

# Éléments d'évaluation de la capacité d'intégration des énergies renouvelables au réseau de distribution électrique basse tension

**KHELIF Messaoud , M'RAOUI Abdelhamid , HASSAINE Linda**

*Centre de Développement des Energies Renouvelables,  
CDER, 16340, Bouzaréah, Alger.*

**Résumé** - Le travail présenté, a pour objectif d'éclairer un volet important des contraintes techniques pouvant limiter localement la capacité d'accueil du réseau électrique des productions décentralisées, notamment à base de ressources renouvelables. Dans cette optique, l'élévation de la tension au point de raccordement, suite au fonctionnement inhérent de ces dernières en tant que sources de puissance, reste un élément déterminant. En effet, le maintien de la tension dans une fourchette de valeurs imposées autour de celle nominale, fait partie des engagements réglementaires les plus en vue du gestionnaire du réseau en matière de qualité d'énergie desservie. Partant de ce constat, une étude analytique préliminaire de la situation est menée sur la base d'un modèle simple illustrant les échanges d'énergie mis en jeux et les modes de contrôle associés. Une évaluation quantitative des contraintes évoquées est alors menée à travers une simulation détaillée en adoptant des topologies simples mais assez représentatives du réseau de distribution basse tension. L'option qu'offre l'interface de puissance qu'est l'onduleur de générer de l'énergie réactive, conjointement au transit de celle active, est également considérée. Ceci étant en vue d'évaluer l'apport de cette alternative quant à l'amélioration du taux d'intégration au réseau électrique des productions distribuées à base de ressources renouvelables, sans pour autant transgresser le plan de tension imposé par la réglementation en vigueur.

**Mots clés** - Réseau électrique ; Puissance réactive ; Plan de tension; Onduleur ; facteur de puissance.

## I- Introduction

Les réseaux électriques dont la topologie a été façonnée jusqu'ici sur la base d'un mode de production assez centralisé, sont entrain de subir une mutation profonde avec l'avènement des énergies renouvelables. En effet, le recours à ces dernières comme source primaire dans la production d'électricité, met en avant des capacités unitaires de production allant de seulement quelques KW (essentiellement PV résidentiel) à plusieurs centaines de MW pour les grandes centrales solaires ou éoliennes (hors Hydro-électricité). De fait, un élargissement remarquable du profil des producteurs potentiels est entrain de s'opérer sous la pression qu'impose la nouvelle dynamique de développement durable à l'échelle mondiale, stimulée par le lancement de nombreux programmes nationaux audacieux dans ce sens [1]. Ainsi, la dernière décennie a vu les capacités installées raccordées à certains réseaux électriques nationaux, dépasser déjà celles des principales ressources conventionnelles. Il reste cependant à souligner que cette transition n'aurait pas eu lieu en si peu de temps si en parallèle, les challenges techniques et organiques prévisibles dès le début [2][3][4], n'avaient pas trouvé des solutions fiables. Ainsi, les appréhensions légitimes quant aux problèmes induits sur le réseau en termes de stabilité, protection et qualité de l'énergie, suite à une intégration massive de ces ressources, ont été amplement atténuées à plusieurs niveaux. Mieux encore, des prestations de services techniques utiles, auxquelles les gestionnaires du réseau

allouent des avantages certains, sont désormais proposées grâce aux progrès accomplis, notamment au niveau de l'onduleur comme interface de contrôle des flux d'énergie échangés. Ce sont justement ces dernières qui constituent aujourd'hui un domaine de recherche appliquée assez fécond aux confins du génie électrique et des énergies renouvelables. Une des issues les plus visibles de ces dernières étant l'élaboration des standards techniques (Grid codes) [5], permettant une intégration optimale des énergies renouvelables au réseau tout en sauvegardant sa stabilité et la qualité de l'énergie desservie.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail présenté, initié par l'étude analytique d'une cellule de base d'un réseau électrique AC, afin d'évaluer les puissances active et réactive pouvant y être échangées tout en identifiant les paramètres permettant de les contrôler. Une topologie radiale élargie à plusieurs récepteurs (charges) est alors adoptée et étudiée à travers une simulation détaillée afin de mieux illustrer le problème typique d'élévation de la tension. Ainsi, la capacité d'intégration au point de raccordement considéré, à travers un onduleur à facteur de puissance unitaire, est évaluée selon la réglementation spécifique au réseau national de distribution basse tension [7]. Dans le même contexte mais en adoptant un onduleur à facteur de puissance inductif spécifique, le plan de tension est réévalué avant de quantifier la capacité supplémentaire de puissance active pouvant être injectée par rapport au cas précédent, sans transgresser la réglementation en vigueur. Enfin, l'emplacement du point de raccordement est également étudié comme élément de choix pouvant aider à optimiser la capacité d'intégration en présence des mêmes données de départ.

