



7^{èmes} Journées Nationales de l'Energie Solaire
25 - 27 Août 2021

Simulation de l'effet photoélectrique : où se situent les incertitudes ? Retour sur 5 ans de mesures

A. MIGAN DUBOIS¹, J. BADOSA², V. BOURDIN³, M. I. TORRES AGUILAR², Y. BONNASSIEUX⁴

1. Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Sorbonne Université, GeePs, Gif Sur Yvette, France
2. Ecole Polytechnique, IPSL, Université Paris-Saclay, ENS, Sorbonne Université, CNRS, LMD, Palaiseau, France
3. CNRS, LISN, Orsay, France
4. CNRS, Ecole Polytechnique, LPICM, Palaiseau, France



Contexte de l'étude



- 150 instruments de caractérisation du rayonnement solaire
- Etalonnage/Calibration au Centre Mondial du Rayonnement de Davos



Contexte de l'étude



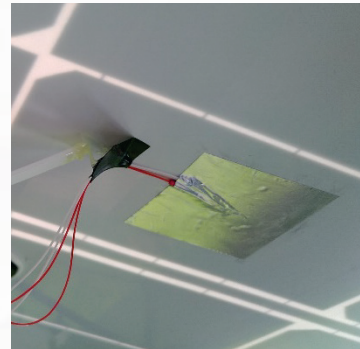


Plan de la présentation

- ❑ Étapes de simulation
- ❑ Performances de la simulation étape par étape
- ❑ Synthèse sur les étapes les plus incertaines
- ❑ Performances de la simulation selon la source des données d'entrée
- ❑ Conclusion



