

# Évaluation des prévisions météorologiques de rayonnement solaire pour la prévision d'énergie solaire

Marie-Adèle Magnaldo

Date de soutenance : 11 décembre 2023

**Équipe :**  
CNRM/GMME/PHY-NH

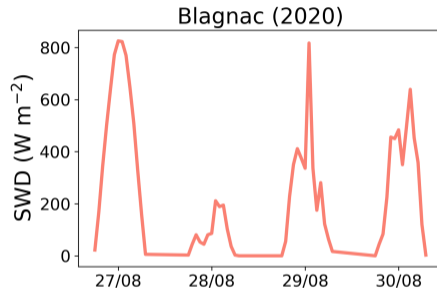
**Encadrement :**  
Quentin Libois, CNRM  
Sébastien Riette, CNRM  
Christine Lac, CNRM

# L'énergie solaire, un levier pour la transition énergétique

- Objectifs du Plan européen pour le climat :  
**45 % d'EnR dans la production électrique en 2030**
- **Forte croissance** du PV (IEA, 2019) : +25%  
en 2021 en France (RTE, 2021)

# L'énergie solaire, un levier pour la transition énergétique

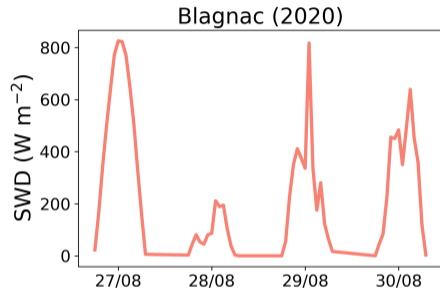
- Objectifs du Plan européen pour le climat :  
**45 % d'EnR dans la production électrique en 2030**
- **Forte croissance** du PV (IEA, 2019) : +25% en 2021 en France (RTE, 2021)
- **Forte variabilité du SWD** (flux de rayonnement descendant à la surface) surtout à causes des nuages (Widén et al., 2015), **météo-dépendant**



*SWD à Blagnac du 27/08 au 30/08/2020*

# L'énergie solaire, un levier pour la transition énergétique

- Objectifs du Plan européen pour le climat :  
**45 % d'EnR dans la production électrique en 2030**
- **Forte croissance** du PV (IEA, 2019) : +25% en 2021 en France (RTE, 2021)
- **Forte variabilité du SWD** (flux de rayonnement descendant à la surface) surtout à causes des nuages (Widén et al., 2015), **météo-dépendant**



SWD à Blagnac du 27/08 au 30/08/2020

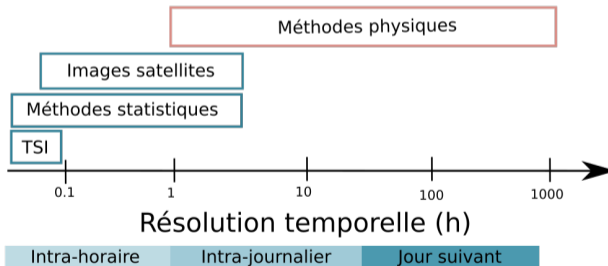
Besoin de prévoir le SWD à différentes échelles de temps

# Pourquoi prévoir l'énergie solaire à différentes échelles de temps ?

**1 h < t < quelques jours** : Engagement des unités

**Méthodes :**

- **Physiques** avec les **modèles de prévision numérique du temps (PNT)**



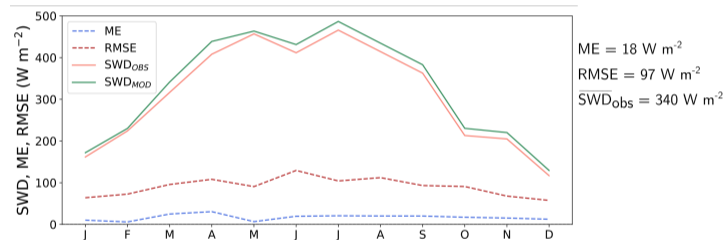
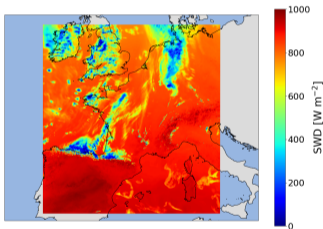
*Méthodes de prévision recommandées pour les énergies solaires selon les résolutions temporelles (Widén et al., 2015)*

# Erreurs significatives pour le SWD dans les modèles de PNT

**AROME 1.3 km, le modèle de PNT opérationnel français** (Seity et al., 2011; Brousseau et al., 2016) :

Sur l'année 2020

Domaine AROME



Biais (ME), RMSE et SWD mensuels sur l'année 2020 et sur 168 pyranomètres

Champ de SWD sur le domaine

AROME à 12 UTC le 01/08/2020

**Biais (ME)** : biais de SWD (erreurs systématiques)

**RMSE** : erreurs systématiques + erreurs non systématiques

**Écart-type des erreurs (SDE)** : erreurs non systématiques,

$$SDE^2 = RMSE^2 - ME^2$$

## Objectifs et approches

- Problématique des erreurs des modèles de PNT déjà relevée, mais concerne surtout **les modèles de climat** ou des **évaluations poussées sur des sites uniques**

### Objectif : Évaluer les prévisions de SWD d'AROME

#### Évaluation globale

- Sur un grand nombre de pyranomètres
- Sur une grande variété de situations météorologiques
- À l'aide d'une méthode générale, systématique et reproductible

#### Évaluation avancée

- Sur un site hautement instrumenté

# Plan

1. Introduction
2. Méthodes et données
3. Évaluation France
4. Évaluation SIRT
5. Conclusions et perspectives

# Plan

1. Introduction
2. Méthodes et données
3. Évaluation France
4. Évaluation SIRT
5. Conclusions et perspectives

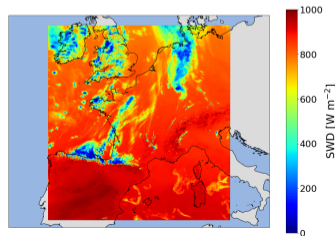
# Modèle de PNT étudié et prévisions évaluées

## Modèle : AROME

- 1.3 km de résolution horizontale et 90 niveaux verticaux
- Sortie toutes les heures
- Valeurs moyennes sur une heure

## Prévisions évaluées :

- Sur l'année 2020
- Prévisions 24h du réseau 00h



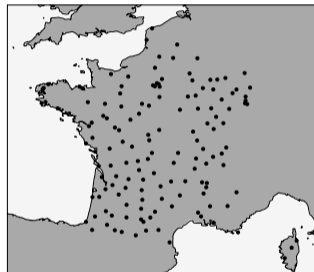
# Observations

## Mesures de SWD :

- 168 pyranomètres du réseau Météo-France
- Altitude < 1km + Classe environnementale satisfaisante
- Moyennes horaires de SWD (pas de mesure de SWD direct et/ou diffus)

## Observations relatives aux nuages :

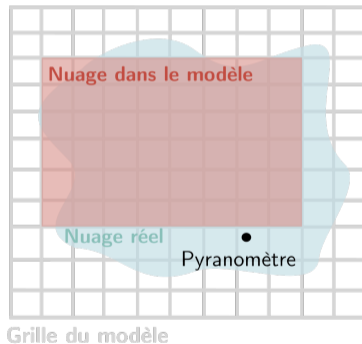
- Produits Eumetsat SAF NWC
- Satellite géostationnaire
- Résolution : tous les quarts d'heure et 5 km sur la France



*Localisation des 168 pyranomètres du réseau d'observations opérationnel de Météo-France*

