



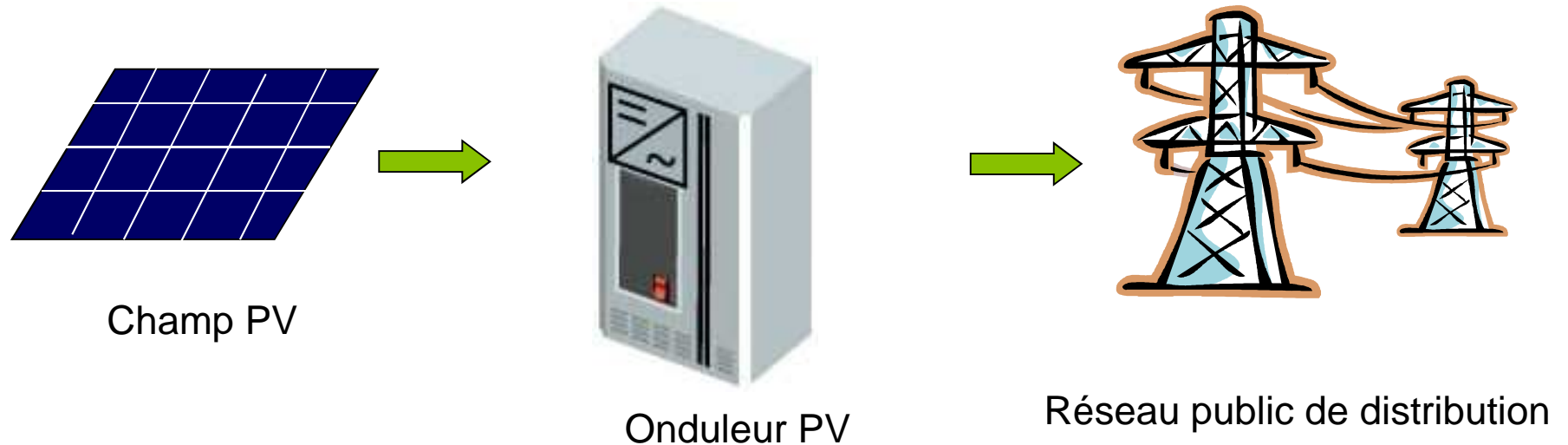
Onduleurs photovoltaïques raccordés au réseau

Sommaire

1. Principe de fonctionnement
2. Types d'onduleurs
3. Caractéristiques
4. Dimensionnement
5. Choix d'onduleurs centralisés ou modulaires
6. Choix d'onduleurs en fonction de la technologie des cellules PV
7. Aspects normatifs
8. Offre mondiale des onduleurs

Principe de fonctionnement des onduleurs

Onduleur photovoltaïque pour injection de courant sur le réseau :

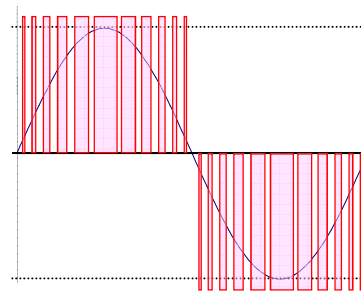
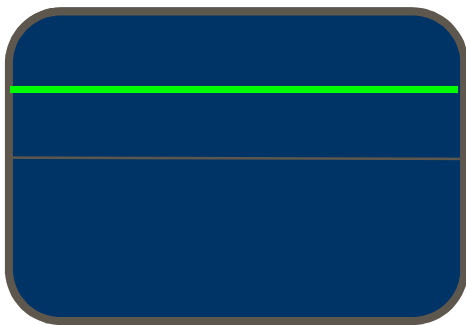
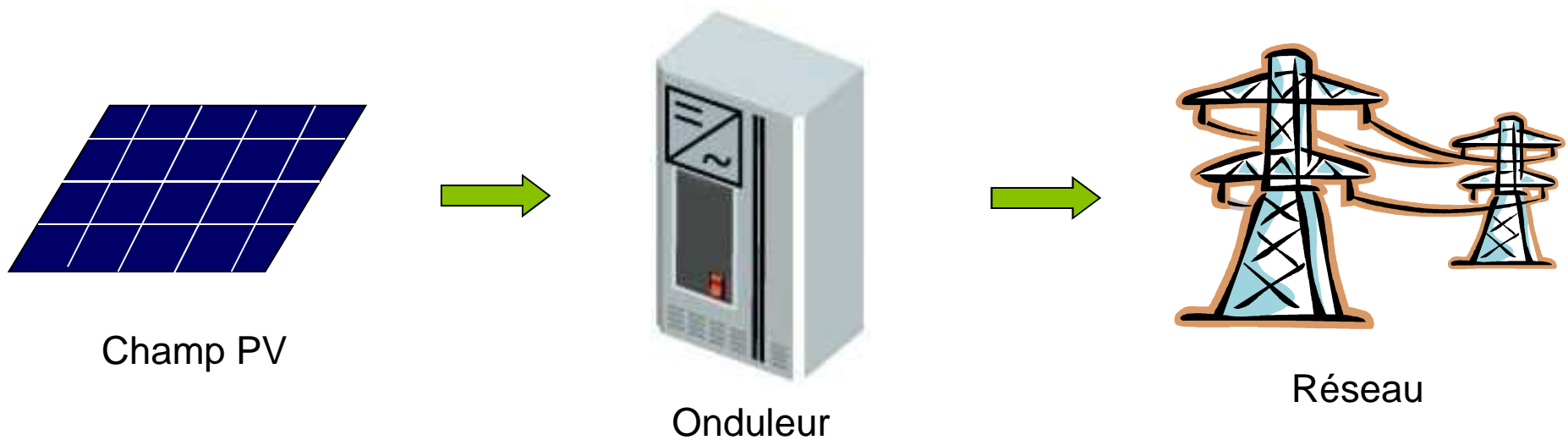


L'onduleur PV est l'interface entre le champ PV et le réseau électrique
Il fonctionne uniquement en journée et seulement si la tension réseau est présente

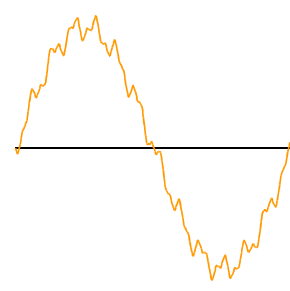
Il a des caractéristiques différentes d'un onduleur PV autonome

Principe de fonctionnement des onduleurs

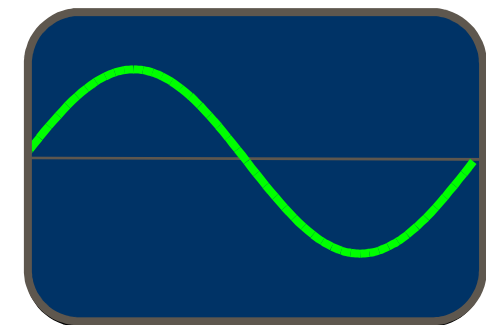
- L'onduleur convertit le courant continu du champ PV en courant alternatif compatible avec le réseau électrique
- Le courant produit est injecté sur le réseau au fil du soleil



Tension



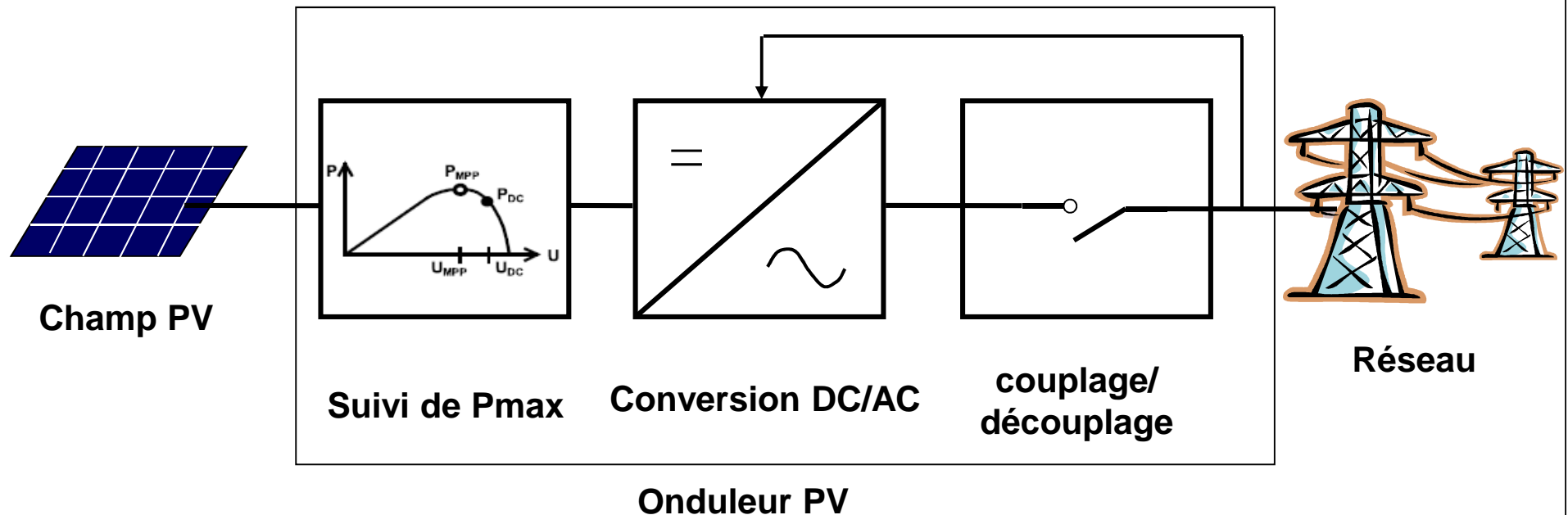
Courant



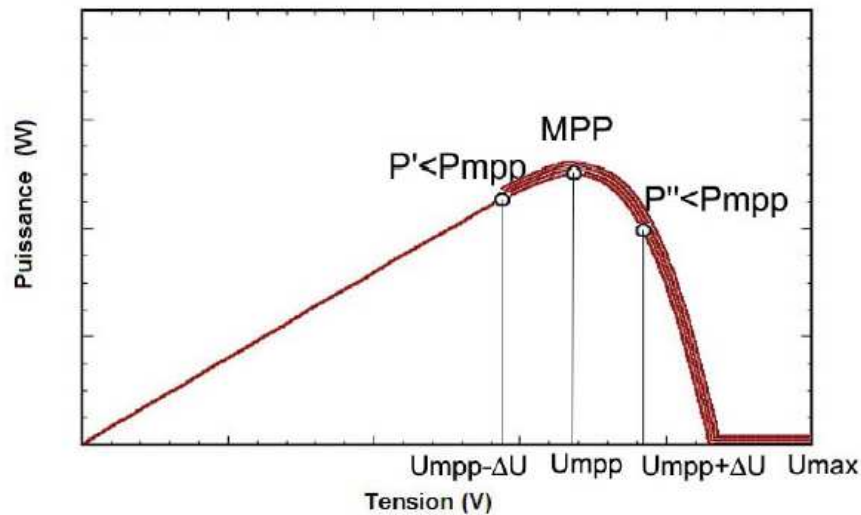
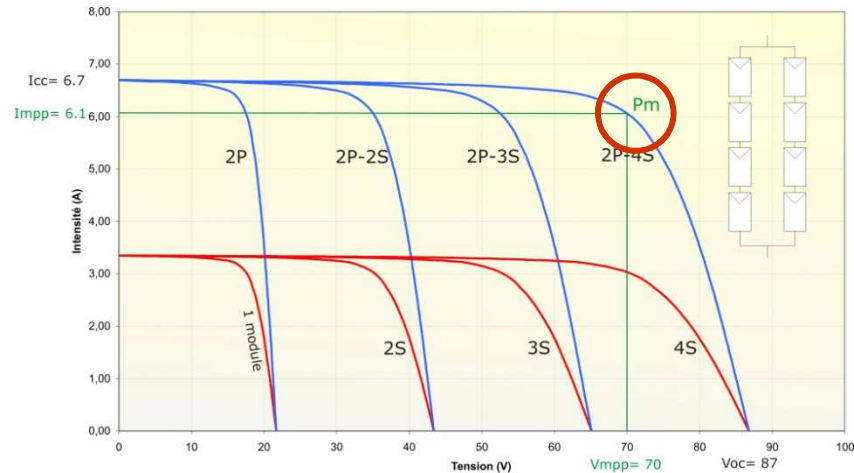
Principe de fonctionnement des onduleurs

L'onduleur intègre 3 fonctions principales :

- Suivi de P max du champ PV en fonction de l'irradiation et de la température
- Conversion du courant continu en courant alternatif
- Couplage/découplage du réseau électrique



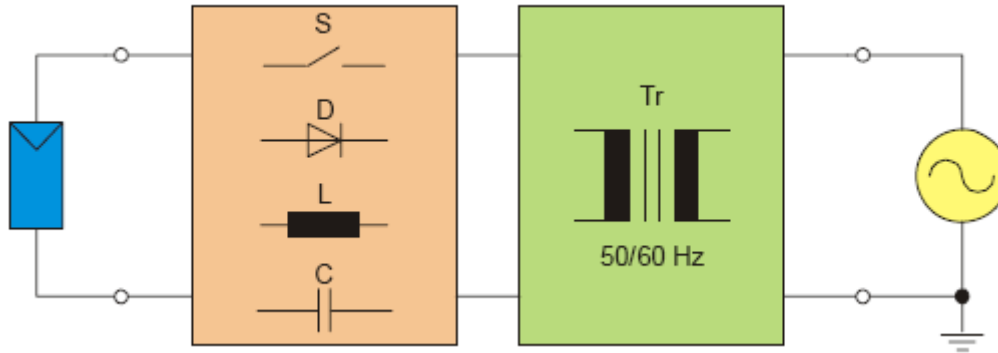
La fonction MPPT ou recherche de Pmax



- L'onduleur a pour fonction de faire travailler de manière optimale le champ PV auquel il est raccordé