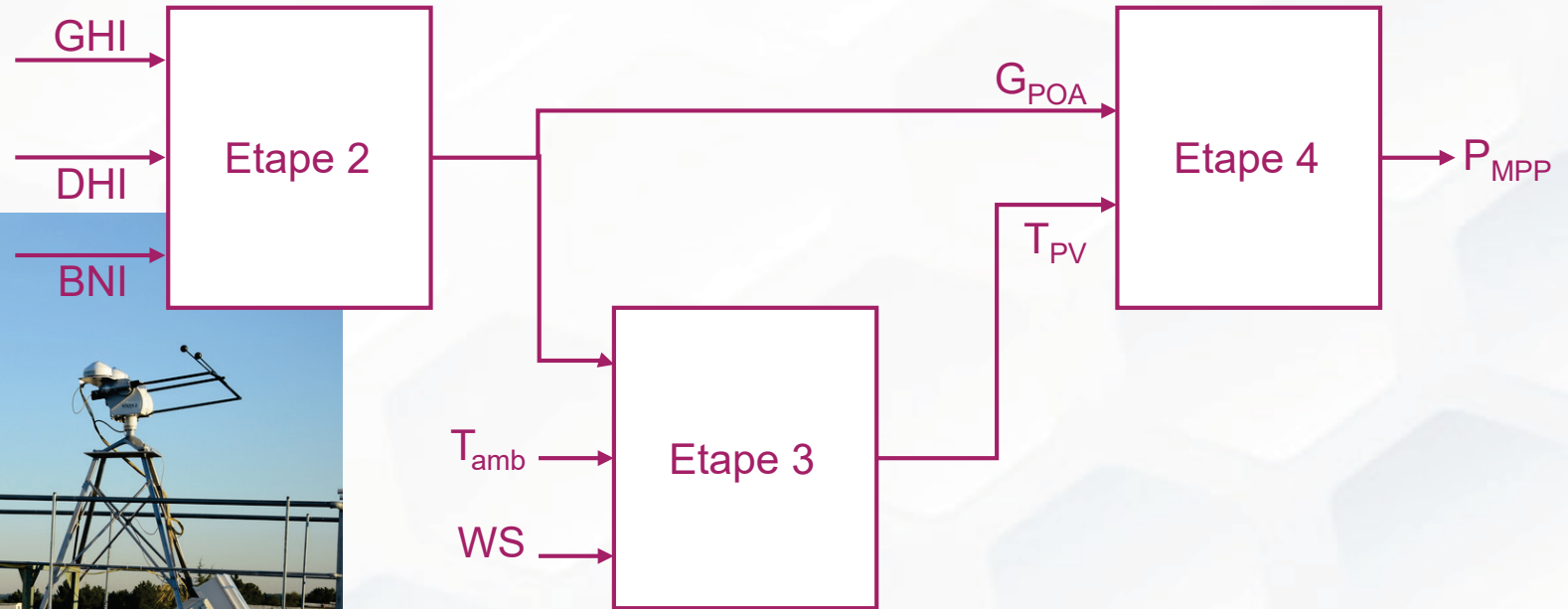
Etapes de simulation



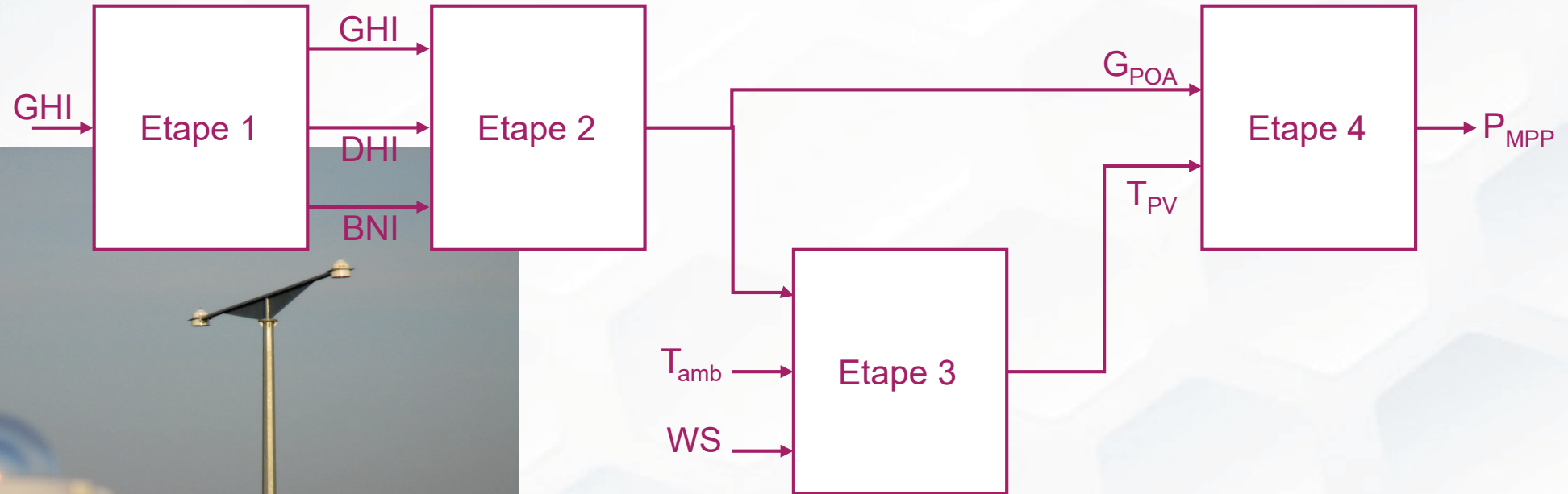
Etapes de simulation

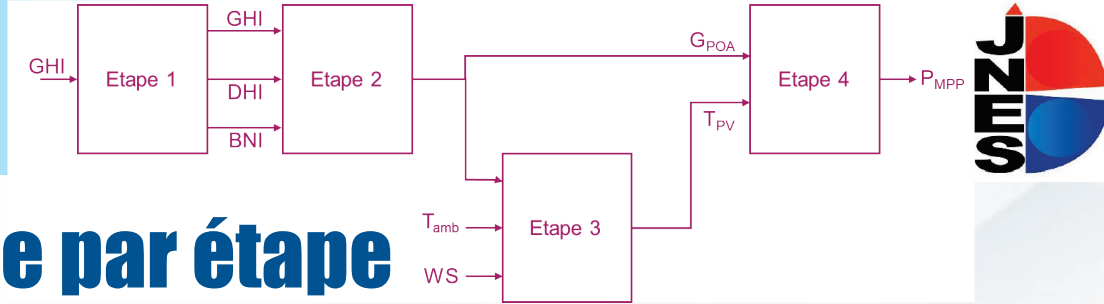


Etapes de simulation



Etapes de simulation





Performances de la simulation étape par étape

□ Les indicateurs de performances

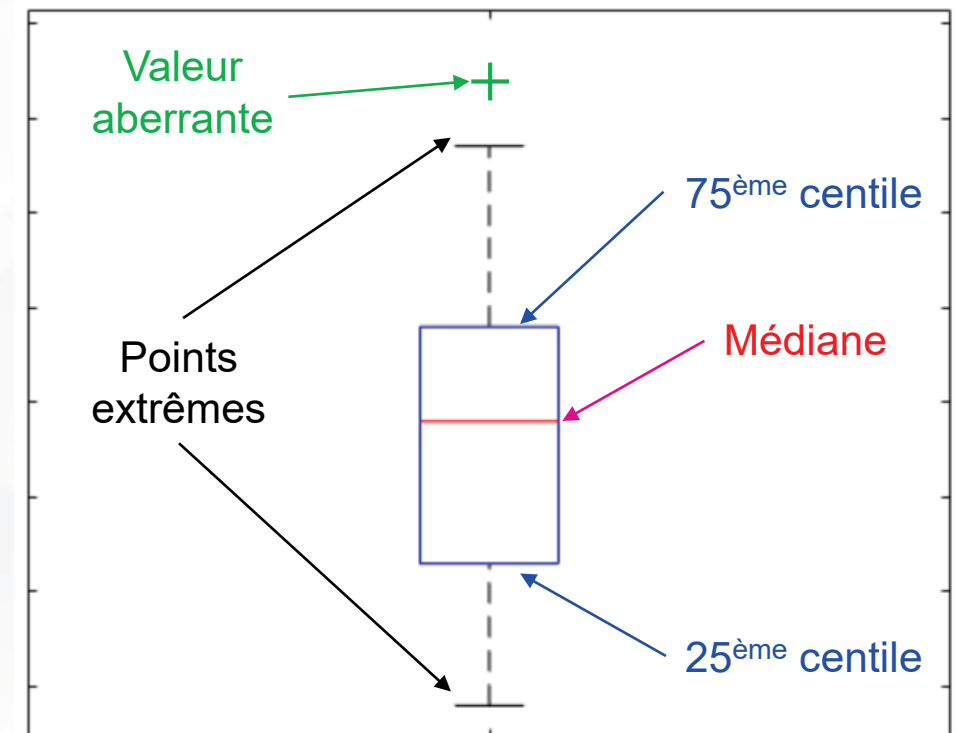
- Erreur relative :

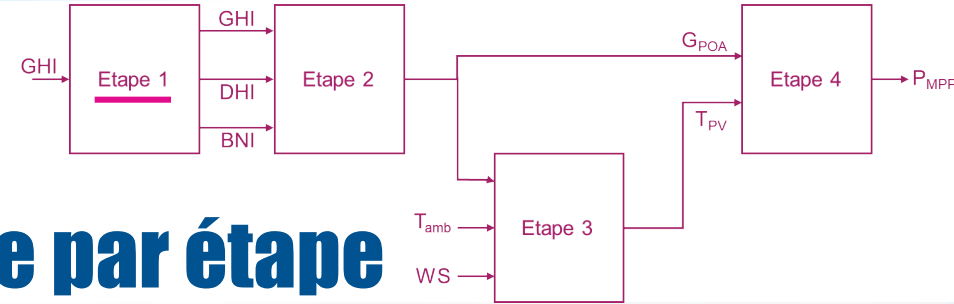
$$rMAE = \frac{\sum_{i=1}^N |X_{calc}(i) - X_{mes}(i)|}{\sum_{i=1}^N X_{mes}(i)}$$

- Biais relatif :

$$rMBE = \frac{\sum_{i=1}^N [X_{calc}(i) - X_{mes}(i)]}{\sum_{i=1}^N X_{mes}(i)}$$

- Boîtes à moustaches :



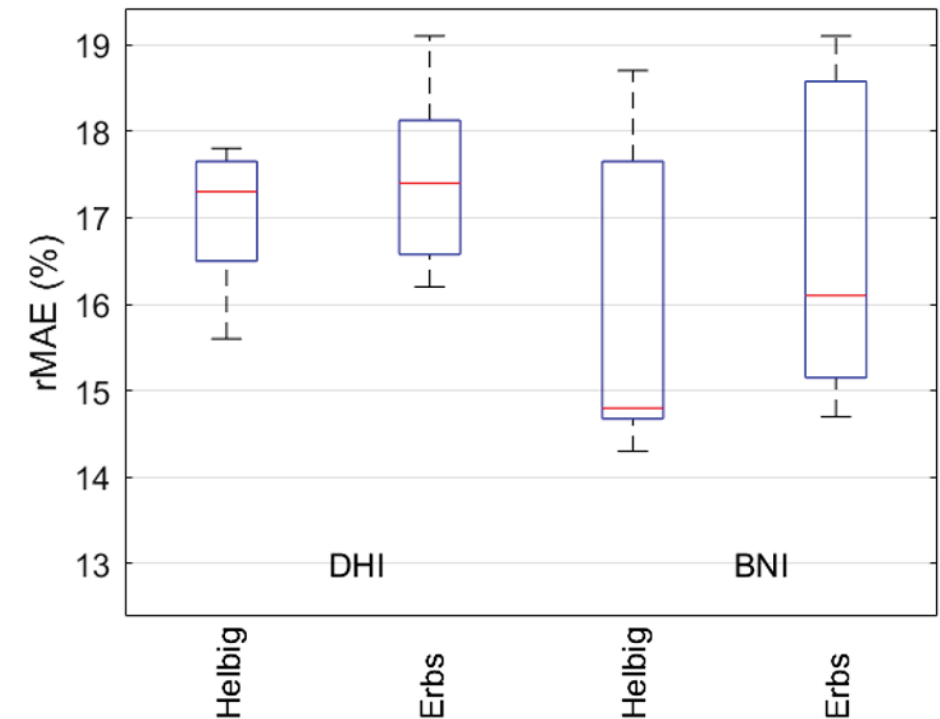
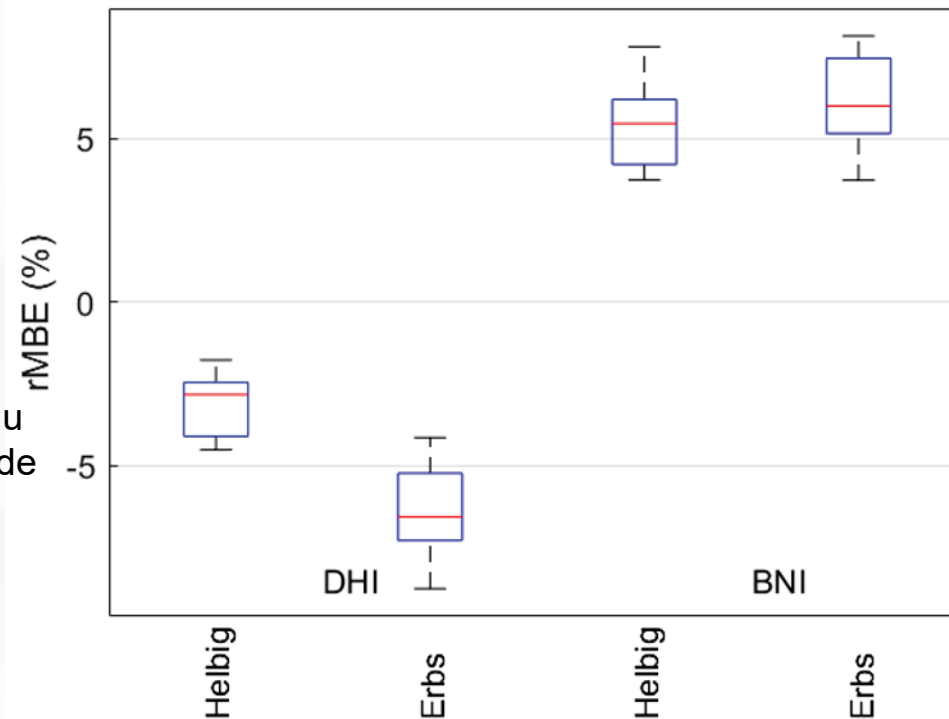


Performances de la simulation étape par étape

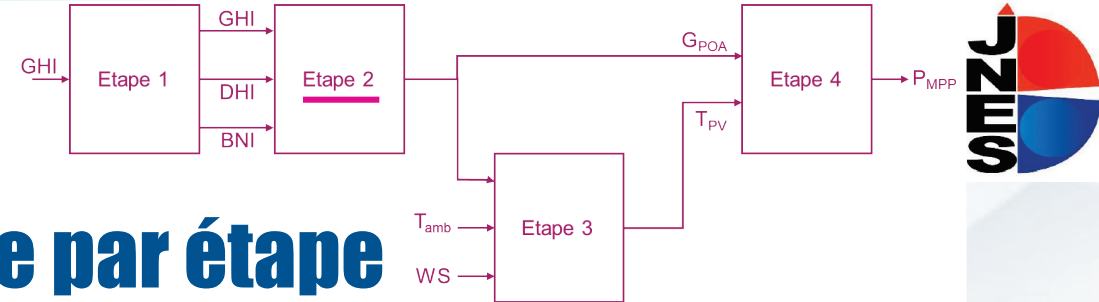
Estimation de la fraction diffuse (DHI, BNI) – Etape 1

- Helbig [1] :
Modèle empirique (coefficients de la littérature)

- Erbs [2] :
Modèle empirique
Différenciation des coefficients du modèle en fonction de la valeur de l'indice de clarté.



