

Prévision de l'éclairement solaire à très court-terme : méthodes et applications

Sylvain Cros

Laboratoire de Météorologie Dynamique – Ecole Polytechnique, Palaiseau

Yves-Marie Saint-Drenan

Centre Observation, Impact, Énergie, Météo et Climat de ParisTech, Sophia Antipolis

Groupe « Thermique atmosphérique et adaptation au changement climatique »

Thème 2: Ressource solaire, modélisation, mesure

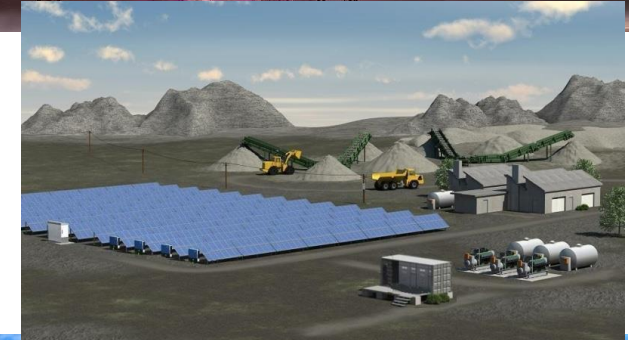


E4C
INTERDISCIPLINARY
CENTER



Pourquoi prévoir la production PV ?

- Assurer la stabilité de la fréquence dans le transport et la distribution d'électricité
- Proposer les meilleures enchères sur les marchés de l'électricité
- Piloter la production d'énergie en micro-réseaux :
 - Réduire la consommation de fossile dans les systèmes hybrides isolés
 - Optimiser l'autoconsommation dans les micro-réseaux connectés
 - Optimiser le stockage (avoir du stock au bon moment, conserver au maximum la production PV, réduire le nombre de sollicitations de la batterie pour allonger sa durée de vie ...)
- Optimiser la production PV (ex : pilotage des trackers)
- Dimensionner un projet de parc PV et estimer sa rentabilité (prévision à très long-terme, climatologie)



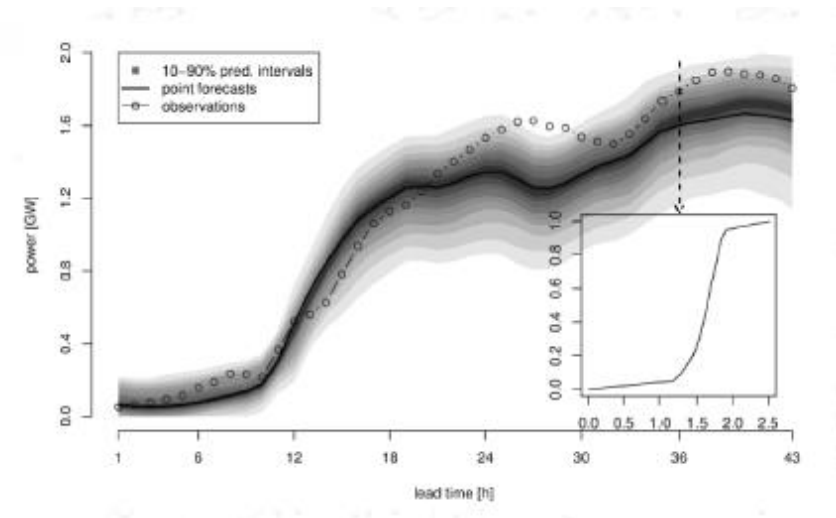
Quels types de prévision selon l'usage ?