## II- Nouvelles contraintes du réseau de distribution

Toutes les analyses et autres projections technico-économiques, convergent vers le fait que c'est le réseau de distribution qui est appelé à devenir le réceptacle le mieux approprié à l'intégration d'une grande partie de la production électrique à base de ressources renouvelables. En effet, avec des paliers de tensions caractéristiques favorables (BT et HTA) et une couverture territoriale étendue, il est naturellement prédestiné à la collecte de la production des Générateurs Electriques Distribués (GED) de petites et moyennes capacités typiques aux ressources renouvelables. Le développement de ces dernières à grande échelle, induirait donc de fait, une mutation structurelle profonde ainsi qu'un élargissement significatif du plan de charge du Gestionnaire du Réseau de Distribution (GRD). Celui-ci passerait, entre autres, du rôle de simple client à celui d'un partenaire majeur du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (GRTE) en matière de contrôle global des flux d'énergie et de coordination des services auxiliaires qui relevaient jusqu'ici exclusivement des prérogatives de ce dernier.

### III- Analyse des échanges d'énergie électrique

Une configuration simple mais assez représentative des échanges d'énergie électrique dans un réseau, peut être matérialisée par une cellule regroupant un générateur donné de tension  $V_r$ , connecté à une charge passive ou un autre générateur de tension  $E$  à travers une ligne d'impédance  $Z$  (Fig-1). En considérant les effets capacitifs négligeables le long d'une ligne de distribution, l'impédance caractéristique de cette dernière peut être modélisée par la mise en série d'une résistance  $R$  et une inductance  $L$  de valeurs globales représentatives [6].

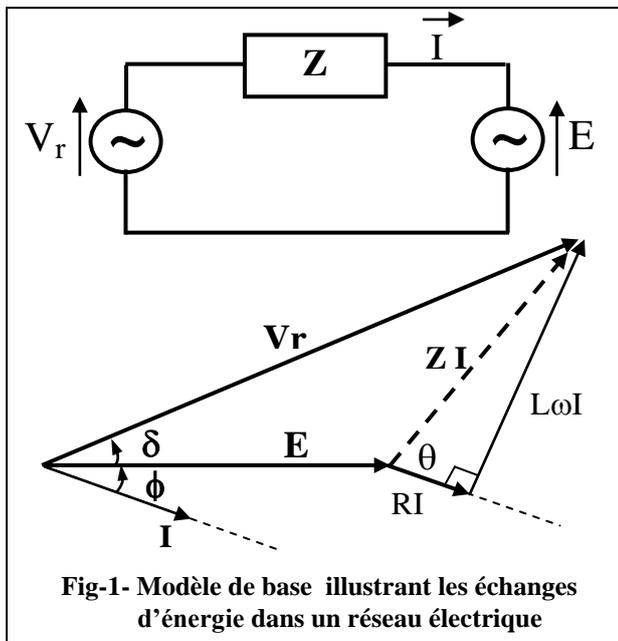


Fig-1- Modèle de base illustrant les échanges d'énergie dans un réseau électrique

En appliquant les lois classiques régissant les circuits électriques à courant alternatif et les outils appropriés permettant d'étudier le modèle retenu, les expressions finales des puissances active  $P$  et réactive  $Q$  échangées au nœud de tension  $E$  (supposé être récepteur) sont établies comme suit:

$$P = \frac{EV_r}{Z} \cos(\delta - \theta) - \frac{E^2}{Z} \cos \theta \quad (1)$$

$$Q = \frac{EV_r}{Z} \sin(\delta - \theta) - \frac{E^2}{Z} \sin \theta \quad (2)$$

avec :  $Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$  ,  $\theta = \arctg \frac{L\omega}{R}$ ,

$\omega = 2\pi f$ , ( $f$  : fréquence du réseau)

Dans le but de mener une analyse explicite des transits de puissance directement à partir de (1) et (2), l'hypothèse assez représentative d'une ligne sans pertes est adoptée ( $R=0$ ,  $\theta = \pi/2$ ), soit une impédance caractéristique  $Z$  qui se résume à une réactance ( $Z=X=L\omega$ ).

$$P = \frac{EV_r}{X} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q = \frac{E}{X} (V_r \cos \delta - E) \quad (4)$$

Les expressions ainsi simplifiées de  $P$  et  $Q$  (3,4), permettent en effet une quantification plus rapide des conditions

d'échange ainsi qu'une vision plus directe quant aux possibilités de contrôle de ces derniers.

En considérant la tension  $V_r$  comme étant celle imposée par le réseau, deux situations assez distinctes peuvent être considérées selon que le récepteur raccordé au nœud de tension  $E$  situé à l'autre bout de la ligne soit passif (consommateur) ou actif (lui-même générateur). Dans le premier cas, considérant une charge passive caractérisée par son facteur de puissance  $F_p$  ( $\cos \phi$ ), utilisé comme paramètre, les résultats mettent en évidence l'existence prévisible d'une limite théorique de la capacité de transit en termes de puissance active  $P$  de la ligne. L'expression analytique de cette dernière  $P_{max}$  pour une charge de facteur de puissance unitaire ( $P_{max} = V_r^2/2X$ ), pouvant être quantitativement validée à titre d'exemple (Fig-2).

