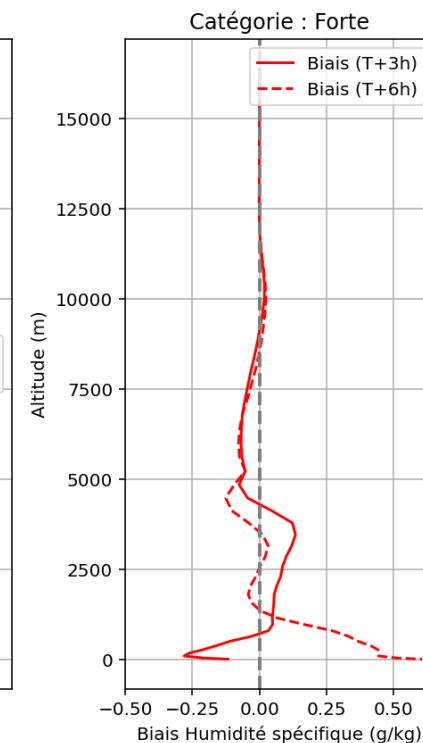
Catégorie : Faible



Catégorie : Modérée



Catégorie : Forte



- ARPEGE tend à stabiliser rapidement son biais après le spin-up initial, et l'humidité reste sous-estimée en basses couches
- Le spin-up initial provoque une forte évacuation de l'humidité, suivie d'une ré-humidification des basses couches après 6h
- ARPEGE passe par une phase d'assèchement rapide suivie d'une forte ré-humidification

Effet systématique du spin-up : dans toutes les catégories, ARPEGE commence par évacuer l'excès d'humidité dans la couche limite

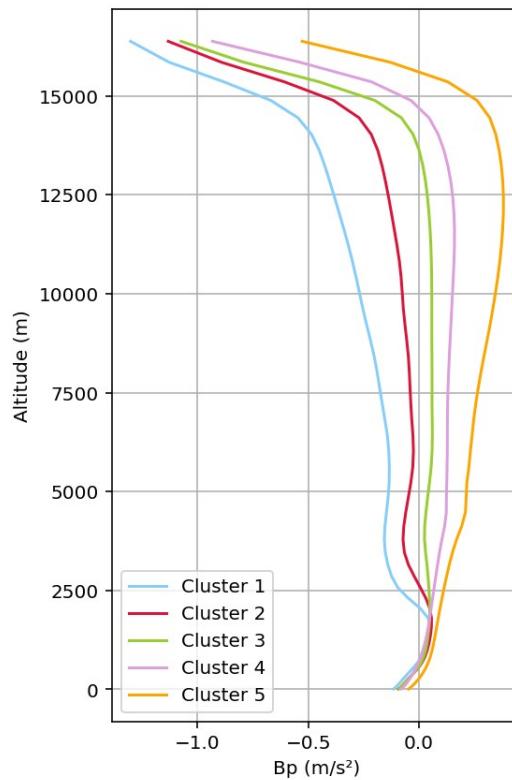
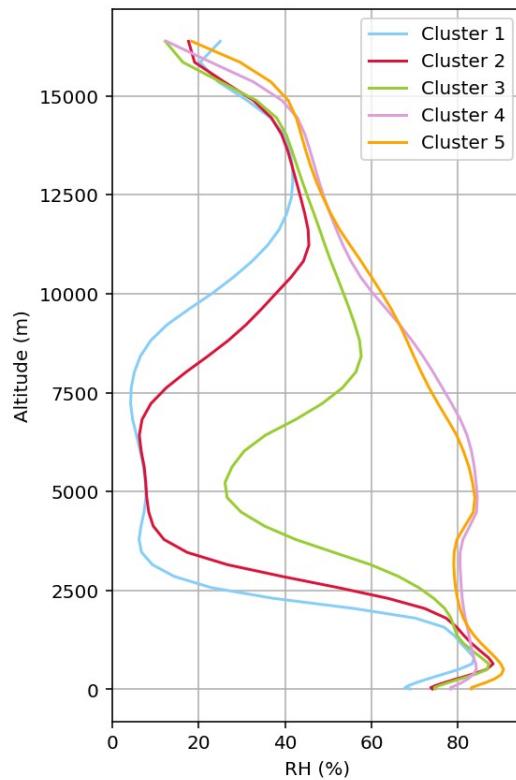
Ré-humidification : plus les précipitations sont intenses, plus l'humidité revient dans les basses couches après 3h (évaporation des précipitations)

Comment ces biais varient-ils en fonction des régimes atmosphériques ?

