

Photovoltaïque : les indicateurs de rendement et de performance

Clément Brossard – Décembre 2012

Comme tous les processus de transformation de l'énergie, la notion de rendement des installations photovoltaïques est très souvent abordée. Il est alors généralement question du rendement photovoltaïque appelé rendement STC, caractérisé par des conditions de test très précises et possibles en laboratoire uniquement. L'obtention de rendements photovoltaïques toujours plus élevés constitue également un axe de recherche majeur dans l'industrie photovoltaïque.

Mais est-ce le facteur le plus judicieux pour choisir un module photovoltaïque ?

En effet, cette notion de rendement surfacique présente sur les fiches techniques ne s'appuie pas sur les conditions réelles d'exploitation du produit, l'environnement étant variable à chaque instant et fonction de la saison et de la localisation du projet. Alors même si la notion de surface occupée par une puissance donnée est déterminante, notamment quand la surface disponible est limitée, il faut considérer d'autres indicateurs permettant de choisir le meilleur produit pour votre projet et son environnement.

Une autre problématique peut être rencontrée, notamment sur les exploitations photovoltaïques existantes : Comment démontrer à un investisseur que sa centrale est en bonne santé indépendamment des conditions extérieures (climat de la période de mesure, angles de pose) ? En effet, même si l'irradiation est bonne et que la puissance de sortie semble correcte, on peut se demander si la production est optimale ? Il faut ainsi disposer d'un indicateur quantifiant cette performance et s'affranchissant des conditions externes.

Il existe ainsi en matière de technologies photovoltaïques, différents indicateurs de rendement : rendement surfacique, rendement spécifique, ratio de performance, rendement européen ou encore heure de fonctionnement.

Nous vous expliquons ici les significations de ces différents critères, leurs méthodes de calcul et leurs utilités, afin de vous permettre de faire les bons choix pour votre futur projet photovoltaïque, ou simplement pour analyser la performance d'une installation photovoltaïque existante.

Le Rendement Surfacique Photovoltaïque :

Signification du rendement surfacique photovoltaïque

Le rendement surfacique **quantifie la conversion de la puissance de l'irradiation solaire en puissance électrique d'un module ou d'une cellule photovoltaïque** sur une surface donnée, à des conditions bien spécifiques (STC, Standard Test Conditions), normes internationales.

C'est donc le rapport de la puissance électrique de sortie d'une surface photovoltaïque donnée, sur la puissance de l'irradiation solaire sur cette même surface. Ce rendement est calculé aux conditions STC (Standard Test Conditions : irradiation de 1000 W/m², température 25° C, AM 1,5*)



qui donnent également la puissance dite crête d'un module photovoltaïque. Ces conditions STC ne sont possibles qu'en laboratoire (flash test). Cependant, ces conditions ne sont jamais atteintes en réalité lors de l'usage du module, chaque paramètre variant en fonction de la localisation et de la saison. Le rendement surfacique reste donc une valeur très théorique.

**AM 1,5 pour Air Mass. C'est l'indice de masse d'air traversée par les rayons lumineux. Quand le soleil est au zénith (AM = 1), il y a moins d'air à traverser pour parvenir au module. AM= 1,5 correspond à la masse d'air pour un angle d'ensoleillement de 41,8° par rapport à l'horizon.*

Exemple de calcul du rendement surfacique photovoltaïque

Rendement surfacique = puissance électrique (W/m²) / irradiation solaire (W/m²)

Exemple : aux conditions STC, un module d'une surface de 1,28 m² m est flashé à 200 W (puissance électrique de sortie). Sa puissance crête est donc de 200 Wc. Par proportionnalité, on calcul la puissance équivalente d'un mètre carré à 156 W. Nous avons donc en entrée une puissance solaire de 1000 W/m² et en sortie une puissance électrique équivalente de 156 W/m². Le rendement surfacique de ce module est donc 156/1000, soit 15,6 %.

Le rendement surfacique d'un module complet est inférieur au rendement surfacique des cellules qui le composent, le module complet contenant des surfaces non utiles (espaces entre cellules, cadres).

