

## Dimensionnement des modules PV et micro-onduleurs

**Auteurs :** David Briggs<sup>1</sup>; Dave Williams<sup>1</sup>; Preston Steele<sup>1</sup>; Tefford Reed<sup>1</sup>;  
Enphase Energy, Inc.  
**25 Octobre 2012**

### RESUME

Cette étude analyse l'impact de l'utilisation de modules photovoltaïques de puissance élevée en combinaison avec un micro-onduleur M215 selon 15 scénarii différents d'installation. L'analyse a ainsi démontré que l'utilisation de plus grandes puissances de modules améliore de manière significative la production annuelle d'énergie, même si la taille de l'onduleur reste inchangée. Le gain de production annuelle est de 25% supérieur aux pertes liées à la saturation de l'onduleur. Cela donne à penser que le raccordement de modules solaires de grande puissance à des micro-onduleurs conduit à des performances plus élevées tout au long de la durée de vie, réduit le coût au Wc installé, et en fin de compte, assure un retour sur investissement des plus hauts pour le client final.

### INTRODUCTION

Ce qui est délivré à la sortie d'un module photovoltaïque est un phénomène complexe qui dépend de nombreux facteurs fluctuants, tels la lumière du soleil, la température, la vitesse du vent, les conditions optiques (clarté du verre, poussière et salissures), et plus encore. En dépit de cette variabilité, la sortie du module est pourtant constante d'une certaine façon : elle est presque toujours inférieure à la puissance nominale du module. En fait, la sortie du module dépasse rarement 90% de sa capacité nominale.

En raison de l'écart important entre les valeurs affichées sur la plaque signalétique du module et la performance réelle sur le terrain, les concepteurs de systèmes sont confrontés à une question difficile : comment dois-je dimensionner les composants aval du système ?

Le dimensionnement de composants aval qui correspondraient à la puissance nominale du module est quasiment assuré d'être excessif, entraînant des coûts exagérés pour le client final. Inversement, sélectionner des composants avals plus faibles abaisse le coût du système, et peut aussi limiter la production des modules à des moments choisis, lorsque les conditions sont optimales. Ainsi, il est important d'élaborer des lignes directrices pour la sélection des composants, équilibrant coûts et performances.

Cet article évalue l'impact du choix de différentes tailles de modules et micro-onduleurs sur le coût et les performances d'un système, mêlés à une variété de climats et de modes d'installation.

### METHODOLOGIE

#### Modélisation du comportement d'un Micro-onduleur.

C'est à l'aide d'Enlighten™, l'application Web de monitoring de Enphase, que les comportements de sortie de micro-onduleurs ont été analysés en plusieurs endroits à travers les Etats-Unis. Tous présentaient des ratios DC/AC supérieurs à 120%. Les valeurs mesurées en sortie ont ensuite été reliées à des mesures d'irradiance solaire provenant des stations météorologiques proches, afin d'établir un indice de performance (PR) entre l'irradiance solaire entrante et la puissance AC délivrée.

Parfois, lorsque l'onduleur est saturé (la puissance délivrée par le module dépasse la capacité maximale de puissance du M215, c'ad 225W), le PR est supposé constant par rapport aux valeurs observées précédemment (Fig. 1). [NOTE : Il s'agit d'une hypothèse prudente pour la modélisation de l'énergie perdue du fait de la saturation de l'onduleur, étant donné que les niveaux d'éclairage plus élevés sont généralement en corrélation avec des températures elles aussi plus élevées, qui nuisent à la performance du module, et donc, devrait diminuer légèrement le PR en période de fort ensoleillement.]

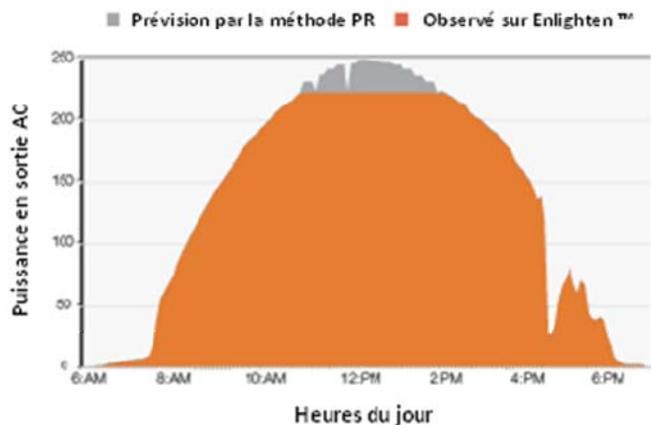


Figure 1 : En couleur orangée, une journée de production d'un M215 associé à un module de 260W. En gris, une évaluation basée sur la méthode du PR.

