

Eclairage électrique décentralisé des zones rurales isolées de la République du Bénin

Robert Hangnilo*

Laboratoire d'Electrotechnique, de Télécommunication
et d'Informatique Appliquée, 'LETIA'
Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, EPAC,
Université d'Abomey-Calavi, UAC, 01 B.P. 2009, Cotonou-Bénin

(reçu le 15 Janvier 2012 – accepté le 30 Juin 2012)

Résumé - Les études préliminaires qui conditionnent l'extension du réseau électrique sont généralement occultées en République du Bénin. Souvent, pour ce faire, seule la raison politique compte. Cependant, les abonnés des zones rurales du pays n'utilisent généralement l'électricité que pour l'éclairage. Malgré cette extension, des ménages sont encore privés des bienfaits de l'électricité au Bénin. Il se pose ainsi le problème de la rentabilité des lignes de transport électrique et de la maîtrise de l'énergie au Bénin. Pour apprivoiser cette denrée, il faut maîtriser ses sources, la produire, la transporter, la distribuer, la consommer et en toute sécurité. Le relèvement de ce défi incombe aux chercheurs scientifiques. En effet, à chaque étape critique du développement d'un pays, nombreux sont les défis à relever par les acteurs des secteurs scientifique et technique. Parmi ces défis, la maîtrise de l'énergie est le plus récurrent et de loin le plus important. Notre article présente les performances de Zokya, une alimentation dont la source primaire est une batterie d'accumulateurs ordinaire. La tension d'entrée de Zokya mesure 12 V, la sortie alternative de 240 V, sa fréquence est 50 Hz. Un contrôleur de décharge isole les lampes, quand l'entrée passe à 10,8 V pour éviter la décharge profonde de la batterie. Elle est rechargée par l'alternateur du véhicule où elle est embarquée ou dans un atelier d'artisan. Cette forme décentralisée de conversion d'énergie pour l'éclairage convient aux sites ruraux isolés du Bénin. La création de centres communautaires de recharge de batterie équipés de générateur photovoltaïque est recommandable.

Abstract - The common electric grid extension in Republic of Benin is a hazard. Despite the grid extensions generally dictated by worries over economic policies, many households in this country and more generally in Africa still remain up today without any electric convenience. It is first and foremost of electric lighting. In order for a long lasting human society development to happen, so many problems have to be solved by engineers and others scientists. Among those problems energy providing is always the most important. Some energy sources which were formerly suitable are nowadays any more safety. Our paper presents a small size power supply, Zokya that uses like primary source of energy a regular battery. The direct input voltage of Zokya is 12 V and the alternative output one measures 240 V at a 50 Hz frequency. A discharge controller cuts the supply when the battery output voltage falls down to 10.8 V. So doing a high efficiency from the battery side can be expected. This latter can be recharged by the alternator of the car it starts or in a workshop. The use of a field of photovoltaic modules in a common recharge center is recommendable.

Mots clés: Energie renouvelable - Sites isolés - Générateur photovoltaïque, - Réseau de distribution électrique - Eclairage électrique.

* hangnilo555@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

En République du Bénin, l'extension du réseau électrique n'a généralement autre mobile que les raisons politiques. Les prétendants au pouvoir politique promettent aux électeurs l'électrification de leurs localités. Une fois élus, ils décrètent l'extension des lignes sans aucune autre forme de procédure. En fin de compte, la mauvaise qualité de l'énergie distribuée empêche les abonnés de jouir pleinement des bienfaits de l'électricité: les consommateurs sont pénalisés par la baisse de tension; des coupures intempestives endommagent les équipements qu'ils relient au réseau; de façon saisonnière, le délestage les replonge dans le noir qu'ils voulaient éviter en prenant un abonnement au près de la Société Béninoise d'Energie Electrique, 'SBEE', **Tableau 1**.

Ils sont aussi victimes d'une hausse des prix du kWh selon un mécanisme de caution solidaire non déclarée. Ce partage des risques s'explique par la non rentabilité des lignes de transport électrique due à la faible densité et au faible pouvoir d'achat des populations rurales connectées. Malgré cette extension du réseau, beaucoup de ménages sont toujours privés d'électricité au Bénin. Ceux qui sont laissés pour compte dans le pays n'y ont-ils pas eux-aussi droit?

