

# Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère 2026

## Session DEPHY

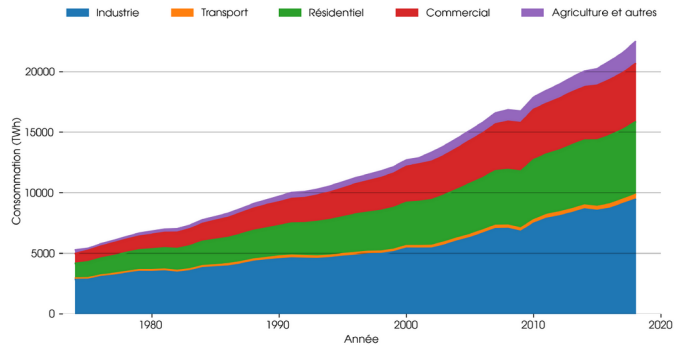
*Outils et méthodologies pour le développement de paramétrisations et la réduction des biais des modèles*

## Utilisation des profils nuageux pour une meilleure caractérisation des erreurs de prévision du rayonnement solaire dans les modèles de PNT

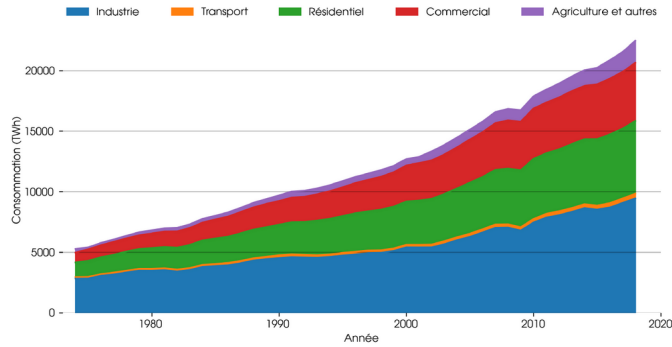
M. Ewart<sup>1</sup>, Q. Libois<sup>2</sup>, S. Riette<sup>1</sup>, M.-A. Magnaldo<sup>3</sup>, C. Lac<sup>4</sup>

1. CNRM/GMME/PHYNH ; 2. CNRM/GMEI/D ; 3. DSM/CS/Energie ; 4. CNRM/GMME/D

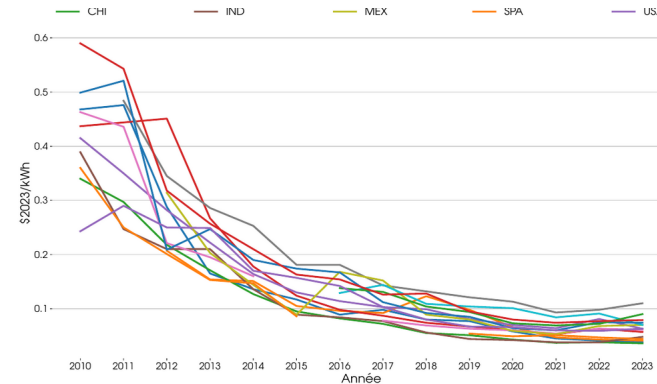
# Météorologie & Énergie



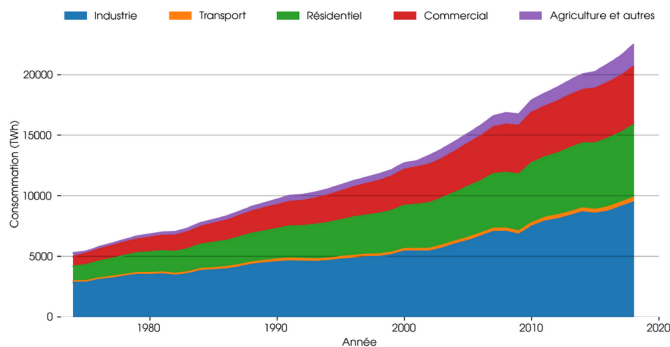
Consommation finale d'électricité par secteur  
(IEA, 2021)



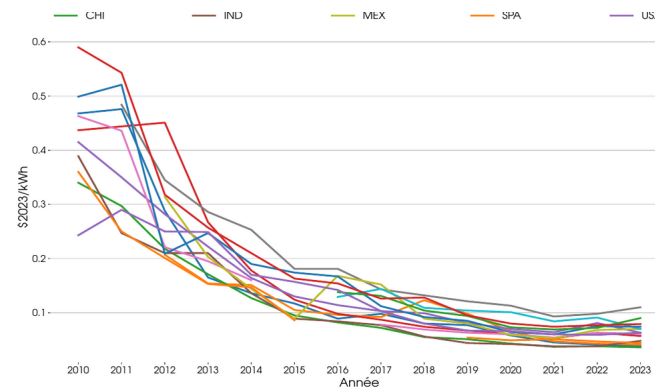
Consommation finale d'électricité par secteur (IEA, 2021)



Coût de revient, pondéré par capacité, des nouvelles fermes solaires par pays. (IRENA, 2024)



Consommation finale d'électricité par secteur (IEA, 2021)



Coût de revient, pondéré par capacité, des nouvelles fermes solaires par pays. (IRENA, 2024)



Journal officiel  
de l'Union européenne

FR  
Série L

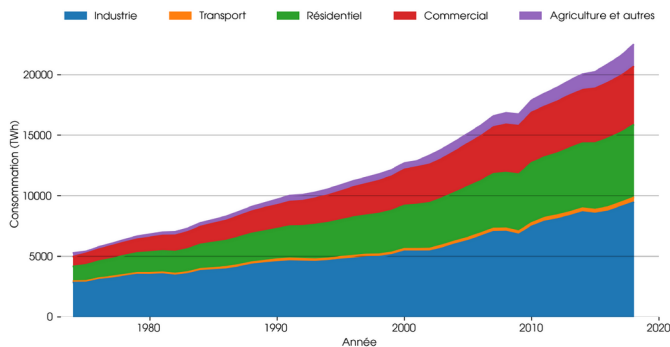
2023/2413

31.10.2023

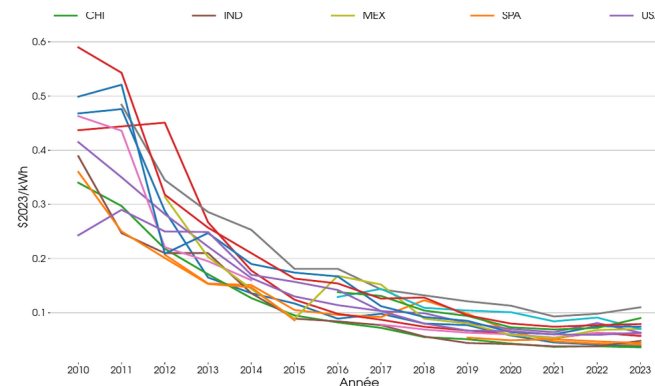
**DIRECTIVE (UE) 2023/2413 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL**

**du 18 octobre 2023**

**modifiant la directive (UE) 2018/2001, le règlement (UE) 2018/1999 et la directive 98/70/CE en ce qui concerne la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, et abrogeant la directive (UE) 2015/652 du Conseil**



Consommation finale d'électricité par secteur (IEA, 2021)



Coût de revient, pondéré par capacité, des nouvelles fermes solaires par pays. (IRENA, 2024)

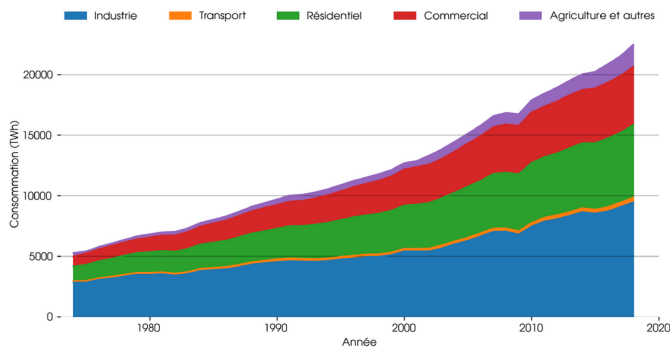


Journal officiel  
de l'Union européenne

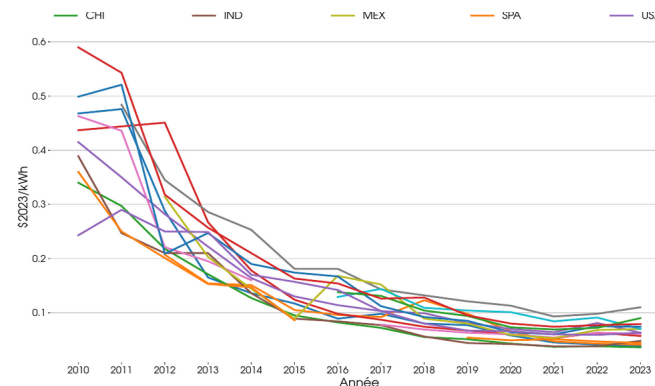
- (3) La directive (UE) 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil (\*) fixe un objectif global contraignant de l'Union visant à ce que la part d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie de l'Union en 2030 soit d'au moins 32 %. Dans le cadre du plan cible en matière de climat à l'horizon 2030, énoncé dans la communication de la Commission du 17 septembre 2020 intitulée « Accroître les ambitions de l'Europe en matière de climat pour 2030: investir dans un avenir climatiquement neutre, dans l'intérêt de nos concitoyens », la part de l'énergie renouvelable dans la consommation finale brute d'énergie devrait être portée à 40 % d'ici à 2030 afin d'atteindre l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre de l'Union. Dans ce contexte, la Commission a proposé en juillet 2021, dans le cadre du train de mesures visant à mettre en œuvre le pacte vert pour l'Europe, de doubler la part de l'énergie renouvelable dans le mix énergétique d'ici à 2030 par rapport à 2020, pour atteindre au moins 40 %.

FR  
Série L

023



Consommation finale d'électricité par secteur (IEA, 2021)



Coût de revient, pondéré par capacité, des nouvelles fermes solaires par pays. (IRENA, 2024)



Journal officiel  
de l'Union européenne

FR  
Série L

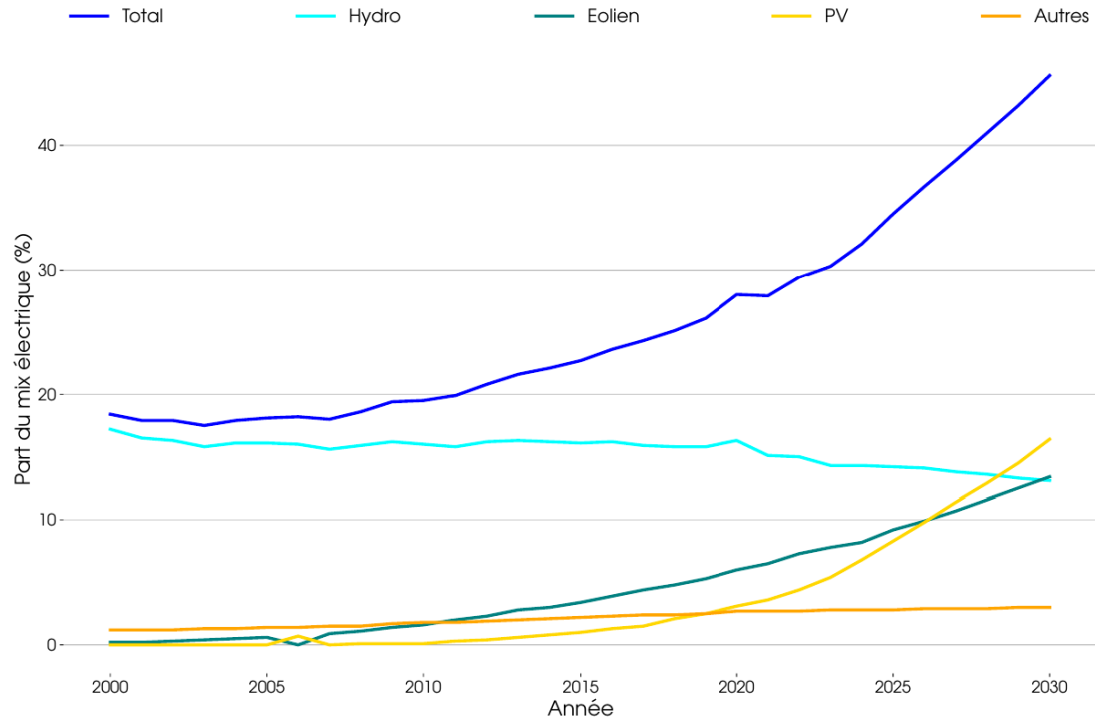
023

(3) La directive (UE) 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil (9) fixe un objectif global contraignant de l'Union visant à ce que la part d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie de l'Union en 2030 soit d'au moins 32 %. Dans le cadre de ce objectif, les États membres se voient assigner des objectifs

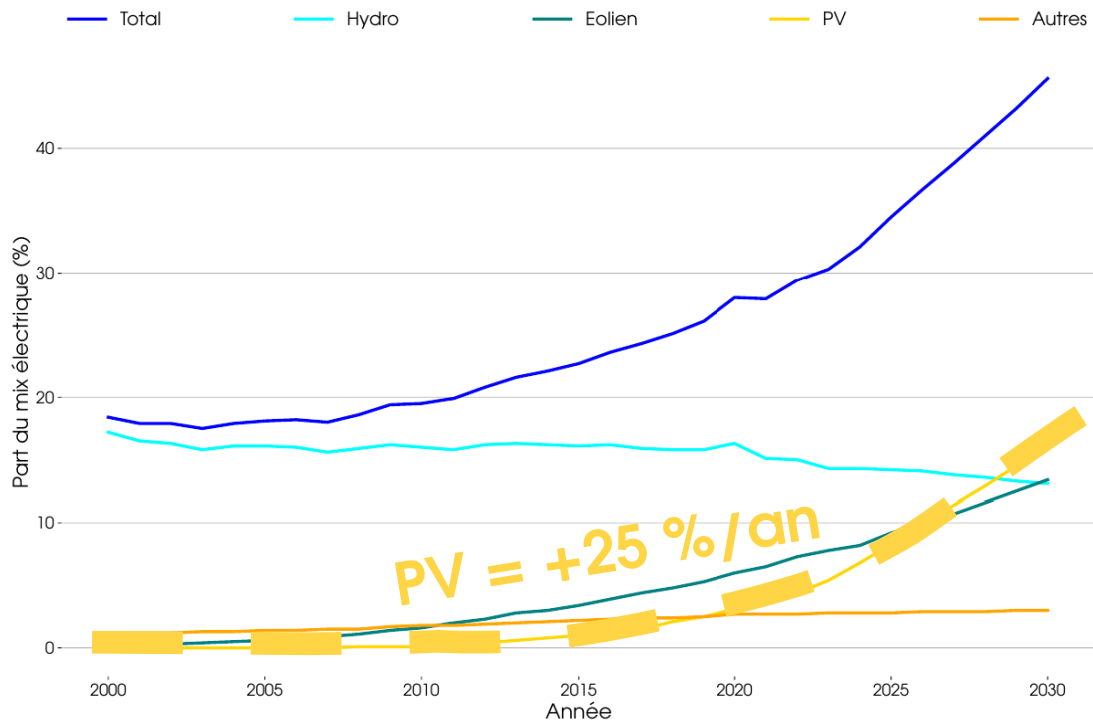
concitoyens», la part de l'énergie renouvelable dans la consommation finale brute d'énergie devrait être portée à 40 % d'ici à 2030 afin d'atteindre l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre de l'Union. Dans ce

pacte vert pour l'Europe, de doubler la part de l'énergie renouvelable dans le mix énergétique d'ici à 2030 par rapport à 2020, pour atteindre au moins 40 %.

# Météorologie & Énergie

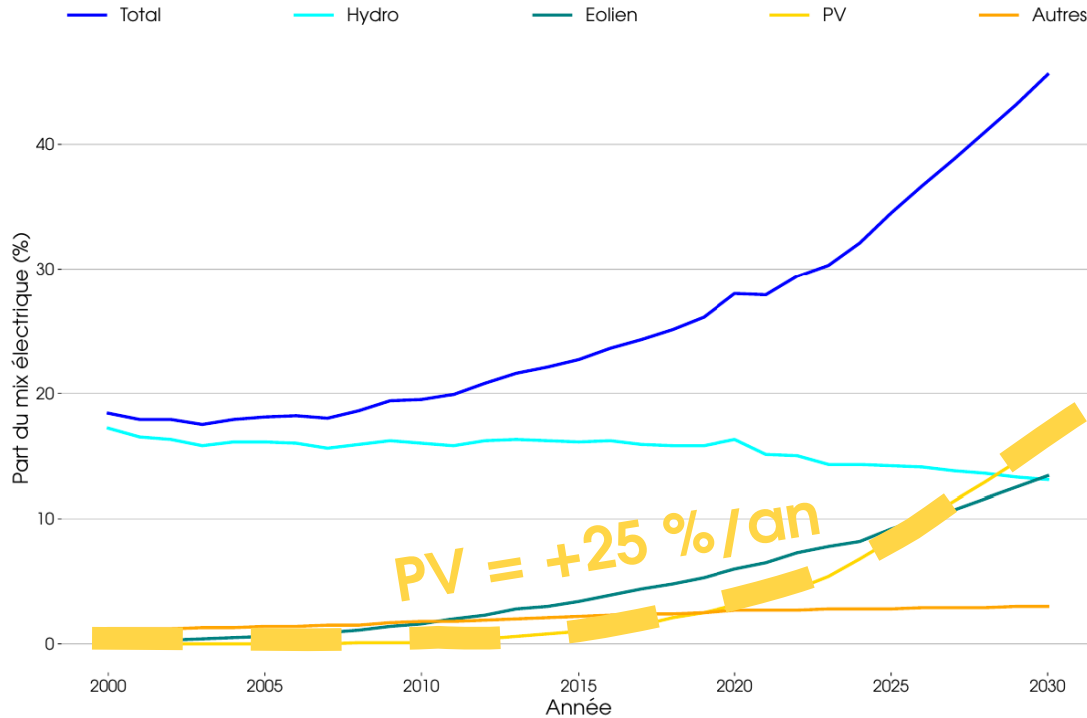


# Météorologie & Énergie



Première source d'électricité renouvelable d'ici 2030 !