■ La prévision déterministe

- Déterminer la fonction $F(t + dt)$

■ La prévision probabiliste

- Déterminer la fonction de densité de probabilité : $P_F(t+dt | t)$

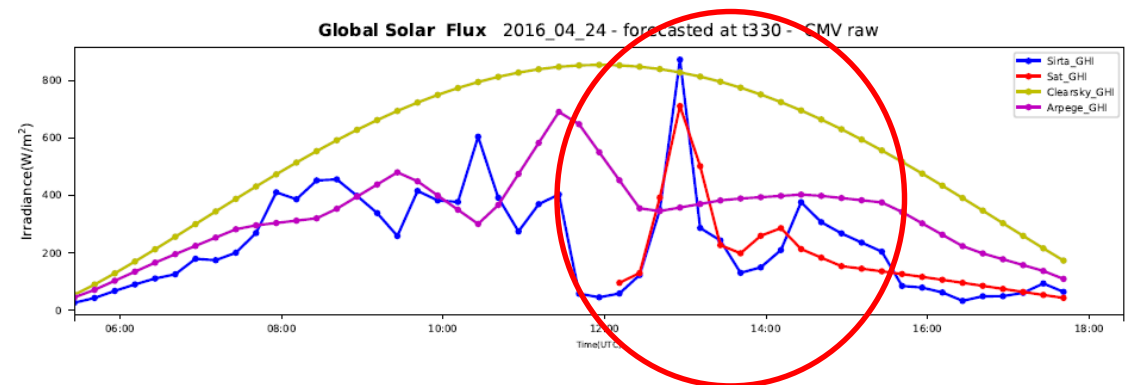


■ La prévision d'énergie

- Somme d'énergie plutôt que la variabilité de puissance

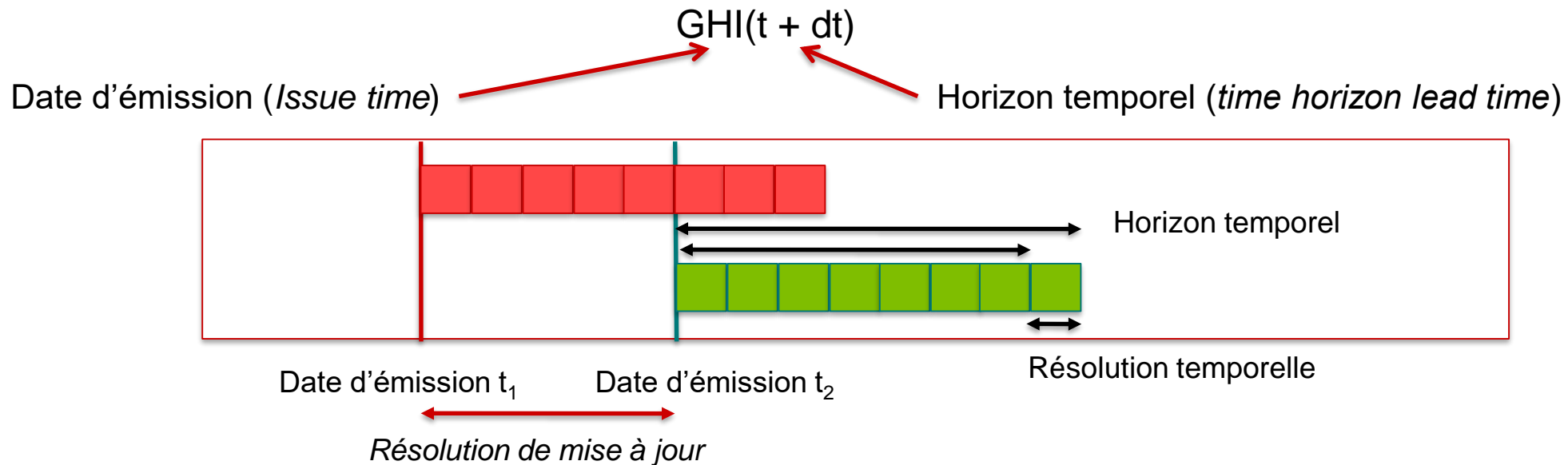
■ La prévision de puissance instantanée

- $F(t + dt)$
- Importance des variations (rampes) plutôt que des valeurs de puissance



Principe général de la prévision

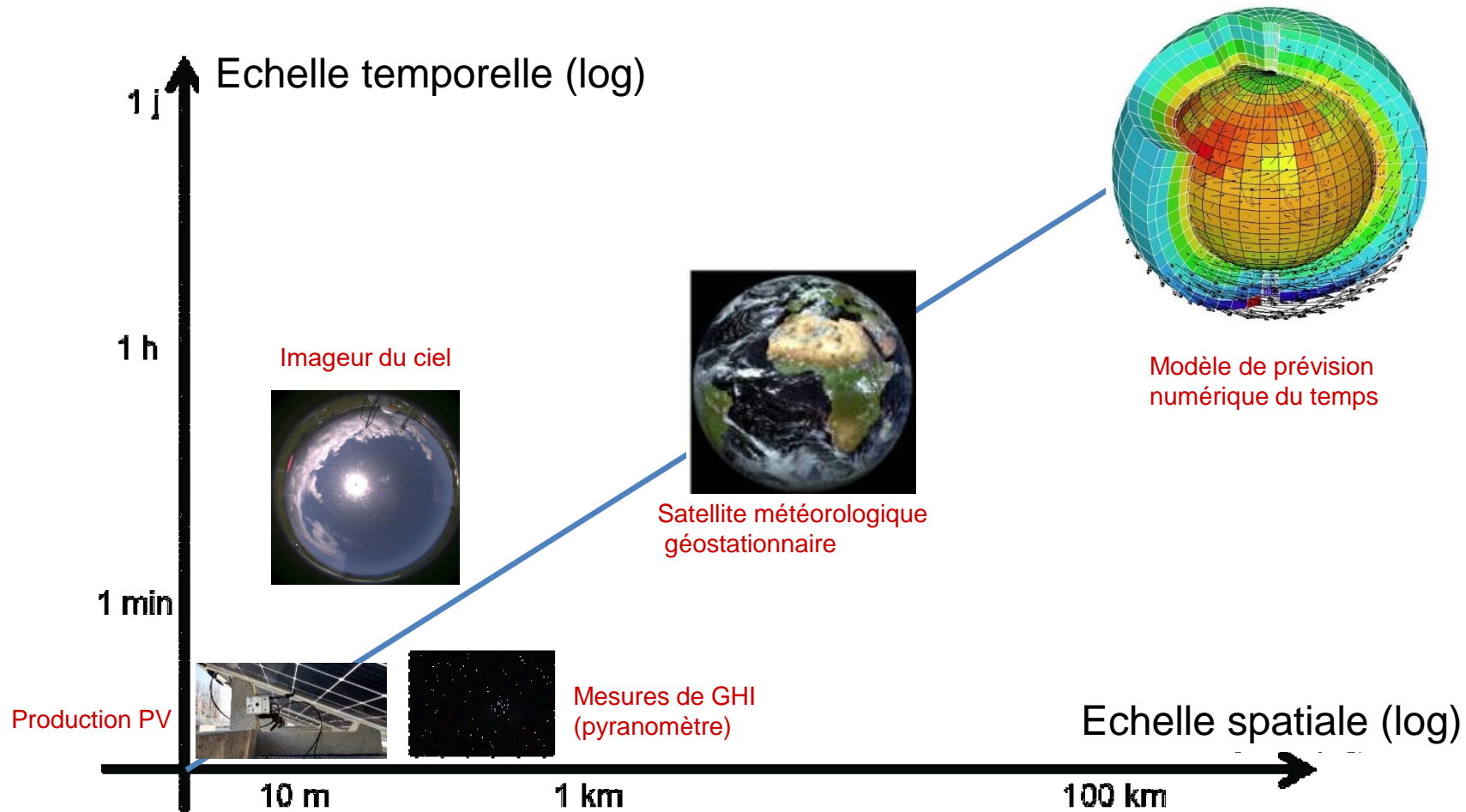
- Estimer l'éclairement solaire (*global horizontal irradiance* ou GHI) ou la production PV à l'instant $t+dt$:
 - Pour un ou plusieurs sites ponctuels ou une zone étendue (spatialement résolue ou moyennée)
 - à un instant t