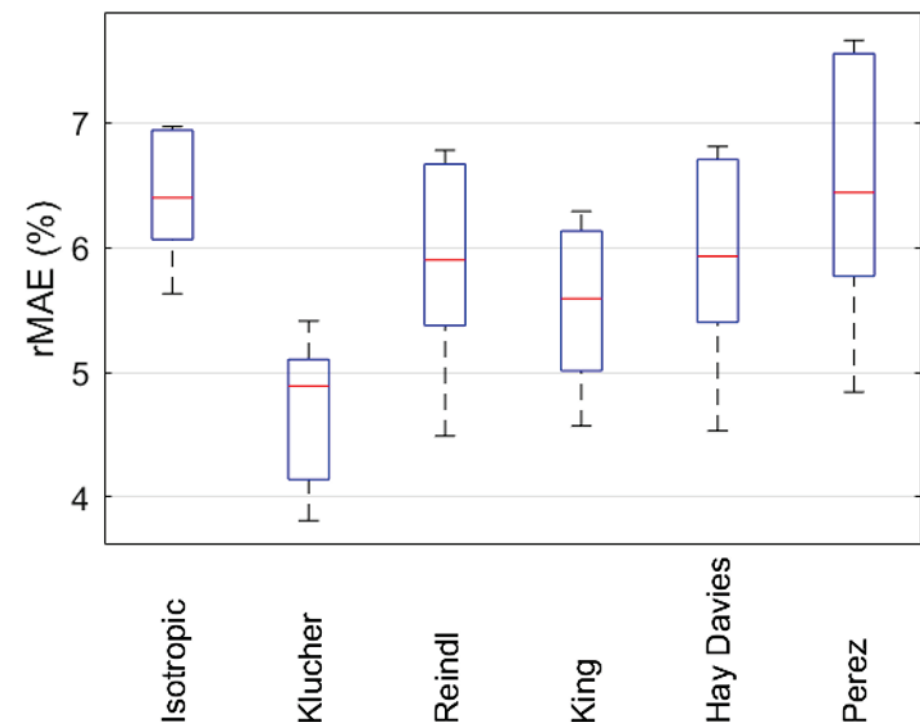
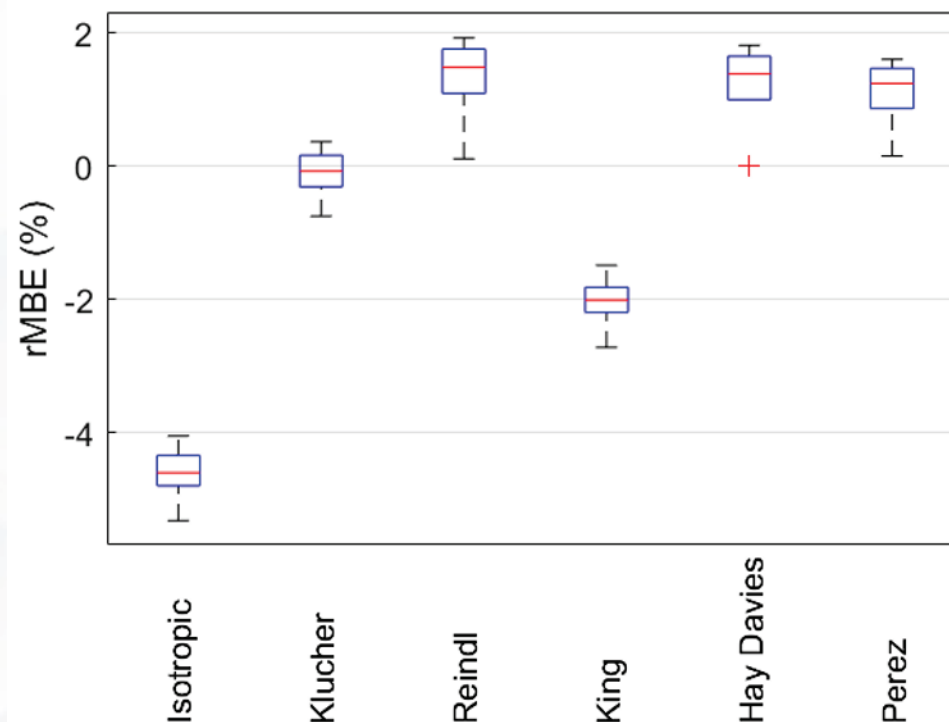
Erreur absolue assez importante sur les deux composantes qui peut se compenser sur une année.
Meilleures performances = Modèle de Helbig



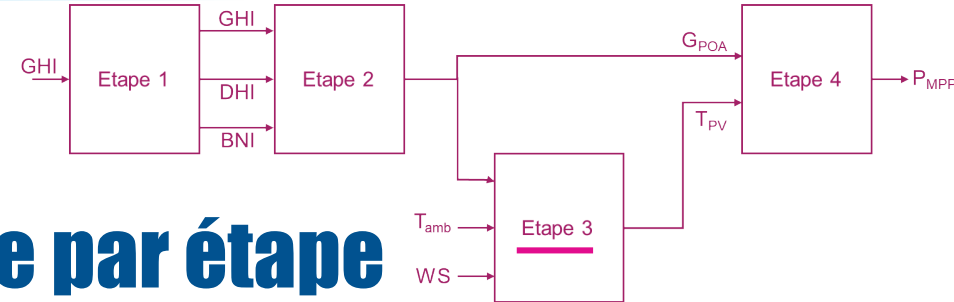
Performances de la simulation étape par étape

Estimation du rayonnement dans le plan PV (G_{POA}) – Etape 2

- Isotrope [3]
- Klucher [4] :
Meilleure prise en compte du circumsolaire.
- King [5] :
Modèle empirique prenant en compte le spectre vs AM et AOI
- Hay&Davies [6] :
Indice d'anisotropie qui divise le diffus circumsolaire et isotrope
- Perez [7] :
Modèle empirique différenciant les composantes du circumsolaire, isotropes et de l'horizon.
- Reindl [8] :
Perez + Hay&Davies



Performances des modèles assez comparables (sauf pour le modèle isotrope)
Meilleures performances = Modèle de Klucher



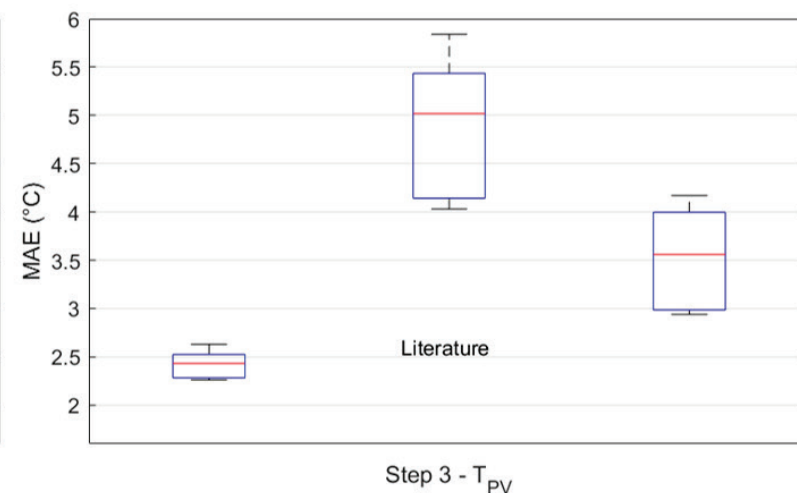
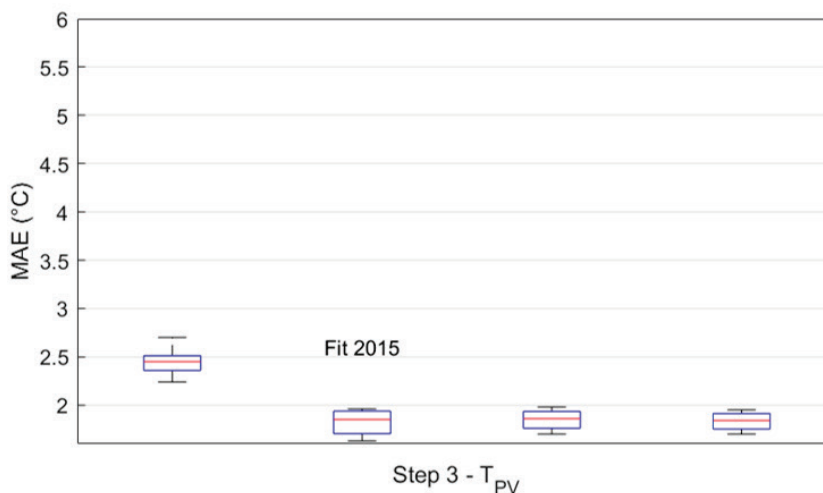
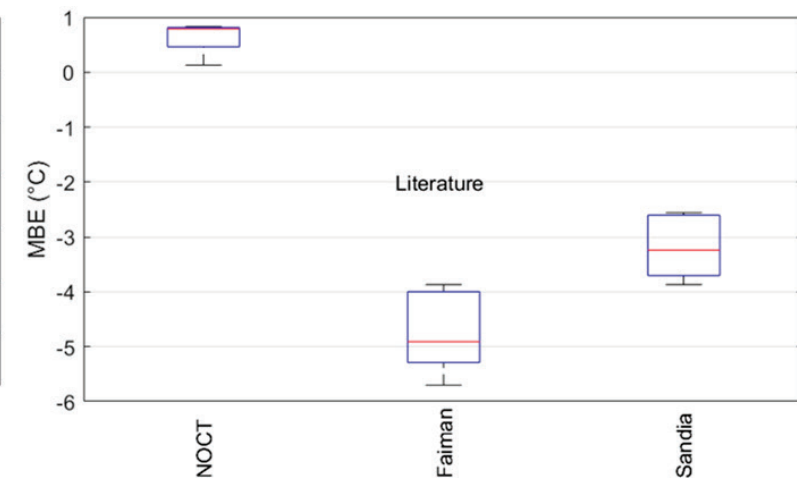
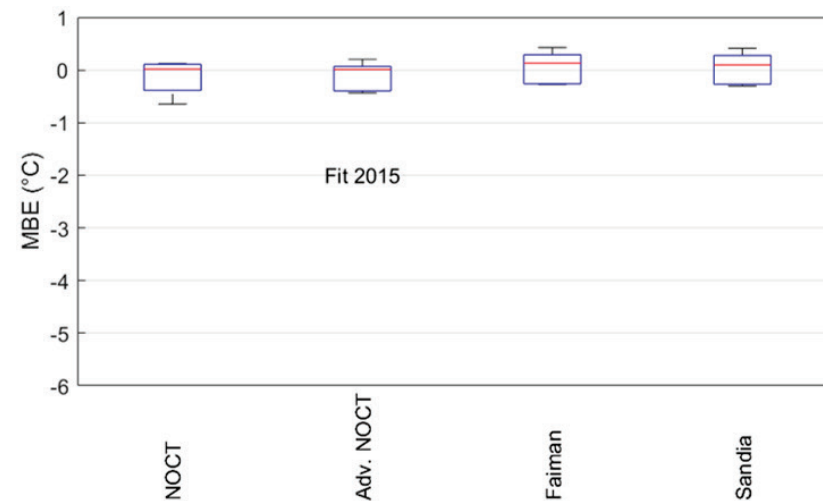
Performances de la simulation étape par étape