En utilisant la méthode du PR, l'effet qu'ont les différentes puissances de modules est facile à estimer en ajustant la sortie proportionnellement à la puissance du module. Par exemple, si un module de 240W produit 212W à 900W/m<sup>2</sup>, alors un module de 280W produira 247W pour le même rayonnement.

La figure 2 illustre un exemple de trois modules de différentes puissances modélisés pour une seule journée.

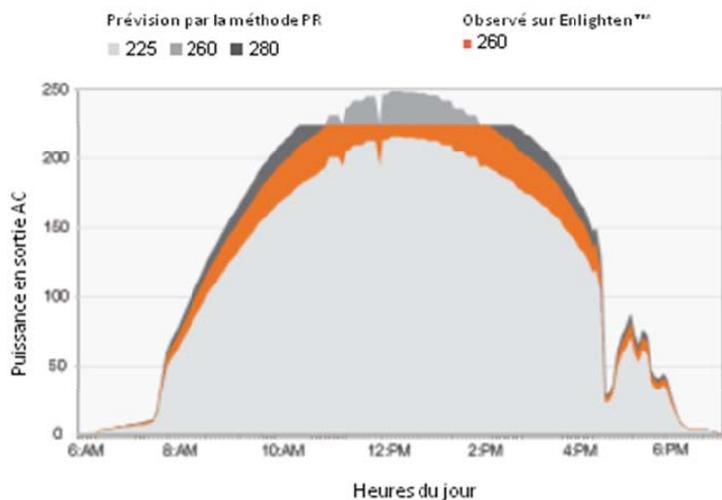


Figure 2 : En utilisant la méthode du PR, le comportement de modules de différentes puissances est affiché en différents niveaux de gris. Le comportement de l'onduleur en phase de saturation est visible au-delà de la limite de puissance

### Modélisation de l'impact annuel

Pour estimer l'impact de la taille des modules et micro-onduleur sur la production annuelle d'énergie, le logiciel de modélisation de performances PVsyst a été utilisé. Des ajustements ont été apportés aux paramètres par défaut de PVsyst afin d'aligner ses prévisions avec les valeurs observées dans Enlighten™. L'alignement entre PVsyst et les données observées a été confirmé en utilisant les mêmes fichiers météo et lieux d'installation, tout comme avec la méthode du PR. Le tableau 1 présente les ajustements apportés aux paramètres de modélisation dans PVSYST.

Une fois paramétré, PVsyst a été utilisé pour modéliser la performance annuelle en plusieurs emplacements géographiques et à de multiples angles d'inclinaison, tout en utilisant les fichiers

météorologiques par défaut de PVsyst. Au total, 15 simulations PVsyst ont été réalisées, avec pour chacune, 8 puissances de modules en utilisant la méthode du PR. Le tableau 2 présente les variables de ces 120 scénarii.

L'impact de la saturation d'un onduleur a été analysé en limitant les estimations horaires de PVsyst au niveau maximum de sortie du micro-onduleur. Dans le cas du M215, la puissance maximale de sortie est de 225W; pour un micro-onduleur de 240W, la puissance maximale a été estimée à 250W. La différence entre l'estimation PVsyst initiale et la valeur limitée de l'onduleur a été considérée comme étant la perte résultant de la saturation de l'onduleur.

Il convient de noter que ces simulations ne prenaient pas en compte la dégradation annuelle des performances du module. Etant raisonnable de s'attendre à ce que cette dégradation permette de réduire l'impact de la saturation de l'onduleur, cette analyse est de fait conservatrice dans le contexte de la performance tout au long de la durée de vie.

