

Pourquoi la puissance nominale de mon module PV est-elle supérieure à celle de mon onduleur ?

Sélectionner son module photovoltaïque (PV) et son onduleur constitue deux décisions des plus importantes lors de la conception d'un système PV. D'un point de vue technique et économique comme sur le plan de la fiabilité, il est essentiel de s'assurer que ces composants sont compatibles.

Les objectifs définis et les hypothèses émises lors de la conception par les différentes parties prenantes peuvent influencer le processus décisionnel. Les considérations suivantes peuvent faciliter la prise de décision :

- Le ratio DC/AC est la relation entre la puissance nominale du module PV et la puissance de l'onduleur. Chaque système PV a un ratio DC/AC indépendant de son architecture. Sur de nombreux onduleurs, le ratio DC/AC est limité pour des raisons de fiabilité et de garantie. **Les micro-onduleurs d'Enphase ne connaissent aucune limitation du ratio DC/AC autre que celle imposée pour la compatibilité entre le courant et la tension continue d'entrée.**
- **Plus le ratio DC/AC est élevé et meilleurs sont l'utilisation de l'onduleur et le taux de charge.** L'utilisation de l'onduleur est mesurée par le taux de charge, c'est-à-dire par le rapport entre la production d'énergie effective et la production d'énergie maximale. Une part significative des coûts du système est liée à la valeur nominale AC de l'onduleur (string ou micro-onduleur). Installer un courant continu supérieur sur un onduleur donné augmente le taux de charge et peut réduire le coût général du système en dollars par watt.
- Les pertes DC dans les systèmes d'onduleurs string (y compris ceux équipés d'optimiseurs) sont généralement supérieures à celles des systèmes à micro-onduleurs. Cela signifie que les simulations d'un système à onduleurs string peuvent présenter des pertes dues à l'écrêtement moindres pour un ratio DC/AC donné. Cependant, ces pertes DC supplémentaires ont également un impact sur le ratio DC/AC nominal et entraînent de meilleurs ratios DC/AC nominaux pour les systèmes à micro-onduleurs à un pairage donné.
- Les pertes dues à l'écrêtement dans les systèmes sont généralement très faibles comparées à d'autres sources de pertes telles que les facteurs d'orientation, la salissure, l'ombrage et la dissipation de chaleur. De plus, les pertes dues à l'écrêtement diminuent au cours du temps avec la dégradation des modules, tandis que d'autres facteurs de pertes tels que la salissure et l'ombrage augmentent dans l'ensemble.
- Les retombées économiques des divers indicateurs de rendement du système, y compris une meilleure utilisation de l'onduleur et un meilleur taux de charge grâce à une conception permettant des ratios DC/AC plus élevés, dépendent finalement de l'économie du marché énergétique local et de la configuration de l'installation du système. Les outils de simulation économique tels que NREL SAM¹ permettent aux parties prenantes de réaliser leurs propres évaluations.

¹ Logiciel « System Advisor Model ». National Research Energy Laboratory. Golden, Colorado, USA.
<https://sam.nrel.gov/downloads>.

Contexte

Pourquoi la puissance nominale de mon module PV est-elle supérieure à celle de mon onduleur ?

Cette question courante a une réponse simple. Dans des conditions réelles, la puissance de sortie d'un module PV est rarement égale à sa puissance nominale en raison de la dissipation de chaleur. La puissance du module PV est le produit du courant continu (courant DC) et de la tension continue (tension DC). À l'intérieur d'un module PV, la tension DC dépend de la température des cellules du module PV. Cela signifie que la tension DC diminue quand la température des cellules augmente. Le courant DC dépend de l'ensoleillement disponible, appelé irradiance, qui dépend de la position du soleil par rapport à l'orientation du module et des conditions ambiantes.

L'*illustration 1* présente les mesures DC d'un module PV au cours du temps. La plupart du temps, la puissance de sortie du module PV est bien inférieure à la limite d'entrée DC (droite inclinée en bleu). Quand la limite de puissance d'entrée est atteinte, l'onduleur augmente la tension continue d'entrée afin de limiter la puissance alternative de sortie à la puissance maximale correspondant au modèle du micro-onduleur. Cet état est appelé « écrêtement de la puissance ». Si la limite DC d'entrée n'est jamais atteinte, l'onduleur n'écrête jamais et est sous-utilisé.

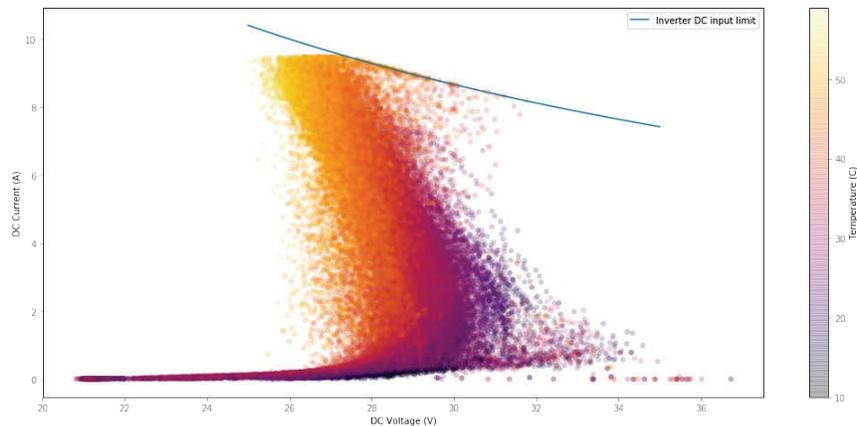


Illustration 1 : Exemple de données sur 5 minutes présentant la puissance DC absorbée d'un micro-onduleur Enphase

La mesure de l'utilisation d'un onduleur est appelée « taux de charge » et est définie comme le rapport entre la production d'énergie réelle et la production d'énergie maximale (si l'onduleur fonctionnait en permanence à plein régime, son taux de charge serait égal à 1,0). Plus le taux de charge est élevé et mieux la capacité nominale de l'onduleur est exploitée. L'*illustration 2* identifie comment le taux de charge augmente avec des ratios DC/AC élevés et montre les effets de l'orientation du module.

