



SYSTEME DE PRODUCTION D'ENERGIE SOLAIRE PV/DIESEL A LA STATION DE POMPAGE DE NAKALGO

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER SPECIALISE EN
GENIE ELECTRIQUE ENERGETIQUE ET ENERGIES
RENOUVELABLES**

OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES

Présenté et soutenu publiquement le 19 Mars 2013 par

Issiaka COULIBALY

Travaux dirigés par : Dr Azoumah YAO Enseignant au 2iE

Maître de stage : Barnabé MILLOGO Ingénieur en Génie électrique, Energétique et
Energies renouvelables ; Chef de la station SP3 à l'ONEA.

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Moussa SORO

Membres et correcteurs : Ingénieur Patrice DANGANG
Ingénieur Moussa Kadri SANI

Promotion 2011-2012

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé avec le soutien de plusieurs personnes que je souhaite remercier ici. Il s'agit notamment de :

- Monsieur le Directeur Général de l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) qui a bien voulu créer un cadre propice à la réalisation de cette formation ;
- Dr Azoumah YAO enseignant au 2iE qui a cordialement accepté de diriger ce travail. Qu'il en soit chaleureusement remercié ;
- Monsieur Barnabé MILLOGO, Ingénieur Génie Electrique, Energétique et Energies Renouvelables, Chef de Section SP3 à l'ONEA qui m'a apporté un encadrement sans faille pour la rédaction de ce mémoire.
- Monsieur Issaka NOMBRE, Electromécanicien au centre de Koupéla qui m'a ouvert les portes de la station et qui m'a apporté les informations nécessaires pour un bon déroulement du stage. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et de mon amitié;
- Tout le personnel enseignant ainsi que celui de l'administration du Master GEER du 2IE pour le soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de cette formation. Je remercie particulièrement Madame OUEDRAOGO Sylvie de la FOAD dont la gentillesse et les encouragements m'ont été très utiles;
- Tous les étudiants de la promotion 2011-2012 de ce Master avec qui j'ai eu souvent l'occasion de travailler à distance. Ce travail est également le leur.
- A ma famille, mon épouse, et vous tous qui m'avez soutenu et avez su être mon inspiration tout au long de cette formation, je vous prie d'accepter mes remerciements les plus sincères.

RESUME

Dans le contexte de développement énergétique durable, il nous est apparu nécessaire d'intégrer les sources d'énergies renouvelables dans le système de pompage d'eau dans les stations isolées de l'ONEA. Toutefois, la période de pointe de consommation est souvent différente de celle de production intermittente d'énergie solaire. Cette situation nous a obligé à adapter une hybridation d'énergie solaire à un groupe électrogène diesel pour faire face à cette inadéquation. Afin d'assurer un éclairage autonome sur le site, les nuits pendant les périodes de faible consommation, des batteries de stockage d'énergie ont été installées à ce titre.

Cette étude menée à la station de pompage de Nakalgo a révélé que malgré les coûts élevés de la production du watt-crête, le système hybride est économiquement rentable à court et moyen terme (environ dix ans) sur les groupes électrogènes classiques. La réduction d'émission de gaz à effet de serre est sans doute d'un des points forts pour la promotion de cette filière. Nous avons fait des recommandations à l'endroit de nos gouvernants de doter notre pays d'un cadre réglementaire et d'une stratégie de développement des énergies renouvelables.

Mots clés :

- 1-Hybridation,
- 2-Groupe électrogène,
- 3-Energie solaire,
- 4-Station de pompage,
- 5-Nakalgo

ABSTRACT

In the context of a sustainable energy development, it became necessary for us to integrate the renewable energy sources to the ONEA water generation stations non connected to the SONABEL power network. Therefore, the peak hour of consumption is sometime different from the solar energy generation one. This situation led us to propose a diesel-photovoltaic hybrid system in order to face this inadequacy in water supply. The Setting up of energy stocking batteries on the site will provide an autonomous lightning in the night during the period of low consumption where starting a generating set is not necessary.

This research that has been made in Nakalgo pumping station revealed that in spite of the expensiveness of the watt-crète generation, the use of the photovoltaic energy gives some undeniable advantages namely in the isolated sites, the easiness in its implementation and its maintenance considered. The hybrid system is economically profitable in a medium-term (about 10 years) than the classical generating sets. The reduction of greenhouse gas emission is no doubt one of the most important reasons motivating the promotion of this channels. We made recommendations to our leaders to equip our country with a statutory framework and a strategy for the development of renewable energies.

