



Estimation de l'impact des aérosols sur la ressource solaire en Europe de l'Ouest

Julien Sablon^{1,2}, Quentin Libois¹, Sébastien Riette¹, Xavier Ceamanos¹

Journées Nationales de L'énergie Solaire (JNES)
30 Juin 2022 - Albi

¹ Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France/CNRS

² ISAE-SUPAERO, Université de Toulouse

Plan de la présentation

■ Introduction

- Contexte
- Interactions aérosols/rayonnement
- Outils de modélisation : ecRad et WO2PV

■ Étude théorique

- Épaisseur optique d'aérosols
- Distribution verticale des aérosols
- Impact radiatif selon la nature des aérosols
- Effet des aérosols sur les performances PV

■ Étude applicative sur le domaine AROME

- Description de l'outil de travail
- Étude de cas : le 18 mars 2020
- Statistiques globales annuelles
- Série temporelle annuelle
- Distribution des différences
- Vers les mesures sur site : Pampelune

■ Conclusions et perspectives



Introduction

Contexte

- Forte augmentation de la production PV
 - France : 1 GW (2010) → > 10 GW (2019) [Adrian 2020]
- Grande variabilité de la production PV
 - Nébulosité, aérosols
- Besoin de prédictions fiables du rayonnement
 - Meilleure intégration sur le réseau électrique
 - Taxes si erreur de prédiction (1 à 12€ par MWh) [Notton 2018]



Amélioration des modèles de prévision numérique du temps (PNT) indispensable



© meteofrance.com

- Amélioration des modèles

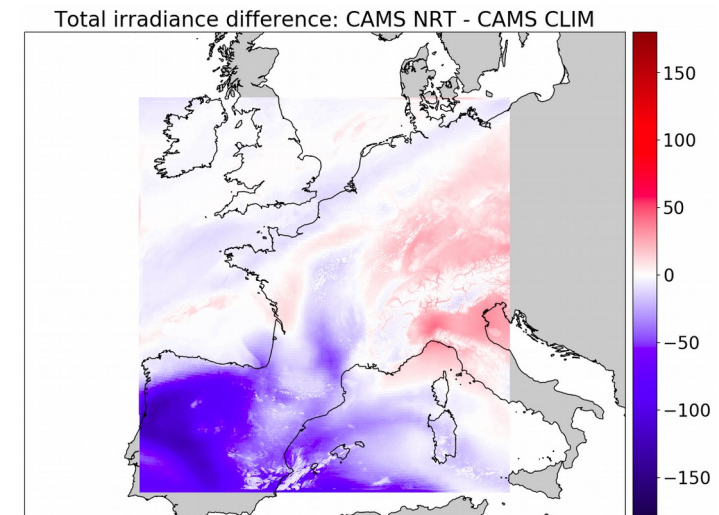
- Échelle météo (de la minute à plusieurs jours)
- Échelle climatique (plusieurs années)

- Méthodes

- Machine learning (adaptation statistique)
- Modèle physique
- Modèle météo

- Stratégie pour Météo-France

- Amélioration de la prédiction du rayonnement solaire avec AROME
- Aérosols représentés actuellement par une climatologie [Tegen 1997]
 - Prise en compte plus réaliste des aérosols



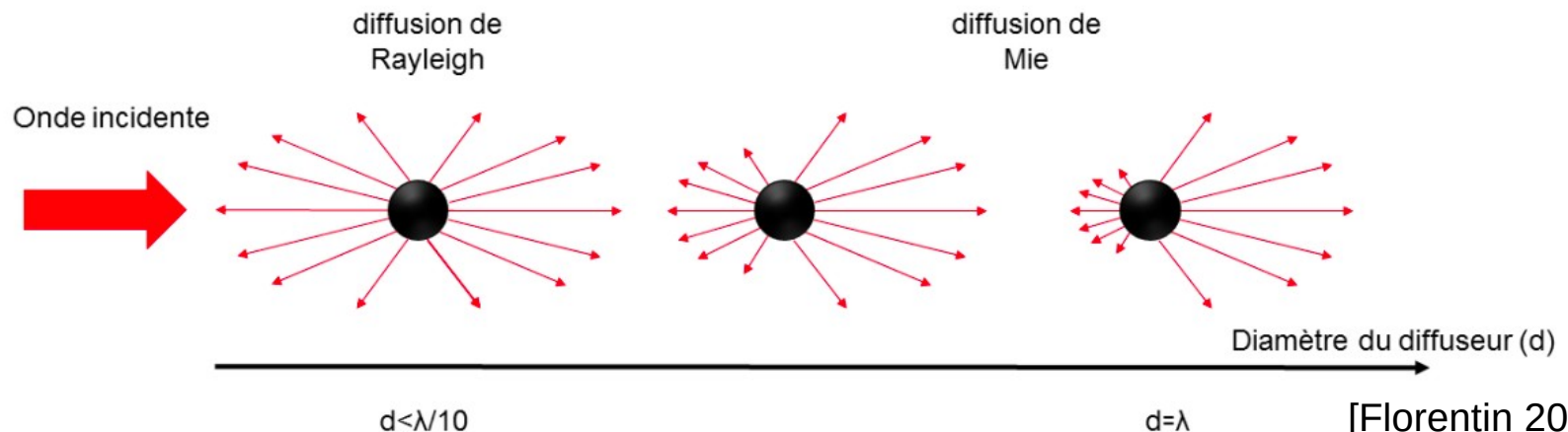
Interactions aérosols/rayonnement

■ Aérosols

- Particules solides ou liquides en suspension dans l'air
- Diversité de tailles, forme, natures chimique
- Diffusion et absorption de la lumière

■ Caractérisation

- Concentration : mass mixing ratio MMR [$\text{kg}_{\text{aerosol}} \text{kg}_{\text{air}}^{-1}$]
- Coefficient d'extinction massique : MEC(λ) [$\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$]
- Coefficient d'extinction : $\sigma_{\text{EXT}}(\lambda) = \text{MEC}(\lambda) \cdot \rho_{\text{air}} \cdot \text{MMR} [\text{m}^{-1}]$
- Albédo de simple diffusion : $\omega(\lambda)$
- Facteur d'asymétrie : $g(\lambda)$ ($g = 1$: avant ; $g = -1$: arrière)

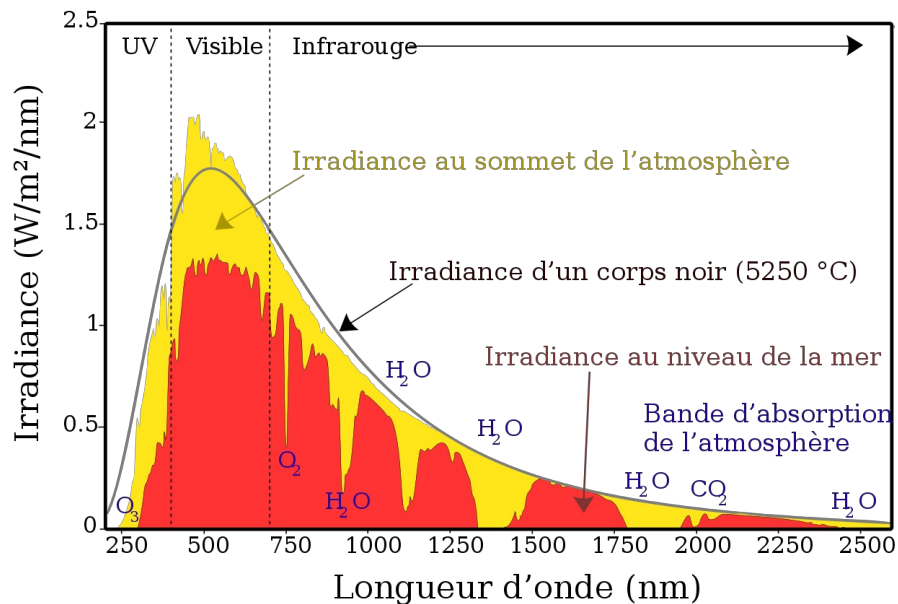


Interactions aérosols/rayonnement

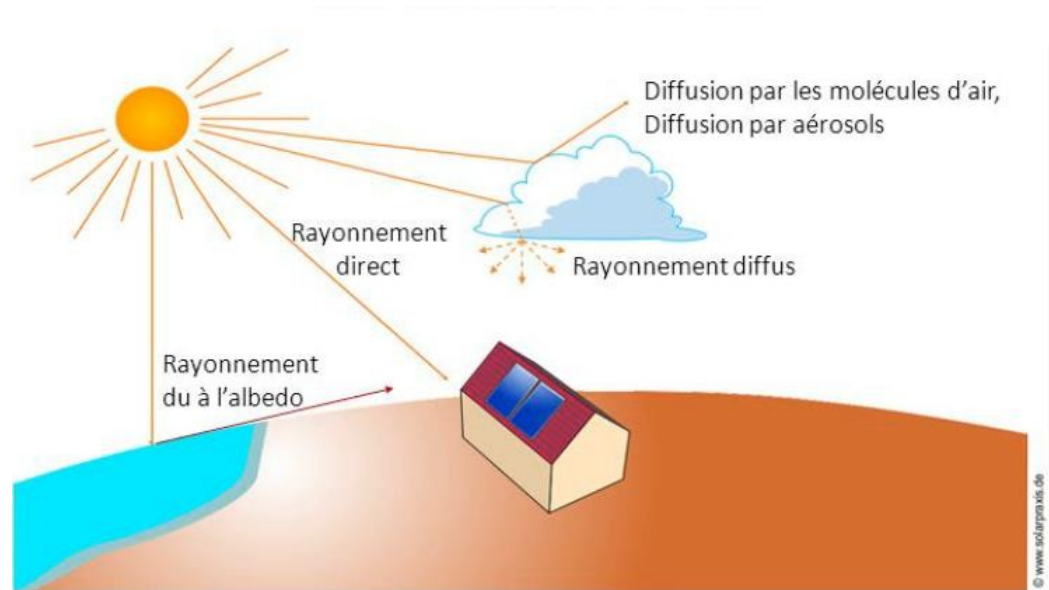
■ Rayonnement solaire

- Distribution spectrale
- Différentes géométries (direct, diffus, plan incliné)

Spectre d'irradiance solaire



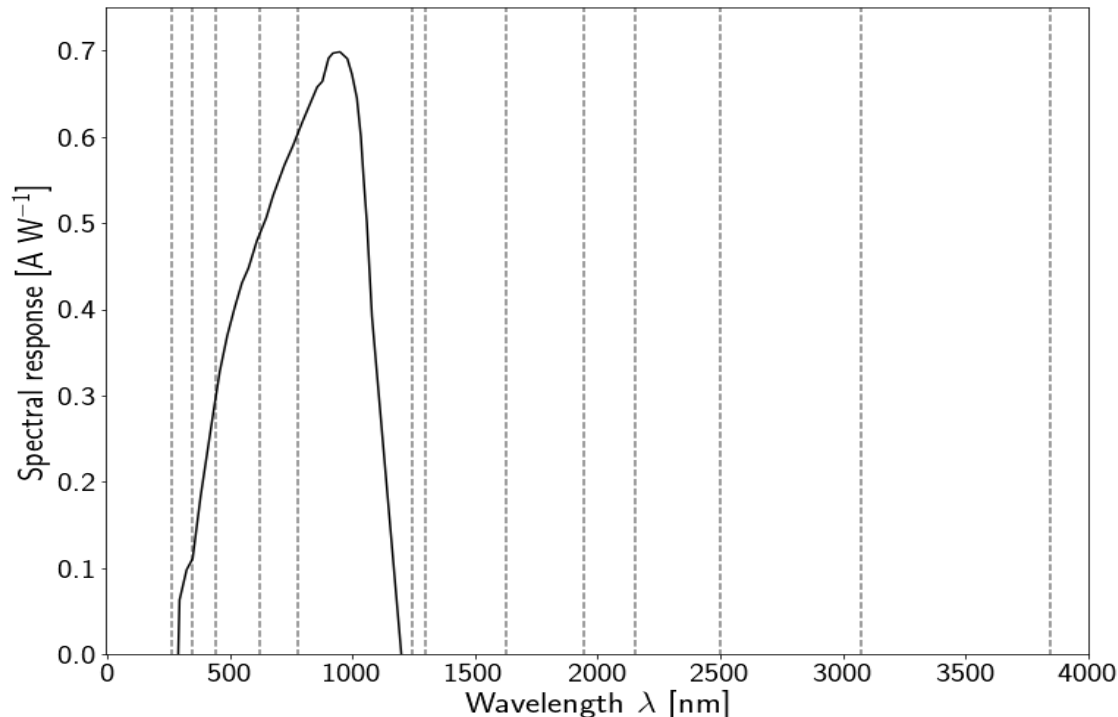
© commons.wikimedia.org



© solarpaxis.de

Outils de modélisation : ecRad et WO2PV

- **ecRad** [Hogan and Bozzo, 2018]
 - Calcule le rayonnement solaire direct et diffus sur un plan horizontal
 - Prend en entrée :
 - Les propriétés thermodynamiques de l'atmosphère (T, humidité, vent, nuages, gaz)
 - Un profil d'aérosols (MMR pour chaque espèce)
 - Discretisation du spectre en 14 bandes distinctes