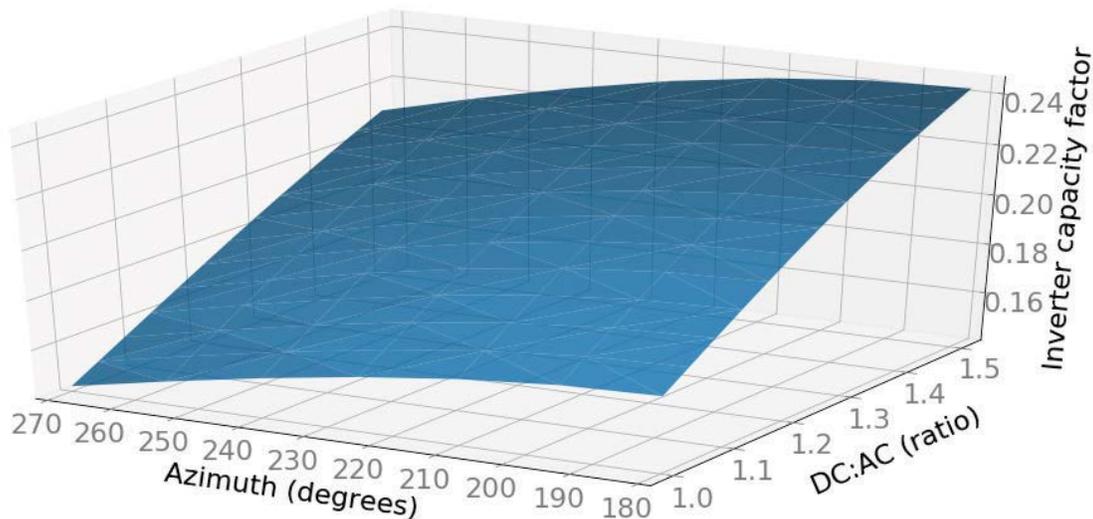


Illustration 2 : Newark – Simulation du taux de charge à une inclinaison de 25°

Le taux de charge de l'onduleur et l'écrêtement du module PV constituent deux des nombreux indicateurs de rendement à prendre en compte lors de l'évaluation de la conception d'un système PV. Demander « Pourquoi la puissance nominale de mon module PV est-elle supérieure à celle de mon onduleur ? » soulève une question bien plus complexe : « Comment choisir le module PV en fonction de l'onduleur ? » Malheureusement, la réponse à cette question n'est pas simple.

Théorie

Le dimensionnement commence par s'assurer que les caractéristiques électriques des modules PV sont compatibles avec l'onduleur. Enphase fournit un calculateur de compatibilité des modules en ligne qui permet de déterminer la compatibilité électrique simplement d'après la tension continue d'entrée de l'onduleur et les plages de courant : <https://enphase.com/fr-fr/support-client/modules-compatibles>

La relation entre la puissance nominale du module PV (P_{STC}) et la puissance nominale de sortie de l'onduleur

($P_{MAX AC}$) est souvent appelée « ratio DC/AC » :

$$\text{ratio DC/AC} = \frac{P_{STC}}{P_{MAX AC}}$$

Les micro-onduleurs d'Enphase sont équipés d'un dispositif de sécurité électronique qui limite la puissance délivrée à la **puissance de crête nominale**. La fiabilité des micro-onduleurs est testée dans ces conditions, sans limitation du ratio DC/AC.

Dans les faits, certains facteurs concrets réduisent le ratio DC/AC. Calculer un ratio DC/AC nominal peut faciliter les comparaisons.

$$\text{ratio DC/AC nominal} = \frac{P_{DC}(1-L_{total})\eta}{P_{AC MAX} \cos \vartheta}$$

Où : P_{DC} est la puissance DC, L_{total} la somme des pertes DC, η le rendement du processus de conversion DC vers AC indépendamment de l'architecture et ϑ l'angle de phase entre la tension et le courant. Les pertes DC dues à l'orientation du module, à sa dégradation, à son incompatibilité, au câblage DC, aux raccordements, à la salissure et à l'ombrage réduisent la puissance DC disponible, ce qui entraîne une baisse du ratio DC/AC nominal. PVWatts, par exemple, suggère une perte par défaut L_{total} de 14 %². Par exemple, le ratio DC/AC d'un module PV de 300 W sur un onduleur IQ 6 serait :

² Il n'existe aucune source dans le document actuel.

$$\text{ratio DC/AC} = \frac{300 \text{ DC } W_{\text{STC}}}{240 W_{\text{crête}}} = 1,25$$

Cependant, en raison des pertes dues à la salissure et aux connexions DC, il est raisonnable de supposer que des pertes L_{total} de 5,6 % combinées à un rendement de 97 % de l'onduleur réduisent en réalité le ratio DC/AC, ce qui résulte en un moindre ratio DC/AC nominal :

$$\text{ratio DC/AC nominal} = \frac{300 \text{ DC } W_{\text{STC}} * (1 - 0,056) * 0,97}{240 W_{\text{crête}} \cos 0} = 1,14$$

Certaines architectures ont un deuxième niveau de conversion DC/DC. Pour calculer le plein rendement DC vers AC, il faut multiplier le rendement de l'optimiseur DC/DC par le rendement de l'onduleur string.