Key words :

- 1-Hybridation,
- 2-Genset,
- 3-Solar energy,
- 4-Pomping station,
- 5-Nakalgo

LISTE DES ABREVIATION

AIE :	Internationale de l'Energie
Aut :	Nombre de jour d'autonomie des batteries
Cb :	Capacité nominale des batteries [Ah]
EDF :	Electricité de France
Ej :	Rayonnement moyen quotidien
GE :	Groupe électrogène
GEER :	Génie Electrique, Energétique et Energie Renouvelable
Ibat :	Courant dans les batteries
Imod :	Courant débite par un module photovoltaïque
INS :	Inverseur normal secours
Ipv :	Courant total débité par les panneaux photovoltaïques
IS :	Courant de saturation inverse de la diode
k=1,38 10-23J.K-1	Constante de Boltzmann,
MPPT :	Maximum Power Point Tracking
ND [cm-3] :	Concentration des donneurs d'électron
ni [cm-3] :	Concentration intrinsèque,
Np :	Nombre de cellules connectées en parallèle
Ns :	Nombre de cellules connectées en série
ONEA :	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
Pc :	Puissance crête des panneaux photovoltaïques
Pcons :	Puissance demandée par le consommateur
Ppv :	Puissance fournie par les panneaux photovoltaïque
PV :	Photovoltaïque
q :	Charge élémentaire d'un électron
T [°K] :	Température Kelvin (absolue)
Ubat :	Tension nominale des batteries
Vbatt :	Tension aux bornes des batteries
Vcom :	Tension en circuit ouvert du module.
VD :	Tension de diffusion sur une jonction
Vmod:	Tension aux bornes du module photovoltaïque
Vmpp :	Tension au point de puissance maximale
Vpv :	Tension aux bornes des panneaux photovoltaïques
Wc :	Watt crête

Sommaire

I.	INTRODUCTION GENERALE	3
II.	OBJECTIFS DU TRAVAIL.....	6
III.	METHODOLOGIE DE L'ETUDE.....	7
IV.	RESULTATS.....	7
A.	Production de l'énergie électrique photovoltaïque.....	7
1.	Le rayonnement solaire.....	8
2.	Le générateur photovoltaïque.....	9
3.	Modélisation d'une cellule photovoltaïque	13
4.	Point de puissance maximale, rendement, facteur de forme.	16
5.	Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque	18
6.	Caractéristique d'un module photovoltaïque	20
B.	Caractéristiques et profil de production des équipements de la station.	22
1.	Caractéristiques des équipements de production.....	22
2.	Profil de production	24
3.	Relevés expérimentales sur les équipements de la station	26
C.	Dimensionnement énergétique, modélisation du système hybride et choix des composants.....	28
1.	Synthèse des architectures de systèmes photovoltaïques autonomes.	28
2.	Structure du système de génération électrique hybride	30
3.	Dimensionnement énergétique du système photovoltaïque	31
V.	Analyse comparative entre générateur diesel et système PV hybride.	40
A.	Analyse comparative entre générateur et système PV hybride	40
1.	Fonctionnement du générateur diesel.	40
2.	Aspects économiques des systèmes hybrides.....	40
B.	Performances du Système Hybride dans la Production d'Electricité.	42
VI.	CONCLUSION GENERALE.....	43
VII.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	44
VIII.	ANNEXES.....	47

LISTE DES FIGURES

- Fig.1 : Origine de la production d'électricité en Afrique (la part des énergies renouvelables est très négligeable).
- Fig.2 : Principe de la conversion photon-électron dans un système a deux niveaux d'énergie.
- Fig.3 : Production d'électricité par la séparation électron-trou.
- Fig.4 : Modèle simplifié d'une cellule PV
- Fig.5 : Modèle de la cellule PV avec prise en compte de perte en tension et courant de fuite.
- Fig.6 : Caractéristique I-V d'une cellule PV, ensoleillement $E=430\text{W/m}^2$, température $T=300\text{K}$ (source <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/lehre/english/pv1/>)
- Fig.7 : Mise en évidence du courant inverse dans une cellule PV (source <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/lehre/english/pv1/>).
- Fig.8 : Détermination de point de puissance maximale d'une cellule
- Fig.9 : Caractéristique idéale d'une cellule P-V
- Fig.10 : Influence de l'ensoleillement
- Fig.11 : Influence de l'ensoleillement
- Fig.12 : Association en série de cellules identiques
- Fig.13 : Caractéristiques résultantes d'un générateur associant np cellules en parallèle et ns cellules en série (identiques ou éventuellement disparates)
- Fig.14 : Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque
- Fig.15 : Présentation générale d'un système photovoltaïque.
- Fig.16 : Schéma général du système hybride PV/Diesel.
- Fig.17 : Synoptique du système hybride de Nakalogo
- Fig.18 : Coût sur la durée d'exploitation.