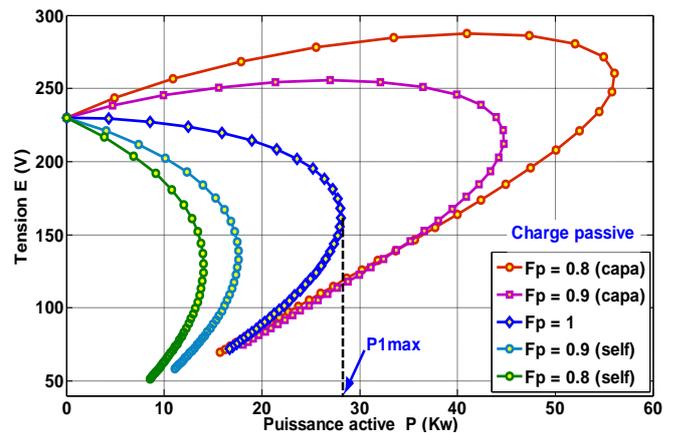


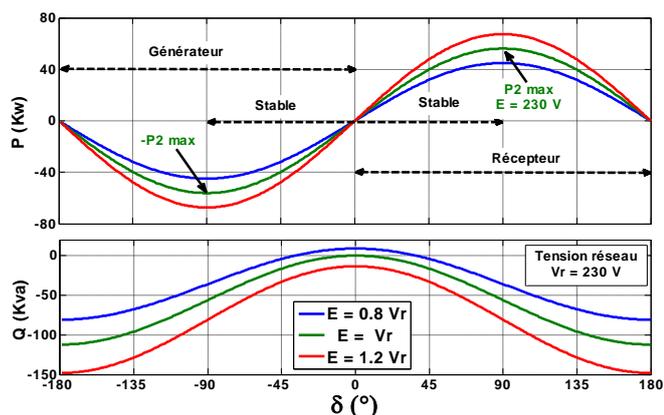
Fig-2- Variation de  $E$  en fonction de  $P$ . Cas d'une charge passive de facteur de puissance  $FP$  donné et  $X=0.943 \Omega$

Dans le second cas, la charge passive est remplacée par une source pouvant illustrer un générateur d'électricité distribuée (GED), imposant au nœud de raccordement correspondant une tension dont l'amplitude  $E$  et la phase  $\delta$  par rapport à  $V_r$  (Fig-1) peuvent être contrôlées. Ainsi, les transits de puissance qui restent régis par les mêmes relations (3) et (4), obéissent dans ce cas à une nouvelle approche qui laisse entrevoir de nouvelles perspectives quant à la gestion de l'intégration des énergies renouvelables au réseau de distribution.

Dans cette optique, une analyse des échanges de puissance entre le réseau imposant  $V_r$  et le GED fixant  $E$ , est menée en gardant les mêmes conventions pour le nœud de raccordement de ce dernier (récepteur). Cela étant afin d'illustrer au mieux les modifications fonctionnelles qui s'imposent à la ligne de distribution avec l'introduction d'une source d'énergie distribuée autre que celle conventionnelle généralement prélevée sur le réseau de transport et ce au niveau du poste de départ.

Considérant le cas général d'un GED réversible (avec stockage), deux situations particulières sont analysées selon que ce dernier soit apte ou pas à générer de la puissance réactive  $Q_{pv}$  tout en assurant le transit effectif de la composante active  $P_{pv}$ . Ces deux alternatives de fonctionnement, exclusivement assurées au niveau du convertisseur DC-AC (onduleur), permettent d'entrevoir des perspectives réelles quant à l'optimisation de l'intégration au réseau de la production d'électricité à base de solaire photovoltaïque et d'éolien.

Dans le cas général,  $P_{pv}$  étant imposé par la source de production (ensoleillement, vent...), le contrôle de  $Q_{pv}$  se fait selon une stratégie de fonctionnement préalablement fixée par le gestionnaire du réseau et élaborée entre autres afin d'aider au réglage du plan de tension [5]. Ainsi, hormis celle qui consiste à maintenir  $Q_{pv}=0$  ( $Fp=1$ ), initialement adaptée pour sa simplicité, mais qui a tendance à disparaître même pour les faibles puissances, la génération contrôlée d'énergie réactive au niveau des onduleurs connectés au réseau est devenue quasi systématique. Cette option contribue en effet à un réglage assez fin du plan de tension local et augmenter en conséquence les limites en termes de capacité d'accueil. C'est dans l'optique d'illustrer au mieux les principaux effets de l'énergie réactive, dont justement la possibilité de contribuer au réglage local de la tension, que les étapes ultérieures d'analyse et essais sont menés.



**Fig-3-** Variations de P et Q fournies par le réseau en fonction de  $\delta$ . Cas d'une ligne sans pertes ( $R=0, L=3 mH$ ), GED avec stockage (réversible) et imposant une tension E donnée.

Il apparaît que pour une amplitude fixée de la tension E du GED, le déphasage  $\delta$  de cette dernière par rapport à celle du réseau, devient l'unique paramètre de réglage des échanges en termes de puissance active P avec dans ce cas une limite théorique pour  $\delta = \pi/2$  ( $P_{max} = EV_r/X$ ) (Fig-3), soit le double du cas où E n'est pas imposée (Fig-2). Ainsi, le contrôle également recherché de la puissance réactive Q au niveau du GED peut être mené à travers l'amplitude de la tension de sortie E de l'onduleur au point de connexion avec le réseau.