Déterminer le meilleur ratio DC/AC est donc un problème d'optimisation mathématique. Les problèmes d'optimisation recherchent la meilleure solution réalisable possible d'après un ensemble d'hypothèses, la meilleure solution étant une fonction de coût. Un système d'énergie solaire comprend de nombreuses fonctions de coûts, dont :

- l'optimisation de la récupération d'énergie,
- l'optimisation de la valeur actuelle nette (VAN),
- l'optimisation de la facture mensuelle,
- l'optimisation du délai de retour sur investissement,
- l'optimisation de l'écrêtement de l'onduleur,
- l'optimisation de l'efficacité du système,
- l'optimisation du taux de charge.

Les restrictions pouvant affecter le choix optimal comprennent :

- l'espace disponible sur le toit,
- l'accessibilité au soleil due à l'ombrage,
- l'accessibilité au soleil due aux restrictions d'orientation du module,
- les caractéristiques du réseau électrique,
- les conditions imposées par le réseau public et la réglementation,
- le capital disponible,
- les équipements disponibles.

La combinaison de divers indicateurs de rendement est appelée « problème d'optimisation à variables multiples ». Lors de la détermination des coûts, il convient de tenir compte du système complet et de toute la procédure d'installation. Il est important de noter que la meilleure solution pour un système spécifique peut être différente de la meilleure solution dans la région. Ce phénomène s'appelle la différence entre l'optimisation locale et générale. Les installateurs peuvent utiliser un calcul simplifié pour déterminer la valeur économique de l'énergie perdue par rapport au coût des composants du système comme possible indicateur de rendement. En alternative, ils peuvent déterminer que les avantages obtenus par la conception d'un système optimisé ne l'emportent pas sur les coûts d'ingénierie supplémentaires imputés au propriétaire.

Exemple de simulations analysant le rendement énergétique

Pour fournir un peu plus de contexte sur les ratios DC/AC et vous aider à prendre une décision, la performance énergétique a été simulée avec le logiciel System Advisor Model (SAM) de NREL à l'aide du modèle de module en feuille polymère sur structure ouverte à rendement simple (coefficient de température : $-0,4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ Pmp) avec des données météorologiques TMY3. Sauf mention contraire expresse, les pertes L_{total} étaient égales à 0,6 %. On a supposé que la salissure était nulle avec une perte de 0,6 % au niveau des connexions DC. Ces pertes DC hypothétiques sont très prudentes. En réalité, les pertes dues à la salissure, par exemple, peuvent être plus élevées, ce qui réduirait à leur tour les pertes dues à l'écrêtement qui en résultent. De nombreux outils permettent d'effectuer des calculs similaires. Pourtant, NREL SAM prend en charge des simulations paramétriques utiles dans cette simulation étant donné le nombre important de sites et de configurations des systèmes.

Les graphiques présentés ici font référence à Newark (New Jersey, USA), mais les principes d'observation s'appliquent également à d'autres sites. L'illustration 3 présente la disparité du rendement énergétique due à l'écrêtement lorsque l'azimut et le ratio DC/AC varient. Quand les azimuts se décalent par rapport à l'orientation idéale face au sud dans l'hémisphère nord, les pertes dues à l'écrêtement diminuent considérablement, et la production en fait de même.

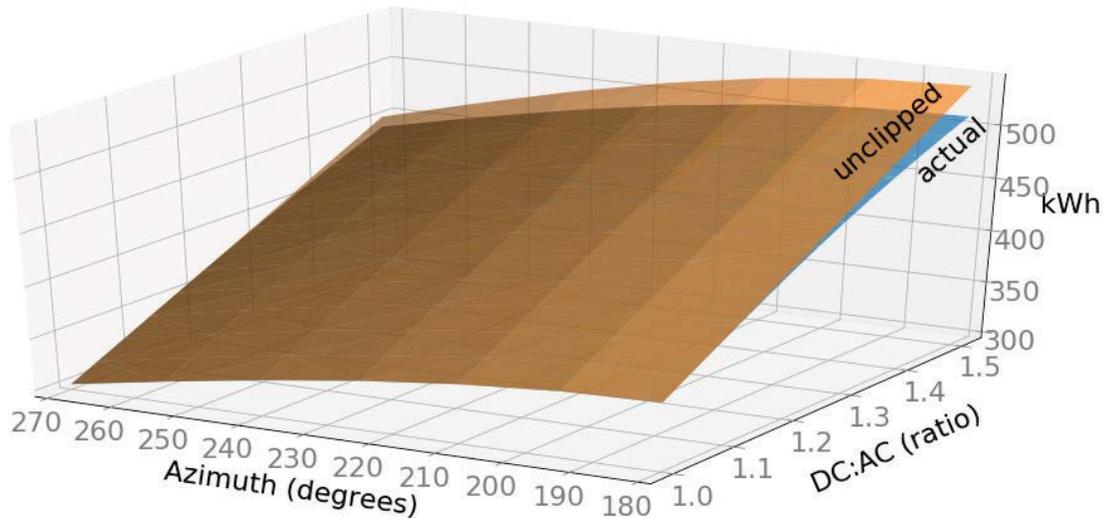


Illustration 3 : Newark – Simulation du rendement réel comparé au rendement sans écrêtement

Comme le montre l'illustration 4, augmenter le ratio DC/AC augmente le rendement énergétique, mais une partie de l'énergie récupérée pourrait être perdue à cause de l'écrêtement de l'onduleur. L'augmentation du rendement énergétique est toujours supérieure aux pertes dues à l'écrêtement, même si les ratios DC/AC sont très élevés. Remarquez que l'écrêtement de l'onduleur présenté ici correspond à la simulation d'un écrêtement au cours de la première année. La puissance délivrée par le module PV se dégrade au fil du temps, de sorte que les pertes dues à l'écrêtement seront réduites proportionnellement.