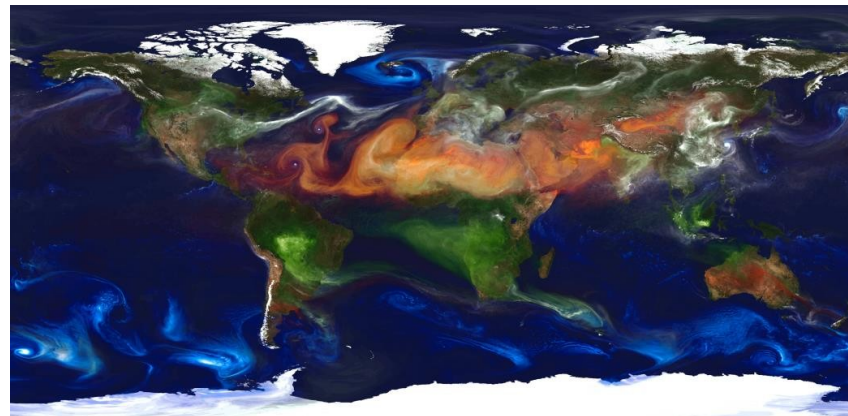


Outils de modélisation : ecRad et WO2PV

■ ecRad

— Représentation des aérosols via 11 différentes classes :

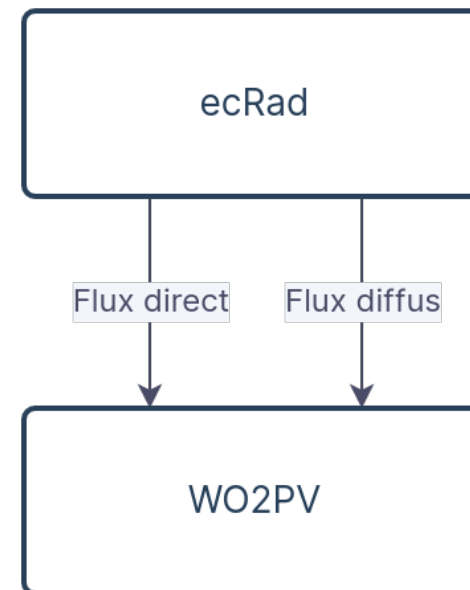
- ▶ (a) Sel de mer (0.03-0.5 μm) [Hess 1998]
- ▶ (b) Sel de mer (0.5-5.0 μm) [Hess 1998]
- ▶ (c) Sel de mer (5.0-20.0 μm) [Hess 1998]
- ▶ (d) Poussières minérales (0.03-0.55 μm) [Dubovik 2002]
- ▶ (e) Poussières minérales (0.55-0.9 μm) [Dubovik 2002]
- ▶ (f) Poussières minérales (0.90-20.0 μm) [Dubovik 2002]
- ▶ (g) Matières organiques hydrophiles [Hess 1998]
- ▶ (g) Matières organiques hydrophobes [Hess 1998]
- ▶ (h) Noir de carbone hydrophile [Boucher 2013]
- ▶ (h) Noir de carbone hydrophobe [Boucher 2013]
- ▶ Sulfates [Mishchenko 2002]



© NASA

Outils de modélisation : ecRad et WO2PV

- **WO2PV**¹ [Lindsay et al., 2020]
 - Modèle physique pour le calcul de la puissance PV
 - Utilisation des flux calculés par ecRad sur les différentes bandes
 - Prise en compte du vent, de la température et de l'albédo du sol
 - Dans cette étude, panneau PV en silicium monocristallin (c-Si)
 - ▶ Orientation : sud
 - ▶ Inclinaison : 30°
 - ▶ Surface : 1m²
 - ▶ $P_{MAX} = 152,5 \text{ W m}^{-2}$



¹ <https://github.com/liboisq/WO2PV>



Étude théorique

Épaisseur optique d'aérosols

- **Définition**

$$\tau(\lambda) = \int \sigma_{\text{EXT}}(\lambda) dz$$

- **Caractéristiques**

- Extinction totale pour une couche atmosphérique
- Très largement utilisée par la communauté PV [Neher 2017]

- **Défauts**

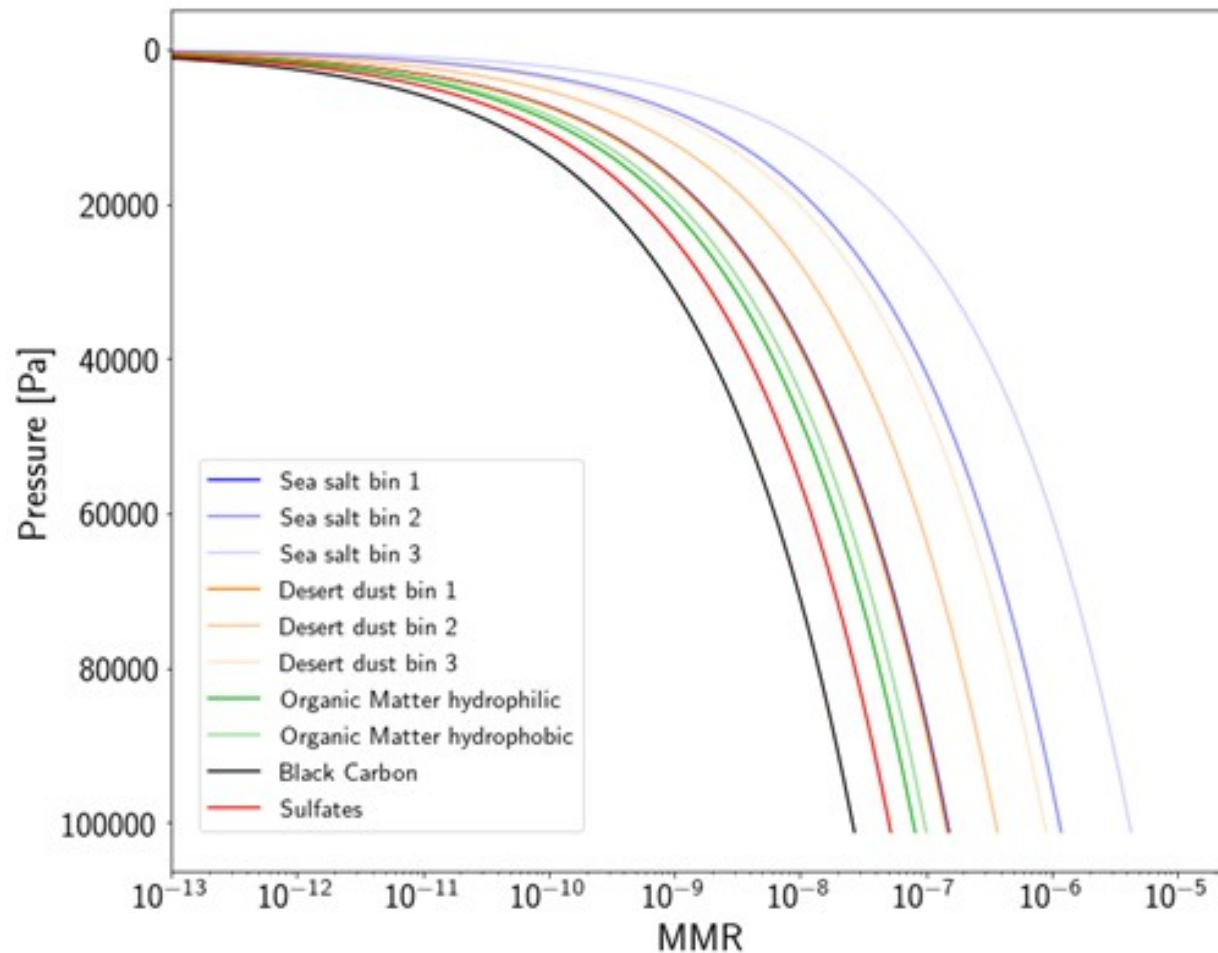
- Ne prend pas en compte ω et g
- Pas de détail de la répartition verticale
- Pas de différence sur la nature des aérosols



L'épaisseur optique est-elle suffisante pour quantifier l'impact des aérosols sur la production PV ?

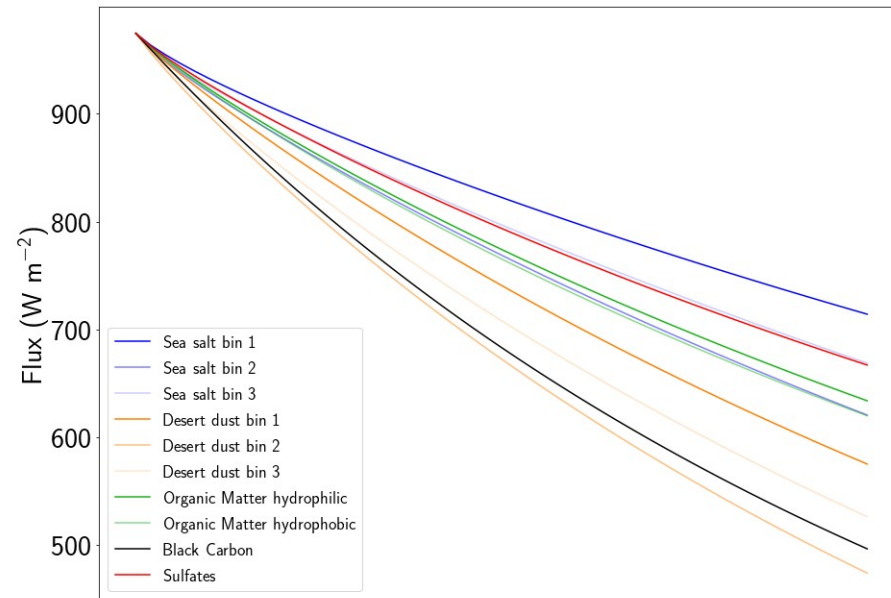
Distribution verticale des aérosols

- Épaisseur optique fixée : $\tau = 1$
- Profil exponentiel de concentration :
$$\text{MMR} = \text{MMR}_0 \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{H}{\xi}}$$
 avec $H = 8400\text{m}$ et $\xi = 3000\text{ m}$