**Tableau 1 : Paramétrage de la section « Détail des pertes » de PVsyst**

Nom du paramètre	Valeur	Description
Paramètres thermiques	Libre	Suppose une bonne ventilation du module
Pertes Ohmiques	0.0%	Pas de pertes de câblage entre module et micro-onduleur
Qualité de modules	-1.0%	Suppose une tolérance de fabrication positive de +1.0%
Pertes de "Mismatch"	0.0%	Suppose qu'il n'y a pas de différences significatives entre les modules
Encrassement	0.0%	Suppose que la lumière n'est pas atténuée par l'encrassement

**Tableau 2 : les simulations PVsyst ont été effectuées pour traiter toutes les combinaisons suivantes**

Localisation	Angle (deg.)			Puissance de modules (Watts @ STC)							
	20	30	40	250	255	260	265	270	275	280	285
Los Angeles, CA	20	30	40	250	255	260	265	270	275	280	285
Toronto, ON	20	30	40	250	255	260	265	270	275	280	285
Denver, CO	20	30	40	250	255	260	265	270	275	280	285
Newark, NJ	20	30	40	250	255	260	265	270	275	280	285
Phoenix, AZ	20	30	40	250	255	260	265	270	275	280	285

### Modélisation de l'impact économique

Une deuxième analyse a été réalisée afin d'évaluer le rapport coût-efficacité de l'appariement de différentes tailles de module et micro-onduleur. L'analyse a comparé le coût initial des composants à leur retour sur investissement. Les tableaux 3 et 4 montrent le coût des composants et les hypothèses financières utilisées. [NOTE : ces hypothèses sont délibérément conservatrices en ce qui concerne le micro-onduleur M215. Par exemple, le coût de l'installation électrique est maintenu constant pour les deux micro-onduleurs, en dépit d'un courant de sortie AC plus élevé avec le micro-onduleur 240W.]

**Tableau 3 : hypothèses des coûts des composants utilisés pour analyser les coûts d'installation.**

Composant	Coût @250W	Indexation	Hypothèses de prix des composants
Module	\$0.90/W	2% / Taille	Production liée à la puissance supérieure du module
Main d'œuvre Structure	\$0.50/W	0%	Pas d'augmentation avec la taille du module
Main d'œuvre Electricité	\$0.50/W	0%	Pas d'augmentation bien que la puissance AC soit supérieure
Micro-onduleur	\$0.60/W	-5% / Taille	Réduction de coût pour appareil de plus forte puissance

**Tableau 4 : Les hypothèses financières utilisées pour analyser la valeur sur la durée de vie.**

Facteur	Hypothèse	Description
Dégradation	0%	Aucune dégradation de module n'a été prise en compte
Rendement onduleur	96%	Aucune différence de rendement entre les onduleurs
Prix de revente de l'énergie	\$0.20/kWh	Moyenne américaine
Coût de l'énergie	3%	Inflation standard du prix de l'énergie
Taux d'actualisation	8%	Standard d'estimation de la valeur actualisée des rendements futurs
Echéancier	20yr / \$0	Financement à 20 ans, sans frais de garantie ou de service

## RÉSULTATS

### *Incidence annuelle*

Globalement, les pertes annuelles par saturation de l'onduleur étaient insignifiantes. Dans 90% des scénarii utilisant le micro-onduleur M215, y compris ceux utilisant des modules de moins de 275W, les pertes annuelles étaient inférieures à 0,5% (tableau 3). En revanche, l'augmentation de la puissance des modules a entraîné des gains importants dans la production annuelle, même si la taille de l'onduleur est restée inchangée.

Comme on peut le voir en figure 3, la taille croissante de modules a eu un avantage presque linéaire sur la production annuelle, entraînant des gains qui étaient 25-100 fois plus importants que les pertes liées à la saturation onduleur. Il est cependant important de noter que les pertes annuelles d'un onduleur saturé croissent de façon géométrique avec la taille du module, et qu'à un certain point, les pertes marginales commencent à dépasser les gains. Ce croisement se produit généralement au-dessus de 140% du rapport DC/AC, ou lors de l'utilisation de modules de plus de 300W avec un micro-onduleur M215.