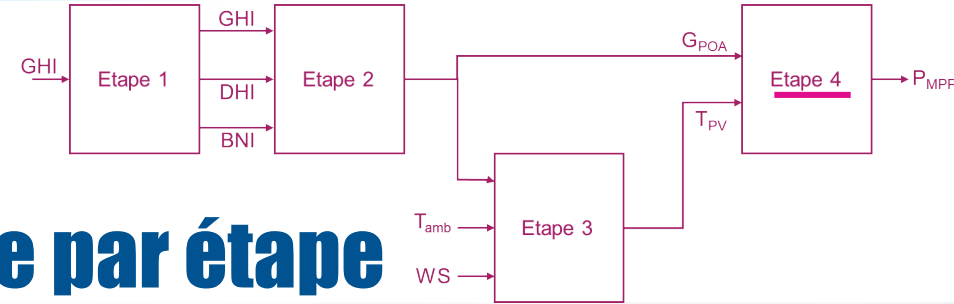
Estimation de la température des modules (T_{PV}) – Etape 3

- NOCT [9] :
Modèle classique basé sur la NOCT des données constructeur.
- NOCT amélioré [10] :
Prise en compte du vent et du taux d'électricité produite.
- Faiman [11] :
Concepts simples de transfert de chaleur
- Sandia [12] :
Modèle thermique simple.

Moins bonnes performances avec les coefficients de la littérature (sauf NOCT)

Meilleur modèle = NOCT amélioré

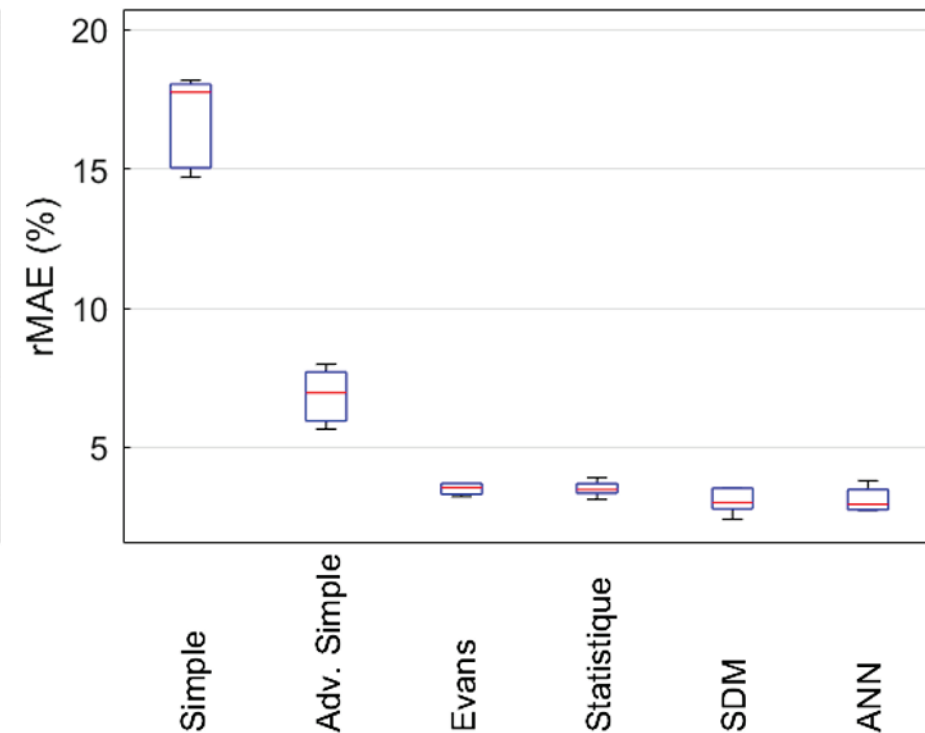
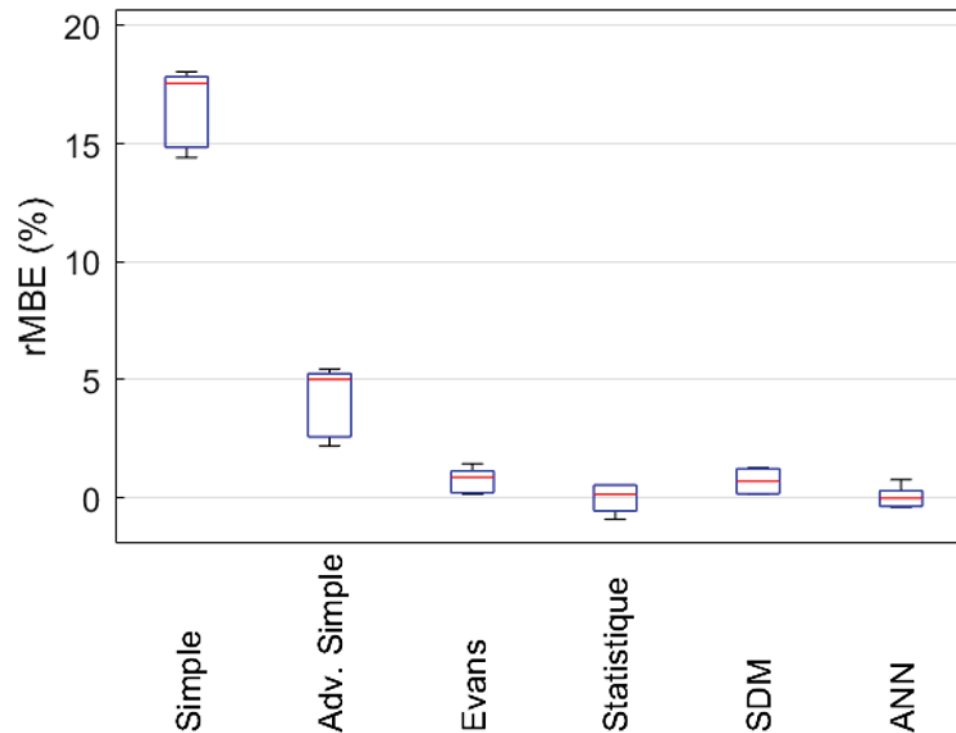




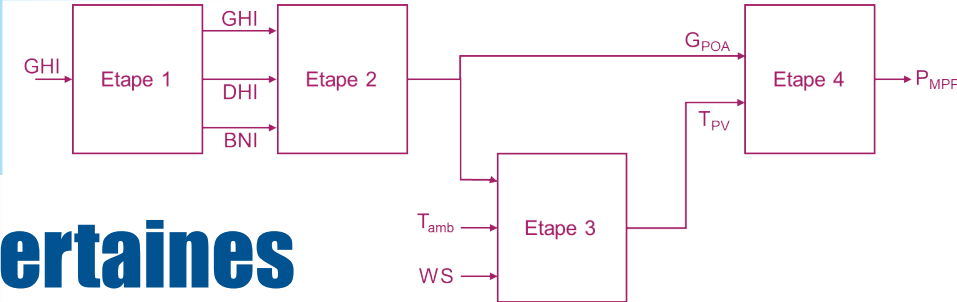
Performances de la simulation étape par étape