Les dispositifs courants qui utilisent le pétrole lampant pour produire de la lumière sont: le lampion, la lanterne, etc... (Fig. 1). L'éclairage à base du pétrole lampant n'est pas commode, ni efficace, ni même bon marché. Il est urgent de rechercher des solutions de remplacement qui garantissent plus d'efficacité et de justice quand on sait que l'extension abusive du réseau électrique est un gâchis.

L'économiste russe N.D. Kondratiev a fait remarquer l'existence d'une intime corrélation entre les découvertes scientifiques, les inventions technologiques et le marasme économique des Etats, [1].

La recherche des solutions aux problèmes qui assaillent la communauté béninoise est donc l'affaire des chercheurs et ingénieurs des différents domaines d'applications du pays. Parmi ces problèmes, l'approvisionnement en énergie est le plus récurrent et de loin le plus important, [2].

L'énergie est utilisée pour la production des biens de consommation dans les industries, l'agriculture, l'élevage et la pêche; dans les divers services; dans le transport; sur les divers chantiers; dans les carrières de traitement des minerais; dans les centres de loisirs et dans les ménages. Pour en disposer, il faut résoudre les questions de la maîtrise des sources, de la production, du transport, du stockage, de la distribution, de la conversion et en toute sécurité.

L'énergie totale consommée dans le monde en 1967 s'élevait à $5,8 \times 10^9$ TEP dont 40,2 % revenaient au pétrole, 38,3 % au charbon et 19,2 % au gaz naturel, [3]. En 2002, cette consommation mondiale s'élève à $10,078 \times 10^9$ TEP et les apports des constituants sont dans l'ordre: 35 % pour le pétrole, 22 % pour le charbon, 20 % pour le gaz, 10 % pour le bois, 6 % pour le nucléaire, 7 % pour l'hydroélectricité et le renouvelable, soit un total de 77 % pour les combustibles fossiles, [4].

L'énergétique mondiale est, comme on peut le voir, essentiellement basée sur les sources fossiles dont la combustion libère du dioxyde de carbone, (Fig. 2). Cette pratique, pour avoir duré, a fini par entraîner le réchauffement du climat de notre planète, (Fig. 3): de 1967 à 2007 soit en 40 ans, la température maximale par année mesurée à Sokodé au Togo dans la sous Région Ouest Africaine prend actuellement des valeurs jamais atteintes dans les années soixante-dix! Cette tendance se conserve à peu de chose près partout ailleurs dans le monde, [5, 6].

D'autre part, les lignes de transport de l'énergie électrique posent de leur côté des problèmes économiques, techniques et environnementaux. Ces lignes de transport sont économiquement beaucoup moins rentables que le transport du pétrole, un peu moins rentable que le transport du gaz et ne peuvent concurrencer que le transport ferroviaire du charbon [3], lorsque les coûts environnementaux sont évidemment occultés.

Parmi les problèmes techniques, l'accroissement du niveau de tension au départ des lignes est le plus sensible. Pour le transport de 2 GW, il est montré dans [3] une étude comparée où la solution du transport à 750 kV est à tous les points de vue, la plus rentable, **Tableau 2**.

Faire jaillir de la lumière dans une maison à un rapport qualité-prix intéressant est de nos jours un enjeu majeur pour un développement durable en République du Bénin. La solution à ce problème passe par la maîtrise de l'énergie solaire photovoltaïque décentralisée. Le dispositif que nous avons mis au point et que nous avons dénommé Zokya permet de gagner ce pari.

L'accès à l'éclairage électrique pour les ménages disséminés dans les zones rurales reculées du Bénin est donc possible sans un recours à l'extension du réseau électrique. Un centre communautaire de recharge de batteries est à installer au chef lieu de chaque arrondissement reculé du Pays ou non loin du marché de la localité. Chaque abonné y apporte par son propre moyen de locomotion sa batterie pour être rechargée suivant un emploi du temps.

Lorsque l'utilisateur possède un véhicule, la batterie d'accumulateurs embarquée dans ce dernier peut servir à éclairer un coin de sa maison avec quelques lampes économiques pendant quelques heures. Dans tous les cas, le contrôleur de décharge incorporé à Zokya permet d'isoler les charges dès que la tension de la batterie tombe à 10,8 volts.