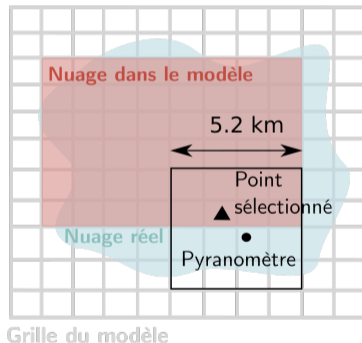
## Comparaison modèle - observations

- Modèles de PNT à haute résolution : **stratégie de voisinage spatial**, inspirée de Amodei and Stein (2009) and Stein and Stoop (2019)



## Comparaison modèle - observations









- Modèles de PNT à haute résolution : **stratégie de voisinage spatial**, inspirée de Amodei and Stein (2009) and Stein and Stoop (2019)



- Comparaison heure par heure
- Sélection des heures de jour

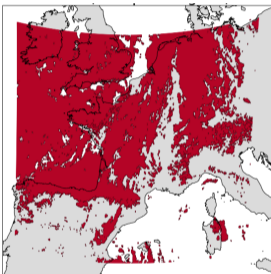
# Classification selon la présence de nuages

## Classification selon la présence de nuages (Tuononen et al., 2019)

	Modèle	Observations
Bonnes détections de nuages (Hit)		
Fausses alarmes (False alarm)		
Non-détections de nuages (Miss)		
Bonnes détections de ciels clairs (Correct negative)		

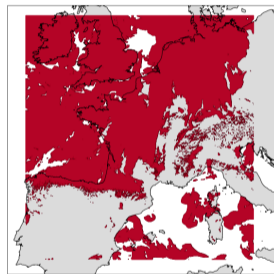
## Identification des ciels nuageux

**Dans les observations :** masque nuageux



*Exemple du produit de masque nuageux sur le domaine AROME (le 01/08/2020 à 12 UTC). Les nuages détectés sont en rouge.*

**Dans le modèle :** lorsque  $CF > 2\%$

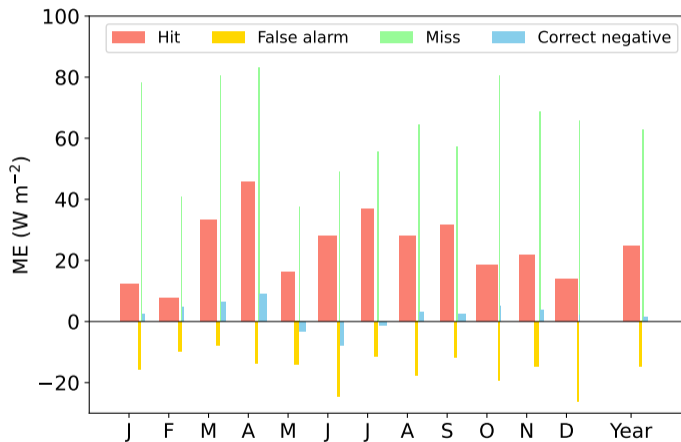


*Exemple de détection de ciels nuageux dans AROME (le 01/08/2020 à 12 UTC). Les nuages détectés sont en rouge.*

# Plan

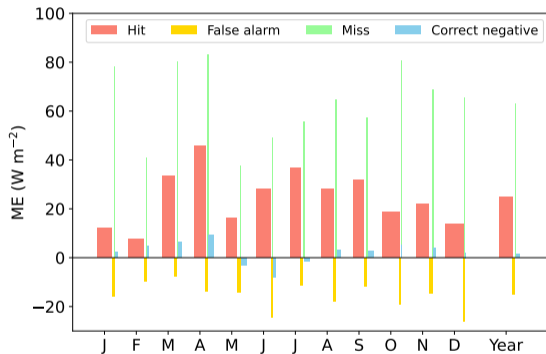
1. Introduction
2. Méthodes et données
3. Évaluation France
4. Évaluation SIRT
5. Conclusions et perspectives

# Attribution des erreurs de SWD à la présence de nuages



*Biais mensuels de SWD et fréquences relatives pour chaque classe de présence de nuages sur l'année 2020*

# Attribution des erreurs de SWD à la présence de nuages

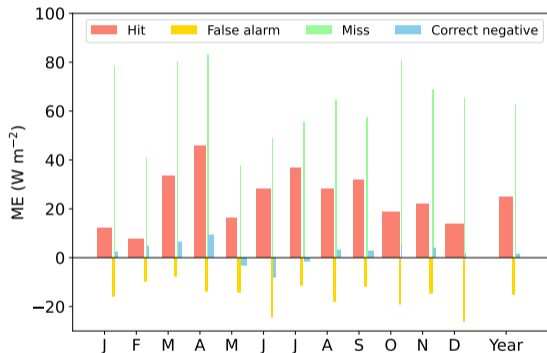


*Biais mensuels de SWD et fréquences relatives*

*pour chaque classe de présence de nuages sur l'année 2020*

- **Fausse alarmes** : Biais  $< 0$   
Faible fréquence (11 %)
- **Non-détections de nuages** : Biais  $> 0$   
Très faible fréquence (4 %)

# Attribution des erreurs de SWD à la présence de nuages



*Biais mensuels de SWD et fréquences relatives*

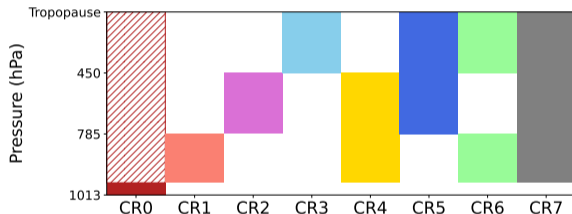
*pour chaque classe de présence de nuages sur l'année 2020*

- **Fausse alarmes** : Biais  $< 0$   
Faible fréquence (11 %)
- **Non-détections de nuages** : Biais  $> 0$   
Très faible fréquence (4 %)
- **Bonnes détections de ciel clair** :  
 $-10 \text{ W m}^{-2} < \text{Biais} < 10 \text{ W m}^{-2}$
- **Bonnes détections de nuages** :  
Biais =  $22 \text{ W m}^{-2}$ , forte fréquence (66 %)  
Écart-type des erreurs =  $110 \text{ W m}^{-2}$

Les erreurs ont majoritairement lieu en ciel nuageux

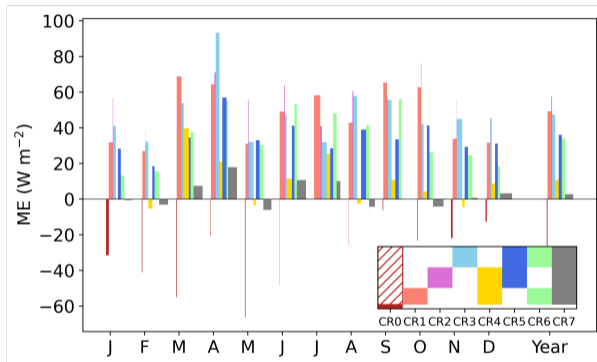
## Classification selon les régimes nuageux modélisés

**Classification selon les régimes nuageux (CR) modélisés, basée sur l'altitude des nuages, inspirée de Weverberg et al. (2018)**



- 7 CR basés sur une CF non nulle ( $CF > 2 \%$ ) dans trois régions verticales d'AROME.
- CR0 correspond aux brouillards lorsque  $q_{l,1^{er} \text{ niveau}} > 10^{-5} \text{ kg kg}^{-1}$ .