- Il adapte en permanence son impédance d'entrée côté DC pour se placer au MPP (P_{max}) du champ PV

Typologie des onduleurs : Onduleurs avec transformateur BF



Technologie

- MOS FET ou IGBT (commutation HF)
- Transfo BF (50 ou 60 Hz)
- Filtres

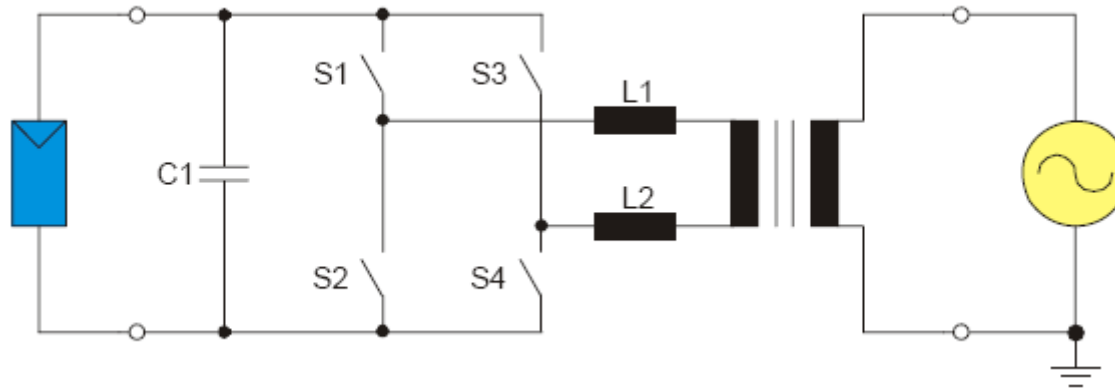
Caractéristiques

- Robustesse
- Bon facteur de puissance (0,95 à 1)
- Rendement : 94% à 96 % max
- Isolation galvanique par rapport au réseau
- Possibilité de relier une polarité DC à la terre

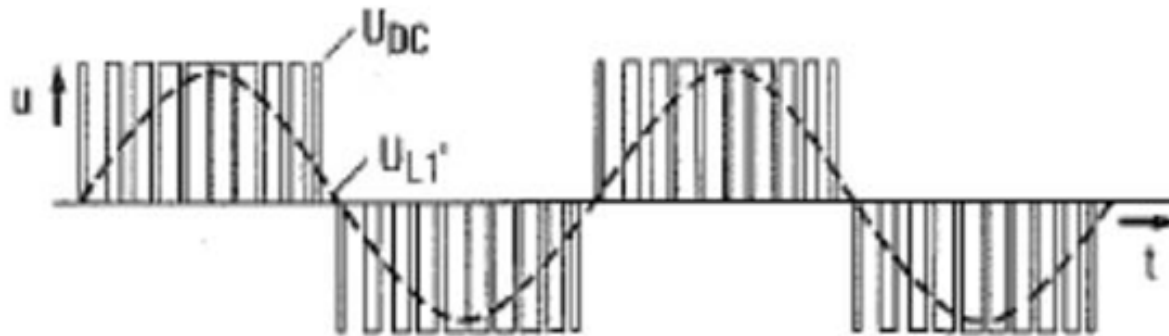
Inconvénients

- encombrement et poids importants (10 kg/kW)
- Perte rendement transfo (2%)

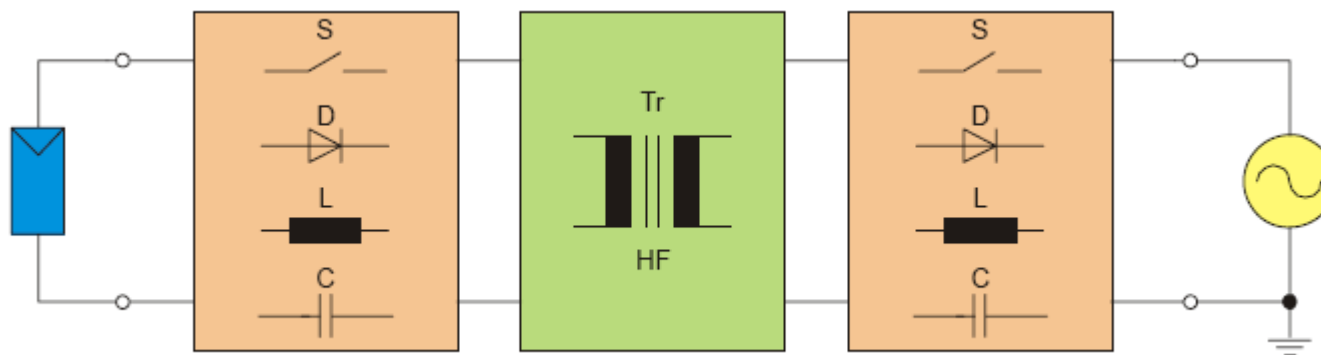
Typologie des onduleurs : Onduleurs avec transformateur BF



Onduleur monophasé



Typologie des onduleurs : Onduleurs avec transformateur HF



Technologie

- MOS FET ou IGBT (commutation HF 10 à 100kHz)
- Transfo HF
- Diodes (redressement)
- Thyristors
- Filtres

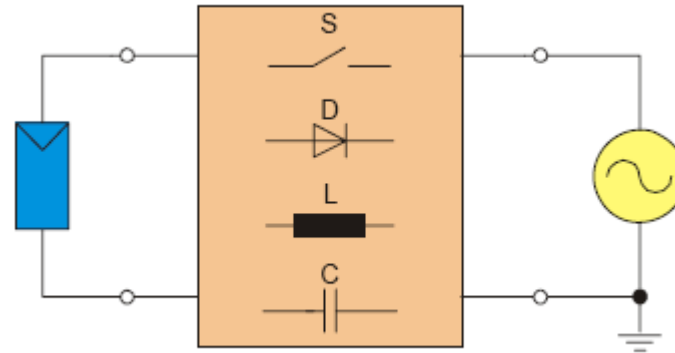
Caractéristiques

- Poids et encombrement faibles
- Rendement : 94% à 96 % max
- Isolation galvanique par rapport au réseau
- Possibilité de relier une polarité DC à la terre

Inconvénients

- Davantage de composants
- Dispositif de contrôle de non injection DC dans le réseau

Typologie des onduleurs : Onduleurs sans transformateur



Technologie

- MOS FET ou IGBT
- Filtre DC

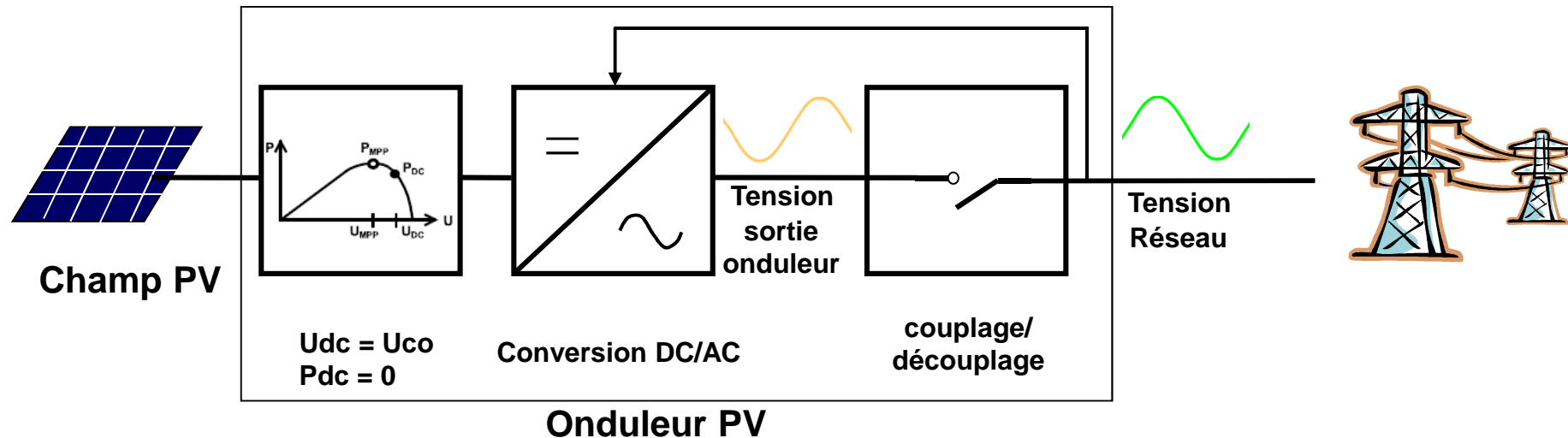
Caractéristiques

- Encombrement et poids plus faible (5kg/kW)
- Moins coûteux que les autres technologies
- Rendement plus élevé (+ 2): 95% à 98%

Inconvénients

- Absence d'isolation galvanique
- Entrée DC ne peut être reliée à la terre
- Courants de fuite capacitifs éventuels

Couplage des onduleurs PV au réseau électrique



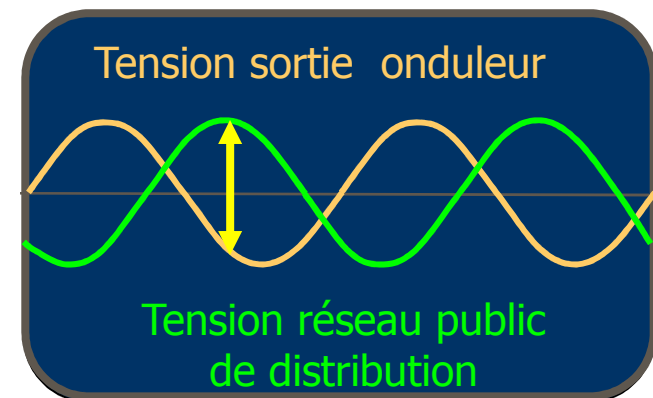
Conditions de couplage au réseau électrique

- Puissance et tension suffisantes en entrée d'onduleur (début de journée)
- Présence de tension du réseau électrique
- Absence de défaut d'isolement au niveau du champ PV

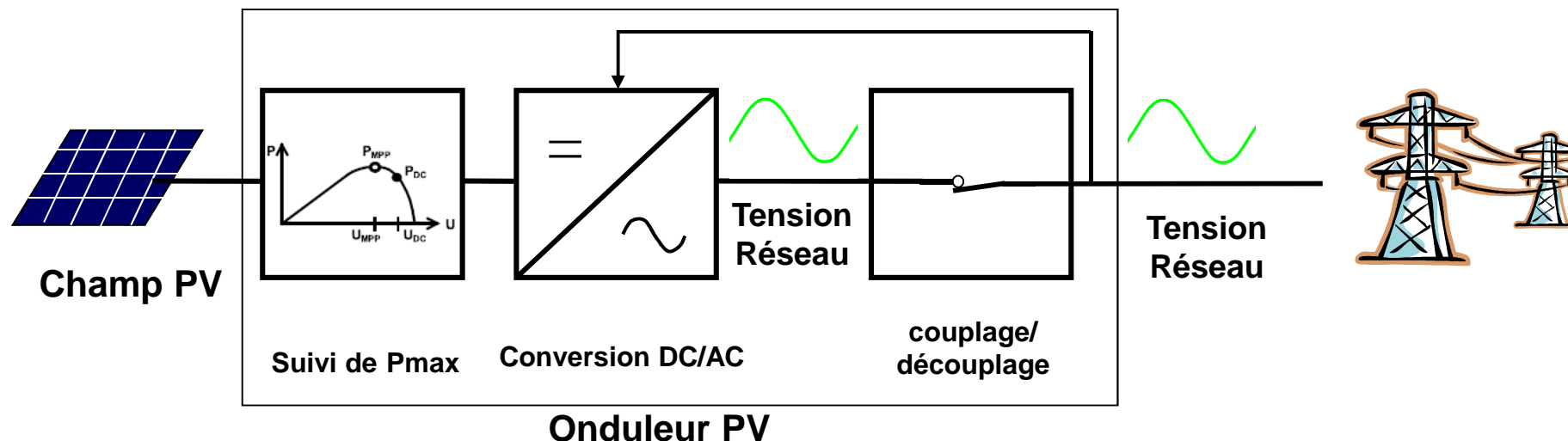
L'onduleur se synchronise sur le réseau électrique:

- en tension
- en fréquence
- en phase

Le couplage s'effectue lorsque la synchronisation est effective (quelques dizaines de secondes)