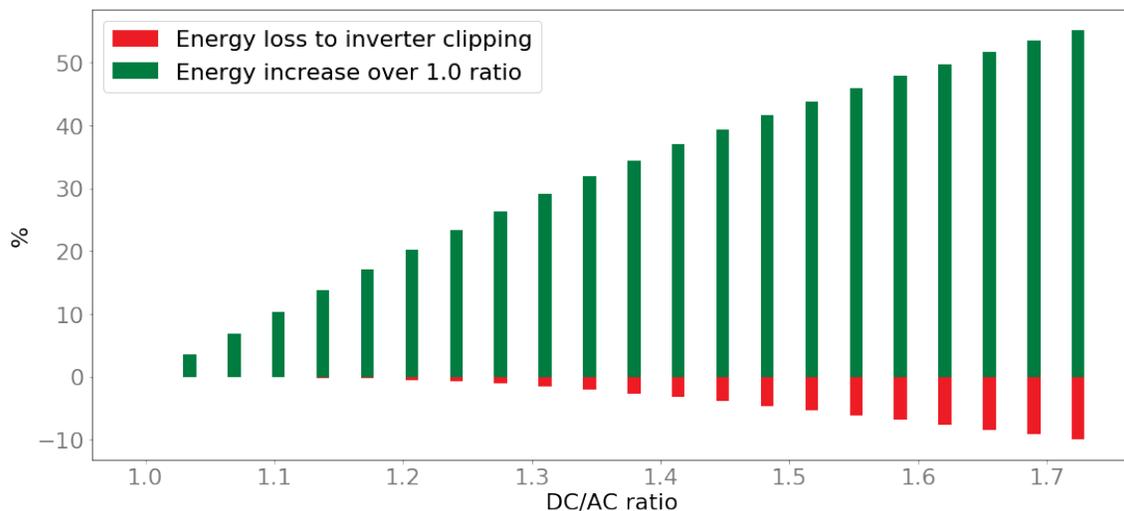


Illustration 4 : Newark, inclinaison 25°, azimut 180°

Résultats des simulations faites avec l'IQ 7

Les tableaux suivants présentent des exemples de rendement énergétique, d'écrêtement et de taux de charge simulés pour l'onduleur d'un module simple au cours de sa première année de fonctionnement avec divers ratios DC/AC. Ces simulations reposent sur le micro-onduleur IQ 7 installé dans différents sites aux États-Unis, d'après un modèle d'efficacité simple de $-0,4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Le micro-onduleur IQ 7 génère un courant de sortie maximal de 250 VA. Dans ce modèle, l'orientation du module est fixée à un azimut de 180° , avec une inclinaison de 25° et des pertes L_{total} de 5,6 %. En réalité, de nombreux systèmes PV n'ont pas une orientation idéale plein sud à un azimut de 180° ni un angle d'inclinaison idéal. Par conséquent, l'impact de l'écrêtement sera inférieur à celui présenté dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 9 : IQ 7 – Newark, modèle de rendement simple à $-0,4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, L_{total} 5,6 %, azimut 180° , inclinaison 25° .

Module STC (Wdc)	Ratio DC/AC	Ratio DC/AC nominal	Taux de charge	Énergie annuelle (kWh)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (%)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (kWh)	Augmentation du rendement énergétique par rapport au
250	1,00	0,92	0,163	342	0,0 %	0,0	0 %
260	1,04	0,96	0,169	356	0,0 %	0,0	4 %
270	1,08	0,99	0,176	369	0,0 %	0,0	8 %
280	1,12	1,03	0,182	383	0,0 %	0,0	12 %
290	1,16	1,07	0,189	397	0,0 %	0,0	16 %
300	1,20	1,10	0,195	411	0,0 %	0,1	20 %
310	1,24	1,14	0,202	424	0,1 %	0,4	24 %
320	1,28	1,18	0,208	438	0,2 %	0,8	28 %
330	1,32	1,21	0,214	451	0,3 %	1,6	32 %
340	1,36	1,25	0,220	463	0,6 %	2,9	36 %
350	1,40	1,29	0,226	476	0,9 %	4,6	39 %
360	1,44	1,32	0,232	487	1,3 %	6,9	43 %
370	1,48	1,36	0,237	498	1,8 %	9,8	46 %
380	1,52	1,40	0,242	508	2,4 %	13,2	49 %
390	1,56	1,43	0,247	518	3,0 %	17,1	52 %
400	1,60	1,47	0,251	528	3,7 %	21,4	54 %
410	1,64	1,51	0,255	537	4,4 %	26,2	57 %
420	1,68	1,54	0,259	545	5,2 %	31,5	60 %

Tableau 10 : IQ 7 – Denver (Golden), modèle de rendement simple à $-0,4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, L_{total} 5,6 %, azimut 180° , inclinaison 25° .