#### IV- Plan de tension et capacité d'intégration locale

En pratique et faute de stockage, le fonctionnement de l'onduleur en tant que source de puissance s'impose afin de permettre l'injection en temps réel de la totalité de la production du GED (au fil du soleil ou du vent). De ce fait, l'élévation induite de la tension au point de raccordement se heurte à la limite réglementaire imposée par le gestionnaire du réseau dans le cadre de ses obligations contractuelles en matière de qualité de l'énergie fournie. A ce sujet, il est en effet tenu d'assurer le maintien de la valeur efficace de la tension en tout point du réseau dans une fourchette fixe autour d'une valeur nominale. Concernant le réseau national de distribution basse tension (BT), la valeur efficace nominale de cette dernière est fixée à 230 V pour la tension simple et 400 V entre phases. Il est également spécifié que les fluctuations de celle-ci doivent être circonscrites dans une fourchette de valeurs ne dépassant pas  $\pm 5\%$  dans les zones urbaines et  $\pm 10\%$  dans celles rurales [7].

En se basant sur cette contrainte, une illustration quantitative de la situation est menée sur la base d'une configuration assez simple de distribution BT, comportant six nœuds équidistants dont un seul associe un GED à base d'énergie solaire photovoltaïque (Fig-4-5-6). Les charges passives connectées à ces derniers, sont supposées présenter les mêmes seuils de consommation minimale et maximale en termes de puissance active  $P_{ch}$  et réactive  $Q_{ch}$  et ce pour des raisons évidentes de simplification. Ces données sont enfin complétées par des caractéristiques réalistes d'une ligne de distribution en milieu rural (Tab-1). Le modèle d'étude d'une telle configuration est reproduit de très près à l'aide des outils du toolbox Simpower-Systems sous Matlab/Simulink. Ainsi une évaluation quantitative par simulation du plan de tension le long de la ligne de distribution considérée, est menée dès la sortie du poste de départ, matérialisé par le transformateur abaisseur alimentant la ligne.

	Puissance active	Facteur de puissance
Charge max. totale	$P_{ch} = 5*8 KW$	0.85
Charge min. totale	$P_{ch} = 5*4 KW$	
Caractéristiques Linéiques /Km	$R = 0.328 \Omega$ , $L = 0.307 mH$ $C = 10^{-5} \mu F$	

Tab-1- Données de simulation

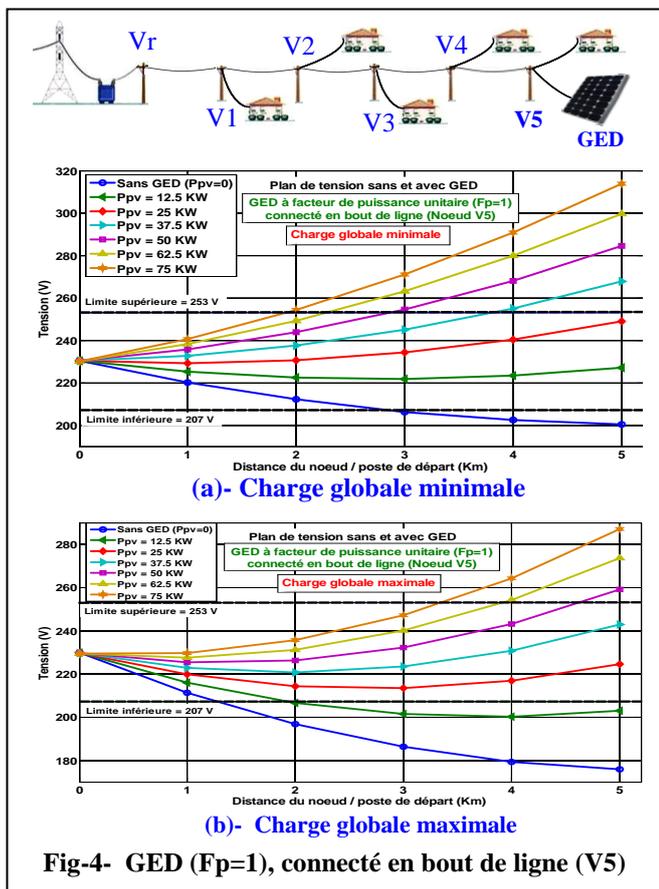
#### IV-1- Eléments d'analyse du plan de tension

Sachant que l'insertion d'une production décentralisée se traduit par une élévation de la tension dans une zone plus ou moins étendue autour du point de connexion, l'objectif ici est d'évaluer cette dernière afin de vérifier si les règles contractuelles (normes) relatives à cela sont toujours respectées. D'un autre côté, les fluctuations de tension pour une charge donnée étant essentiellement liées à la puissance active injectée par le GED ainsi que les impédances de ligne, plusieurs cas d'analyse sont menés afin de bien illustrer le rôle de l'énergie réactive générée en imposant un facteur de puissance  $Fp$  spécifique au GED à travers l'onduleur. En effet, malgré le fait que c'est la puissance active ( $P_{pv}$ ) générée par le GED qui définit son premier rôle, il reste néanmoins à considérer également sa capacité de générer ou pas de la puissance réactive ( $Q_{pv}$ ). Cette dernière pouvant être justement un élément déterminant quant à l'optimisation de la puissance utile ( $P_{pv}$ ) pouvant transiter sans altérer les nombreuses règles définissant la qualité requise de l'énergie échangée. Dans la même optique, sachant que cette dernière peut aussi dépendre de manière notable de la distribution des impédances de ligne autour du GED, l'emplacement de celui-ci, le long de la ligne de distribution, est également considéré. De ce fait, prenant le facteur de puissance  $Fp$  du GED ainsi que l'emplacement de son point de raccordement comme paramètres, plusieurs cas d'études sont menés avant de présenter les résultats les plus significatifs.