Avec cette tension, la voiture peut démarrer sans à-coups. En ville, avec l'ajout en amont d'un redresseur, Zokya peut être des services lors des coupures et des délestages. Le redresseur recharge la batterie quand l'énergie est présente sur le réseau. Pendant une coupure, Zokya prend la relève de ce dernier et fournit de l'énergie aux lampes d'éclairage.



Fig. 1: Lampes à pétrole courantes, a-Lampion, b-Lanterne

Le but général poursuivi par nos travaux est la résolution des problèmes posés par l'extension du réseau électrique en République du Bénin. Il s'agit spécifiquement d'apporter une réponse à l'épineuse question d'électrification des zones rurales faiblement peuplées du pays sans un recours systématique à l'extension du réseau électrique.

Tableau 1: Programme de délestage sur le réseau côtier de la SBEE du 19 au 25/04/2010

08h-15h (19/4/10)	D1 (Agblangandan à PK 16 route de Porto-Novo) St Michel; P1 (P/Novo ville, Semè Podji et Kraké); 20A (Godomey à Calavi Kpota, Zogbadjè, Agori); 10B aérien (Zone aéroportuaire, Cocotiers, ORTB, croix du Sud); Agla (Agla Hlazounto, Cocotomey, Gbodjè à Cococodji); C179 (CNHU-Camp Guézo, Pâte d'oie 40 logements et environs) Dassa, 40,2MW
15h-24h	D2 (Ayélawadjè, Senadé, Avotrou et environs); Cot 1(quartiers Jak, Dénokpo); P2 (Nouveaux quartiers jusqu'à Agbokou P/Novo); 20B (Marché St Michel, Dantokpa jusqu'à Ganhi) Fidjrossè (cité Houehiho jusqu'à Houenoussou et environs); C262 (Hall des Arts, DG la SONEB,CC Chinois, Ex Résidence KEREKOU et environs); C263 (CSP, Cliniques les Grâces, st Jean et environs) Calavi (Calavi centre, Gbodjo, Zopa jusqu'à Sô -Ava) Covè et Abomey, 39,8 MW
00h-08h (19/4/10)	Cot (Akpakpa centre, Hôtel GL, Place Lénine); Cot4(Cité Vie Nouvelle, Zone des Ambassades, PK5 et environs); Cot5 (Wlacodji, Hôtel du Lac, Padre Pio; HOMEL); Cimbenin (Tanto, Abattoir, Dandji); P3 (Adjarra, Avrankou, Ifangni Igolo); 10A aérien (Vêdoko, Agontinkon, Sikèkodji, Wloguèdè); C236 (Ste Rita, Fifadji jusqu'à Mènantin); C204 (Gondwana Fidrossè et environs); C181 (Maro Militaire Zongo, DGle Benin Telecom, Cour constitutionnelle) Bohicon, 42,9 MW

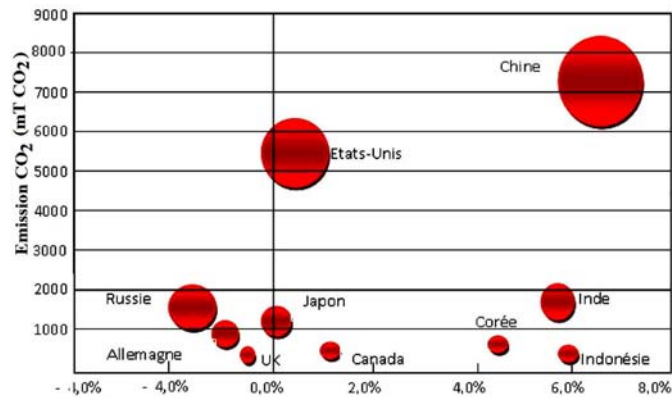


Fig. 2: Point sur l'émission de CO₂ en 2010, (MtCO₂)

Tableau 2: Etude comparée des options de lignes aériennes de transport électrique, [2]

