

Production décentralisée d'énergie électrique d'origine renouvelable et éclairage basse consommation

Manuela Sechilariu, Fabrice Locment, Cristian Demian

UTC, Equipe AVENUES

Université de Technologie de Compiègne, BP 60319, Compiègne 60203 Cedex, France

manuela.sechilariu@utc.fr

RESUME. Cette communication porte sur la modélisation, la simulation et l'expérimentation électrique et énergétique d'un système d'éclairage d'intérieur basse consommation alimenté par champ photovoltaïque. L'objectif principal est de repenser les architectures électriques internes des bâtiments et de démontrer la viabilité de l'introduction des réseaux à courant continu dans les bâtiments tertiaires, dans le but de supprimer des conversions énergétiques multiples pour des charges de faible puissance. Pour analyser le système proposé, nous avons réalisé les modèles énergétiques des éléments constitutifs, regroupés ensuite dans un modèle numérique global, basé sur les résultats issus de tests expérimentaux. Ceci permet d'extrapoler la théorie pour un dimensionnement optimal et d'identifier les adaptations nécessaires. Les résultats concernent principalement la viabilité d'un système électrique hybride (courant alternatif et courant continu) dans un bâtiment équipé en énergies renouvelables et la prospective d'utilisation des diodes électroluminescentes alimentées en courant continu pour l'éclairage intérieur.

MOTS-CLÉS : photovoltaïque, éclairage, efficacité énergétique globale.

ABSTRACT. This communication relates to the electrical energy modelling, simulation and testing of a photovoltaic-powered low consumption indoor lighting system. The main objective is the redefinition of building's electrical architecture and to demonstrate the viability of direct current power supply for a tertiary building equipped with renewable energy sources, with an aim of elimination of multiple energy conversion for low power loads. The analysis of this system is based on experimentation results. A global numerical model was design according to energy models' components. This helps to extrapolate the optimal design and identify the necessary adjustments. The mainly results concern the viability of a hybrid electrical network (alternating current and direct current) for tertiary buildings equipped with direct current renewable energy sources and the prospective use of photovoltaic-powered light-emitting diodes for indoor lighting, in order to increase the global energy efficiency.

KEYWORDS: photovoltaic, lighting system, global energy efficacy.

1. INTRODUCTION

Le concept de bâtiment à énergie positive vise le développement de bâtiments à très haute performance énergétique alimentés par des énergies renouvelables. Ces bâtiments pourraient progressivement assurer leurs propres besoins en énergie électrique, et même à long terme restituer l'énergie non consommée sur le réseau. On peut rendre les bâtiments semi autonomes en énergie électrique, par le développement de la production locale d'énergies renouvelables, à condition d'être capable d'optimiser les moyens de production, de stockage, de conversion et de consommation. Cette étude s'inscrit dans un contexte d'anticipation. On observe d'une part, le progrès fulgurant de la technologie des diodes électroluminescentes (LED¹) pour les sources d'éclairage, et, d'autre part, le développement rapide du photovoltaïque surimposé ou intégré au bâtiment. Cela suppose une arrivée

¹ LED : *light electric diode*, ci-après LED est la dénomination des diodes électroluminescentes.

massive des deux technologies à l'horizon des années 2020. Par ailleurs, un des grands défis techniques qui peine à être relevé dans le bâtiment, est celui d'utiliser l'électricité produite localement où, quand et dans la forme dont elle est produite, et que le réseau public soit vu comme un appoint (Sechilariu, 2007-1). Certes, ceci ne peut être applicable que dans certains cas, comme les bâtiments tertiaires (espaces de travail, bureaux, commerces), dont les besoins électriques sont très présents pendant la journée, soit la période active des panneaux photovoltaïques (PV). L'avènement de ces deux technologies, PV et LED, offre donc une opportunité de relever ce défi. Mais, s'il est vrai qu'une véritable révolution technologique et économique est en marche, elle n'en est cependant qu'à ses prémices, ce qui permet, temporairement, de se placer en amont des intérêts industriels.