# Météorologie & Énergie



Première source d'électricité renouvelable d'ici 2030 !





**Prévoir l'énergie solaire reste difficile...**

(Widen et al., 2015 ; Antonanzas et al. 2016)

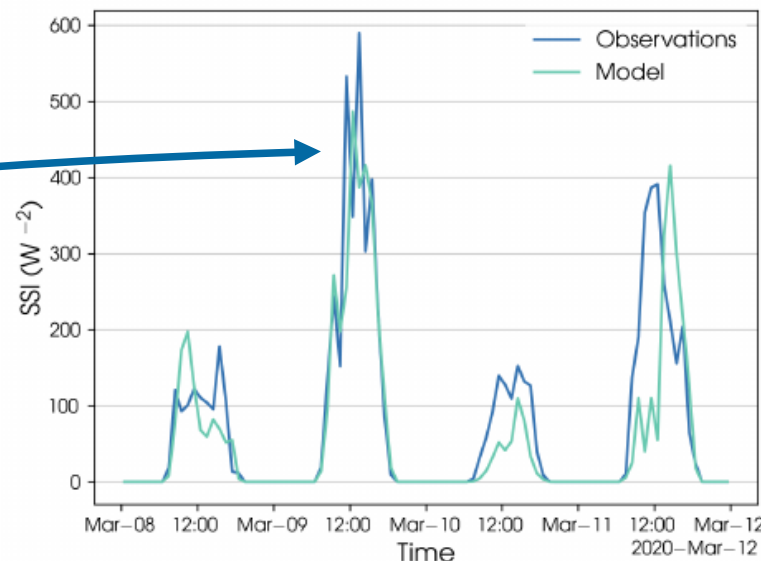
$$P_{PV} = f(SSI, T_{2m}, U_{10m}, \dots)$$



**Prévoir l'énergie solaire reste difficile...**

(Widen et al., 2015 ; Antonanzas et al. 2016)

$$P_{PV} = f(SSI, T_{2m}, U_{10m}, \dots)$$



Séries temporelles du SSI observé à Blagnac par pyranomètre (bleu) et prévu par AROME (vert)

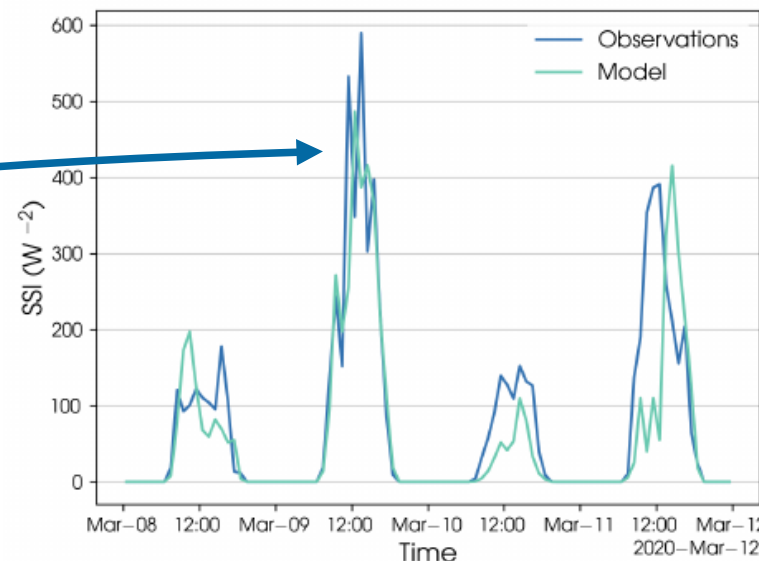


**Prévoir l'énergie solaire reste difficile...**

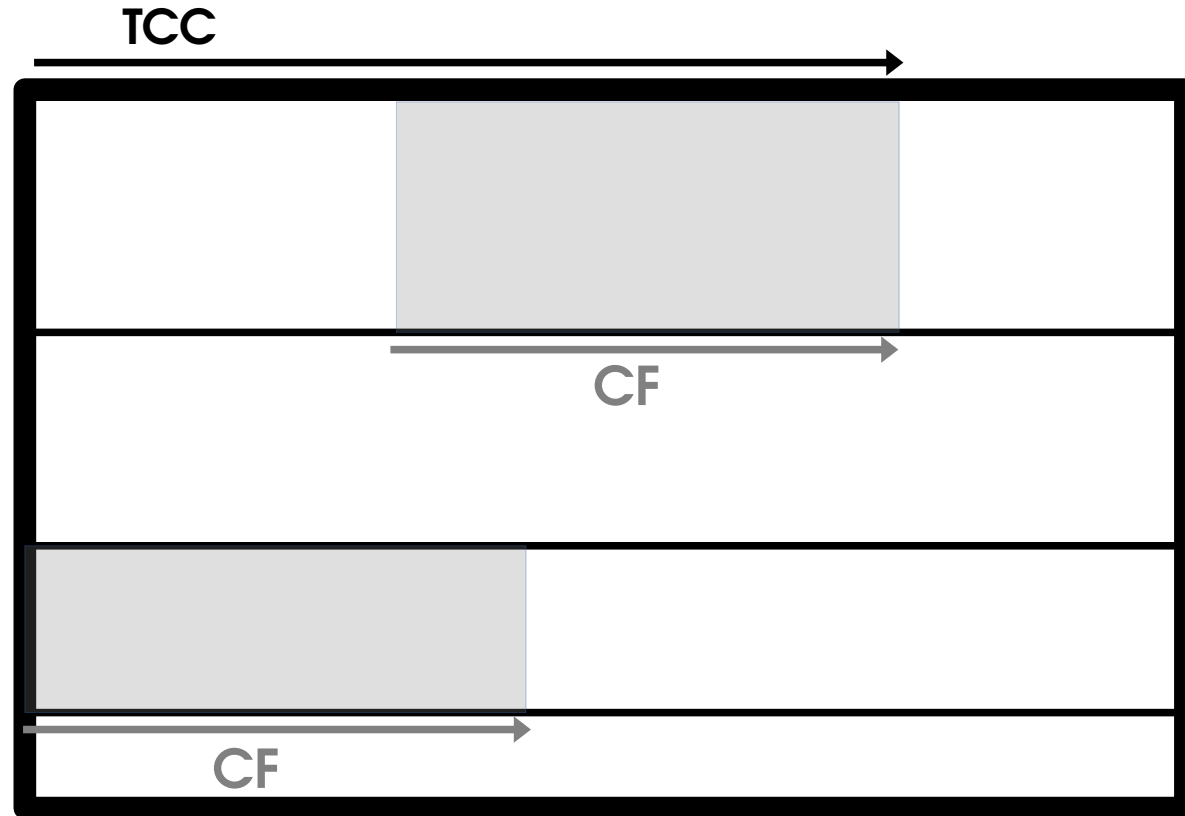
(Widen et al., 2015 ; Antonanzas et al. 2016)

$$P_{PV} = f(\text{SSI}, T_{2m}, U_{10m}, \dots)$$

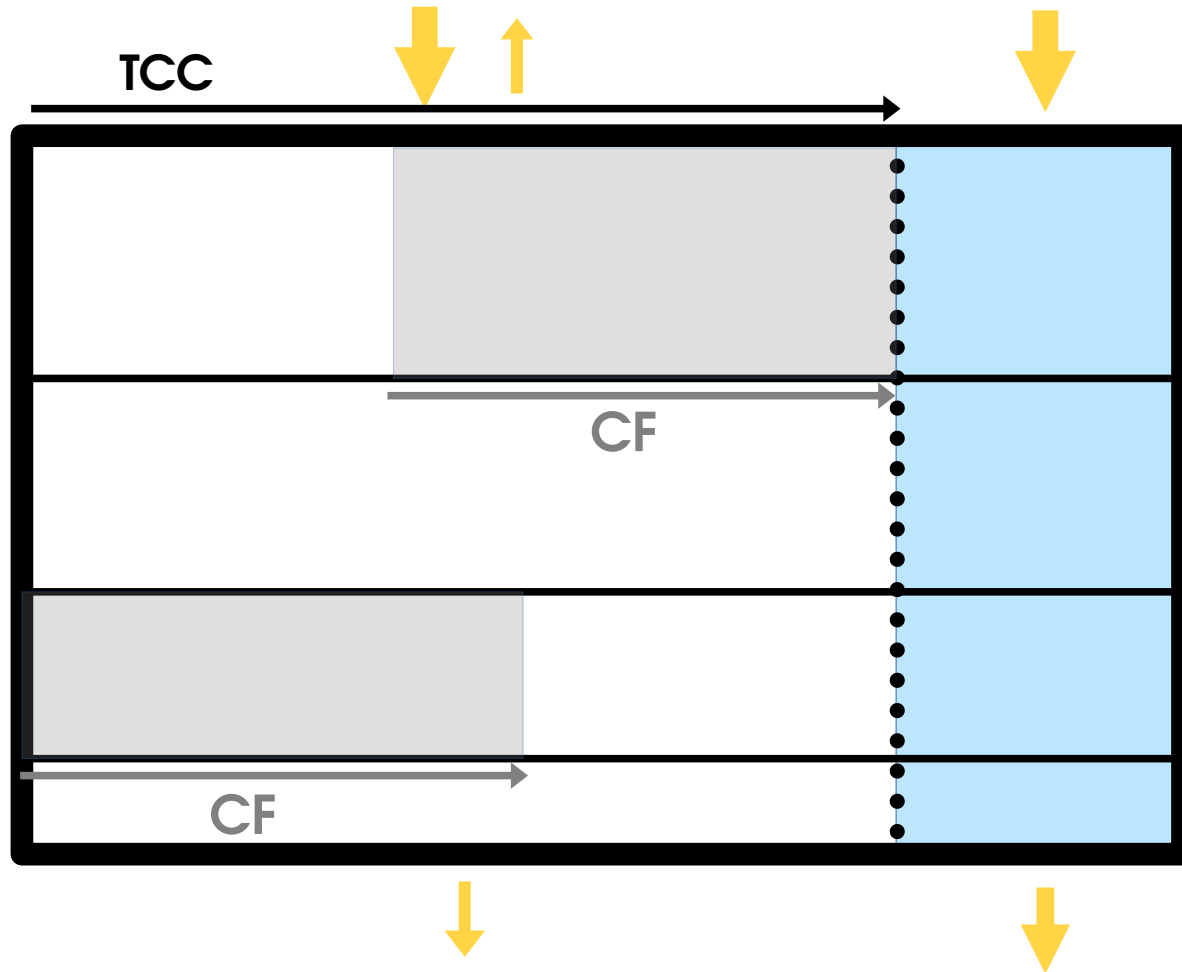
Les services météorologiques peuvent appuyer la transition vers les renouvelables en **améliorant les prévisions de Surface Solar Irradiance (SSI)**



Séries temporelles du SSI observé à Blagnac (bleu) et prévu par AROME (vert)

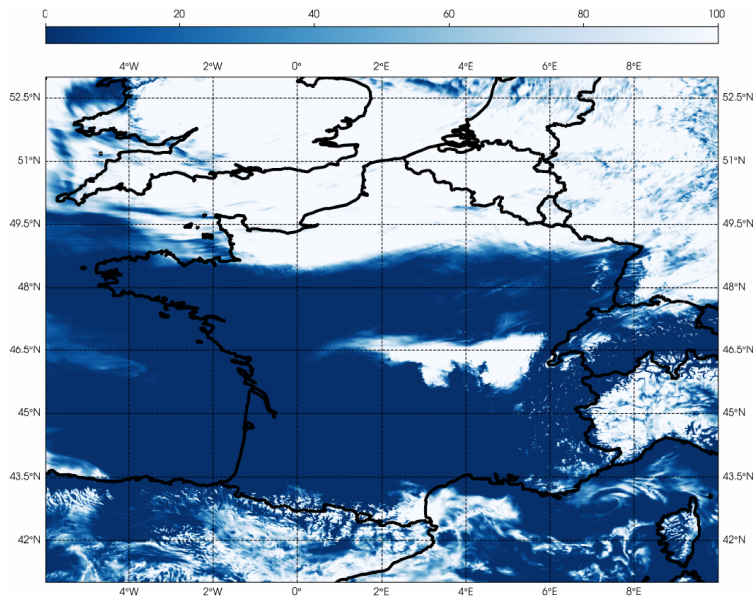


# Modélisation des nuages



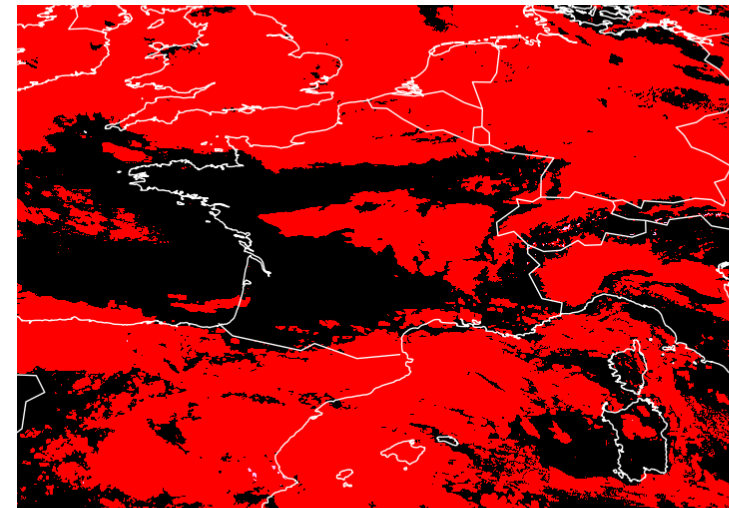
1) Évaluer le modèle au-delà de scores classiques (Magnaldo et al., 2024)

## « Occurrences des nuages ? »



Prévision AROME de nébulosité TCC

Cloudy Clear-sky



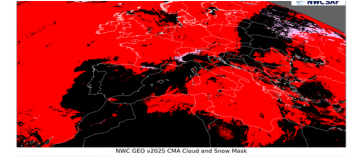
Produit « Cloud Mask » du SAF NWC

# Vers une amélioration des prévisions de SSI



1) Évaluer le modèle au-delà de scores classiques (Magnaldo et al., 2024)

« Problèmes d'occurrences ? »

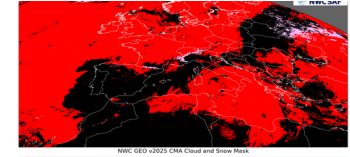


Mask		NWC SAF	
		Cloud	Clear-sky
AROME	*Cloud	Hit	False alarm
	Clear-sky	Miss	Clear-sky

\* TCC > 2 %

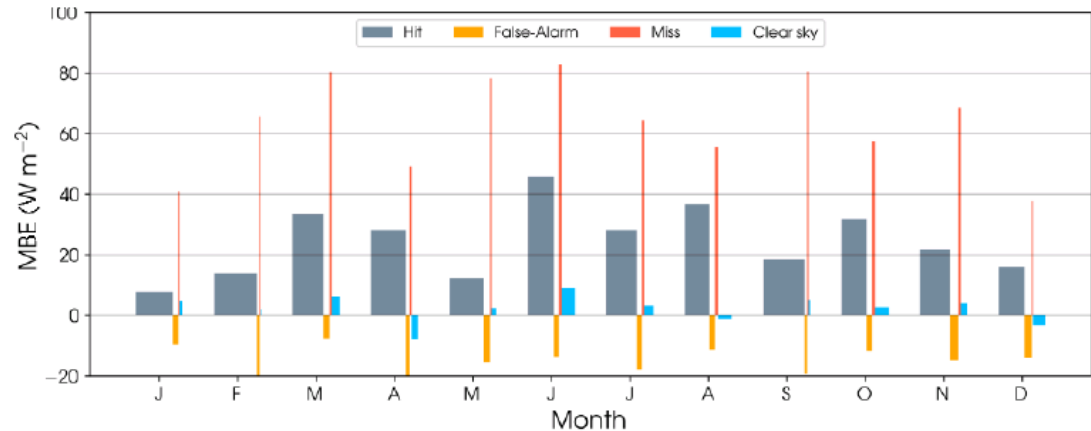
# Vers une amélioration des prévisions de SSI

- 1) Évaluer le modèle au-delà de scores classiques (Magnaldo et al., 2024)  
 « Problèmes d'occurrences ? »



		NWC SAF	
		Cloud	Clear-sky
AROME	*Cloud	Hit	False alarm
	Clear-sky	Miss	Clear-sky