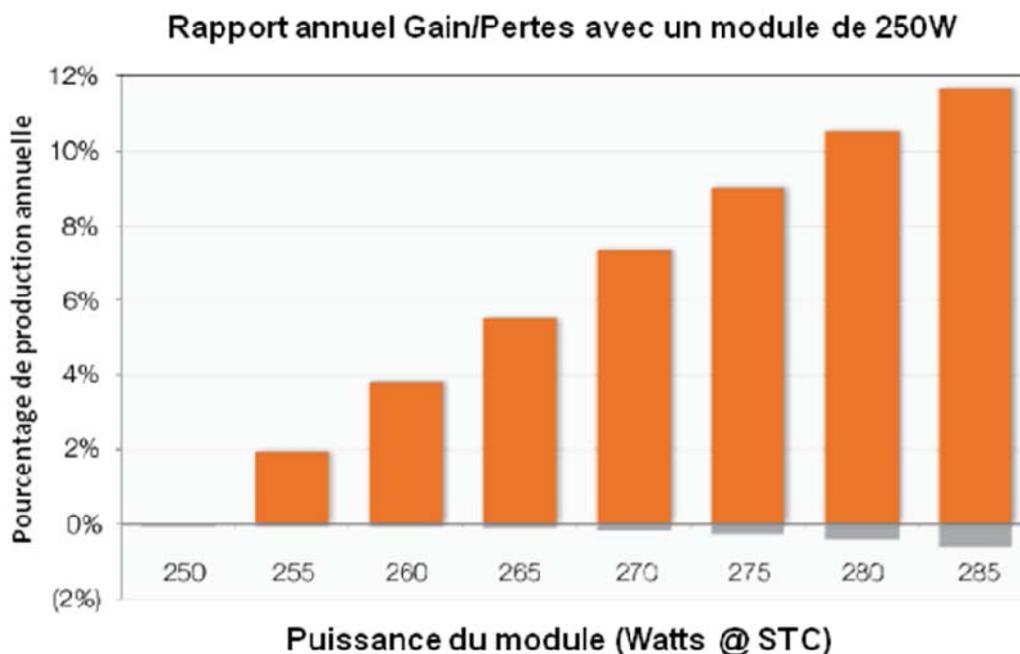


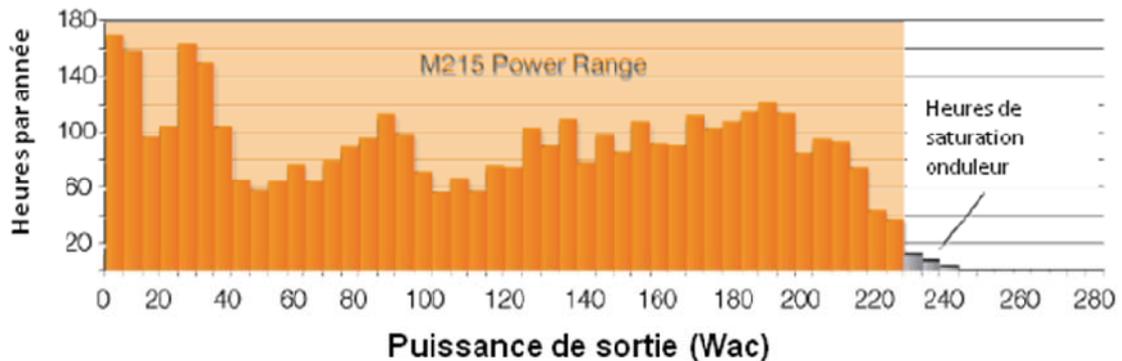
Figure 3 : Le gain de rendement annuel pour des puissances de modules différentes, par rapport à un module de 250W à Denver, CO, est représenté en orange. Le total des pertes annuelles liées à la saturation de l'onduleur sont indiquées en gris.

### **Comportement du micro-onduleur**

Dans tous les scénarii, le micro-onduleur M215 a été en dessous de son rendement maximum pendant plus de 90% de l'année. La figure 4 montre le nombre d'heures que le M215 a passé tout au long de l'année à chaque niveau de puissance de sortie, alors qu'il était associé à un module de 260W à Denver, CO. Comme on peut le voir, le micro-onduleur fonctionne en dessous de sa puissance maximale de sortie pendant plus de 99,5% du temps.

Pour évaluer l'impact de la saturation de l'onduleur, il est important de rappeler que ce dernier continue de produire à sa puissance maximale pendant cette période (figure 1). Par exemple, dans la figure 4 l'onduleur continue à produire 225W pendant les « heures de saturation de l'onduleur », et par conséquent, il a converti environ 95% de la production totale du module à ces moments là.

**Prévisionnel de production la première année avec un module de 260W, à Denver, CO**



**Figure 4 : La répartition des heures passées à chaque niveau de puissance de sortie tout au long de l'année d'un module de 260W à Denver, CO, à 30 degrés d'inclinaison. Les heures de saturation de l'onduleur sont indiquées en gris.**

Comme on peut le voir sur le tableau 3, la localisation influence les pertes liées à la saturation de l'onduleur. Ceci s'explique par le fait que certains endroits sont plus susceptibles d'avoir des conditions ensoleillées à basse température. Typiquement, ce sont des endroits de haute altitude ou sous des latitudes élevées.