Différentes études, qui visent la recherche de performances énergétiques et le dimensionnement optimal pour un bâtiment, démontrent les avantages des PV, qui délivrent de l'énergie en courant continu (c.c.), en couplage direct sur des charges électriques c.c. à faible consommation, telles que les lampes à base de LEDs (Thornton *et al.*, 2004) (Yutao *et al.*, 2004) (Yutao *et al.*, 2005). C'est typiquement le cas des bâtiments qui ont un besoin en éclairage artificiel pendant la journée et avec des niveaux d'éclairage élevés à maintenir (Hoffmann, 2007).

Dans cet article nous présentons et analysons d'abord le système de production d'électricité décentralisée d'origine photovoltaïque dans la configuration de bus c.c., d'une part, pour une alimentation des charges c.c., et d'autre part, pour une alimentation des charges en courant alternatif (c.a.) précédée de la transformation c.c. en c.a., par l'intermédiaire d'un onduleur. Ensuite, nous présentons le système d'éclairage en tant que charge : lampe à base de LEDs blanches de haute puissance et tube fluorescent (TF) T5. Les deux types de lampe sont alimentés à l'aide des convertisseurs statiques (c.c./c.c. et c.a./c.c.), et respectivement des ballasts électroniques (c.c./c.a. et c.a./c.a.), chacun adapté à sa charge. Le descriptif matériel ainsi que les tests expérimentaux réalisés pour chaque type de lampe sont donnés. Les mesures électriques et le calcul des rendements de convertisseurs nous conduisent à une modélisation numérique du système global, sous MATLAB Simulink. Le modèle ainsi obtenu nous permet la simulation du système pour une charge variable, le cas typique de fonctionnement d'un bâtiment. Nous concluons sur le rendement total du système de production PV dans les deux cas, c.c. et respectivement c.a., en mettant en évidence l'enchaînement des conversions énergétiques multiples. L'analyse de l'efficacité énergétique de chaque composant nous permet de d'identifier les configurations optimales pour certaines applications et de mettre en évidence les principaux inconvénients.

2. ECLAIRAGE BASSE CONSOMMATION ALIMENTE EN PHOTOVOLTAIQUE

Dans notre cas d'étude, la production décentralisée d'électricité d'origine renouvelable concerne les bâtiments tertiaires qui consomment leur propre production. Alors, il est légitime de s'interroger sur la possibilité d'alimenter des charges électriques directement en c.c. (Robinson, 2005) (Sechilariu, 2007-2). Concernant les bâtiments tertiaires nous observons l'augmentation du nombre d'équipements qui fonctionnent en interne avec du c.c. mais qui, étant alimentés en c.a., doivent effectuer une conversion. Nous donnons quelques exemples de charges concernées par le c.c. : les équipements à base de microprocesseurs (informatiques et péri-informatiques), l'éclairage à base de LEDs, l'éclairage de secours, les alimentations de secours. Une autre réalité marquante est l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments en utilisant les variateurs de fréquence qui, dans leur dernier

étage, transforment un signal c.c. en un signal c.a. à des niveaux différents de tensions et de fréquences. Nous pouvons citer les ballasts électroniques pour l'éclairage fluorescent et les variateurs de vitesse des moteurs qui équipent les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (George, 2006). Ces exemples réunis représentent un pourcentage non négligeable de charges concernées par le c.c. pour un bâtiment tertiaire. Certains travaux montrent déjà la faisabilité de leur alimentation directement en c.c. (Barker *et al.*, 2003) (Crudelle *et al.*, 2004) (Baldwin *et al.*, 2005).

2.1. PRESENTATION DU SYSTEME ETUDIE : BUS C.C./C.C. ET BUS C.C./C.A.

Supposons une production locale d'énergie électrique c.c. à partir d'un générateur PV, en complément du réseau national, qui, à travers les convertisseurs nécessaires, alimente deux types de charges : lampe à base de LEDs et TF type T5. Ce système, complété d'une batterie et son régulateur-chargeur, est présenté sur la figure 1. Le générateur PV possède une caractéristique courant-tension déterminée selon la température du panneau et le rayonnement solaire momentané, laquelle présente, dans un point déterminé, une puissance maximale P_{MPP} . Cette puissance est obtenue grâce à la commande de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) associée au convertisseur (Muller, 2006). La liaison avec le réseau public est une connexion utilisable uniquement en cas de besoin.