\* TCC > 2 %

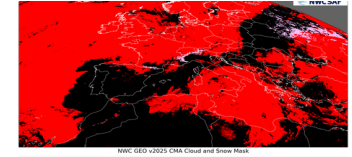


Evaluation des biais moyens mensuels de SSI par cas de détection

# Vers une amélioration des prévisions de SSI

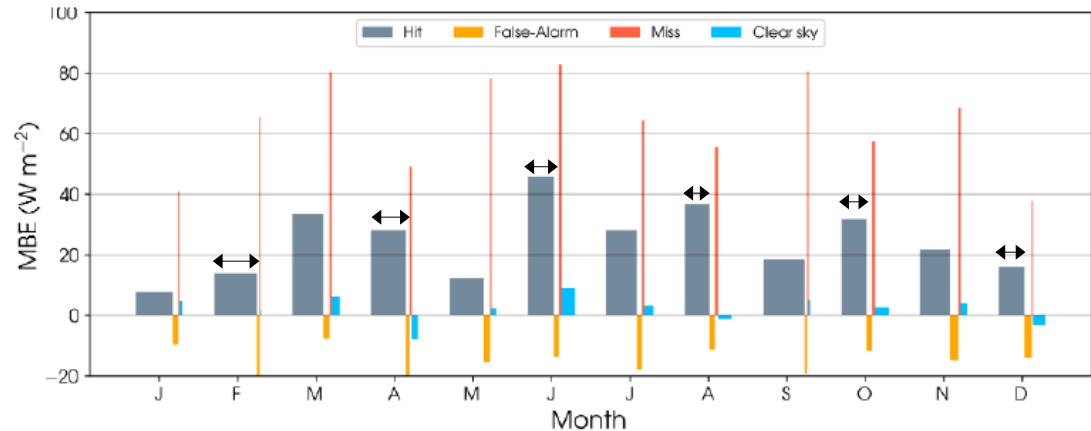
1) Évaluer le modèle au-delà de scores classiques (Magnaldo et al., 2024)

« Problèmes d'occurrences ? »



		NWC SAF	
		Cloud	Clear-sky
AROME	*Cloud	Hit	False alarm
	Clear-sky	Miss	Clear-sky

\* TCC > 2 %

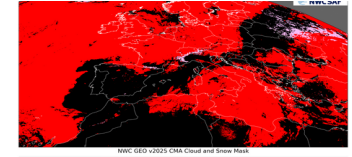


Evaluation des biais moyens mensuels de SSI par cas de détection

# Vers une amélioration des prévisions de SSI

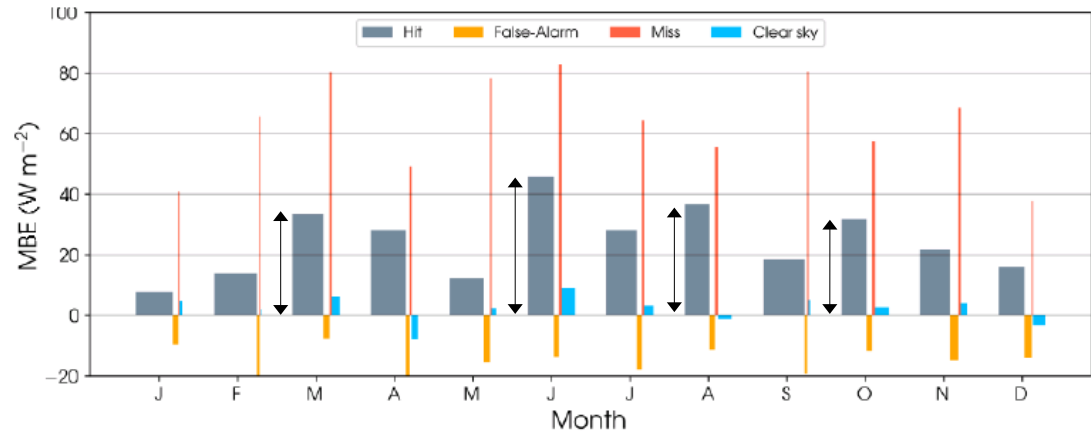
1) Évaluer le modèle au-delà de scores classiques (Magnaldo et al., 2024)

## « Problèmes d'occurrences ? »



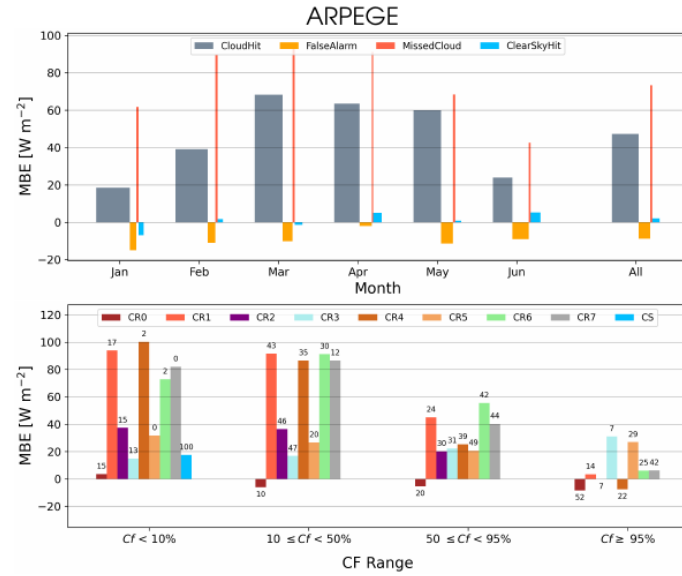
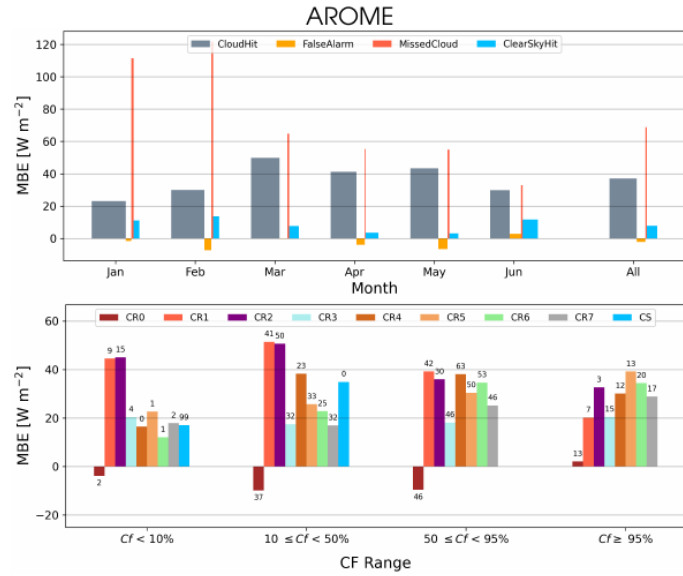
		NWC SAF	
		Cloud	Clear-sky
AROME	*Cloud	Hit	False alarm
	Clear-sky	Miss	Clear-sky

\* TCC > 2 %

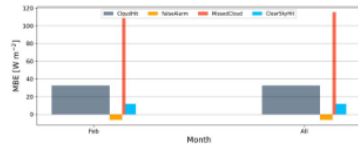


Evaluation des biais moyens mensuels de SSI par cas de détection

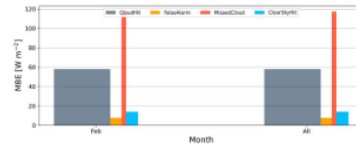
⇒ Contribution importante des bonnes détections de nuages (« Hit ») au **biais global positif**



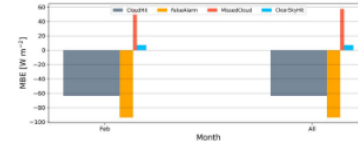
### ICE3



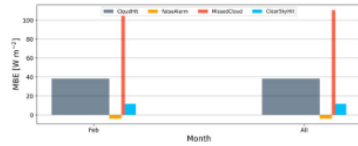
### LIMAC



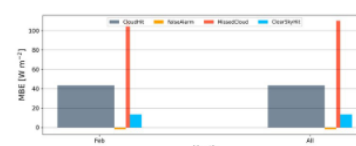
### LIMA



### ICE3JW



### LIMAC sans N dans ECRAD



### LIMA cfave

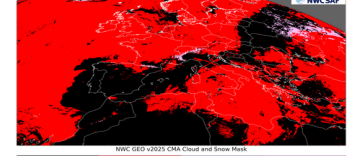


# Vers une amélioration des prévisions de SSI

---



1) Évaluer le modèle **au-delà de scores classiques** (*Magnaldo et al., 2024*)

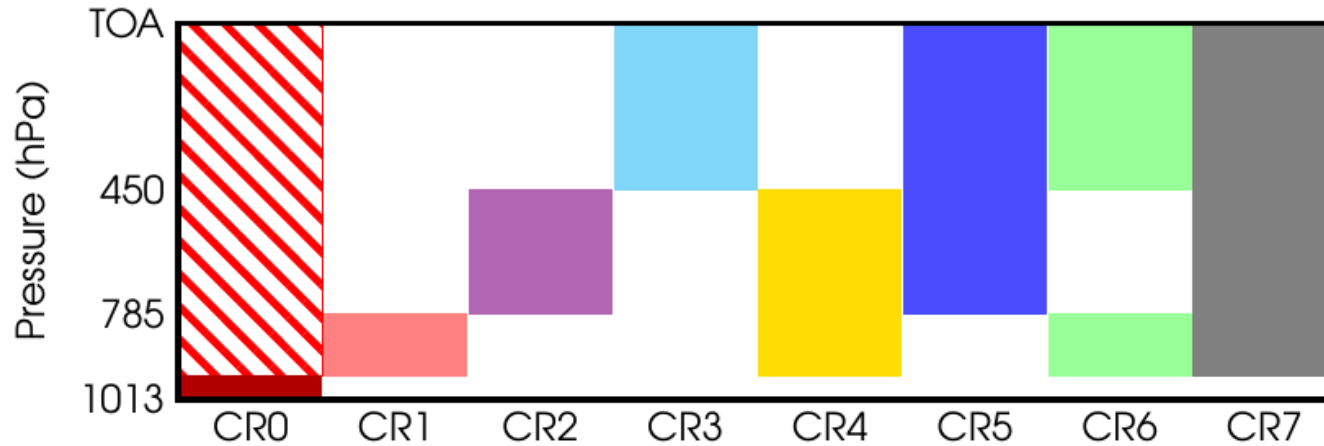


⇒ Contribution importante des **bonnes détections de nuages** (« Hit »)

2) Lier les erreurs aux paramétrisations : introduction de **catégories/classes spécifiques nuageuses** (*Ahlgrimm & Forbes, 2012*)

« Quels types de nuages ? »

## Régimes nuageux (CR) du modèle AROME



Régimes nuageux issus du modèle, équivalent aux propositions de (Rossow et al. 2005a)

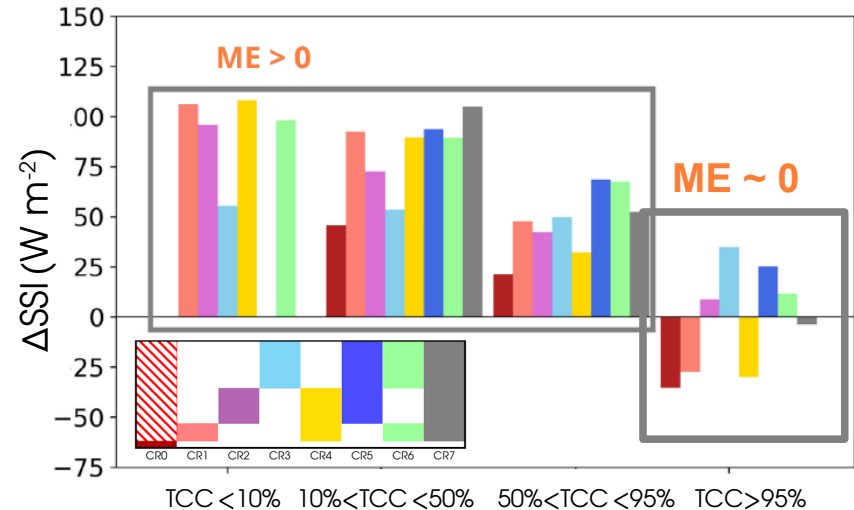
## Régimes nuageux (CR) du modèle AROME

Couverts partiels (TCC < 95 % dans AROME) :

- Biais positifs systématiques

En **overcast** (TCC > 95% dans AROME) :

- Compensations d'erreurs



Biais annuel moyen par régime nuageux et par bin de nébulosité (issus du modèle)

# Vers une amélioration des prévisions de SSI

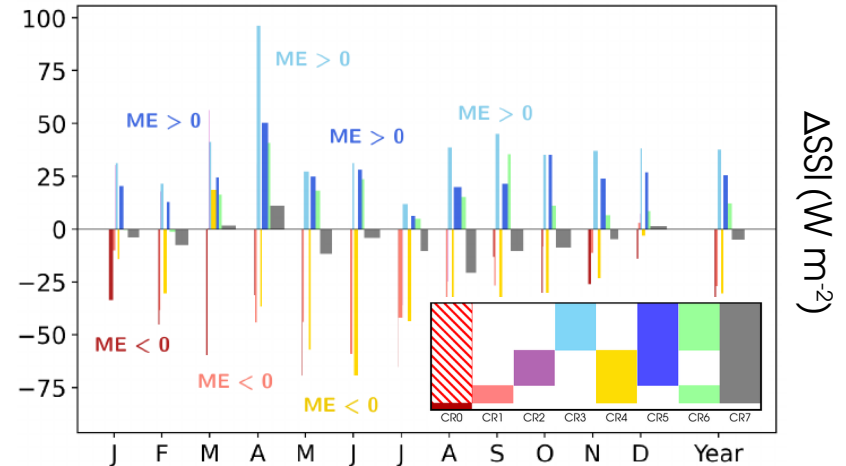


En **overcast** (TCC > 95% dans AROME):

- Nuages hauts (CR3 + CR5) : **biais positifs**  
⇒ optiquement trop fins

---

- Nuages bas (CR0 + CR1 + CR4) : **biais négatifs**  
⇒ optiquement trop épais OU  
nébulosité surestimée



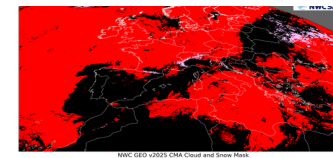
Biais mensuels moyens par régime en conditions **overcast** pour AROME

# Vers une amélioration des prévisions de SSI



1) Évaluer le modèle **au-delà de scores classiques** (*Magnaldo et al., 2024*)

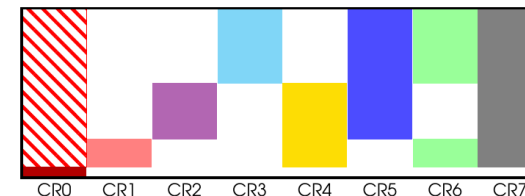
⇒ Contribution importante des **bonnes détections de nuages (« Hit »)**



2) Lier des erreurs aux paramétrisations : introduction de **catégories/classes spécifiques** (*Ahlgrimm & Forbes, 2012 ; Magnaldo et al., 2024*)

**Nuages hauts (CR3 + CR5) : biais positifs**  
⇒ optiquement trop fins

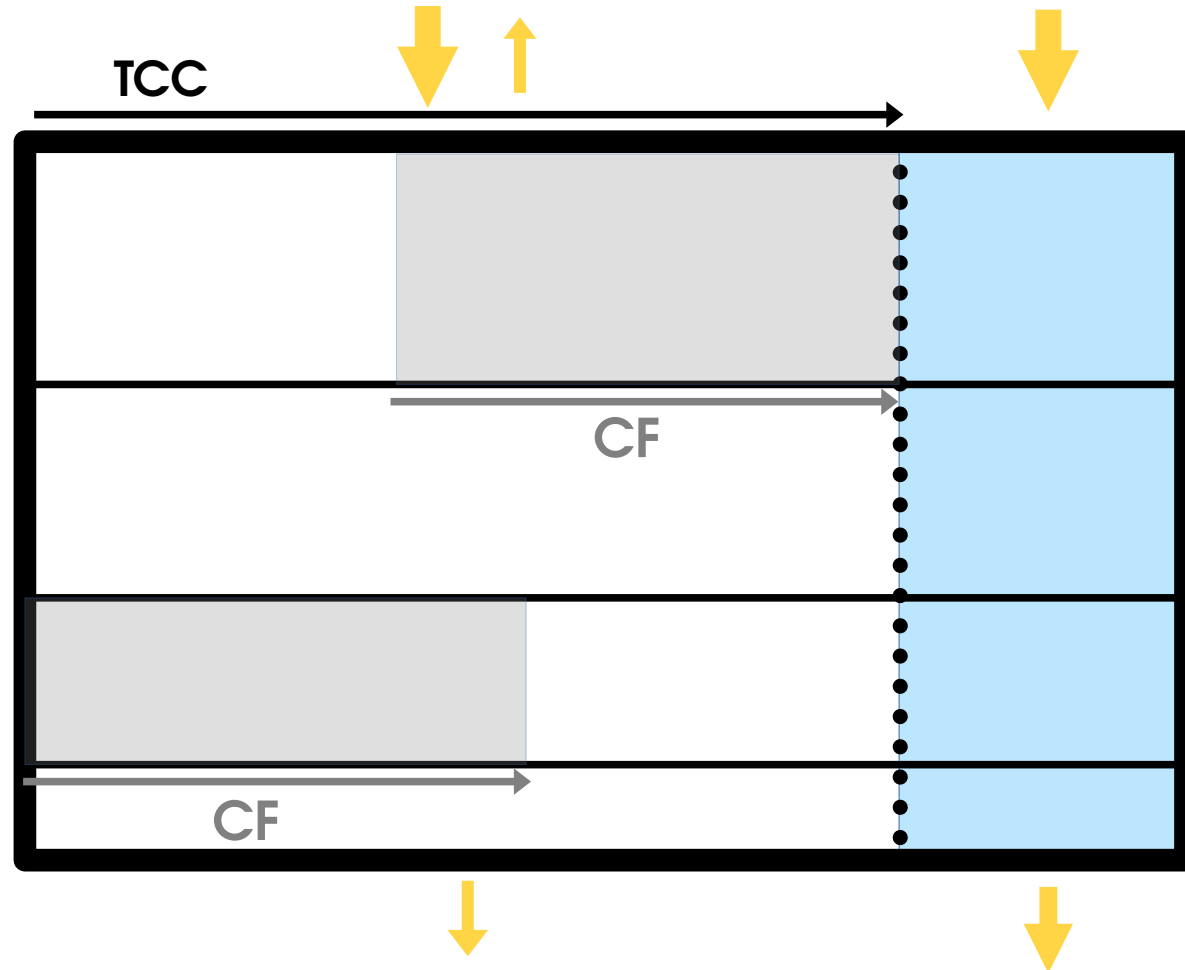
**Nuages bas (CR0 + CR1 + CR4) : biais négatifs**  
⇒ optiquement trop épais OU nébulosité surestimée



