

## Article 20. Intégration de sources à énergie renouvelable de type solaire photovoltaïque dans un réseau d'énergie électrique\*

P. Botoronono<sup>1</sup>, L. F. Rafanotsimiva<sup>1,2</sup>, N. J. Razafinjaka<sup>2</sup>

(1) Université d'Antsiranana, Antsiranana Madagascar

(2) Institut Supérieur de Technologie D'Antsiranana, Antsiranana, Madagascar

### Résumé

D'une part, en termes d'électrification, Madagascar n'est pas encore au stade d'un réseau interconnecté national. A part les réseaux des Chefs lieux de provinces, on compte une soixantaine de petits réseaux ruraux îlotés. Plusieurs mémoires d'Ingénieur ont déjà été réalisées dans le domaine de l'électrification rurale et plusieurs demandes ont déjà été exprimées dans la Région DIANA (Madagascar) en termes d'études de faisabilité : la Société Nationale d'Eau et d'Electricite, la Compagnie Salinière de Madagascar, ... Ce qui fait l'intérêt régional, voire national d'une telle recherche.

D'autre part, que ce soit dans les pays industrialisés ou dans les pays en développement, à cause du réchauffement climatique et de la tarification des ressources fossiles et dans une optique de protection de l'environnement, le tournant tend actuellement vers les sources à énergie renouvelable et alternative. L'installation d'un tel système est déjà maîtrisée à petite échelle et en utilisation indépendante.

Beaucoup de travaux ont déjà abordés dans ce domaine et dans le cadre de ce travail, nous allons faire une synthèse des recherches bibliographiques effectuées dans les littératures auxquelles nous avons eu accès comme le travail de B. De Metz-Noblat [METZ\_97] et celui de Thi Minh Chau Le [THI\_12].

**Mots clés :** Electrification rurale, réseau d'énergie électrique, énergie renouvelable, solaire photovoltaïque, taux de pénétration, intégration.

### Abstract

On the one hand, in terms of electrification, Madagascar is not yet at the stage of a national interconnected network. Apart from the networks of provincial chiefs, there are some 60 small, rural, island networks. Several masters memories have already been realized in the field of rural electrification and several requests have already been expressed in the DIANA Region (Madagascar) in terms of feasibility studies: the National Society of Water and Electricity, the Compagnie Salinière de Madagascar, ... What makes the regional interest, even national of such a research.

On the other hand, whether in industrialized countries or in developing countries, because of global warming and the pricing of fossil fuels and with a view to protecting the environment, the current trend is towards sources to renewable and alternative energy. The installation of such a system is already controlled on a small scale and in independent use.

A lot of work has already been done in this field and as part of this work, we are going to summarize the bibliographic research carried out in the literatures to which we have had access, such as the work of B. De Metz-Noblat [METZ\_97] and that of Thi Minh Chau The [THI\_12].

**Keywords :** Rural electrification, electricity grid, renewable energy, solar photovoltaic, penetration rate, integration.

### 1. INTRODUCTION

L'intégration des sources d'énergie renouvelables (RES) solaire photovoltaïque crée de nouveaux problèmes techniques lors des études de planification du réseau telles que: impacts sur le changement des flux de puissance (bidirectionnel), sur le plan de tension, sur le plan de protection, sur la qualité de l'énergie et les problèmes d'instabilité.

D'un autre côté, les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations sur les réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement des systèmes PV [TRAN\_10d].

Pour cette raison, l'étude se porte sur l'influence de l'insertion de sources photovoltaïques au réseau de distribution, d'autre part le comportement dynamique des systèmes PV en régime permanent et face aux perturbations du réseau électrique. Il est nécessaire de proposer des solutions aux problèmes de stabilité due à l'intégration des sources à énergie renouvelable dans les réseaux électriques de petite taille. Il est aussi envisagé de développer des solutions permettant d'augmenter la performance des onduleurs PV afin d'augmenter leur taux d'insertion au réseau de distribution.

L'objectif de cet article est de présenter l'influence de l'insertion de sources photovoltaïques sur le plan de protection du réseau de distribution et le comportement dynamique des systèmes PV (onduleurs monophasé ou triphasé) raccordé au réseau BT et HTA face aux régimes transitoires, en particulier au creux de tension lors d'un défaut.

La description de notre thème d'étude d'après la collecte bibliographique paraît intéressante ; les différents systèmes photovoltaïques connectés au réseau et leur comportement dynamique ont été abordés, ainsi qu'une synthèse de synchronisation.