Attention cependant : pour le calcul de puissance crête d'une installation complète, nous avons tendance à additionner la puissance crête de chaque module composant le générateur, ce qui n'est pas correct. En effet, il existe une tolérance sur la puissance crête des modules photovoltaïques de l'ordre de 5% pour un même modèle. Il y a également le phénomène de « Mismatching » qui lorsque l'on assemble des modules photovoltaïques en série et en parallèle, modifie les caractéristiques de sortie des modules (exemple le module au plus faible courant fixe le courant de toute sa chaîne). Il faudrait en fait placer l'ensemble du générateur dans une salle de flash test aux conditions STC pour obtenir la valeur réelle de la puissance crête. Il est donc aujourd'hui techniquement impossible de déterminer précisément la puissance crête d'une installation complète.

Utilités, avantages et inconvénients du rendement surfacique photovoltaïque

- L'intérêt premier du rendement surfacique est de fournir une valeur de surface nécessaire pour une puissance crête fixée et inversement.
- L'autre intérêt du rendement surfacique est qu'il permet de comparer les modules entre eux, grâce aux normes STC qui sont communes à tous les tests et ce à l'échelle internationale.
- Cependant, s'il permet de comparer les modules entre eux aux conditions précises que sont les STC, il ne donne pourtant pas un élément de comparaison fiable lorsque l'on parle d'exploitation à long terme sur un site donné. En effet, en condition réelle d'utilisation, le rendement varie en fonction de l'irradiation et de la température. Ainsi, un module avec un bon rendement surfacique aux conditions STC, pourra voir son rendement fortement dégradé avec les variations de conditions, notamment à plus faible irradiation.



A contrario, il existe des modules, notamment les technologies couches minces, qui disposent d'un rendement surfacique plus important pour une irradiation inférieure à 1000 W/m².

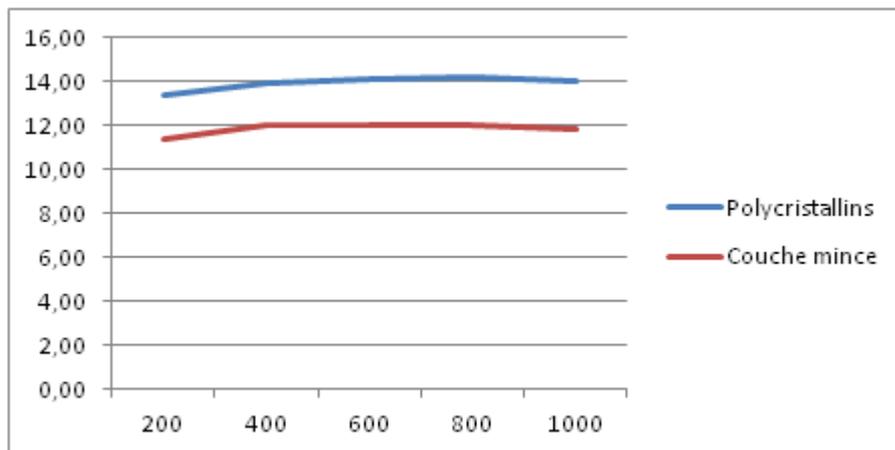


Fig 1 : Exemple de courbes de rendements surfaciques en fonction de l'irradiation (données constructeurs, 2011) montrant la variation de rendement surfacique en fonction de l'irradiation.

- Le rendement surfacique aux conditions STC est l'unique rendement garanti par les fabricants de modules à l'heure actuelle. Voir notre article dédié aux garanties fabricants de modules photovoltaïques.

Ainsi, s'il reste important pour les laboratoires d'améliorer les rendements surfaciques STC des cellules photovoltaïques, la recherche doit aussi permettre de limiter les variations de rendements dues aux variations des conditions extérieures.

Pour quantifier ces variations de rendement en fonction des conditions réelles on introduit la notion de **Ratio de Performance**, expliquée ci-après.

Le Ratio de performance photovoltaïque

Signification du ratio de performance photovoltaïque

Le ratio de performance photovoltaïque est le rapport entre le rendement réel en situation d'exploitation et le rendement surfacique aux conditions STC. En tant que ratio, il n'a pas d'unité. S'il est généralement inférieur à 1 (ratio de performance pour lequel le rendement réel = rendement théorique), il peut également être supérieur, signe d'un environnement plus optimal que les STC pour certains modules.