Estimation de la puissance produite – Etape 4

- Simple [13] :
Rendement STC constant
- Simple amélioré :
Rendement annuel moyen mesuré
- Evans [14] :
Effet de la température et du faible éclaircissement
- Statistique [15] :
Conditions environnementales similaires en 2015
- SDM [16] :
Circuit électrique équivalent à 1 diode et 5 paramètres.
- Réseaux de neurones [17] :
Feed-forward ANN avec combinaison linéaire pondérée et fonction sigmoïde



Performances des modèles assez comparables (sauf pour les modèles simples)
Compromis simplicité/performances = Modèle de Evans



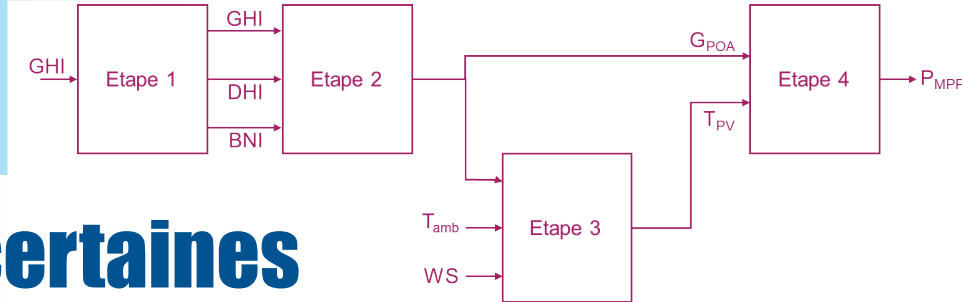
Synthèse sur les étapes les plus incertaines

□ Impact de l'éclairement sur la température PV

Le biais n'est pas impacté par l'estimation ou la mesure de l'éclairement dans le plan

L'erreur moyenne passe de 1,8°C à 2°C que l'on parte de l'éclairement dans le plan (G_{POA}), ou de l'éclairement global horizontal (GHI)

	Etape 3	Etapes 2&3	Etapes 1&2&3	
Modèle	Adv. NOCT	+ Klucher	+ Helbig	
Entrées	G_{POA} , T_{amb} , WS	GHI, DHI, BNI, T_{amb} , WS	GHI, T_{amb} , WS	→ T_{PV}
MBE (°C)	-0,1±0,3	0,0±0,3	-0,2±0,3	
MAE (°C)	1,8±0,1	2,0±0,1	2,0±0,1	



Synthèse sur les étapes les plus incertaines

□ Impact de la température sur la puissance PV

L'estimation de la température PV n'induit pas d'erreur supplémentaire dans l'estimation de la puissance PV (erreur du modèle thermique de l'ordre de 2°C).

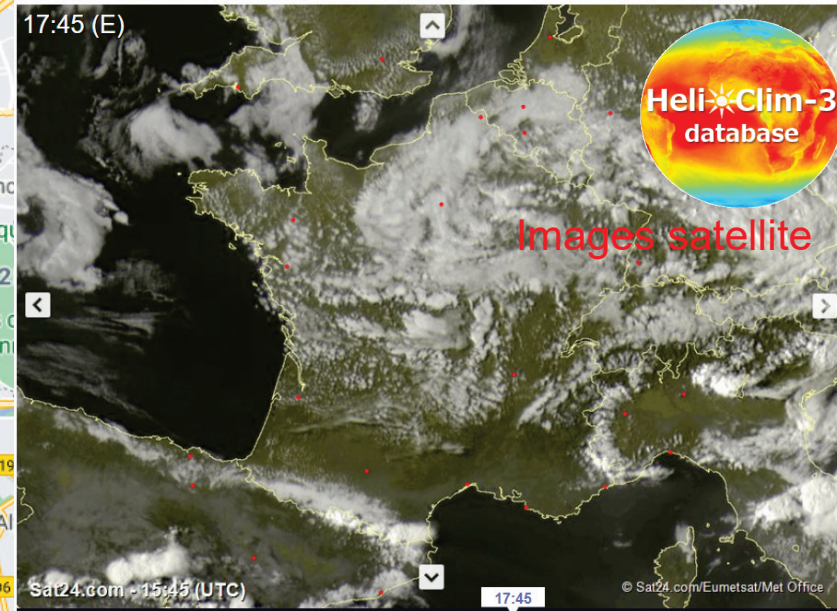
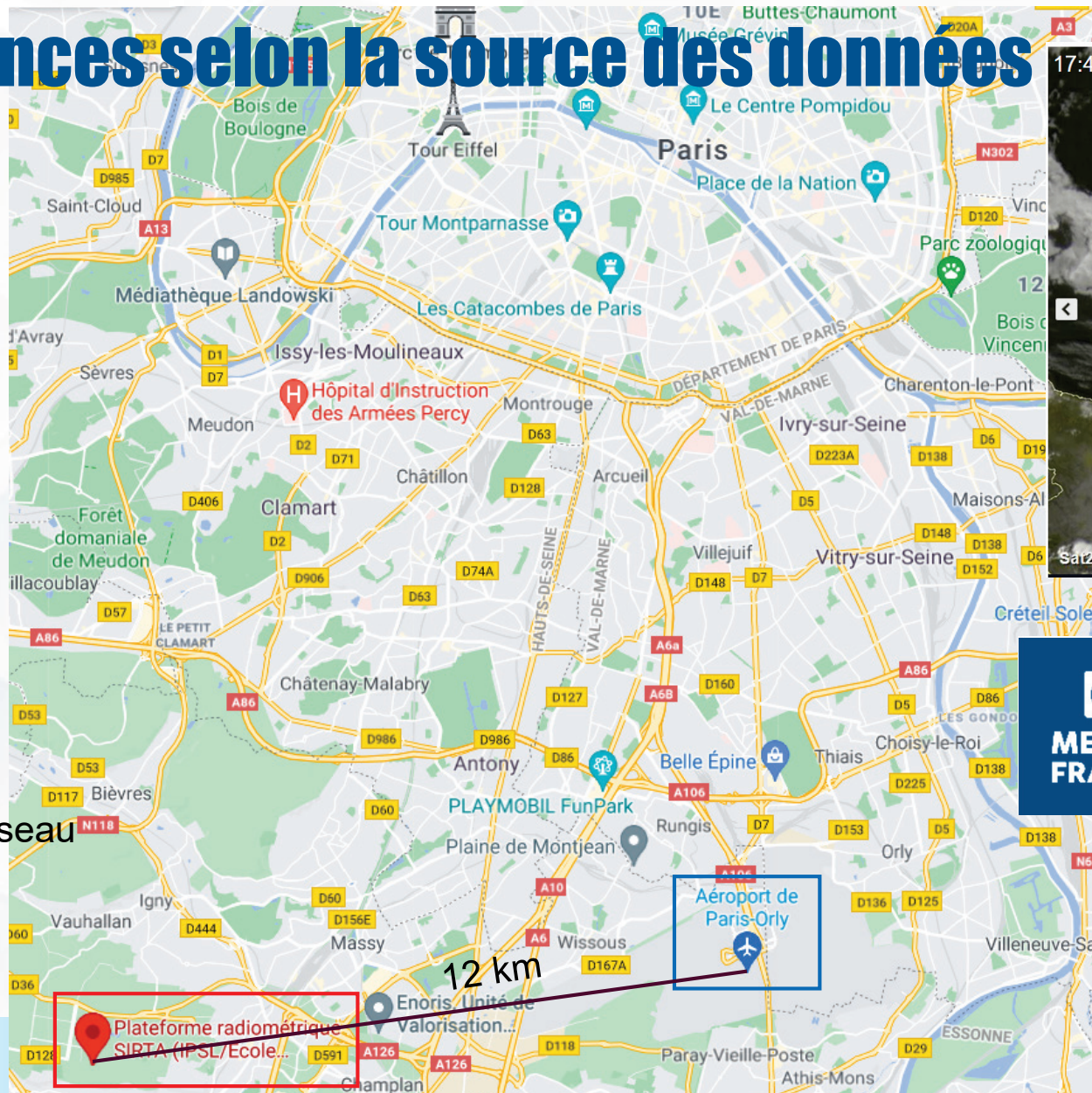
	Etape 4	Etapes 3&4	
Modèle	Evans	+ Adv. NOCT	
Entrées	G_{POA} , T_{PV}	G_{POA} , T_{amb} , WS	→ P_{MPP}
rMBE (%)	0,7±0,5	0,7±0,6	3,2±0,6
rMAE (%)	3,5±0,2	3,5±0,2	4,9±0,3

□ Impact de l'éclairement sur la puissance PV

L'erreur moyenne annuelle double quasiment lorsque l'on mesure ou que l'on estime l'éclairement dans le plan PV.