### 2. DESCRIPTION DU SYSTÈME ETUDIÉ

Au sein des centrales photovoltaïques à l'instar de Centrale Solaire Photovoltaïque d'Ambatolampy à Madagascar, les modules solaires sont groupés pour former des rangées (ou strings) et optimiser la production d'électricité. Ces rangées

de 73.728 panneaux de 1521 modules qui sont ensuite reliés en série, par l'intermédiaire de boîtiers de raccordement, pour former des sous-ensembles et produire une puissance de 20 Mwc avec courant alternatif de 63kV. Il s'agit de panneaux polycristallins sur structure métallique galvanisée. Ces boîtiers de raccordement, répartis sur la totalité du parc pour réduire le câblage, intègrent toujours des fonctions de protection contre les surtensions et de surveillance du courant des modules photovoltaïques. Enfin, ces boîtiers sont raccordés à l'onduleur central. Un parc photovoltaïque comporte plusieurs onduleurs centraux en parallèle et directement raccordés côté CA, la production électrique étant injectée dans le réseau via des appareillages et des transformateurs de moyenne tension à haut rendement.

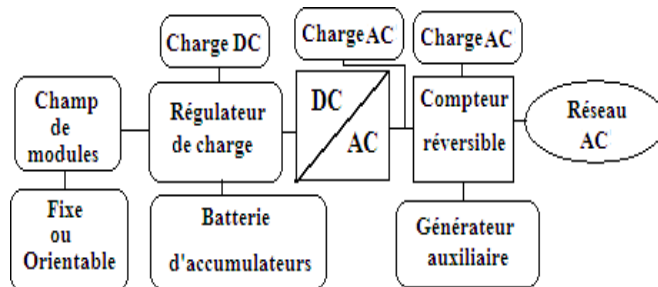
Le raccordement au réseau de l'installation photovoltaïque via l'onduleur nécessite évidemment la synchronisation de ces deux systèmes.

La méthode adoptée pour ce cas étudié est la suivante :

La synthèse bibliographique concernant le thème en question ;

L'élaboration des perspectives par rapport à la thèse qui est l'objet de cette recherche.

**Figure.1.** Schéma synoptique décrivant de notre système



La figure 1 représente symboliquement les divers éléments du système le plus général. Dans la pratique, les systèmes utilisent les éléments appropriés aux types de charges et aux conditions locales

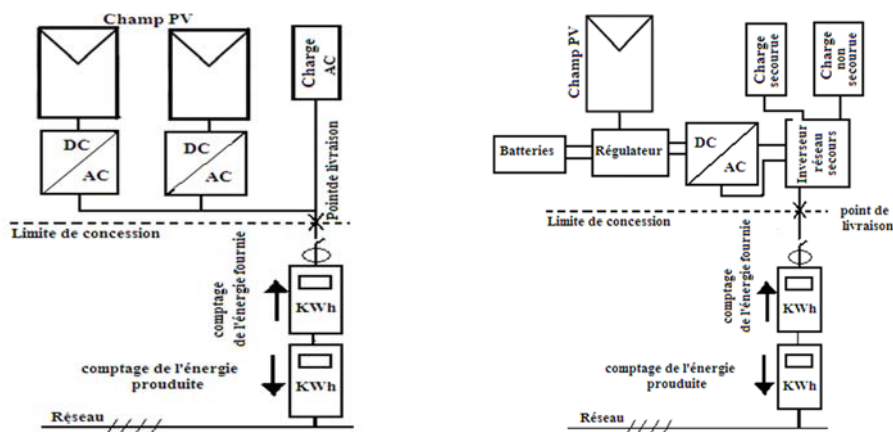
## 2.1. COMPARAISON DE SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES CONNECTES AU RESEAU EXISTANTS

Trois variantes des systèmes photovoltaïques résidentiels raccordés au réseau citées ci-dessous ont été constatées d'après la figure 2:

l'installation PV raccordée au réseau avec injection des excédents de production : (A) et (B)

l'installation PV raccordée au réseau par injection totale de l'énergie produite : (C)

l'installation PV résidentiel raccordée au réseau sans injection : (D)



(A) : Schéma de principe de la configuration d'injection du surplus d'énergie

(B) : Schéma de principe de la configuration (ASI) et d'injection du surplus

Figure 2 : Différents systèmes photovoltaïques connectés au réseau [EDF\_03]

(A) : La consommation d'une partie de la production et l'injection au réseau le solde (surplus) : lors que la consommation dépasse la production, le client suture du réseau le solde. Cette installation est équipée de deux compteurs, l'un mesurant l'énergie soutirée du réseau et l'autre mesurant l'énergie injectée dans réseau (compteur d'injection).