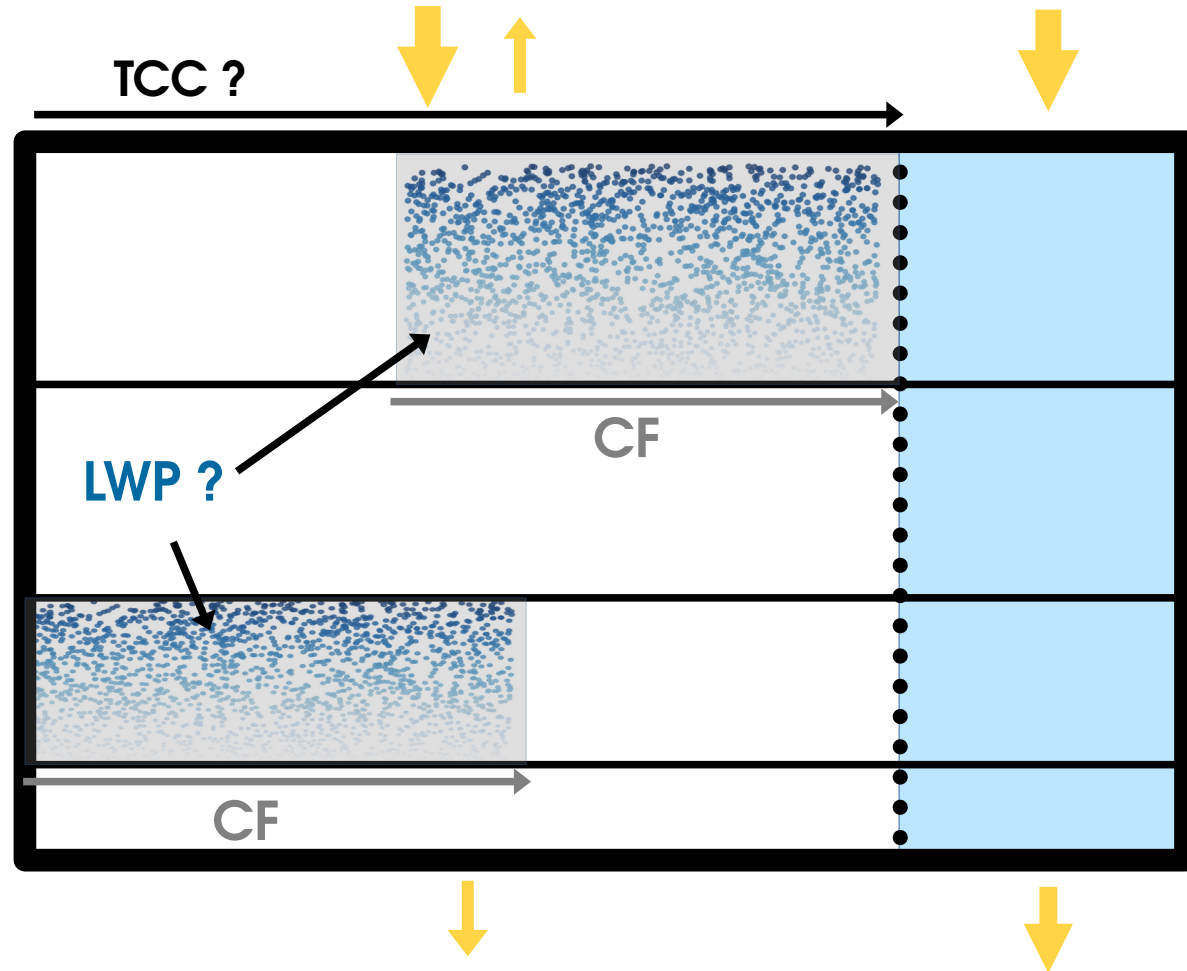
3) Comprendre les erreurs en les reliant à des grandeurs physiques

« **Quelles propriétés sont mal (ou non-)représentées ?** »

# Modélisation des nuages



# Modélisation des nuages (bas)



# Besoin d'observations

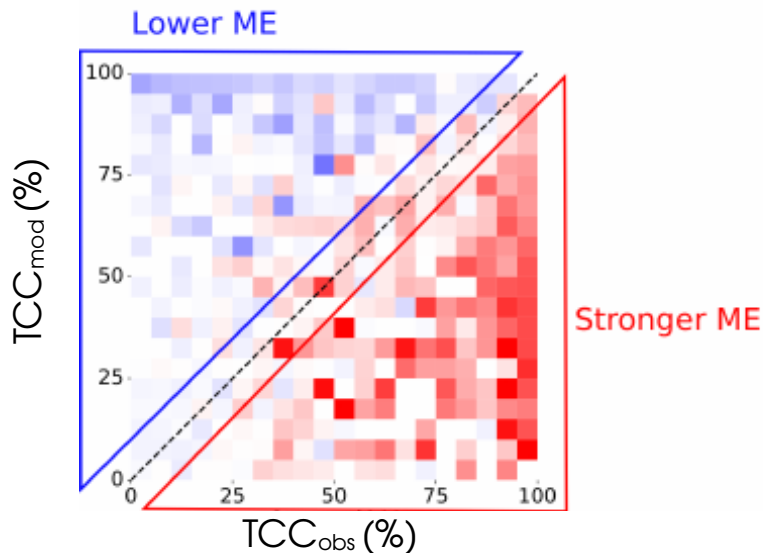


Haeffelin et al., 2005



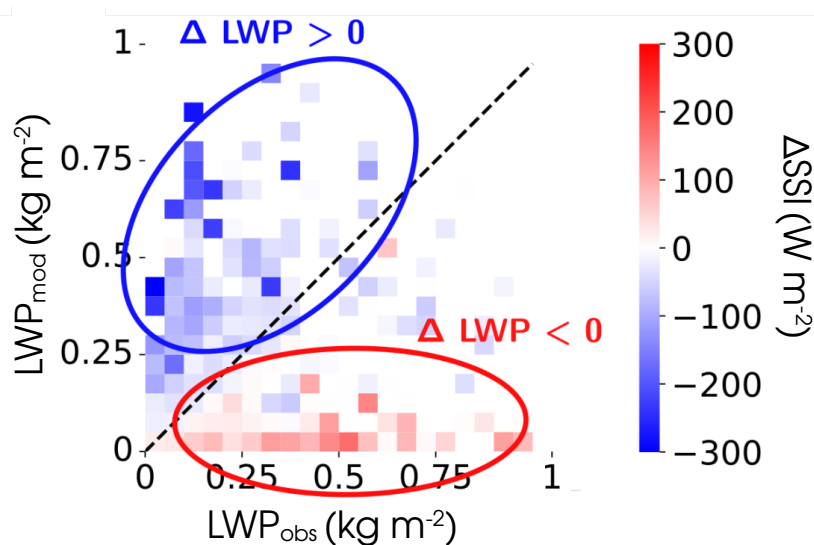
Delanoë et al., 2020

## Nébulosités intermédiaires ( $0,05 < TCC < 0,95$ )



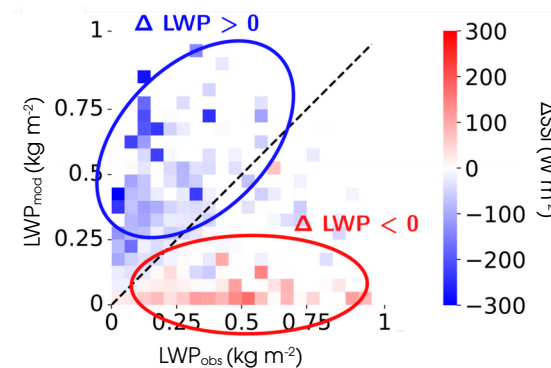
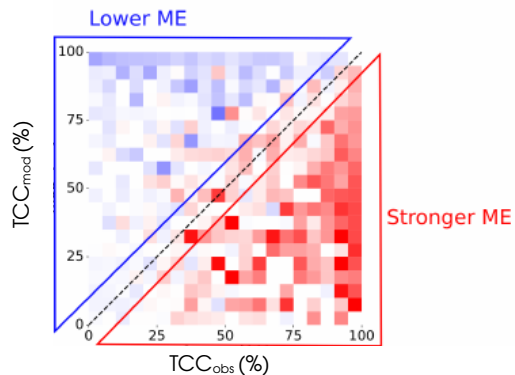
Biais moyen de rayonnement catégorisés par comparaison de fractions nuageuses

## Overcast AROME CR1



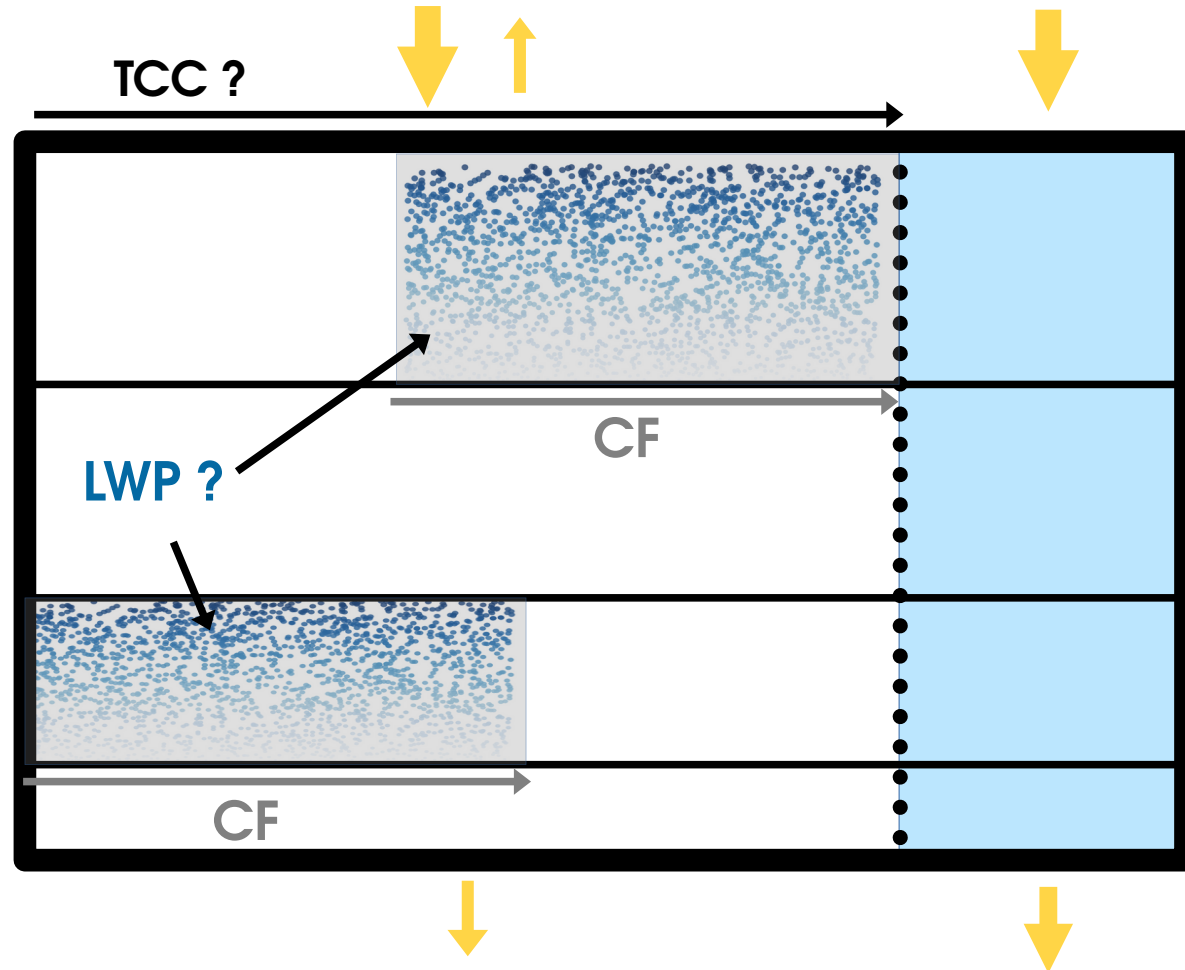
Biais moyen de rayonnement catégorisés par comparaison de LWP

⇒ Le **biais moyen positif** semble être expliqué par des erreurs plus fortes en sous-estimation  
On remarque par ailleurs que le biais est assez bien corrélé au contenu en eau liquide

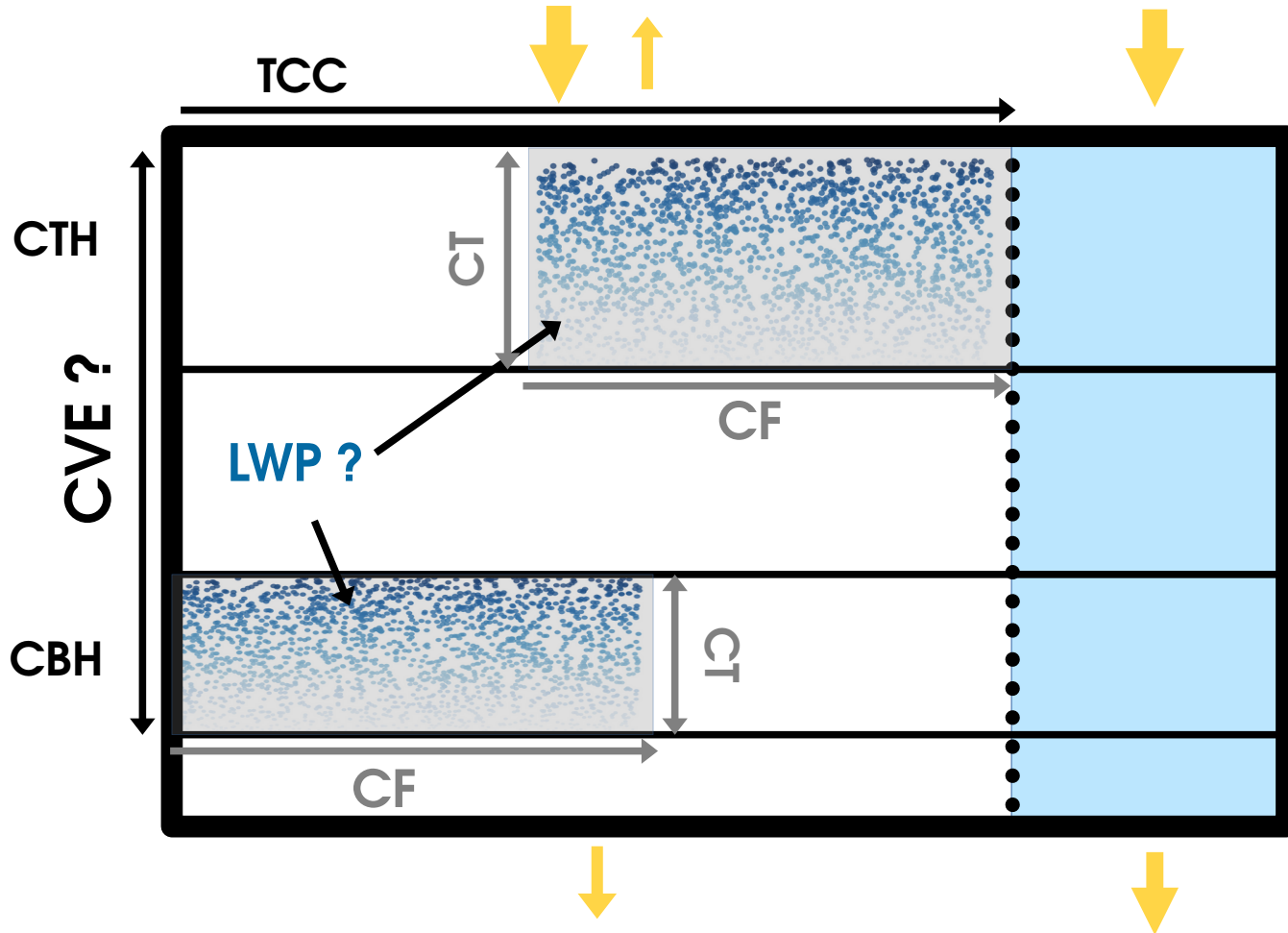


- 1) Peut-on mieux contraindre la définition des régimes nuageux pour comprendre un biais positif global ?
- 2) L'information des profils peut-elle être utilisée pour identifier l'origine des erreurs sur les grandeurs macroscopiques ?