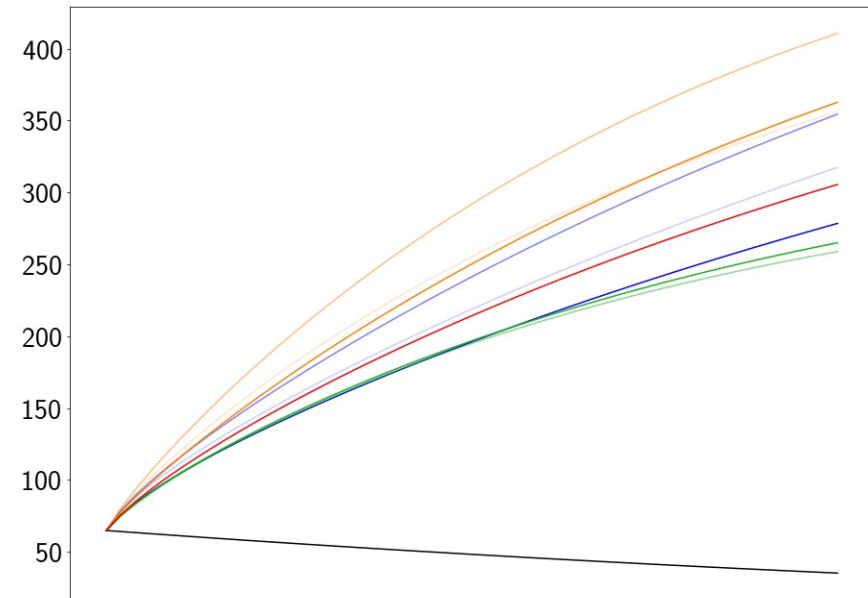


Impact radiatif selon la nature des aérosols

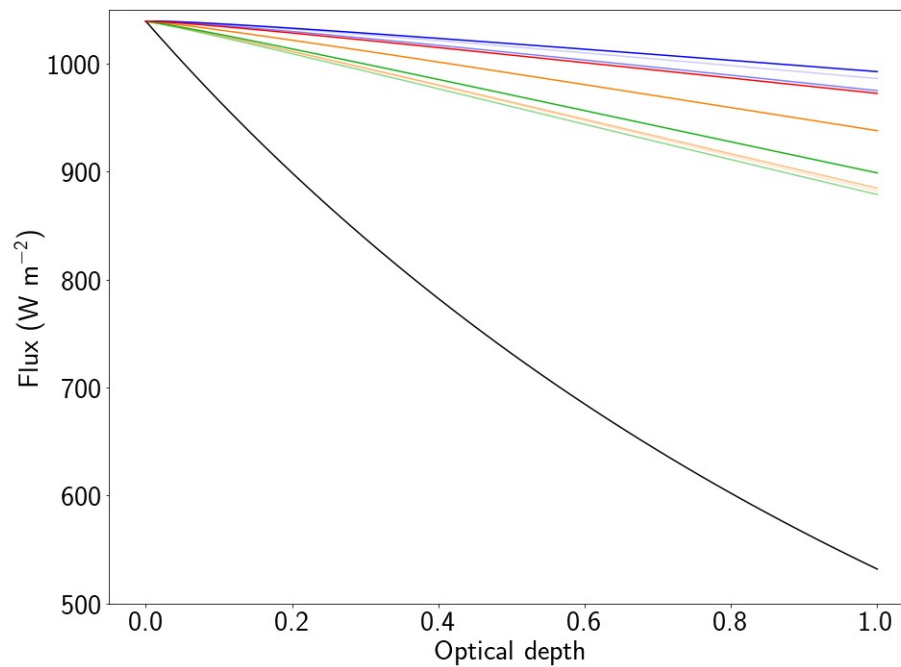
Direct



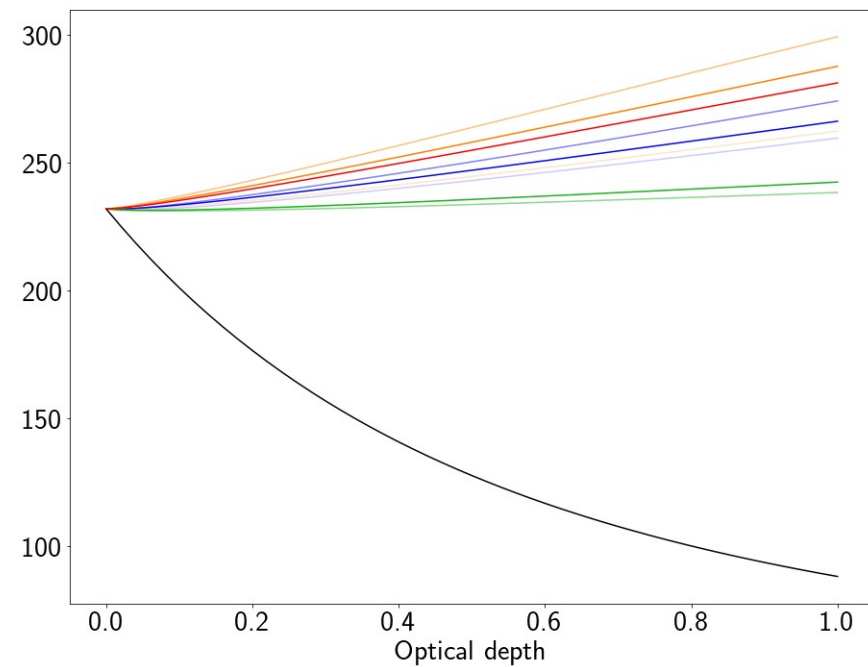
Diffus



Total

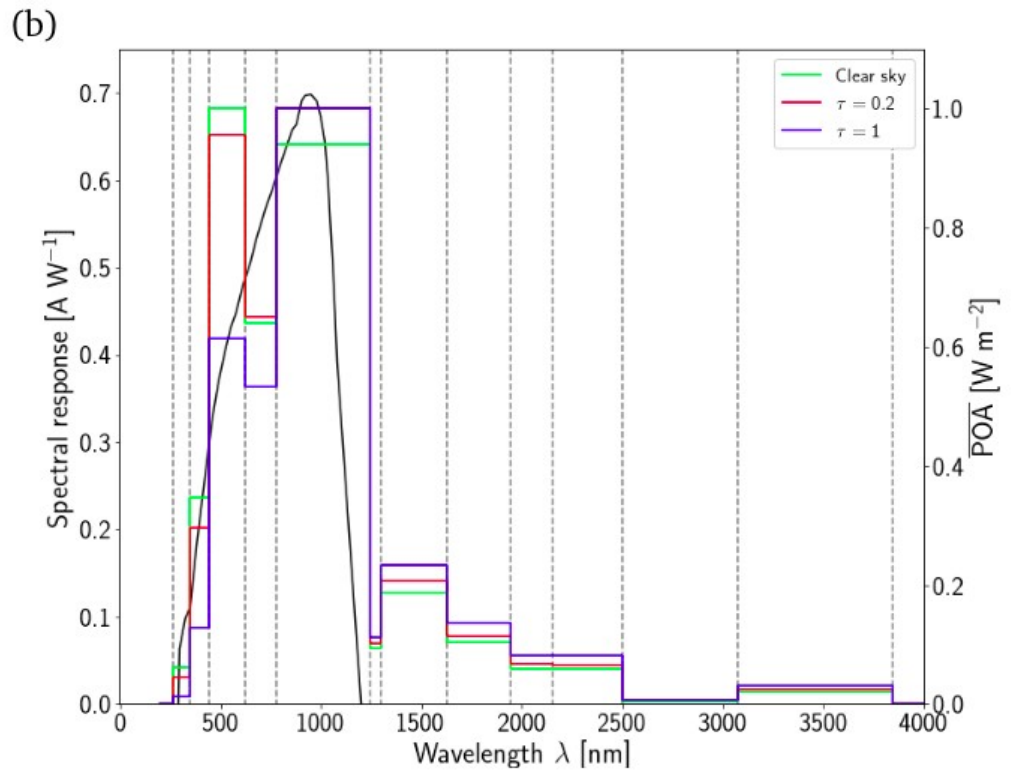
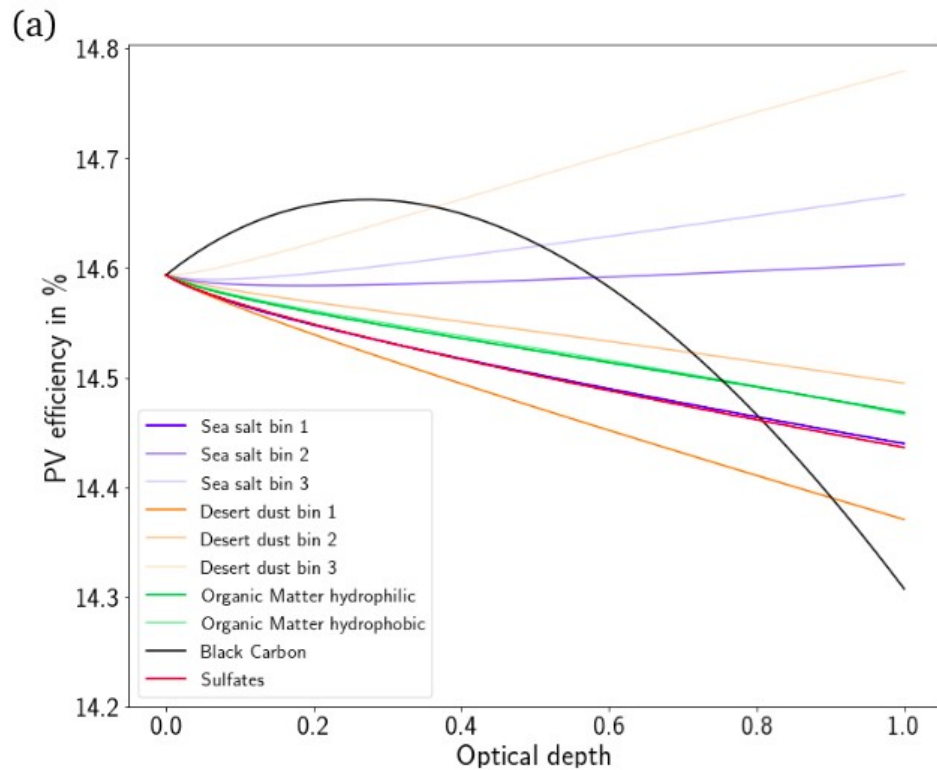


Total TOA



Effet des aérosols sur les performances PV

- (a) Variation rendement en fonction de τ
 - Rendement PV = $\frac{P_{PV}}{POA}$
 - Pourquoi le rendement pour BC augmente avant de diminuer ?
- (b) Spectre normalisés du BC pour deux épaisseurs optiques