Module STC (Wdc)	Ratio DC/AC	Ratio DC/AC nominal	Taux de charge	Énergie annuelle (kWh)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (%)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (kWh)	Augmentation du rendement énergétique par rapport au
250	1,00	0,92	0,186	391	0,0 %	0,0	0 %
260	1,04	0,96	0,193	407	0,0 %	0,0	4 %
270	1,08	0,99	0,201	422	0,0 %	0,0	8 %
280	1,12	1,03	0,208	438	0,0 %	0,1	12 %
290	1,16	1,07	0,216	454	0,1 %	0,3	16 %
300	1,20	1,10	0,223	469	0,2 %	0,9	20 %
310	1,24	1,14	0,230	483	0,4 %	2,0	24 %
320	1,28	1,18	0,237	497	0,7 %	3,7	27 %
330	1,32	1,21	0,243	511	1,1 %	6,2	31 %
340	1,36	1,25	0,249	523	1,7 %	9,5	34 %
350	1,40	1,29	0,254	535	2,4 %	13,7	37 %
360	1,44	1,32	0,259	545	3,2 %	18,8	40 %
370	1,48	1,36	0,264	555	4,0 %	24,5	42 %
380	1,52	1,40	0,269	565	4,9 %	30,6	45 %
390	1,56	1,43	0,273	574	5,8 %	37,3	47 %
400	1,60	1,47	0,277	583	6,7 %	44,4	49 %
410	1,64	1,51	0,281	591	7,7 %	52,0	51 %
420	1,68	1,54	0,285	599	8,7 %	60,0	53 %

Tableau 11 : **IQ 7** – Los Angeles, modèle de rendement simple à -0,4 %/°C, L_{total} 5,6 %, azimut 180°, inclinaison 25°.

Module STC (Wdc)	Ratio DC/AC	Ratio DC/AC nominal	Taux de charge	Énergie annuelle (kWh)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (%)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (kWh)	Augmentation du rendement énergétique par rapport au
250	1,00	0,92	0,199	419	0,0 %	0,0	0 %
260	1,04	0,96	0,207	435	0,0 %	0,0	4 %
270	1,08	0,99	0,215	452	0,0 %	0,0	8 %
280	1,12	1,03	0,223	469	0,0 %	0,0	12 %
290	1,16	1,07	0,231	486	0,0 %	0,0	16 %
300	1,20	1,10	0,239	503	0,0 %	0,1	20 %
310	1,24	1,14	0,247	519	0,1 %	0,5	24 %
320	1,28	1,18	0,254	535	0,3 %	1,7	28 %
330	1,32	1,21	0,261	549	0,7 %	4,0	31 %
340	1,36	1,25	0,268	563	1,2 %	7,4	35 %
350	1,40	1,29	0,274	575	1,9 %	12,0	37 %
360	1,44	1,32	0,279	587	2,7 %	17,2	40 %
370	1,48	1,36	0,284	598	3,5 %	22,9	43 %
380	1,52	1,40	0,289	609	4,4 %	29,3	45 %
390	1,56	1,43	0,294	618	5,3 %	36,4	48 %
400	1,60	1,47	0,298	627	6,3 %	44,3	50 %
410	1,64	1,51	0,302	636	7,3 %	52,9	52 %
420	1,68	1,54	0,306	644	8,3 %	61,8	54 %

Tableau 12 : **IQ 7** – Phoenix, modèle de rendement simple à -0,4 %/°C, L_{total} 5,6 %, azimut 180°, inclinaison 25°.

Module STC (Wdc)	Ratio DC/AC	Ratio DC/AC nominal	Taux de charge	Énergie annuelle (kWh)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (%)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (kWh)	Augmentation du rendement énergétique par rapport au
250	1,00	0,92	0,217	456	0,0 %	0,0	0 %
260	1,04	0,96	0,226	475	0,0 %	0,0	4 %
270	1,08	0,99	0,235	493	0,0 %	0,0	8 %
280	1,12	1,03	0,243	511	0,0 %	0,0	12 %
290	1,16	1,07	0,252	530	0,0 %	0,0	16 %
300	1,20	1,10	0,261	548	0,0 %	0,1	20 %
310	1,24	1,14	0,269	566	0,0 %	0,2	24 %
320	1,28	1,18	0,278	584	0,1 %	0,8	28 %
330	1,32	1,21	0,286	601	0,3 %	2,0	32 %
340	1,36	1,25	0,294	617	0,7 %	4,3	35 %
350	1,40	1,29	0,300	632	1,2 %	8,2	38 %
360	1,44	1,32	0,307	645	2,0 %	13,6	41 %
370	1,48	1,36	0,312	656	2,8 %	20,1	44 %
380	1,52	1,40	0,317	667	3,8 %	27,7	46 %
390	1,56	1,43	0,322	677	4,8 %	36,1	48 %
400	1,60	1,47	0,327	687	5,9 %	45,2	50 %
410	1,64	1,51	0,331	695	6,9 %	54,7	52 %
420	1,68	1,54	0,335	704	8,0 %	64,7	54 %

Résultats des simulations faites avec l'IQ 7+

Les tableaux suivants présentent des exemples de rendement énergétique, d'écrêtement et de taux de charge simulés pour l'onduleur d'un module simple au cours de sa première année de fonctionnement pour divers ratios DC/AC. Ces simulations reposent sur le micro-onduleur IQ 7+ installé dans différents sites aux États-Unis, d'après un modèle d'efficacité simple de $-0,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Le micro-onduleur IQ 7+ génère un courant de sortie maximal de 295 VA. Dans ce modèle, l'orientation du module est fixée à un azimut de 180° , avec une inclinaison de 25° et des pertes L_{total} de 5,6 %. En réalité, de nombreux systèmes PV n'ont pas une orientation idéale plein sud à un azimut de 180° ni un angle d'inclinaison idéal. Par conséquent, l'impact de l'écrêtement sera inférieur à celui présenté dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 13 : **IQ 7+** – Newark, modèle de rendement simple à $-0,4 \text{ }^\circ\text{C}$, L_{total} 5,6 %, azimut 180° , inclinaison 25° .