Le ratio de performance peut être calculé à un instant T ou sur une période variable (d'une seconde à une année et plus), à l'échelle d'un module seul ou d'une installation complète. Dans le cas d'une installation complète, le ratio de performance peut être calculé en différents points. Il comprend alors le ratio de performance des modules mais également les différents rendements de la chaîne de transformation (mismatching, pertes en ligne, rendement onduleurs...).

Ratio de performance module = rendement réel (%) / rendement STC (%)

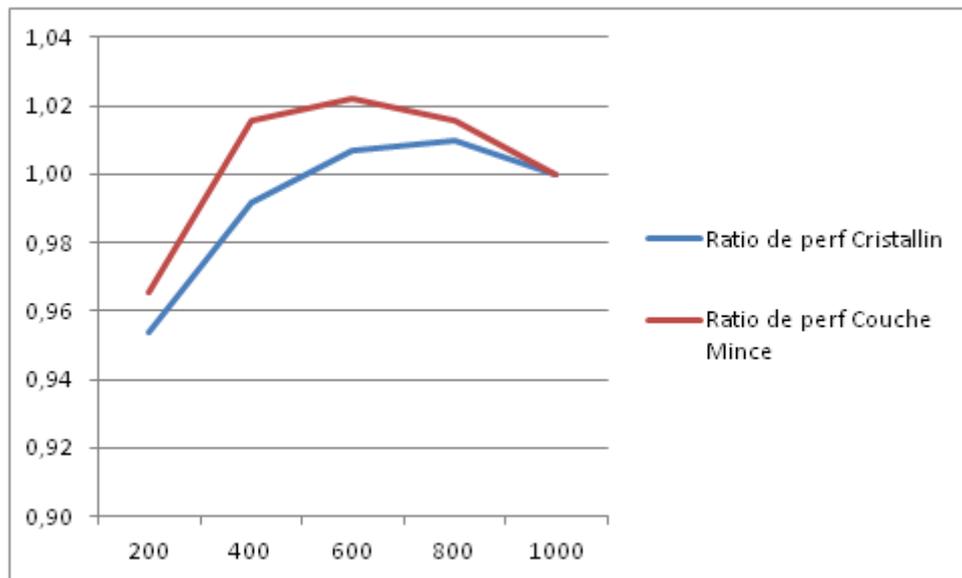
Ratio de performance en un point = puissance mesurée (W) / puissance théorique STC (W)

Ratio de performance sur une période = production réelle (kWh) / production théorique (kWh)



Exemple de calcul du ratio de performance photovoltaïque

- Pour un module seul : reprenons l'exemple ci-dessus, d'un module au rendement surfacique de 15,6 % aux conditions STC. On place ce module en conditions réelles (exemple irradiation de 500 W/m², température de 20°), sa puissance électrique mesurée passe alors à 70 W/m² équivalent. Son nouveau rendement surfacique dans ces conditions est de 70/500, soit 14 %. Son ratio de performance à cet instant est donc de 14/15,6, soit 0,89. Le module est donc moins performant à plus faible éclaircissement.



Exemple de mesure de ratios de performance à différentes irradiances (depuis la figure 1). On observe que la technologie couche mince se comporte mieux à faible éclaircissement que le cristallin, malgré un rendement surfacique STC moins élevé.

- Pour calculer un ratio de performance sur une période, on ne considère plus les puissances instantanées, mais les énergies. C'est alors **le rapport du productible réel sur le productible théorique aux conditions STC**. Dans un premier temps, on calcule **le productible théorique** (au rendement surfacique STC) à partir de l'énergie solaire reçue sur une période donnée dans le plan du générateur. Comment ? Aux conditions STC, la puissance crête est donnée pour une irradiation de 1000 W/m². L'astuce consiste donc à ramener l'irradiation journalière réelle, à une irradiation instantanée de 1000 W/m² pendant **un nombre d'heure équivalent**. En effet à 1000 W/m² d'irradiation, la puissance du module est connue, c'est la puissance crête. Il ne reste plus qu'à multiplier la puissance crête par ce nombre d'heure équivalent pour obtenir l'énergie productible. Par exemple, une irradiation de 4500 Wh/m² sur une journée complète, est ramenée à une irradiation de 1000 W/m² pendant 4,5 h. Pour un module de 200 Wc, le productible théorique est donc de 200 Wc x 4,5 h, soit 900 Wh. Or, si notre module de 200 Wc a réellement produit 800 Wh durant cette journée, le ratio de performance est donc de 800/900, soit 0,89.