Effet des aérosols sur les performances PV

■ Explication des variations du rendement pour BC variable

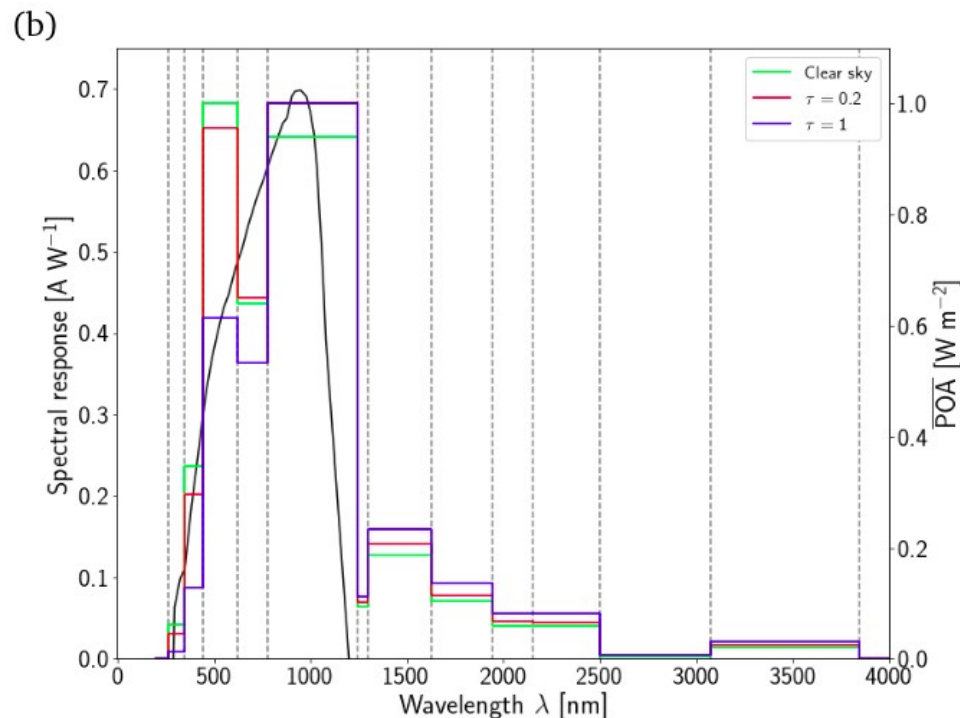
— Augmentation à $\tau = 0,2$

Déplacement du maximum de POA vers le maximum de réponse spectrale (RS)

Diminution de l'importance du rayonnement avec une faible RS

— Diminution à $\tau = 1$

Forte diminution du rayonnement à λ proche de 1000 nm

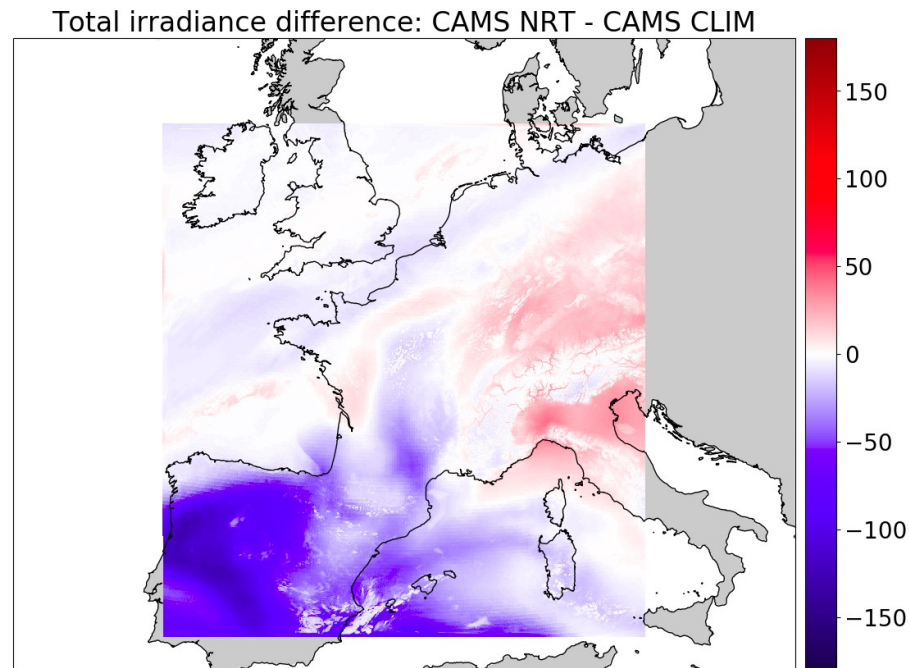




Étude applicative sur le domaine AROME

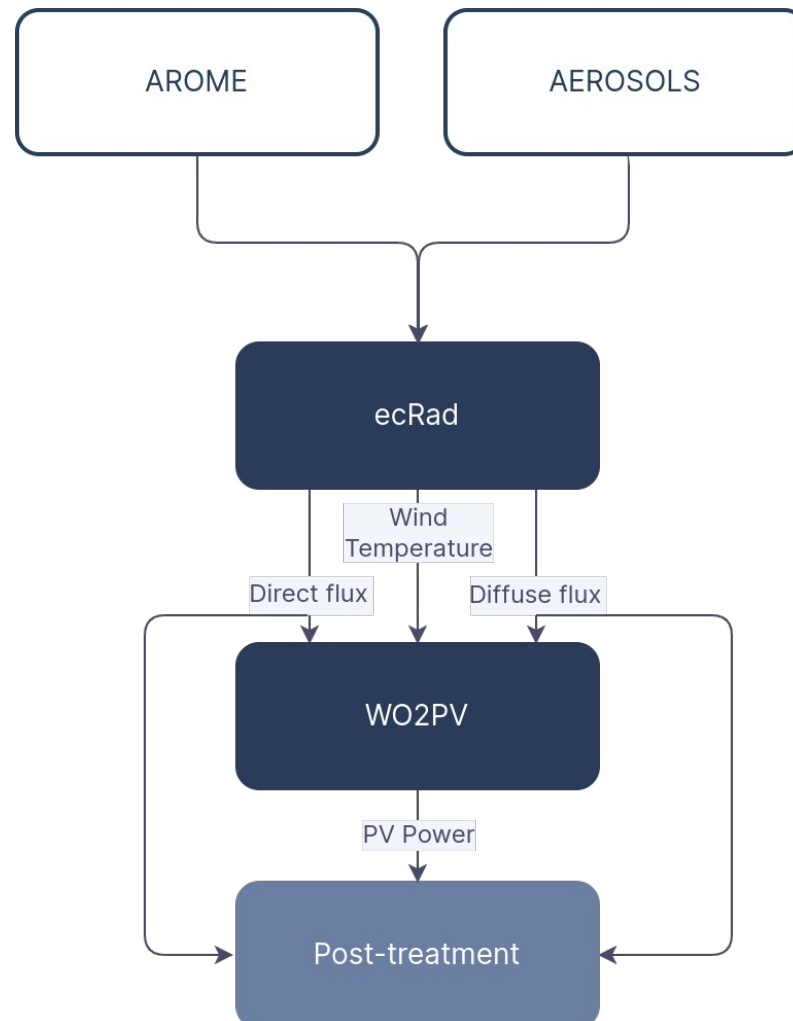
Description de l'outil de travail

- **AROME** (modèle opérationnel de Météo France) [Seity et al. 2011]
 - Un an de simulation
 - Résolution spatiale : 1,3 km
 - Résolution temporelle : 1h