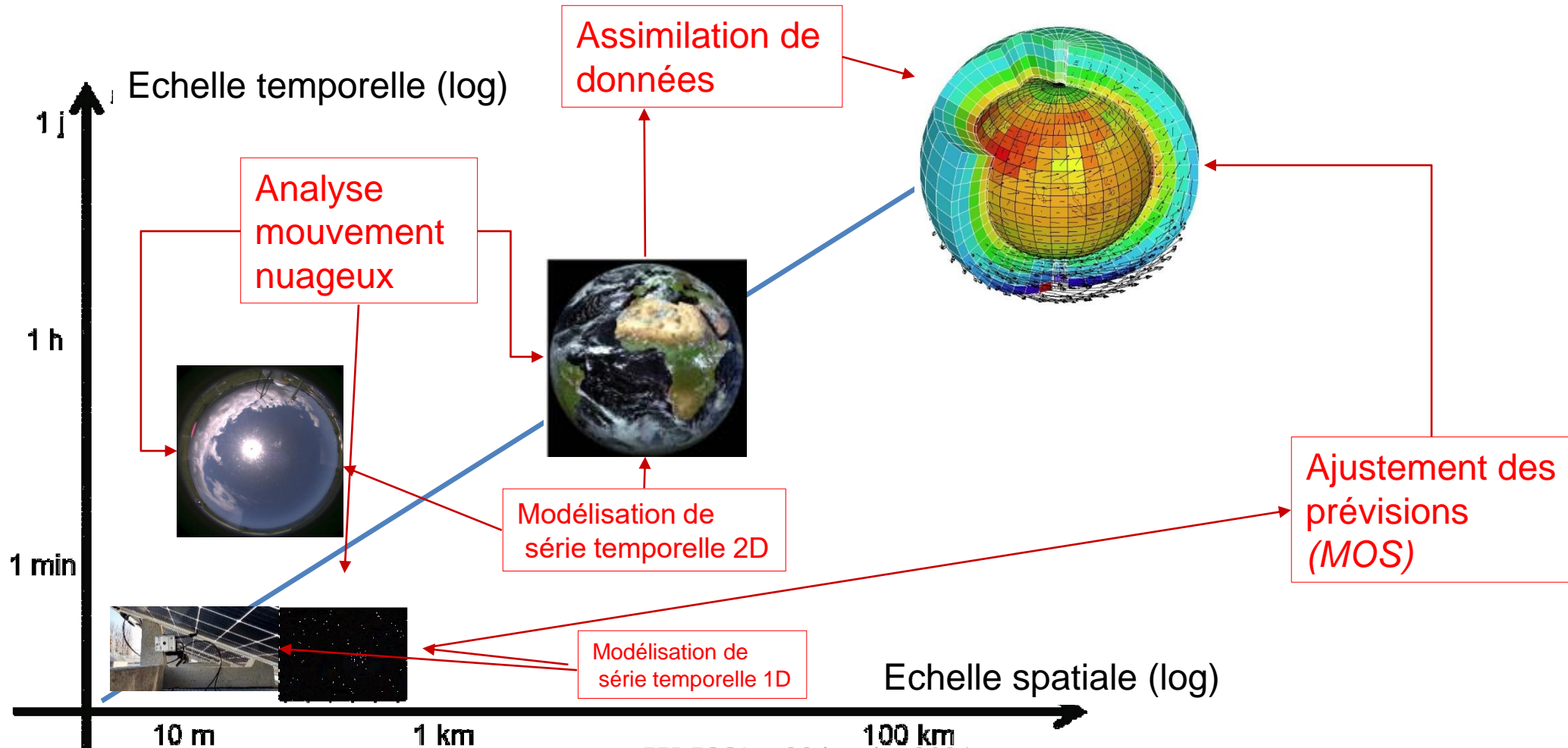
Quelles sont les enjeux scientifiques de la prévision de production PV ?

- Caractériser les variations spatiales et temporelles de la ressource solaire
 - **À différentes échelles spatiales** : du sub-métrique (en urbain) aux échelles kilométriques pour des couvertures continentales ou même mondiales
 - **À différentes échelles temporelles** : des plus fines (sub-minutes) aux échelles multi-annuelles et même climatologiques (> multi-décennales)
- La production PV varie à cause de :
 - **L'éclairement solaire au sol** qui varie à cause de :
 - **La position du soleil** (connue avec prévision)
 - **L'état optique de l'atmosphère claire** (vapeur d'eau, aérosols, ozone) qui varient en quelques heures
 - **La couverture nuageuse** (influence la plus importante et la plus variable, jusqu'à -50 % de puissance PV en quelques secondes)
 - **La température du module PV** qui varie à cause de :
 - **La température de l'air** (peu variable et prévisible)
 - **La vitesse du vent** (moins prévisible mais l'influence est limitée)

A chaque échelle son observant

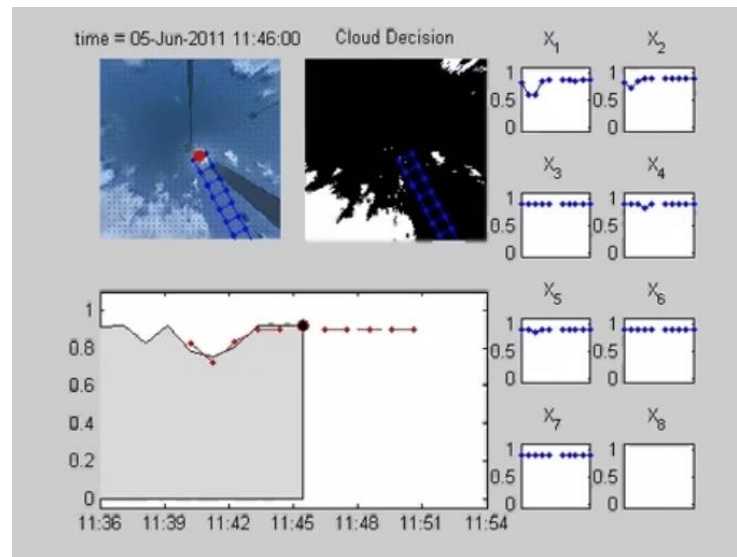
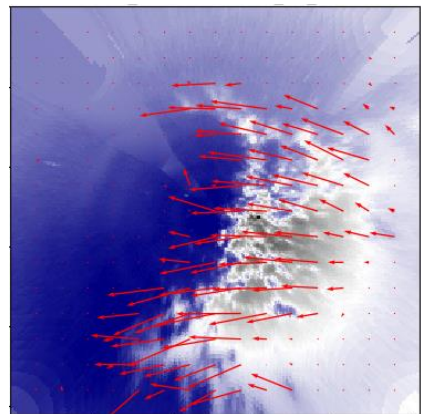


Multiples méthodes applicables



Observation par imageur du ciel

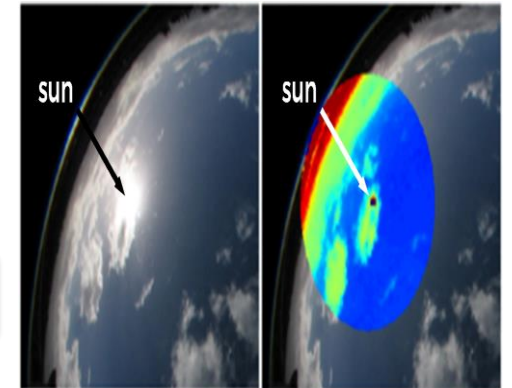
■ Par imageur du ciel



Prévision sur vecteur vent unique
Combiné souvent avec apprentissage automatique



Mobotix Q25



Infrarouge thermique
Sky Insight™ (Reuniwatt)
Cros et al., (2019)