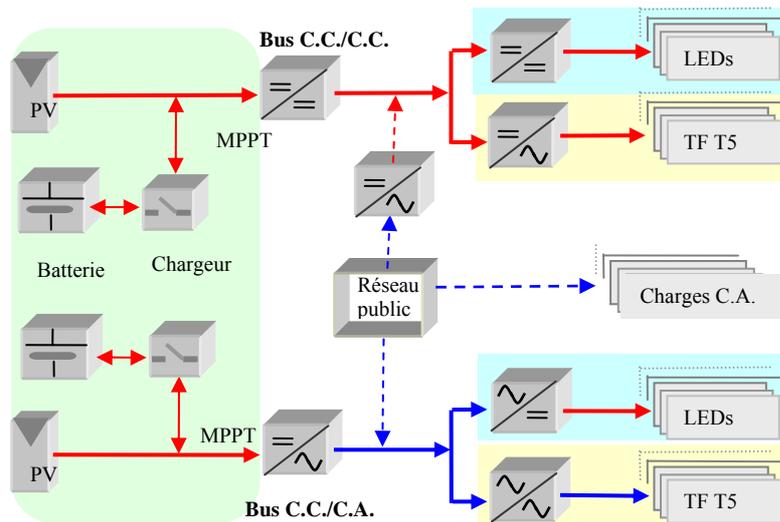


Figure 1 : Configuration de bus c.c./c.c. et bus c.c./c.a.

Pour assurer un échange d'énergie entre le générateur PV et l'éclairage, le 1^{er} cas pris en considération c'est le bus c.c./c.c., avec l'interface de puissance, le « hacheur » c.c./c.c. Ce réseau alimente le convertisseur c.c./c.c. spécifique pour l'alimentation d'une lampe à LEDs et le ballast continu (c.c./c.a.) pour le TF. Le 2^e cas, c'est le bus c.c./c.a., tel que proposé traditionnellement pour la production d'électricité d'origine renouvelable.

Cette deuxième configuration impose un onduleur avant le couplage avec les charges alimentées habituellement en alternatif. Cet onduleur, soit la conversion c.c./c.a., est l'objet de plusieurs recherches et développements qui visent une nette amélioration de son rendement (max. 95%) et de la qualité du signal de sortie. Nous considérons comme charges les mêmes sources d'éclairage, lampe à LEDs et TF T5, mais alimentées cette fois par des convertisseurs adaptés en entrée au c.a. L'objectif principal est l'amélioration de l'efficacité énergétique du système globale source - charge, et donc, la réduction du nombre de conversions énergétiques. Pour cela, la comparaison énergétique des deux bus, c.c./c.c. et c.c./c.a., est nécessaire.

2.2. CONVERSION D'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE

La configuration du système expérimental comporte un générateur PV (2x125Wc sous conditions STC²). Pour le bus c.c./c.a. nous avons choisi un onduleur PV supposé délivrer une puissance

² STC : température de la cellule solaire de 25°C et 1000W/m² de radiation solaire.

maximale de 175Wc. L'onduleur a un rendement maximum de 94%, d'après la référence CEC³ qui recense plusieurs types d'onduleur PV en provenance de divers fabricants. A partir d'au moins cinq essais dans différentes conditions climatiques, il est calculé un rendement moyen, soit *CEC Efficiency*, tel que l'exemple illustré sur la figure 2. Quant au bus c.c./c.c., il est difficile de choisir un convertisseur réel du marché, car il n'existe pas de « hacheur » PV de série, à notre connaissance.