	Etape 4	Etapes 2&3&4	Etapes 1&2&3&4	
Modèle	Evans	+ Klucher	+ Helbig	
Entrées	G_{POA} , T_{amb} , WS	GHI, DHI, BNI, T_{amb} , WS	GHI, T_{amb} , WS	→ P_{MPP}
rMBE (%)	0,7±0,5	0,7±1,0	2,6±0,8	
rMAE (%)	3,5±0,2	5,9±0,4	6,9±0,4	

Performances selon la source des données



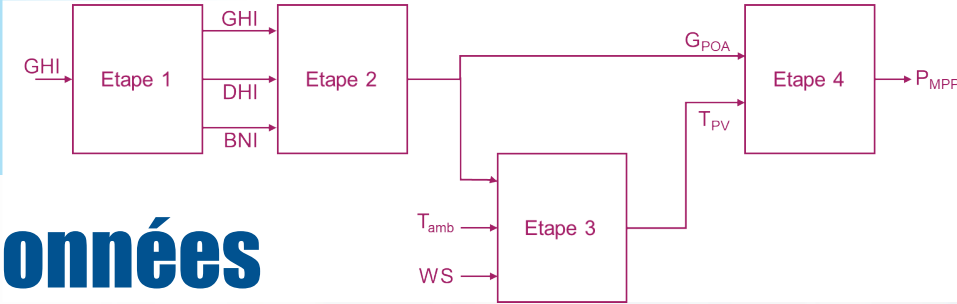
SIRTA Mesures
in situ
SITE INSTRUMENTAL DE RECHERCHE
PAR TÉLÉDETECTION ATMOSPHÉRIQUE

Ecole Polytechnique, Palaiseau
Latitude : $48^{\circ}42'N$
Longitude : $2^{\circ}12'E$



Mesures
en station
météo

Aéroport d'Orly, Athis Mons
Latitude : $48^{\circ}43'N$
Longitude : $2^{\circ}23'E$

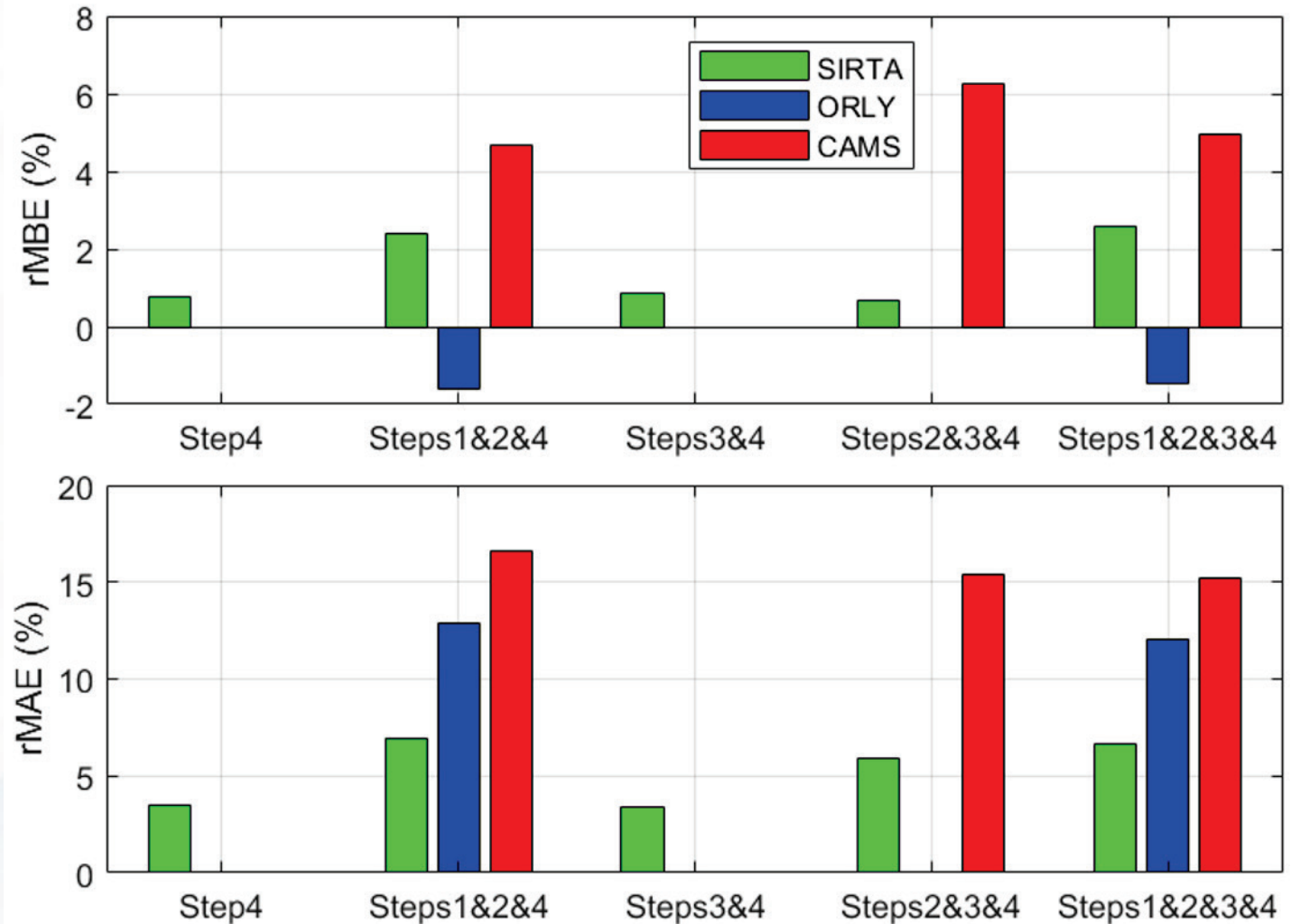


Performances selon la source des données

- SIRTA :
Mesures sur site

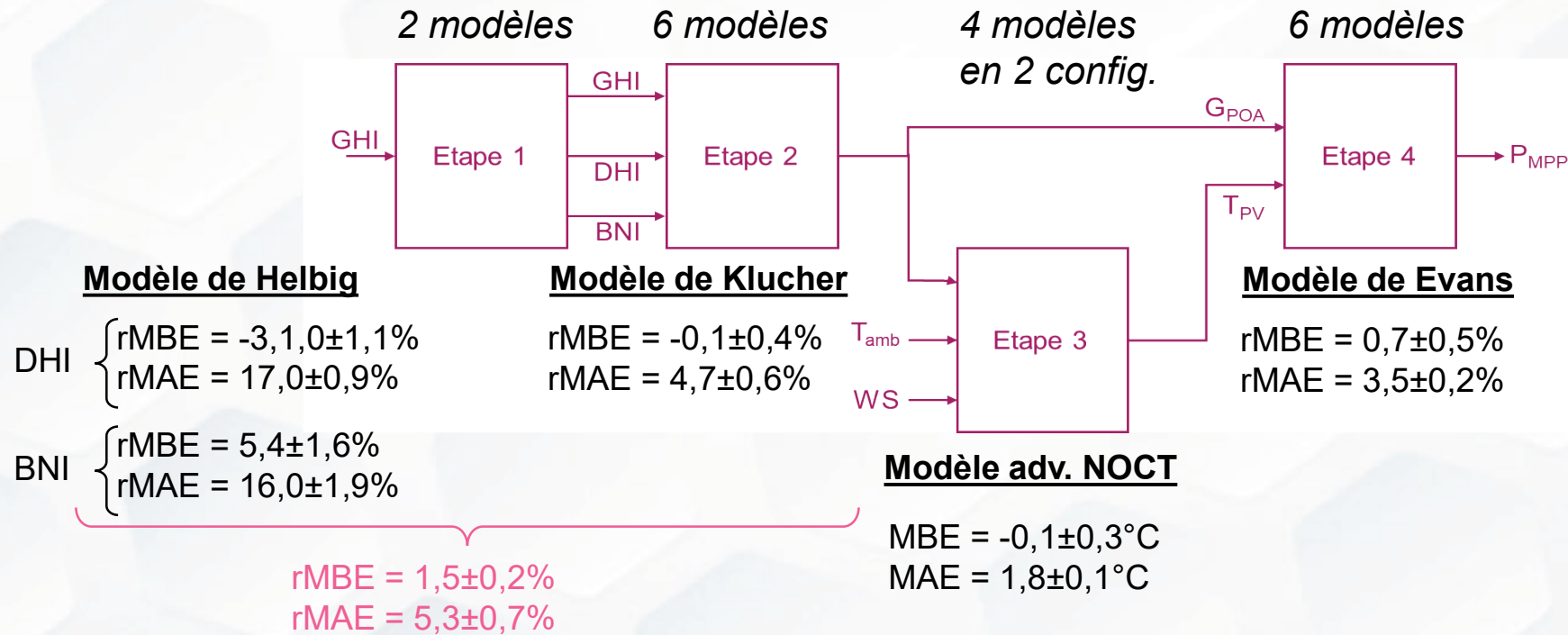
- ORLY :
Base de données MétéoFrance (12km)