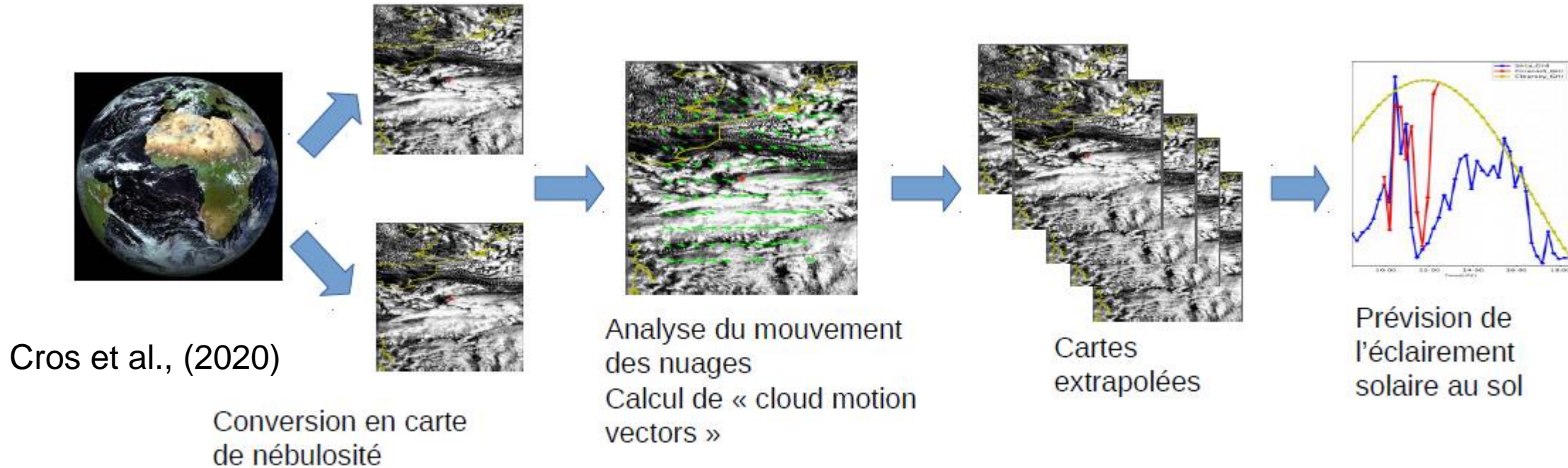


EKO SRF-02



TSI YES

Analyse du mouvement nuageux par satellite



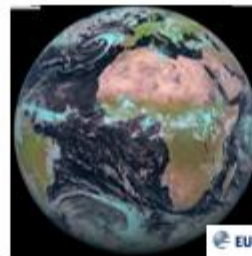
- Applicable sur tous les satellites météorologiques géostationnaires



GOES-17
Etats-Unis
Pacifique



GOES-16
Amériques



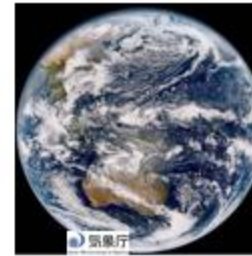
MSG-4
Europe, Afrique,
Atlantique, Brésil



MSG-1
Afrique, Moyen-
Orient, Océan
Indien

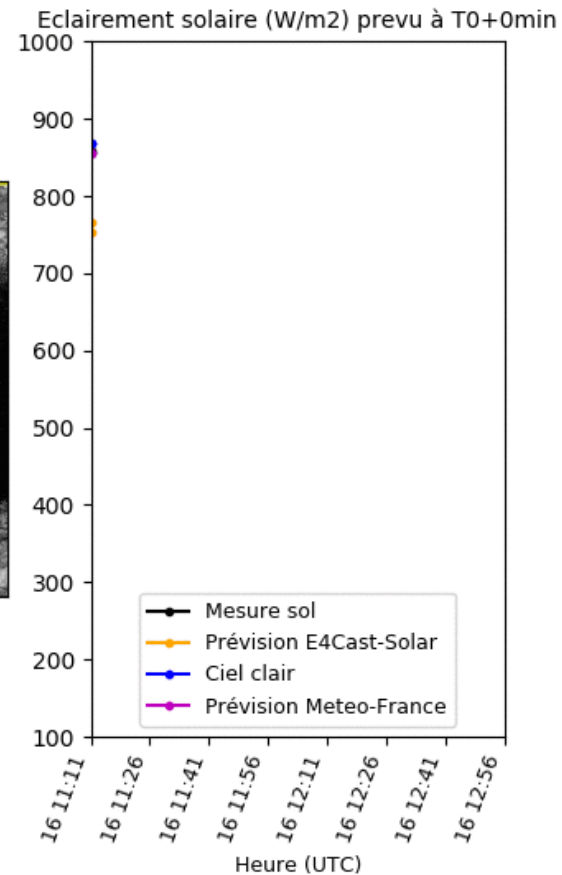
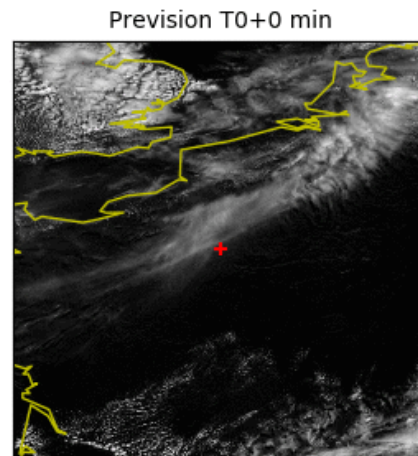
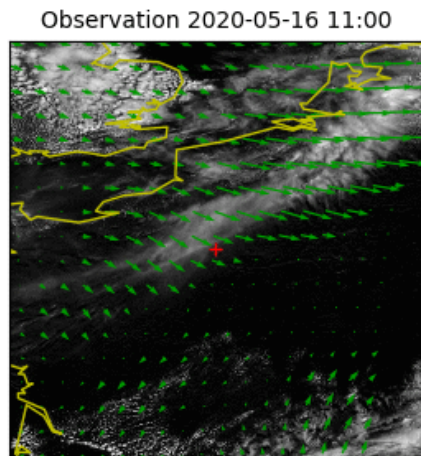