Description de l'outil de travail

- Cœur du programme

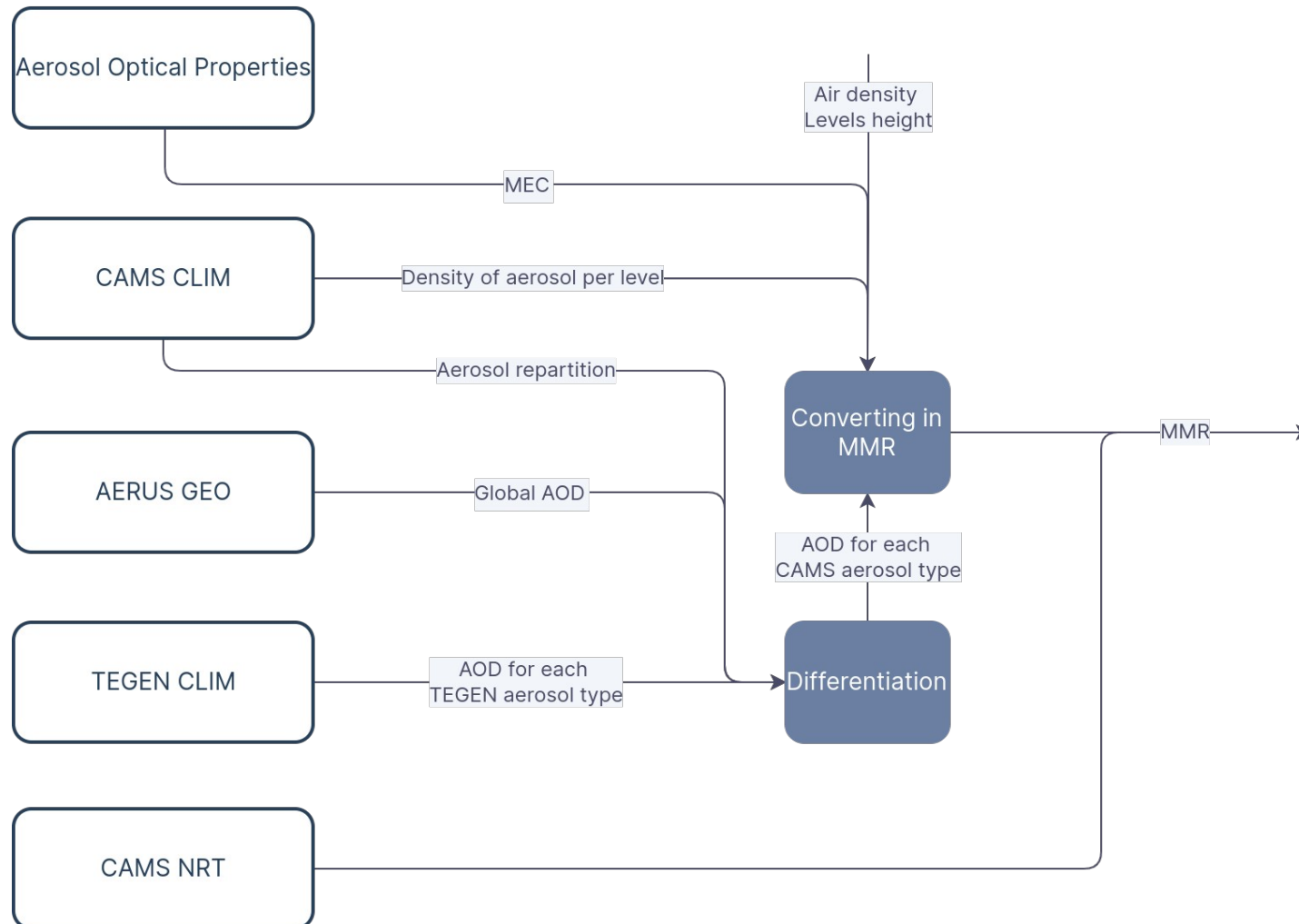


- Ajout des informations sur l'atmosphère et l'albédo



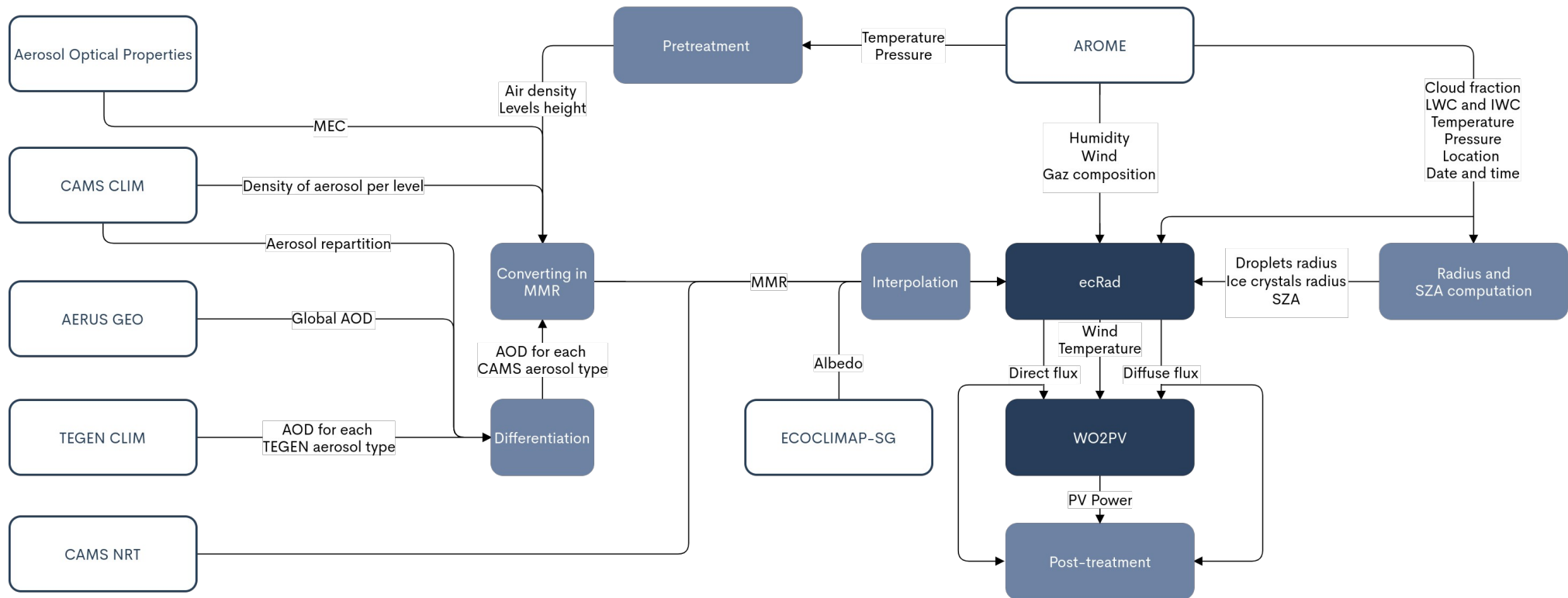
Description de l'outil de travail

■ Prétraitement des données sur les aérosols



Description de l'outil de travail

■ Insertion des aérosols dans le schéma de calcul



Étude de cas : le 18 mars 2020

■ Rayonnement total [W m^{-2}]

■ Impact radiatif des aérosols

- 162 W m^{-2}
- 20 % du flux local en ciel propre (flcp)

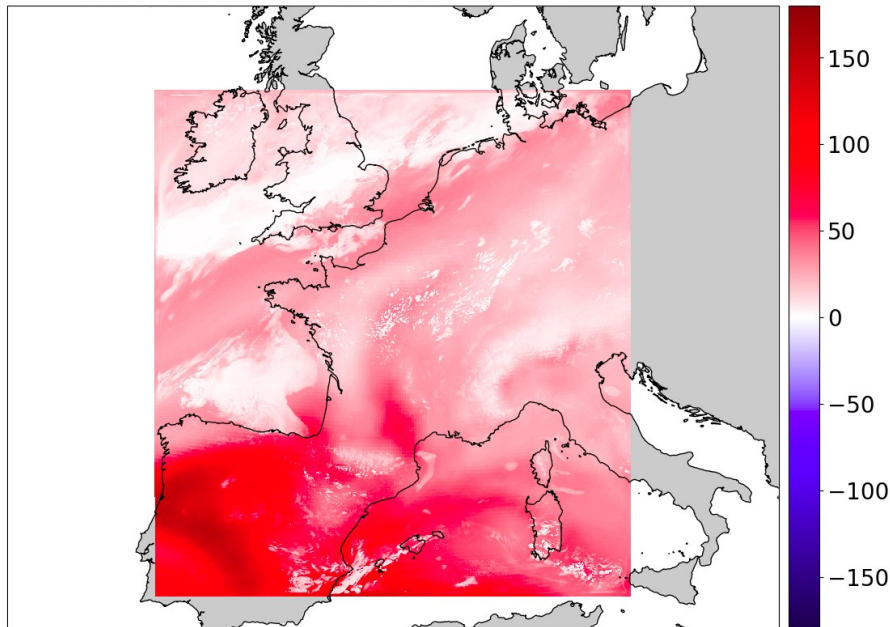
CAMS NRT – CAMS CLIM

- 134 W m^{-2} (16,5 % du flcp)

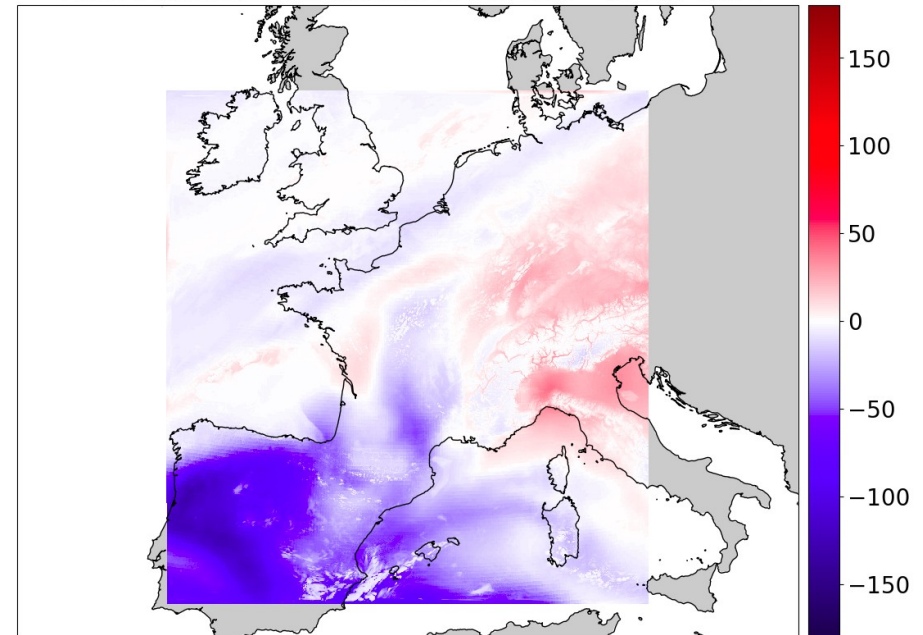
TEGEN CLIM – CAMS CLIM

- 36 W m^{-2} (5,3 % du flcp)

Total irradiance difference : Clean - CAMS NRT



Total irradiance difference: CAMS NRT - CAMS CLIM



Étude de cas : le 18 mars 2020

■ Puissance PV [W m^{-2}]

■ Impact radiatif des aérosols

- 60 W m^{-2}
- 25,4 % de la puissance en ciel propre (pcp)

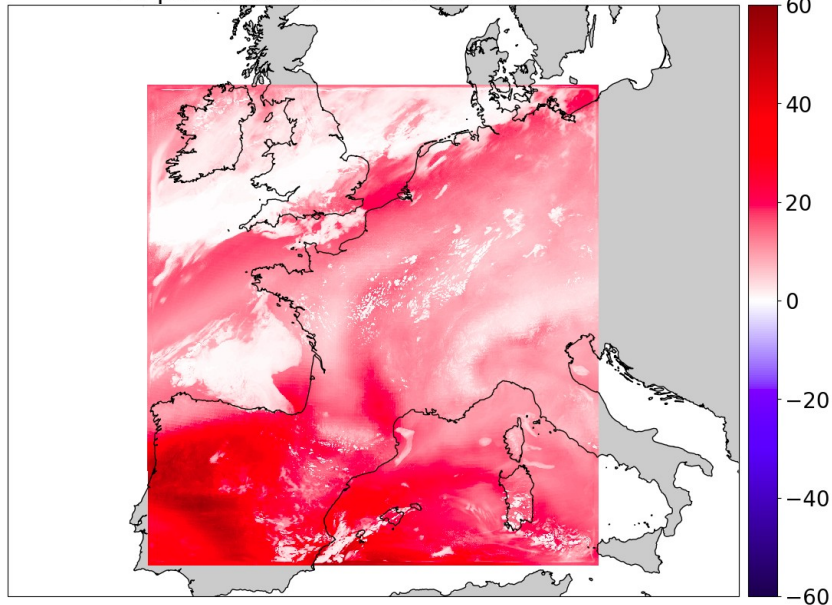
CAMS NRT – CAMS CLIM

- 49 W m^{-2} (20,1 % du pcp)

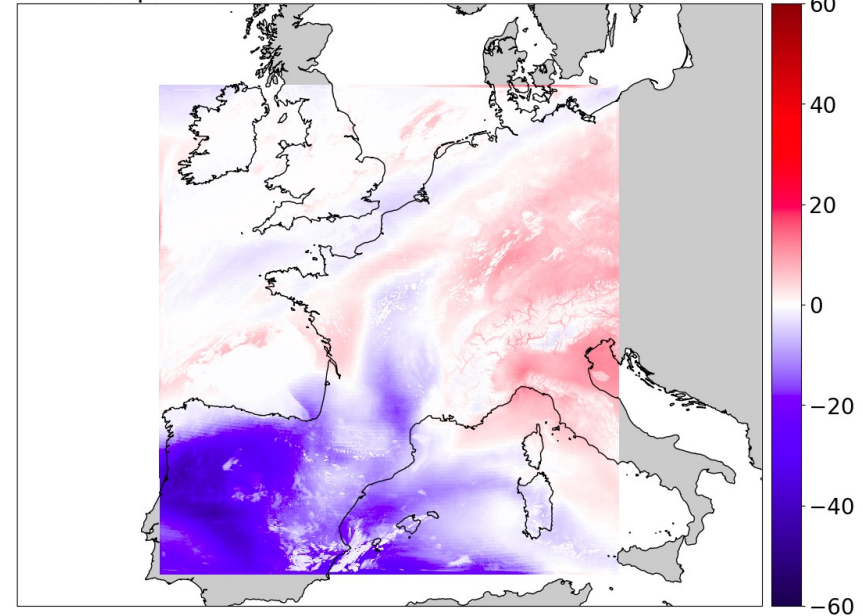
TEGEN CLIM – CAMS CLIM

- 13 W m^{-2} (5,3 % du pcp)

PV power difference : Clean - CAMS NRT



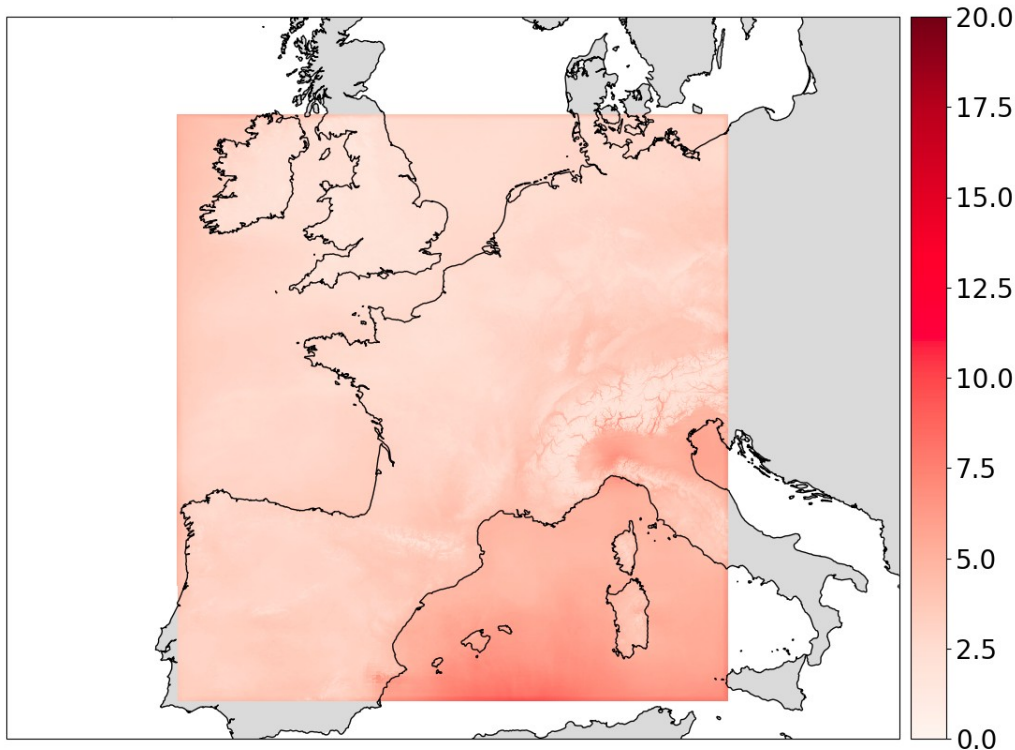
PV power difference: CAMS NRT - CAMS CLIM