Identification des régimes atmosphériques avec K-means, en utilisant :

Humidité relative (RH)

Flottabilité (Bp)



Régimes secs et stables (clusters 1 & 2)

Régime neutre (cluster 3)

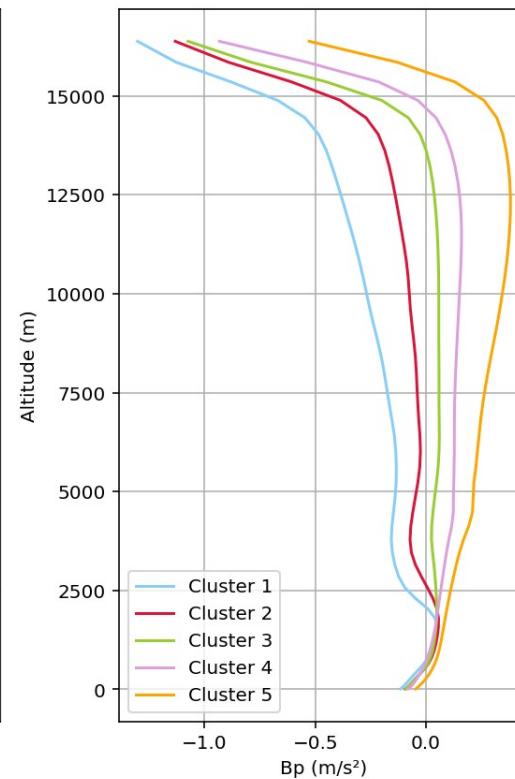
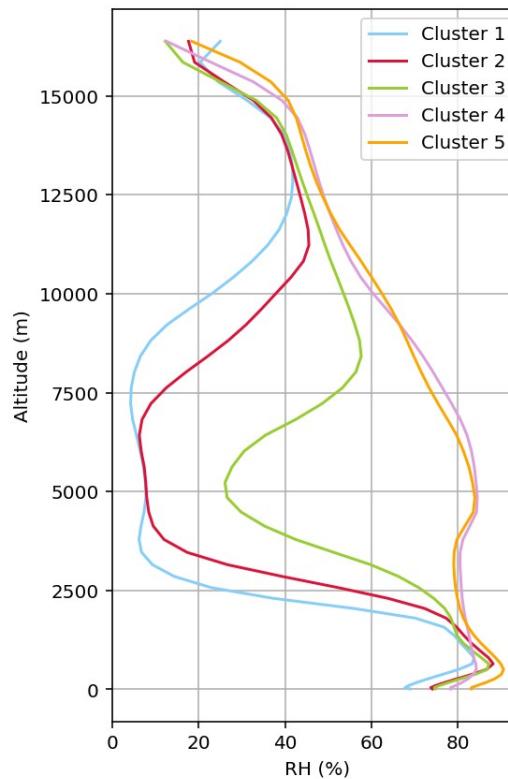
Régimes humides et instables (clusters 4 & 5)



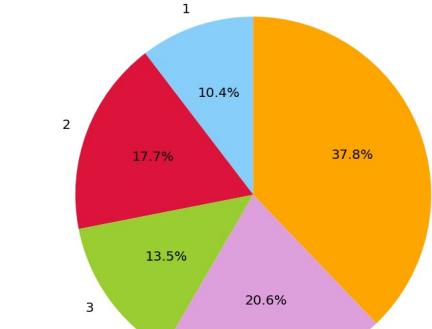
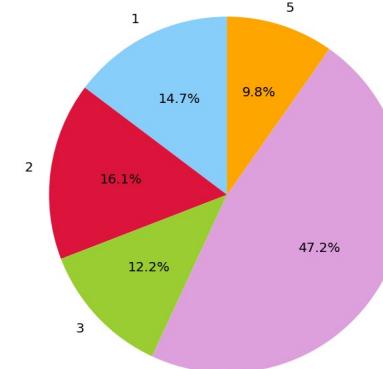
Identification des régimes atmosphériques avec K-means, en utilisant :

Humidité relative (RH)