# Modélisation des nuages (bas)



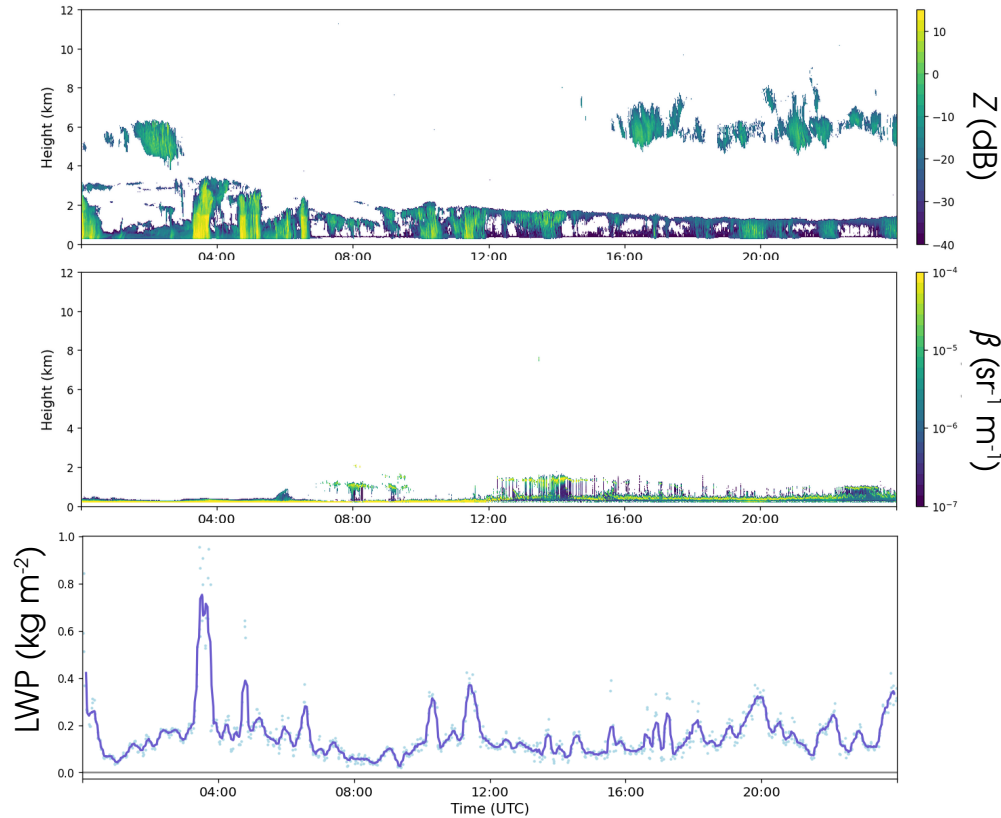
# Modélisation des nuages (bas)



$$ICT = \sum CT$$

?

# Toujours plus d'observations : Cloudnet

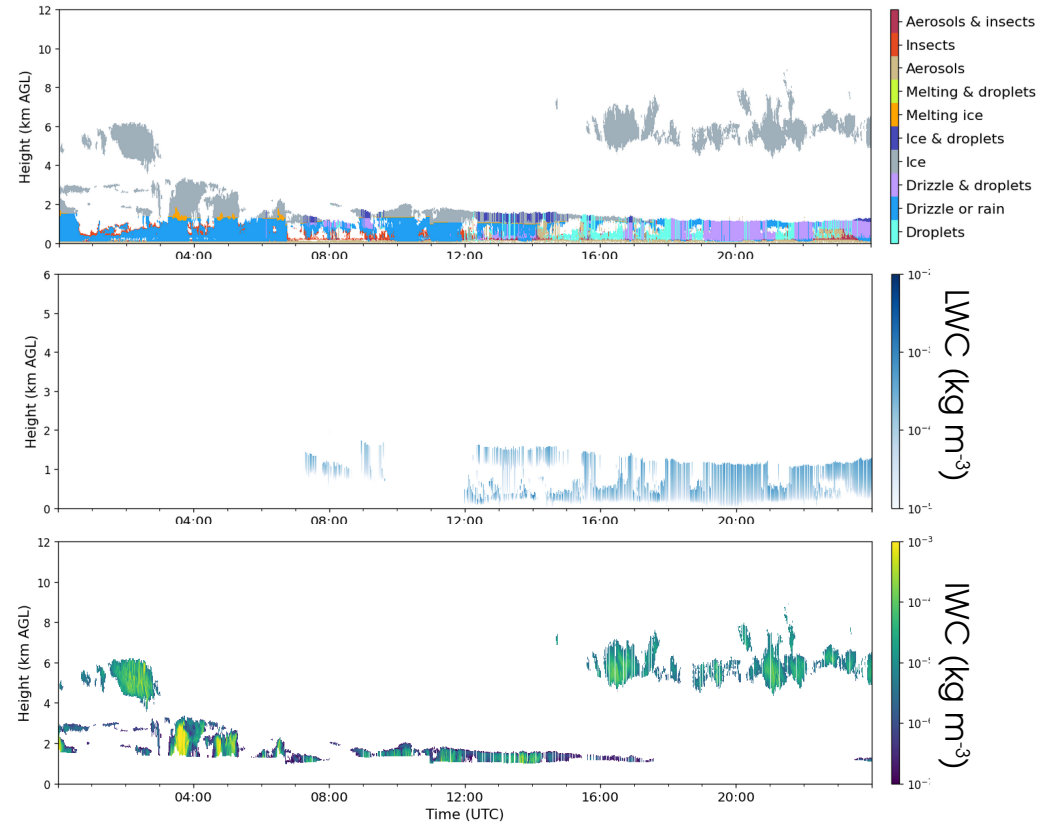


Produits L1

# Toujours plus d'observations : Cloudnet



Produits L2



# Q1. Améliorer la définition de régimes ?

---



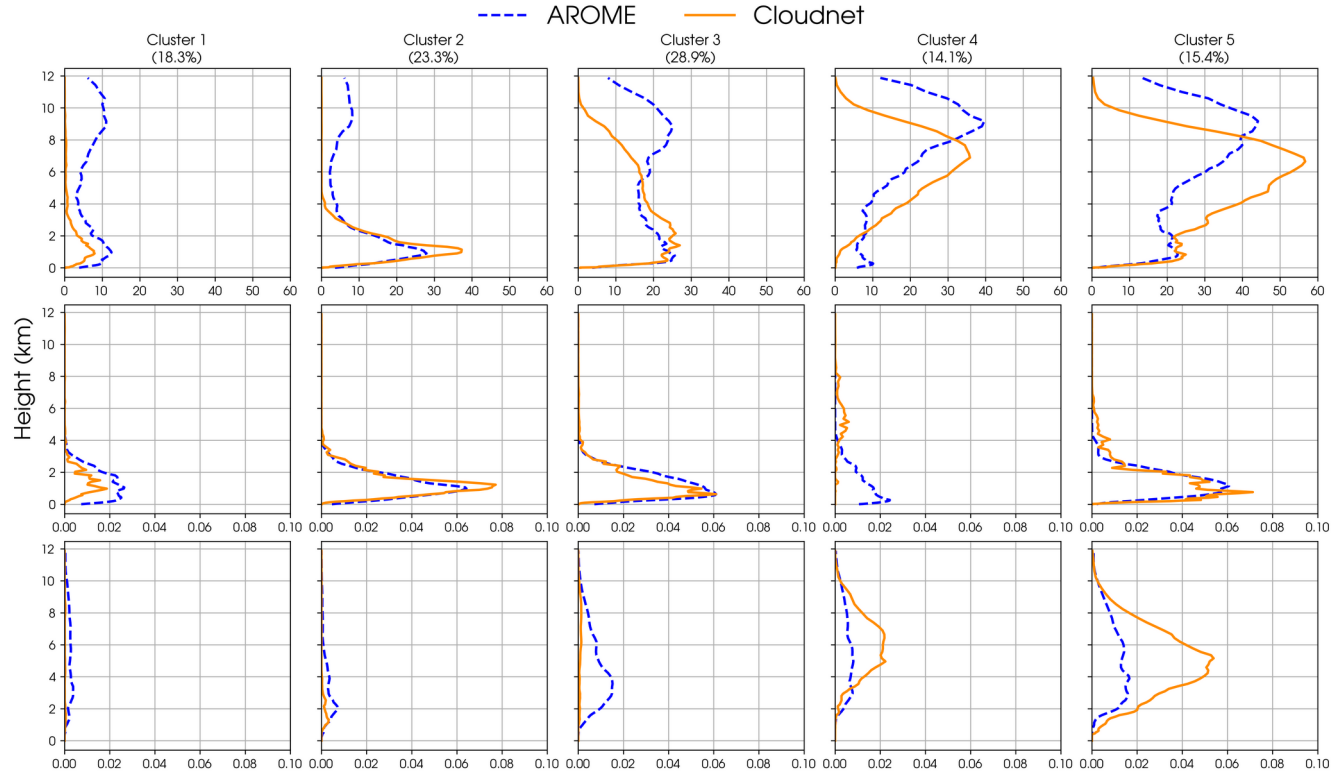
**Alternative proposée** : Classification non-supervisée à partir des observations

- **Géométrie** : CTH, CBH, TCC, ICT, MultiLayerFlag
- **Contenus** : LWP, IWP

Algorithme ***K-Means*** « optimisé » :

- **Automatisme** : choix du nombre de clusters **K** en combinant une dizaine de ***Internal Clustering Validation Indices***
- **Stabilité** : initialisations multiples pour chaque **K** (optimisation globale)
- **Robustesse** : plusieurs runs pour la détermination de **K**

# Q1. Améliorer la définition de régimes ?



Profils de CF, LWC et IWC des composites (« clusters »). Les lignes en pointillés correspondent aux clusters et l'enveloppe l'interquartile par niveau

# Q1. Améliorer la définition de régimes ?



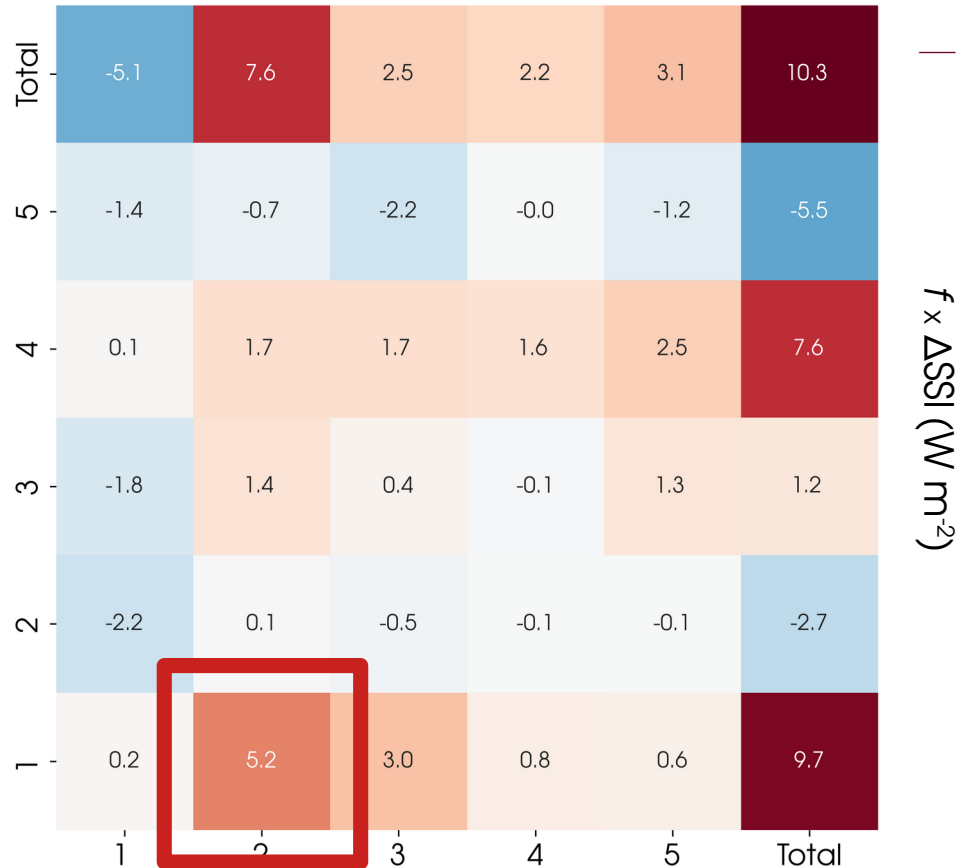
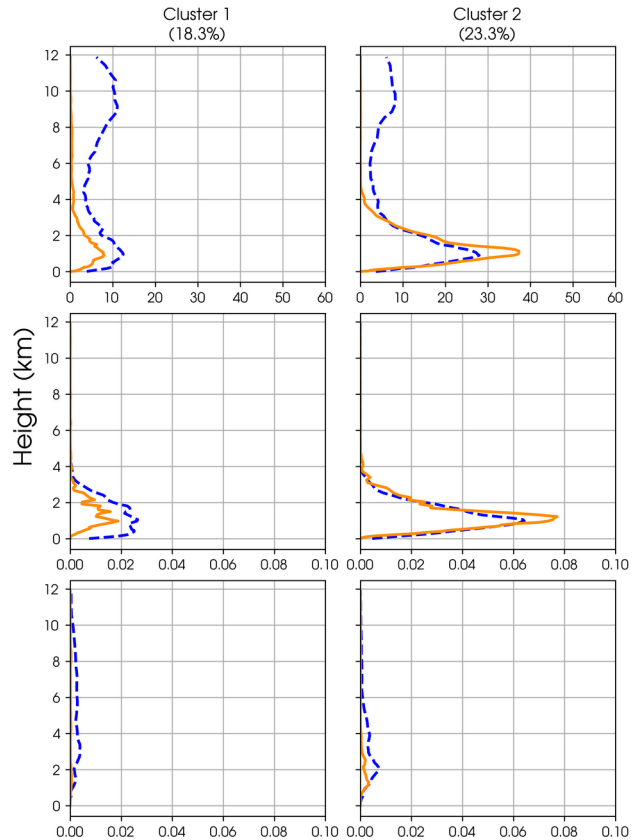
Total	18.3	23.3	28.9	14.1	15.4	100.0
5	1.8	2.5	11.1	3.5	8.9	27.8
4	3.6	1.4	3.0	7.6	2.7	18.4
3	4.9	8.6	10.1	1.9	3.0	28.5
2	2.2	6.1	2.2	0.3	0.3	11.0
1	5.7	4.8	2.6	0.8	0.5	14.4
	1	2	3	4	5	Total

Fréquence (%)

Total	-27.7	32.8	8.6	15.3	20.3	10.3
5	-77.1	-29.6	-19.4	-0.5	-13.3	-19.7
4	3.2	124.6	56.5	20.7	91.3	41.5
3	-36.2	16.7	3.6	-7.6	43.7	4.2
2	-98.6	0.8	-21.0	-22.3	-23.0	-24.7
1	2.9	108.5	116.0	95.4	126.7	67.5
	1	2	3	4	5	Total

ASSI ( $W m^{-2}$ )

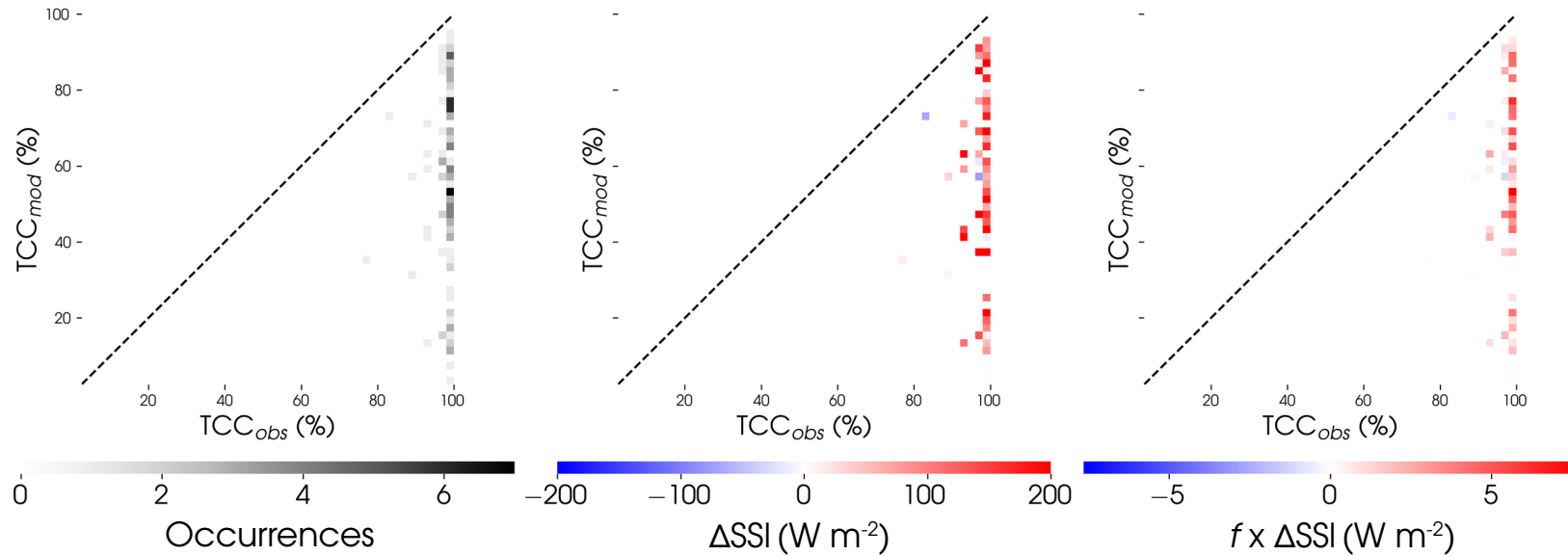
# Q1. Améliorer la définition de régimes ?