# Attribution des erreurs selon les régimes nuageux (CR) : tous ciels nuageux



Biais mensuels et fréquences relatives selon les CR sur l'année 2020

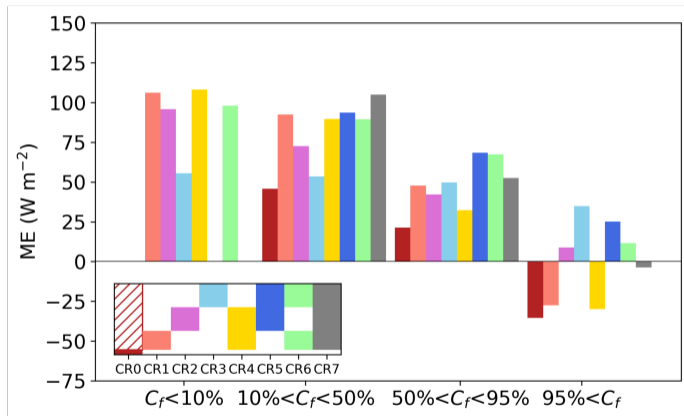
Biais  $> 0$  pour presque tous les CR

## Sources d'erreurs possibles :

- Sous-estimation de la fraction nuageuse CF (quantité de nuage dans une maille du modèle)
- Sous-estimation de l'épaisseur optique (propriétés physiques et optiques des nuages simulés)

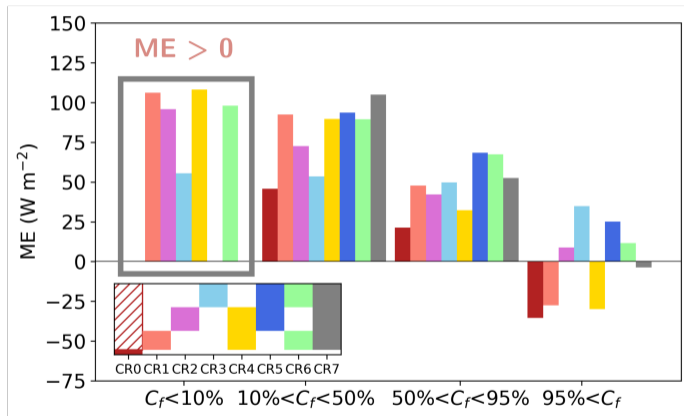
Problème : pas d'observations de CF fiable sur tout le domaine AROME

# Attribution des erreurs de SWD selon le régime nuageux : tous ciels nuageux



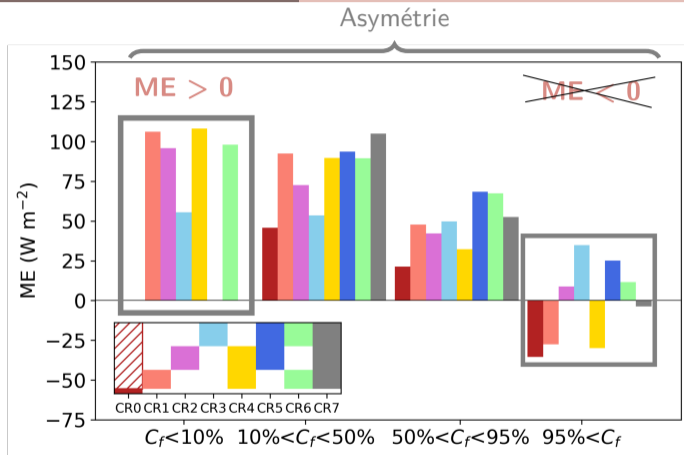
*Biais de SWD annuel pour différentes fractions nuageuses dans AROME*

# Attribution des erreurs de SWD selon le régime nuageux : tous ciels nuageux



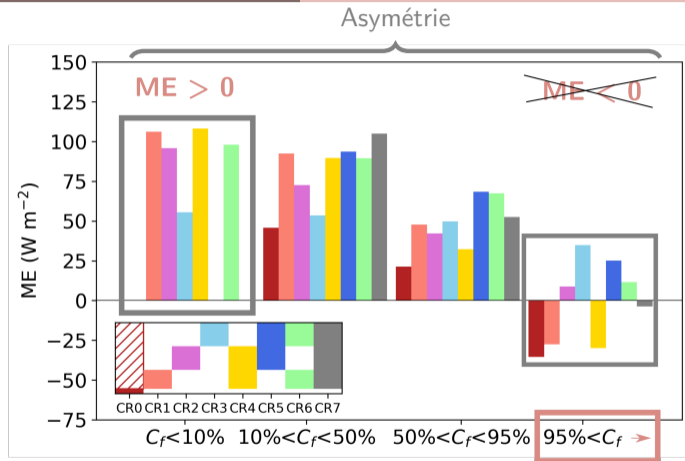
*Biais de SWD annuel pour différentes fractions nuageuses dans AROME*

# Attribution des erreurs de SWD selon le régime nuageux : tous ciels nuageux



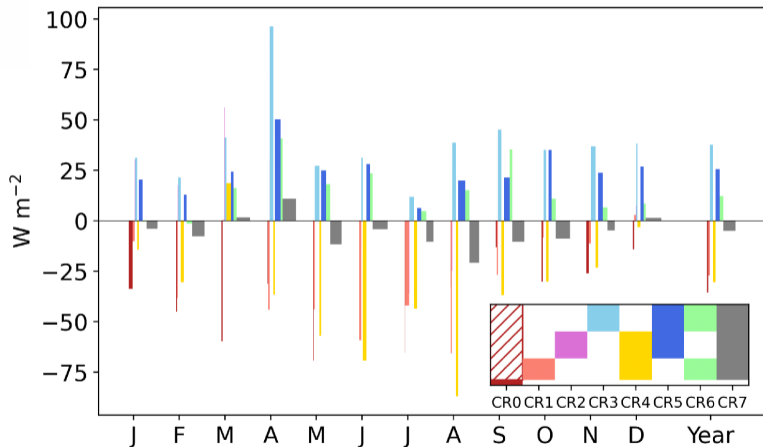
Biais de SWD annuel pour différentes fractions nuageuses dans AROME

# Attribution des erreurs de SWD selon le régime nuageux : tous ciels nuageux



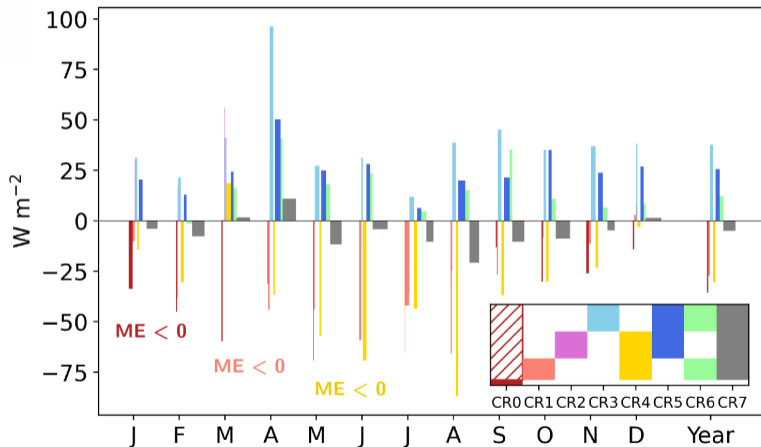
Biais de SWD annuel pour différentes fractions nuageuses dans AROME

# Attribution des erreurs de SWD selon le régime nuageux : en ciel couvert



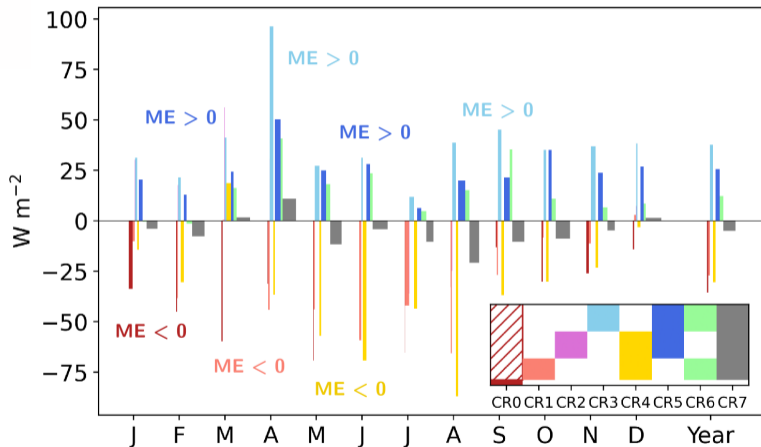
*Biais mensuel et fréquence relative selon les CR sur l'année 2020 en situation de ciel couvert dans le modèle*