(B) : la variante avec générateur de sécurisation permet, en absence d'énergie fournie par le réseau l'utilisation d'énergie stockée par le parc batterie d'accumulateurs en introduisant une fonction redresseur- onduleur de type alimentation sans interruption (ASI) avec une sortie secours associé à un mode de fonction autonome de l'onduleur et celle fournie par le champ photovoltaïque afin d'alimenter des usages propriétaires de l'installation.

(C): Le raccordement au réseau permet d'injecter la totalité d'énergie produite. La séparation entre les deux points de livraison consommation et injection (production) conduit donc à étoiler le branchement en deux parties, avec cependant une seule liaison au réseau BT. Le branchement production comporte deux compteurs montés en tête bêche (production et consommation des dispositifs de la chaîne PV), pour mieux saisir leurs utilités, l'un des compteurs se charge de l'énergie d'origine photovoltaïque produite et l'autre pour compter l'énergie achetée au fournisseur et consommée par les récepteurs de l'installation.

(D) :L'installation PV résidentiel raccordée au réseau sans injection de production dont l'énergie produite par le système photovoltaïque est destinée à l'autoconsommation, dans le cas où la production PV est insuffisante pour des systèmes de petite taille. L'énergie soutirée du réseau comble le déficit d'énergie de consommation.

### 3. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES SYSTEMES PV RACCORDE AU RESEAU

Avant d'entamer n'importe quelle étude sur l'intégration de sources à énergie renouvelable de type solaire photovoltaïque dans le réseau d'énergie électrique, il est nécessaire de savoir que la part de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangeante pour les riverains voisins. D'autre part, cette source d'énergie est très facile à intégrer dans les bâtiments.

La figure 3 ci-dessous, nous donne des informations sur l'évolution de la puissance solaire raccordée au réseau électrique dans le monde de 2006 à 2015.

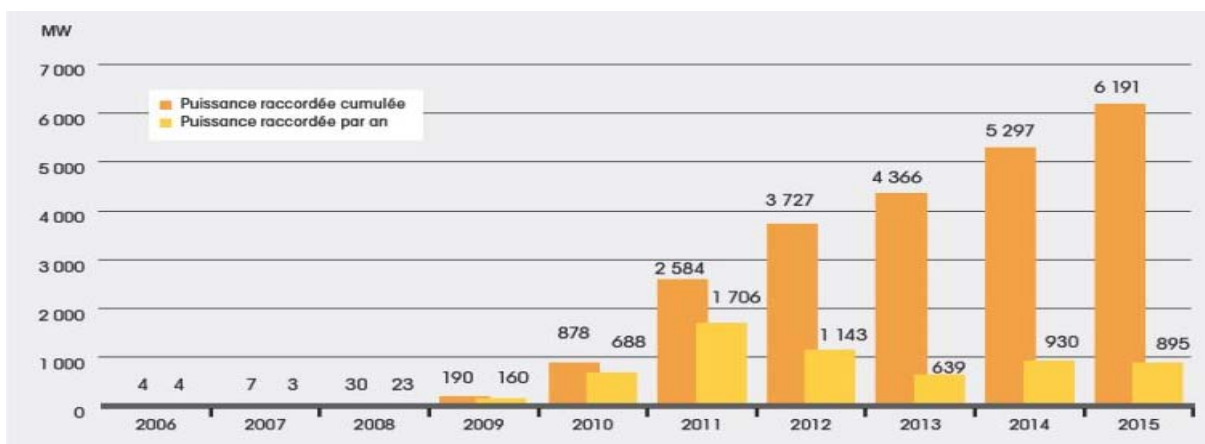


Figure 3 : Evolution de la puissance solaire raccordée dans le monde

A cet effet, les études de stabilité dynamique consistent à envisager les principaux scénarios critiques tels que court-circuit, perte d'énergie mécanique, perte de source électrique, variation de charge, contraintes de process, prédire le comportement du réseau face à ces perturbations et préconiser les mesures à prendre en exploitation, telles que type de protection, réglage de relais, délestages, configurations pour éviter les modes de fonctionnement indésirables.