## Q2. Origine des erreurs ?

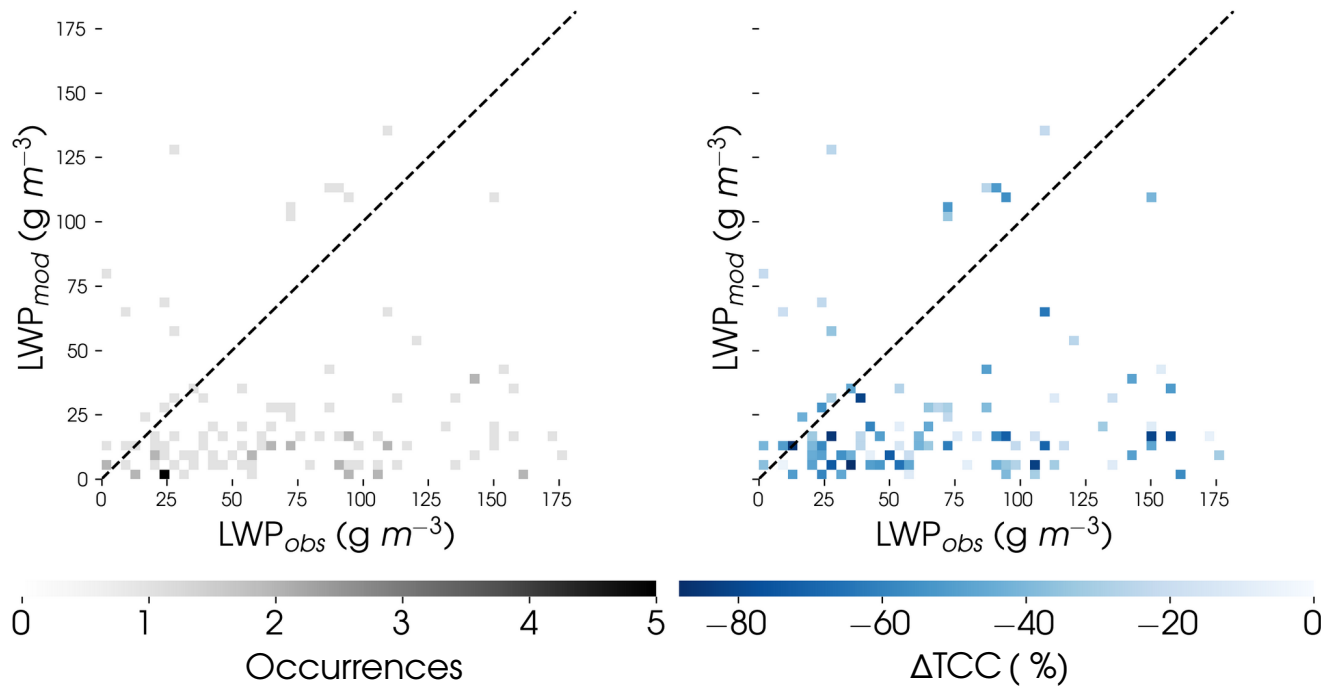


Cluster 1 d'après Cloudnet, Cluster 2 dans AROME: **Nuages bas**



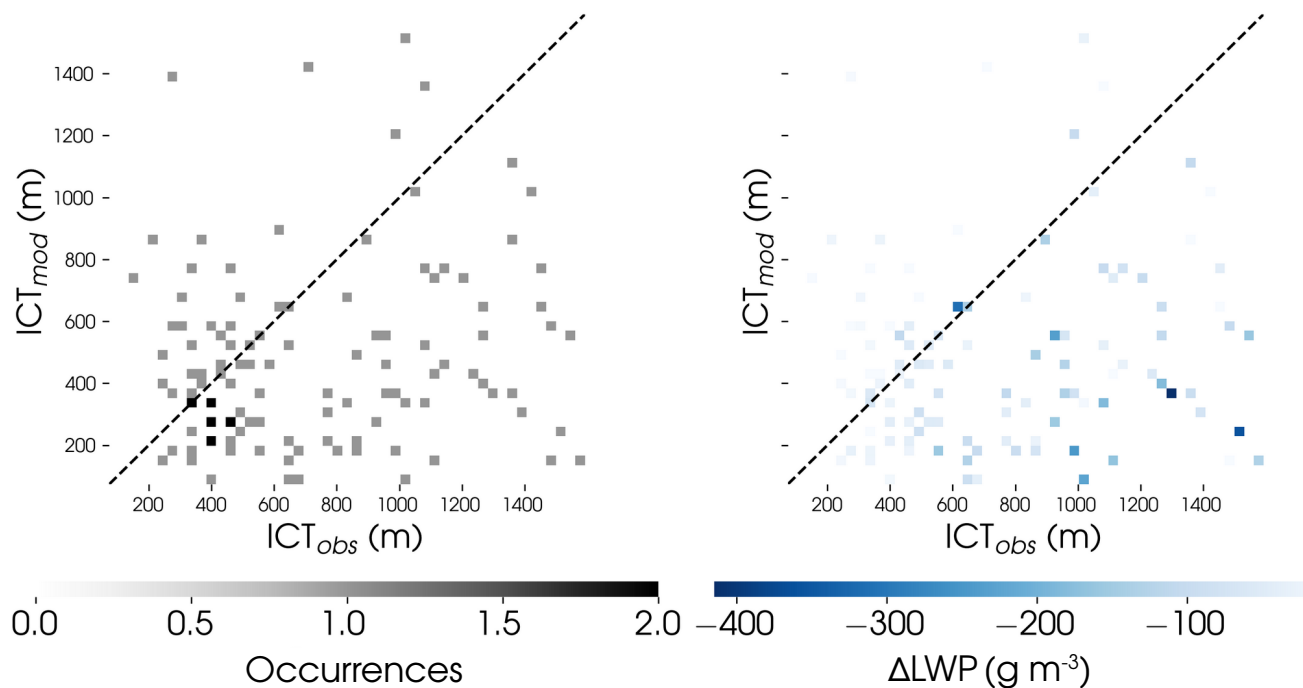
⇒ La nébulosité des cas **overcast** dans les observations est trop souvent sous-estimée : **biais positif marqué !**

## Q2. Origine des erreurs ?



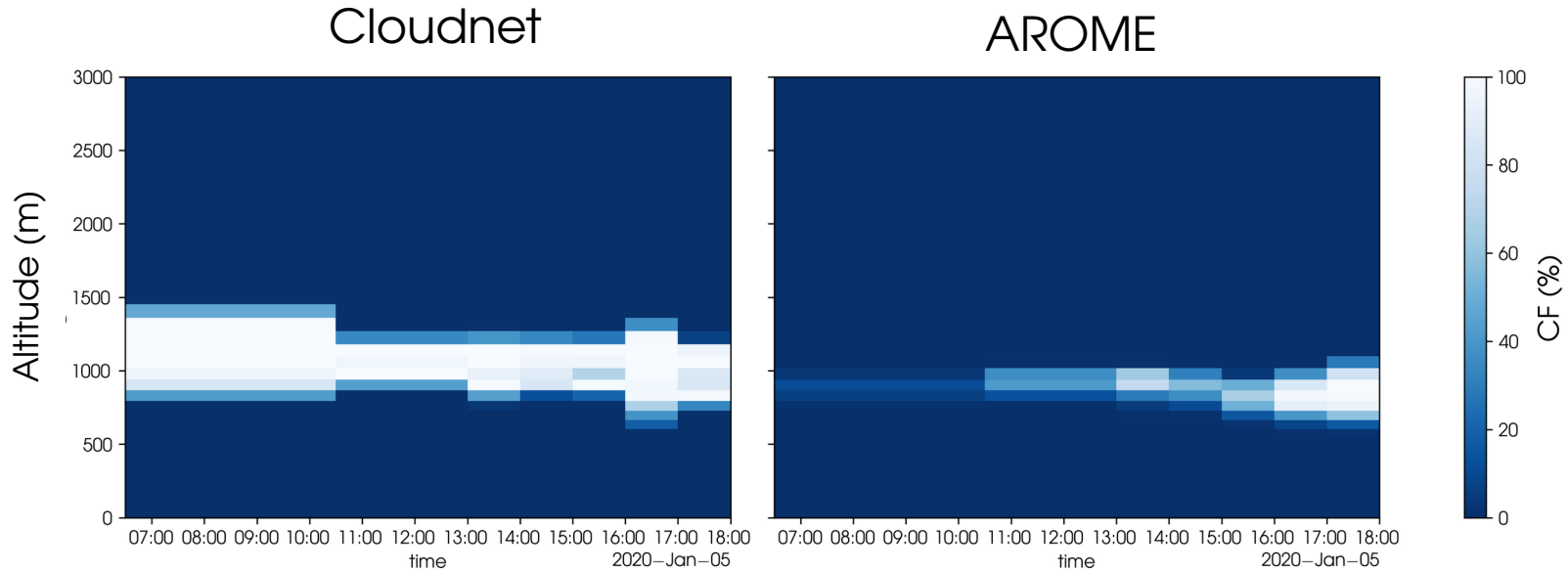
⇒ Cela s'explique par une **sous-estimation du contenu**, presque systématique.

## Q2. Origine des erreurs ?



⇒ Cette sous-estimation du LWP semble assez **liée**  
**au développement vertical du nuage**

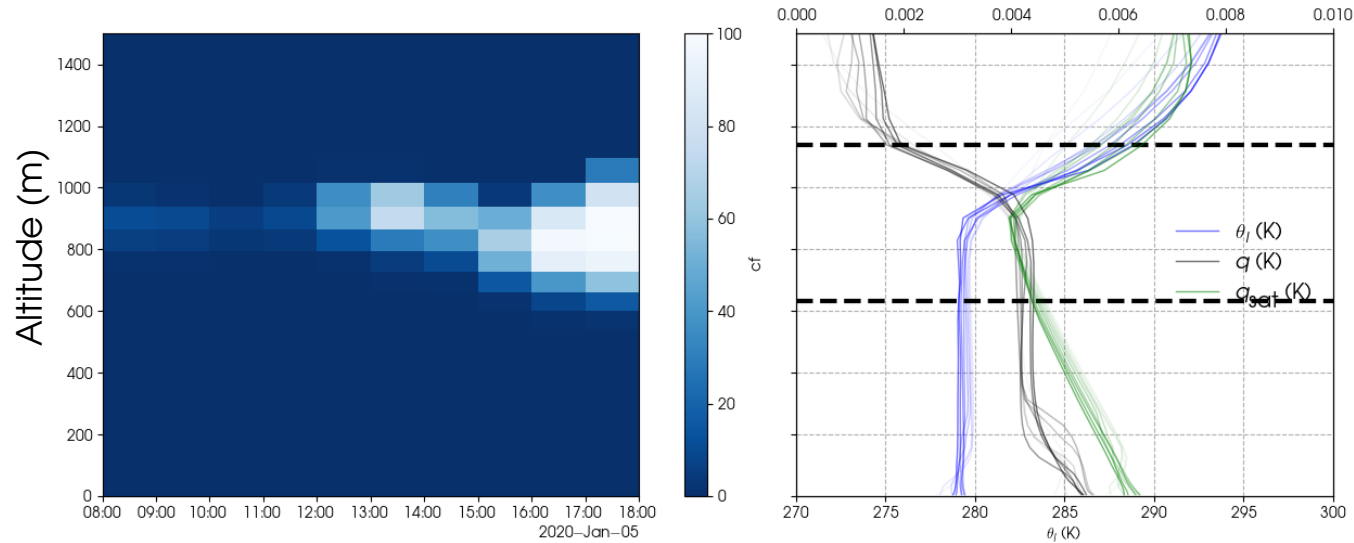
## Q2. Origine des erreurs ?



⇒ **Déficit de saturation**

- Mauvais couplage (apport insuffisant depuis la surface) ?

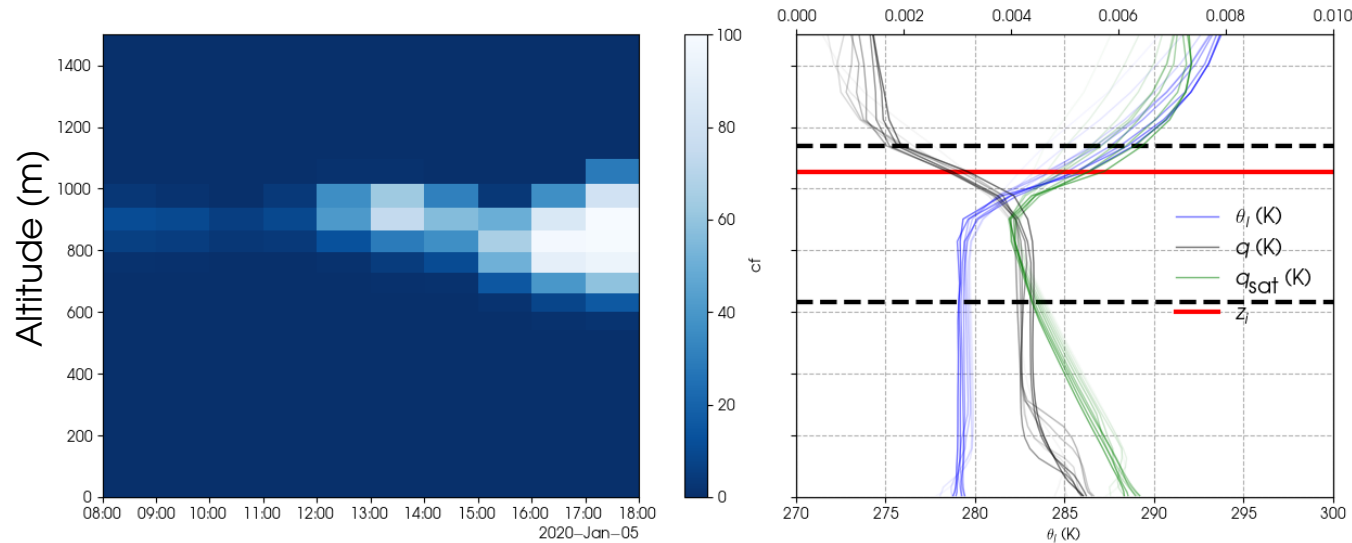
## Q2. Origine des erreurs ?



⇒ **Déficit de saturation**

- ~~Mauvais couplage (apport insuffisant depuis la surface) ?~~
- Mauvaise représentation de la **hauteur d'inversion** ?

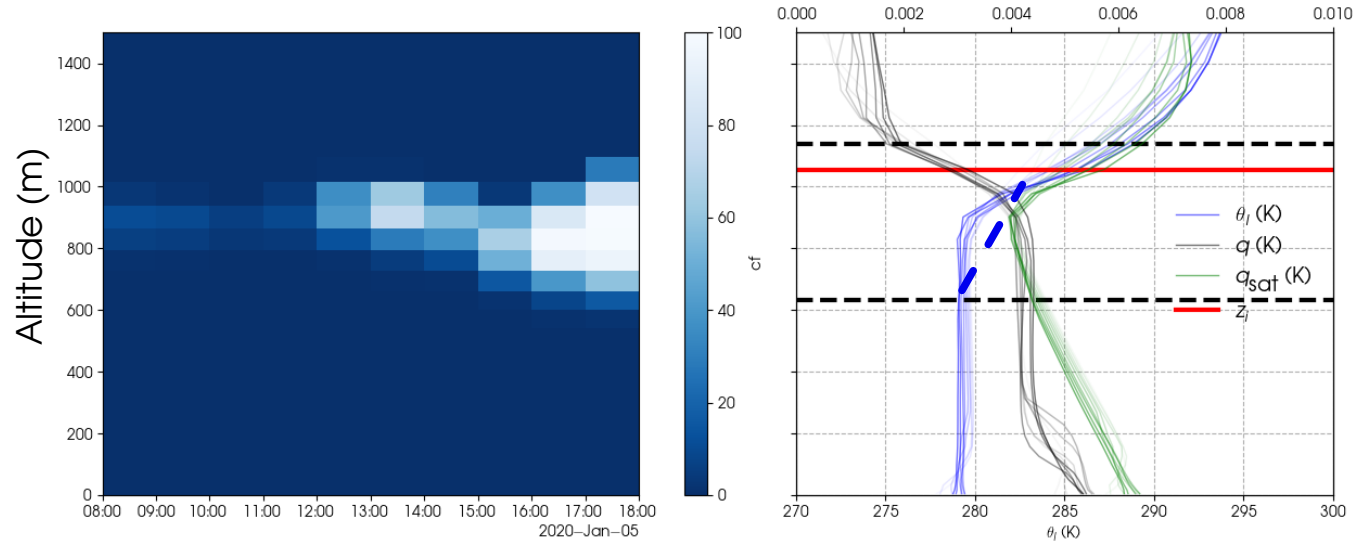
## Q2. Origine des erreurs ?