De même, nous voyons sur le tableau 3 qu'un angle d'inclinaison élevé conduit à des saturations plus fréquentes parce que températures froides et rayonnement important sont plus susceptibles de se produire lorsque le soleil est bas dans le ciel (que ce soit en début de journée ou pendant les mois d'hiver). En revanche, il est probable que n'importe quel angle d'inclinaison inférieur à 20 degrés donnera lieu à une quantité négligeable de perte d'énergie par saturation de l'onduleur.

Tableau 5 : La perte annuelle d'énergie par saturation de l'onduleur est indiquée pour 120 différents scénarii d'installation.

Localisation	Inclinaison (deg.)	Pertes annuelles par saturation onduleur							
		Puissance de module (Watts @ STC)							
		250	255	260	265	270	275	280	285
Los Angeles, CA	20	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.04%	0.07%	0.13%
	30	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.03%	0.07%	0.13%	0.23%
	40	0.00%	0.00%	0.01%	0.04%	0.09%	0.16%	0.25%	0.37%
Toronto, ON	20	0.01%	0.03%	0.05%	0.09%	0.16%	0.25%	0.38%	0.53%
	30	0.04%	0.07%	0.12%	0.19%	0.30%	0.43%	0.60%	0.80%
	40	0.10%	0.16%	0.23%	0.32%	0.43%	0.58%	0.75%	0.96%
Denver, CO	20	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.04%	0.08%	0.16%	0.27%
	30	0.00%	0.01%	0.03%	0.07%	0.13%	0.23%	0.37%	0.56%
	40	0.04%	0.08%	0.14%	0.22%	0.34%	0.49%	0.68%	0.90%
Newark, NJ	20	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.03%	0.07%
	30	0.00%	0.01%	0.01%	0.02%	0.04%	0.07%	0.11%	0.17%
	40	0.01%	0.03%	0.04%	0.07%	0.11%	0.16%	0.23%	0.31%
Phoenix, AZ	20	0.00%	0.00%	0.01%	0.03%	0.07%	0.13%	0.22%	0.34%
	30	0.00%	0.00%	0.04%	0.09%	0.16%	0.28%	0.45%	0.66%
	40	0.02%	0.04%	0.10%	0.20%	0.34%	0.54%	0.78%	1.06%

### Impact économique

Dans tous les cas, le coût d'installation par watt a diminué quand la puissance du module augmentait (figure 5). Ceci s'explique par le fait que le coût du module ne représente qu'une fraction du coût total du système, et que la puissance du module est la base même de la taille du système. Ainsi, dans l'équation du coût par Watt, le dénominateur croît plus rapidement que le numérateur.

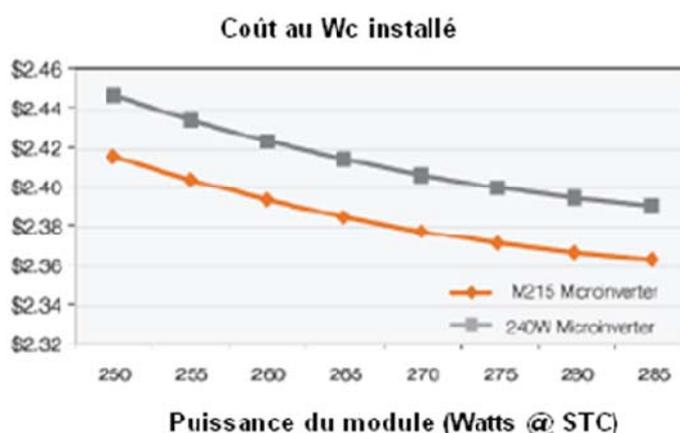


Figure 5: le coût par watt installé est indiqué pour différentes puissances de modules et micro-onduleurs

En revanche, l'augmentation de puissance du micro-onduleur augmente le coût système, mais n'a aucun effet sur la taille du système. Ainsi, le coût au watt du système a constamment été plus élevé en utilisant un micro-onduleur plus puissant. Il est important de noter que cet effet pourrait devenir plus important encore si la plus grande capacité du micro-onduleur nécessite d'augmenter la taille et le coût des composants électriques.

Sur le plan de l'investissement, le taux de rendement du système augmente avec la taille du module, mais pas celle du micro-onduleur. Ceci est cohérent avec le constat que les gains croissent de manière plus significative avec la taille du module que les pertes par saturation de l'onduleur. Ainsi, la valeur de la production supplémentaire liée à l'utilisation de modules plus puissants était supérieure à leur coût additionnel, ce qui n'est pas le cas en utilisant un onduleur plus puissant.