Rated Maximum Continuous Output Power: 175 W Night Tare Loss: 0.58 W

Vmin: 25 Vdc Vnom: 32.5 Vdc Vmax: 40 Vdc

Input Voltage (Vdc)	Power Level (%; kW)						Wtd
	10%	20%	30%	50%	75%	100%	
Vmin 25	87.4	92.7	93.9	94.6	94.5	92.5	94.0
Vnom 32.5	86.3	91.8	93.6	94.4	94.8	94.5	94.1
Vmax 40	85.4	91.5	92.9	94.0	94.7	94.8	93.8

Figure 2 : Rendement maximum d'un onduleur PV. Source CEC

Sachant qu'à puissance et taille comparable, un convertisseur c.c./c.c. a moins de pertes qu'un convertisseur c.c./c.a., dans la suite de cette étude, nous considérons un « hacheur » de même rendement énergétique que l'onduleur PV.

2.3. CHARGE : ECLAIRAGE A BASE DE LEDS

Issues des recherches sur la technologie des semi-conducteurs, les LEDs peuvent être alimentées à partir de c.c. ou de c.a. à travers des convertisseurs spécifiques. Le système expérimental choisi (voir figure 3) se compose d'une lampe *Luxeon Flood* à 12 LEDs blanches de haute puissance, 700mA, 24Vc.c. alimentée à travers les 2 convertisseurs choisis pour un fonctionnement énergétique optimal :

- convertisseur c.c./c.c., tension d'entrée $U_e = 18 - 36V$ c.c., courant de sortie $I_s = 0,7A$ c.c.
- convertisseur c.a./c.c., tension d'entrée $U_e = 230V$ c.a., courant de sortie $I_s = 0,7A$ c.c.

V_e (V)	I_e (A)	P_e (W)	I_s (A)	V_s (V)	P_s (W)	η (%)	I_{c-c} (A)	P_e (W)	I_s (A)	V_s (V)	P_s (W)	η (%)
18	1	18	0,7	23,6	16,52	91,77	0,28	22,76	0,7	23,1	16,17	71,01
24	0,785	18,84	0,7	23,5	16,45	87,31						
30	0,64	19,2	0,7	23,45	16,41	85,49						
36	0,54	19,44	0,7	23,4	16,38	84,25						

Tableau 1 : Mesures c.c./c.c. LEDs

Tableau 2 : Mesures c.a./c.c. LEDs

Les résultats des mesures effectuées sont donnés dans les tableaux 1 et 2. La source de tension utilisée est une source continue variable, et respectivement une source alternative de 230V. Les rendements η sont calculés à partir des puissances d'entrée P_e et des puissances de sortie P_s . La figure 4 illustre les points de rendements énergétiques obtenus dans les deux cas d'alimentation.

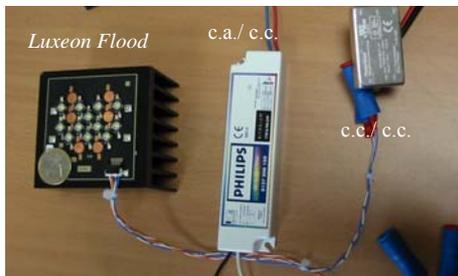


Figure 3 : Système LEDs

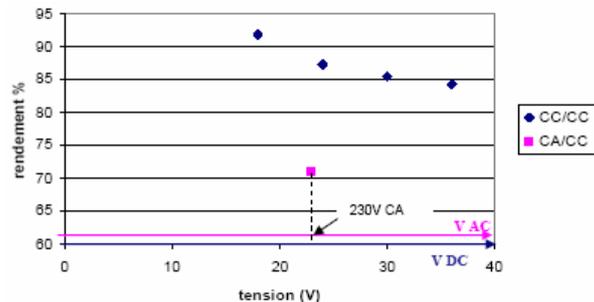


Figure 4 : Rendements des convertisseurs LEDs

Bien que les convertisseurs aient été choisis avec un grand soin en ce qui concerne les paramètres de la lampe à LEDs et la qualité de fabrication, on note la supériorité de l'efficacité du système

³ CEC : Consumer Energy Center (CEC) of California Energy Commission

convertisseur – lampe alimenté en continu par rapport à celle en alternatif.