Tension, Ligne, kV	Puissance transportée par ligne 3-phasée (GW)	Nombre de lignes 3-phasées (n)	Section du câble par phase (mm ²)	Valeur réduite du besoin en aluminium pour câbles	Valeur réduite des pertes de puissance	Valeur réduite des investissements
750	2	1	2400	1	1	1
500	1	2	1800	1,5	1,5	1,6
330	0,4	5	1100	2,3	2,3	2,9

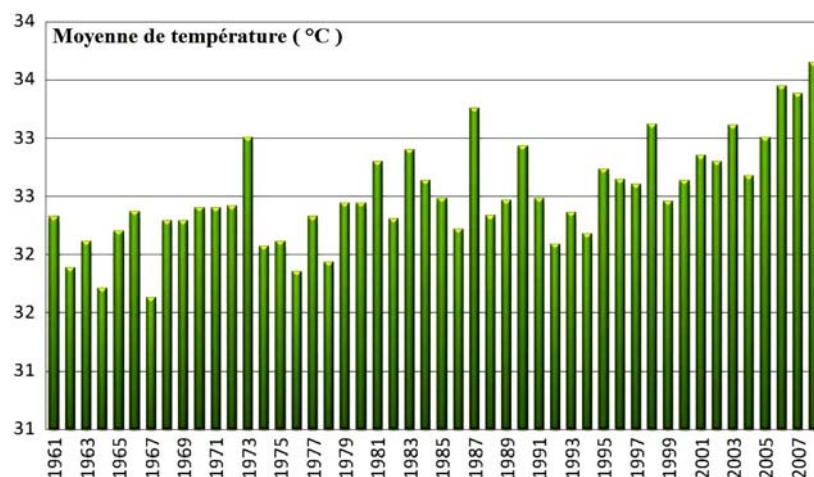


Fig. 3: Moyenne des températures maximales par année de 1961 à 2007, (°C) (mesurées à Sokodé au Togo dans la sous-région Ouest Africaine, Source des données, Météo Togo)

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Les lampes d'éclairage et le partage des applications

2.1.1 Les lampes à pétrole

Les lampes à pétrole (Fig. 1) ont rendu d'énormes services aux pays faiblement industrialisés comme le Bénin. Celle de la figure 1a- communément appelée lampion se fabrique sur place par les artisans du pays. La lanterne de la marque Feuer-hand qu'on peut voir (Fig. 1b-) est un produit d'importation.

Aujourd'hui au Bénin, le coût du pétrole lampant fait que l'éclairage par ces dispositifs est tout aussi cher que l'éclairage électrique avec un rapport qualité-prix pourtant médiocre. Zokya permettra d'accompagner doucement ces luminaires au musée.

2.1.2 Les lampes électriques

Les lampes électriques sont les seules utilisables par Zokya. Au nombre de ces dernières, on distingue les lampes à incandescence, les tubes fluorescents, les lampes fluo compactes encore appelées lampe à basse consommation, LBC, et les lampes à LED.

- La lampe à incandescence, (**Tableau 3**) produit de la lumière par chauffage à blanc d'un filament généralement en tungstène. Son rendement de conversion de l'énergie en lumière est faible, [7]. C'est une lampe énergivore qui ne saurait convenir aux applications photovoltaïques décentralisées.

- Les lampes à décharge: le tube fluorescent et la lampe fluorescente compacte (**Tableau 3**) sont toutes appelées lampes à décharge. La lampe fluorescente compacte est une adaptation des lampes fluorescentes à tubes linéaires dont le tube miniaturisé est plié en deux ou plus, ou encore enroulé et puis doté d'un culot contenant un ballast électronique. Elles ont à peu près les mêmes avantages que les tubes fluorescents linéaires à la différence que le tube ne se change pas.

- La lampe à LED, (**Tableau 3**) produit de la lumière par électroluminescence d'un semi-conducteur. Quelques exemplaires de ces diodes sont posés à côté de la lampe. Elles étaient surtout utilisées dans le passé pour réaliser entre autres des voyants lumineux mais avec le progrès, elles servent de nos jours à l'éclairage. Le rendement d'une lampe à LED et sa durée de vie sont très avantageux pour le consommateur.