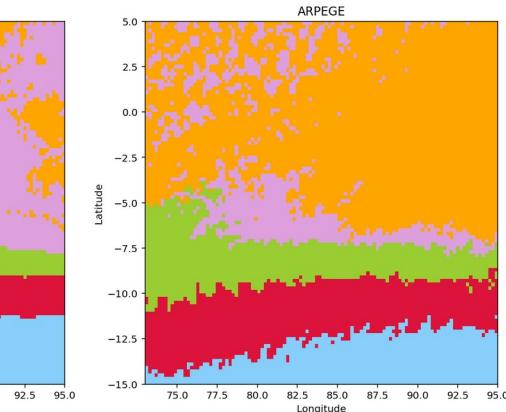
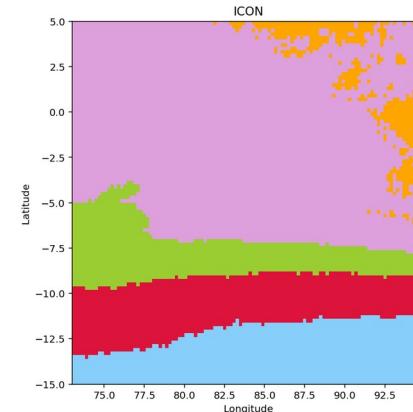
Flottabilité (Bp)



Occurrence des régimes dans ICON et ARPEGE



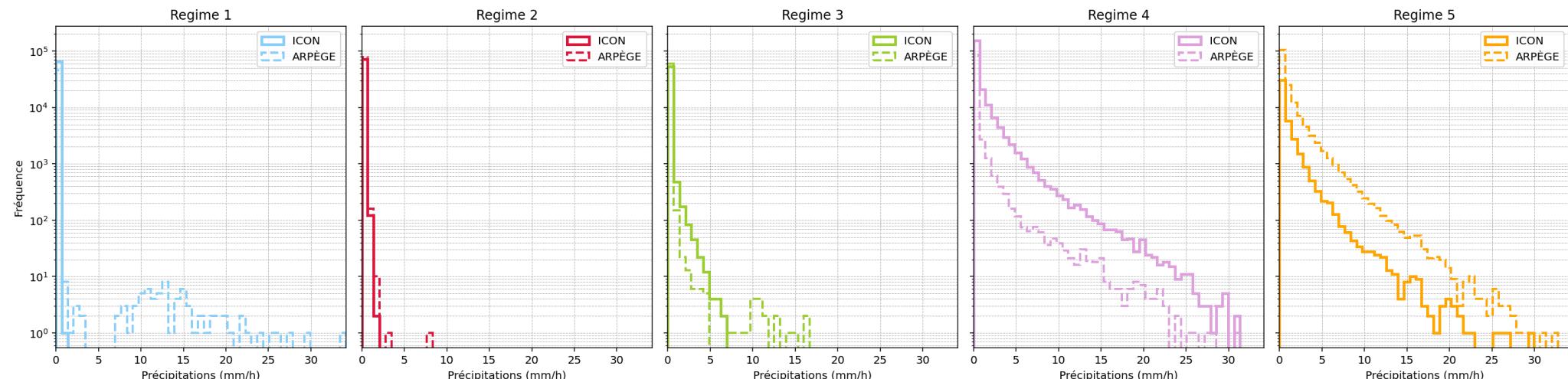
Distribution spatiale des régimes atmosphériques



Legend: Cluster 1 (light blue), Cluster 2 (red), Cluster 3 (green), Cluster 4 (purple), Cluster 5 (orange)

Régimes secs et stables (1 & 2) → fréquence similaire des occurrences
 Régimes humides et instables (4 & 5) → différences marquées

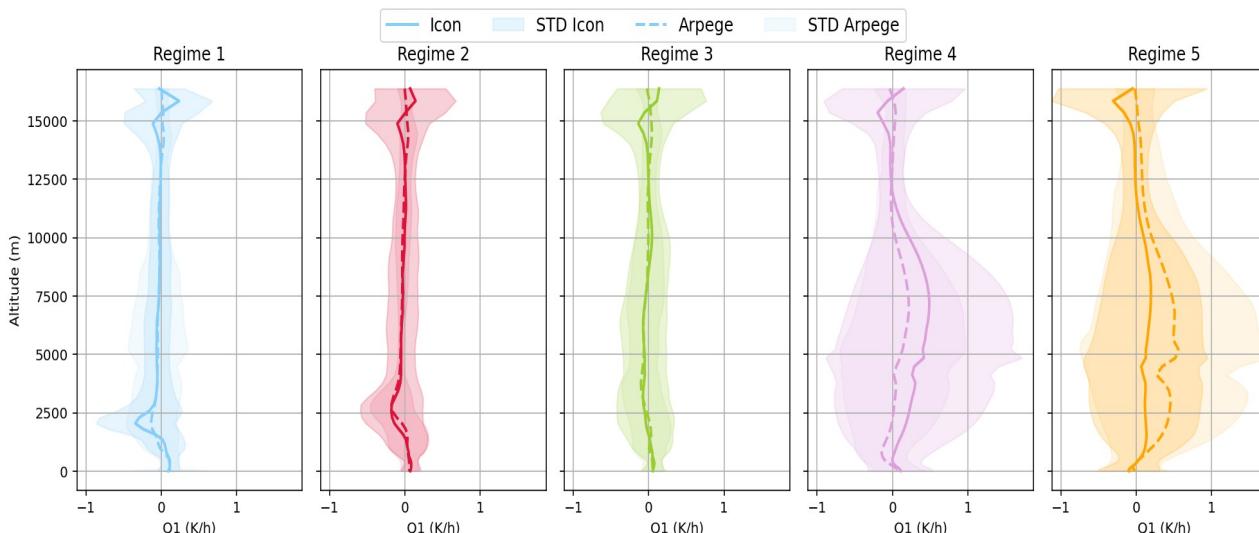
Distribution des taux de précipitations par régime atmosphérique