# Attribution des erreurs de SWD selon le régime nuageux : en ciel couvert



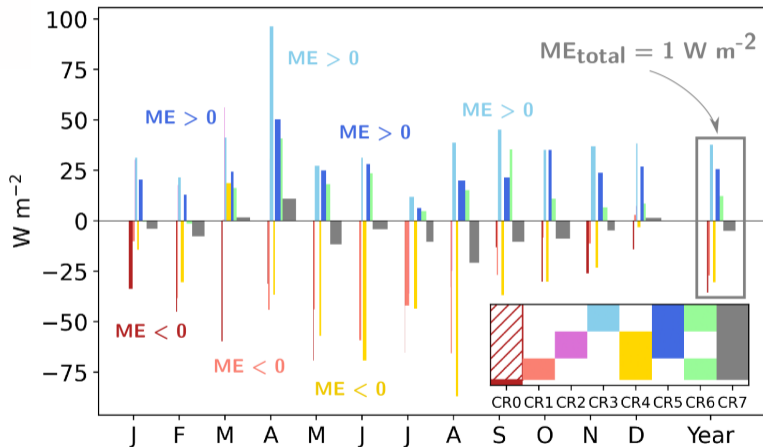
Biais mensuel et fréquence relative selon les CR sur l'année 2020 en situation de ciel couvert dans le modèle

# Attribution des erreurs de SWD selon le régime nuageux : en ciel couvert



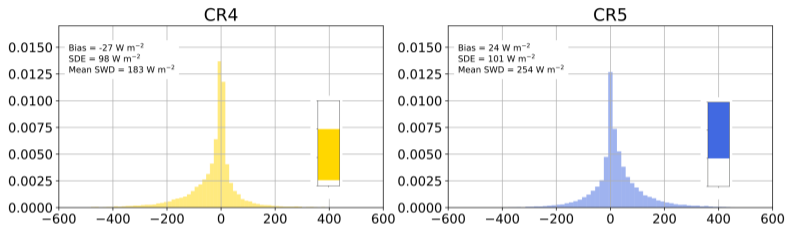
Biais mensuel et fréquence relative selon les CR sur l'année 2020 en situation de ciel couvert dans le modèle

# Attribution des erreurs de SWD selon le régime nuageux : en ciel couvert



Biais mensuel et fréquence relative selon les CR sur l'année 2020 en situation de ciel couvert dans le modèle

# Attribution des erreurs de SWD selon le régime nuageux : en ciel couvert



*Distribution des écart-types des erreurs pour CR4 et CR5*

Fort SDE for chaque régime nuageux (CR)

## Conclusion de l'évaluation sur la France

- Mise en place d'une **méthode générale, systématique et reproductible** pour d'autres modèles
- Biais de SWD positif pour les **bonnes détections de nuages**
- Erreurs systématiques mises en avant **en ciel couvert** dans le modèle :
  - Biais de SWD négatifs pour les nuages bas
  - Biais de SWD positifs pour les nuages hauts
- Résultats détaillés dans un article accepté dans GMD

### EGUSPHERE-2023-1181 | Methods for assessment of models

Received: 01 Jun 2023 – Discussion started: 08 Aug 2023 – Revised: 11 Nov 2023 – Accepted: 23 Nov 2023

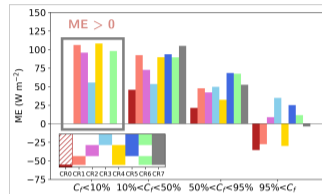
**Evaluation of surface shortwave downward radiation forecasts by the numerical weather prediction model AROME**

Marie-Adèle Magnaldo, Quentin Libois , Sébastien Riette , and Christine Lac

## Limites de cette première évaluation

### En ciels nuageux :

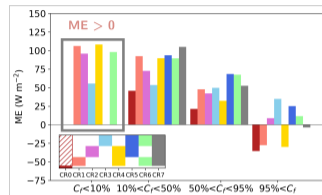
- ① Une **sous-estimation de CF** peut-elle expliquer le **biais positif de SWD** observé dans les situations de bonnes détections de nuages ?



## Limites de cette première évaluation

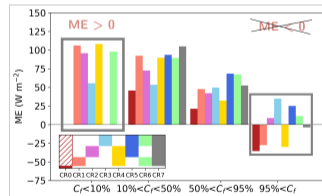
### En ciels nuageux :

- ① Une **sous-estimation de CF** peut-elle expliquer le **biais positif de SWD** observé dans les situations de bonnes détections de nuages ?



### En ciel couvert :

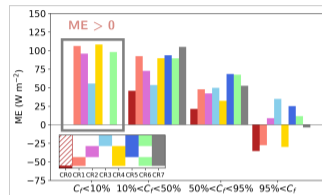
- ② Les **biais négatifs de SWD** relevés pour les nuages bas en **ciel couvert** sont-ils dus à une **surestimation de la CF** dans le modèle ?



# Limites de cette première évaluation

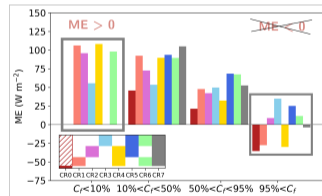
## En ciels nuageux :

- 1 Une **sous-estimation de CF** peut-elle expliquer le **biais positif de SWD** observé dans les situations de bonnes détections de nuages ?



## En ciel couvert :

- 2 Les **biais négatifs de SWD** relevés pour les nuages bas en **ciel couvert** sont-ils dus à une **surestimation de la CF** dans le modèle ?
- 3 Les biais de SWD en ciel couvert sont-ils liés à des **erreurs de contenu intégré en eau liquide (LWP)** ?



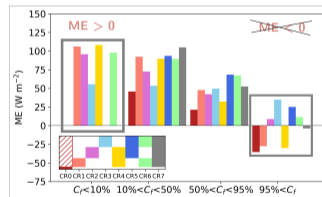
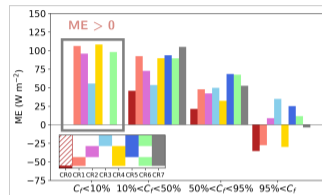
## Limites de cette première évaluation

### En ciels nuageux :

- 1 Une **sous-estimation de CF** peut-elle expliquer le **biais positif de SWD** observé dans les situations de bonnes détections de nuages ?

### En ciel couvert :

- 2 Les **biais négatifs de SWD** relevés pour les nuages bas en **ciel couvert** sont-ils dus à une **surestimation de la CF** dans le **modèle** ?
- 3 Les biais de SWD en ciel couvert sont-ils liés à des **erreurs de contenu intégré en eau liquide (LWP)** ?