Module STC (Wdc)	Ratio DC/AC	Ratio DC/AC nominal	Taux de charge	Énergie annuelle (kWh)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (%)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (kWh)	Augmentation du rendement énergétique par rapport au
295	1,00	0,92	0,192	404	0,0 %	0,0	0 %
305	1,03	0,95	0,199	418	0,0 %	0,0	3 %
315	1,07	0,98	0,206	432	0,0 %	0,0	7 %
325	1,10	1,01	0,212	446	0,0 %	0,0	10 %
335	1,14	1,04	0,219	460	0,0 %	0,0	14 %
345	1,17	1,08	0,225	473	0,0 %	0,0	17 %
355	1,20	1,11	0,232	487	0,0 %	0,1	20 %
365	1,24	1,14	0,238	501	0,1 %	0,4	24 %
375	1,27	1,17	0,244	514	0,1 %	0,8	27 %
385	1,31	1,20	0,251	527	0,3 %	1,5	30 %
395	1,34	1,23	0,257	540	0,4 %	2,4	34 %
405	1,37	1,26	0,263	552	0,7 %	3,8	37 %
415	1,41	1,29	0,268	564	0,9 %	5,6	40 %
425	1,44	1,32	0,274	576	1,3 %	7,9	42 %
435	1,47	1,36	0,279	587	1,7 %	10,7	45 %
445	1,51	1,39	0,284	597	2,2 %	14,0	48 %
455	1,54	1,42	0,289	607	2,7 %	17,7	50 %
465	1,58	1,45	0,293	617	3,2 %	21,8	53 %
475	1,61	1,48	0,298	626	3,8 %	26,1	55 %
485	1,64	1,51	0,302	635	4,4 %	30,9	57 %
495	1,68	1,54	0,306	644	5,1 %	36,2	59 %
505	1,71	1,57	0,310	652	5,7 %	41,7	61 %

Tableau 14 : **IQ 7+** – Denver, modèle de rendement simple à $-0,4 \text{ }^\circ\text{C}$, L_{total} 5,6 %, azimut 180° , inclinaison 25° .

Module STC (Wdc)	Ratio DC/AC	Ratio DC/AC nominal	Taux de charge	Énergie annuelle (kWh)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (%)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (kWh)	Augmentation du rendement énergétique par rapport au
295	1,00	0,92	0,220	462	0,0 %	0,0	0 %
305	1,03	0,95	0,227	478	0,0 %	0,0	3 %
315	1,07	0,98	0,235	493	0,0 %	0,0	7 %
325	1,10	1,01	0,242	509	0,0 %	0,0	10 %
335	1,14	1,04	0,250	525	0,0 %	0,2	14 %
345	1,17	1,08	0,257	540	0,1 %	0,5	17 %
355	1,20	1,11	0,264	555	0,2 %	1,1	20 %
365	1,24	1,14	0,271	570	0,4 %	2,1	23 %
375	1,27	1,17	0,278	584	0,6 %	3,7	26 %
385	1,31	1,20	0,284	597	0,9 %	5,9	29 %
395	1,34	1,23	0,290	610	1,3 %	8,8	32 %
405	1,37	1,26	0,296	622	1,9 %	12,4	35 %
415	1,41	1,29	0,301	634	2,4 %	16,7	37 %
425	1,44	1,32	0,306	644	3,1 %	21,7	39 %
435	1,47	1,36	0,311	654	3,8 %	27,3	42 %
445	1,51	1,39	0,316	664	4,5 %	33,3	44 %
455	1,54	1,42	0,320	673	5,3 %	39,7	46 %
465	1,58	1,45	0,325	682	6,1 %	46,4	48 %
475	1,61	1,48	0,329	691	6,9 %	53,7	50 %
485	1,64	1,51	0,332	699	7,7 %	61,3	51 %
495	1,68	1,54	0,336	707	8,5 %	69,2	53 %
505	1,71	1,57	0,340	714	9,3 %	77,3	55 %

Tableau 15 : IQ 7+ – Los Angeles, modèle de rendement simple à -0,4 %/°C, L_{total} 5,6 %, azimut 180°, inclinaison 25°.

Module STC (Wdc)	Ratio DC/AC	Ratio DC/AC nominal	Taux de charge	Énergie annuelle (kWh)	Perte d'écèlement de l'onduleur la 1 ^{re} année (%)	Perte d'écèlement de l'onduleur la 1 ^{re} année (kWh)	Augmentation du rendement énergétique par rapport au
295	1,00	0,92	0,235	495	0,0 %	0,0	0 %
305	1,03	0,95	0,243	512	0,0 %	0,0	3 %
315	1,07	0,98	0,251	528	0,0 %	0,0	7 %
325	1,10	1,01	0,259	545	0,0 %	0,0	10 %
335	1,14	1,04	0,267	562	0,0 %	0,0	14 %
345	1,17	1,08	0,275	579	0,0 %	0,0	17 %
355	1,20	1,11	0,283	596	0,0 %	0,1	20 %
365	1,24	1,14	0,291	612	0,1 %	0,5	24 %
375	1,27	1,17	0,299	628	0,2 %	1,4	27 %
385	1,31	1,20	0,306	643	0,5 %	3,4	30 %
395	1,34	1,23	0,312	657	0,9 %	6,2	33 %
405	1,37	1,26	0,319	670	1,4 %	10,0	35 %
415	1,41	1,29	0,324	682	2,0 %	14,7	38 %
425	1,44	1,32	0,330	693	2,6 %	19,9	40 %
435	1,47	1,36	0,335	704	3,3 %	25,5	42 %
445	1,51	1,39	0,340	715	4,0 %	31,6	45 %
455	1,54	1,42	0,345	725	4,8 %	38,4	47 %
465	1,58	1,45	0,349	735	5,6 %	45,7	48 %
475	1,61	1,48	0,354	743	6,4 %	53,7	50 %
485	1,64	1,51	0,358	752	7,3 %	62,3	52 %
495	1,68	1,54	0,361	760	8,1 %	71,1	54 %
505	1,71	1,57	0,365	767	9,0 %	80,2	55 %

Tableau 16 : IQ 7+ – Phoenix, modèle de rendement simple à -0,4 %/°C, L_{total} 5,6 %, azimut 180°, inclinaison 25°.