#### IV-2- Cas d'un GED à facteur de puissance unitaire

La principale spécificité des lignes de distribution d'énergie électrique en milieu rural, réside dans le fait que les distances entre les différents nœuds sont assez importantes comparées à celles observées en milieu urbain [8]. De ce fait et afin de

simplifier la présentation des résultats relatifs à la configuration étudiée, une distance constante de 1 Km entre nœuds successifs a été adoptée. Un profil simple d'injection d'une puissance croissante par gradins respectifs de 12.5 Kw à partir de zéro (sans GED) et allant jusqu'à 75 KW a été introduit (Fig-4-5-6). Ces derniers étant maintenus constants sur une durée suffisante pour permettre l'établissement du régime permanent et autoriser les mesures caractéristiques du plan de tension tel que défini par les différents standards correspondants.

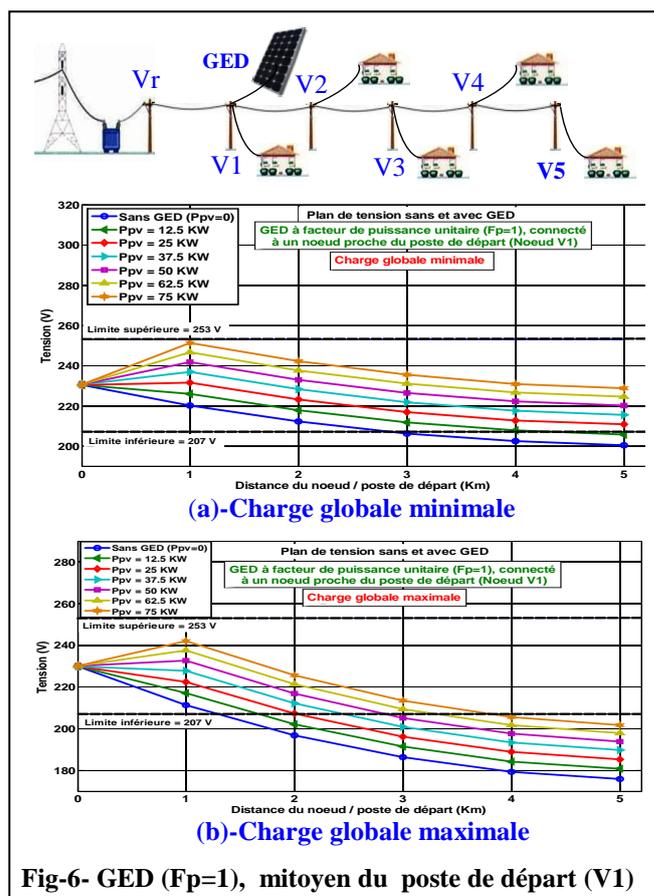
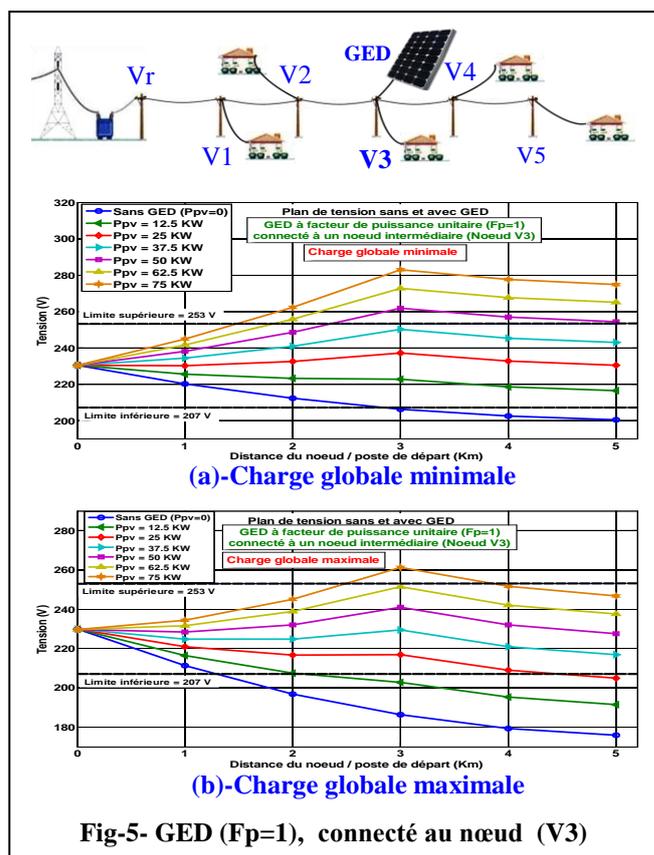


Les résultats obtenus dans ce cas ( $F_p=1$ ), permettent une appréciation significative des effets escomptés quant à l'introduction du GED considéré. Ainsi, il apparaît bien que c'est le cas avec charge globale minimale qui induit le maximum d'élévation de la tension au point de raccordement (Fig-4-5-6). Donc, c'est à partir de ce cas de figure que doit être évaluée la puissance maximale du GED ( $P_{pv-max}$ ), injectée sans transgression de la limite réglementaire imposée (253 V). Une analyse simple des résultats obtenus dans ce contexte précis (Fig-4-a, 5-a, 6-a), permet de déduire quantitativement les seuils suivants (Tab-2) :

Nœud de raccordement	V5	V3	V1
Capacité d'injection autorisée (KW)	25	37.5	75

Tab-2- Capacité d'accueil selon le nœud de raccordement

Ce sont les impédances de ligne relativement élevées entre nœuds successifs assez distants (cas rural), qui expliquent le fait que la limite de la capacité d'accueil peut varier de manière significative selon l'emplacement du point de raccordement du même GED.