Ces études permettent donc la maîtrise du comportement du réseau considéré, qu'il soit public ou privé, H.T. ou B.T.[METZ\_97].

#### 3.1. INFLUENCE DES SYSTÈMES PV SUR RÉSEAU ELECTRIQUE

Par suite de ces spécificités techniques des installations photovoltaïques, le raccordement des systèmes PV au réseau peut avoir des impacts importants sur son fonctionnement [TRAN\_10d].

Les influences les plus significatives des systèmes PV sur le réseau de distribution sont les suivantes :

##### Influence sur le plan de tension :

La tension varie en fonction des injections de puissances active et réactive sur le réseau [RAMI\_06], [TRAN\_09]. En particulier pendant une période de fort ensoleillement et de faible consommation, la tension de certains nœuds du réseau peut dépasser le seuil admissible. L'injection d'énergie sur le réseau fait croître la tension jusqu'à un seuil provoquant le découplage de certains systèmes [UEDA\_05]

##### Influence sur le plan de protection :

La contribution des systèmes PV au courant de défaut dans le réseau de distribution a des conséquences faibles sur le plan de protection. Mais la sélectivité et la sensibilité des protections du réseau peuvent être affectées et provoquer le déclenchement intempestif du départ sain ou l'aveuglement de la protection du départ en défaut [THI\_12]..

##### Influence sur la qualité de l'énergie [THI\_12].:

Injection d'harmoniques de courant : la présence d'interfaces électronique de puissance peut injecter des harmoniques de découpage au réseau si les onduleurs ne sont pas munis de filtres efficaces. Les conséquences de ces harmoniques

peuvent être instantanées sur certains appareils électroniques : troubles fonctionnels (synchronisation, commutation), disjonctions intempestives, erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie...

Injection de courant continu au réseau : Perturbation du bon fonctionnement des dispositifs de coupure différentiels, créer des erreurs sur les compteurs d'énergie, affecter la durée de vie des composants du réseau, notamment à travers une augmentation de leur corrosion et enfin contribuer à une saturation des transformateurs

Déséquilibre entre phases : en cas d'utilisation d'onduleurs monophasés. Si la puissance produite n'est pas correctement répartie entre les 3 phases d'un même système PV triphasé, alors ce système va contribuer à déséquilibrer le réseau BT.

### 3.1.1 Influence sur les pertes dans les réseaux de distribution :

Une étude d'EDF R&D [LOEN\_09] a montré que les fermes PV de plusieurs MW, généralement raccordées sur de départs HTA dédiés, conduiraient à une augmentation des pertes et que les installations PV de type résidentiel, plus proches des lieux de consommation, permettraient de réduire les pertes.

### 3.2. INFLUENCE DU RÉSEAU SUR LE FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS PV

Les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations des réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement normal des systèmes PV. Ceci provient généralement, soit des caractéristiques intrinsèques des réseaux de distribution, soit de la qualité de tension dégradée par d'autres utilisateurs du réseau, soit d'une association de ces deux causes [ESPRIT\_10a]. Ces effets entraînent généralement des découplages injustifiés des onduleurs. Les influences du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques peuvent se résumer comme suit :

**Régime de neutre et courants de fuite** : Avec ce régime de neutre, la protection des personnes s'effectue à l'aide de disjoncteurs ou d'interrupteurs différentiels qui ont pour fonction de s'ouvrir en cas de fuite de courant. Les installations PV peuvent produire des courants de fuite du fait des caractéristiques capacitatives des panneaux, et des onduleurs (capacités des filtres EMC). Ces capacités en présence d'une composante alternative sur le circuit à courant continu engendrent des courants de fuite dans la liaison de mise à la terre [IEE\_PV\_07]. Ces courants de fuite peuvent être d'amplitude importante et devenir potentiellement dangereux pour les personnes en cas de contact direct avec le fil de terre [TRAN\_10a]. De plus, ils peuvent provoquer le déclenchement intempestif des disjoncteurs différentiels.

**Niveau de tension du réseau** : paramètre clé vis-à-vis du dimensionnement et du fonctionnement des installations PV et les types de protection de découplage.