I. INTRODUCTION GENERALE

Avec la crise pétrolière annoncée depuis quelques années, le recours aux énergies alternatives connaît une forte expansion. Les débats sur l'avenir énergétique de la planète se sont intensifiés compte tenu des besoins sans cesse croissants dans le domaine et les conséquences que cela peut engendrer à moyen terme [Tchapo Singo 10]. En effet, l'évolution démographique et le développement de certaines zones géographiques comme l'Asie, l'Amérique Latine, la Russie, laissent présager une augmentation considérable de la consommation énergétique mondiale [iea 02].

A ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront assurer les besoins que pour quelques décennies encore, ce qui entraînerait des situations de pénurie dont les prémices se sont fait ressentir à travers la crise du pétrole durant ces dernières années.

Les gisements de ressources énergétiques d'origines fissiles, même si elles offrent une alternative à court/moyen terme, posent de réels problèmes environnementaux (surexploitation des ressources naturelles ; traitement des déchets radioactifs...). Pour ce faire, une première piste à cette crise annoncée a été la diminution de la consommation énergétique par des systèmes à haute efficacité énergétique. C'est alors que sont apparus sur le marché ces dernières années, des appareils de faible consommation d'énergie.

En parallèle, il faudra développer l'utilisation de nouvelles sources d'énergie propres et renouvelables.

A ce sujet, le soleil, le vent, la biomasse, la mer, ... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. Ainsi, d'après l'Agence Internationale de l'Energie [iea 12], si l'on prend l'exemple du soleil, une surface de 145000km² (4% de la surface des déserts arides) de panneaux photovoltaïques (PV) suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux.

Au-delà de toutes considérations hypothétiques, il apparait que le photovoltaïque se présente comme une solution d'avenir car il offre une multitude d'avantages à savoir :

- la production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre, il faut cependant réduire l'impact environnemental de la fabrication du système ;
- la lumière du soleil étant disponible partout et quasi-inépuisable, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne, dans les villages isolés que dans les grandes villes.

- l'électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population mondiale.

Le caractère écologique du photovoltaïque peut aussi être mis en avant par rapport à d'autres moyens de production : contrairement à ce que l'on peut croire, une installation rembourse l'énergie nécessaire à sa fabrication dans un délai de 1 à 3 ans suivant l'ensoleillement du site (source Agence Internationale de l'Energie) et de surcroît, permet d'économiser entre 1,4 et 3 tonnes de CO₂ au cours de sa durée de vie pour 1 kWc installé [ried 06].

Dans un contexte de crise énergétique mondial et de réchauffement climatique, il est alors aisé de comprendre l'engouement des gouvernements, des privés à encourager l'installation de systèmes photovoltaïques. Ainsi, le marché mondial des systèmes photovoltaïques se verra multiplier par cinq d'ici les dix prochaines années. En France selon les derniers chiffres EDF-ERDF, le parc photovoltaïque raccordé au réseau est passé de 24,48 MWc à 68,8 MWc entre 2007 et 2008. Même si le marché photovoltaïque africain tarde à décoller réellement, selon les prévisions, l'électricité d'origine photovoltaïque sera compétitive par rapport aux autres sources de production vers 2020.

Les performances à grande échelle citées plus haut sont très attractives mais avant de les atteindre, il faudra s'affranchir de certaines contraintes en optimisant le fonctionnement global des systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont envisagées pour parer au problème d'intermittence de la fourniture de l'énergie solaire entre autre l'hybridation des sources de production. Au niveau de la station de pompage de Nakalgo où ont lieu nos expériences, l'électricité est fournie par un groupe électrogène diesel. L'exploitant se trouve ainsi confronter à plusieurs problèmes dont la difficulté d'approvisionnement et de stockage du gas-oil sur le site, la disponibilité des équipes de maintenance pour les interventions urgentes, les problèmes de pièces de rechange ... c'est autant de raisons qui nous ont guidé à proposer une autre source d'alimentation plus sûr, plus fiable et abondante pour juguler ce problème.

Les chiffres sur la pénétration d'énergie renouvelable dans nos habitude de production et de consommation parlent d'eux-mêmes ; d'après les chiffres de EDF, les énergies renouvelables (géothermique, solaire et éolien) ne fournissent que 0,1%, chiffre qui peut sembler dérisoire mais en continuelle évolution (+30% par an).