- CAMS :
Images satellites



Conclusion

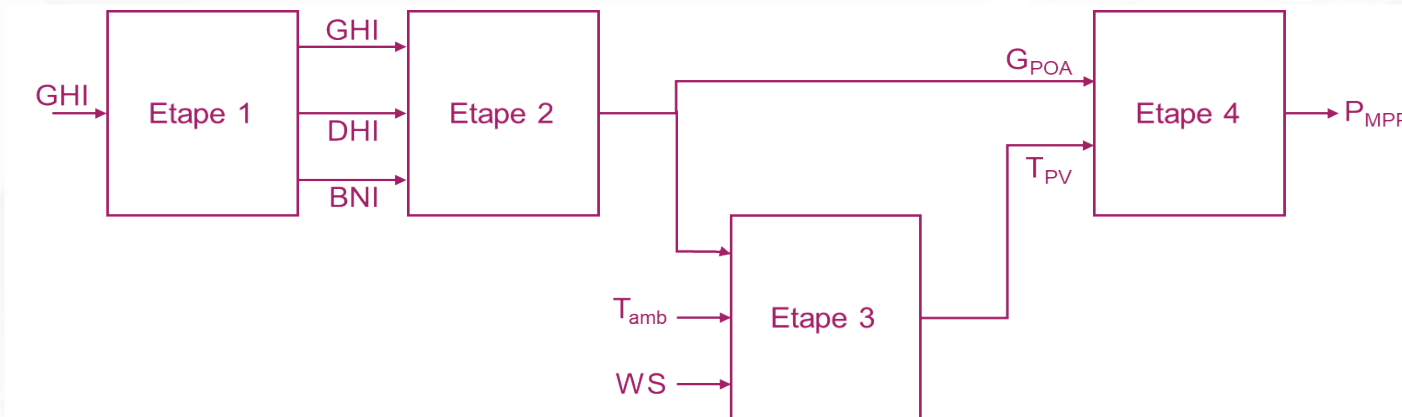
Meilleures performances étape par étape :



Conclusion

❑ Etapes limitantes :

- Estimation de la température PV : Les coefficients empiriques de la littérature conduisent à des erreurs plus importantes



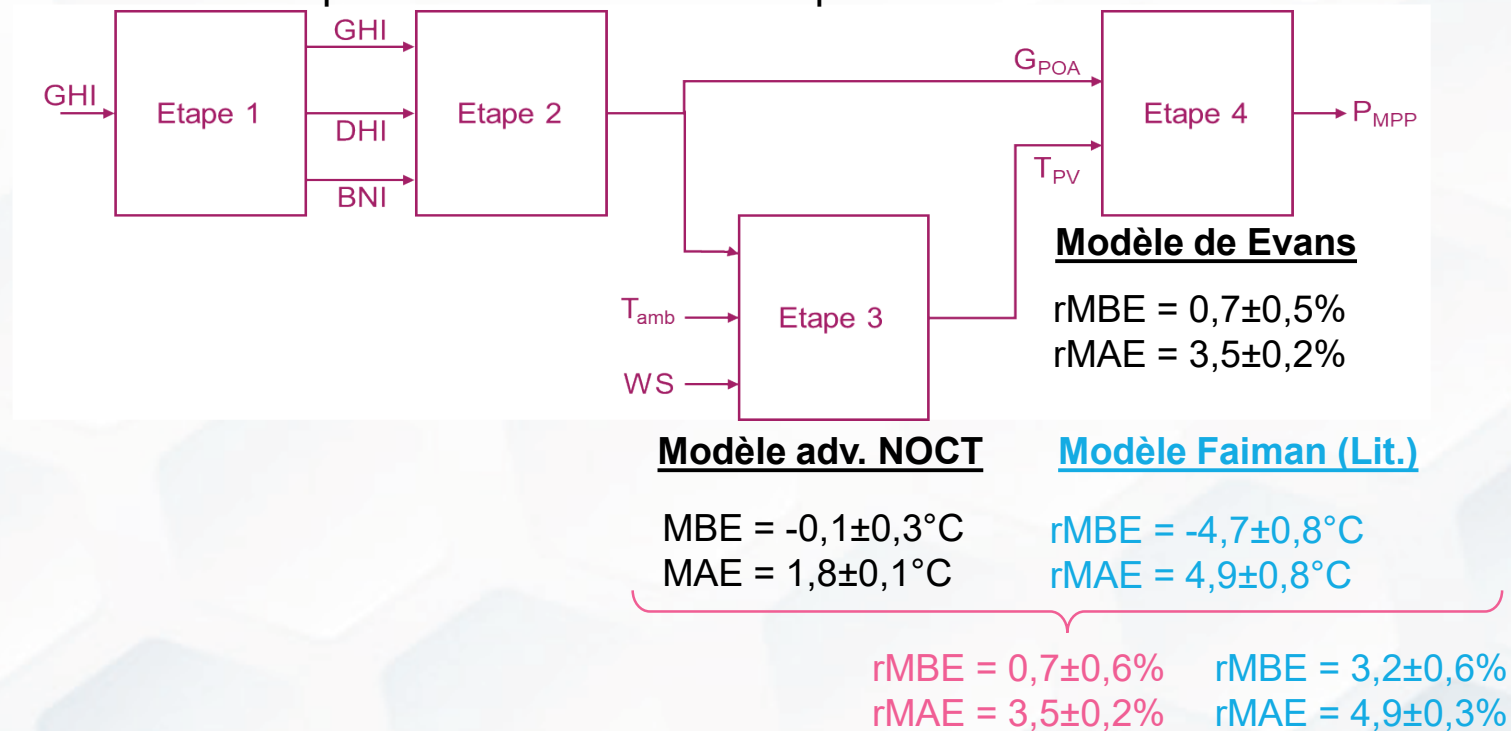
$$\text{Faiman (Lit.)} \begin{cases} \text{rMBE} = -4,7 \pm 0,8^{\circ}\text{C} \\ \text{rMAE} = 4,9 \pm 0,8^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

$$\text{Faiman (Fit)} \begin{cases} \text{rMBE} = 0,1 \pm 0,3^{\circ}\text{C} \\ \text{rMAE} = 1,9 \pm 0,1^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

Conclusion

❑ Etapes limitantes :

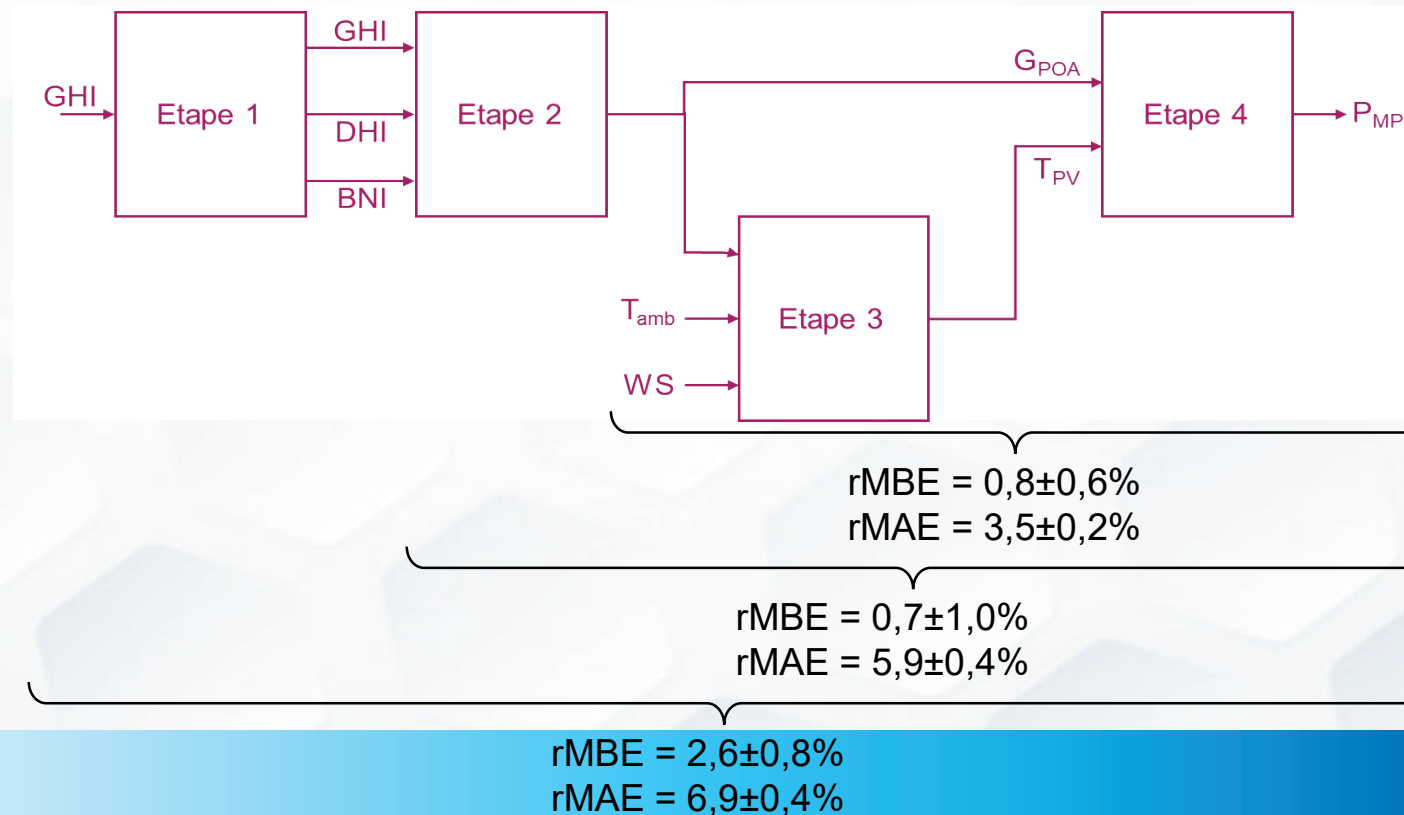
- Estimation de la température PV : Les coefficients empiriques de la littérature conduisent à des erreurs plus importantes
L'impact sur l'estimation de la puissance PV est faible