Découplage des onduleurs PV du réseau électrique



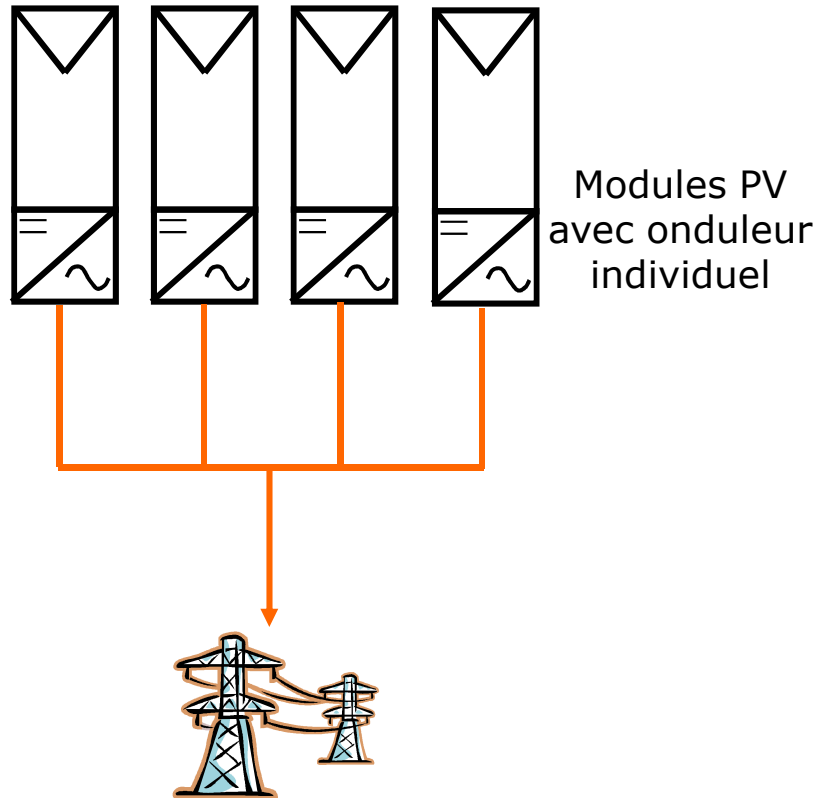
Conditions de découplage du réseau électrique

- Puissance et tension insuffisantes en entrée d'onduleur (fin de journée)
- Absence de tension du réseau électrique (ou hors tolérance en tension et fréquence)
- Défaut d'isolement au niveau du champ PV (pour onduleur avec transfo)

Les différents types d'onduleurs

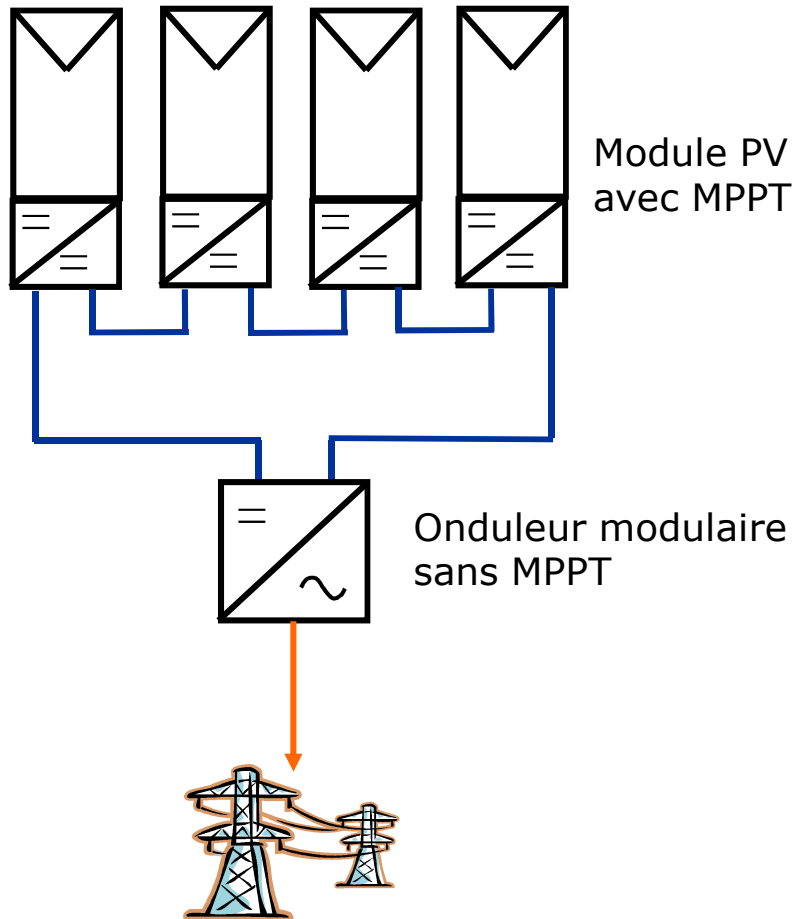
1. Onduleur distribué
2. Onduleur modulaire sans MPPT
3. Onduleur modulaire avec 1 MPPT
4. Onduleur avec plusieurs MPPT
5. Onduleur centralisé

Micro-Onduleurs



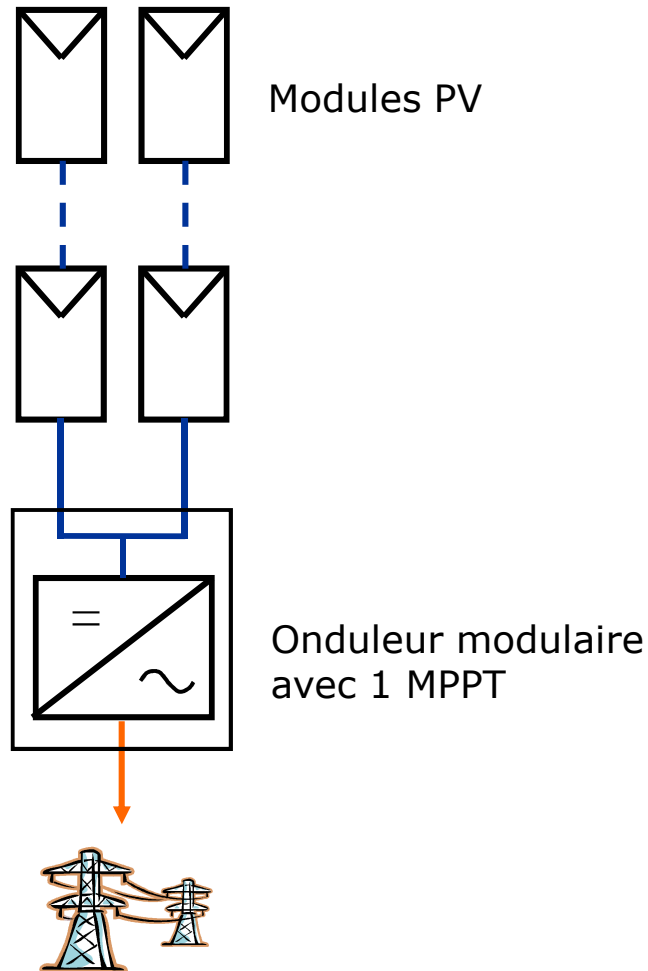
- Petit onduleur implanté à l'arrière de chaque module PV
- Puissance unitaire d'une centaine de watts
- Connexion directe sur réseau monophasé AC
- Facilité d'installation
- Modules peuvent être orientés différemment
- Absence de connexion DC
- Attention à la maintenance,...

Onduleurs modulaires (sans MPPT)



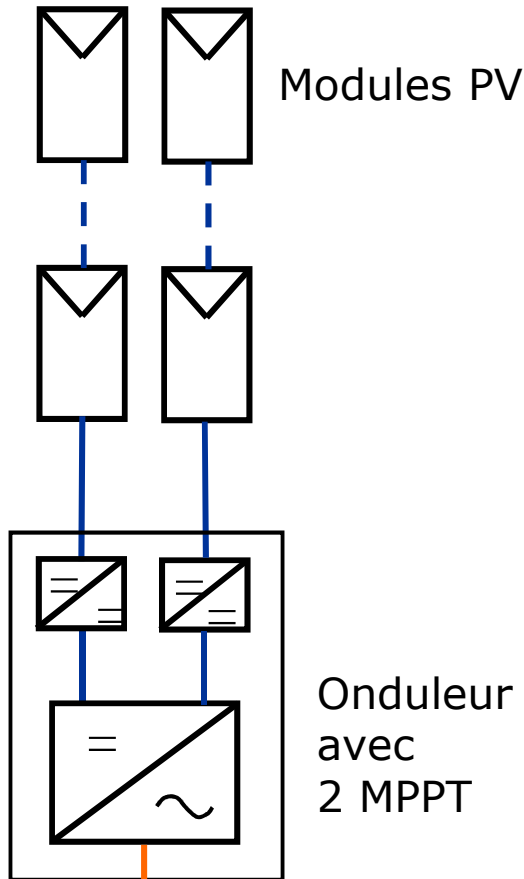
- Convertisseur DC/DC pour chaque module PV
- Chaque chaîne de modules PV avec MPPT est raccordée directement à l'onduleur
- Tension d'entrée de quelques centaines de volts
- Tension AC monophasée
- Mise en parallèle côté AC, en sortie des onduleurs
- Faible impact en cas d'ombrage sur modules
- Absence de tension DC si coupure AC
- Concept innovant mais manque retour expérience sur fiabilité

Onduleurs modulaires (avec 1 MPPT)



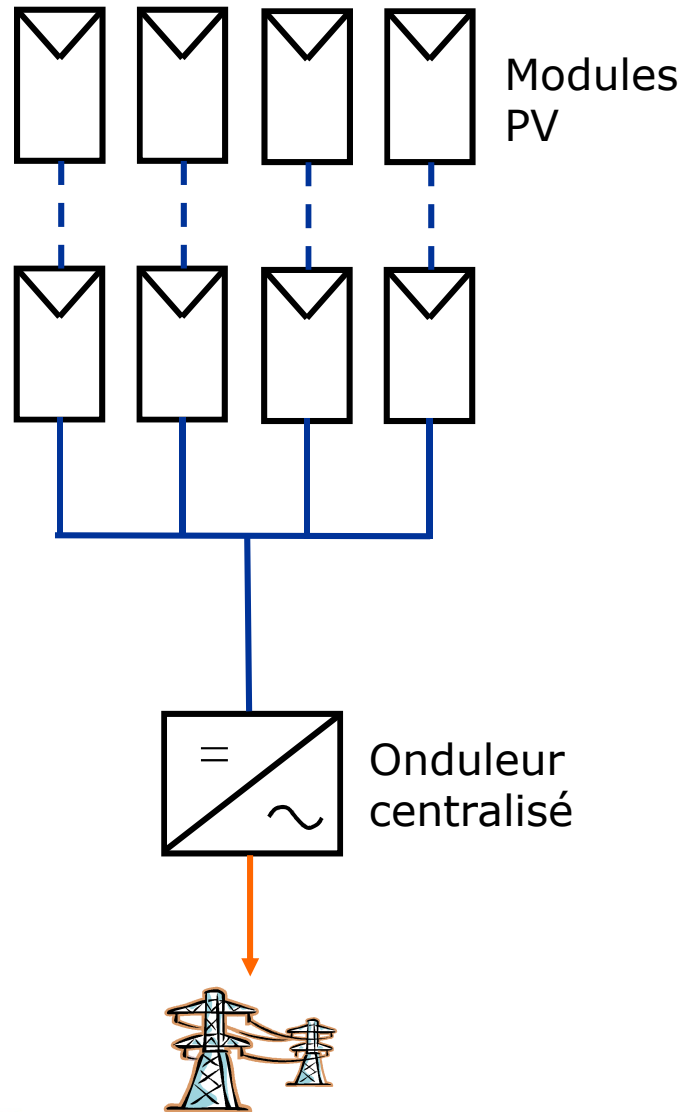
- Puissance unitaire des onduleurs de quelques kW
- Chaque chaîne est raccordée directement à un onduleur (peu d'appareillage DC)
- Tension d'entrée de 150 à 1500 V
- Tension AC monophasée ou tri
- Mise en parallèle côté AC, en sortie des onduleurs
- Grande flexibilité dans la conception des installations PV
- Facilité d'installation et de maintenance
- Nombreux produits disponibles

Onduleurs modulaires (avec plusieurs MPPT)



- Puissance de quelques kW (idem modulaire)
 - Un convertisseur DC/DC par sous-champ avec suivi de Pmax
 - Un convertisseur DC/AC unique
- Possibilité de sous-champs PV différents (technologie, taille, orientation, inclinaison, ombrage), avec MPPT pour chacun
- Adapté pour des bâtiments avec pans de toiture d'orientation et/ou d'inclinaison différentes

Onduleurs centralisés



- Un seul onduleur pour le champ PV
- Puissance unitaire de quelques dizaines de kW à quelques MW
- Chaînes PV mises en parallèle dans des boîtes de jonction
- Câblage et appareillage DC spécifique
- Tension d'entrée de 300 à 900 V
- Tension AC triphasée
- Transformateur basse fréquence
- Plutôt utilisés dans les centrales PV (> 100kWc)

Caractéristiques en entrée DC d'onduleur

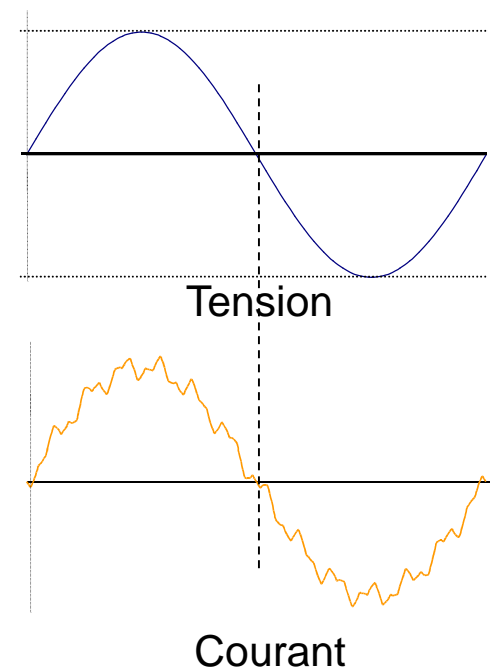
Caractéristiques en entrée (DC):