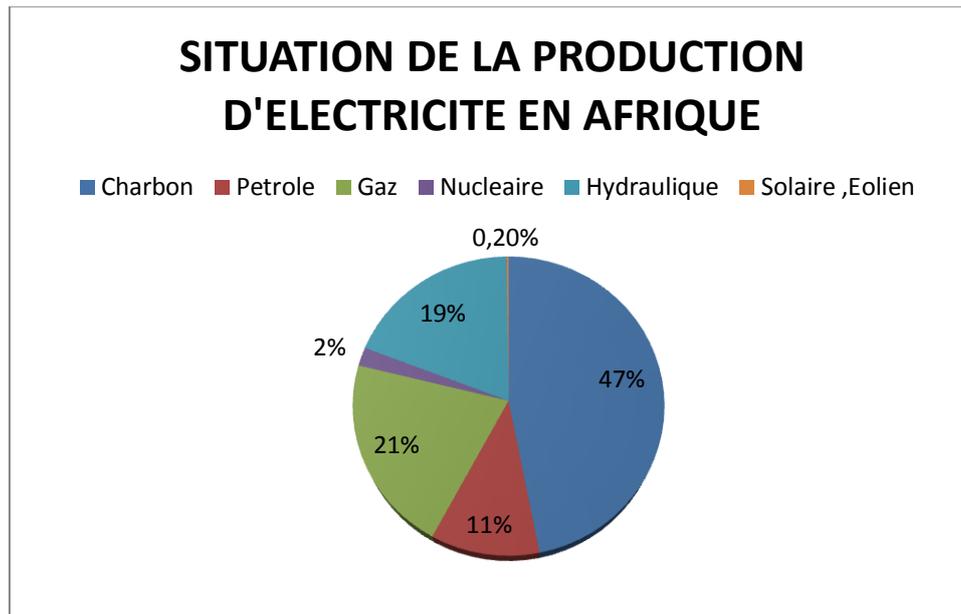


Fig.1 : Origine de la production d'électricité en Afrique (la part des énergies renouvelables est très négligeable).

Cette figure est une illustration parfaite de la très faible utilisation des énergies renouvelables dans le continent, et nous rappelle combien il est important de nous tourner vers cette énergie sûre et abondante [riaed 11]. Ainsi, pour développer notre thème qui est « Dimensionnement d'un générateur hybride solaire/diesel pour l'alimentation d'un système d'adduction d'eau potable sur le site de Nakalgo », notre document se subdivise en quatre chapitre. Dans le premier chapitre, nous présenterons la problématique liée à l'utilisation de l'énergie solaire et ensuite nous rappellerons le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque tout en faisant ressortir les différents facteurs pouvant affecter son fonctionnement.

Pour ce qui est du deuxième chapitre, nous dresserons les caractéristiques des équipements de production du site de Nakalgo (la station et les équipements qui s'y trouvent) avant de proposer le profil de production de la station. Dans le troisième chapitre, nous présenterons un descriptif du modèle du système hybride à proposer suivi du choix des composants.

Enfin le chapitre quatre sera consacré à l'analyse comparative entre générateur diesel et système hybride Solaire/Diesel puis nous terminerons cette partie par une discussion sur les performances d'un tel système dans les sites isolés.

Nous terminerons notre document par une synthèse en guise de conclusion sur les avantages des systèmes hybrides sur les groupes électrogènes dans les petites stations de pompage de l'ONEA.

II. OBJECTIFS DU TRAVAIL

La maîtrise de l'énergie est l'un des facteurs important pour l'essor d'une entreprise. De nos jours, 80% des énergies utilisées dans le monde proviennent des combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole, le gaz mais aussi de l'uranium. Ces gisements naturels, engendrés au cours d'une lente évolution géologique, existent en quantité limitée et sont épuisables. Les énergies renouvelables (le solaire, le vent, L'eau ...) sont une alternative incontournable pour remédier aux problèmes énergétiques qui sont de plus en plus pressant.

L'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) dont la mission première est de fournir l'Eau potable dans tous les centres urbains et semi-urbains du Burkina Faso à un coût optimal s'inscrit dans cette dynamique.

L'alimentation en eau potable de la ville de Koupéla chef lieu de la Province du Kouritenga, situé à environ 150 km de la capitale Ouagadougou, est entièrement assurée par ONEA. Actuellement la ville est en partie alimentée par des eaux de forages ; l'énergie utilisée pour le pompage est fournie par des groupes électrogènes.

Les objectifs de ce travail se présentent comme suit :

- Faire un plaidoyer auprès des décideurs pour briser la barrière qui ne favorise pas une émergence des énergies renouvelables dans notre système de production, surtout pour le cas des sites isolés comme celui de Koupéla où les forages sont implantés dans des zones non couverte par le réseau national d'électricité (SONABEL).
- Présenter une méthode de dimensionnement d'un système photovoltaïque comme source de production principale avec en toile les données climatiques et géographiques de la province du kouritenga. La deuxième source qui est un groupe électrogène diesel viendra en appoint pour les périodes de faible ensoleillement ou pendant les nuits de fortes consommations.
- Fournir un support technique et pratique d'aide à la préparation, à la réalisation des projets d'installations photovoltaïques à usage industriel.