Tableau 3: Etude comparative des performances des différentes technologies de lampes électriques

Technologie	Rendement Lm/W	Durée de vie Moyenne (h)
 Lampe à incandescence	12 - 20	1000 – 1200
 Lampes fluorescentes	60 - 100	6.000-15.000
 LED et lampe à LED	+ de 100	50.000-100.000

2.2 Les options d'utilisation de Zokya

2.2. L'utilisateur est en zone isolée du réseau électrique de distribution

L'énergie électrique est une denrée indispensable à presque toutes les applications. Elle est généralement produite à grande échelle dans des centrales et transportée sur de longues distances depuis ces centrales jusqu'aux abonnés via les stations de transformation.

Malgré sa modeste capacité, la Centrale hydroélectrique de Nagbéto a produit en 2004, 156,778 GWh, [8]: soit 99,99 %, le rendement de cette conversion d'énergie, ce

qui n'est pas fréquent. On assiste même dans ce cas extrême à une perte d'énergie de l'ordre de 1,57 GWh.

L'avenir appartient donc à l'énergie douce décentralisée, EDD. La puissance à installer est dimensionnée en fonction des besoins et produite sur place à partir de sources modulaires. L'extension est à tout moment possible : c'est le cas de l'énergie solaire photovoltaïque.

Avec cette approche, les zones rurales isolées et peu peuplées d'Afrique en général et du Bénin en particulier pourraient ne plus attendre l'extension du réseau électrique avant d'entrer dans la jouissance des bienfaits de l'éclairage électrique.

Pour ce faire, il suffira d'installer au chef lieu de chaque arrondissement reculé du Bénin un centre communautaire de recharge de batteries. Un champ de panneaux solaires photovoltaïques convenablement dimensionné (Fig. 4d-) fournit de la puissance pour la recharge des batteries que les consommateurs apportent soit à moto, à vélo, ou au dos d'un âne...

L'alimentation Zokya permettra de produire de la lumière électrique avec des lampes fluorescentes ou luminescentes. La décharge de la batterie étant automatiquement contrôlée par une électronique incorporée à Zokya, la longévité de cette source électrochimique sera bien assurée si les autres précautions utiles sont prises.

2.2.2 L'utilisateur est dans une localité connectée au réseau électrique

La fragilité du réseau de la SBEE est quasi légendaire. Les nombreuses coupures de plusieurs heures qui émaillent chaque journée de travail ou de loisirs et les délestages saisonniers comme le prouve le **Tableau 1**, font que cette alimentation est aussi utile même à Cotonou, capitale de fait de la République du Bénin.

Le déploiement de Zokya en ville nécessite un redresseur qui sera placé entre le réseau et la batterie d'accumulateurs. Un contrôleur de charge et décharge pourra régler le flux et le reflux d'énergie à travers la batterie d'accumulateurs. A chaque défaillance du réseau, un relais met Zokya sous tension pour suppléer ce dernier.

On peut même, dans un autre schéma, se passer du relais. L'alimentation débite continuellement et le contrôleur de charge / décharge permet à la batterie d'accumulateurs d'emmagasiner l'énergie que le redresseur en amont prélève au réseau lorsque ce dernier est en service. Dans le cas de sa défaillance, l'utilisateur ne s'en rendra compte que lorsque la durée de cette coupure dépasse l'autonomie du système Zokya-batterie.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

L'autonomie du système Zokya-batterie (Fig. 4a- et b-) est la durée de temps en heures pendant laquelle elle fait fonctionner des lampes jusqu'à son arrêt automatique par le dispositif électronique de contrôle de décharge de la batterie d'accumulateurs.

Cette durée de temps dépend essentiellement du nombre et de l'état des batteries, de la puissance cumulée en Watt des lampes utilisées et de leur rendement en lumen par watt.

S'il est vrai que les batteries d'accumulateurs ordinaires de voiture peuvent être utilisées avec Zokya, c'est important de savoir que les lampes à utiliser soient des plus sobres possible en énergie. D'après l'étude que nous venons de faire sur les lampes, nous recommandons prioritairement les lampes à LED pour Zokya; viennent ensuite les

lampes fluo compactes tandis que les lampes à incandescence sont à proscrire. Le rendement lumineux de ces dernières est en effet trop bas pour l'application envisagée.