En présence d'une charge globale maximale, il est notable que c'est plutôt le problème typique de baisse de tension, qui trouve sa solution dès que l'apport de puissance active du GED dépasse un seuil donné (Fig-4-b, 5-b). Il reste

cependant entièrement posé dans le cas du GED placé tout près du poste de départ (Fig-6-b). A noter que cette remarque peut être avantageusement mise à profit pour régler les problèmes récurrents de baisse excessive de tension pour les clients les plus éloignés du poste de départ de la ligne. Ceci est notamment le cas au niveau national, lors des pics de consommation en phase avec l'ensoleillement d'été et essentiellement dû au recours excessif à la climatisation.

### IV-3- Cas d'un GED avec réglage de puissance réactive

La puissance active  $P_{pv}$  injectée en temps réel par le GED étant strictement liée à la source renouvelable primaire (au fil du soleil ou du vent), le réglage de la puissance réactive reste à priori la seule alternative permettant de pallier au problème induit de l'élévation de la tension. En effet, l'objectif ici est de faire chuter la tension au point de raccordement au dessous du seuil imposé afin d'autoriser plus de puissance active à transiter, tout en respectant le plan de tension réglementaire. Ainsi, en plus du contrôle de  $P_{pv}$ , le réglage de la puissance réactive  $Q_{pv}$  au niveau de l'onduleur de connexion est également devenu une option incontournable. Dans ce contexte, ce sont plusieurs approches liées à la caractéristique même de réglage de  $Q_{pv}$  qui ont vu le jour dans le but de satisfaire les exigences spécifiques imposées par le gestionnaire du réseau concerné. Ce sont justement les deux alternatives les plus utilisées parmi ces dernières, qui sont analysées ici en vue de valider leur apport effectif quant à l'amélioration de la capacité d'accueil, comparativement au cas précédent avec onduleur à facteur de puissance unitaire.

#### IV-3-1- GED avec facteur de puissance imposé

Selon les résultats obtenus précédemment avec un onduleur à facteur de puissance unitaire (Fig-4-5-6), seuls les deux premiers cas (GED raccordé à V3 et V5) nécessitent le réglage de  $Q_{pv}$  afin d'augmenter le taux de puissance  $P_{pv}$  active injectée par rapport à celle disponible (75 KW). Ainsi, en imposant au GED un fonctionnement avec un facteur de puissance inductif ( $F_p=0.9$ ), les seuils de puissance active injectée  $P_{pv}$  n'induisant pas un dépassement de la tension limite, passent respectivement à l'échelon supérieur (Fig-7):

- 50 KW au lieu de 37.5 KW (GED connecté au nœud V3)
- 37.5 KW au lieu de 25 KW (GED connecté au nœud V5)

#### IV-3-2- GED avec facteur de puissance variable

Dans le cas précédent, l'objectif initial d'augmenter le seuil de la puissance active injectée est atteint grâce à l'adoption d'un facteur de puissance  $F_p$  exclusivement inductif. Si la baisse de tension désirée reste favorable dans ce cas en présence d'une charge globale minimale, elle peut cependant aggraver la situation en cas de charge globale maximale. En effet, c'est la limite inférieure de la tension imposée par la réglementation (207 V) qui est doublement transgressée dans ce cas, notamment par l'effet inductif supplémentaire introduit ( $F_p=0.9$  inductif). Afin de pallier à un tel inconvénient, une seconde alternative, réalisant un réglage plus ciblé de  $Q_{pv}$  en fonction de la tension au point de raccordement, est adoptée. En effet, le principe d'un facteur de puissance variable ( $P_{pv}$  imposé) étant toujours maintenu, cette approche permet d'ajuster  $Q_{pv}$  en signe (inductif ou capacitif) et en amplitude en fonction de l'écart de la tension par rapport à sa valeur nominale  $V_n$  (Fig-8).