- Faire ressortir les difficultés et contraintes liées à l'utilisation des groupes électrogènes comme seule source d'alimentation des sites de production.
- Faire une étude comparative pour montrer la viabilité économique du système solaire et groupe électrogène par rapport au système existant.

III. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

Une étude bibliographique sera effectuée sur la problématique du système hybride énergie solaire et groupe électrogène afin de pouvoir faire une configuration optimale de la production d'énergie du site.

Une fiche de données technique d'exploitation mentionnant le nombre d'équipements à alimenter, les caractéristiques techniques à prendre en compte dans la description technique du site.

Le processus d'optimisation, la détermination de la puissance crête du générateur solaire, la puissance de l'onduleur, la puissance nominale du groupe électrogène sont déterminés en s'appuyant sur les outils mathématiques, sur les lois de l'électrotechnique et aux données climatiques recueillies sur le terrain.

Au vu des résultats obtenus une analyse des coûts d'investissement et la durée des amortissements des installations nous permettra sans doute de faire un choix optimum du système à vulgariser à l'ONEA.

IV. RESULTATS

A. Production de l'énergie électrique photovoltaïque

Avant de détailler la production de l'énergie solaire photovoltaïque, il nous semble opportun de décrire le principe photovoltaïque permettant de transformer la lumière en électricité ainsi que les différents paramètres pouvant influencer le fonctionnement des panneaux.

1. Le rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil comporte des ondes électromagnétiques dont une partie appelée rayonnement solaire, ne cesse de parvenir à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la valeur prise par la température superficielle du soleil (environ 5800°K), l'énergie de rayonnement électromagnétique transmise à la terre provient essentiellement de l'émission d'ondes lumineuses qui se situent dans le visible (entre $0,4$ et $0,7 \mu\text{m}$ de longueur d'onde environ) et le proche infrarouge (entre $0,7$ et $4 \mu\text{m}$ environ).

Cette énergie, rayonnée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairage de quelque $340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Mais sur cette quantité d'éclairage qu'apporte le soleil au système terre-atmosphère, environ $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ sont réfléchis vers l'espace ; le reste est absorbé pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface terrestre.

Tout d'abord, près du quart de cet éclairage incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère ; pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages (environ $65 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), le reste étant dû aux autres constituants atmosphériques : le gaz et les aérosols réfléchissent environ $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. En outre, l'atmosphère et ses nuages prélèvent par absorption $80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ environ sur l'éclairage solaire. Il reste donc approximativement $180 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont à peu près les deux tiers se font directement. Le reste s'effectuant par diffusion vers le bas ; c'est grâce à ce rayonnement diffus que l'on peut voir sans interruption pendant le jour, même quand les nuages cachent le soleil.

On assiste à un processus assez complexe d'interaction entre diffusion vers le bas et réflexion. La surface terrestre possédant un albédo moyen élevé (l'albédo est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle), devrait renvoyer dans l'atmosphère environ $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ sur les quelque $180 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ incidents ; mais en fait, la majeure partie de l'éclairage qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard par diffusion vers le bas depuis le milieu atmosphérique et s'ajoute partiellement aux $130 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ de rayonnement solaire non réfléchis à son contact.

Bien qu'il n'existe pas dans la réalité deux instants distincts pour l'absorption par la surface terrestre, mais un phénomène continu d'absorption du rayonnement solaire, on peut résumer le processus précédent en disant que tout se passe comme si les $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ réfléchis par cette surface se répartissaient entre $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire après diffusion vers le haut à travers l'atmosphère et $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ retournant à la surface terrestre après diffusion différée vers le bas.

Ces 30 W.m^{-2} s'ajoutent aux 130 W.m^{-2} initialement non réfléchis pour constituer approximativement les 160 W.m^{-2} . C'est pratiquement la moitié du rayonnement solaire qui est absorbée par la surface terrestre.

En ramenant toutes les couches de l'atmosphère dans des conditions normales ($P= 1013 \text{ mbar}$ et $t= 25^\circ\text{C}$), on a défini une atmosphère standard d'épaisseur verticale moyenne de 7,8 km prise pour référence unité et formée de couches planes et stratifiées composées par les divers gaz comme l'azote (couche de 6 150 m), l'oxygène (1 650 m), l'argon (74 m), le gaz carbonique (24 m)... L'eau est représentée par une couche d'épaisseur variable de quelques dizaines de mètres pour la vapeur et de quelques centimètres pour le liquide [Tchapo Singo thèse 10].