2.4. CHARGE : ECLAIRAGE FLUORESCENT TF T5

La source d'éclairage basse consommation fluorescente choisie se compose d'un tube T5, 14W, puissance proche de celle de la lampe à LEDs. Le tube T5 est alimenté à travers les deux ballasts électroniques choisis pour un fonctionnement énergétique optimal (voir figure 5) :

- ballast c.a./c.a., tension d'entrée $U_e = 230 - 240V$ c.a., 50-60Hz
- ballast c.c./c.a., tension d'entrée $U_e = 20 - 30V$ c.c.

V_e (V)	I_e (A)	I_s (A)	V_s (V)	η (%)
20	0,78	0,161	95,16	98,75
22,5	0,76	0,181	90,14	95,73
25	0,74	0,192	85,57	88,89
27,5	0,72	0,202	83,19	84,95
30	0,70	0,21	80,87	80,61

Tableau 3 : Mesures c.c./c.a._TFT5

V_e (V)	I_{c-c} (A)	I_s (A)	V_s (V)	η (%)
232,5	0,078	0,186	15,121	83,38

I_{c-c} : courant d'entrée crête-à-crête

Tableau 4 : Mesures c.a./c.a._TFT5

Les résultats des mesures effectuées sont donnés dans les tableaux 3 et 4. Les grandeurs de sortie sont en valeur efficace sur tout le spectre de fréquence. La source de tension utilisée est une source continue variable, et respectivement une source alternative de 230V. La figure 6 illustre les points de rendements énergétiques obtenus dans les deux cas d'alimentation.

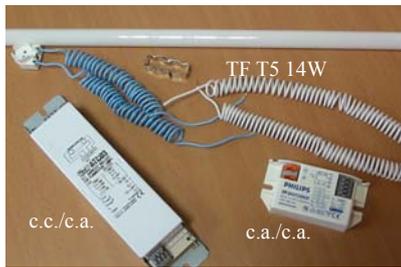


Figure 5 : Tube T5 et ses ballasts

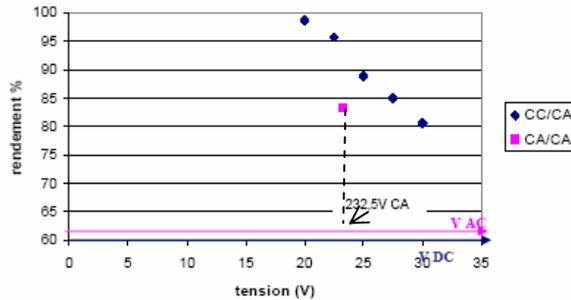


Figure 6 : Rendement des convertisseurs pour TF T5

Les ballasts alternatifs sont utilisés dans la plupart des installations d'éclairage des bâtiments, contrairement aux ballasts continus qui sont très rares et difficiles à trouver sur le marché existant. Les rendements obtenus montrent que l'efficacité du système ballast – lampe alimenté en c.c. est supérieure à celle obtenue en c.a. Ceci était prévisible, car la conversion effectuée par le ballast c.a./c.a. comporte un étage intermédiaire en c.c. et, donc, induit des pertes supplémentaires.

3. MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME GLOBAL

Les mesures électriques et le calcul des rendements des convertisseurs nous conduisent à une modélisation énergétique du système global, sous MATLAB Simulink. A partir des caractéristiques électriques de la source PV et de la charge présentées précédemment, le système global, par type de bus utilisé, a été modélisé. Dans l'hypothèse de travail annoncée, de consommer l'électricité produite localement où, quand et dans la forme dont elle est produite, la performance globale du système de production pour chaque bus est calculée en prenant en compte la dynamique du système :

- tension variable en sortie de PV : 20V, 30V, 40V,

- puissance variable pour la charge globale d'éclairage : de 1 à 4 lampes à LEDs et de 1 à 4 TF.

A ce stade de l'étude, la modélisation détaillée du fonctionnement du PV avec la commande MPPT n'est pas prise en compte. L'objectif est de comparer l'efficacité énergétique du système dans les deux cas de bus utilisés, c.c./c.c. et respectivement c.c./c.a., en mettant en évidence l'enchaînement des conversions énergétiques multiples.