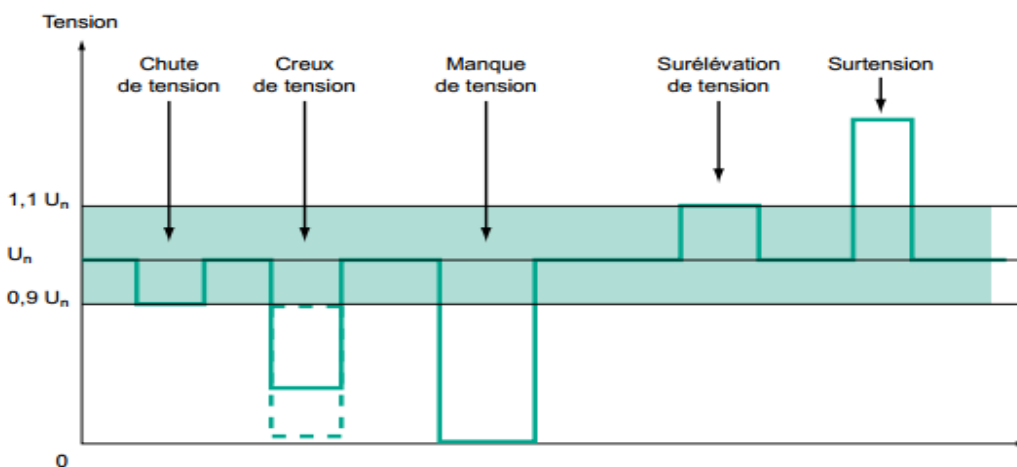


Figure 4: Perturbations de tension dans les réseaux [METZ\_97].

**Creux de tension et tenue des systèmes PV** : les creux de tension sont considérés comme les plus graves perturbations de la qualité de service en raison de leurs effets sur les processus sensibles. Leur profondeur et leur durée varient en fonction des caractéristiques du réseau et des groupes de production qui y sont raccordés. Des essais ont été effectués sur 12 onduleurs PV conformes à la norme DIN VDE 0126, dans le cadre du projet européen DISPOWER [DISPOWER\_06]. Ces essais avaient pour objectif de déterminer la sensibilité des onduleurs aux creux de tension.

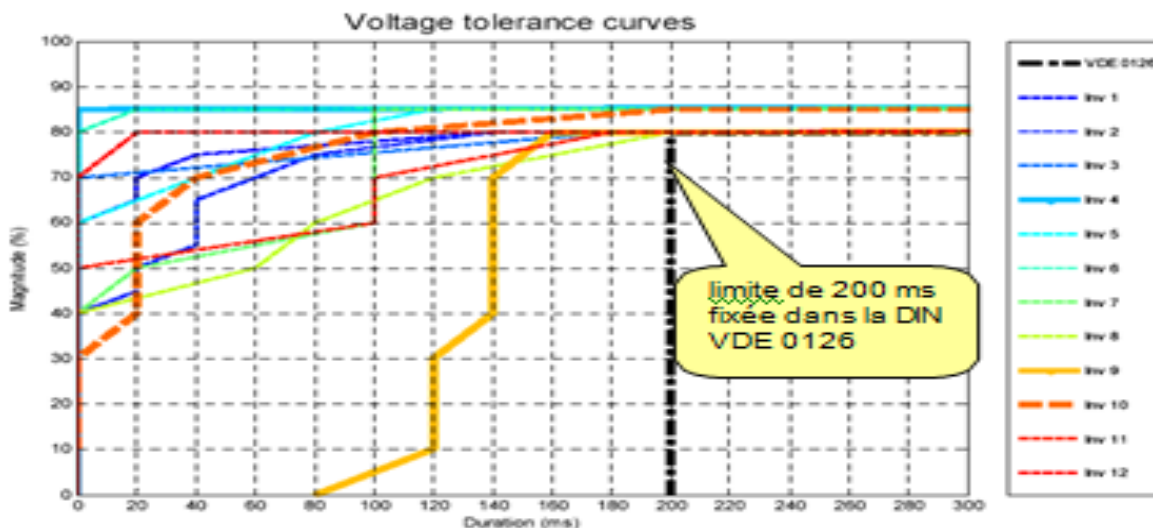


Figure 5. Courbes de tolérance en tension des onduleurs

Le résultat de ces essais est représenté sur la Figure 4, sur laquelle on peut voir apparaître la profondeur du creux de tension en ordonnée et sa durée en abscisse. On peut remarquer que la norme « DIN VDE 0126 » impose aux onduleurs de se déconnecter en moins de 200 ms si la tension chute en dessous du seuil de 80 % de la tension nominale  $U_n$ . Mais on peut aussi remarquer que certains onduleurs se décrochent pour  $U = 85 \% U_n$  et dans tous les cas pour des temps très inférieurs à 200 ms, ce qui montre la grande sensibilité ces onduleurs aux creux de tension [DIN\_0126\_1].