FenYun-4A
Asie Centrale,
Océan Indien



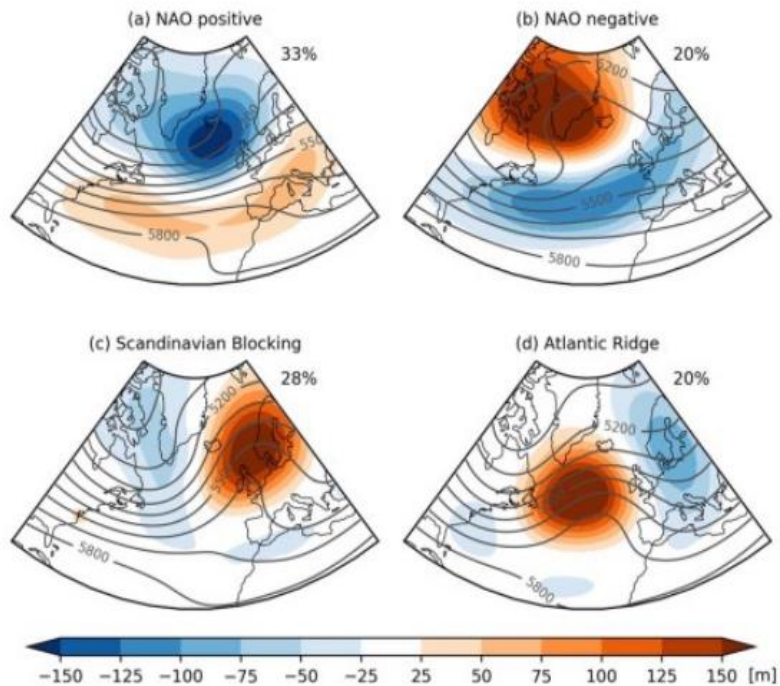
Himawari-8/9
Asie orientale,
Océanie, Pacifique
ouest

Extrapolation d'images d'indice nuageux par « cloud motion vectors »



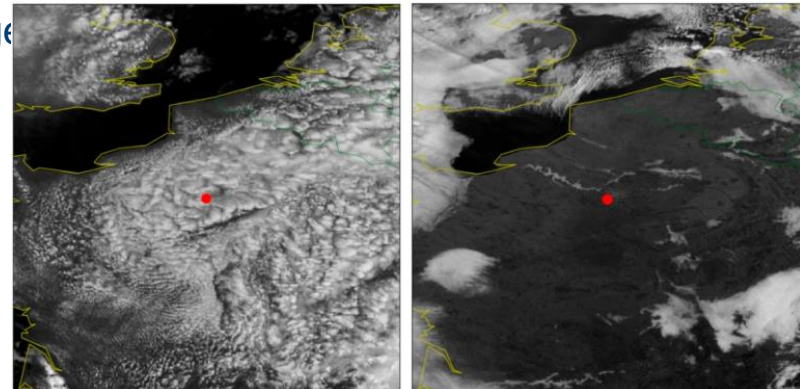
- Perception d'une dynamique "ratée" par les modèles météorologiques
- Mise à jour de la prévision à chaque production d'image (15min. pour Météosat)
- Fiable jusque 4-5h d'horizon temporel

Sensibilité aux régimes de temps



D'après van der Wiel et al.
(2019)

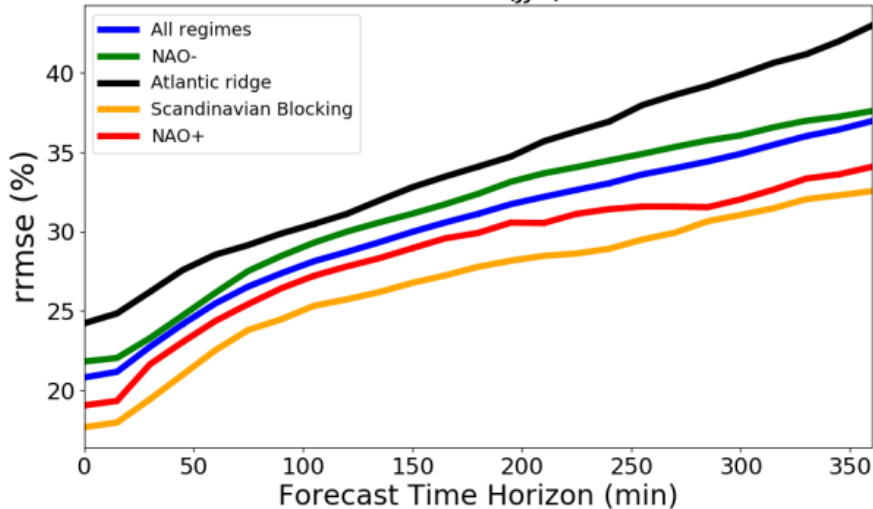
- Un régime de temps est défini par des motifs redondants de la variation verticale de l'isobare 500 hPa
- Régimes de l'Atlantique Nord
- NAO+ : chaud et sec
- NAO- : froid et humide
- Scandinavian Blocking : chaud, sec et stable
- Atlantic Ridge



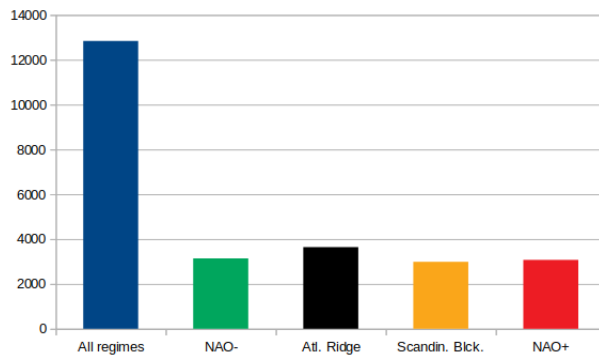
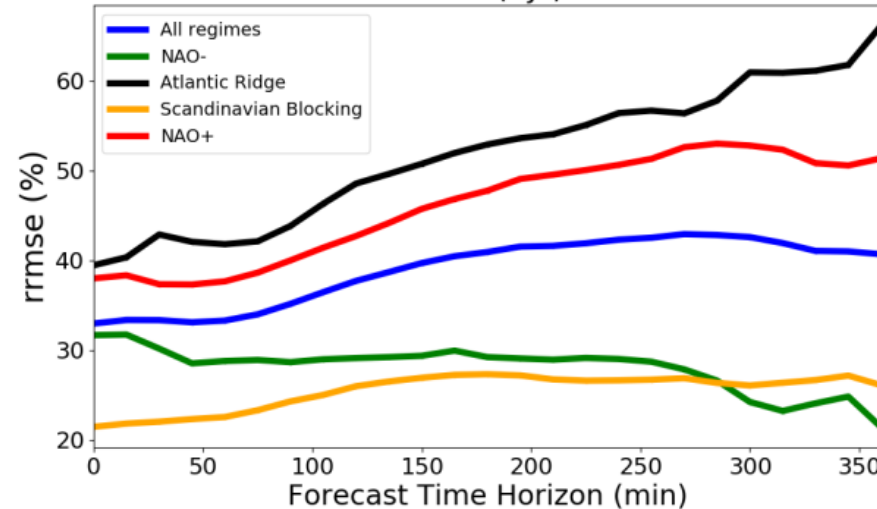
Atlantic Ridge (2018-06-13) Scandinavian Blocking (2018-12-25)

Sensibilité aux régimes de temps (2017-2020)