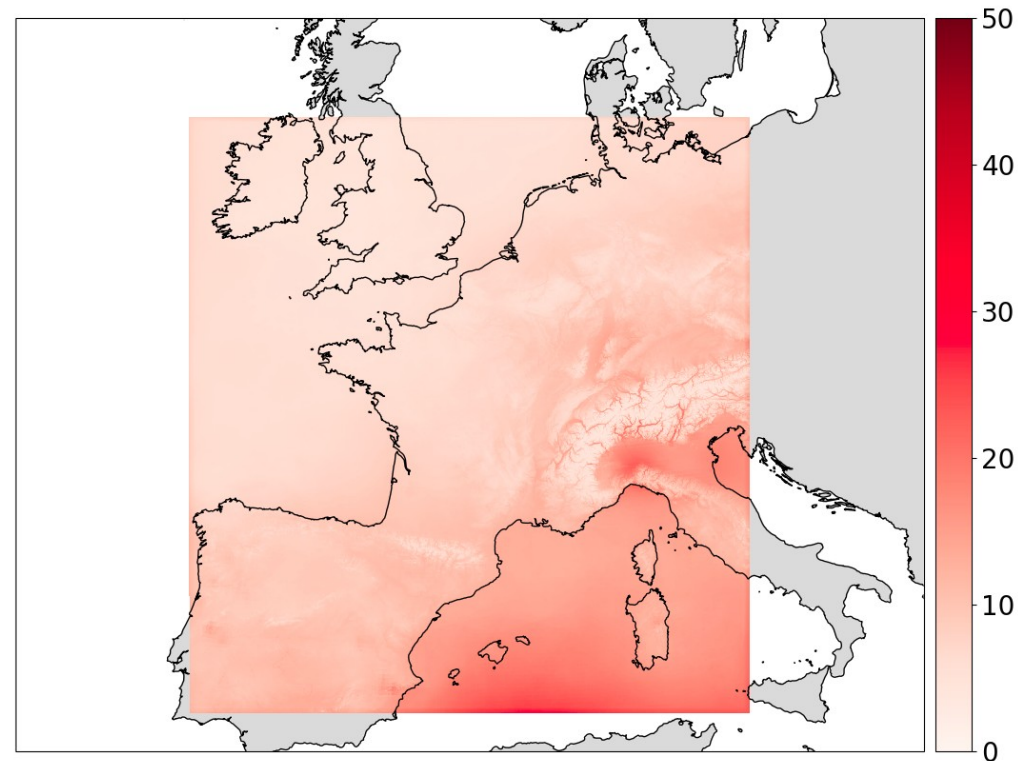
Statistiques globales annuelles

- RMSD annuelle sur le domaine complet puissance PV

PV[W/m²]

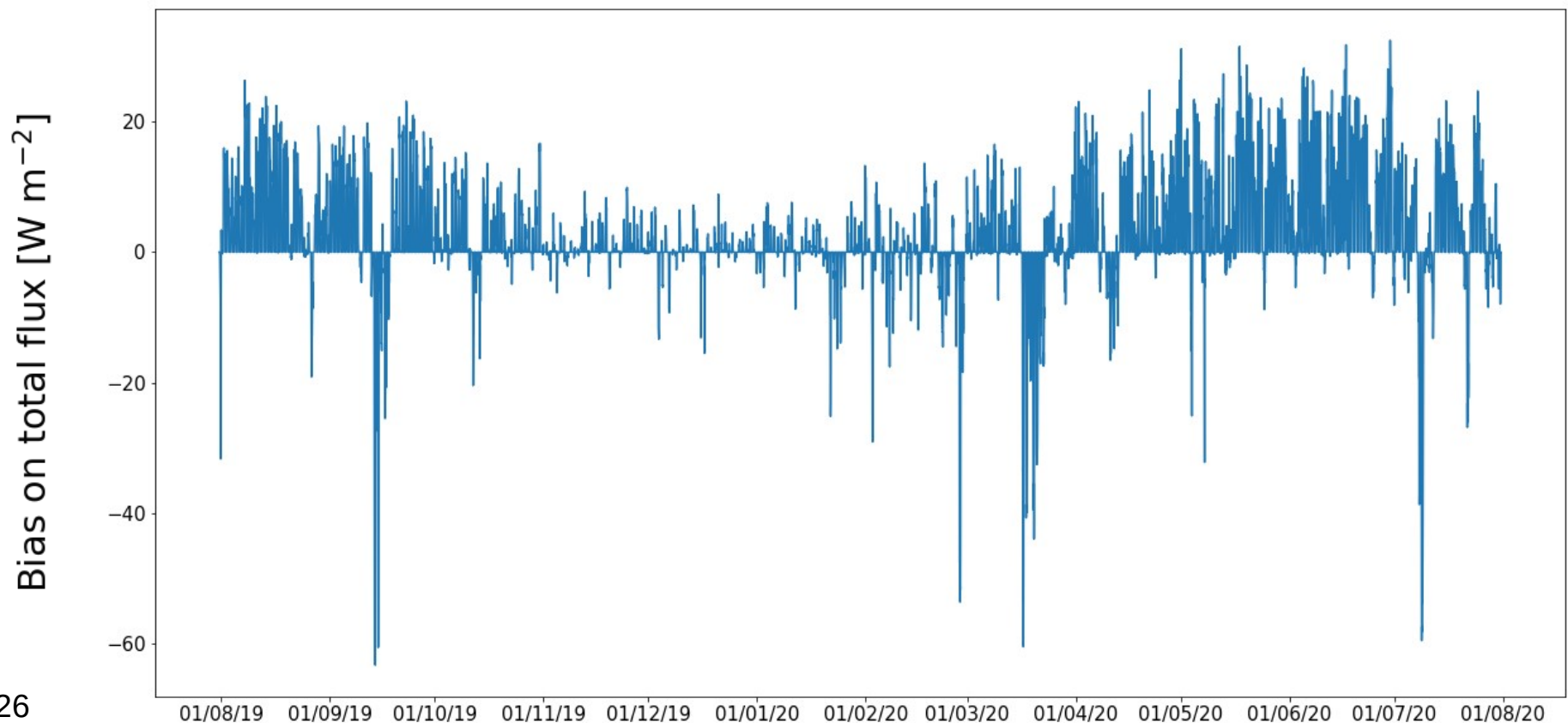


Irradiance[W/m²]



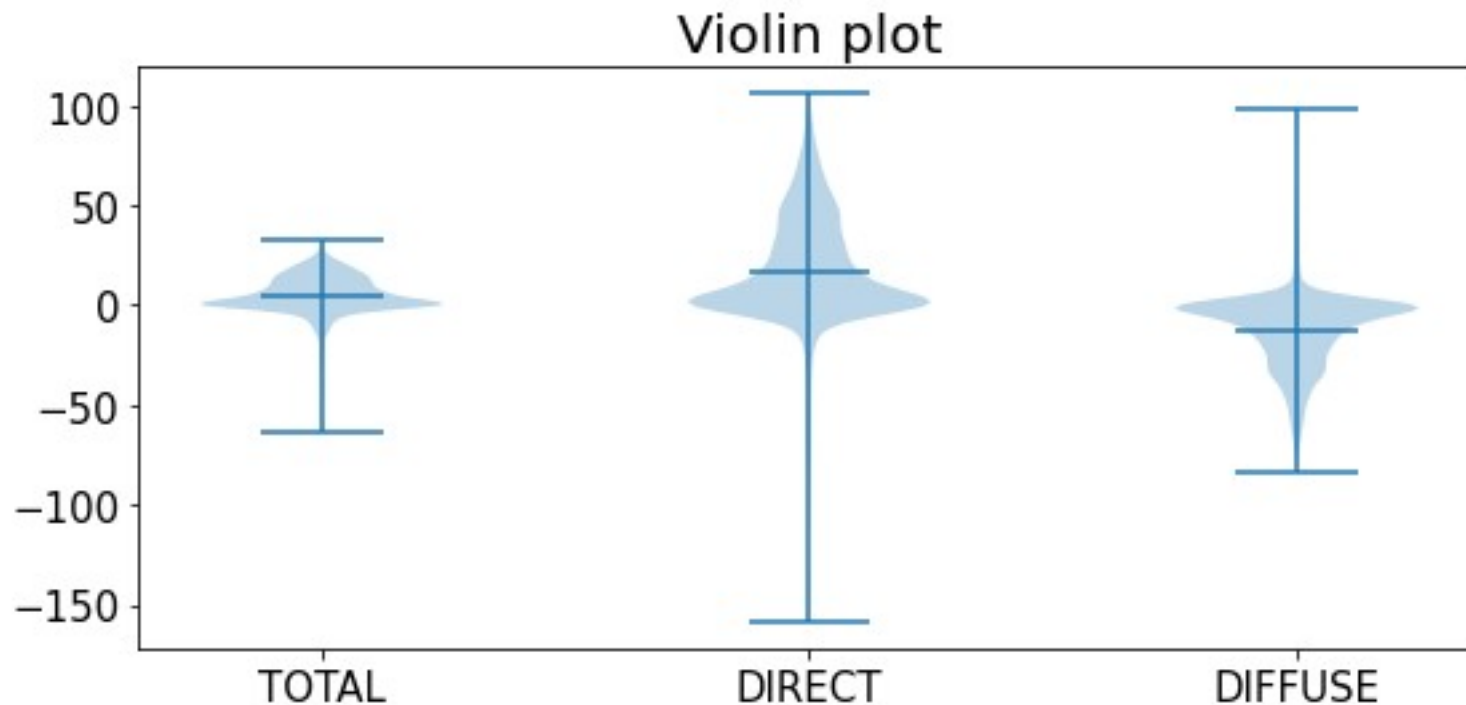
Série temporelle annuelle

- Application à un point : Pampelune
- Différence entre NRT et Climatologie CAMS (NRT - CLIM)
 - Moyenne : 4,4 W/m²
 - RMSE : 11,6 W/m²