- Puissance nominale d'entrée ($P_{nom\ DC}$) : kW ou MW
- Tension d'entrée optimale de fonctionnement ($U_{opt\ DC}$)
- Plage de tension de fonctionnement MPP
- Tension maximale d'entrée ($U_{max\ DC}$)
- Courant maximal d'entrée ($I_{nom\ DC}$)

Caractéristiques de sortie AC d'onduleur

Caractéristiques électriques de sortie (AC)

- Puissance nominale de sortie : P_{ac} (kVA ou kW)
- Tension nominale de sortie : 230V (monophasé) ou 400 V (triphase)
- Fréquence nominale de sortie : 50 ou 60 Hz
- Courant de sortie I_{ac} (A)
- Taux de distorsion d'harmoniques en courant : THD (de l'ordre de 3%)
- Facteur de puissance : de l'ordre de 1 (courant injecté en phase avec la tension du réseau)

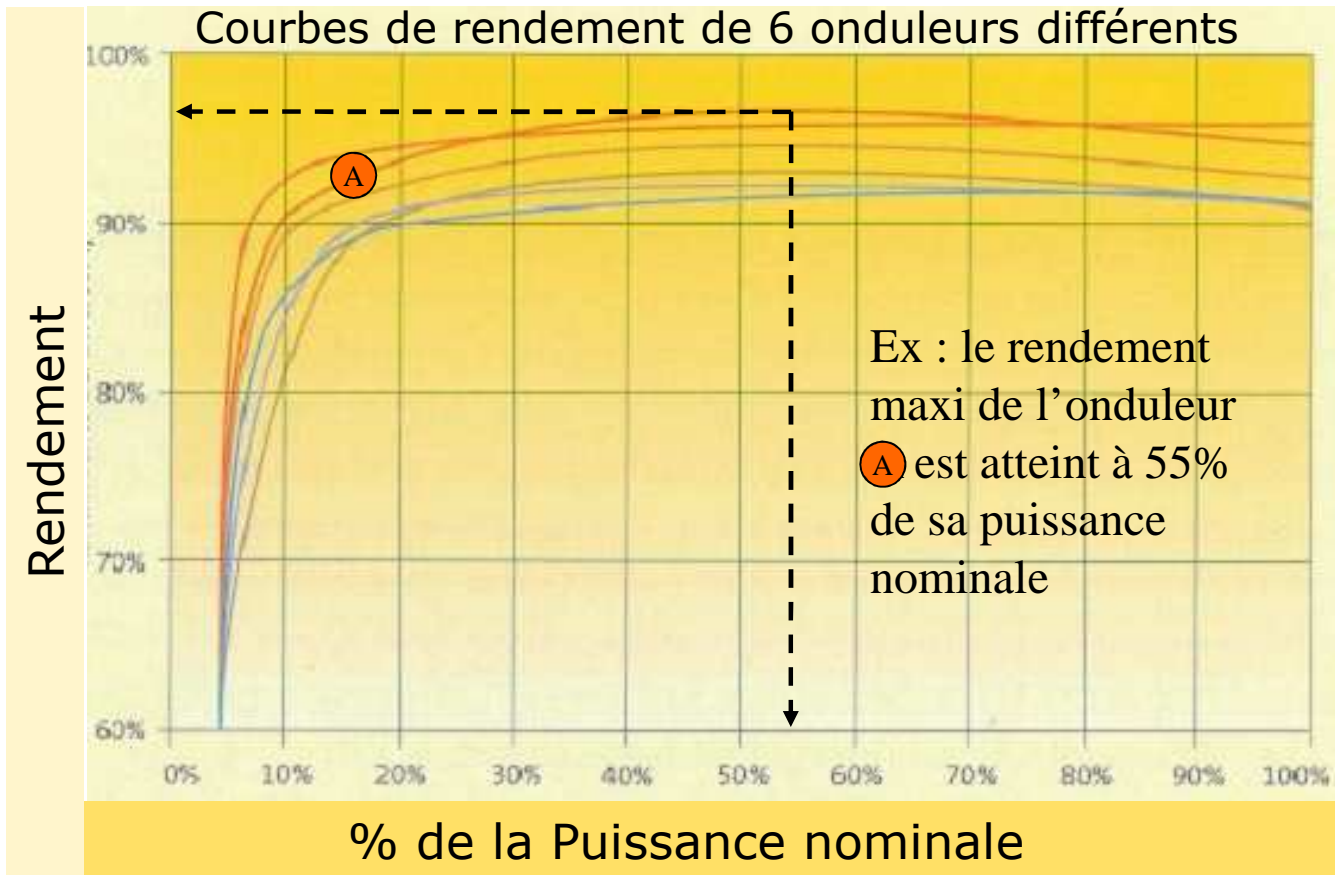


Caractéristiques générales

Autres caractéristiques électriques:

- Protection en température (déconnexion en cas de surchauffe)
- Contrôle de défaut d'isolement sur le circuit DC (champ PV)
- Faible consommation propre
- Affichage des paramètres de fonctionnement (voyants, mesures DC et AC, etc...)
- Monitoring

Rendement des onduleurs



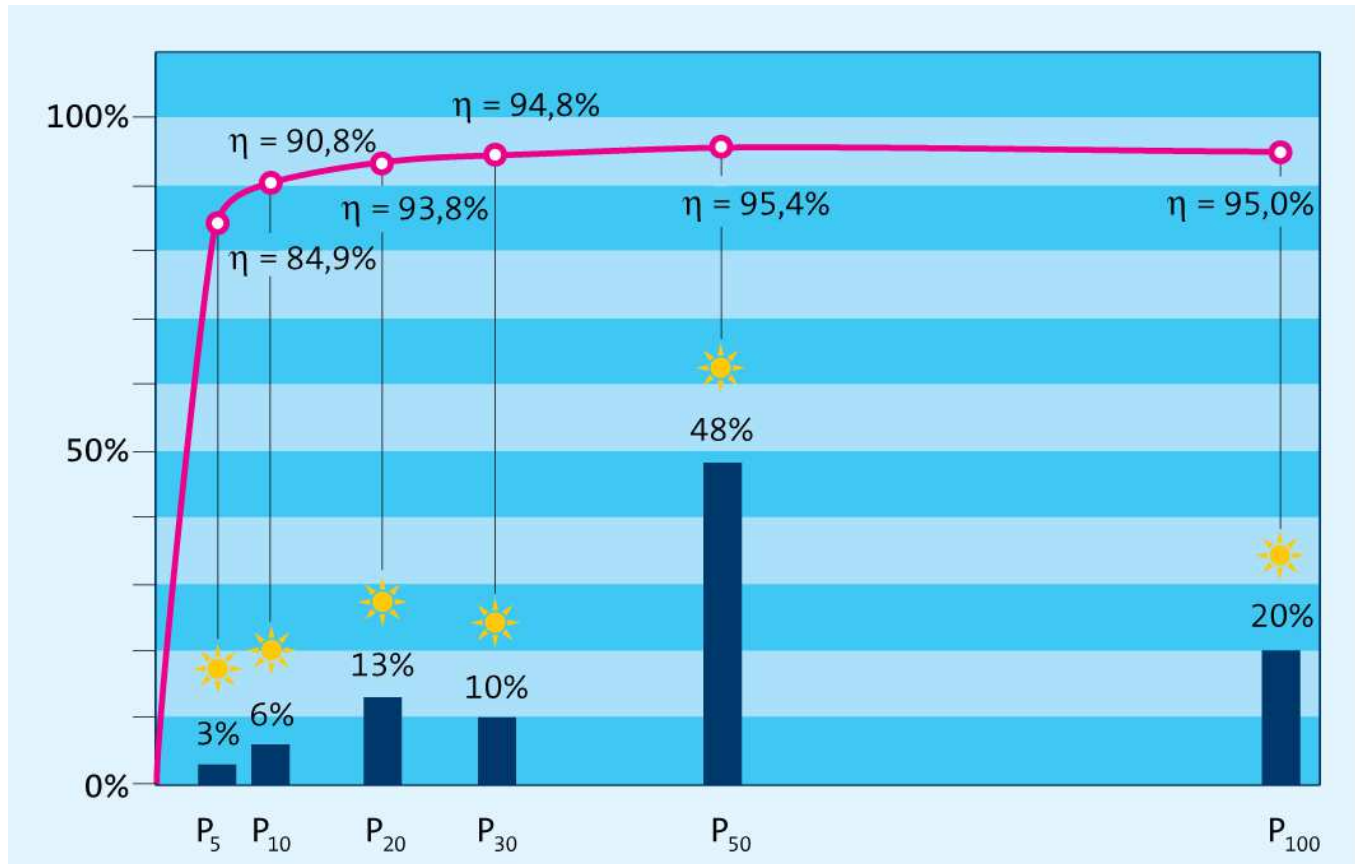
Le rendement de l'onduleur dépend :

- de la puissance de l'onduleur
- du niveau de la tension d'entrée DC
- des performances de recherche de P_{\max} (MPPT)
- de la technologie utilisée DC/AC (BF, HF, composants, ..)
- du transformateur (si existant)

Rendement max

- Le rendement maximum est atteint lors du fonctionnement à environ 30 à 60% de la puissance maximale de l'onduleur
- Certains onduleurs ont un rendement maximal supérieur à 98%

Définition du rendement européen des onduleurs

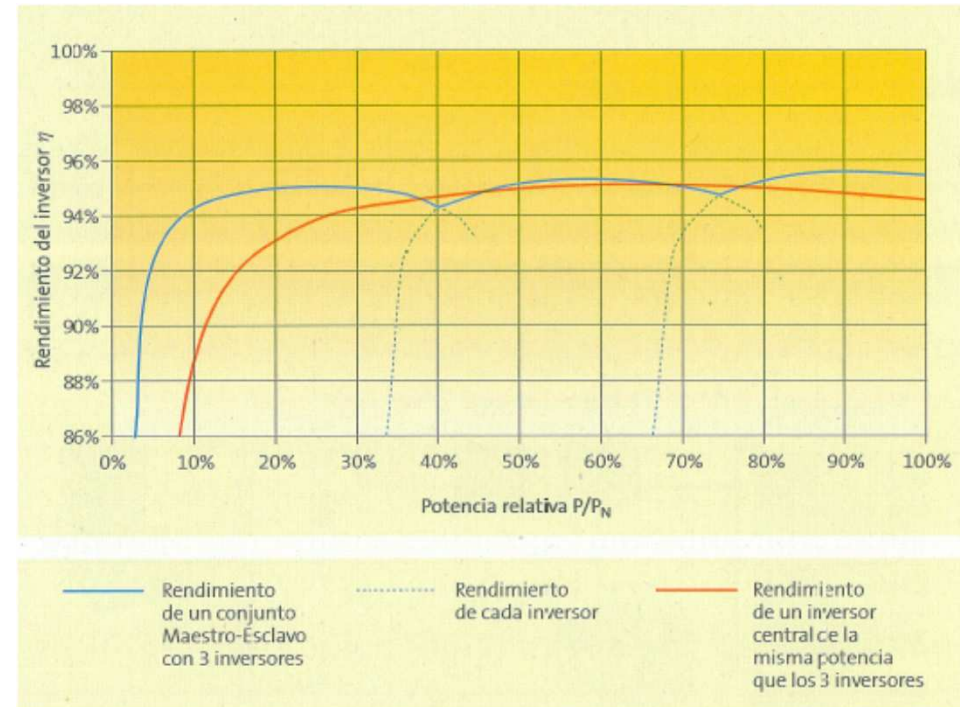
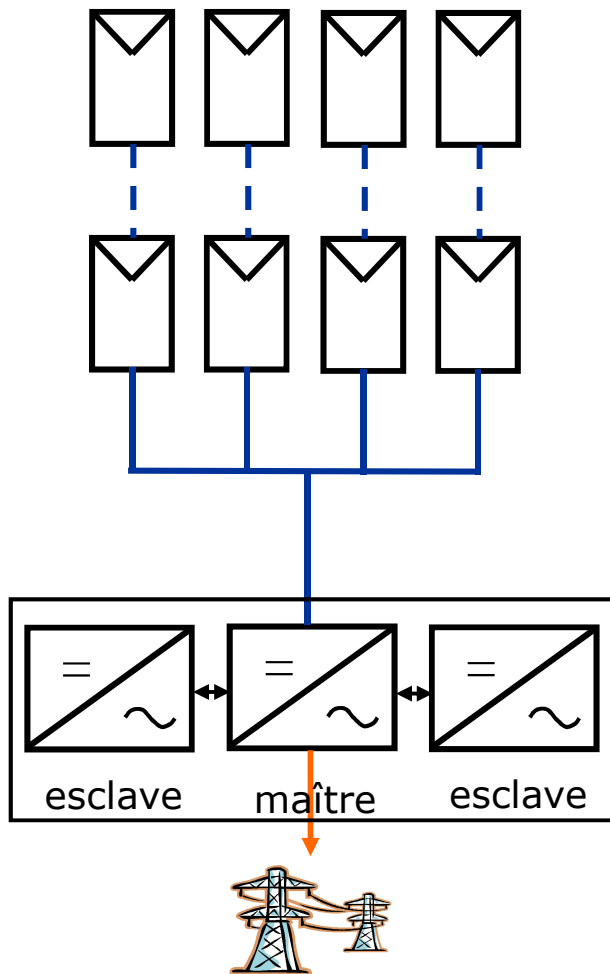


Rendement européen normalisé :

$$\eta_{\text{euro}} = 0,03 \times \eta_{5\%P_n} + 0,06 \times \eta_{10\%P_n} + 0,13 \times \eta_{20\%P_n} + 0,10 \times \eta_{30\%P_n} + 0,48 \times \eta_{50\%P_n} + 0,20 \times \eta_{P_n}$$

Comment augmenter le rendement onduleur à faible charge?