Les creux de tension sont ainsi l'une des principales causes de déclenchements des systèmes PV [IEEE\_00]. La déconnexion d'un nombre important de systèmes PV pourrait avoir des impacts locaux et globaux sur le fonctionnement du réseau, en particulier sur des réseaux faibles.

**Présence de composante continue et d'harmoniques de tension :** les onduleurs pour systèmes photovoltaïques hachent le courant continu issu des modules photovoltaïques en modulation à largeur d'impulsion (MLI ou PWM pour "Pulse Width Modulation") pour le convertir en courant alternatif sinusoïdal. Le fonctionnement des onduleurs sans transformateur peut être affecté par une asymétrie des tensions du réseau (déformation de la sinusoïde par addition d'harmoniques paires), par exemple en présence d'harmoniques issues de charges non-linéaires, qui se traduirait par l'ajout d'une composante DC dans la tension injectée par l'onduleur [IEE\_PV\_07].

**Inter harmoniques :** Les inter-harmoniques (fréquences qui ne sont pas un multiple entier de la fréquence du réseau) sont produits par des variations rapides des charges, ou la saturation des transformateurs [IEE\_PV\_07]. Les tests sur 12 onduleurs du projet DISPOWER ont montré que ces inter-harmoniques créent des perturbations sévères sur les dispositifs de mesures de la fréquence et de l'impédance du réseau [DTI\_99].

#### 4. RECAPITULATION

Notre système est classé dans la configuration (C) de figure 2 dont l'injection de l'énergie solaire photovoltaïque au réseau est complète. Puisqu'il s'agit d'une installation neuve, plusieurs données de scène critique de l'étude sont en cours de collection. Pourtant quant à la connexion série des modules, la théorie prouve déjà une augmentation de la tension du champ PV et le courant reste constant. Le modèle de configuration série pour 24 modules photovoltaïques connectés en série est représenté sur la Fig. 6.

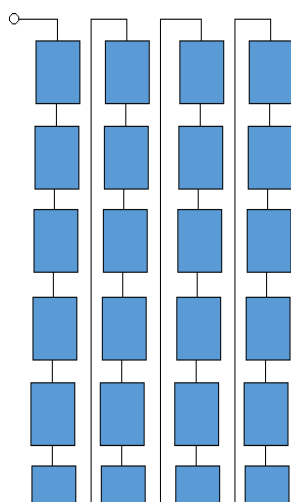


Fig. 6 Série (S) configuration

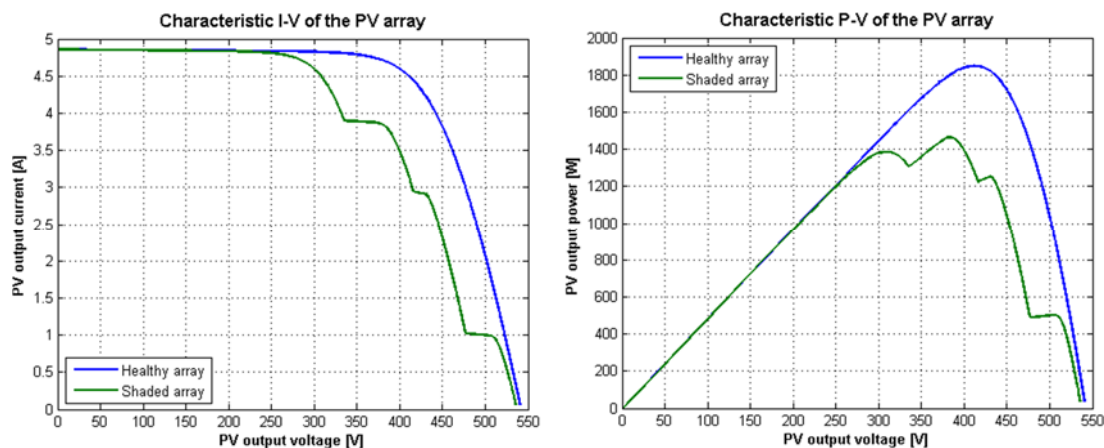


Fig.7 Caractéristique (I-V) et (P-V) du tableau de configuration de la série (S) lors de l'ombrage des défauts

En fonction de la caractéristique (I-V) de la configuration, le constat révèle la diminution exagérée du courant et de la tension en cas de défaut d'ombrage par rapport à la caractéristique de fonctionnement normale. Ensuite, la différence entre la puissance maximale obtenue en fonctionnement normal et ombré est d'environ 25%. A cette dénivellation, l'injection s'arrête automatiquement c'est-à-dire que le taux de pénétration reste nul pour le(s) string(s) en question.