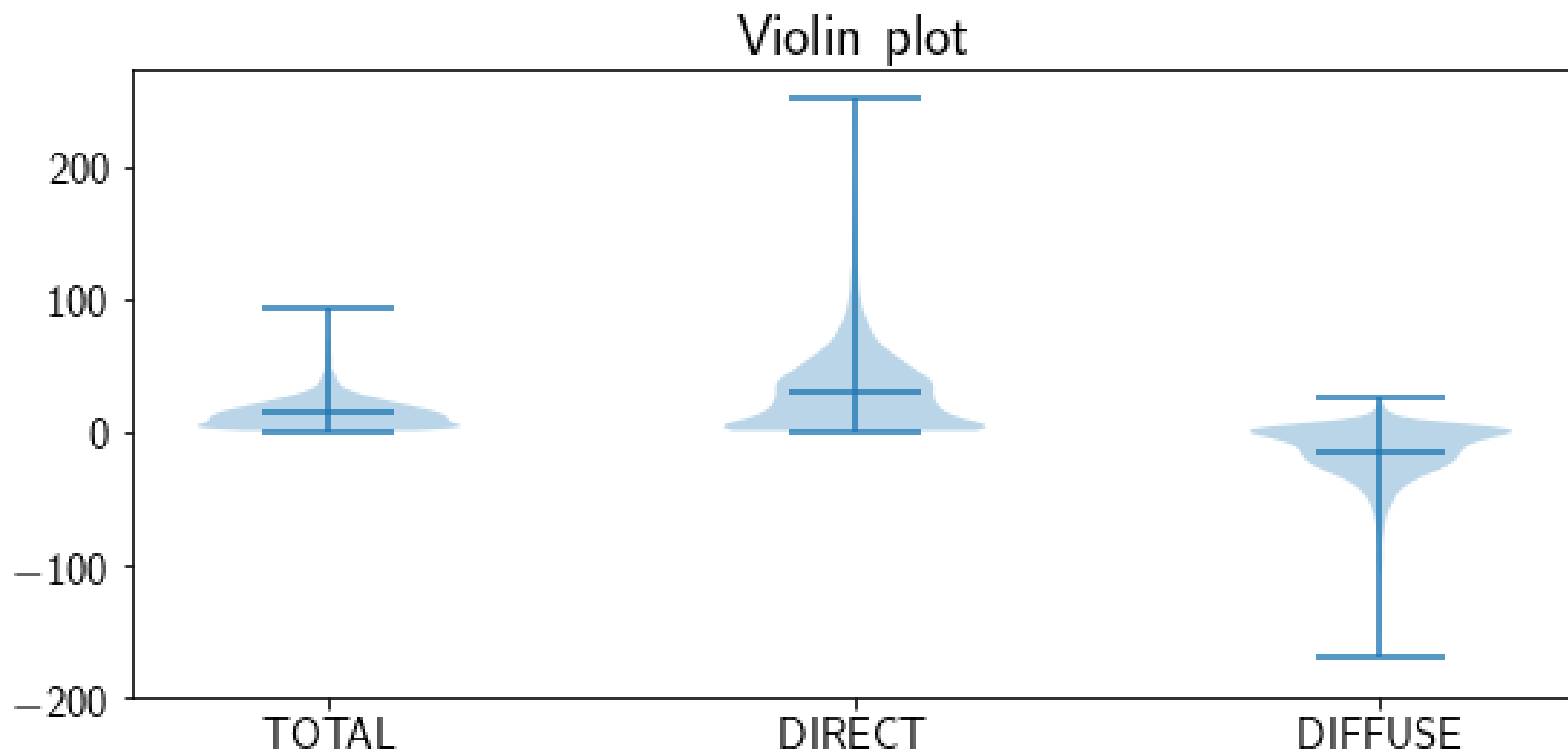
Distribution des différences

- Application à un point : Pampelune
- Différence entre NRT et Climatologie CAMS (NRT – CLIM)
 - Moyenne :
 - 4,4 W/m² [TOT] 16,5 W/m² [DIR] -12,1 W/m² [DIF]



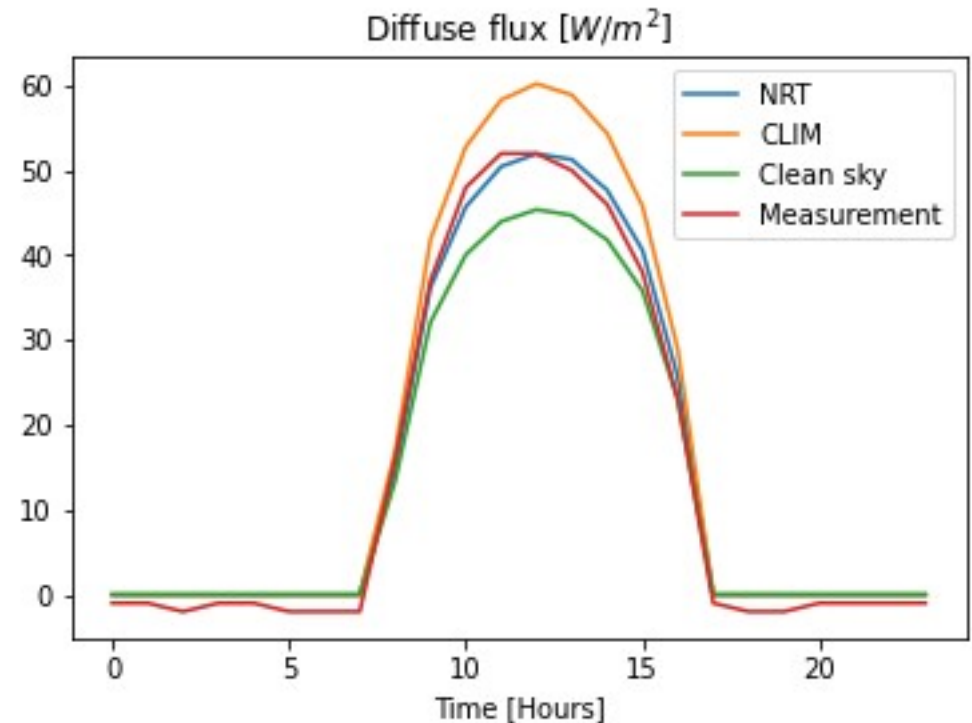
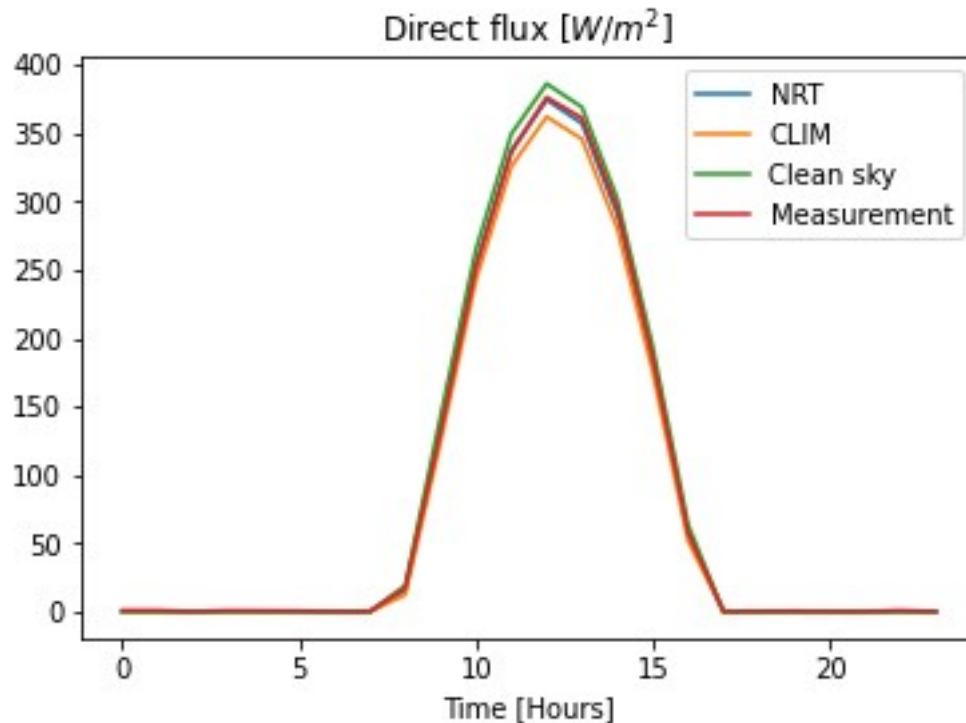
Distribution des différences

- Application à un point : Pampelune
- Impact des aérosols (CLEAN – NRT)
 - Moyenne :
 - 13,6 W/m² [TOT] 30,2 W/m² [DIR] -16,6 W/m² [DIF]



Vers les mesures sur site : Pampelune

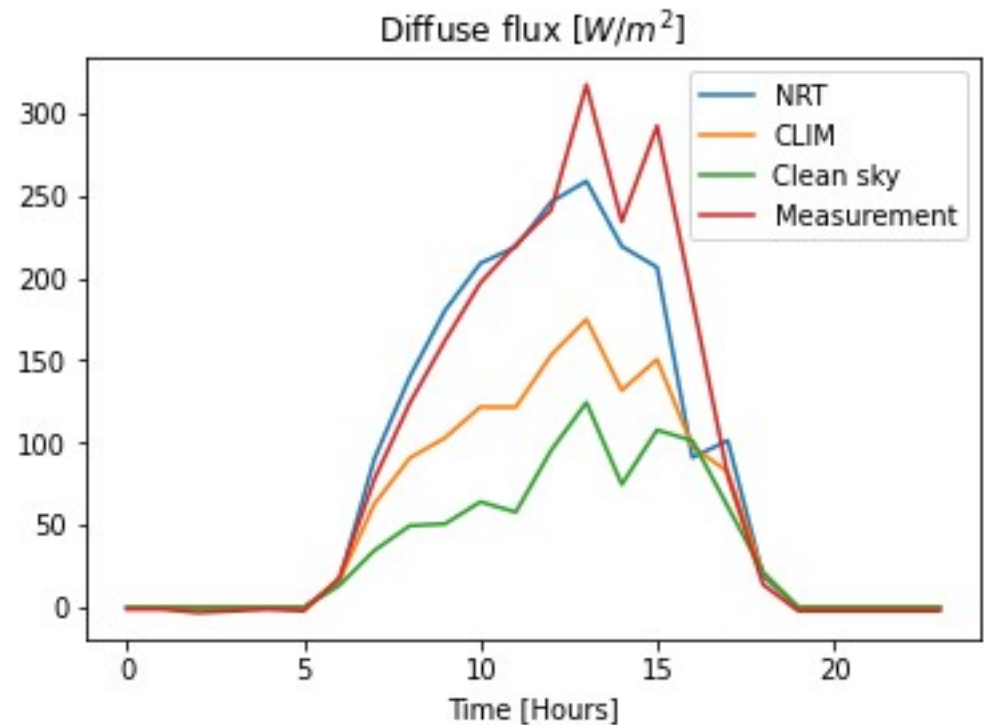
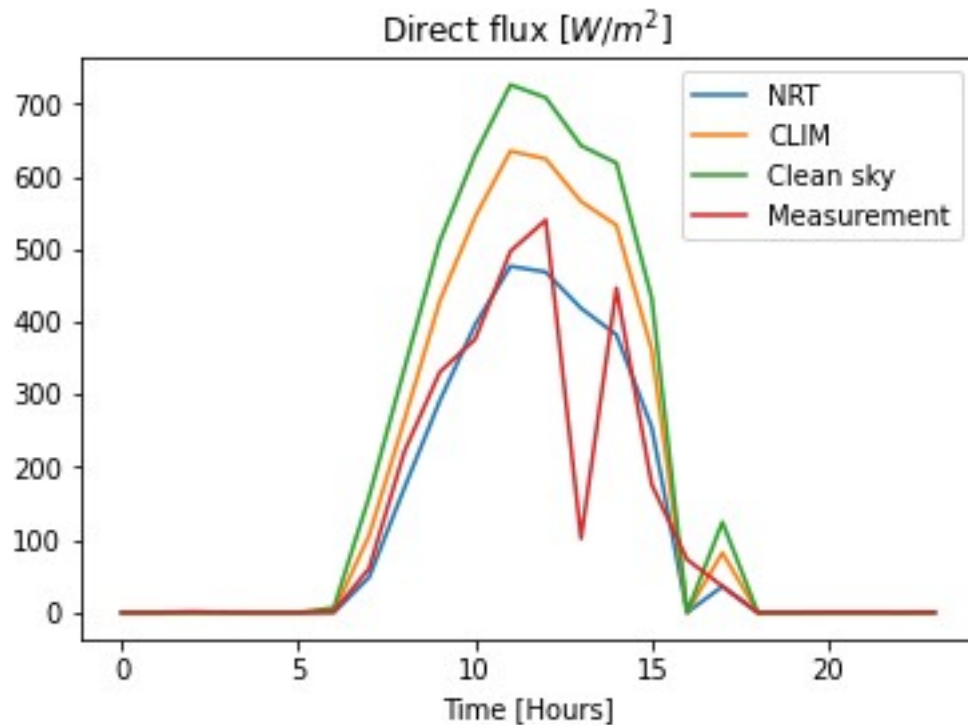
- Comparaison sur la station de CENER¹ (Pampelune, Espagne)
 - 06/01/20 : un jour avec peu d'aérosols