3.1. BUS C.C./C.A.

La configuration simplifiée du système étudié est illustrée sur la figure 7. Le schéma synoptique du modèle énergétique obtenu sous MATLAB Simulink est donné sur la figure 8.

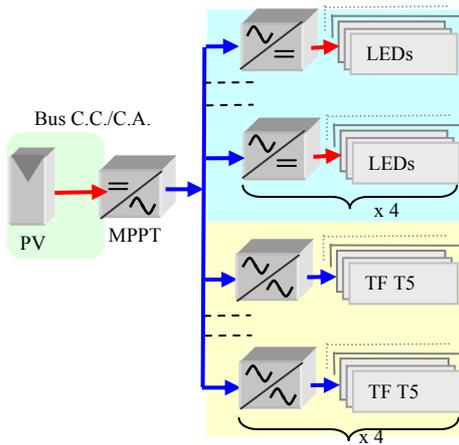


Figure 7 : PV – éclairage en C.C./C.A.

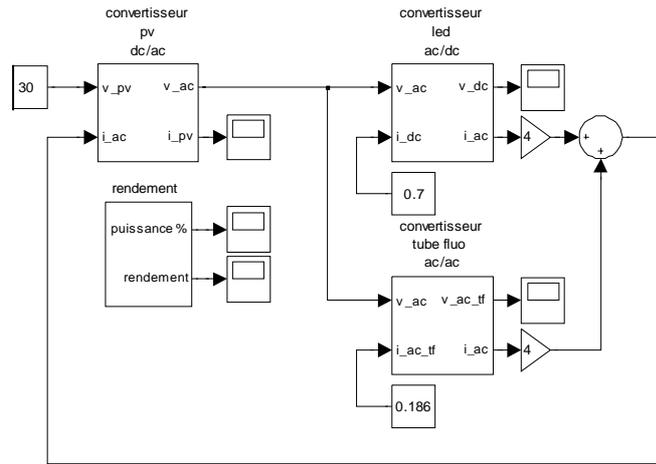


Figure 8 : Synoptique de simulation en Matlab

La simulation du modèle est réalisée avec une tension c.c. variable en entrée de l'onduleur : 20V, 30V, 40V. L'éclairage est simulé comme étant une charge variable, de 1 à 4 lampes à LEDs et TF. En suivant le nombre de lampes (voir figure 9a) et la variation de la tension continue donnée par le PV, les courbes de rendements (voir figure 9b) démontrent une meilleure efficacité de fonctionnement pour la pleine charge jusqu'à la moitié de la charge nominale. On observe la supériorité des rendements impliqués par les ballasts par rapport aux convertisseurs c.a./c.c. des LEDs. En effet, depuis quelques années, des efforts considérables ont été faits dans l'augmentation des performances lumineuses des LEDs, mais leur alimentation reste à améliorer. Pour une entrée de 20V c.c., l'efficacité est nettement supérieure. Les courbes suivent les tendances données par le rendement de l'onduleur PV choisi.

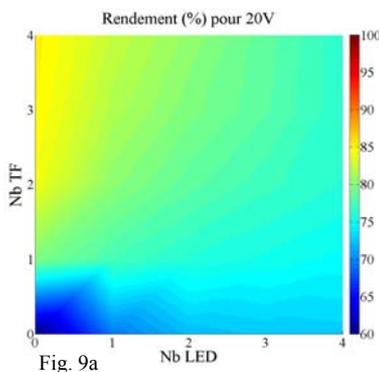


Fig. 9a

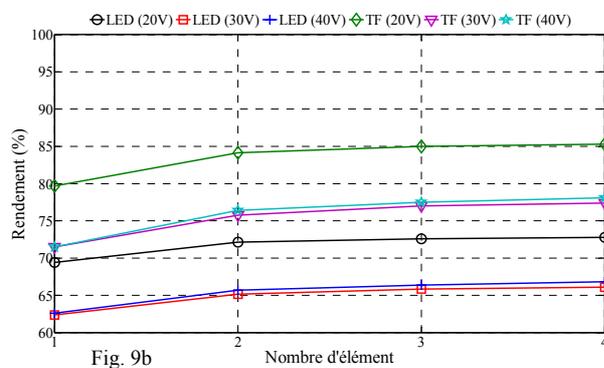


Fig. 9b

Figure 9 : Rendements du système global en configuration de bus C.C./C.A.