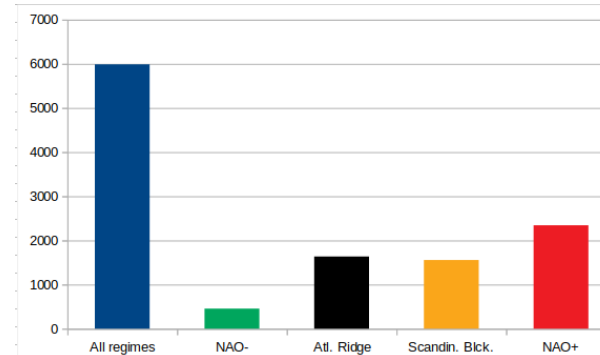
Palaiseau SIRTa (48.7N, 2.2E) 20170701-20200630
summer(JJA)



Palaiseau SIRTa (48.7N, 2.2E) 20170701-20200630
winter(DJF)



Eté

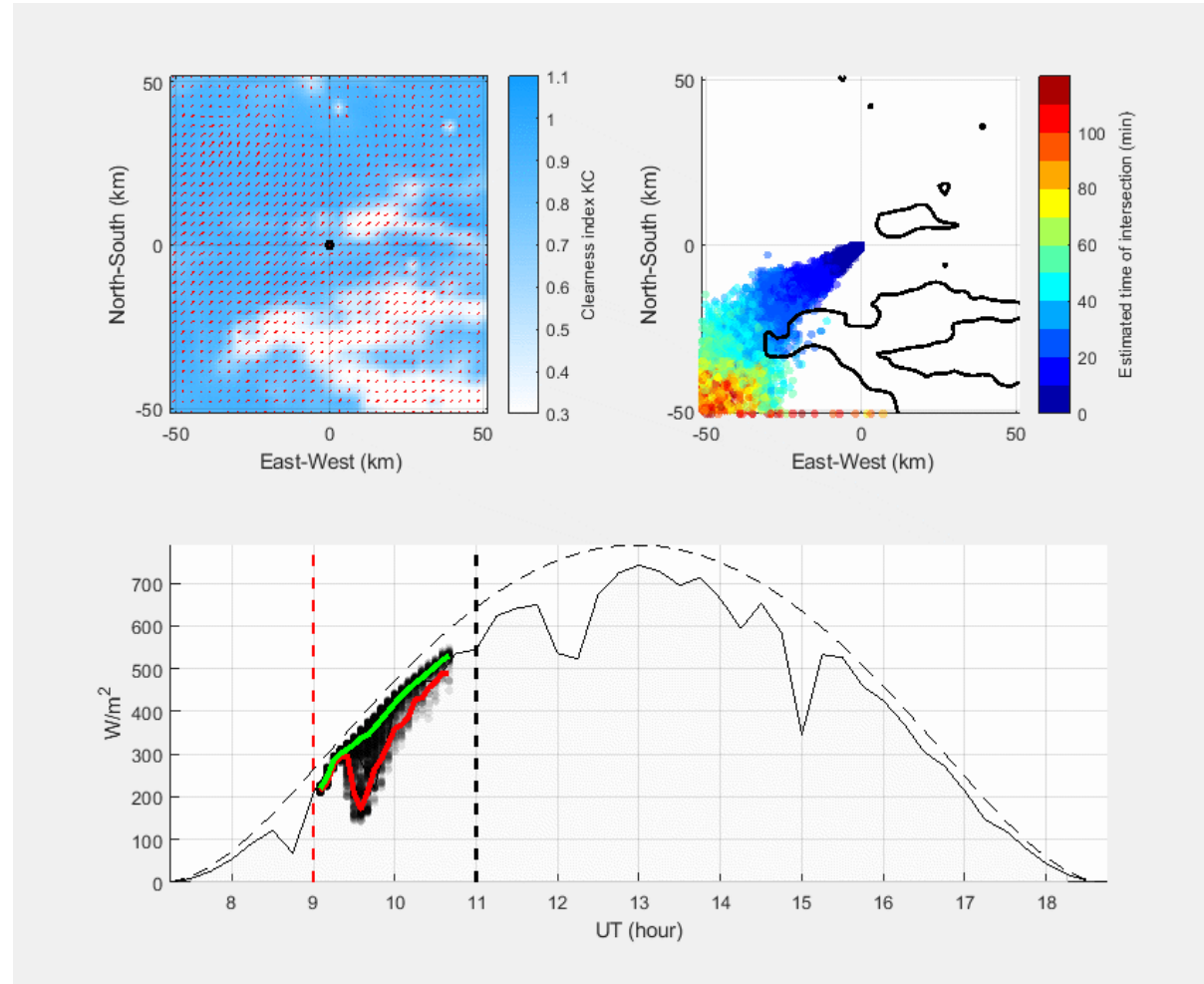


Hive

- L'occurrence et la durée des régimes de temps peuvent connus plusieurs jours à l'avance
 - La performance relative de la prévision infrajournalière peut donc être évaluée en fonction du régime de temps
- Cros et al., (2020)

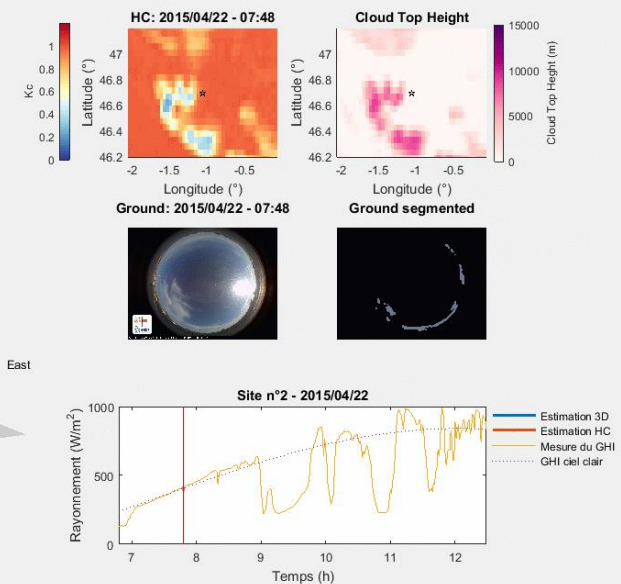
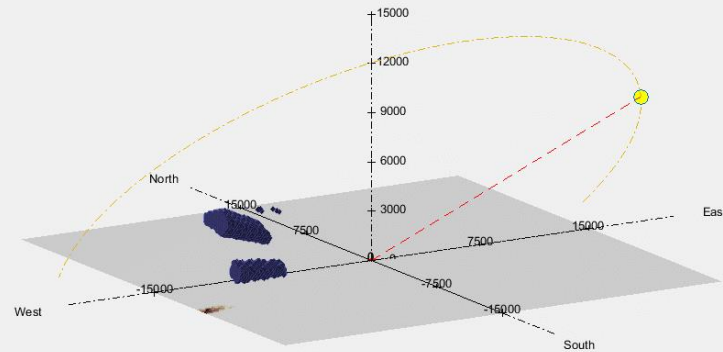
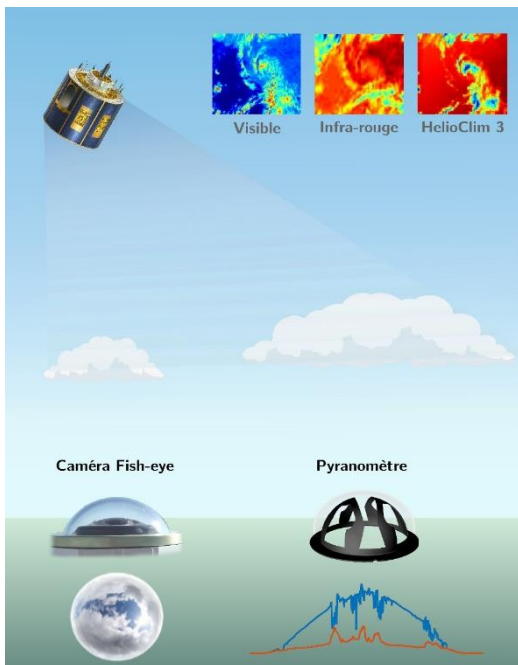
Prévision probabiliste par satellite