La figure 7 compare directement le coût additionnel d'un micro-onduleur 240W à la valeur de la production supplémentaire. Bien que la valeur ajoutée d'un micro-onduleur plus puissant augmente avec la taille du module, cette valeur, dans tous les cas, a été inférieure au surcoût de l'onduleur.

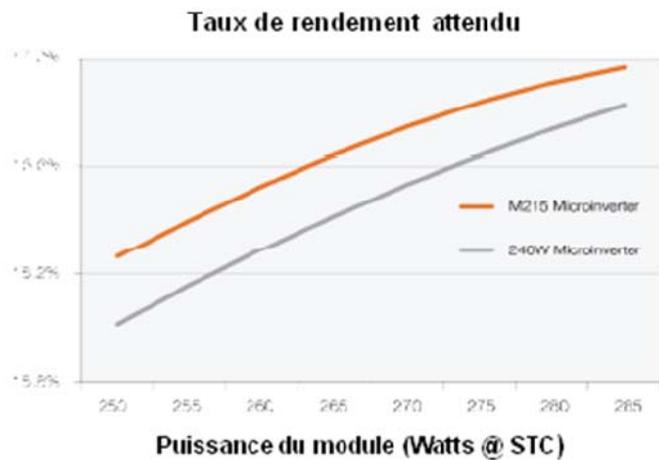


Figure 6 : Le taux de rendement attendu est indiqué pour différentes puissances de modules et micro-onduleurs

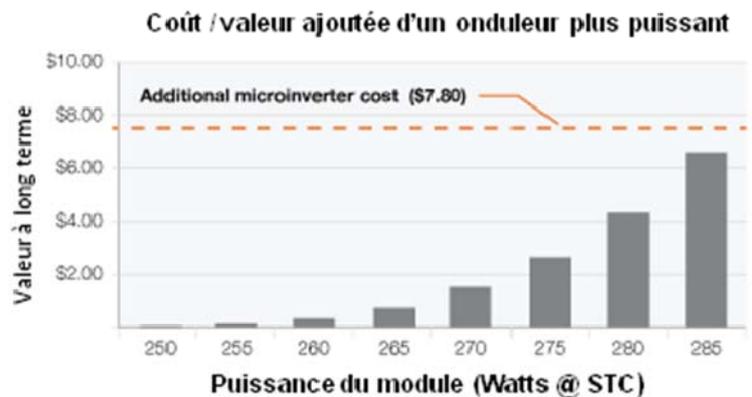


Figure 7 : La valeur ajoutée d'un micro-onduleur de plus grande capacité est comparée avec son coût additionnel.

## CONCLUSION

Il ressort clairement de cette étude que l'utilisation de modules solaires de grande puissance avec le M215 se traduit par des gains substantiels dans la production annuelle et des pertes minimales du fait de la saturation du micro-onduleur. Cette conclusion est renforcée par le fait que les pertes de saturation cumulées seront probablement inférieures, en raison de la dégradation des modules et de l'accumulation de salissures au fil du temps.

Cette étude souligne la nécessité d'évaluer les modules solaires en fonction de leur performance prévue sur le terrain, plutôt que sur leur puissance nominale. Les modules solaires ne produiront à leur puissance nominale qu'en présence de conditions météorologiques optimales, lorsque le soleil brille et la température est fraîche. Dans l'ensemble, ces conditions sont rares, et ne se produisent que sur un faible pourcentage de jours de la fin de l'hiver ou du début du printemps, alors que les jours les plus ensoleillés tout au long de l'année affichent des températures plus élevées, qui généralement limitent la sortie du module à 80%, ou moins, de sa puissance nominale.

En outre, cette étude montre qu'il existe des économies importantes à réaliser en utilisant des modules de puissance plus élevée en association avec le micro-onduleur M215. Cette constatation est significative dans l'environnement industriel que nous connaissons aujourd'hui, où les prix de modules solaires diminuent rapidement et le coût des micro-onduleurs et appareils électriques sont une partie de plus en plus importante du coût du système. Cette tendance suggère que le ratio de dimensionnement module/onduleur optimal va continuer à augmenter au fil du temps, encourageant la conception de systèmes qui satureraient fréquemment les micro-onduleurs du fait de l'impact favorable sur le retour sur investissement.