3.2. BUS C.C./C.C.

Nous appliquons strictement la même démarche pour la simulation du système source – éclairage avec le bus c.c./ c.c. Les résultats obtenus sont donnés sur les figures 10a et 10b.

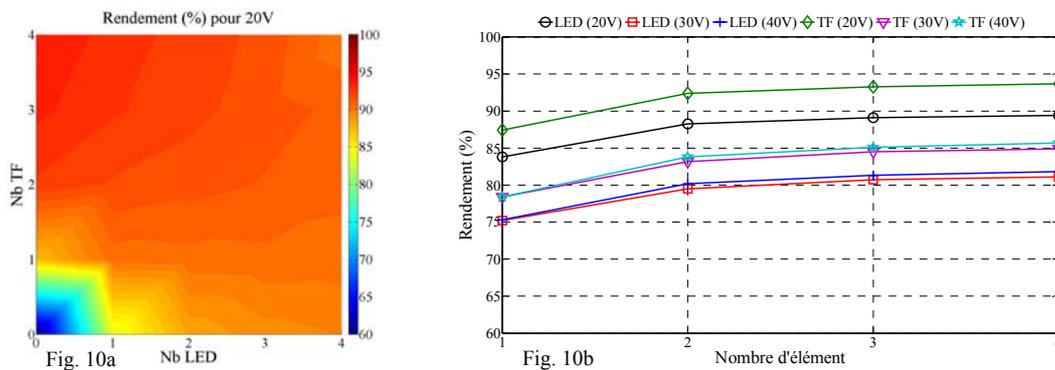


Figure 10 : Rendements du système global en configuration de bus C.C./C.C.

Les courbes des rendements obtenus suivent les tendances vues précédemment, à la seule différence que les valeurs maximales atteintes sont supérieures à celles obtenues dans le cas c.c./c.a.

4. COMPARAISON D'EFFICACITE ENERGETIQUE GLOBALE DU SYSTEME C.C. ET C.A.

L'analyse des rendements énergétiques permet d'identifier les configurations optimales pour certaines applications et de mettre en évidence les principaux inconvénients. Dans le cas du bus c.c./c.c. les rendements énergétiques sont bien supérieurs pour les deux types de charge étudiés. La figure 11 illustre clairement cette différence notamment dans le cas de la lampe à LEDs. Cela prouve que, pour une énergie photovoltaïque produite localement et dans l'hypothèse d'une utilisation où, quand et dans la forme dont elle est produite, il est judicieux d'étudier la mise en place d'un réseau c.c. d'alimentation du système d'éclairage. Ainsi, les étages de conversion électrique sont réduits au minimum. En revanche, la topologie et la construction des convertisseurs c.c./c.c., ainsi que c.c./c.a., doivent être améliorées, ce qui est technologiquement possible.

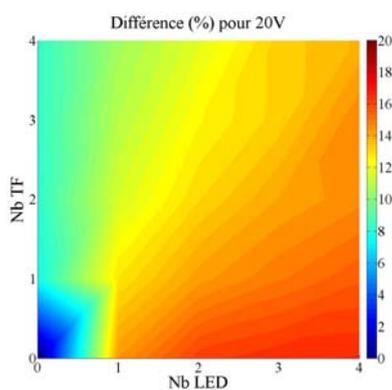


Figure 11 : Différence entre les efficacités énergétiques des 2 bus

Une future implantation d'un tel système, PV – éclairage basse consommation, dans les bâtiments tertiaires, est faisable à condition de choisir les convertisseurs bien adaptés à leur charge, un à un. Dans le cas d'une lampe à éclairage variable, les convertisseurs doivent avoir chacun une commande adaptée sinon, leurs rendements baissent rapidement pour des fonctionnements à moins de 50% de la puissance nominale. La commande concerne aussi les « hacheurs » dédiés à la production PV en bus c.c./c.c. La commande de ces derniers devrait être conçue en prenant en compte la variation de la puissance globale du système d'éclairage du bâtiment.