- Méthode CMV qui attribue une incertitude gaussienne à la direction et norme de ses vecteurs
- Chaque résultat de prévision est une fonction probabiliste
- Carrière et al., (2021)



Combinaison d'observations

- Reconstruction 3D de la scène nuageuse avec pyranomètre, caméra et satellite



Combinaison d'observations

- Assimilation de données nuageuses de
 - satellite météorologique géostationnaire dans
 - un modèle PNT régional

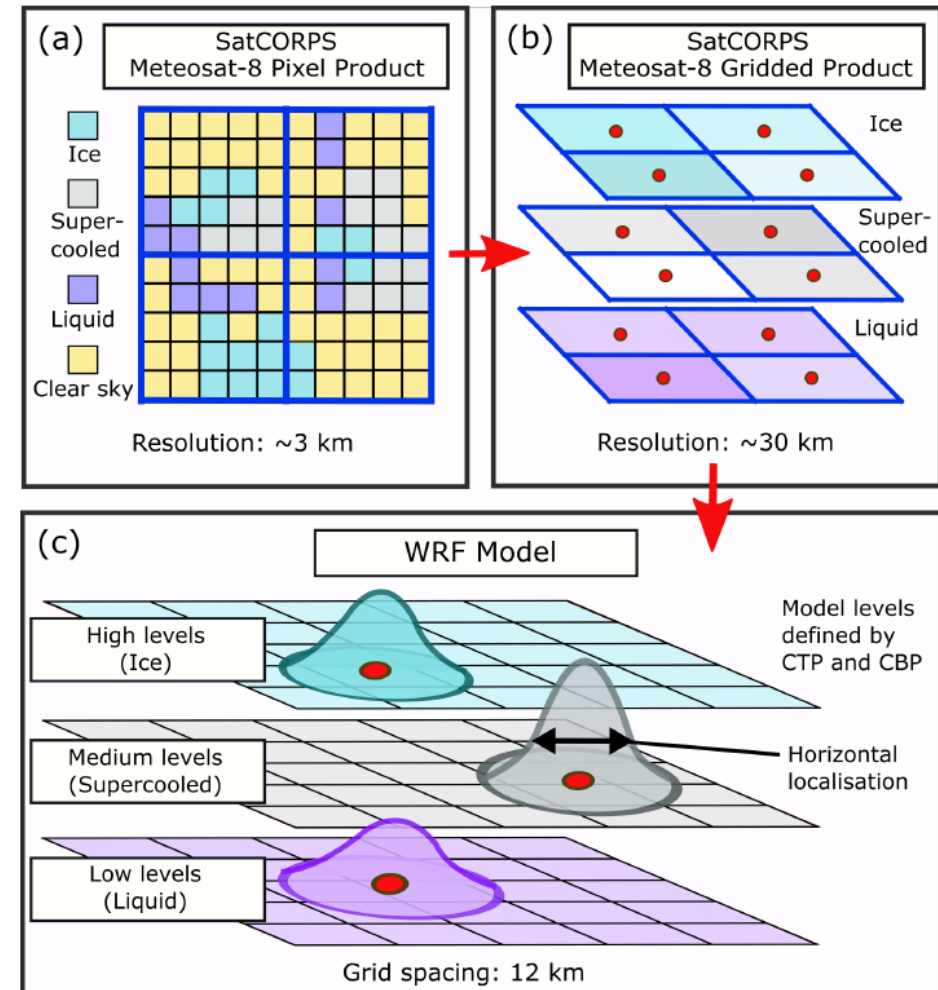
UR UNIVERSITÉ
DE LA RÉUNION

Université
de Guyane

IRD
Institut de Recherche
pour le Développement
FRANCE

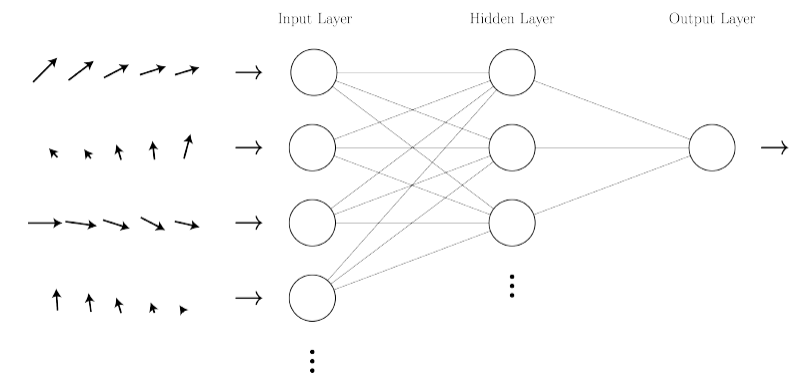
— Reuniwatt —

Kurzrock et al., (2019)