2. Le générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs modules, ces derniers étant constitués de plusieurs cellules en série afin d'obtenir une tension souhaitée.

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque consiste en une conversion d'énergie lumineuse (solaire) en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque, une des propriétés électriques des semi-conducteurs.

a) Principe photovoltaïque.

A- Jonction PN

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dope N (donneurs d'électrons) et d'un semi-conducteur dope P (composé de trous).

L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction.

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- Une jonction PN (homo-jonction, i.e. : les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas) ;
- Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents) ;
- Une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires.

Les électrons de la jonction se déplacent vers la région P et les trous vers la région N. Il ne reste que des atomes ionisés fixes. Cette zone (dite de déplétion) de porteurs libres est appelée zone de charge d'espace créant un champ électrique. En dehors, le champ électrique est nul. Dans une homojonction à l'équilibre thermodynamique, à la frontière des deux régions, il se forme pendant le processus de déplétion, une barrière de potentiel V_D appelée tension de diffusion.

$$V_D = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{ND \cdot NA}{n_i^2} \right)$$

V_D [V] tension de diffusion sur une jonction,

$K = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ Constante de Boltzmann,

T [°K] température absolue du cristal,

$q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ charge élémentaire,

ND [cm^{-3}] concentration des donneurs,

NA [cm^{-3}] concentration des trous,

n_i [cm^{-3}] concentration intrinsèque,

Avec $V_T = kT/q = 26 \text{ mV}$ à la température ambiante.

Les cellules solaires photovoltaïques sont souvent des jonctions dissymétriques, c'est-à-dire qu'un dopage est plus fort que l'autre.

Dans ce cas, la zone de charge d'espace se trouve pratiquement dans la région la plus faiblement dopée.

B- Production d'électricité

La cellule solaire est le lieu où la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique se produit. La puissance électrique résultant de cette conversion dépend du flux et de la répartition spectrale de l'énergie spectrale.

Dans une cellule photovoltaïque basée sur une jonction PN, une excitation lumineuse crée aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction [Ariane Neusser 02].

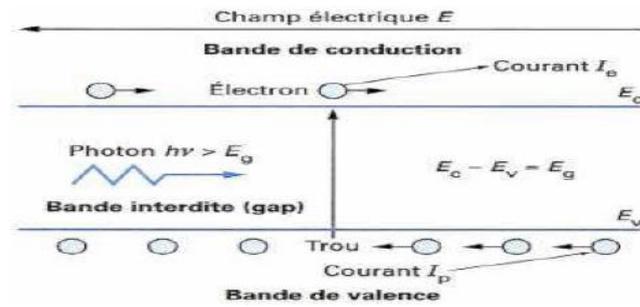


Fig.2 : Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie.

b) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La naissance d'une différence de potentiel lorsque les porteurs de charges sont créés dans les environs de la jonction par excitation lumineuse permet à la cellule de fonctionner comme un générateur électrique quand les deux faces de la cellule sont électriquement reliées à une charge, par exemple une résistance R.

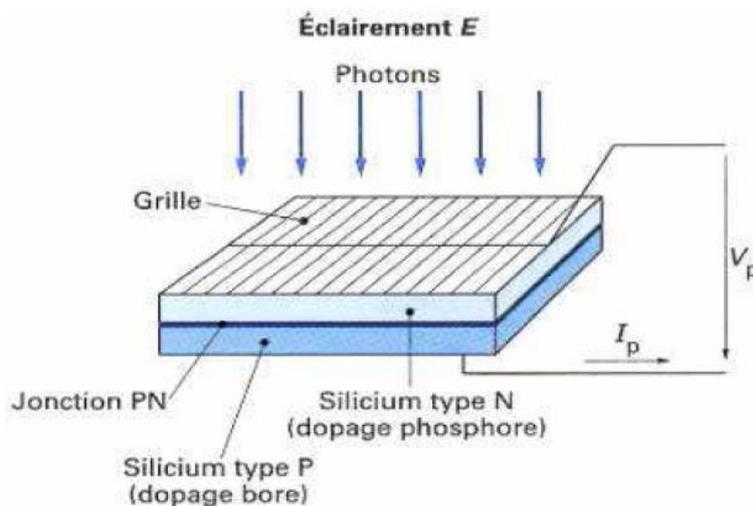


Fig.3 : Production d'électricité par la séparation électron-trou.

Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occuper qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée. Afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident, une couche antireflet recouvre uniformément toute la face avant.