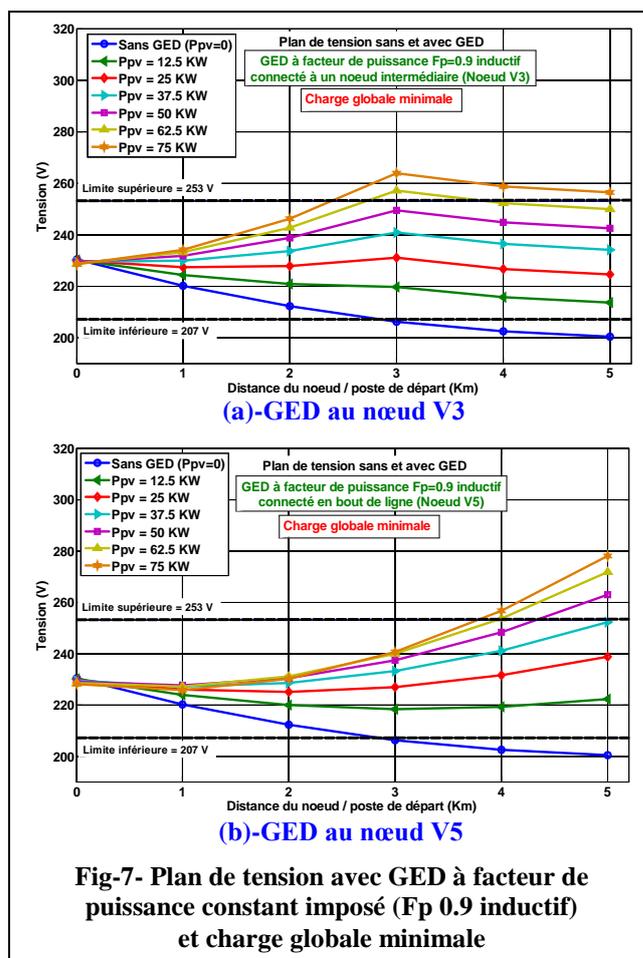


Fig-7- Plan de tension avec GED à facteur de puissance constant imposé ( $F_p$  0.9 inductif) et charge globale minimale

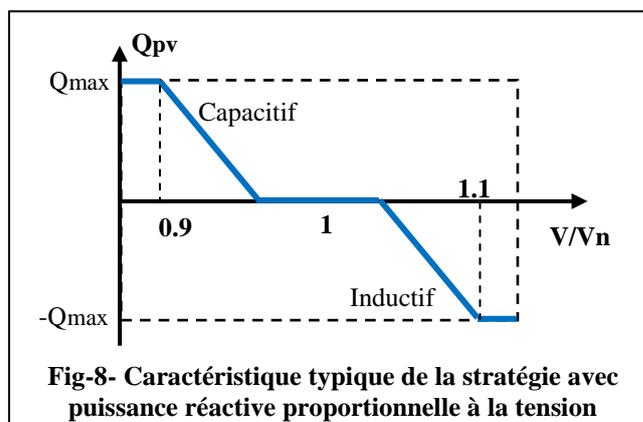
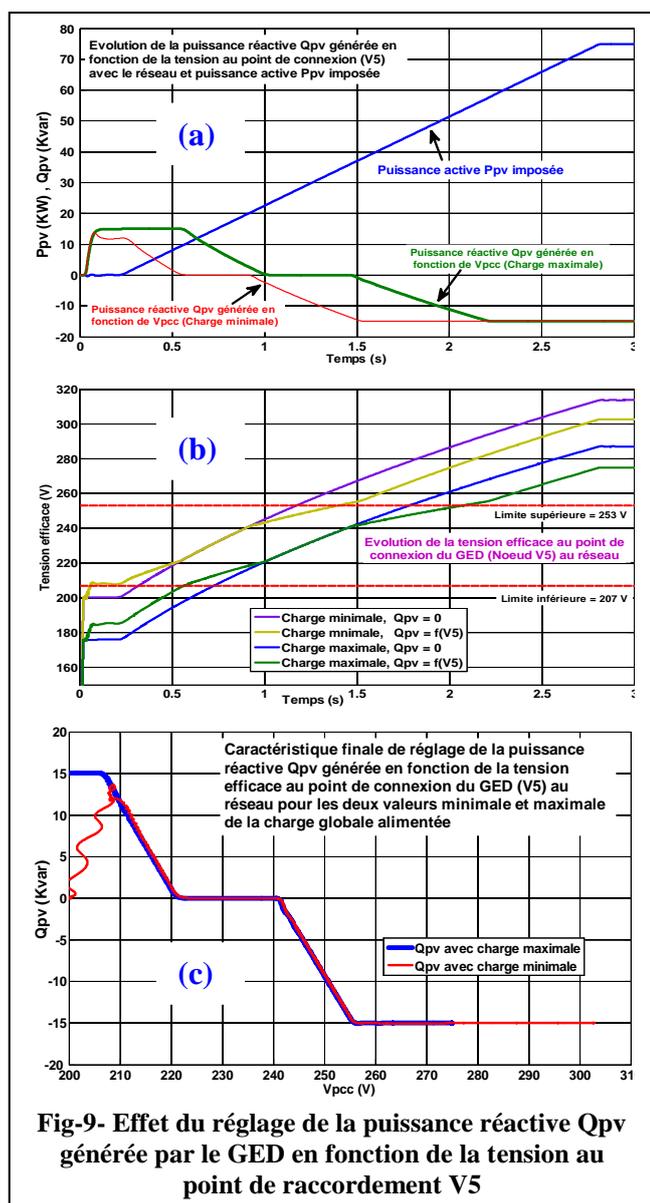


Fig-8- Caractéristique typique de la stratégie avec puissance réactive proportionnelle à la tension

