

# DES PRÉVISIONS PRÉCISES POUR LE RENDEMENT DU PV

Le rendement électrique des systèmes photovoltaïques, comme celui des installations éoliennes, est soumis à des fluctuations considérables. Un facteur d'influence important est le temps. Grâce aux pronostics sur plusieurs jours, les météorologues peuvent prévoir les rendements attendus de l'énergie solaire pendant plusieurs jours avec une fiabilité intéressante. Les modèles météorologiques nécessaires à cette fin sont constamment améliorés, en partie grâce aux efforts d'un groupe de travail international qui travaille depuis trois ans sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie. Les météorologues suisses jouent un rôle de premier ordre.



Aujourd'hui, les prévisions météorologiques sont souvent calculées à partir des données de nombreuses stations météorologiques. Sur l'image: un thermomètre (à gauche) et une unité de transmission de données contrôlée par Jan Remund, collaborateur chez Meteotest. Photo: B. Vogel



Plusieurs fois par an, des courants d'air portent la poussière du Sahara jusqu'en Suisse. De telles conditions météorologiques réduisent le rendement des systèmes photovoltaïques jusqu'à 10%. Photo: J. Remund.

La période idéale pour la production d'énergie solaire est une journée ensoleillée de mai. Le soleil est haut dans le ciel. L'atmosphère est exempte de nuages et de brume, les rayons du soleil atteignent la terre sans obstacles. L'air est frais, une légère brise refroidit les modules photovoltaïques (PV) à base de silicium; grâce à la température ambiante réduite, ils fonctionnent sur une plage de puissance plus efficace. Dans ces conditions favorables, le soleil fournit environ 1000 watt par mètre carré sur le Plateau suisse. L'installation PV convertit environ un cinquième du rayonnement solaire en électricité. Les 200 watts de puissance par mètre carré qui en résultent suffisent, par exemple, pour faire fonctionner un ordinateur personnel.

Le temps n'est pas toujours aussi clément pour les exploitants d'installations photovoltaïques. Par temps légèrement nuageux, le rendement est réduit de moitié et passe à un dixième lors d'une triste journée pluvieuse de novembre. Mais la météo a toutefois ses humeurs. Ainsi, il peut y avoir également des situations avec des rendements solaires exceptionnellement élevés. Parfois, l'énergie rayonnée sur les modules PV est plus élevée que l'énergie rayonnante à la limite supérieure de l'atmosphère - à savoir lorsque la lumière du soleil frappe les cellules solaires non seulement directement,

mais également par réflexion sur un nuage orageux blanc. Ce phénomène - les météorologues parlent de « over radiation » – c'est-à-dire surradiation – ne dure généralement que quelques secondes. L'énergie irradiée peut alors atteindre jusqu'à 1500 watts/m<sup>2</sup>.

### **Améliorer l'intégration du photovoltaïque au réseau**

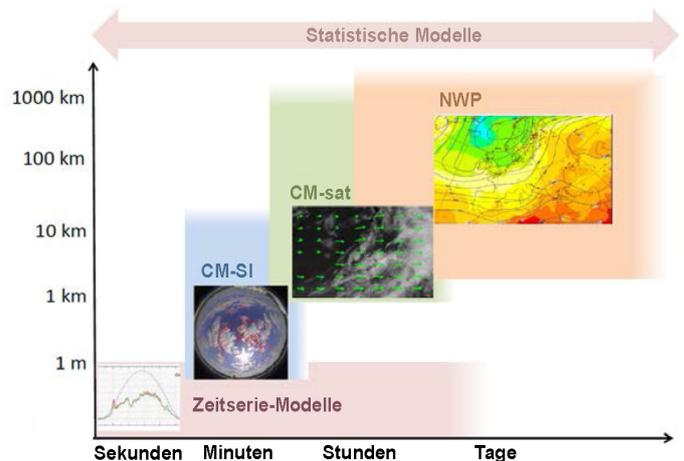
Quiconque produit de l'électricité solaire doit s'attendre à des rendements fluctuants. « Nous, météorologues, ne pouvons pas influencer les fluctuations, mais nous pouvons prévoir l'évolution des rendements au cours des prochains jours », déclare Jan Remund, responsable de l'énergie et du climat chez le prestataire privé de services météorologiques Meteo-test AG à Berne. Les prévisions de rendement créent une prévisibilité pour les exploitants d'installations photovoltaïques. En même temps, ils encouragent l'intégration du photovoltaïque au réseau, comme le souligne Remund: « Les prévisions constituent la base d'un fonctionnement fiable du réseau électrique dans la mesure où les exploitants de réseau peuvent désormais réagir de manière prévoyante à la quantité d'électricité injectée au réseau et éviter les problèmes susceptibles de survenir en cas d'injection plus ou moins importante. » Aujourd'hui, la société nationale de réseau Swiss-

grid utilise les données de prévision de la même manière que les grandes compagnies d'électricité suisses. Les prévisions de rendement sont également importantes pour les négociants en électricité. Ils sont ainsi en mesure d'estimer l'évolution des prix sur les bourses de l'électricité de manière prospective.