Différences significatives entre les régimes 1-4-5 :

- Quelques taux de précipitations élevés dans ARPEGE, non observés dans ICON
- Presque pas de précipitations
- Distribution similaire : régime plus stable ou faiblement convectif
- ICON a des taux de précipitations élevés plus fréquents
- ARPEGE présente des taux de précipitations élevés plus fréquents

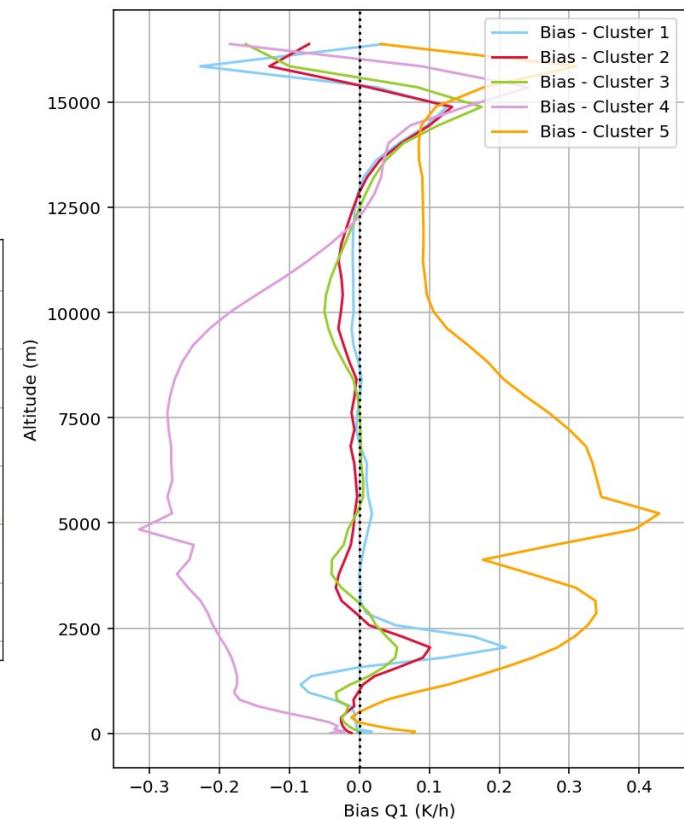
Composite du taux de chauffage Q1 par régime atmosphérique



Régimes 1-2-3 : Cohérence entre les modèles

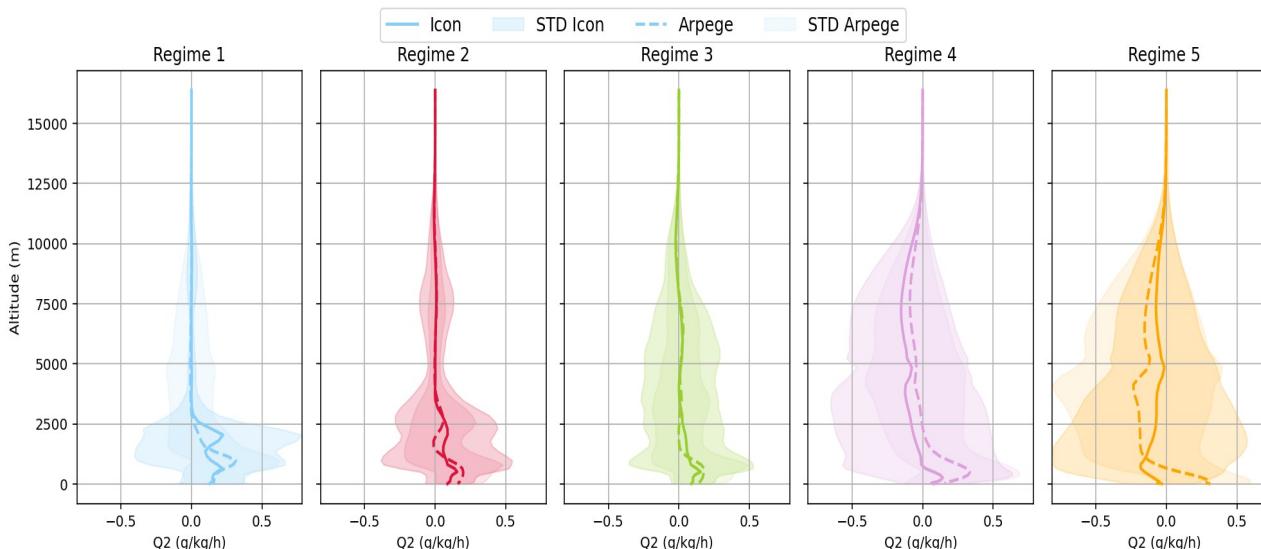
[Différence dans la manière de représenter la couche limite](#)