Étude complémentaire ciblée sur le site du SIRTA

# Plan

- 1. Introduction
- 2. Méthodes et données
- 3. Évaluation France
- 4. Évaluation SIRT
- 5. Conclusions et perspectives

# Site hautement instrumenté

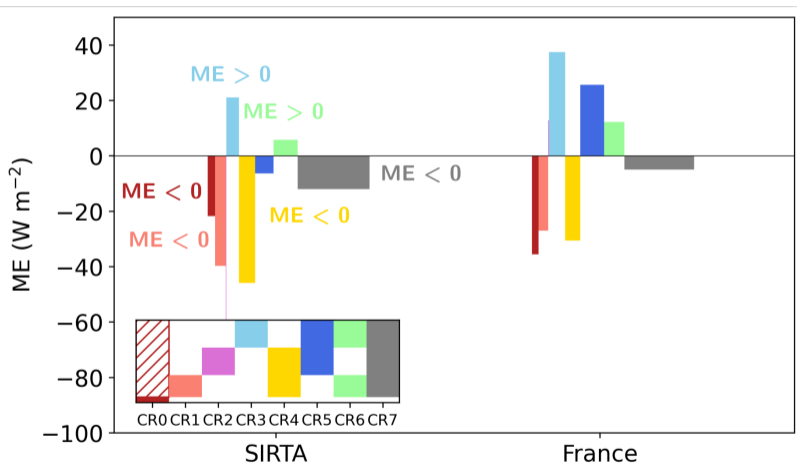
## Site du SIRT

- À Palaiseau (sud de Paris)
- Variables disponibles (SWD, CF, LWP)
- Projet ReOBS
- Données moyennes horaires  
Haefelin et al. (2005)



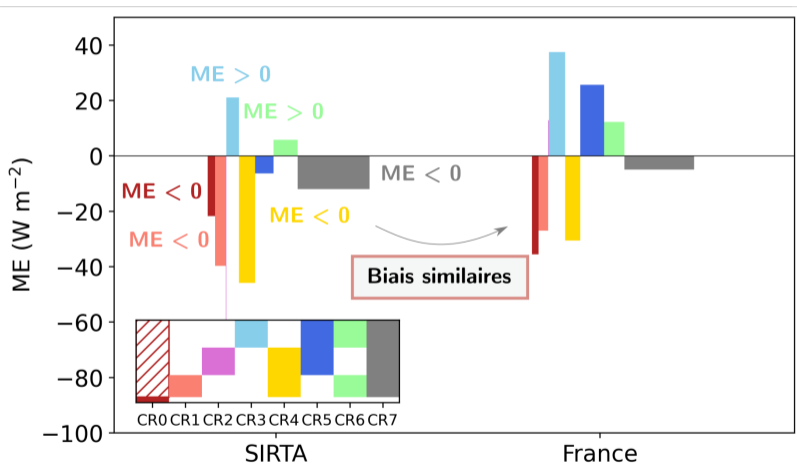
*Instruments du SIRT (Chiriaco et al., 2018)*

# Le SIRTA : un site représentatif de l'ensemble de la métropole ?



*Biais et fréquences annuels selon les CR sur le site du SIRTA et sur la France métropolitaine*

# Le SIRTA : un site représentatif de l'ensemble de la métropole ?



*Biais et fréquences annuels selon les CR sur le site du SIRTA et sur la France métropolitaine*

# Résultats de l'évaluation sur le SIRTA

**Objectif** : Apporter des éléments complémentaires à l'évaluation sur la France

- **En situations de bonnes détections de nuages** :
  - Surestimation moyenne de la fraction nuageuse
  - Biais de SWD positif, mais pas uniquement dû à une sous-estimation de la fraction nuageuse
- **Pour les nuages hauts** :
  - Biais de SWD positif
  - Sous-estimation de LWP
  - Sous-estimation de IWP (contenu en glace intégré) pour les nuages hauts et géométriquement fins
- **Pour les nuages bas** :
  - Biais de SWD négatif même en ciel couvert (dans le modèle + dans les observations)
  - Surestimation du LWP : nuages géométriquement trop épais

# Plan

1. Introduction
2. Méthodes et données
3. Évaluation France
4. Évaluation SIRT
5. Conclusions et perspectives

## Conclusions

### Objectif 1 : Évaluer les prévisions de SWD d'AROME

- **Méthode d'évaluation générale, systématique et reproductible**
- **Erreurs systématiques** mises en avant avec une évaluation sur la France métropolitaine :
  - Biais de SWD négatif pour les nuages bas et brouillards
  - Biais de SWD positif pour les nuages hauts
- Étude avancée sur le site du SIRT qui **conforte ces erreurs et apporte des éléments complémentaires** :
  - Surestimation moyenne de la CF
  - Surestimation du LWP : pour les nuages bas
  - Sous-estimation du LWP : pour les nuages hauts et géométriquement épais

# Perspectives pour améliorer d'AROME

## Objectif 2 : Améliorer les prévisions de SWD d'AROME

- Proposer des pistes d'améliorations pour AROME
- Utiliser cette méthode d'évaluation pour quantifier l'impact de modifications sur le SWD prévu sur la France

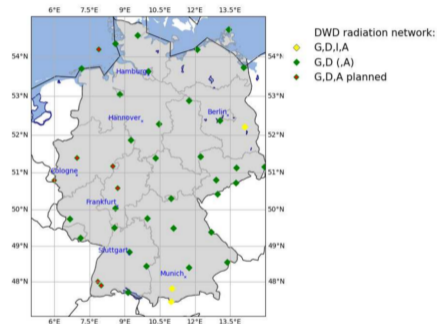
### De nombreuses pistes d'amélioration :

- Prendre en compte du **contenu en neige dans le schéma radiatif** d'AROME (Li et al., 2014; Li et al., 2022)
- Améliorer la vitesse de chute des cristaux de glace, qui cause un **contenu en neige trop faible** (Wurtz et al., 2021; Taufour et al., 2018)
- Utiliser un **nombre de gouttelette plus réaliste** (trop élevé pour les cas de brouillards) qui pourrait être une des causes d'un retard à la dissipation (Antoine et al., 2023)

## Perspectives en termes d'observations

Une plus grande quantité d'observations pour affiner notre compréhension :

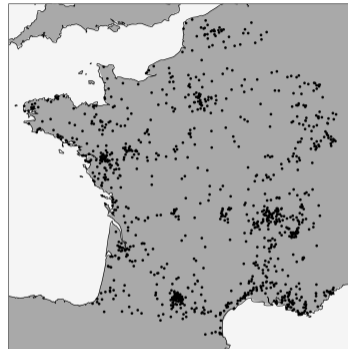
- Disposer de **mesures de SWD global et diffus** (réseau de pyranomètres du DWD)
- Évaluer la **CF sur le SIRT** à l'aide de méthodes comme celle basée sur les Total-Sky Imager
- Utiliser d'autres produits de mesures d'autres paramètres, comme les produits **DARDAR** de télédétection active à bord de satellites défilants (contenu en glace par exemple)



Réseau de pyranomètres du DWD  
(source : Lionel Doppler)

## Perspectives en lien avec le PV

- Utiliser des **modèles de conversion des prévisions de SWD vers des prévisions de production électrique** (ex : WO2PV, Lindsay et al. (2020))
- Appliquer la méthodologie d'évaluation sur la **production d'énergie solaire avec l'association BDPV** : permet d'avoir un très grand nombre de stations de mesures







*Localisation des panneaux photovoltaïques de particuliers de l'association BDPV (1174 stations de production)*




An aerial photograph of a vast solar farm. The solar panels are arranged in neat, parallel rows across a green field. The rows are separated by narrow paths or access roads. In the background, there is a dense line of trees and a small cluster of buildings. The sky is blue with scattered white clouds. A semi-transparent red rectangular box is overlaid on the center of the image, containing the text "Merci pour votre attention !".

Merci pour votre attention !




# Références 1

-  Ahlgrimm, M. and R. Forbes (2012). **“The Impact of Low Clouds on Surface Shortwave Radiation in the ECMWF Model”**. *Monthly Weather Review* 140.11, pp. 3783–3794. DOI: 10.1175/mwr-d-11-00316.1 (cit. on p. 68).
-  Amodei, M. and J. Stein (2009). **“Deterministic and fuzzy verification methods for a hierarchy of numerical models”**. *Meteorological Applications* 16.2, pp. 191–203. DOI: DOI:10.1002/met.101 (cit. on pp. 12, 13).
-  Antoine, S., R. Honnert, Y. Seity, B. Vié, F. Burnet, and P. Martinet (2023). **“Evaluation of an improved AROME configuration for fog forecasts during the SOFOG3D campaign.”**. *Weather and Forecasting* (cit. on p. 43).
-  Brousseau, P., Y. Seity, D. Ricard, and J. Léger (2016). **“Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system”**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142.699, pp. 2231–2243. DOI: DOI:10.1002/qj.2822 (cit. on p. 6).