La puissance maximale pouvant être délivrée par le module photovoltaïque est définie sur sa caractéristique I-V par le point de puissance maximale (MPP en anglais, Maximum

Power Point). Une transformation de la caractéristique de la charge connectée permet donc de bénéficier du maximum de puissance du module.

3. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

a) Générateur photovoltaïque idéal

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{Ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV.

Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant I et le reste, le courant I_D , dans la diode. On a alors la relation :

$$I = I_{Ph} - I_D$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_D$$

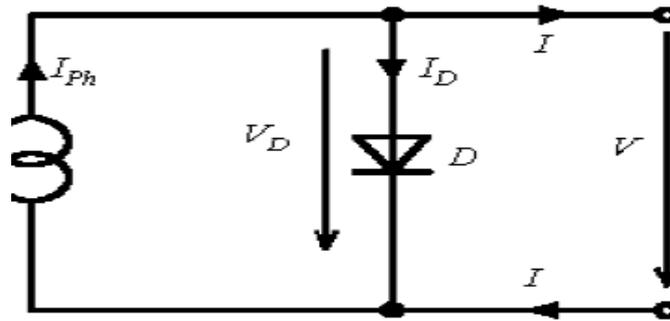


Fig.4 : Modèle simplifié d'une cellule PV

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_D = I_S \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right)$$

Avec

I_S = courant de saturation inverse de la diode

$V_T = kT/q$, potentiel thermique

V_D = tension au borne de la diode

Le courant débité équivaut a :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_S \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right)$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte de perte de tension, courant de fuite...). Il existe d'autres

modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte tenu du comportement de la cellule photovoltaïque.

b) Générateur photovoltaïque "réel"

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite.

On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p .

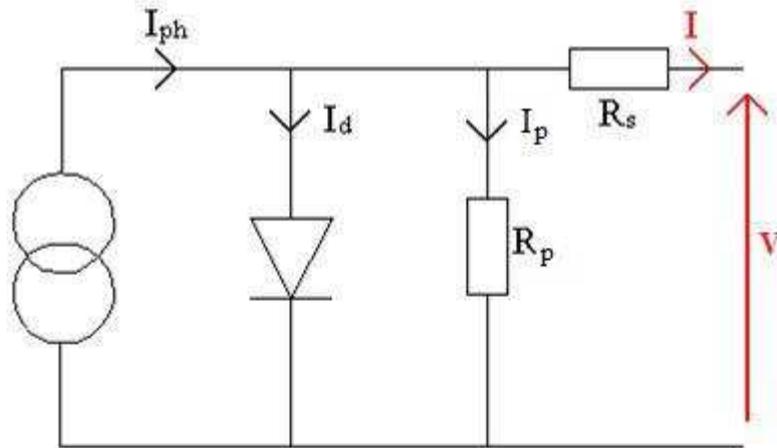


Fig.5 :Modèle de la cellule PV avec prise en compte de perte en tension et courant de fuite.

On a: $I = I_{ph} - I_d - I_p$

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p}$$

Nous obtenons une équation implicite en I et U qui peut être résolue grâce à une méthode numérique (la méthode de Newton-Raphson par exemple).

c) Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

La comparaison entre la caractéristique I-V des modèles ci-dessus et celle d'une cellule poly cristalline réelle est représentée en figure 5. Nous pouvons remarquer que dans la zone de fonctionnement de la cellule, la caractéristique I-V du modèle simplifié présente des écarts non négligeables par rapport à celle d'une cellule PV réelle ; avec un même modèle à diode réelle, on se rapproche de la caractéristique de la cellule réelle.

Enfin, on obtient une caractéristique encore plus précise grâce au modèle complet de la cellule réelle.