Régimes 4-5 : Forte variabilité dans la basse et moyenne troposphère
Divergence marquée entre les modèles



- Faible biais entre 3 et 10 km pour les régimes stables
→ Bon accord entre ICON et ARPEGE
- Biais important dans les régimes instables
→ Compensation entre le régime modérément et fortement instable

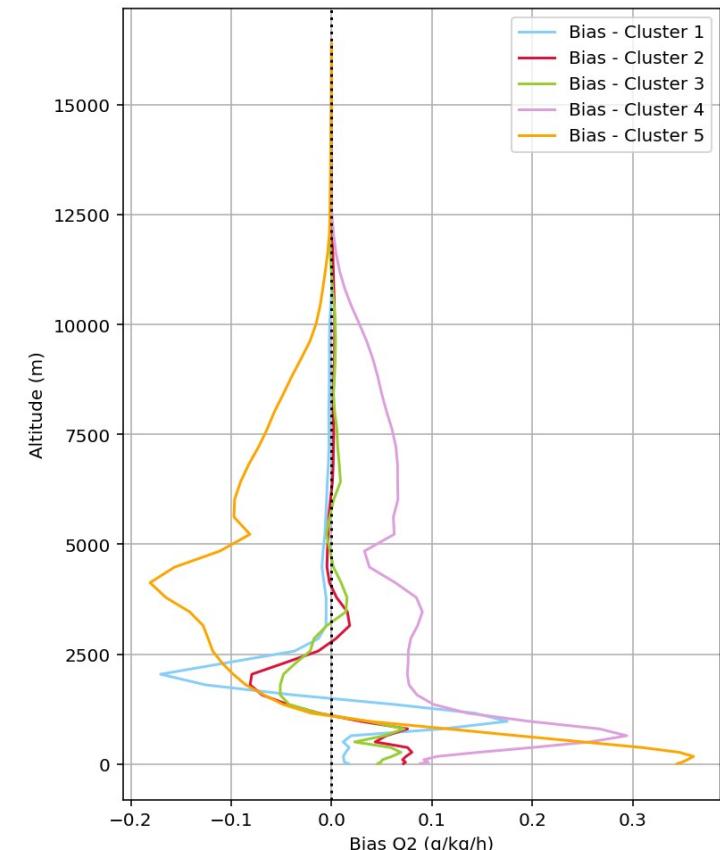
Composite des puits d'humidité Q2 par régime atmosphérique



Les régimes 1, 2 et 3 sont moins différents, sauf dans la couche limite

ARPEGE sèche moins qu'ICON dans la troposphère libre

ARPEGE sèche plus que ICON dans la troposphère libre



Conclusions

1 Globalement ARPEGE parvient à reproduire la simulation coarse-grained de référence

Les différences observées peuvent s'expliquer par :

- La différence de dimensionnalité (ARPÈGE en 1D et ICON en 3D)
- Les différences de paramétrisations physiques entre les deux modèles

2 L'influence du spin-up sur les différences entre les modèles

- Les différences entre ARPEGE et ICON sont particulièrement visibles en début de simulation
- ARPEGE a peut-être besoin d'un temps d'ajustement pour trouver son équilibre

3 La sensibilité des différences aux conditions atmosphériques

- Les différences entre les modèles varient en fonction du régime atmosphérique
- Plus l'environnement est instable et convectif, plus les différences entre ARPEGE et ICON sont marquées

Perspectives

Pouvons-nous calibrer ARPEGE pour imiter ICON ?

Sous-échantillonner un nombre représentatif de cas pour chaque régime

→ Quantifier les différences paramétriques et structurelles d'ARPEGE par rapport à ICON

Possibilité de dériver un nouvel ensemble de données de forçage avec la simulation AROME-Global DYAMOND2