Le réseau électrique doit être maintenu en équilibre, c'est pourquoi la prévision ou le contrôle de la production et de la charge est important. La production des installations photovoltaïques ne peut être contrôlée que dans une mesure très limitée. C'est pourquoi les prévisions de rendement sont particulièrement significatives. Les prévisions sont d'autant plus importantes que le photovoltaïque contribue à la production d'électricité dans une zone d'approvisionnement. En cas d'injection élevée d'électricité photovoltaïque, les exploitants de réseau doivent réagir par des mesures appropriées pour maintenir l'équilibre. Les précautions possibles comprennent la construction de batteries de stockage et des mesures techniques telles que le contrôle de la puissance réactive ou l'utilisation de transformateurs modernes avec des changeurs de prises en charge (voir l'article technique de l'OFEN « [Installations PV: Problème et partie de la solution](#) »). Un système de contrôle de la consommation « intelligent » est également utile: il assure que les appareils électriques, par exemple des pompes à chaleur, fonctionnent lorsque de l'électricité PV est disponible.

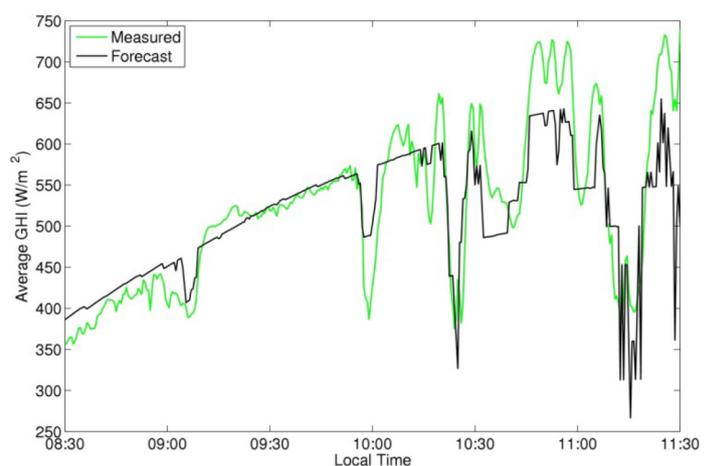
### Des pronostics encore plus précis

Les météorologues peuvent d'ores et déjà prévoir les rendements des installations photovoltaïques de manière plutôt fiable. Cela signifie que la quantité totale d'électricité solaire produite en Allemagne peut être prévue pour le jour suivant avec une précision (Root Mean Square Error/RMSE) d'environ 5%. Si, par exemple, les météorologues prévoient un rendement solaire national de 20 GWh pour le jour à venir pour l'heure comprise entre 11 heures et 12 heures, le rendement réel se situe entre 19 (- 5% d'écart par rapport à la valeur prévue) et 21 GWh (+ 5% d'écart par rapport à la valeur prévue). Cela ne s'applique pas à toutes les prévisions mais à environ deux tiers d'entre elles. Cette qualité de prévision concerne l'ensemble du pays; pour une seule installation PV, la précision est nettement inférieure (+/- 30 à 40%). En Suisse, l'erreur de prévision tend à être plus importante car le pays est plus petit et les phénomènes météorologiques sont plus complexes en raison de la topographie, et donc plus difficiles à prévoir.



Selon la période de prévision, les météorologues s'appuient sur différents modèles de pronostic: si la période de prévision est de seulement quelques secondes, les valeurs mesurées existantes sont extrapolées. Pour les prévisions sur quelques minutes, les séquences d'images des caméras météorologiques (CM pour Cloud Motion; SI pour Sky Imager) peuvent être évaluées. Les prévisions météorologiques pour les prochaines heures sont générées de préférence par l'évaluation d'images satellites (CM pour Cloud Motion; sat pour satellite). Les pronostics pour un ou plusieurs jours, à leur tour, se basent généralement sur les mesures provenant d'un grand nombre de stations météorologiques (Numerical Weather Prediction/NWP). Illustration: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/68886.pdf> / remanié par B. Vogel

Le domaine de la météorologie énergétique, un sous-domaine de la science météorologique, a pour objectif, entre autres, d'améliorer davantage la précision des prévisions météo-



Pronostic et valeur mesurée du rayonnement global (Global Horizontal Irradiation/GHI; somme du rayonnement direct et diffus) pendant une matinée. Le pronostic a été élaboré sur la base des images d'une caméra météorologique. Graphique: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/68886.pdf>

rologiques. Il y a trois ans, le comité d'experts « Solar Resource for High Penetration and Large Scale Applications » a été constitué sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) avec des experts de 21 états (voir encadré). Le groupe d'experts dirigé par Jan Remund établit des rapports sur diverses questions dans le domaine de l'énergie solaire; l'un d'entre eux est consacré à l'objectif général d'améliorer la fiabilité des prévisions météorologiques pour les applications photovoltaïques afin de garantir une connexion au réseau des installations photovoltaïques fiable et rentable.