## Références 2

-  Chiriaco, M., J.-C. Dupont, S. Bastin, J. Badosa, J. Lopez, M. Haeffelin, H. Chepfer, and R. Guzman (2018). **“ReOBS: a new approach to synthesize long-term multi-variable dataset and application to the SIRT supersite”**. *Earth System Science Data* 10.2, pp. 919–940. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-10-919-2018> (cit. on p. 37).
-  Haeffelin, M., L. Barthès, O. Bock, C. Boitel, S. Bony, D. Bouniol, H. Chepfer, M. Chiriaco, J. Cuesta, J. Delanoë, et al. (2005). **“SIRT, a ground-based atmospheric observatory for cloud and aerosol research”**. In: *Annales Geophysicae*. Vol. 23. 2. Copernicus GmbH, pp. 253–275 (cit. on p. 37).
-  IEA (2019). **État du photovoltaïque en France**. Tech. rep. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie and International Energy Agency (cit. on pp. 2–4).





## Références 3

-  Li, J.-L., R. Forbes, D. Waliser, G. Stephens, and S. Lee (2014). **“Characterizing the radiative impacts of precipitating snow in the ECMWF integrated forecast system global model”**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119.16, pp. 9626–9637 (cit. on p. 43).
-  Li, J.-L. F., K.-M. Xu, W.-L. Lee, J. H. Jiang, E. Fetzer, G. Stephens, Y.-H. Wang, and J.-Y. Yu (2022). **“Exploring Radiation Biases Over the Tropical and Subtropical Oceans Based on Treatments of Frozen-Hydrometeor Radiative Properties in CMIP6 Models”**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 127.7. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021JD035976> (cit. on p. 43).
-  Lindsay, N., Q. Libois, J. Badosa, A. Migan-Dubois, and V. Bourdin (2020). **“Errors in PV power modelling due to the lack of spectral and angular details of solar irradiance inputs”**. *Solar Energy* 197, pp. 266–278 (cit. on p. 45).




## Références 4

-  Mol, W., B. Heusinkveld, M. R. Mangan, O. Hartogensis, M. Veerman, and C. van Heerwaarden (2023). **“Observed Patterns of Surface Solar Irradiance under Cloudy and Clear-sky Conditions”**. *arXiv preprint arXiv:2307.06980* (cit. on p. 67).
-  Morcrette, J.-J. (2002). **“Assessment of the ECMWF model cloudiness and surface radiation fields at the ARM SGP site”**. *Monthly weather review* 130.2, pp. 257–277 (cit. on p. 67).
-  Müller, H., A. Ehrlich, E. Jäkel, J. Röttenbacher, B. Kirbus, M. Schäfer, R. J. Hogan, and M. Wendisch (2023). **“Evaluation of downward and upward solar irradiances simulated by the Integrated Forecasting System of ECMWF using airborne observations above Arctic low-level clouds”**. *EGUsphere* 2023, pp. 1–28 (cit. on p. 68).



## Références 5

-  Rieger, D., A. Steiner, V. Bachmann, P. Gasch, J. Förstner, K. Deetz, B. Vogel, and H. Vogel (2017). **“Impact of the 4 April 2014 Saharan dust outbreak on the photovoltaic power generation in Germany”**. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17.21, pp. 13391–13415. DOI: DOI:10.5194/acp-17-13391-2017 (cit. on p. 67).
-  RTE (2021). ***Panorama de l'électricité renouvelable***. Tech. rep. Agence ORE et al. (cit. on pp. 2–4).
-  Seity, Y., P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, and V. Masson (2011). **“The AROME-France Convective-Scale Operational Model”**. *Monthly Weather Review* 139.3, pp. 976–991. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1> (cit. on p. 6).
-  Stein, J. and F. Stoop (2019). **“Neighborhood-Based Contingency Tables Including Errors Compensation”**. *Monthly Weather Review* 147.1, pp. 329–344. DOI: DOI:10.1175/MWR-D-17-0288.1 (cit. on pp. 12, 13).


## Références 6

-  Taufour, M., B. Vié, C. Augros, B. Boudevillain, J. Delanoë, G. Delautier, V. Ducrocq, C. Lac, J.-P. Pinty, and A. Schwarzenböck (2018). **“Evaluation of the two-moment scheme LIMA based on microphysical observations from the HyMeX campaign”**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 144.714, pp. 1398–1414 (cit. on p. 43).
-  Tuononen, M., E. J. O'Connor, and V. A. Sinclai (2019). **“Evaluating solar radiation forecast uncertainty”**. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19.3, pp. 1985–2000. DOI: 10.5194/acp-19-1985-2019 (cit. on pp. 14, 68).
-  Vié, B., J.-P. Pinty, S. Berthet, and M. Leriche (2016). **“LIMA (v1. 0): A quasi two-moment microphysical scheme driven by a multimodal population of cloud condensation and ice freezing nuclei”**. *Geoscientific Model Development* 9.2, pp. 567–586 (cit. on p. 66).

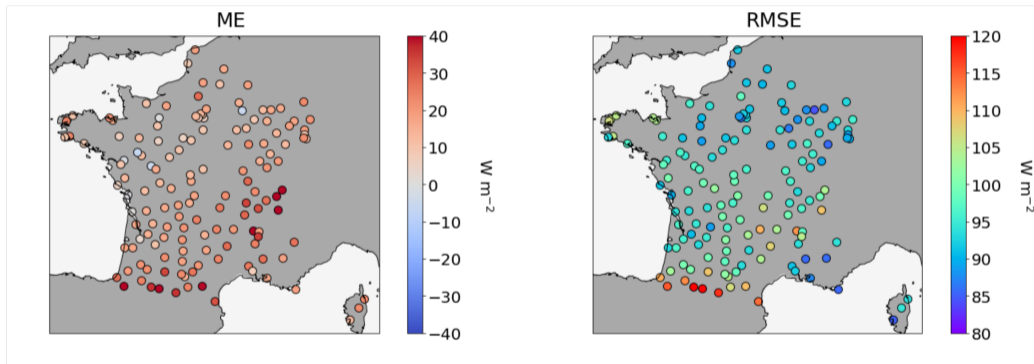
## Références 7

-  Weverberg, K. V., C. J. Morcrette, J. Petch, S. A. Klein, H.-Y. Ma, C. Zhang, S. Xie, Q. Tang, W. I. Gustafson, Y. Qian, L. K. Berg, Y. Liu, M. Huang, M. Ahlgrimm, R. Forbes, E. Bazile, R. Roehrig, J. Cole, W. Merryfield, W.-S. Lee, et al. (2018). **“CAUSES: Attribution of Surface Radiation Biases in NWP and Climate Models near the U.S. Southern Great Plains”**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123.7, pp. 3612–3644. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017JD027188> (cit. on p. 20).
-  Widén, J., N. Carpmann, V. Castellucci, D. Lingfors, J. Olauson, F. Remouit, M. Bergkvist, M. Grabbe, and R. Waters (2015). **“Variability assessment and forecasting of renewables: A review for solar, wind, wave and tidal resources”**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44, pp. 356–375 (cit. on pp. 2–5).

## Références 8

-  Wurtz, J., D. Bouniol, B. Vié, and C. Lac (2021). **“Evaluation of the scpAROME/scp model’s ability to represent ice crystal icing using in situ observations from the scpHAIC/scp 2015 field campaign”**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 147.738, pp. 2796–2817. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.4100> (cit. on p. 43).