Module STC (Wdc)	Ratio DC/AC	Ratio DC/AC nominal	Taux de charge	Énergie annuelle (kWh)	Perte d'écèlement de l'onduleur la 1 ^{re} année (%)	Perte d'écèlement de l'onduleur la 1 ^{re} année (kWh)	Augmentation du rendement énergétique par rapport au
295	1,00	0,92	0,257	539	0,0 %	0,0	0 %
305	1,03	0,95	0,265	558	0,0 %	0,0	3 %
315	1,07	0,98	0,274	576	0,0 %	0,0	7 %
325	1,10	1,01	0,283	594	0,0 %	0,0	10 %
335	1,14	1,04	0,291	613	0,0 %	0,0	14 %
345	1,17	1,08	0,300	631	0,0 %	0,0	17 %
355	1,20	1,11	0,309	649	0,0 %	0,1	20 %
365	1,24	1,14	0,317	667	0,0 %	0,2	24 %
375	1,27	1,17	0,326	685	0,1 %	0,7	27 %
385	1,31	1,20	0,334	702	0,2 %	1,6	30 %
395	1,34	1,23	0,342	719	0,4 %	3,3	33 %
405	1,37	1,26	0,349	734	0,8 %	6,1	36 %
415	1,41	1,29	0,356	748	1,3 %	10,2	39 %
425	1,44	1,32	0,362	761	1,9 %	15,6	41 %
435	1,47	1,36	0,368	773	2,6 %	21,9	43 %
445	1,51	1,39	0,373	784	3,4 %	29,2	45 %
455	1,54	1,42	0,378	794	4,3 %	37,2	47 %
465	1,58	1,45	0,382	804	5,1 %	45,8	49 %
475	1,61	1,48	0,387	813	6,0 %	54,9	51 %
485	1,64	1,51	0,391	822	6,9 %	64,4	52 %
495	1,68	1,54	0,395	830	7,8 %	74,3	54 %
505	1,71	1,57	0,399	838	8,7 %	84,6	55 %

Résultats des simulations faites avec l'IQ 7X

Les tableaux suivants présentent des exemples de rendement énergétique, d'écrêtement et de taux de charge simulés pour l'onduleur d'un module simple au cours de sa première année de fonctionnement pour divers ratios DC/AC. Ces simulations reposent sur le micro-onduleur IQ 7X installé dans différents sites aux États-Unis, d'après un modèle d'efficacité simple de $-0,4 \text{ \%/}^\circ\text{C}$. Le micro-onduleur IQ 7X génère une puissance maximale de 320 VA. Dans ce modèle, l'orientation du module est fixée à un azimut de 180° , avec une inclinaison de 25° et des pertes L_{total} de 5,6 %. En réalité, de nombreux systèmes PV n'ont pas une orientation idéale plein sud à un azimut de 180° ni un angle d'inclinaison idéal. Par conséquent, l'impact de l'écrêtement sera inférieur à celui présenté dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 17 : **IQ 7X** – Denver, modèle de rendement simple à $-0,4 \text{ \%/}^\circ\text{C}$, L_{total} 5,6 %, azimut 180° , inclinaison 25° .

Module STC (Wdc)	Ratio DC/AC	Ratio DC/AC nominal	Taux de charge	Énergie annuelle (kWh)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (%)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (kWh)	Augmentation du rendement énergétique par rapport au
320	1,00	0,92	0,240	505	0,0 %	0,0	0 %
330	1,03	0,95	0,248	521	0,0 %	0,0	3 %
340	1,06	0,98	0,255	537	0,0 %	0,0	6 %
350	1,09	1,01	0,263	553	0,0 %	0,1	9 %
360	1,12	1,03	0,270	568	0,0 %	0,2	13 %
370	1,16	1,06	0,278	584	0,1 %	0,6	16 %
380	1,19	1,09	0,285	599	0,2 %	1,2	19 %
390	1,22	1,12	0,292	614	0,4 %	2,3	22 %
400	1,25	1,15	0,299	629	0,6 %	3,8	24 %
410	1,28	1,18	0,305	642	0,9 %	6,0	27 %
420	1,31	1,21	0,312	655	1,3 %	8,8	30 %
430	1,34	1,24	0,318	668	1,7 %	12,2	32 %
440	1,38	1,26	0,323	680	2,3 %	16,4	35 %
450	1,41	1,29	0,329	691	2,9 %	21,3	37 %
460	1,44	1,32	0,334	701	3,5 %	26,8	39 %
470	1,47	1,35	0,338	711	4,2 %	32,7	41 %
480	1,50	1,38	0,343	721	4,9 %	39,0	43 %
490	1,53	1,41	0,347	730	5,7 %	45,7	45 %
500	1,56	1,44	0,352	739	6,4 %	52,7	46 %

Tableau 18 : **IQ 7X** – Los Angeles, modèle de rendement simple à $-0,4 \text{ \%/}^\circ\text{C}$, L_{total} 5,6 %, azimut 180° , inclinaison 25° .