- Pour calculer le ratio de performance d'une installation complète, on effectue les mesures de puissance en différents points. Prenons l'exemple d'une installation comportant plusieurs onduleurs : la puissance électrique coté courant continu est mesurée à l'entrée d'un des onduleurs. La puissance crête photovoltaïque correspondant à cet onduleur est de 15 kWc. A une irradiation de 500 W/m², mesurée par un pyranomètre dans le plan du générateur (attention aux incertitudes de mesures), on obtient à l'entrée de l'onduleur une puissance électrique de 6,5 kW. Une autre méthode de calcul du ratio de performance, sans repasser par le calcul de rendement



surfactive peut également être utilisée car plus pratique : une irradiation de 500 W/m^2 correspond à la moitié de 1000 W/m^2 , avec le même rendement surfactive on devrait donc obtenir en théorie la moitié de la puissance crête, soit $7,5 \text{ kW}$. Le ratio de performance de ce groupe à l'entrée de l'onduleur est donc de $6,5/7,5$, soit $0,86$. Ce ratio contient ainsi le ratio de performance des modules, multiplié par le rendement mismatching (environ $0,98$) et la chute de tension des câbles ($\times 0,99$).

Utilités du ratio de performance photovoltaïque

- Sur une installation complète, la mesure du ratio de performance en différents points permet d'analyser la bonne santé d'une centrale indépendamment de l'irradiation reçue et de l'angle de pose. C'est en effet une donnée purement intrinsèque à l'installation. Exemple : lors d'une année très ensoleillée, une centrale dont le générateur solaire est posé à l'angle optimal pour l'année, disposera aux yeux du propriétaire d'un très bon productible. Pourtant en effectuant le calcul du ratio de performance qui n'est pas très bon, on se rend alors compte que la centrale photovoltaïque aurait pu produire davantage ! Le ratio de performance permet donc de vérifier la performance d'une installation en s'affranchissant des conditions externes. Ainsi, si votre installateur vous affirme qu'il ne peut pas garantir la météo durant la vie de votre installation, **il pourrait vous garantir son ratio de performance** qui ne dépend que des produits utilisés et de la qualité de pose. *Voir notre article spécial sur les garanties photovoltaïque.*
- A l'instar du rendement surfactive, le ratio de performance donne un réel aperçu du comportement d'un module en situation réelle d'exploitation. Ainsi à rendement surfactive STC égaux, deux modules aux ratios de performance différents n'auront pas le même productible.
- C'est un très bon indicateur de rendement financier : en effet il met en avant la capacité de chaque watt crête de module acheté, à produire un maximum d'énergie et ce indépendamment de la surface de pose. En effet, lorsque l'on achète un module photovoltaïque, son prix varie en fonction de la puissance crête et non de sa surface.

Le magazine Photon dispose d'un banc de test de ratio de performance sur différents modules photovoltaïques. Les résultats, disponibles chaque mois, oscillent entre $0,78$ et $0,9$ pour l'année 2011. Ce résultat démontre **qu'entre 2 modules photovoltaïques de rendement surfactive STC équivalent, il est possible d'avoir une différence de productible annuel de l'ordre de 13 %** ($(1 - 0,78/0,9) \times 100$) pour les mêmes conditions d'exploitation.

A partir du calcul du ratio de performance à différentes conditions, **nous lançons l'idée de l'introduction du rendement européen des modules photovoltaïques**, en suivant l'exemple du rendement européen donné pour les onduleurs. Cette proposition fait l'objet d'un article spécial écrit par nos soins : Pour l'introduction d'un rendement photovoltaïque européen.

Le rendement spécifique photovoltaïque

Signification du rendement spécifique photovoltaïque

Le rendement spécifique donne le productible annuel en kWh, ramené à l'unité de puissance kilowatt crête. Son unité est le kWh/kWc/an. Il est souvent calculé pour une installation complète et consiste alors à diviser le productible annuel total (kWh) par la puissance crête du générateur photovoltaïque complet (kWc).



Ce rendement peut être calculé en prévision d'une installation, à l'aide d'un logiciel de simulation photovoltaïque dédié, ou bien au cours de l'exploitation sur une période donnée à partir des relevés de production.