Avec les lampes à LED, cette autonomie sera la plus grande possible. Cette durée de temps de jouissance sera légèrement écourtée avec les lampes fluo compactes et encore plus avec les tubes fluorescents.

Zokya a été comparé à un onduleur pour ordinateurs de bureau, d'appellation commerciale Nutech, (Fig. 4c-). Les caractéristiques techniques de cet onduleur sont les suivantes:

Puissance apparente: 650 VA

Tension d'entrée: 230 V AC- 50 Hz

Tension à la sortie: 230 V AC- 50 Hz

Pour caractériser notre innovation, nous avons relevé les allures de sa tension à vide (Fig. 4e-), du courant appelé par deux lampes fluorescents qui lui sont connectées (Fig. 4g-). Ces oscillographes sont comparés aux graphes correspondants de Nutech (Fig. 4f- et 4h-) dans les mêmes conditions.

Une étude plus poussée est en perspective et devra aboutir à l'analyse harmonique de chacune de ces ondes de tension et de courant pour déterminer le facteur de puissance et le taux de distorsion harmonique de chacune d'elle. La comparaison de l'amplitude des fondamentaux et des harmoniques, rang par rang, permettra de reconnaître entre Zokya et Nutech l'alimentation qui est la plus performante en terme de rendement de transfert d'énergie et de compatibilité électromagnétique, [9].

Pour l'instant, Zokya ne recule en rien devant Nutech compte tenu des allures des courbes de courant et de tension, (Fig. 4e-, f-, g-, h-).

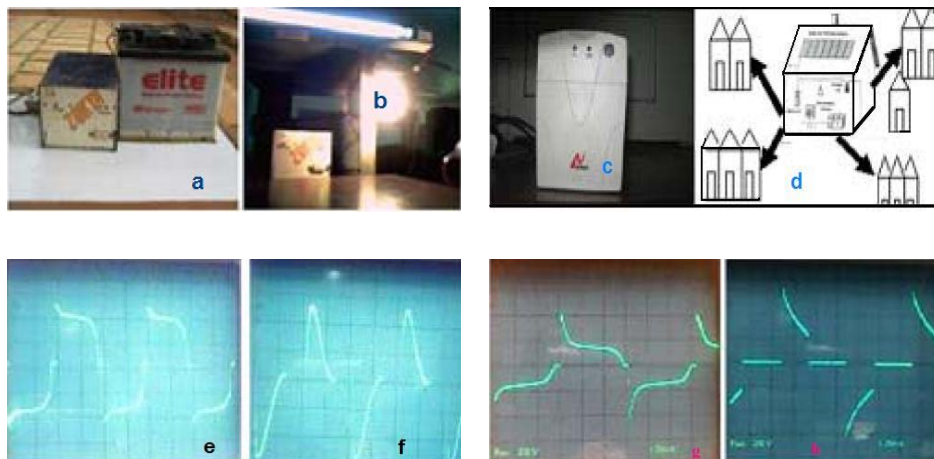


Fig. 4: Zokya, Nutech et le centre communautaire de recharge de batteries

4. CONCLUSION

La peur qu'avaient suscitée les nombreuses projections concernant l'épuisement des sources d'énergie fossile n'est pas vaine. Si la plupart des pronostics alarmistes en la matière ne se sont pas encore réalisés, les solutions de recharge suscitées par cet avertissement sont par contre salutaires.

En attendant un épuisement de ressources fossiles qui n'est menaçant que pour nos habitudes de consommation actuelles, l'échauffement de notre milieu de vie par l'effet de serre résultant de la combustion à très grande échelle comme c'est le cas aujourd'hui des sources fossiles, menace gravement non seulement la civilisation atteinte par l'humanité à ce jour mais surtout la survie de l'espèce humaine sur terre.

Parmi les solutions de rechange envisagées, l'alternative solaire photovoltaïque occupe une place de choix. Pour ce faire, l'étude et la conception de convertisseurs statiques de grande efficacité s'avèrent nécessaires.

Zokya est une réponse efficace à cet appel. Cette nouvelle solution est capable de suppléer le réseau électrique partout où ce dernier est défaillant ou absent. Le contrôleur de décharge incorporé à Zokya permet d'espérer une durée de vie suffisamment longue pour la batterie d'accumulateurs.