Module STC (Wdc)	Ratio DC/AC	Ratio DC/AC nominal	Taux de charge	Énergie annuelle (kWh)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (%)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (kWh)	Augmentation du rendement énergétique par rapport au
320	1,00	0,92	0,257	541	0,0 %	0,0	0 %
330	1,03	0,95	0,265	558	0,0 %	0,0	3 %
340	1,06	0,98	0,274	575	0,0 %	0,0	6 %
350	1,09	1,01	0,282	592	0,0 %	0,0	9 %
360	1,12	1,03	0,290	609	0,0 %	0,0	13 %
370	1,16	1,06	0,298	626	0,0 %	0,0	16 %
380	1,19	1,09	0,306	643	0,0 %	0,1	19 %
390	1,22	1,12	0,314	660	0,1 %	0,5	22 %
400	1,25	1,15	0,322	676	0,2 %	1,4	25 %
410	1,28	1,18	0,329	691	0,5 %	3,3	28 %
420	1,31	1,21	0,336	706	0,8 %	5,9	30 %
430	1,34	1,24	0,342	719	1,2 %	9,5	33 %
440	1,38	1,26	0,348	732	1,8 %	14,0	35 %
450	1,41	1,29	0,354	744	2,4 %	19,2	37 %
460	1,44	1,32	0,359	755	3,0 %	24,7	40 %
470	1,47	1,35	0,364	766	3,7 %	30,7	42 %
480	1,50	1,38	0,369	777	4,4 %	37,3	44 %
490	1,53	1,41	0,374	787	5,1 %	44,4	45 %
500	1,56	1,44	0,379	796	5,9 %	52,1	47 %

Tableau 19 : **IQ 7X-** – Newark, modèle de rendement simple à -0,4 %/°C, L_{total} 5,6 %, azimut 180°, inclinaison 25°.

Module STC (Wdc)	Ratio DC/AC	Ratio DC/AC nominal	Taux de charge	Énergie annuelle (kWh)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (%)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (kWh)	Augmentation du rendement énergétique par rapport au
320	1,00	0,92	0,210	442	0,0 %	0,0	0 %
330	1,03	0,95	0,217	456	0,0 %	0,0	3 %
340	1,06	0,98	0,224	470	0,0 %	0,0	6 %
350	1,09	1,01	0,230	484	0,0 %	0,0	9 %
360	1,12	1,03	0,237	498	0,0 %	0,0	13 %
370	1,16	1,06	0,243	512	0,0 %	0,0	16 %
380	1,19	1,09	0,250	526	0,0 %	0,1	19 %
390	1,22	1,12	0,257	540	0,1 %	0,4	22 %
400	1,25	1,15	0,263	553	0,1 %	0,8	25 %
410	1,28	1,18	0,269	566	0,2 %	1,4	28 %
420	1,31	1,21	0,276	579	0,4 %	2,4	31 %
430	1,34	1,24	0,282	592	0,6 %	3,7	34 %
440	1,38	1,26	0,287	604	0,8 %	5,3	37 %
450	1,41	1,29	0,293	616	1,1 %	7,5	39 %
460	1,44	1,32	0,299	628	1,5 %	10,1	42 %
470	1,47	1,35	0,304	638	2,0 %	13,2	44 %
480	1,50	1,38	0,309	649	2,4 %	16,8	47 %
490	1,53	1,41	0,313	659	2,9 %	20,7	49 %
500	1,56	1,44	0,318	669	3,4 %	24,9	51 %

Tableau 20 : **IQ 7X-** – Phoenix, modèle de rendement simple à -0,4 %/°C, L_{total} 5,6 %, azimut 180°, inclinaison 25°.

Module STC (Wdc)	Ratio DC/AC	Ratio DC/AC nominal	Taux de charge	Énergie annuelle (kWh)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (%)	Perte d'écrêtement de l'onduleur la 1 ^{re} année (kWh)	Augmentation du rendement énergétique par rapport au
320	1,00	0,92	0,281	590	0,0 %	0,0	0 %
330	1,03	0,95	0,289	608	0,0 %	0,0	3 %
340	1,06	0,98	0,298	627	0,0 %	0,0	6 %
350	1,09	1,01	0,307	645	0,0 %	0,0	9 %
360	1,12	1,03	0,316	664	0,0 %	0,0	13 %
370	1,16	1,06	0,325	683	0,0 %	0,0	16 %
380	1,19	1,09	0,333	701	0,0 %	0,1	19 %
390	1,22	1,12	0,342	719	0,0 %	0,2	22 %
400	1,25	1,15	0,351	738	0,1 %	0,7	25 %
410	1,28	1,18	0,359	755	0,2 %	1,5	28 %
420	1,31	1,21	0,367	772	0,4 %	3,1	31 %
430	1,34	1,24	0,375	788	0,7 %	5,5	34 %
440	1,38	1,26	0,382	803	1,1 %	9,3	36 %
450	1,41	1,29	0,388	817	1,7 %	14,3	38 %
460	1,44	1,32	0,394	829	2,3 %	20,4	41 %
470	1,47	1,35	0,400	841	3,0 %	27,3	43 %
480	1,50	1,38	0,405	852	3,8 %	35,1	44 %
490	1,53	1,41	0,410	862	4,6 %	43,5	46 %
500	1,56	1,44	0,415	872	5,5 %	52,5	48 %

Conclusion

L'objectif principal de ce document est de fournir un cadre technique au débat. Certaines configurations ordinaires des onduleurs d'Enphase ont fait l'objet d'une simulation dans le logiciel NREL SAM pour illustrer la manière dont divers indicateurs de rendement changent lorsque l'on modifie les ratios DC/AC.

Les modules PV produisent rarement une puissance équivalente à la puissance nominale obtenue dans des conditions d'essai. Cela pousse les installateurs à associer des modules PV dont la puissance nominale est supérieure à celle de l'onduleur. Sur de nombreux sites, des ratios DC/AC élevés n'entraînent pas systématiquement des pertes significatives dues à l'écrêtement. Cependant, augmenter davantage le ratio DC/AC revient à augmenter le taux de charge de l'onduleur, ce qui risque d'augmenter le coût du système.