Suite à l'implémentation de la stratégie ainsi définie, deux essais sont menés avec charge globale minimale puis maximale afin de solliciter les deux zones de fonctionnement avec puissance réactive inductive et capacitive (Fig-9-a et c). En adoptant une évolution linéaire de  $P_{pv}$  entre 0 et 75 KW (Fig-9-a) et non par paliers de 12.5 KW comme précédemment, une évaluation assez fine de l'amélioration attendue peut être menée. Comme résultat, la plage permise à l'injection de puissance active  $P_{pv}$  par le GED, est plus étendue dans ce cas (10 à 35 KW). Ceci étant que ce soit avec charge globale maximale ou minimale, au lieu de 15 à 28 KW avec,  $F_p=1$  ( $Q_{pv}=0$ ; Fig-9-b). Quant aux résultats montrant l'évolution de  $Q_{pv}$  en fonction de la tension au point de raccordement (V5) du GED, ils illustrent bien le fait que la caractéristique de contrôle de la puissance réactive adoptée (Fig-8), a été efficacement implémentée (Fig-9c).



**Fig-9- Effet du réglage de la puissance réactive  $Q_{pv}$  générée par le GED en fonction de la tension au point de raccordement  $V_5$**

## V- Conclusion

Une démarche assez simple a été suivie afin d'illustrer une des nombreuses contraintes techniques qui peuvent à priori limiter l'accès au réseau de distribution des productions réparties notamment à base de ressources renouvelables. Les conséquences de l'inhérente élévation locale de la tension autour du point de raccordement des GED, fonctionnant en source de puissance et non de tension, ont ainsi été mises en évidence et analysées. En utilisant comme support une configuration radiale simple mais assez représentative du réseau de distribution, plusieurs cas d'étude ont été menés. A cet effet, ce sont l'emplacement du point de raccordement du GED et la stratégie spécifique à celui-ci en matière de génération d'énergie réactive, qui ont servi de paramètres. Dans ce contexte, le premier scénario a consisté à mener des simulations en présence d'un onduleur à facteur de puissance unitaire. Une évaluation quantitative du seuil maximum de puissance active pouvant être injecté conformément à la réglementation du plan de tension en vigueur, a ainsi été menée. Les résultats, prévisibles dans ce cas, ont surtout donné lieu à une évaluation quantitative des seuils admissibles selon l'emplacement considéré du point de

raccordement du GED. Ces derniers, servant de référence, ont ainsi permis de quantifier l'avantage d'un réglage simultané de la puissance réactive en vue d'améliorer la capacité d'accueil de celle active, tout en respectant le plan de tension réglementaire. Dans cette perspective, deux alternatives ont été considérées et analysées selon le choix de la stratégie de contrôle adoptée. Ainsi, en optant en premier pour un onduleur assurant un facteur de puissance inductif constant, une augmentation notable de la puissance active injectée a pu être observée. Toutefois, sachant que cela engendrait de fait une baisse de tension supplémentaire préjudiciable en cas d'une charge élevée, une deuxième approche a été introduite. Celle-ci repose en effet sur une caractéristique de réglage permettant d'ajuster la puissance réactive échangée en signe (inductif ou capacitif) et en amplitude en fonction de l'écart de la tension, mesurée au point de raccordement, par rapport à sa valeur nominale. Les résultats obtenus et présentés dans ce cas, illustrent bien le fait qu'un tel réglage répond, dans une certaine mesure, à l'ensemble des problèmes de plan de tension, typiques de l'intégration des productions décentralisées d'électricité au réseau, notamment celles à base de ressources renouvelables.

## Bibliographie

- [1]-REN21. 2017, "Renewables 2017 Global Status Report". ISBN 978-3-9818107-6-9.
- [2]- Jens. C. Boemer et al, "Overview of German Grid Issues and Retrofit of Photovoltaic Power Plants in Germany for the Prevention of Frequency Stability Problems in Abnormal System Conditions of the ENTSO-E Region Continental Europe", 1st International Workshop on Integration of Solar Power into Power Systems, 24 October 2011, Aarhus, Denmark
- [3]- M. Crappe, "Contraintes techniques de l'intégration de la production décentralisée aux réseaux électriques", Revue Evtuiedschrift N°2/2002, pp.,37-41 de la Société Royale Belge des Électriciens
- [4]- H. Colin, C. Duvauchelle, G. Moine, Y. Tanguy, B. Gaidon (HESPUL), T. Tran-Quoc, "Raccordement des installations photovoltaïques au réseau public de distribution électrique à basse tension", Rapport ESPRIT, ADEME, Avril 2010.
- [5]- Thomas Ackermann et al. "Scaling up variable renewable power: The role of Grid Codes", IRENA Report 2016.
- [6]- Jean-Louis LILIEN, "Transport et Distribution de l'Énergie Électrique – Manuel de travaux pratiques", Cours\_Université de Liège, Belgique, 2000.
- [7]- "Art. 5 .du décret exécutif n° 10-138 du 28 du13/05/2010, fixant les règles techniques de conception, d'exploitation et d'entretien des réseaux de distribution de l'électricité et du gaz", Journal Officiel de la RADP, N° 33 du 19 mai 2010
- [8]- Rita Pinto, Sílvio Mariano, Maria do Rosário Calado and José Felipe de Souza, "Impact of Rural Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems on Power Quality", Energies 2016, 9, 739; doi:10.3390/en9090739.