⇒ **Déficit de saturation**

- Mauvais couplage (apport insuffisant depuis la surface) ?
- Mauvaise représentation de la **hauteur d'inversion ?**

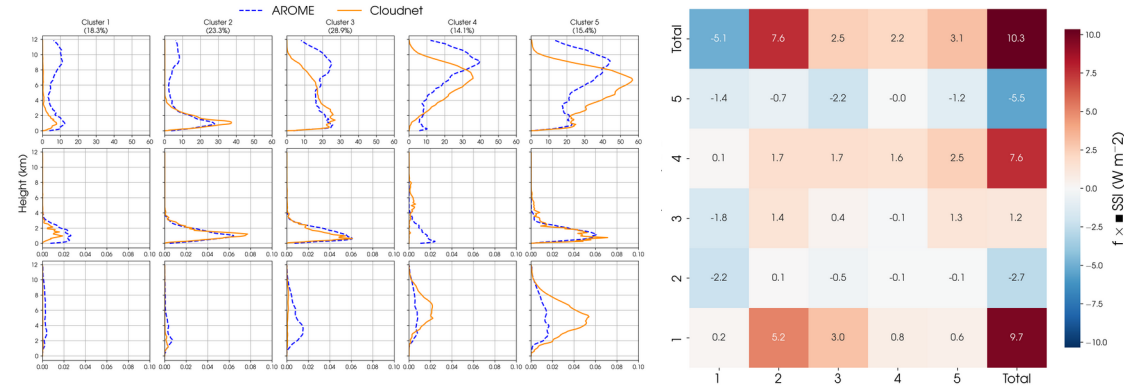
## Q2. Origine des erreurs ?



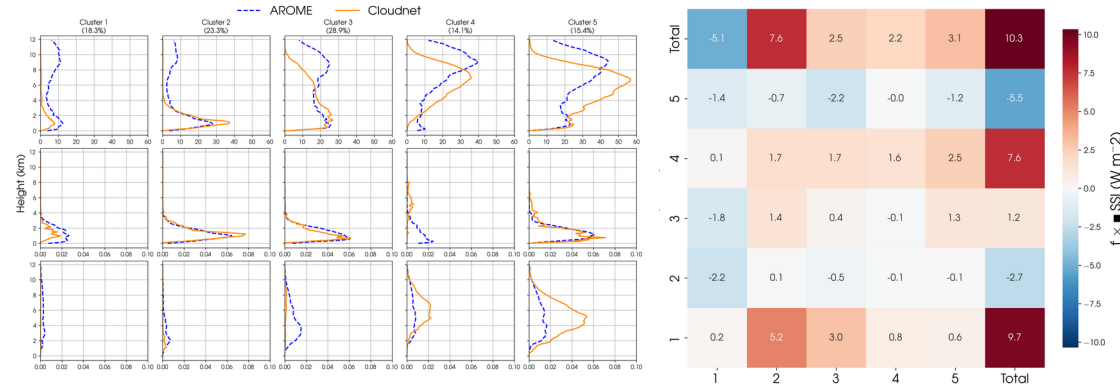
⇒ **Déficit de saturation**

- Mauvais couplage (apport insuffisant depuis la surface) ?
- Mauvaise représentation de la **hauteur d'inversion ?**

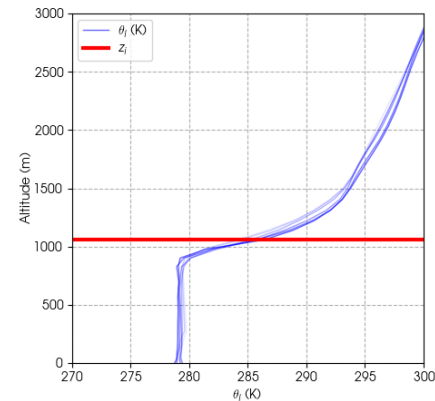
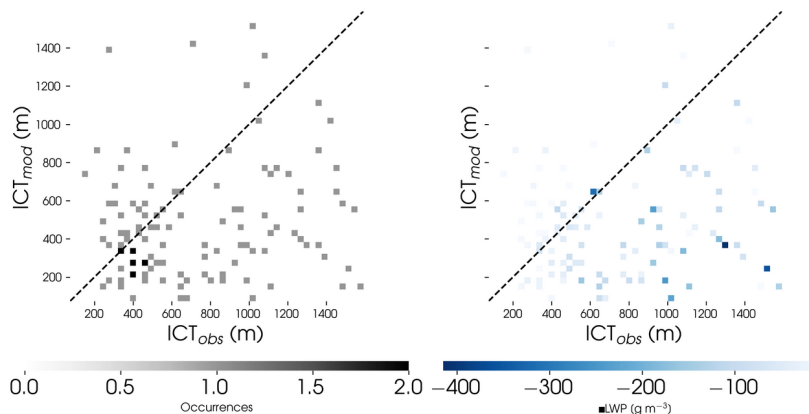
## 1) Peut-on mieux contraindre la définition des régimes nuageux pour comprendre un biais positif global ?



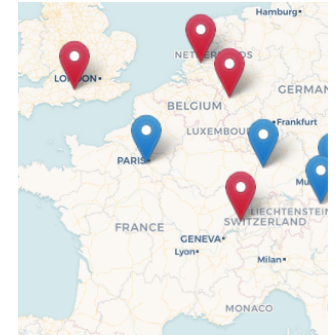
## 1) Peut-on mieux contraindre la définition des régimes nuageux pour comprendre un biais positif global ?



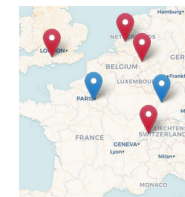
## 2) L'information des profils peut-elle être utilisée pour identifier l'origine des erreurs sur les grandeurs macroscopiques ?



- **Limitation spatiale : « Résultats valides sur les autres sites ? »**



- **Limitation spatiale : « Résultats valides sur les autres sites ? »**
- **Incertitudes** des produits Cloudnet ?



- **Typical uncertainties**

- Ice water content: factor of 2-3
- Effective radius: +/- 30%
- Cloud cover: +/- 10%

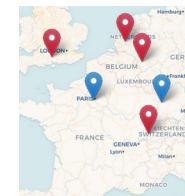
Radar reflectivity

Proportional to  $D^6$   
Difference clouds can produce the same Z:

- Cloud with few large particles
- Cloud with many small particles
- Somewhere in the middle

IWC:  
Must assume PSD, mass-size relationship, particle density, habit, ...

Extrait d'une présentation :  
« Parameterization of sub-grid physical processes (ECMWF 2026)



- **Limitation spatiale : « Résultats valides sur les autres sites ? »**
- **Incertitudes des produits Cloudnet ?**

- **Typical uncertainties**

- Ice water content: factor of 2-3
- Effective radius: +/- 30%
- Cloud cover: +/- 10%

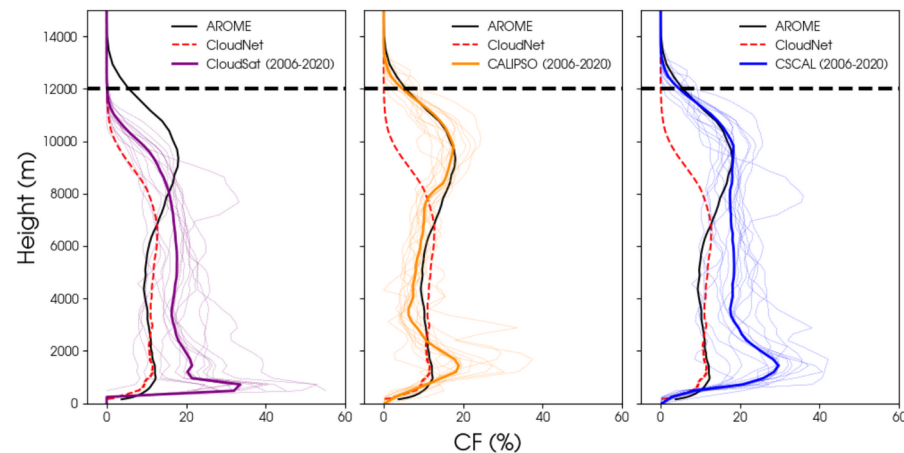
Radar reflectivity

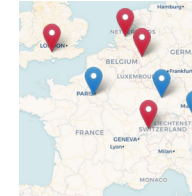
Proportional to  $D^6$   
 Difference clouds can produce the same Z:

- Cloud with few large particles
- Cloud with many small particles
- Somewhere in the middle

IWC:  
 Must assume PSD, mass-size relationship, particle density, habit, ...

Extrait d'une présentation :  
 « Parameterization of sub-grid physical processes (ECMWF 2026)





- **Limitation spatiale : « Résultats valides sur les autres sites ? »**

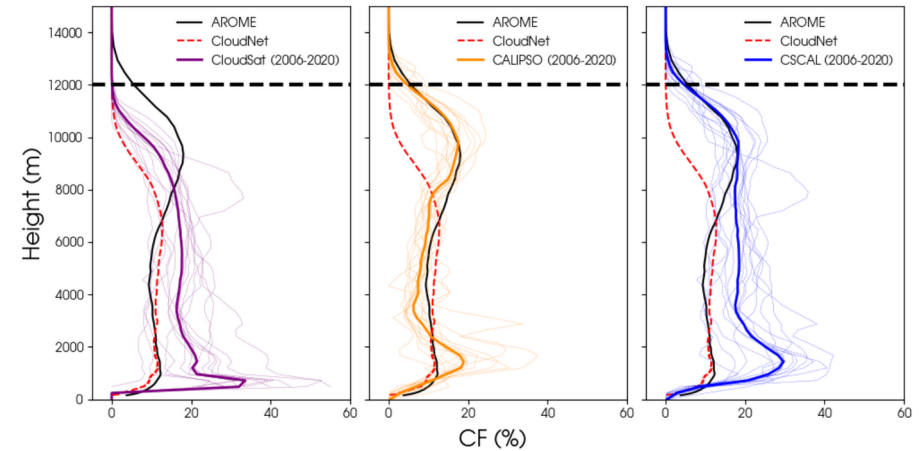
- **Incertitudes des produits Cloudnet ?**

- **Typical uncertainties**

- Ice water content: factor of 2-3
- Effective radius: +/- 30%
- Cloud cover: +/- 10%

Radar reflectivity  
Proportional to  $D^6$   
Difference clouds can produce the same Z:  
• Cloud with few large particles  
• Cloud with many small particles  
• Somewhere in the middle  
IWC:  
Must assume PSD, mass-size relationship, particle density, habit, ...

Extrait d'une présentation :  
« Parameterization of sub-grid physical processes (ECMWF 2026)



- **Limitation temporelle : « Les clusters trouvés pour 2020 se retrouvent-ils pour d'autres années ? »**

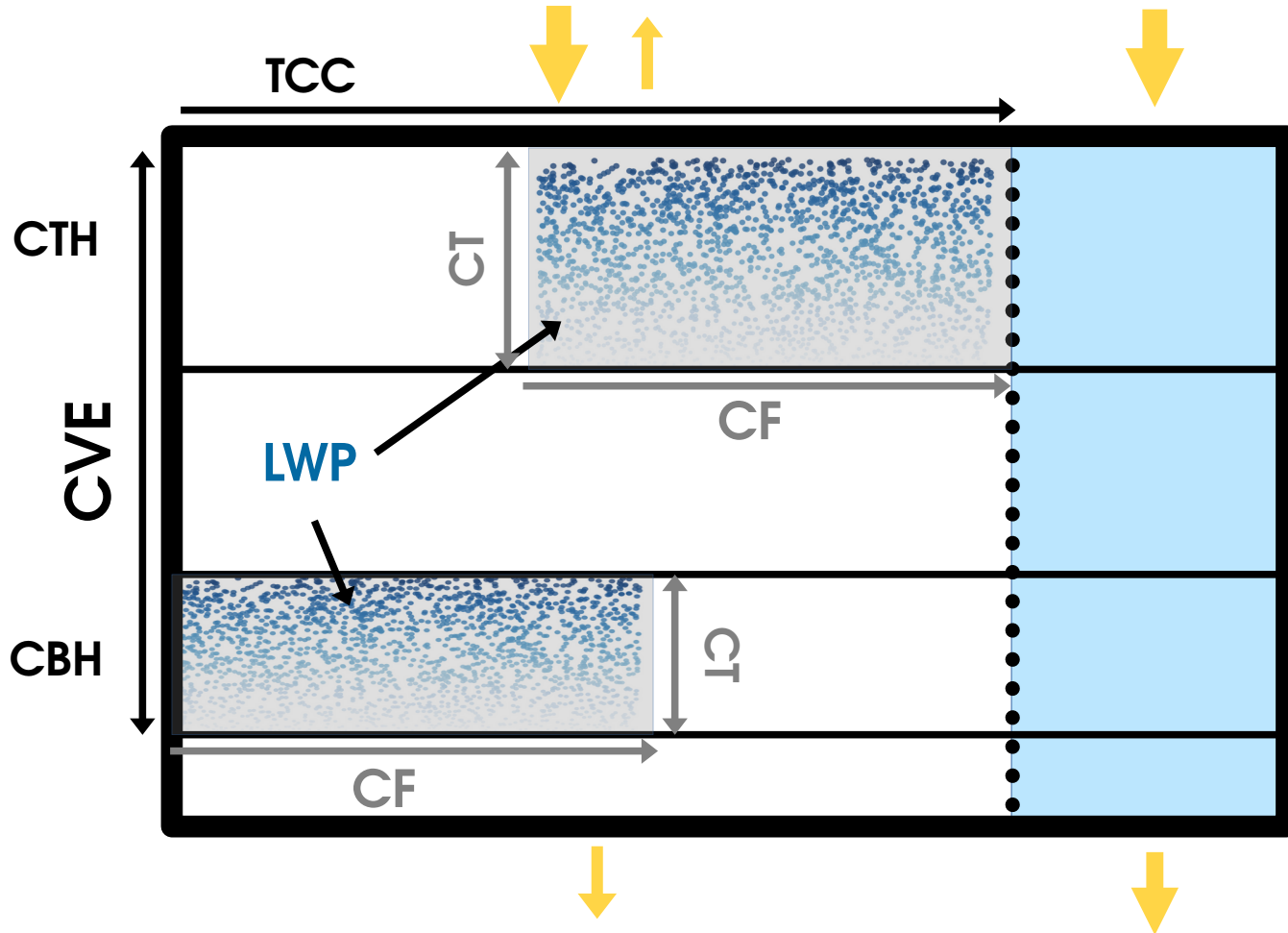
## Conclusion :

- Une **nouvelle méthode** pour **identifier** des **régimes nuageux plus réalistes** est proposée.
- Celle-ci permet **d'avantage de cibler des corrections** : ici **les nuages liquides stratiformes** semblent le **plus contribuer au biais positif** trouvé en conditions nuageuses.
- Une inspection des profils suggère que **le développement vertical des nuages n'est pas correctement simulé** pour ces cas.