Conclusion

❑ Etapes limitantes :

- Estimation de la température PV : Les coefficients empiriques de la littérature conduisent à des erreurs plus importantes
L'impact sur l'estimation de la puissance PV est faible
- Estimation de l'éclairement dans le plan PV :



Conclusion

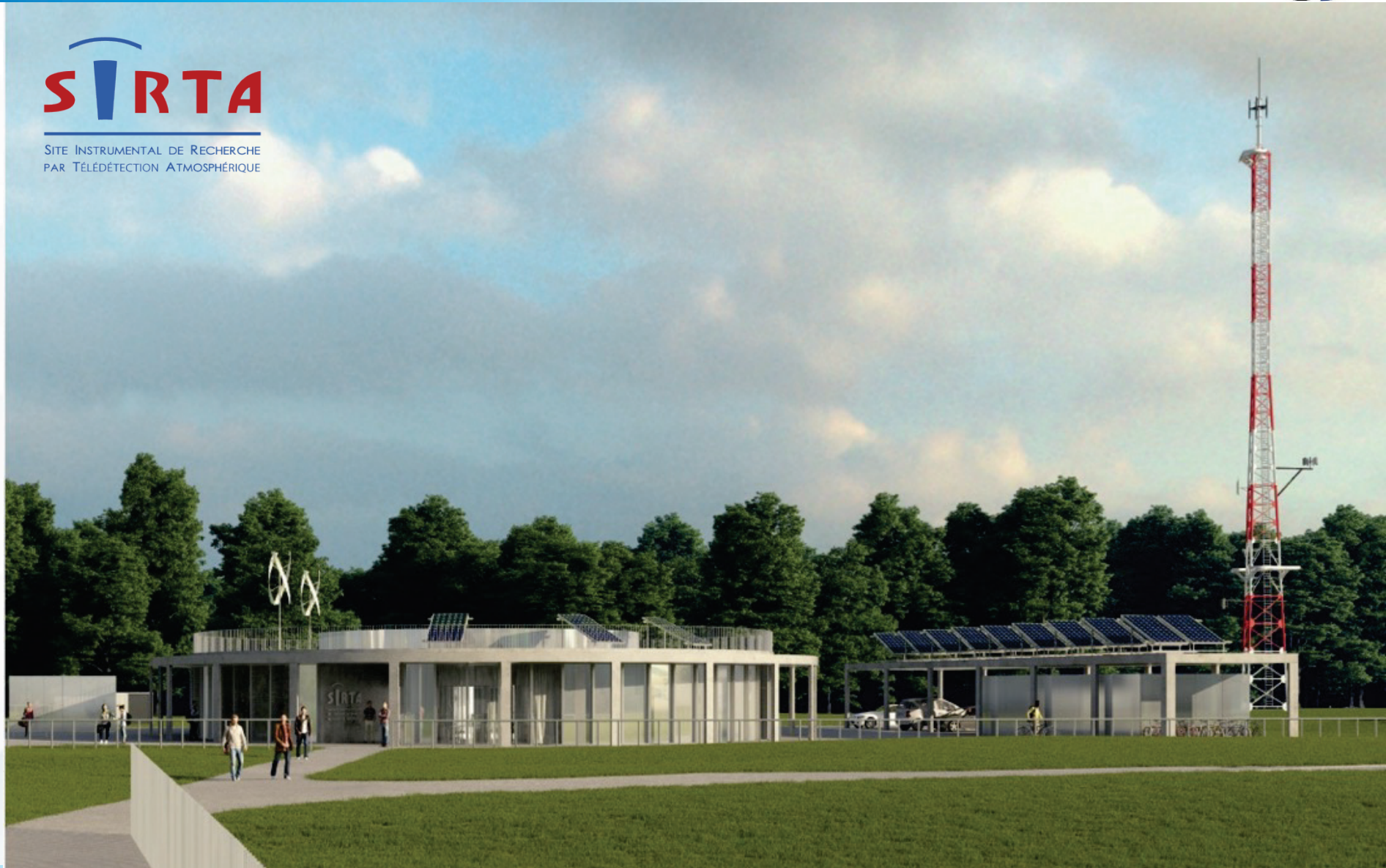
❑ Performances selon la source :

- Plus les mesures environnementales sont proches du champs PV, meilleurs sont les résultats de simulation :

SIRTA	ONLY	CAMS
rMBE = 2,6±0,8%	rMBE = -1,5±1,4%	rMBE = 5,0±2,5%
rMAE = 6,9±0,4%	rMAE = 12,1±7,0%	rMAE = 15,2±7,0%

 **Merci**


SITE INSTRUMENTAL DE RECHERCHE
PAR TÉLÉDÉTECTION ATMOSPHÉRIQUE



Références :

- [1] N. Helbig, “*Application of the radiosity approach to the radiation balance in complex terrain*”, Thesis at University of Zurich (2009), https://www.zora.uzh.ch/id/eprint/30798/1/Helbig_Application_of_the_2009.pdf
- [2] D. Erbs, S. Klein, J. Due, “*Estimation of the diuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation*”, Solar Energy 28 (1982) 293302. doi:10.1016/0038-092x(82)90302-4.
- [3] H. Hottel, B. B. Woertz, “*Performance of flat-plate colar-heat collector*”, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers 64 (1942) p. 91, doi:10.1243/PIME_PROC_1955_169_108_02.
- [4] T. Klucher, “*Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces*”, Solar Energy 23 (2) (1979) p. 111. doi:10.1016/0038-092X(79)90110-5.
- [5] D. L. King, W. E. Boyson, J. A. Kratochvil, “*Photovoltaic array performance model*”, Tech. rep., Sandia National Laboratories (2004), <https://prod.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2004/043535.pdf>
- [6] J. Hay, J. Davies, “*Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface*”, in : Proceedings of the rst Canadian solar radiation data workshop, Toronto, Canada (1980) pp. 373-380.
- [7] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart, “*Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*”, Solar Energy 44 (1990) pp.271-289 doi:10.1016/0038-092x(90)90055-h.
- [8] D. Reindl, W. Beckman, J. Duffie, “*Evaluation of hourly tilted surface radiation models*”, Solar Energy 45 (1990) pp. 9-17, doi:10.1016/0038-092x(90)90061-g.

Références :

- [9] R. Ross, “*Flat-plate photovoltaic array design optimization*”, in : 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA. (1980) p. 1126.
- [10] V. Bourdin, J. Badosa, F. Calderon-Obaldia, C. Abdel-Nous, A. Migan Dubois, Y. Bonnassieux, “*Comparaison de modèles de complexité croissante pour la simulation de la température de modules photovoltaïques*”, JNPV.
- [11] D. Faiman, “*Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules*”, Progress in Photovoltaics : Research and Applications 16 (2008) p. 307. [doi:10.1016/j.infrared.2018.05.017](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.05.017).
- [12] M. K. Fuentes, “*A simplified thermal model of photovoltaic modules*”, Tech. rep., Sandia National Laboratories (1985).
<https://www.osti.gov/biblio/6802914>
- [13] A. Labouret, P. Cumunel, J.-P. Braun, B. Faraggi, “*Cellules solaires : Les bases de l'énergie photovoltaïque*”, Dunod Edition, ETSF, Dunod, 2010, <https://www.dunod.com/sciences-techniques/cellules-solaires-bases-energie-photovoltaique>
- [15] D. L. Evans, “Simplified method for predicting photovoltaic array output”, Solar Energy 27 (6) (1981) p. 555.
[doi:10.1016/0038-092X\(81\)90051-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90051-7).
- [16] G. Graditi, S. Ferlito, G. Adinolfi, “*Comparison of Photovoltaic plant power production prediction methods using a large measured dataset*”, Renewable Energy 90 (2016) 513-519. [doi:10.1016/j.renene.2016.01.027](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.027).
- [17] G. R. Walker, Evaluating mppt converter topologies using a matlab pv model, Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering 21 (1) (2001) p. 49, <https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=537020271845747;res=IELENG>
- [18] A. Mellita, S. A. Kalogirou, “Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review, Progress in Energy and Combustion Science 34 (2007) p. 574. [doi:10.1016/j.pecs.2008.01.001](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.01.001).