### Essai sur le terrain de caméras météorologiques

Un projet actuel du groupe d'experts se consacre à la qualité des caméras météorologiques. Celles-ci photographient le ciel à intervalles rapprochés. Un logiciel analyse la formation des nuages et établit un pronostic pour l'évolution du temps au cours des prochaines minutes sur la base des changements (cf. graphique p.3). Les caméras météorologiques sont déjà utilisées aujourd'hui, par exemple en Amérique du Sud où les générateurs diesel sont automatiquement réduits lorsque de hauts rendements photovoltaïques sont imminents. Au cours de l'été 2020, six logiciels de caméra différents, tous des prototypes, ont été comparés sur un site d'essai à Almería, dans le sud de l'Espagne. Deux de ces All Sky



Site d'essai météorologique à Almería (sud de l'Espagne): en été 2020, six logiciels de caméra, dont deux de Suisse, ont été comparés. Photo: S. Wilbert (DLR)..

Imagers (ASI) ont été développés dans le cadre d'un projet de recherche de l'OFEN: un par Meteotest en collaboration avec le Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM), et un autre par l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).

Les premiers résultats de la comparaison de quatre des six systèmes ASI montrent que les prévisions obtenues avec ces derniers sont réellement significatives pour le développement

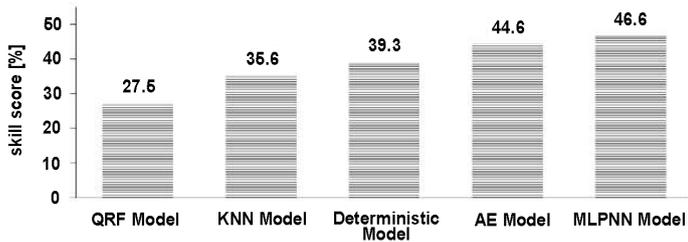
## LA SUISSE EN RÉSEAU AU NIVEAU INTERNATIONAL

L'Agence internationale de l'énergie, avec son siège à Paris, a environ 40 programmes de recherche (« Technology Cooperation Programmes »/TCP), chacun se penchant sur différents aspects de l'approvisionnement énergétique et plusieurs projets de recherche (« tasks »). Le TCP PVPS (abréviation de « Photovoltaic Power Systems ») se consacre aux questions relatives au photovoltaïque, tandis que le TCP SolarPACES (abréviation de « Solar Power and Chemical Energy Systems ») étudie les centrales solaires thermodynamiques à concentration (CSP).

Le projet « Solar Resource for High Penetration and Large Scale Applications » est un projet commun de TCP PVPS et TCP SolarPACES. Ce projet de recherche, auquel des scientifiques de 53 institutions de 21 pays participent conjointement, concerne toutes les technologies solaires (solaire thermique, PV, CSP). L'une des nombreuses questions est le lien entre les prévisions météorologiques et le photovoltaïque. Avec leurs résultats, les chercheurs fournissent une base pour la planification et l'exploitation des installations photovoltaïques.

La Suisse est représentée dans le projet « Solar Resource » par Jan Remund. Il a été mandaté pour ce projet par l'Office fédéral de l'énergie. Remund est également le responsable (« Operating Agent ») du groupe d'experts. L'Institut de technologie solaire du SPF sur le site de Rapperswil de la Haute école spécialisée de Suisse orientale apporte une importante contribution au projet de recherche. BV

➔ <https://iea-pvps.org/research-tasks/solar-resource-for-high-penetration-and-large-scale-applications/>



Une étude menée dans le cadre du projet «Solar Resource» de l'IEA a comparé différents modèles de prévisions météorologiques sur plusieurs jours. Le «skill score» exprime à quel point un modèle de pronostic est meilleur qu'un «non pronostic» (l'hypothèse que le temps restera tel qu'il est actuellement). Le modèle MLPNN, qui utilise des méthodes d'apprentissage automatiques pour traiter les données de nombreuses stations météorologiques en vue de prévisions, a fourni les meilleurs résultats. Le modèle analogue (modèle AE), qui n'utilise pas d'intelligence artificielle mais se compare à des situations météorologiques similaires dans le passé, a donné des résultats seulement un peu moins satisfaisants. Le KNN et le QRF s'appuient également sur l'intelligence artificielle. Le modèle déterministe se base sur la somme des pronostics individuels d'installations sélectionnées.