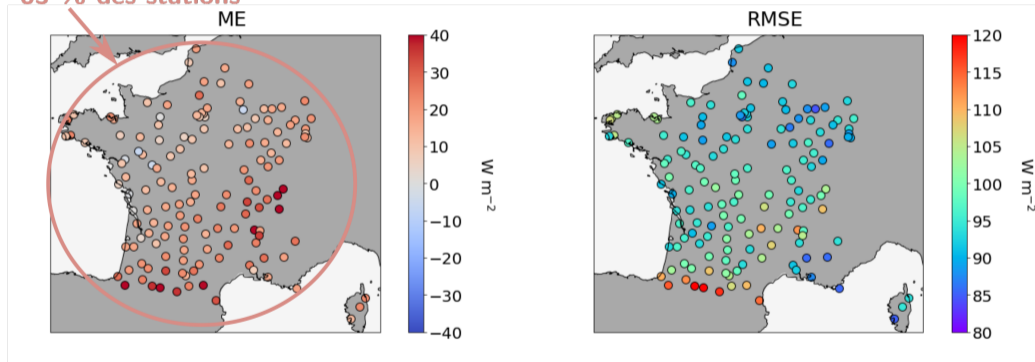
# Variabilité spatiale des erreurs de SWD



*Carte des biais et RMSE sur l'année 2020 sur les stations du réseau*

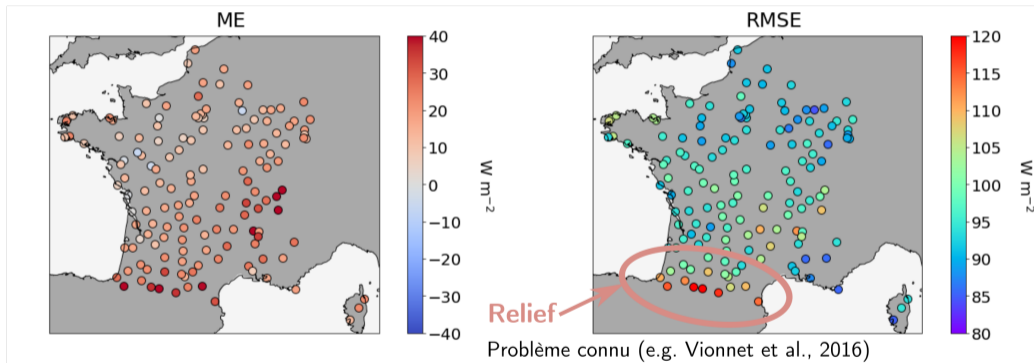
# Variabilité spatiale des erreurs de SWD

ME > 0 pour  
83 % des stations



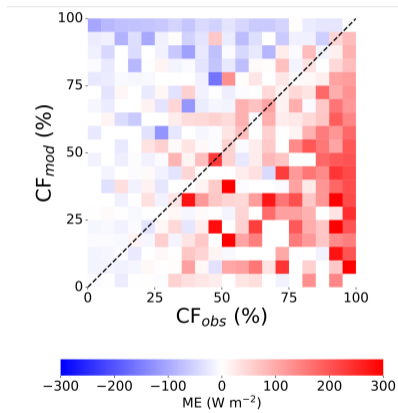
*Carte des biais et RMSE sur l'année 2020 sur les stations du réseau*

# Variabilité spatiale des erreurs de SWD



*Carte des biais et RMSE sur l'année 2020 sur les stations du réseau*

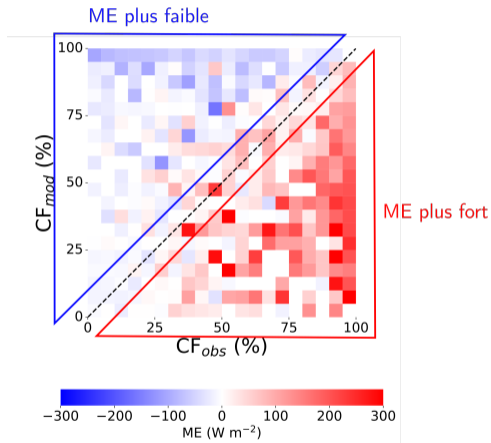
# Impact de la CF : biais positif de SWD en bonnes détections de nuages



- AROME surestime plus souvent la CF qu'il ne la sous-estime ( $\overline{\Delta CF} = 5 \%$ )
- Bonne anti-corrélation entre  $\Delta CF$  et  $\Delta SWD$

*CF<sub>mod</sub> et CF<sub>obs</sub> et biais de SWD associés*

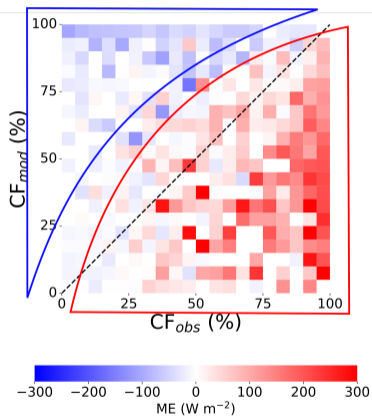
# Impact de la CF : biais positif de SWD en bonnes détections de nuages



- AROME surestime plus souvent la CF qu'il ne la sous-estime ( $\overline{\Delta CF} = 5\%$ )
- Bonne anti-corrélation entre  $\Delta CF$  et  $\Delta SWD$
- Biais de SWD plus fort lorsque  $\Delta CF < 0$  que lorsque  $\Delta CF > 0$

$CF_{mod}$  et  $CF_{obs}$  et biais de SWD associés

# Impact de la CF : biais positif de SWD en bonnes détections de nuages

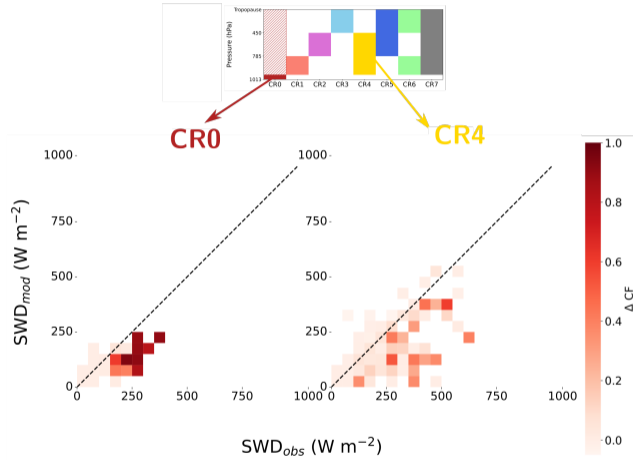


$CF_{mod}$  et  $CF_{obs}$  et biais de SWD associés

- AROME surestime plus souvent la CF qu'il ne la sous-estime ( $\overline{\Delta CF} = 5\%$ )
- Bonne anti-corrélation entre  $\Delta CF$  et  $\Delta SWD$
- Biais de SWD plus fort lorsque  $\Delta CF < 0$  que lorsque  $\Delta CF > 0$

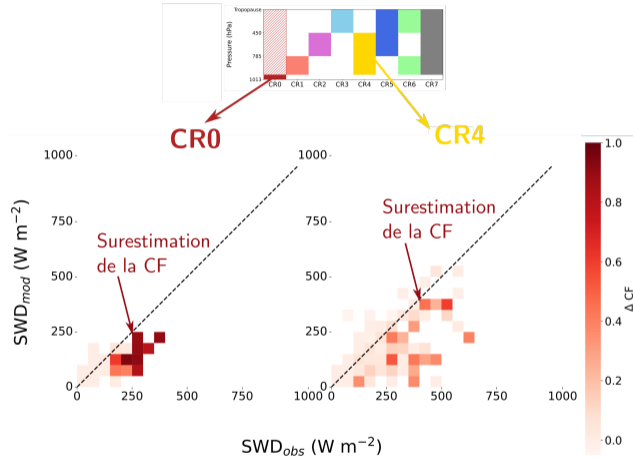
Les biais de SWD  $> 0$  en bonnes détections de nuages ne sont pas uniquement dus à  $\Delta CF < 0$