5. CONCLUSION

La production d'énergie photovoltaïque peut alimenter, en couplage c.c./c.c., un système d'éclairage basse consommation avec une efficacité globale bien supérieure au couplage traditionnel

c.c./c.a. Une construction optimisée énergétiquement des convertisseurs de la chaîne de production pourrait accroître encore plus cette efficacité. D'autre part, disposer d'autant de convertisseurs qu'il y a de lampes et de les choisir chacun bien calibrés à la puissance nominale de la charge, présente l'avantage d'obtenir un rendement individuel et une performance globale du système plus élevés. Les LEDs, en tant que source d'éclairage général d'intérieur, sont sans doute la lumière du futur mais pas celle de demain. Il y a beaucoup de travaux dans ce domaine, mais il y a une grande différence entre un dispositif de démonstration et la réalité. Une des principales barrières technologiques et scientifiques est l'efficacité globale pour une puissance et un type d'alimentation électrique donnés. Le rendement du convertisseur des LEDs blanches de haute puissance est un paramètre critique qui pourrait aider la LED à devenir la source d'éclairage préférée pour une alimentation photovoltaïque en couplage direct.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Baldwin M., Geary D. (2005). High-Reliability DC Power Distribution System for Critical Power Environments. *Proc. of the 7x24 Exchange National Conference*, Boca Raton, USA, CDRom.
- Barker P.B., Crudelle F.D., Langlery R., Mansoor A., Peterson T. (2003). Lauby, M.: Enhancing the Economics of Photovoltaic Power Generation with Innovative DC Applications. *Proc. of the IERE Central America Forum & General Meeting*, San Jose, Costa Rica, CDRom.
- Crudelle F.D., Key T., Mansoor A. (2004). Commercial and Industrial Applications-Getting Ready for DC Power Distribution. *Proc. of the IEEE Power Systems Conference and Exposition*, New York, USA, CDRom.
- George K. (2006). DC Power Production, Delivery and Utilization. White Paper of EPRI (Electric Power Research Institute, www.epri.com).
- Hoffmann W. (2007). Evolution and Perspectives of the Global and European Markets and Potential Cost Reductions. *Proc. of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSECPIA)*, Milan, Italy, CDRom.
- Muller J.-C. (2006). *Production photovoltaïque d'électricité*, Nouvelles Technologies de l'Energie : Les énergies renouvelables, sous la direction de J. C. Sabonnadière, Hermès Lavoisier, pp. 27-50.
- Robinson M. (2005). Enhancing Reliability and Efficiency Using Locally Generated DC Power – The Hybrid Building. *Proc. of the West Coast Energy Management Congress, WCEMC*, CdRom, San Diego, USA.
- Sechilariu M. (2007-1). CA versus CC : intégrer un réseau électrique hybride dans les bâtiments équipés en énergies renouvelables. *Electrotechnique du futur EF 2007*, Toulouse, Cdrom.
- Sechilariu M. (2007-2). Hybrid Electrical Building: DC Power Supply for Buildings Equipped with Renewable Energy Sources. *CISBAT 2007 EPFL Lausanne, Proceedings* pp 571-576.
- Thornton J. P., Stafford B. (2004). Successful design of PV power systems for solid-state lighting applications. *Fourth International Conference on solid state lighting*, Denver, USA, Proceedings of the SPIE, Volume 5530, pp. 284-295.
- Yutao Z., Narendran N. (2004). Performance of PV-powered LED lighting systems for buildings ; *Fourth International Conference on solid state lighting*, Denver, USA, Proceedings of the SPIE, Volume 5530, pp. 296-307.
- Yutao Z., Narendran N. (2005). Photovoltaic-powered light-emitting diode lighting systems. *Optical Engineering*, volume 44(11), p. 111311-1 - 111311-6.