Graphique: Betti et al. 2020

du temps sur des périodes de prévision de deux à trois minutes. Les évaluations réalisées à ce jour montrent que les incertitudes sont faibles lorsque le ciel est exempt de nuages, bien qu'il reste un potentiel d'amélioration. Les incertitudes sont nettement plus grandes par temps changeant. Dans ces conditions, les différences entre les différents systèmes ASI sont relativement faibles. « Une approche hybride de la persistance et des prédictions basées sur ASI peut probablement améliorer la prédiction », déclare Jan Remund.

### Comparaison des prévisions sur plusieurs jours

Un autre projet du groupe d'experts « Solar Resource » portait sur les périodes de prévision des jours. Des modèles numériques de prévision météorologique du temps (en anglais Numerical Weather Prediction/NWP) sont généralement utilisés à cette fin. Ces modèles météorologiques modélisent le changement temporel de l'atmosphère terrestre sur la base de données mesurées par de nombreuses stations météorologiques et satellites. Dans cette étude, les scientifiques ont comparé cinq modèles de PNT pour estimer les rendements PV régionaux. Une étude partielle s'est concentrée sur de grandes régions d'Italie, une autre sur une région des Pays-Bas de la taille du canton de Zurich.

Quatre des modèles fonctionnaient avec une intelligence artificielle. Les prévisions météorologiques sont ici le résultat de processus d'apprentissage automatiques. Une cinquième

méthode était « analogique », ce qui signifie dans le contexte actuel que les prévisions sont déduites à partir d'une comparaison de la situation météorologique actuelle avec des situations similaires (analogues) dans le passé. La référence des cinq modèles de l'étude était la persistance, c'est-à-dire un « non-pronostic » supposant que le temps restera le même à l'avenir qu'aujourd'hui.

Les principales conclusions de l'étude sont présentées sous une forme simplifiée: les méthodes basées sur l'intelligence artificielle ont tendance à produire des prévisions plus précises; cependant, elles ne sont pas nettement meilleures que celles de l'approche analogique. Le meilleur pronostic est obtenu par la combinaison de plusieurs modèles. Et: plus la zone de référence est grande, plus il est précis. Il a également été confirmé que les cinq modèles prévisionnels sont nettement plus performants que les modèles de « non pronostic ».

### L'énergie solaire comme principal pilier du système énergétique

Les rendements fluctuants des énergies solaire et éolienne sont parfois utilisés par les critiques comme argument contre la poursuite de l'expansion des énergies renouvelables. « Il s'agit d'une approche improductive », déclare Jan Remund, « dans notre groupe d'experts, nous réfléchissons actuellement davantage à la manière dont le photovoltaïque peut être développé en vue de devenir un pilier du système énergétique ». Le météorologue bernois fait ainsi référence au concept de « firm PV power », ce qui, traduit en français, signifie « alimentation fiable en énergie solaire ». Le cerveau de cette approche est le Dr Richard Perez, chercheur à l'université d'État de New York à Albany, dans l'État de New York, et membre du groupe d'experts de l'AIE.

Perez examine les conditions requises pour l'utilisation la plus large possible de l'énergie solaire. Il a mené des études correspondantes pour l'État américain du Minnesota, lequel se situe au nord des États-Unis et où le photovoltaïque n'a pas été largement utilisé jusqu'à présent. Ses calculs montrent que, pour des raisons économiques, il est judicieux de développer fortement la production photovoltaïque, même si les centrales solaires doivent alors être temporairement arrêtées en cas d'excédent de production. La planification calculée de la capacité excédentaire est une idée que les amateurs d'énergie solaire ont parfois du mal à accepter, comme le déduit Jan Remund de sa propre expérience: « Je suis impliqué dans le photovoltaïque depuis des décennies et j'apprécie chaque ki-

lowattheure d'énergie solaire. Mais si nous voulons vraiment utiliser le photovoltaïque à grande échelle, nous devons nous éloigner de la pensée archaïque selon laquelle nous ne devons pas « détruire » l'énergie solaire. Au contraire: nous avons besoin de très grandes capacités de production afin de couvrir la charge de base de l'approvisionnement en électricité. »

- Le Dr Stefan Oberholzer, responsable du programme de recherche de l'OFEN sur le photovoltaïque communique des **informations** à ce sujet :  
[stefan.oberholzer\[at\]bfe.admin.ch](mailto:stefan.oberholzer@bfe.admin.ch).
- Vous trouverez d'autres **articles spécialisés** concernant les projets phares et de recherche, les projets pilotes et de démonstration dans le domaine du photovoltaïque sur [www.bfe.admin.ch/ec-photovoltaique](http://www.bfe.admin.ch/ec-photovoltaique).