# Impact de la CF : biais négatif de SWD en ciel couvert dans le modèle



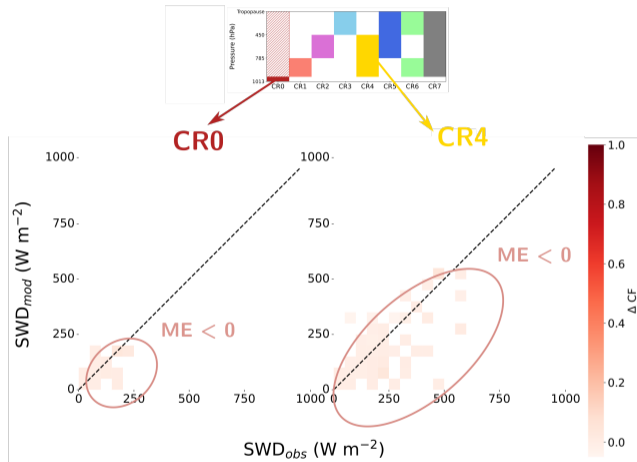
*SWD<sub>mod</sub> vs SWD<sub>obs</sub> et biais de CF associés*

# Impact de la CF : biais négatif de SWD en ciel couvert dans le modèle



*SWD<sub>mod</sub> vs SWD<sub>obs</sub> et biais de CF associés*

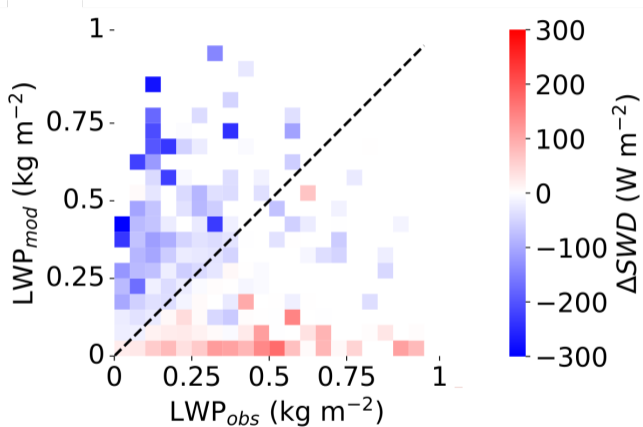
# Impact de la CF : biais négatif de SWD en ciel couvert dans le modèle



Biais négatif de  $SWD < 0$  persistant lorsque le ciel est couvert dans les observations  
⇒ d'autres sources d'erreurs que la surestimation de la CF

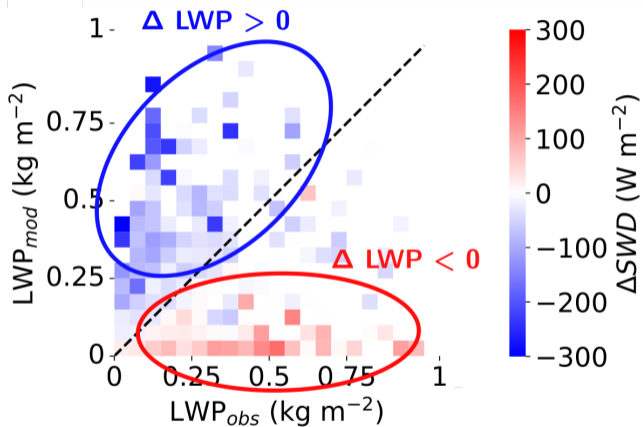
*$SWD_{mod}$  vs  $SWD_{obs}$  et biais de CF associés*

# Impact du LWP sur le SWD : en ciel couvert dans le modèle et dans les observations



*$LWP_{mod}$  vs  $LWP_{obs}$  et biais de SWD associés en ciel couvert dans le modèle et dans les observations*

# Impact du LWP sur le SWD : en ciel couvert dans le modèle et dans les observations



Les erreurs de LWP peuvent expliquer une partie des biais de SWD

$LWP_{mod}$  vs  $LWP_{obs}$  et biais de SWD associés en ciel couvert dans le modèle et dans les observations

# Perspectives pour améliorer d'AROME

## De nombreuses pistes d'amélioration :

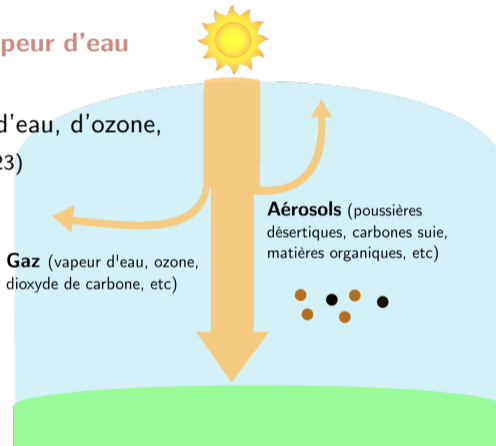
- Affiner la prise en compte de la neige dans le schéma radiatif en **distinguant les propriétés optiques de la glace primaire et celle de la neige**
- Prendre en compte les **autres hydrométéores précipitants** (pluie et graupel) dans le schéma radiatif
- Utiliser le schéma microphysique **LIMA** (Vié et al., 2016) pour une initialisation à partir d'observations de concentration d'aérosols et une représentation prognostique des concentrations d'aérosols/hydrométéores
- Travailler sur le schéma radiatif, en ajoutant **plus de cohérence avec les autres schémas** (ex : paramétrisation concernant les hétérogénéités sous-maille nuageuse avec le schéma de condensation sous-maille)
- Utiliser cette méthodologie pour évaluer l'impact sur le SWD de **nouvelles paramétrisations**

# Sources d'erreurs dans les modèles de PNT : en ciel clair

- **Absorption de la vapeur d'eau**

(Morcrette, 2002)

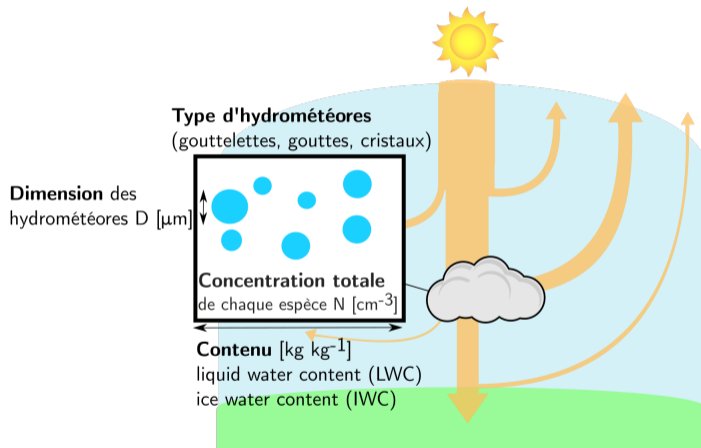
- **Contenu** de vapeur d'eau, d'ozone, etc (e.g. Mol et al., 2023)



- **Concentration d'aérosols** (e.g.

Rieger et al., 2017)

# Sources d'erreurs dans les modèles de PNT : en ciel nuageux



- **Fraction nuageuse**  
(e.g. Tuononen et al., 2019)
- **Type d'hydrométéores**  
(e.g. Ahlgrimm and Forbes, 2012)
- **Contenu intégré** (LWP, *liquid water path* et IWP, *ice water path*)  
(e.g. Tuononen et al., 2019)
- **Concentration totale d'hydrométéores**  
(e.g. Müller et al., 2023)