En rajoutant à Zokya un chargeur accompagné cette fois d'un contrôleur de charge, cette alimentation pourra rendre de précieux services aux habitants des villes du Bénin, victimes des coupures intempestives de la fourniture d'énergie par le réseau électrique, de la baisse de tension et des délestages. Un tel chargeur est un redresseur à pont de diodes dont la sortie est simplement filtrée par condensateurs.

Le contrôleur de charge est semblable à celui de décharge déjà présent dans notre réalisation: il isole Zokya du réseau quand la tension de la batterie atteint 12 V et la referme sur ce dernier lorsque cette même tension descend à 10,8 V et que le réseau est en état de fournir de l'énergie.

Autres charges électriques que les lampes d'éclairage comme la télévision, l'ordinateur et la chaîne Hifi peuvent être alimentées par Zokya pourvu que le transformateur et les transistors de puissance qui l'équipent aient la puissance convenable.

NOMENCLATURE

Zokya: Appellation donnée à l'alimentation de notre invention	V: Unité de mesure de la Différence de Potentiel ou Tension électrique, (Volt)
SBEE: Société béninoise d'énergie électrique, Société d'état spécialisée dans la distribution de l'énergie électrique au Bénin	Hz: Unité de mesure de la Fréquence d'une onde de courant ou de tension électrique pulsée (Hertz)
LED: Light Electroluminescent Diode, acronyme anglais qui signifie Diode électroluminescente	kW/h: Unité de mesure d'énergie électrique usitée par les producteurs et les distributeurs d'électricité
GW, Gigawatt: Multiple du Watt, unité de la puissance électrique	Tonne équivalent pétrole, (TEP): Unité de mesure d'énergie de valeur très élevée
LBC: Lampe à basse consommation	kilovolt, (kV): Multiple du Volt
CO ₂ : Formule chimique du dioxyde de carbone, appelé gaz carbonique	ORTB: Office de radio diffusion et de télévision du Bénin
Heure, (h): Unité de mesure du temps courant	MW, (Mégawatt): Multiple du Watt
Homel: Hôpital de la mère et de l'enfant de la lagune	CHNU: Centre hospitalier national universitaire (de Cotonou)

CC Chinois: Centre culturel chinois	CSP: Cours secondaire protestant
DG SONEB: Direction générale de la Société Nationale de l'Eau du Bénin	Cimbenin: Usine de fabrication du Ciment du groupe Heidelberg
VAC: Volt Alternative Current – Tension de courant alternatif	Nutech: Nom commerciale de l'onduleur Ordinateur de bureau
CEB: Communauté électrique du Bénin	EDD: Energie douce décentralisée
UAC: Université d'Abomey-Calavi	AIE: Agence Internationale de l'Energie

REFERENCES

- [1] R.A. Blais et J.H. Dubuc, '*L'invention*', L'ingénieur, Vol. 71, N°1, pp. 3 - 8, 1985.
- [2] Y. Tioldéchi et Y. Lesney, '*Le Monde à la Recherche de l'Energie*', Edition Mir, Moscou, 1981.
- [3] N.N. Tihadeev, '*Le Transport de l'Energie Electrique Aujourd'hui et Demain*', Edition Energuia, Leningrad, 1975.
- [4] [http:// www.maniocre.com](http://www.maniocre.com), (source AIE), visité le 27 Janvier 2012 à 19h45.
- [5] J.C. Bergonzini, '*Changements Climatiques, Désertification, Diversité Biologique et Forêts*', Publications du CIRAD, Silva, 146 pages, 2004.
- [6] W.M. Ciesla, '*Le Changement Climatique, les Forêts et l'Aménagement Forestier, Aspects Généraux*', Etude FAO n°126, Rome, 1997.
- [7] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe#Galerie>
- [8] CEB as a supplier of energy to fuel economies and cooperation between countries at the sub-regional level, Annual Report, 2004.
- [9] R. Hangnilo, '*Contribution à l'Etude et au Développement d'un Onduleur Multiniveau non Polluant Adapté au Couplage d'un Générateur Photovoltaïque au Réseau de Distribution Electrique*', Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 1998.