¹ cener.com

Vers les mesures sur site : Pampelune

- Comparaison sur la station de CENER¹ (Pampelune, Espagne)
 - 14/09/19 : un jour avec beaucoup d'aérosols



¹ cener.com



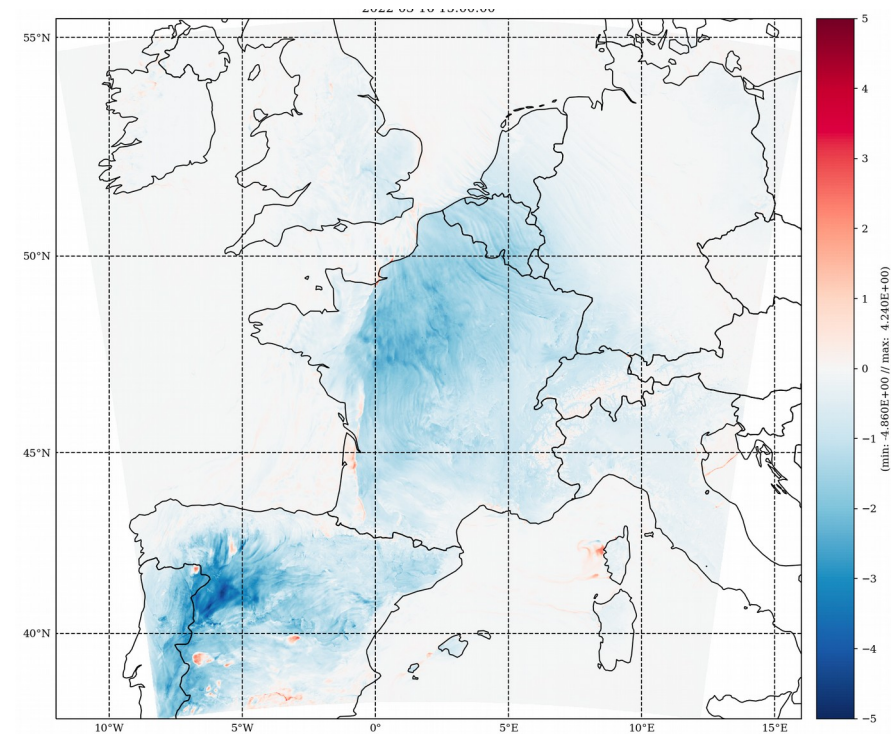
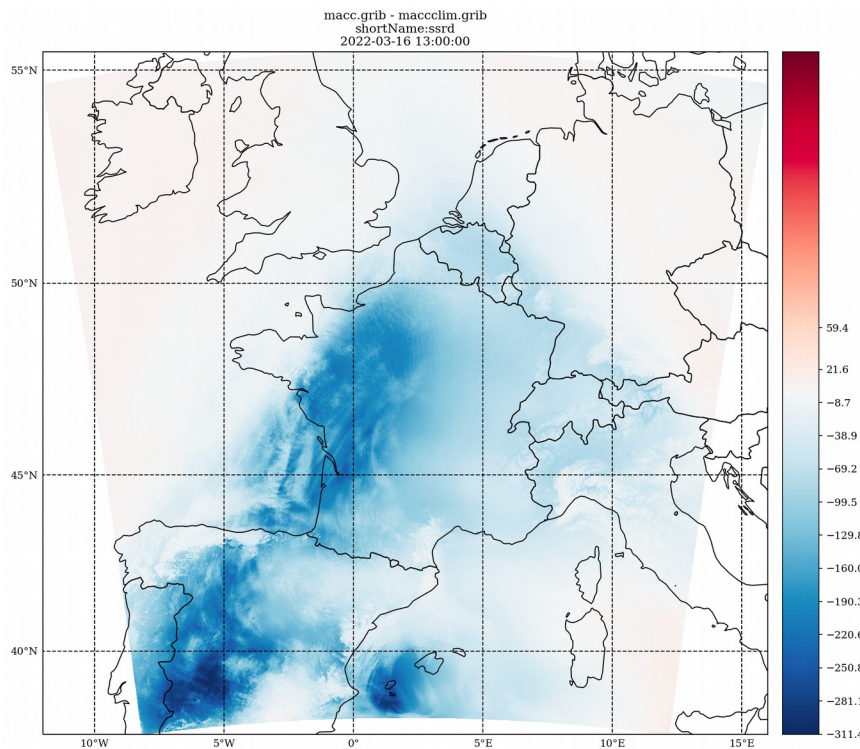
Conclusions et perspectives

Conclusions

- Épaisseur optique insuffisante
- Gros impact de la nature de l'aérosol sur PV
- Erreurs liées aux climatologies
- Biais de plusieurs dizaines de W/m^2 localement
- On peut améliorer les prédictions en utilisant NRT

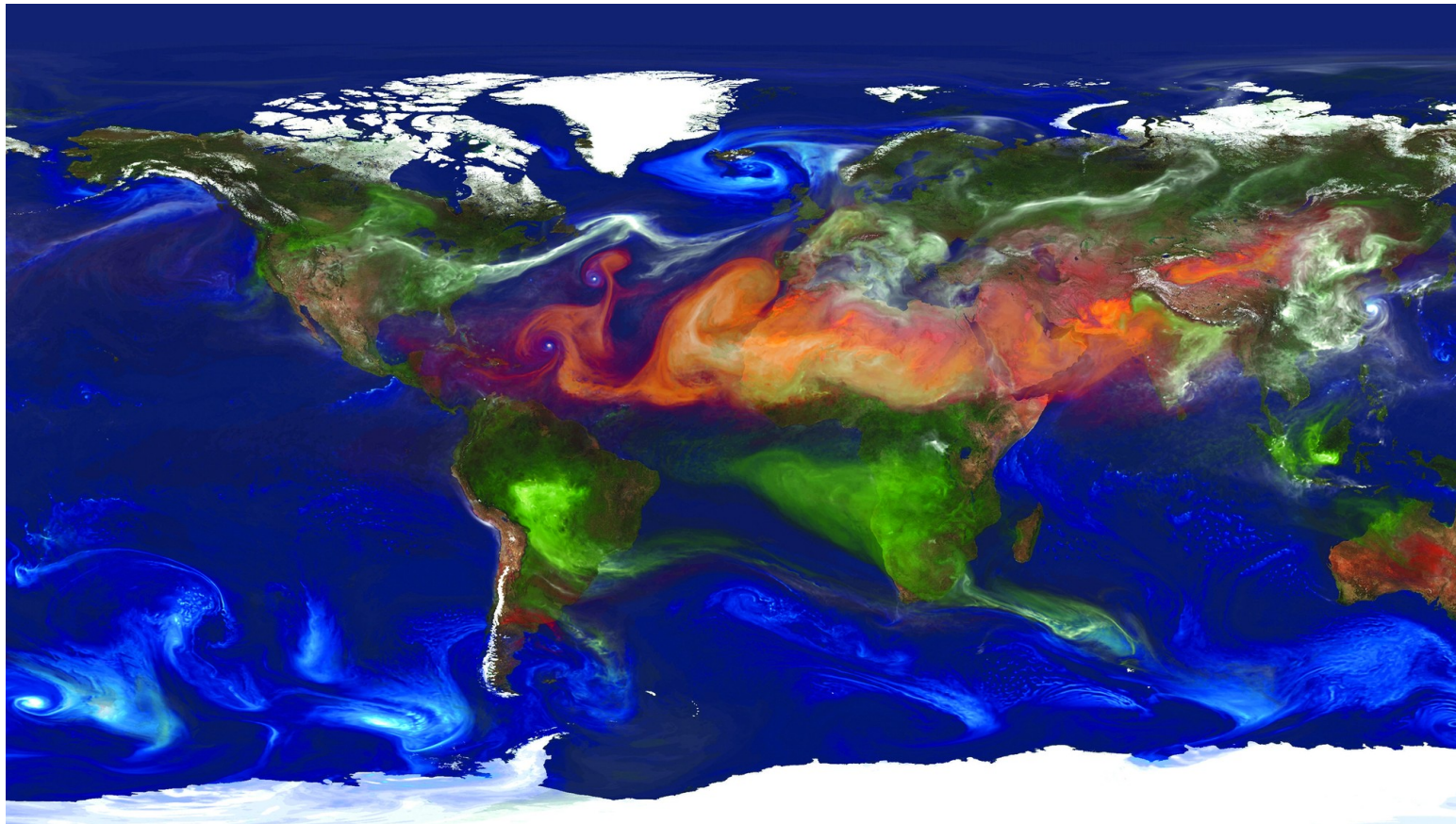
Perspectives

- Utiliser des aérosols NRT en PNT (de CAMS ou MOCAGE)
 - Stage prévu cet été pour la mise en place sur AROME
- Gérer les aérosols (émission, évolution, transport, dépôt) directement dans AROME
- Impact sur le rayonnement mais aussi et surtout sur la température : le 16/03/22



Merci pour votre attention !

Des questions ?





Annexes

Sources

[Adrian 2020] W. Adrian, R. Sonia, A. Dennis, E. Nazik, E. Gerardo et A. Iana. Renewable Energy Statistics 2020. Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.

[Boucher 2013] O. Boucher, D. Randall, P. Artaxo, C. Bretherton, G. Feingold, P. Forster, V.-M. Kerminen, Y. Kondo, H. Liao, U. Lohmann et al. Clouds and aerosols. Climate change 2013 : the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pages 571–657, 2013.

[Dubovik 2002] O. Dubovik, B. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanré et I. Slutsker. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. Journal of the atmospheric sciences, vol. 59, no. 3, pages 590–608, 2002.

[Florentin 2017] R. Florentin. Propagation et contrôle adaptatif de la lumière amplifiée dans une fibre multimode. Doctoral dissertation, Limoges, 2017.

[Hess 1998] M. Hess, P. Koepke et I. Schult. Optical properties of aerosols and clouds : The software package OPAC. Bulletin of the American meteorological society, vol. 79, no. 5, pages 831–844, 1998.

[Hogan 2018] R. J. Hogan et A. Bozzo. A flexible and efficient radiation scheme for the ECMWF model. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, vol. 10, no. 8, pages 1990–2008, 2018.

Sources

[Lindsay 2020] N. Lindsay, Q. Libois, J. Badosa, A Migan-Dubois et V. Bourdin. Errors in PV power modelling due to the lack of spectral and angular details of solar irradiance inputs. Solar Energy, vol. 197, pages 266–278, 2020.

[Mishchenko 2002] M. Mishchenko, J. Penner et D. Anderson. Global aerosol climatology project, 2002.

[Neher 2017] Neher, I., Buchmann, T., Crewell, S., Evers-Dietze, B., Pfeilsticker, K., Pospichal, B., Schirrmeister, C. and Meilinger, S. : Impact of atmospheric aerosols on photovoltaic energy production Scenario for the Sahel zone, Energy Procedia, Elsevier, 125, 170-179, 2017.

[Notton 2018] Notton, G., Nivet, M.-L., Voyant, C., Paoli, C., Darras, C., Motte, F., and Fouilloy, A.: Intermittent and stochastic character of renewable energy sources: Consequences, cost of intermittence and benefit of forecasting, Renewable and sustainable energy reviews, 87, 96–105, 2018.

[Tegen 1997] I. Tegen, P. Holrig, M. Chin, I. Fung, D. Jacob and J. Penner : Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness : Estimates from model results. Journal of Geophysical Research : Atmospheres, vol. 102, no. D20, pages 23895–23915, 1997.