Rendement spécifique (kWh/kWc/an) = production annuelle (kWh) / puissance crête (kWc)

Exemple et Méthodes de calcul du rendement spécifique

Le rendement spécifique photovoltaïque est intimement lié au ratio de performance. En effet le productible annuel réel est en fait le produit du productible théorique aux conditions STC x le ratio de performance moyen sur une année.

Prenons l'exemple d'un site disposant d'une irradiation solaire annuelle de 1200 kWh/m² dans le plan du générateur. Ceci équivaut à 1200 h équivalent à 1000 W/m², comme nous l'avons expliqué dans les paragraphes précédents.

- **En prévisionnel** : le productible théorique est égal à la puissance crête du générateur multiplié par le nombre d'heure équivalent. Dans notre cas, pour une installation de 36 kWc, le productible théorique est donc de 36 x 1200, soit 43 200 kWh. Or si l'on considère les rendements onduleurs (95 %, soit x0,95), les chutes de tensions dans les câbles (- 2%, soit x0,98), le rendement mismatching (-2%, soit x0,98) et bien sur le ratio de performance des modules (environ 0,85 sur l'année par exemple) soumis à des variations d'irradiations et de températures, on estime un ratio de performance moyen à 0,78. Le productible réel annuel estimé est donc de 43 200 x 0,78, soit 33 700 kWh. Le rendement spécifique est donc de 33 700/36, soit 936 kWh/kWc/an. On remarquera qu'il suffit finalement de multiplier le nombre d'heure équivalent par le ratio de performance pour retomber sur le rendement spécifique (1200 x 0,78 = 936). Le productible réel et donc le rendement spécifique qui en découle peut donc être évalué sans outils informatiques particuliers. Les logiciels dédiés à la simulation photovoltaïque comme PV SOL ou PV SYST permettent, dans un premier temps, de calculer l'irradiation dans le plan du générateur à partir des données d'irradiations horizontales statistiques. Ensuite ils calculent les différents ratios de performance en fonction des conditions externes et des caractéristiques produits (modules, onduleurs) pour chaque instant de l'année. Le ratio de performance prévisionnel est ainsi beaucoup plus précis qu'une évaluation de tête.

- **Sur une exploitation existante** : il suffit de relever la production en kWh sur l'année et de le diviser par la puissance crête de l'installation. Si en parallèle, il est possible de récupérer les données d'irradiation solaire sur cette même période, il est alors possible de calculer le ratio de performance de votre centrale et donc d'évaluer sa bonne santé.

Utilités du rendement spécifique photovoltaïque

- Le rendement spécifique permet d'estimer rapidement un productible. En effet, les rendements spécifiques moyens de chaque région sont à peu près connus et servent de référence de calcul rapide.
- Le calcul prévisionnel de rendement spécifique avec un logiciel de simulation adapté, permet également de comparer différentes solutions techniques et configurations (modules, onduleurs, architectures) pour un même site et donc de faire le meilleur choix.
- Le rendement spécifique est un réel indicateur de la rentabilité d'un projet, puisqu'il donne le productible (et donc le gain en raccordé réseau) à l'unité de puissance achetée, équivalent de

l'investissement, le coût d'une centrale photovoltaïque étant souvent déterminé à partir de la puissance crête.

- Sur une exploitation existante, le calcul du rendement spécifique permet de déterminer rapidement le ratio de performance de l'installation (si l'on a connaissance de l'irradiation). Sans connaissance de l'irradiation, le rendement spécifique d'une installation photovoltaïque ne permet pas à lui seul d'évaluer son bon fonctionnement.
- Enfin, dans le cas de deux centrales en exploitation géographiquement proches, le calcul des rendements spécifiques de chaque centrale, permet de comparer leurs performances.

Les heures de fonctionnement photovoltaïque

Les contrats de rachat de kWh d'origine photovoltaïque stipulent généralement une clause de production maximum limitée à un nombre d'heure de fonctionnement. En France métropolitaine le nombre d'heure de fonctionnement photovoltaïque est ainsi limité à 1500 h par exemple.

Si les centrales photovoltaïques sont généralement en fonctionnement (allumage de l'onduleur) environ 4000 h/an, la limite des 1500 heures correspond en fait au nombre d'heure d'équivalence de fonctionnement à la puissance crête de l'installation.