## Perspectives :

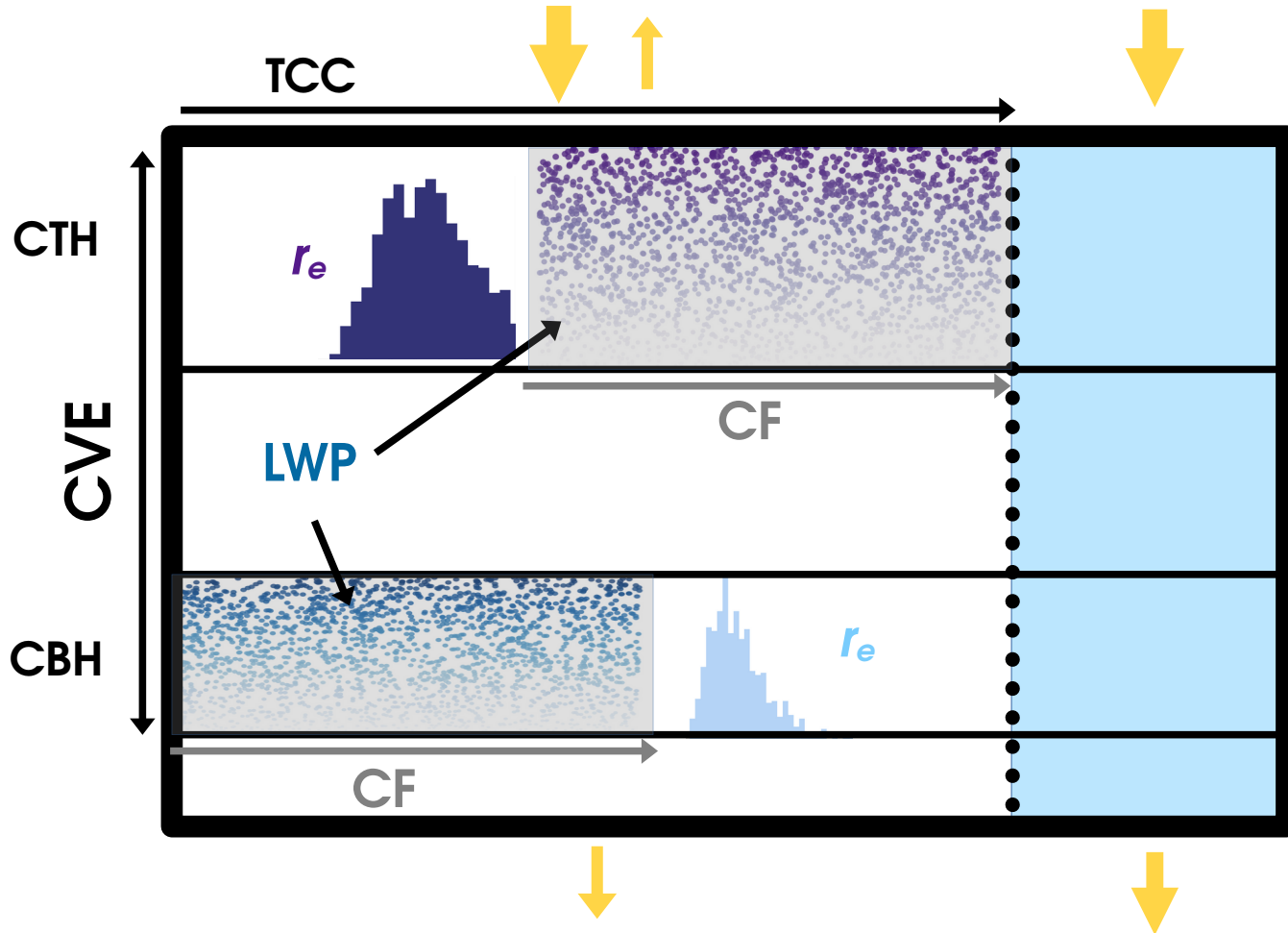
- Entraînement du clustering sur plusieurs sites Cloudnet (Jülich, Payerne, Cabauw, etc.) : **Couvrir davantage de situations**
- Étendre la notion de clusters à des **séquences** (Time Series Kmeans ?, Histogramme journalier de régimes ?) : **Aller jusqu'à la situation météorologique locale**
- **Répliquer** cette méthode **avec des produits satellite, e.g., issus d'EarthCARE (Nuages hauts ?)**
- **Évaluer** les **modifications** du **schéma CVPP (Marcel et al. 2025)**
- Certains cas ont le **bon LWP** mais un **biais de TCC**, problème **d'ajustement à la saturation ?**

# Modélisation des nuages (bas)



$$ICT = \sum CT$$
$$TCV = \sum CT \cdot CF$$

# Modélisation des nuages (bas)



$$ICT = \sum CT$$

$$TCV = \sum CT \cdot CF$$

- Hypothèse de **Taylor (FTH)** : Les **moyennes spatiales** d'une valeur instantanée sont **équivalentes à des moyennes temporelles**

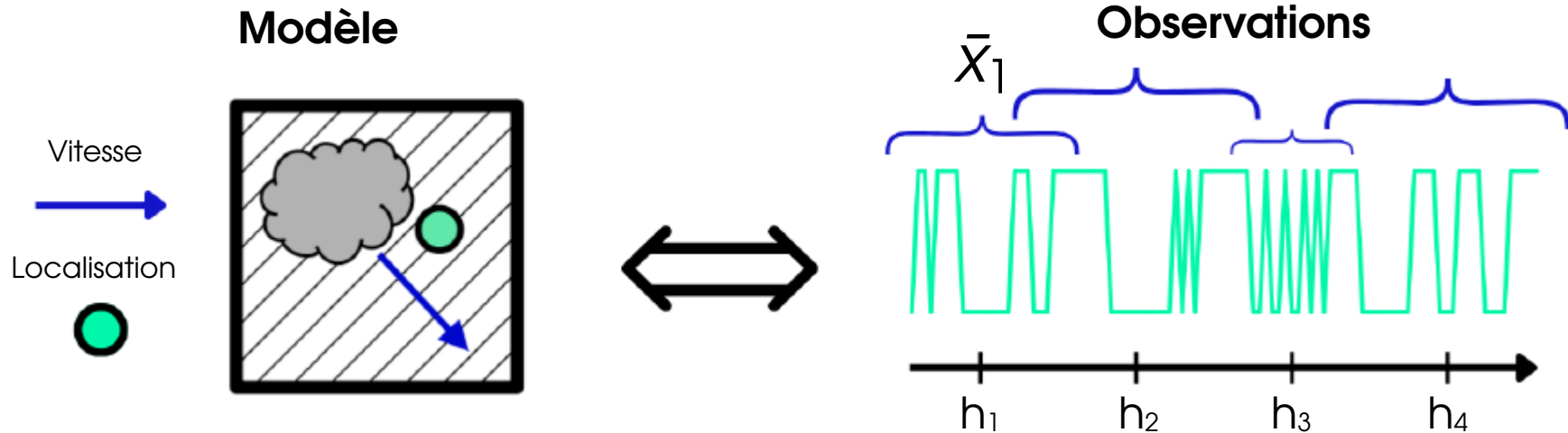
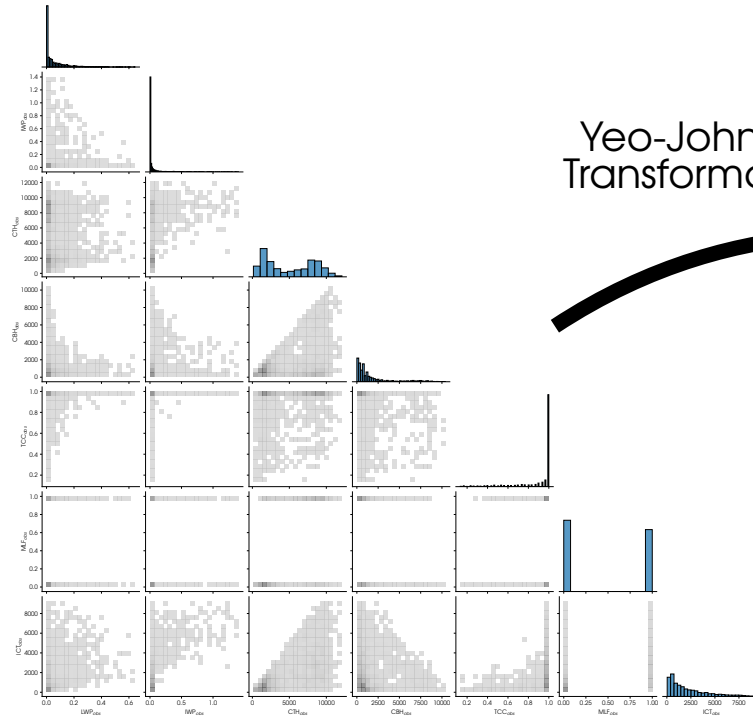


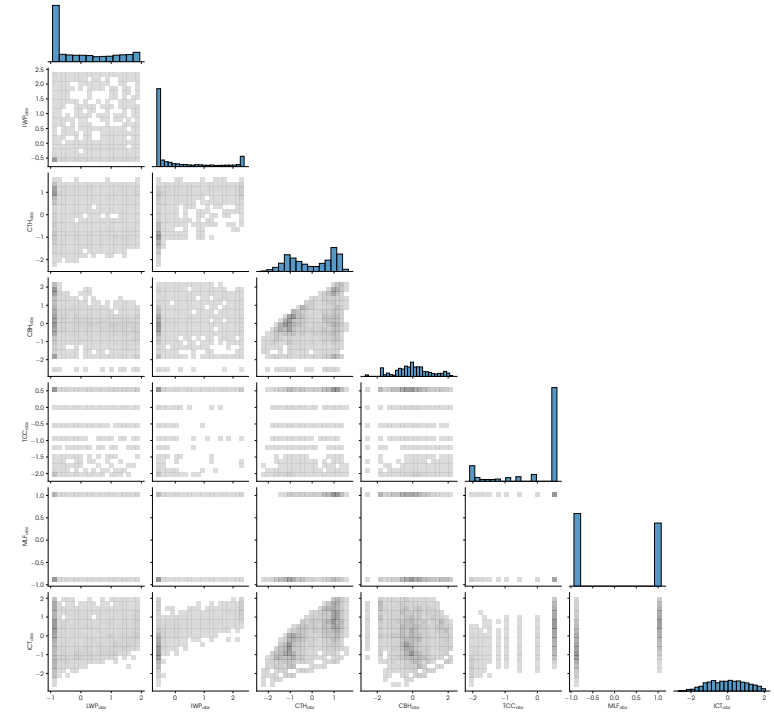
Illustration du principe de traitement des données : les propriétés à l'échelle de la maille sont équivalentes à des moyennes temporelles avec une fenêtre de temps variable qui dépend de l'advection

# Détails techniques : Clustering

« Bonnes » données ? (hypersphère ?)

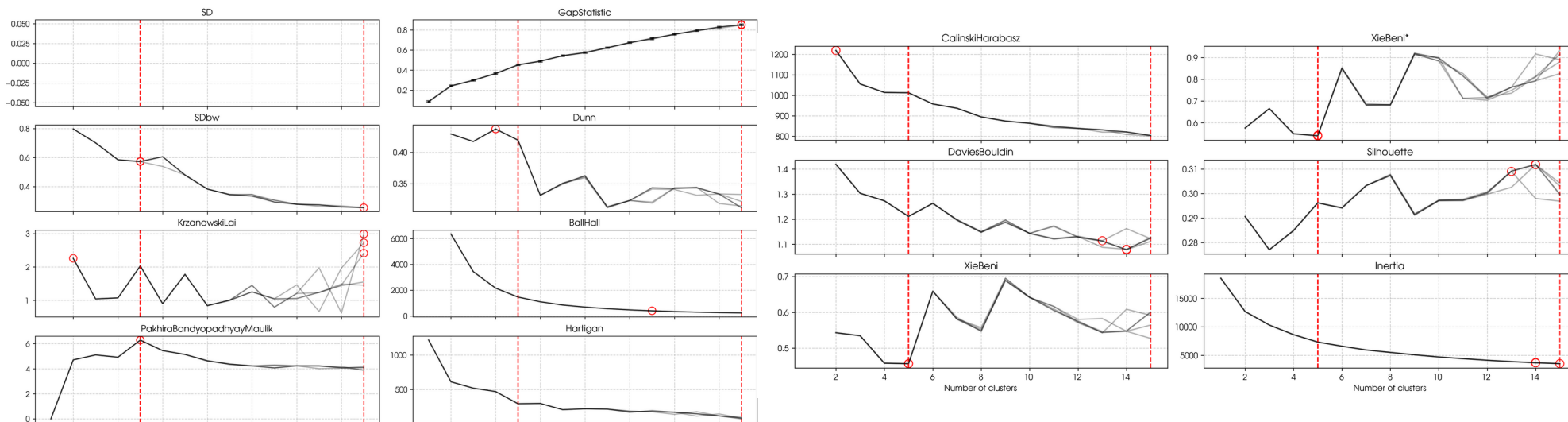


Yeo-Johnson Transformation



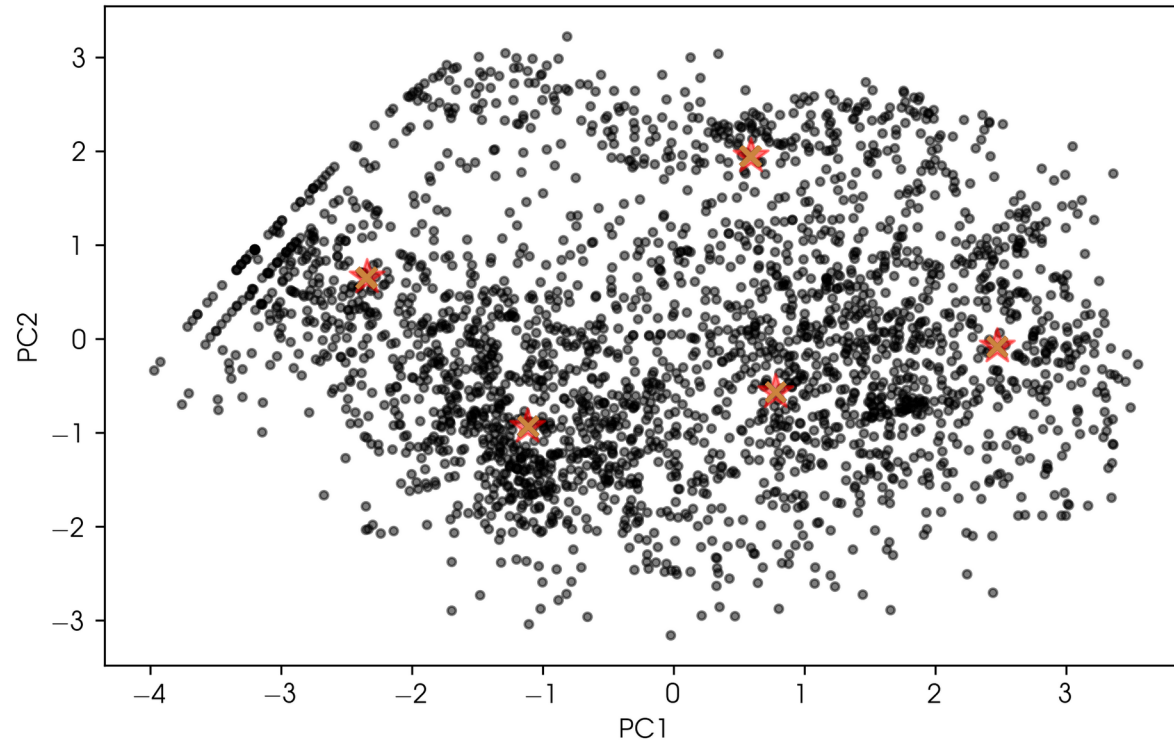
# Détails techniques : Clustering

**Nombre de clusters ?** ⇒ Métriques de **qualité de partition**



## Clusters stables ?

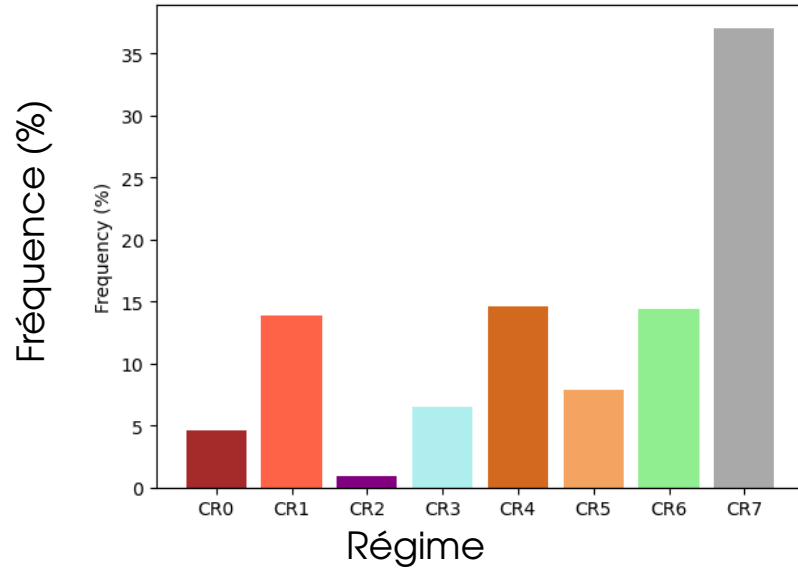
- Data Points
- ★ Centroides trouvés (50 init)
- ✕ Centroides (Run 0, 100 init)
- ✕ Centroides (Run 20, 100 init)
- ✕ Centroides (Run 40, 100 init)
- ✕ Centroides (Run 60, 100 init)



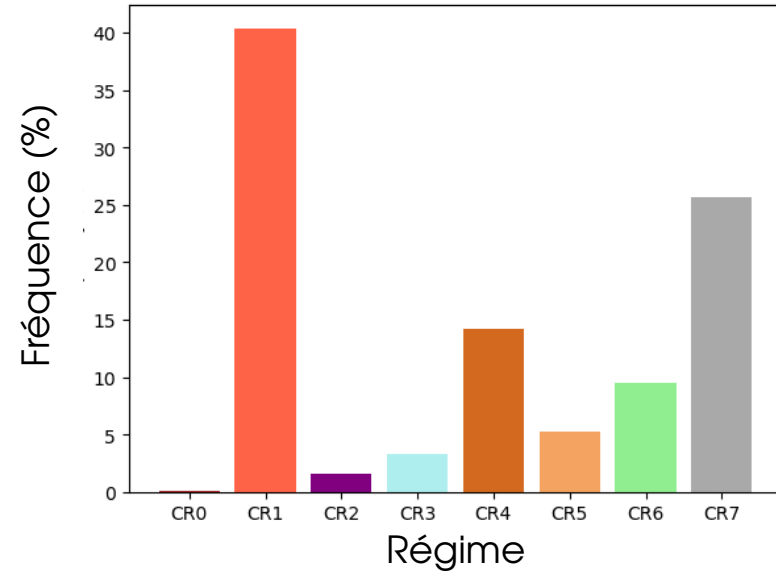
# Distribution des régimes à Palaiseau



## AROME



## Cloudnet



Distribution des régimes nuageux, tels que définis pour le modèle, sur le site de Palaiseau à partir des profils issus du modèle (gauche) et des observations (droite).