Concept « maître-esclave »



Principe :

Onduleur centralisé constitué de plusieurs étages de puissance.

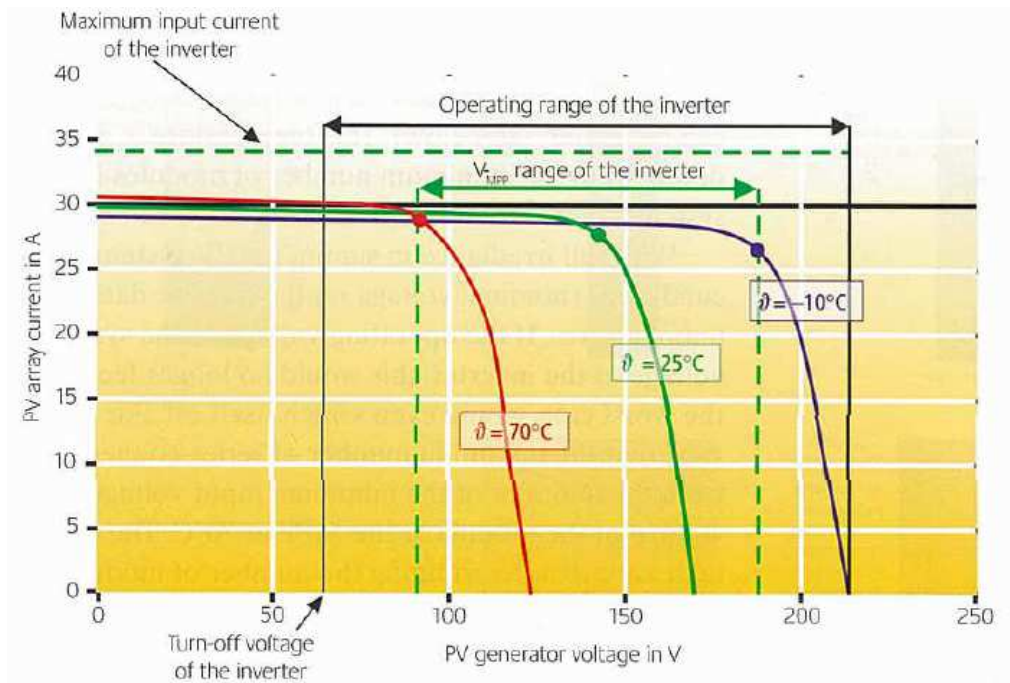
Sous faible ensoleillement, seul le maître est en fonctionnement

Quand le premier onduleur atteint sa puissance max, il enclenche la mise en parallèle du suivant.

Dimensionnement de l'onduleur

3 paramètres à prendre en compte pour le dimensionnement d'onduleur :

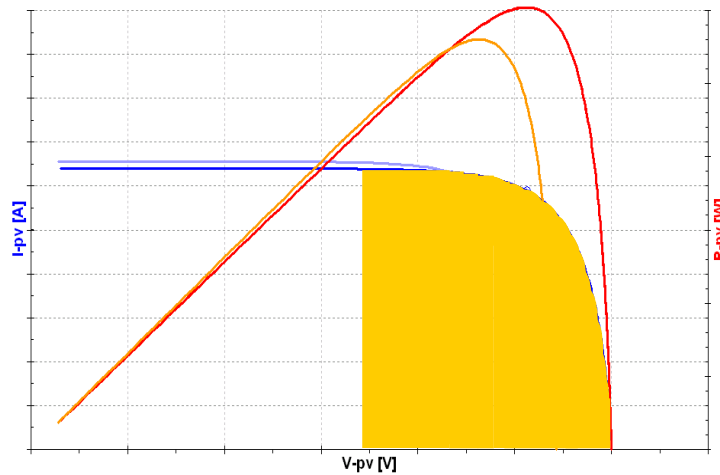
- Le courant maximum fourni par le champ PV selon son orientation
- La puissance maximum fournie par le champ PV selon son orientation
- La plage de variation de tension du champ PV en fonction de la température des cellules PV



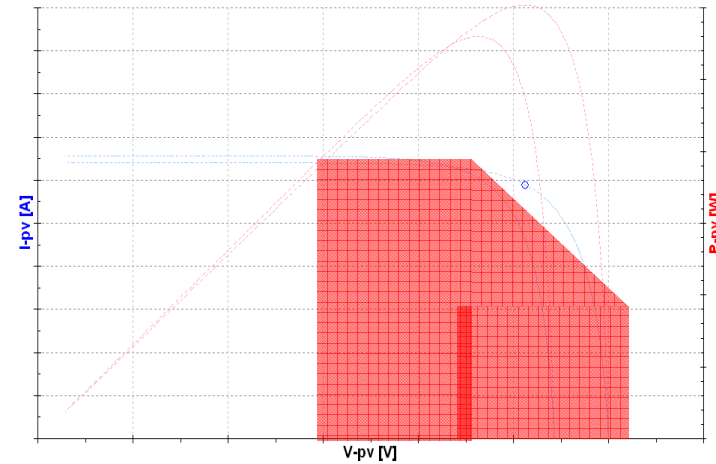
Le point de fonctionnement optimal (MMP) peut varier dans une plage de tension de l'ordre de -20% à +15% en fonction de la température des modules PV (par exemple de -10°C à $+70^\circ$)

Dimensionnement d'un onduleur

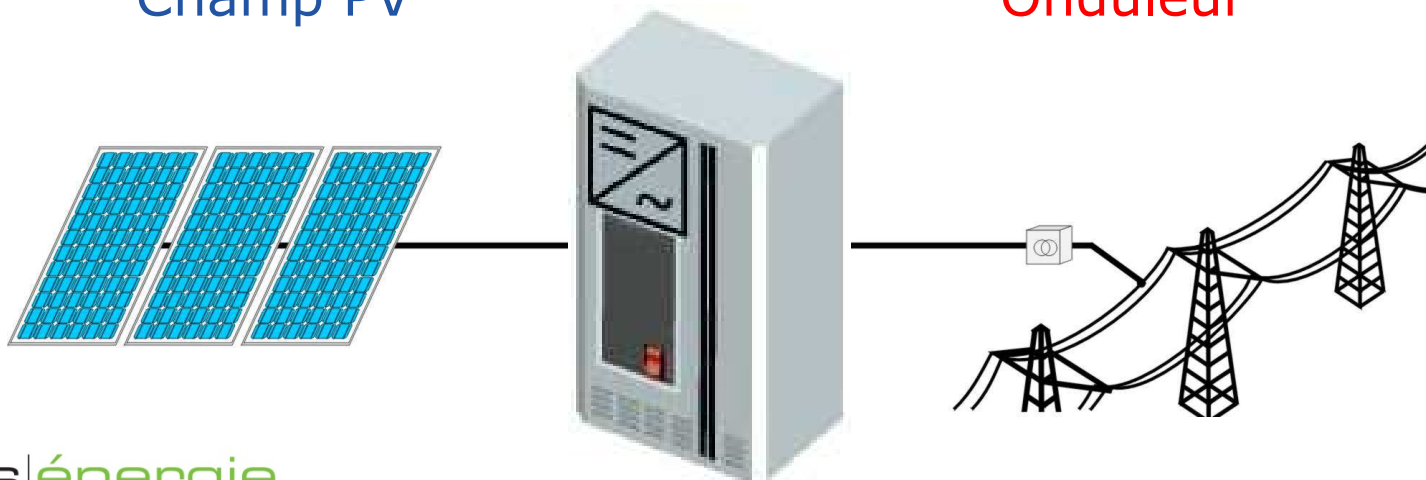
Vérification de la bonne adaptation entre les caractéristiques électriques du champ PV et celles de l'onduleur



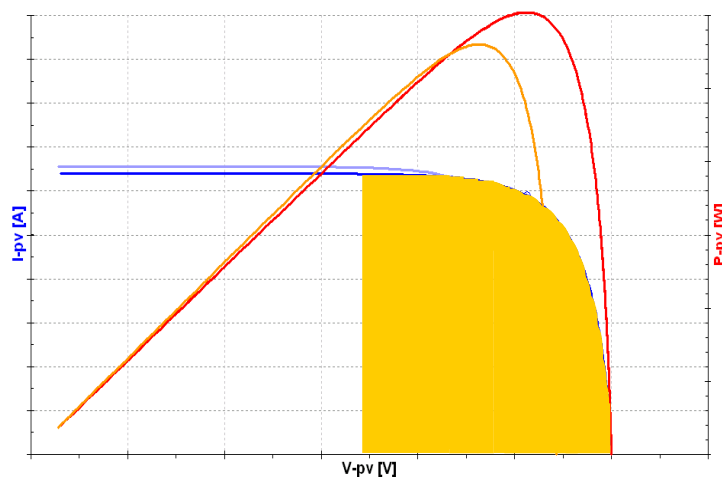
Champ PV



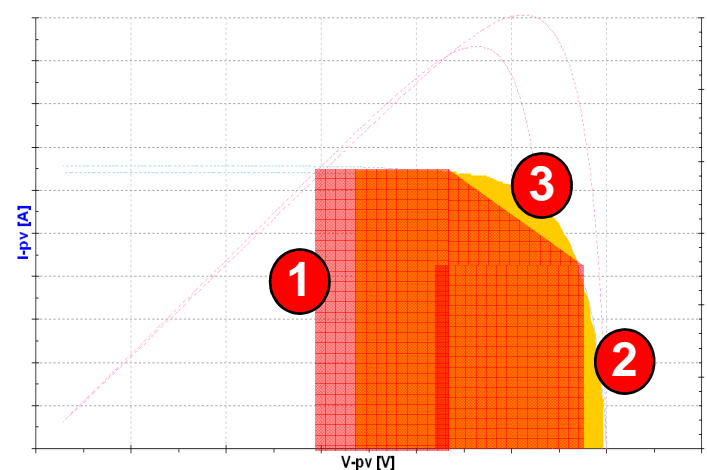
Onduleur



Plages de fonctionnement Champ PV / Onduleur



Champ PV



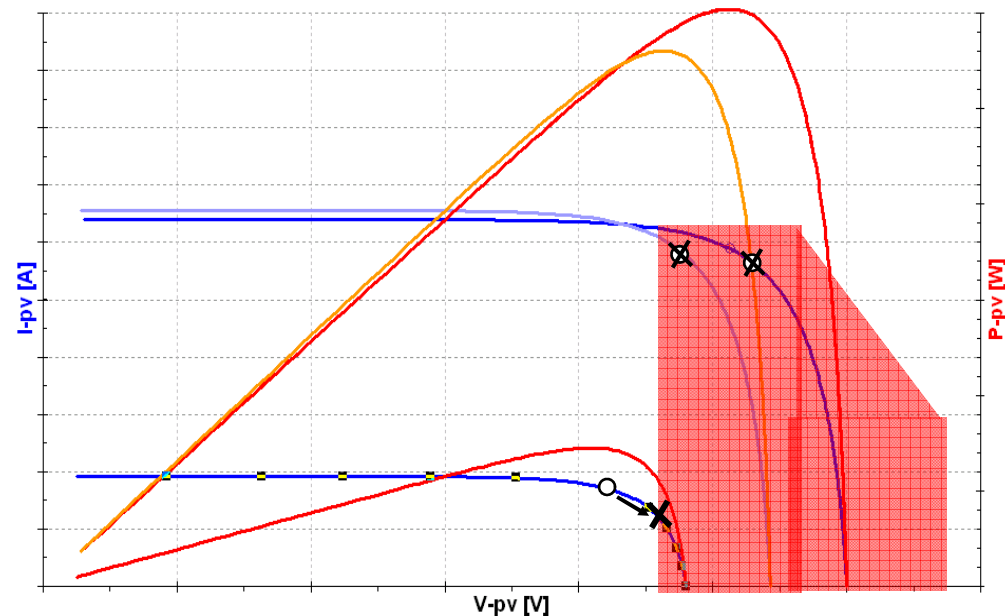
Onduleur

Les plages de fonctionnement du champ PV ne sont pas identiques

Vaut-il mieux légèrement sur-dimensionner ou sous-dimensionner l'onduleur?

Tension $U_{MPP} <$ tension minimale d'entrée de l'onduleur

Cas ①: Le champ PV atteint son MPP pour une tension inférieure à la tension minimale d'entrée de l'onduleur

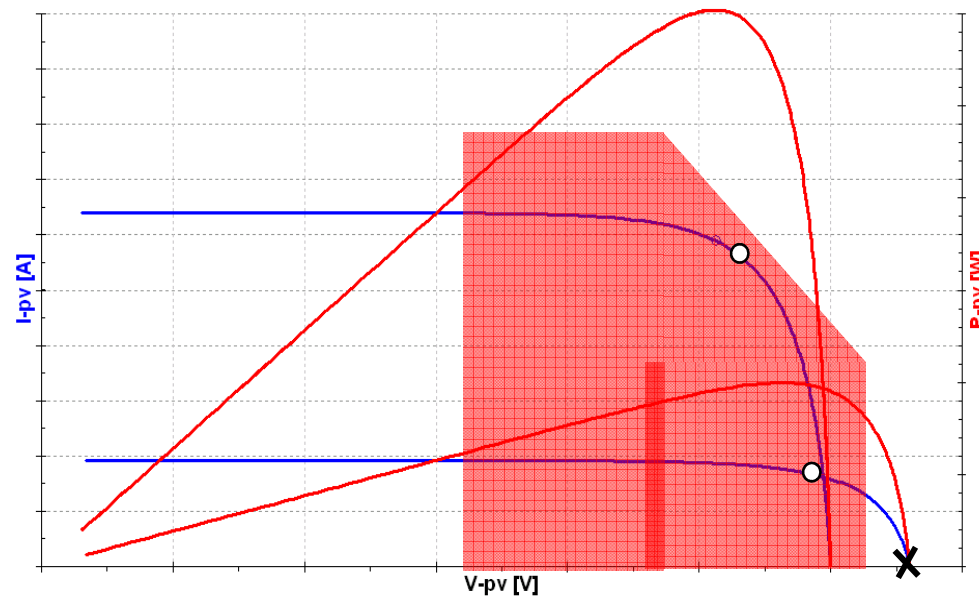


Cas non critique :

- soit l'onduleur ne démarre pas
- soit l'onduleur fonctionne à une puissance correspondante à sa tension d'entrée minimale

Tension U_{co} > tension maximale onduleur

Cas ② : Le champ PV a une tension à vide plus élevée que la tension d'entrée maximale de l'onduleur.