Exemple de calcul des heures de fonctionnement photovoltaïque

Une installation photovoltaïque de 3 kWc a produit 3500 kWh sur une année. Elle a donc fonctionnée l'équivalent de 1166 h à la puissance de 3 kW. Le nombre d'heure de fonctionnement pris en compte est donc 1166 h. Pour retrouver le nombre d'heure de fonctionnement pris en compte, il faut donc diviser la production en kWh, par la puissance crête en kW. Cela revient donc à calculer le rendement spécifique présenté ci-dessus.

$$\text{Heures de fonctionnement} = \text{Production (kWh)} / \text{puissance crête (kWc)}$$

A l'inverse, à partir du gisement solaire d'un site, il est possible d'obtenir le nombre d'heure de fonctionnement prévisionnel. Exemple : La Rochelle reçoit chaque année 1300 kWh/m² dans le plan horizontal. En fonction de l'angle d'inclinaison et d'orientation, on en déduit l'irradiation dans le plan du générateur (avec un disque solaire par exemple). Avec par exemple un angle optimal d'inclinaison de 36 °, orienté plein Sud, l'irradiation dans le plan du générateur monte jusqu'à 1500 kWh/m², soit 1500 h à 1000 W/m². Il suffit de multiplier par le ratio de performance estimé pour l'ensemble de la centrale pour retrouver le nombre d'heure de fonctionnement réel. Le nombre d'heure de fonctionnement est ainsi de 1155 h/an avec un ratio de performance de 0,77.

$$\text{Heures de fonctionnement} = \text{Heures d'irradiation équivalent 1000 W/m}^2 \text{ (heures)} \times \text{ratio de performance}$$

Enfin il ne faut pas confondre le nombre d'heure de fonctionnement, avec le nombre d'heure d'ensoleillement donné par météo France par exemple, puisqu'il représente le nombre d'heure ou l'éclairement est supérieur à 120 W/m². Il ne qualifie donc pas le productible d'un générateur photovoltaïque.

Utilités des heures de fonctionnement photovoltaïque

Le nombre d'heure de fonctionnement quantifie la durée équivalente à puissance crête du générateur photovoltaïque, et au même titre que le rendement spécifique, **il quantifie donc la performance du système photovoltaïque complet**. Il qualifie également une localisation géographique pour la quantité d'irradiation solaire reçue.

Conclusion

Nous avons ici démontré que le rendement surfacique ne constitue pas l'unique critère de choix et de performance pour la technologie photovoltaïque. En effet, il qualifie uniquement la notion de rendement d'une surface donnée, alors que c'est davantage la puissance crête qui quantifie l'investissement, indépendamment de la surface occupée.

Pour maximiser le productible d'une installation c'est donc **le rendement spécifique** qu'il faut optimiser. Deux facteurs entrent alors en jeu : **l'irradiation solaire**, facteur externe sur lequel on ne peut pas intervenir (hormis en jouant sur les angles de pose, avec par exemple un tracker solaire) et **le ratio de performance**, facteur intrinsèque à l'installation et qui peut donc être optimisé.

Le ratio de performance d'une installation dépend en grande partie du ratio de performance des modules photovoltaïques. Des tests en laboratoire (Photon) menés sur différents modules ont ainsi démontré qu'il est possible **d'avoir une différence de productible de 13% entre deux modules de même rendement surfacique**. Ainsi, en fonction du climat de la région du projet d'installation, il faudra privilégier une technologie photovoltaïque présentant le meilleur rendement aux éclaircissements les plus fréquents de la zone. Cependant, d'un point de vue économique, les différences actuelles de coûts d'acquisition entre les technologies (cristallins, couches minces...) profitent surtout aux modules cristallins. En effet ils bénéficient d'un coût au watt crête relativement bas, leur permettant de combler leur faiblesse en termes de ratio de performance à faible éclaircissement.

Au-delà des modules photovoltaïques, l'obtention de bons ratios de performance pour des installations complètes, passe par une étude attentionnée de l'architecture électrique, du choix des produits et d'une mise en œuvre de qualité.

Lors d'un projet photovoltaïque, il y a donc un réel **travail d'optimisation** prenant en compte les facteurs climatiques, techniques et économiques, variant généralement à chaque projet.

Clément Brossard

Ingénieur Conseil **System Off Grid**