

Améliorer la fiabilité des modèles d'apprentissage profond en vue d'accroître l'observabilité des installations photovoltaïques en toiture en France

Gabriel Kasmi

À la fin de 2024, la puissance installée photovoltaïque (PV) a atteint 24,3 GWc, en croissance de 22 % sur un an. La filière PV est caractérisée par une grande diversité d'installations, allant de grandes centrales à des installations individuelles sur toiture. Pour ces dernières, qui représentent plus de 95 % des installations raccordées — et 20 % de la puissance installée totale, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité (GRT) n'était pas en mesure d'estimer la précision des estimations de production, tant à l'échelle individuelle (du système) qu'au niveau agrégé. Compte tenu de la forte croissance du PV, ce problème dit de la mauvaise observabilité du PV sur toiture pourrait compromettre son insertion sur le réseau électrique.

L'objectif de la thèse est de contribuer à l'amélioration de l'observabilité du PV sur toiture, qui recoupe d'une part la faculté du GRT à évaluer la précision des estimations de production et d'autre part sa faculté à disposer d'une description adéquate et complète du parc PV sur toiture. Celui-ci n'étant pas raccordé au réseau de transport, le GRT ne maîtrise pas la méthode de remontée des données, ni ses incertitudes. Au cours des dernières années, de nombreux travaux ont montré que l'intelligence artificielle pouvait permettre la cartographie à l'échelle nationale de systèmes photovoltaïques sur toiture. Ces méthodes n'avaient cependant pas été appliquées en France et la fiabilité des données demeurait à établir. La thèse s'est ainsi proposé d'évaluer si l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage profond et d'orthoimages est une méthode adaptée à la construction d'un registre technique

national d'installations PV sur toiture destiné à améliorer son observabilité en France.

La première contribution de la thèse est la mise à disposition du GRT d'une cartographie de près d'un demi-million de systèmes PV sur toiture situés en France. Cette cartographie recense la localisation précise mais aussi les caractéristiques techniques de ces systèmes. Les données issues de ce registre ont été comparées avec les données internes du GRT, ont mis en lumière des cas où le descriptif existant du parc PV diffus était imprécis et ont permis d'effectuer les retraitements nécessaires. Ainsi, la confiance dans le descriptif du parc et sa qualité a été améliorée. La deuxième contribution est l'évaluation de la méthode d'estimation de la production utilisée par RTE et sa comparaison avec un modèle physique simplifié, utilisant une caractérisation minimale du système et des données météorologiques, introduit pour l'occasion. L'analyse avec de véritables données de production a montré la bonne performance de la méthode utilisée par RTE, dont la précision est comparable à celle de la méthode physique.

La thèse a enfin abordé la question de la fiabilité des algorithmes d'apprentissage profond dans un contexte industriel. Cette réflexion a conduit à une troisième contribution : l'introduction d'une méthode originale d'explicabilité proposant une représentation multi-échelles du processus de décision du modèle. Appliquée à la détection de panneaux solaires, cette approche permet de distinguer si le modèle fonde sa prédiction sur des caractéristiques génériques (couleur, forme générale) ou sur des motifs plus fins, tels qu'un

quadrillage visible dans l'image. En explicitant le processus de décision du modèle et en mettant en avant la prépondérance de certains motifs, la thèse a ainsi proposé des outils permettant d'améliorer la transparence des outils d'IA, condition nécessaire à leur utilisation dans des applications industrielles.

En conclusion, cette thèse a démontré que l'observabilité des installations photovoltaïques sur toiture repose avant tout sur un recensement

précis de la puissance installée, bien davantage que sur l'estimation de la production PV. Par ailleurs, l'amélioration de la transparence des algorithmes d'apprentissage profond renforce la confiance dans ces outils pour compléter et auditer les données industrielles. L'algorithme de cartographie, la méthode d'explicabilité et la base de données associée sont accessibles sous licence ouverte.

Laboratoire d'accueil : La thèse a été préparée au sein du Centre Observation, Impacts, Énergie (O.I.E.). Le centre O.I.E. est un des 18 centres de recherche de Mines Paris-PSL. Ses activités se situent au carrefour de l'énergie, de l'environnement et de l'observation de la Terre. Il étudie et modélise les ressources «énergies renouvelables» et les impacts environnementaux liés à leur exploitation, en s'appuyant sur des disciplines scientifiques fondamentales et appliquées (mathématiques, métrologie, physique, environnement...) et sur les technologies de l'information et de la communication. Les bases de données et services web constituent pour l'équipe un des principaux vecteurs de dissémination de ses connaissances.



Le centre O.I.E. est rattaché à l'école doctorale «Ingénierie des Systèmes, Matériaux, Mécanique, Énergétique» (ISMME), portée par le collège doctoral de PSL et opérée par Mines Paris-PSL.

Pour plus d'informations : <https://www.oie.minesparis.psl.eu/Accueil/>.

Soutenance de la thèse : La thèse a été soutenue le 5 avril 2024 à Mines Paris-PSL, devant un jury composé de Stéphane Mallat, professeur, Collège de France (président); Angela Meyer, professeure, Berner Fachhochschule (rapporteuse); Mathieu Serrurier, maître de conférences HDR, Université Toulouse 3 (rapporteur); Christina Cornaro, professeure associée, Università degli studi di Roma Tor Vergata (examinatrice); Laurent Dubus, expert émérite, RTE (examinateur); Yves-Marie Saint-Drenan, ingénieur de recherche, Mines Paris-PSL (examinateur); Philippe Blanc, professeur, Mines Paris-PSL (directeur de thèse).

La thèse est disponible sur : <https://theses.fr/2024UPSLM027> et sur demande auprès de l'auteur.

Et après la thèse? Gabriel Kasmi poursuit ses recherches sur l'amélioration de l'observabilité des systèmes PV sur toiture et sur la fiabilité des algorithmes d'apprentissage profond dans le cadre d'un postdoctorat au sein du centre O.I.E. de Mines Paris-PSL et à RTE.