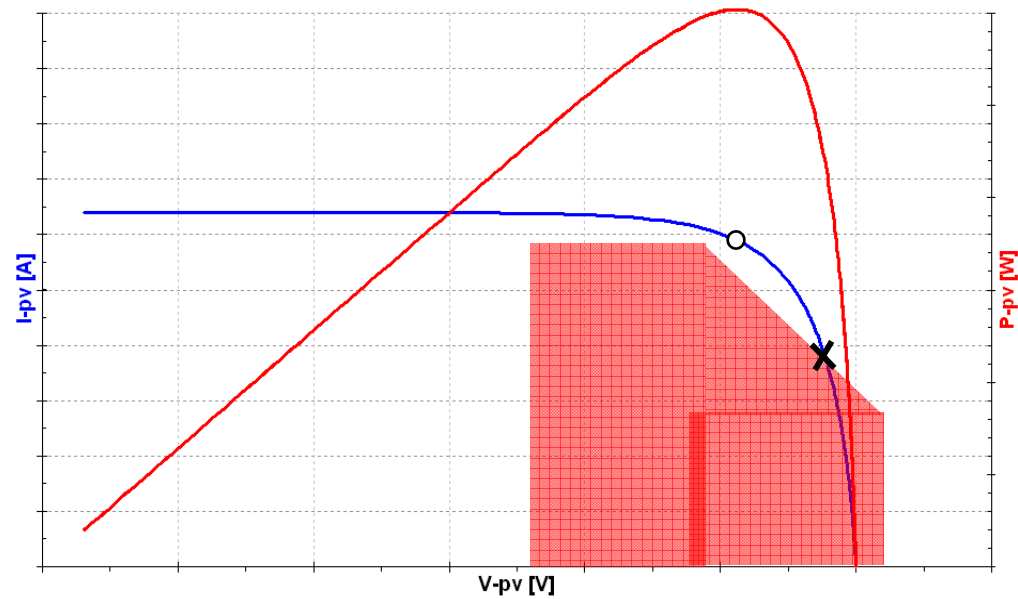
Cas critique :

L'onduleur est en danger et risque d'être endommagé !



Limitation de puissance du champ PV

Cas ③ : Le champ PV pourrait délivrer une puissance supérieure à la puissance d'entrée maximale de l'onduleur.



Cas non critique :

L'onduleur limite la puissance d'entrée par déplacement du point de fonctionnement (perte potentielle de puissance disponible)

Dimensionnement des onduleurs

Règles de conception en tension et courant:

- $U_{mpp} (+70\text{ °C}) >$ tension d'entrée mini de l'onduleur
- $U_{mpp} (-10\text{ °C}) <$ tension d'entrée max de fonctionnement de l'onduleur
- $U_{co} (-10\text{ °C}) <$ tension d'entrée max. de l'onduleur
- $I_{scmax} <$ Courant max de l'onduleur

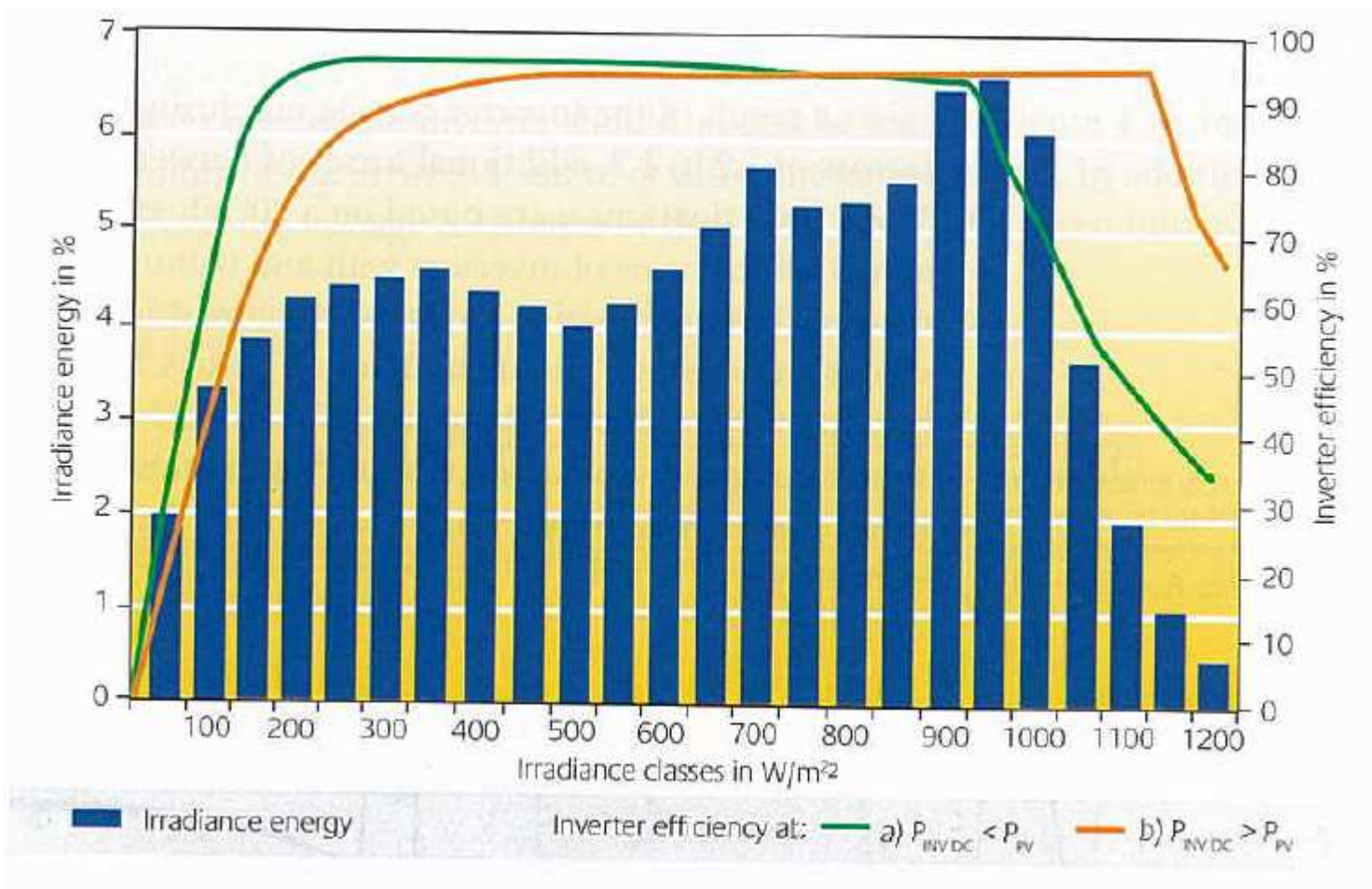
N.B. De nombreux fabricants d'onduleurs proposent des petits logiciels d'aide aux choix de leurs onduleurs en fonction de différents paramètres (configuration du champ PV, température,...)

Attention :

Pour les couches minces tenir compte des valeurs plus élevées les premières semaines d'exposition au rayonnement solaire (par exemple + 11% pour la tension)

Comment optimiser la puissance de l'onduleur ?

Exemple de distribution moyenne annuelle de l'énergie solaire



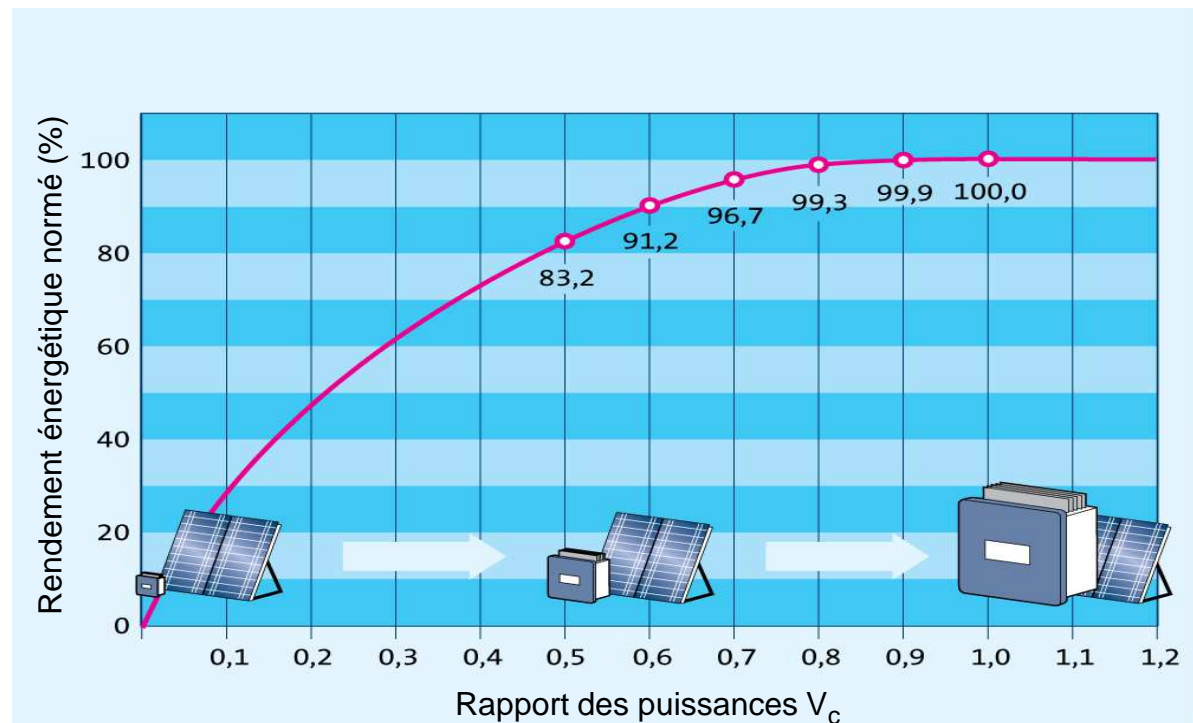
Dimensionnement des onduleurs

Règles de conception en puissance :

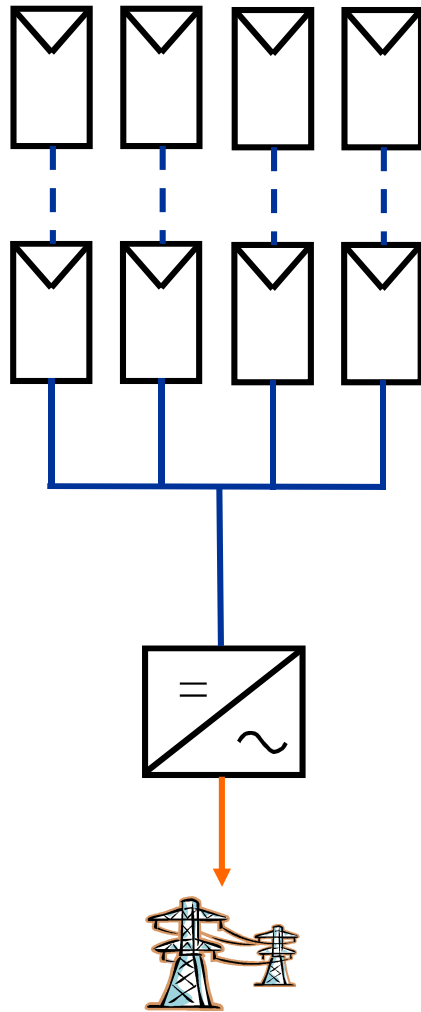
- Rapport de puissance idéalement compris entre 80 et 100 % pour une installation PV idéalement orientée et inclinée
(Rapport de puissance: puissance d'entrée max de l'onduleur / puissance crête du champ PV)

$$0,8 < \frac{P_{DC}}{P_C} < 1^*$$

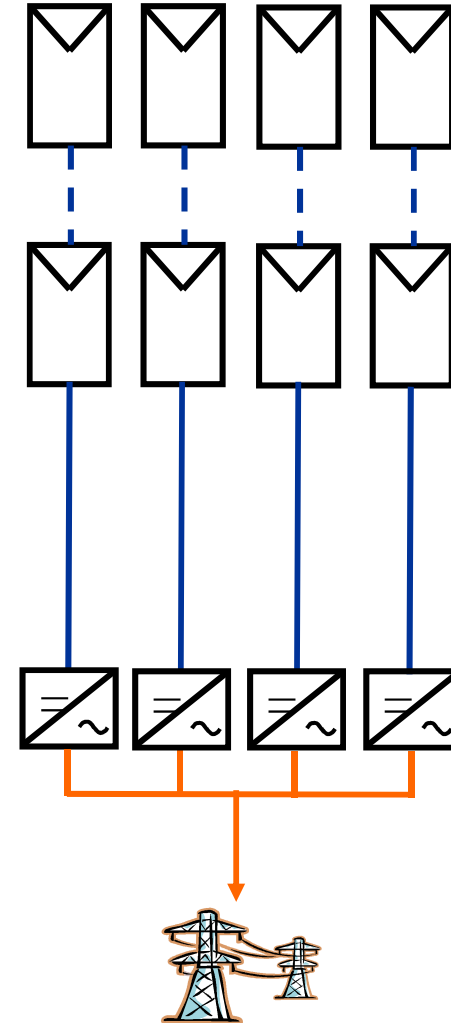
*: valeur pouvant atteindre 1,2 pour les couches minces



Onduleur centralisé ou multitude d'onduleurs modulaires ?