Apprentissage automatique et profond

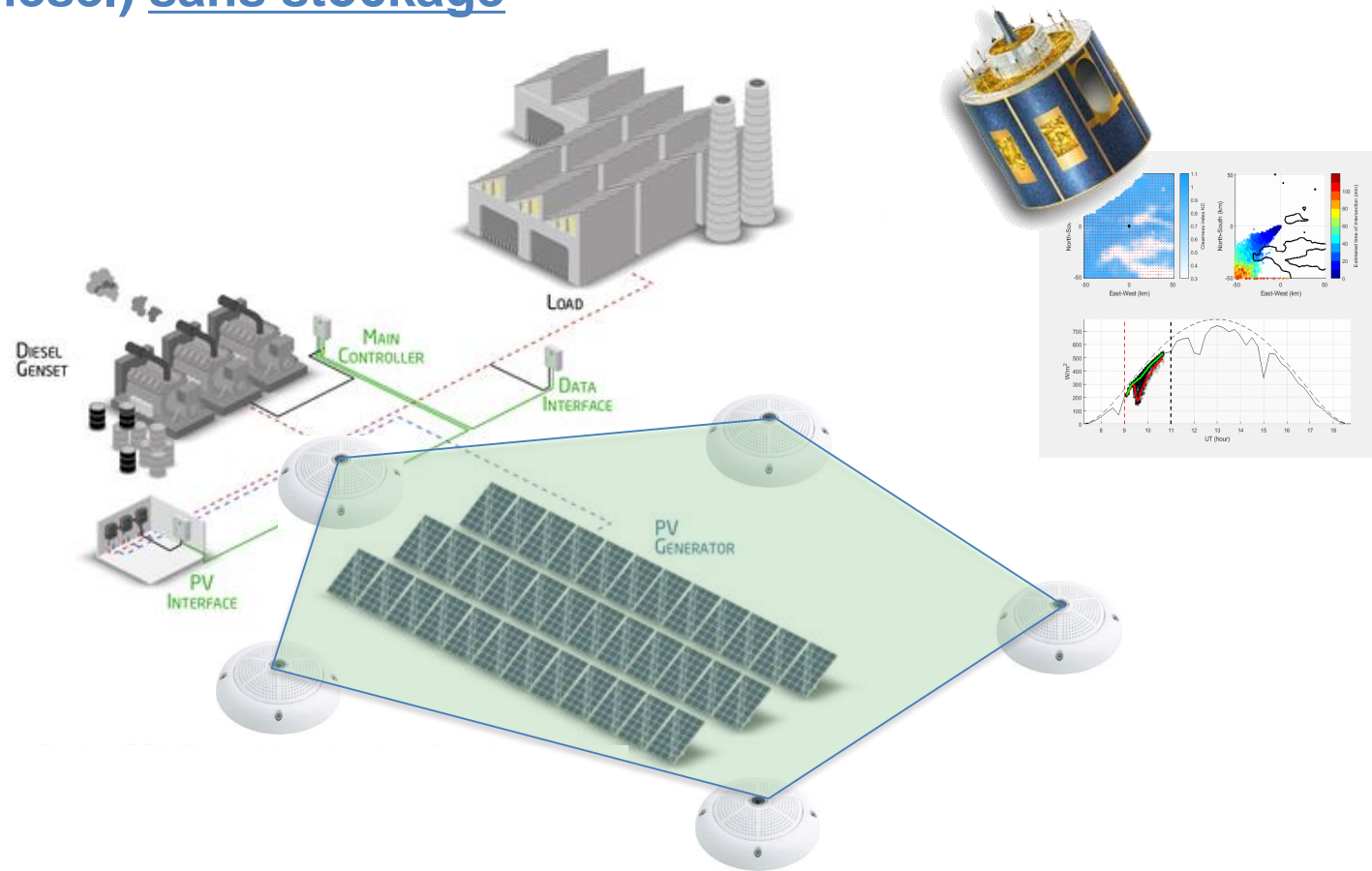
- L'approche « intelligence artificielle » peut compléter quasiment toutes les méthodes présentées ; elle bénéficie d'une base physique solide pour concevoir de nouveaux algorithmes
- La modélisation physique des processus stochastiques des nuages à petite échelle reste un verrou qu'il sera difficile de lever avec une approche physique seule



Penteliuc & Frinçu
(2019)

Prévisions opérationnelles

- En opération : gestion d'un système énergétique isolé hybride (PV / diesel) sans stockage



Adapté de www.th-energy.net


SPIE


ARMINES

Prévisions opérationnelles



20 compteurs intelligents
7 capteurs environnementaux
Ferme PV (53 panneaux, 16.7 kWc)
Batterie (30 kWh)
Borne V2H
Système de gestion d'énergie
Smart GTB

Collaborations industrielles :



accenta.

Mise à jour des stratégies de charge/décharge
des batteries grâce aux prévisions
infrajournalières



Références bibliographiques

- Carrière, T., Amaro e Silva, R., Zhuang, F., Saint-Drenan, Y. M., & Blanc, P. (2021). A New Approach for Satellite-Based Probabilistic Solar Forecasting with Cloud Motion Vectors. *Energies*, 14(16), 4951.
- Cros, S.; Badosa, J.; Szantaï, A.; Haeffelin, M. Reliability Predictors for Solar Irradiance Satellite-Based Forecast. *Energies* **2020**, *13*, 5566. <https://doi.org/10.3390/en13215566>
- Dambreville, R., Blanc, P., Chanussot, J., & Boldo, D. (2014). Very short term forecasting of the global horizontal irradiance using a spatio-temporal autoregressive model. *Renewable Energy*, 72, 291-300.
- Kurzrock, F., Nguyen, H., Sauer, J., Chane Ming, F., Cros, S., Smith Jr, W. L., ... & Lajoie, G. (2019). Evaluation of WRF-DART (ARW v3. 9.1. 1 and DART Manhattan release) multiphase cloud water path assimilation for short-term solar irradiance forecasting in a tropical environment. *Geoscientific Model Development*, 12(9), 3939-3954.
- Penteliuc, M., & Frincu, M. (2019, September). Prediction of Cloud Movement from Satellite Images using Neural Networks. In 2019 21st International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC) (pp. 222-229). IEEE.
- Vallance, Loïc. Synergie des mesures pyranométriques et des images hémisphériques in-situ avec des images satellites météorologiques pour la prévision photovoltaïque. Diss. Paris Sciences et Lettres, 2018
- van der Wiel, K., Bloomfield, H. C., Lee, R. W., Stoop, L. P., Blackport, R., Screen, J. A., & Selten, F. M. (2019). The influence of weather regimes on European renewable energy production and demand. *Environmental Research Letters*, 14(9), 094010..
- Verbois et al, 2017. Solar Irradiance Forecasting Using Numerical Weather Prediction and Statistical Learning, ICEM 2017

Merci pour votre attention !



sylvain.cros@lmd.ipsl.fr

yves-marie.saint-drenan@mines-paristech.fr



E4C
INTERDISCIPLINARY
CENTER



SIRTA
SITE INSTRUMENTAL DE RECHERCHE
PAR TÉLÉDÉTECTION ATMOSPHÉRIQUE