## CONCLUSION

A travers cet article, Nous avons étudié les différentes formes d'impacts significatifs des systèmes PV sur le réseau de distribution ainsi que les impacts importants des caractéristiques et perturbations des réseaux sur le fonctionnement des systèmes PV. Dans le cadre de cette thèse, des solutions sur les problèmes de stabilité due à l'intégration des sources à énergie renouvelable dans les réseaux électriques de petite taille sont envisagés. La taille du réseau de raccordement a vraiment une grande influence dans cette intégration, c'est pourquoi il est nécessaire de rechercher des solutions adéquats pour les réseaux de puissance infinie afin d'accentuer au maximum le taux de pénétration des énergies renouvelables. C'est ainsi qu'orienté cette étude vers la source d'énergie solaire photovoltaïque de grande puissance synchronisant vers les réseaux électriques de grande taille.

## REFERENCES

- [DIN\_0126] Norme DIN VDE 0126, "Automatic disconnecting facility for photovoltaic installations with a nominal output up to 4.6 kVA and a single-phase parallel feed by means of an inverter into the public low-voltage mains", avril 1999.
- [DTI\_99] Halcrow Group, DTI, "Co-ordinated experimental research into power interaction with the supply network – Phase 1" (ETSU S/P2/00233/REP), 1999.
- [DISPOWER\_06] "Deliverable 2.2: State of the art solutions and new concepts for islanding protection." Projet DISPOWER, 2006.
- [DON] Ph. Dondon, "L'essentiel de la boucle à verrouillage de phase analogique",
- [EDF\_03]. EDF & GDF accès au réseau BT pour l'installation PV conditions techniques et contractuelle pour le raccordement, référentiel PV V1. Doc 2003schémas
- [ESPRIT\_10a] Rapport du projet Esprit financé par l'ADEME, « Raccordement des installations photovoltaïques au réseau public de distribution électrique à basse tension », 2010
- [IEEE\_00] IEEE Std 929-2000, "IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems", April 2000
- [IEE\_PV\_07] "State of the art on dispersed PV power generation: publications review on the impact of PV Distributed Generation and Electricity networks", IEE PV Upscale, WP4-Deliverable 4.1, 2007
- [LOEN\_09] Philippe Loevenbruck, "Impact Of Distributed Generation On Losses, Draw Off Costs From Transmission Network And Investments Of The French Distribution Network Operator Erdf", CIREN, juin 2009.
- [METZ\_97] B. De Metz-Noblat, G. Jeanjean « Stabilité dynamique des réseaux électriques industriels », Cahier technique n° 185, janv. 1997
- [RAMI\_06] G. Rami, « Contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution », Thèse doctorat de l'INPG, 2006.
- [THI\_12] Thi Minh Chau Le. Couplage onduleurs photovoltaïques et réseau, aspects contrôle / commande et rejet de perturbations. Autre. Université de Grenoble, 2012.
- [TRAN\_09] T. Tran-Quoc, C. Le Thi Minh, S. Bacha, C. Kieny, N. Hadsaid, C. Duvauchelle, A. Almeida, "Local voltage control of PVs in distribution networks", CIREN, Prague, Czech Republic, 8-11 May 2009
- [TRAN\_10a] T. Tran-Quoc, H. Colin, C. Duvauchelle, B. Gaidon, C. Kieny, C. Le-Thi-Minh, S. Bacha, Saddek, G. Moine, Y. Tanguy, "Transformerless inverters and RCD: what's the problem?", 25th EUPVSEC, Valencia, Spain, 5-10 sept. 2010
- [TRAN\_10d] T. Tran-Quoc, R. Caire, chapitre 5 du livre "La distribution d'énergie électrique en présence de production décentralisée", éditeur LAVOISIER, 2010.
- [UEDA\_05] Y. Ueda, "Analytical Results Of Output Restriction Due To The Voltage Increasing Of Power Distribution Line In Grid-Connected Clustered PV Systems", 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.