?



Onduleur centralisé ou multitude d'onduleurs modulaires ?

Choix par optimisation technico-économique sur la base de nombreux critères

Implantation du PV sur bâtiment :

- Puissance de l'installation ?
- Tension de raccordement BT ou HTA ?
- Taille et orientation des pans de toitures ?
- Ombrage partiel possible ?
- Accessibilité et maintenance des onduleurs ?
- Longueur des circuits courant continu restant sous tension en cas de coupure d'urgence ?
- Rendement énergétique selon les différentes configurations ?
- Nécessité de fournir de l'énergie réactive au réseau ?
- Coûts de chaque configuration?
 - câblage et appareillage DC et AC
 - onduleur(s)

Conclusion : Onduleur centralisé ou multitude d'onduleurs modulaires selon les cas !

Onduleur centralisé ou multitude d'onduleurs modulaires ?

Choix par optimisation technico-économique sur la base de nombreux critères

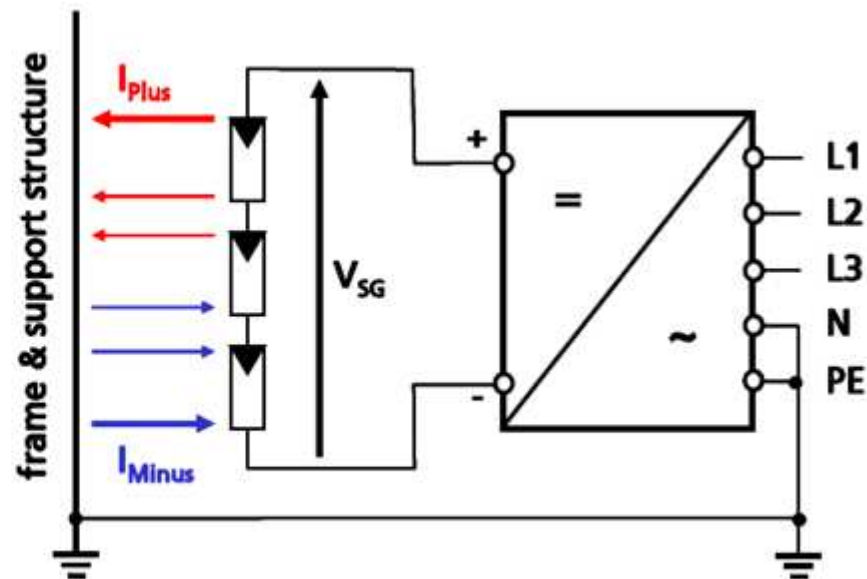
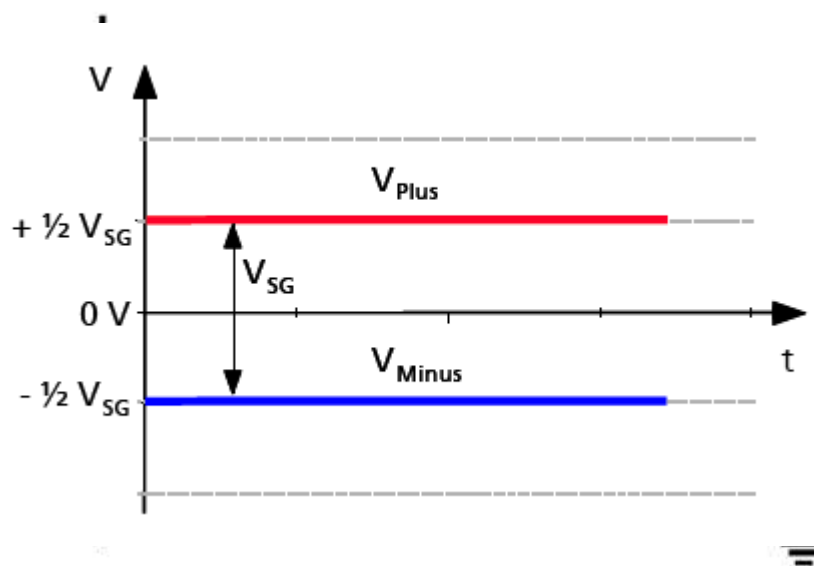
Centrale PV au sol :

- Puissance de l'installation ?
- Structures fixes ou trackers ?
- Rendement énergétique selon les différentes configurations ?
- Coûts de chaque configuration?
 - câblage et appareillage DC et AC
 - onduleur(s)
- Nécessité de fournir de l'énergie réactive au réseau ?

Conclusion : Onduleur centralisé dans la plupart des cas mais tendance aux modulaires observés!

Courants de fuite résistifs au niveau du champ PV

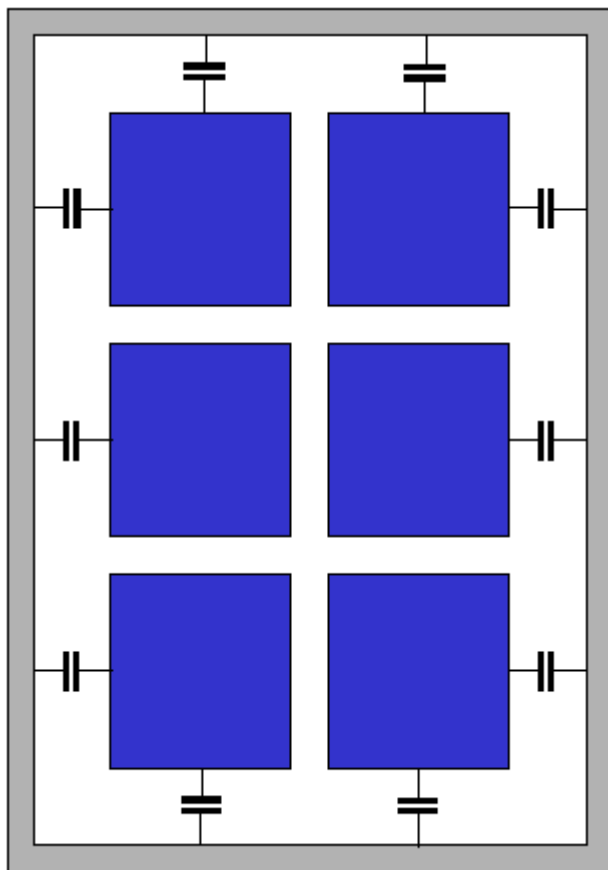
La présence de tension élevée au niveau du champ PV et de résistances d'isolement entraînent des courants de fuite de faible valeur en journée vers les structures métalliques



Pas de polarité reliée DC reliée à la terre et tension symétrique

Attention déclenchement intempestif du 30mA en habitation

Effet capacitif entre cellules PV et cadre / structure



Modules PV secs : de 2 à 3 nF/kW

Modules humides : de 100 à 150 nF/kW

Films couches minces standard : valeurs similaires

Films couches minces sur feuille acier inox : de l'ordre de 1000 nF/ kW!



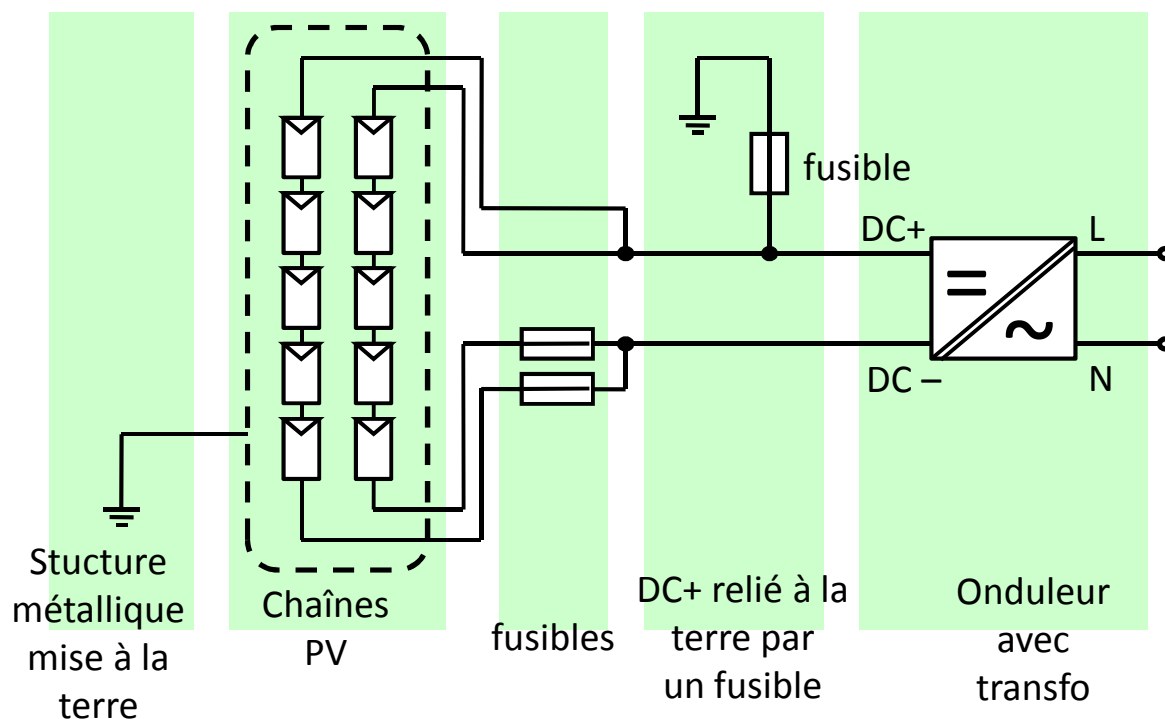
Manque d'information des fabricants !

Recommandations pour choix d'onduleur en présence de cellules PV avec contacts en face arrière

Kit de mise à la terre proposée par certains fabricants d'onduleurs:

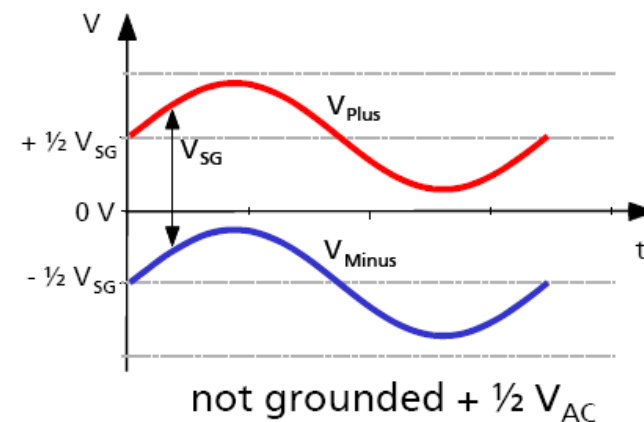
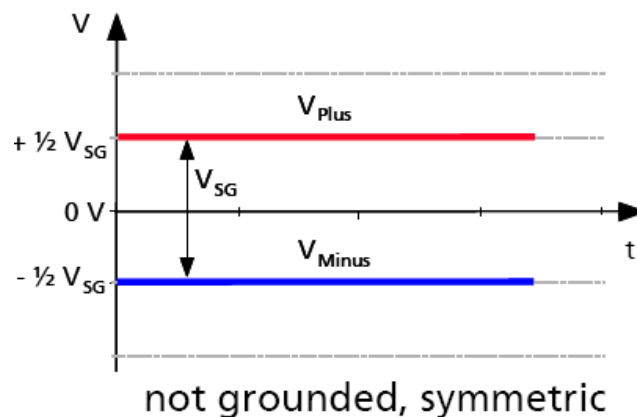
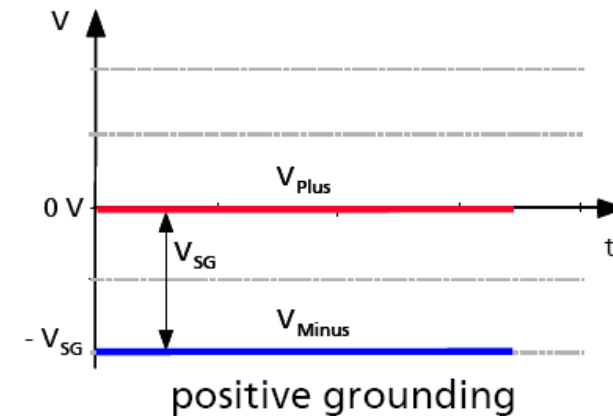
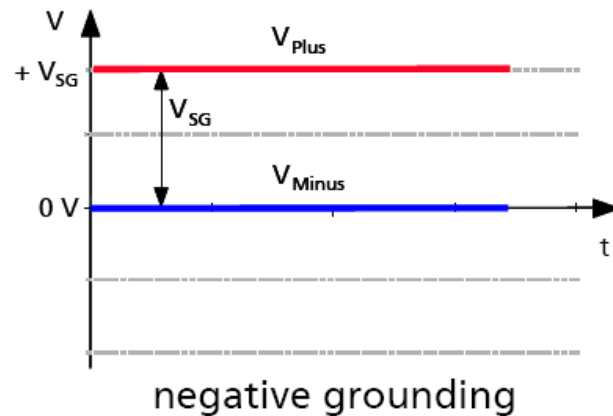
Polarité (+) ou (-) reliée DC reliée à la terre en amont de l'onduleur **avec transformateur**

- soit par fusible
- soit par résistance



Mise la terre d'une polarité DC (sans fusible) validée dans le guide C15-712 sous réserve de protection complémentaire

Exemples de potentiels en entrée onduleur selon les différentes typologies



Selon la typologie des onduleurs, on retrouve des potentiels de forme et de tension différente par rapport à la terre

Normes applicables aux onduleurs en France

Conformité aux normes :

- Conformité CE
- Protection de découplage :
VDE 0126-1-1 (février 2006)
- Compatibilité électromagnétique :
EN55014
- Harmoniques : CEI 61000-x...
- Sécurité : EN 60950
- CEI 62109
- Certificat de tests délivrés par
laboratoire agréé

 innova Product Service GmbH		Gewerbestr. 28 87600 Kaufbeuren Allemagne
Certificat d'essai		
Fabricant:	TOTAL ENERGIE 12-14 allée du Levant 89890 LA TOUR DE SALVAGNY France	
Produit:	Onduleur photovoltaïque	
Modèle:	DHN-1AC-1900W-ENS et DHN-1AC-2200W-ENS	
Label de certification:	  	
<i>Un échantillon d'essai représentatif du modèle mentionné ci-dessus a été soumis avec succès à examen et vérification. Ces critères sont décrits ci-après:</i>		
Fondements (Bases) de la vérification: IEC 60950-1:2001 (1ère Edition) et/ou DIN/EN 60950-1:2003 et EN50178:1998 ainsi que VDE 0126:1999. Les procédures de sécurité examinées, pour le produit mentionné ci-dessus, correspondent à des conditions d'utilisations spécifiées et sont conformes aux exigences en vigueur par l'EDF au moment de la délivrance de ce certificat.		
Conditions d'utilisation: L'onduleur photovoltaïque est un outil de régulation autonome muni d'un système de découplage du réseau, système ENS, tenu inaccessible pour les entreprises de distribution d'électricité. Ces entreprises pourront cependant accéder à une commande externe équivalente. L'ENS est un élément intégré à l'onduleur photovoltaïque.		
Donnée résultant:	12. Mars 2005	
Ce certificat d'essai a une validité de 3 ans à compter de la date de certification.		
Gérant: Horst Haug		
		

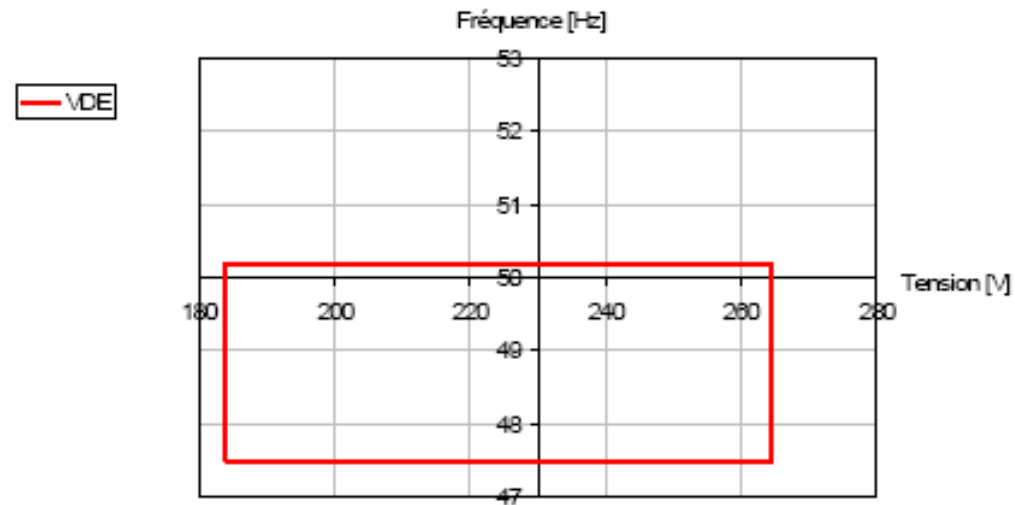
DIN VDE 0126-1-1

Protection de découplage automatique souvent intégrée à l'onduleur (sinon nécessité d'une protection de découplage externe)

Pas de limitation de puissance en BT (auparavant <4,6kVA)

Paramètres contrôlés :

- Tension réseau : entre 80 et 115% de la tension nominale / si hors tolérance : déconnexion en moins de 0,2sec
- Fréquence : entre 47,5 à 50,2 Hz de la fréquence nominale / si hors tolérance : déconnexion en moins de 0,2sec



DIN VDE 0126-1-1

Autres paramètres contrôlés :

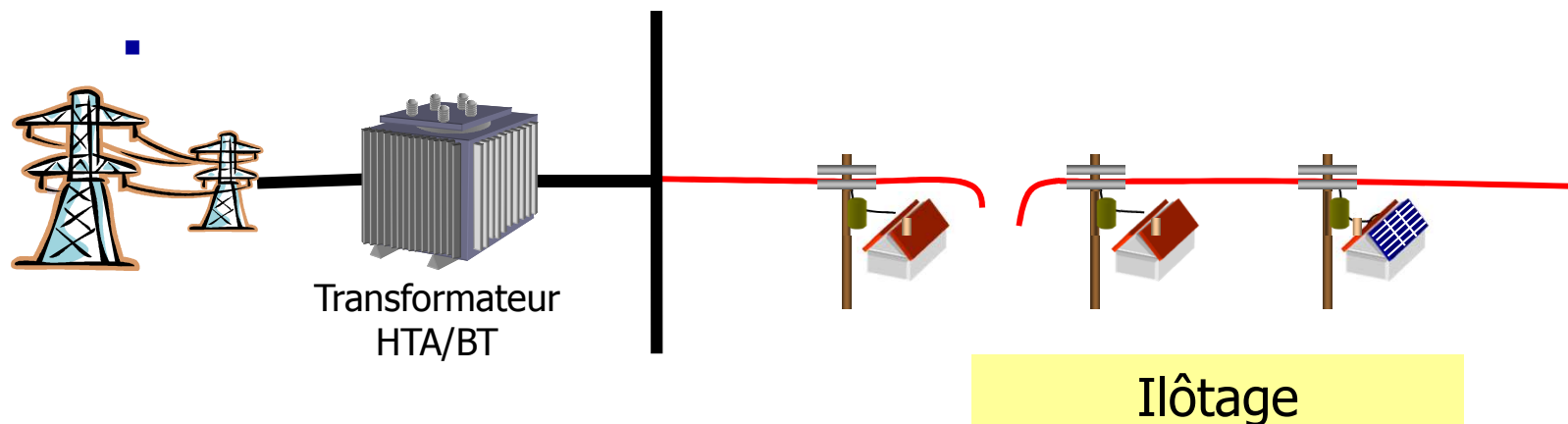
- Résistance d'isolement $R_{iso} \geq 1k\Omega/V$ ($V =$ Tension max entrée onduleur) et pas $< 500k\Omega$ avant connexion au réseau
- Courants de fuite (si $> 300mA$ déconnexion en moins de 0,3s)
- Courant injecté en DC sur le réseau
- Courants de défauts côté AC

Valeur efficace du courant de défaut/(mA)	Temps d'arrêt/(s)
30	0,3
60	0,15
150	0,04

- Détection d'îlotage (différentes méthodes possibles dont la mesure d'impédance du réseau : si saut d'impédance réseau $> 1\Omega$, déconnexion en 5s max)

DIN VDE 0126-1-1

Détection d'îlotage



Les installations PV et autres générateurs de production locale d'électricité sont conçues pour interrompre leur fourniture en cas de coupure du réseau électrique

Cependant, il existe une très faible possibilité que le système PV continue d'alimenter par défaut des récepteurs sur le réseau îloté

Cette condition est appelée "îlotage"



Attention !!

Produits disponibles sur le marché

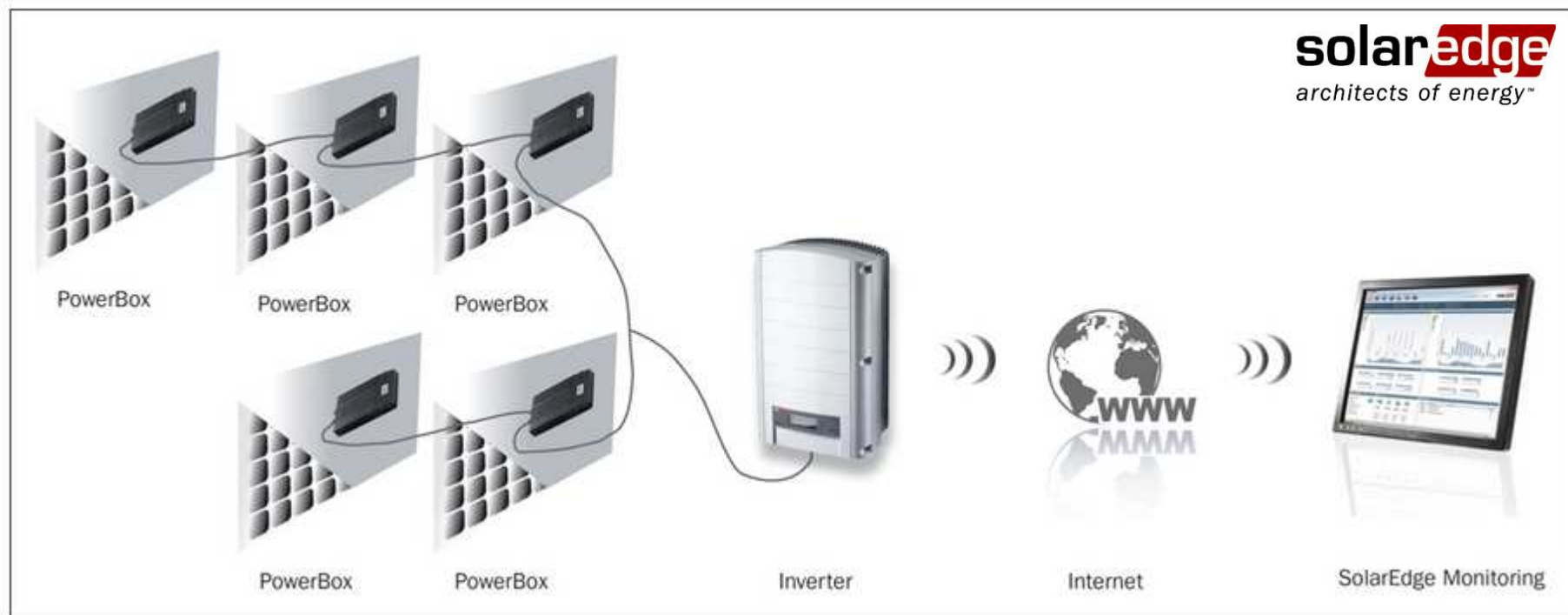


Micro-onduleurs

Technical specifications	
Input Data (DC)	
Reccommended Input Power - STC	270W
Maximum Input DC Voltage	50V
Minimum Voltage	24V
MPPT Voltage Range	27V - 42V
Maximum Input Current	10A
Output Data (AC)	
Maximum Output Power	220W
Nominal Output Voltage/Range	240V / 195V - 260V
Maximum Output Current	1.2A
Nominal Output Frequency/Range	50Hz / 48.25 - 50.45
US Nominal Output Frequency/Range	60Hz / 59.5 - 60.25
Power factor	> 0.95
Total Harmonic Distortion	< 5%
Efficiency	
CEC Efficiency	93%
Peak efficiency	94%
Mechanical Data	



Onduleurs de petites puissances sans MPPT



- Sans transformateur
- Plage de tension : fixe
- Tension d'entrée max : 550 V
- Courant d'entrée max : 13 A à 20 A
- Puissance de sortie nominale jusqu'à : 3 à 6 kVA
- Rendement européen : 97,1%

Caractéristiques générales

DONNÉES D'ENTRÉE	FRONIUS IG 15	20	30	40	60
Gamme de tension MPP	150 - 400 V	150 - 400 V	150 - 400 V	150 - 400 V	150 - 400 V
Tension d'entrée max. (avec 1000 W/m ² ; -10°C)	500 V	500 V	500 V	500 V	500 V
Puissance du dispositif PV	1300 - 2000 Wc	1800 - 2700 Wc	2500 - 3600 Wc	3500 - 5500 Wc	4600 - 6700 Wc
Courant d'entrée max.	10,8 A	14,3 A	19 A	29,4 A	35,8 A
DONNÉES DE SORTIE	FRONIUS IG 15	20	30	40	60
Puissance nominale	1300 W	1800 W	2500 W	3500 W	4600 W
Puissance de sortie max.	1500 W	2000 W	2650 W	4100 W	5000 W
Rendement max.	94,2 %	94,3 %	94,3 %	94,3 %	94,3 %
Rendement Euro	91,4 %	91,6 %	92,7 %	93,5 %	93,5 %
Tension de réseau / fréquence	230 V / 50 Hz				
Taux de distorsion harmonique	< 3,5 %				
Facteur de puissance	1				
Consommation propre pendant la nuit	0 W				

Petites et moyennes puissances

ONDULEURS AVEC BJ INTEGRE

- ABB : TRIO
- FRONIUS : SYMO
- SCHNEIDER : CONEXT