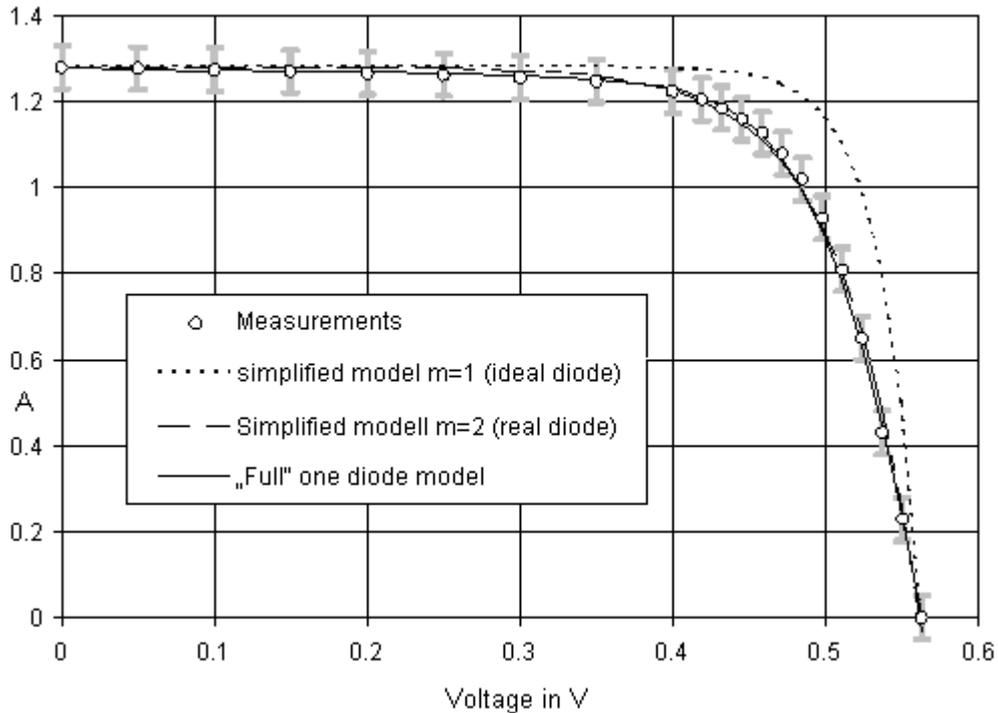


Fig.6 : Caractéristique I-V d'une cellule PV, ensoleillement $E=430W/m^2$, température $T=300K$ (source <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/lehre/english/pv1/>)

Le courant inverse dans la cellule ou courant d'obscurité est mis en évidence sur la figure suivante 7. Pour cela, on applique une tension aux bornes de la cellule. Pour une tension positive, la diode est dans un état passant ; pour une tension négative, elle reste bloquée jusqu'à $-15V$, puis passe lentement à l'état passant. On observe à ce niveau une dissipation d'énergie sous forme de chaleur pouvant causer des dommages irréversibles sur la cellule.

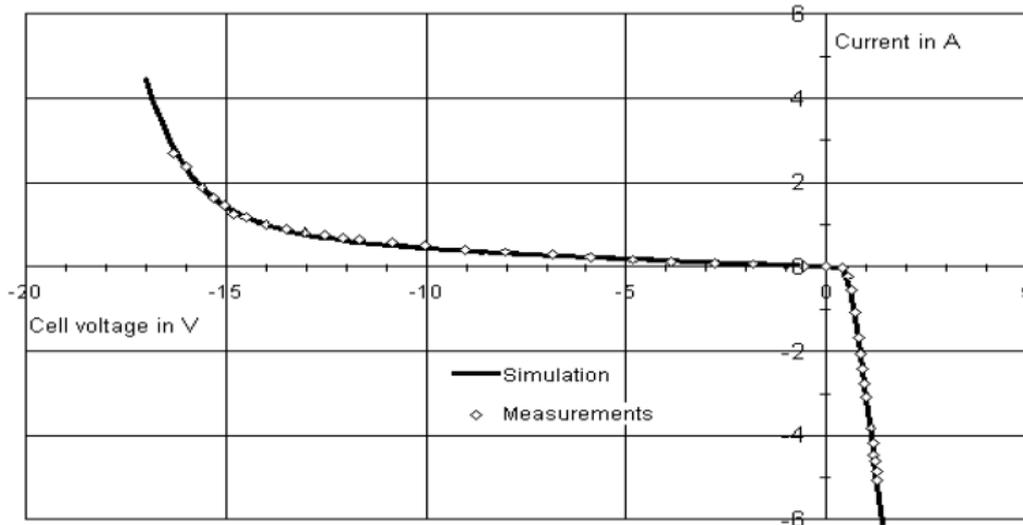


Fig.7 : Mise en évidence du courant inverse dans une cellule PV (source <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/lehre/english/pv1/>).

Dans un système PV, ce courant inverse peut s'établir s'il arrivait que les sources de stockage soient déchargées dans les modules durant la nuit.

Il est donc nécessaire de protéger ces derniers en intégrant au système une diode de blocage [emsolar. ee. tu-berlin 12].

4. Point de puissance maximale, rendement, facteur de forme.

a) Point de puissance maximale.

Pour une cellule PV, nous pouvons définir le courant de court circuit I_{SC} et la tension à vide V_{OC} . Le courant I_{SC} correspond à la valeur du courant débité lorsque la cellule est court-circuitée alors que V_{OC} est la tension à ses bornes en l'absence de charge.

Si nous traçons la courbe de puissance P (avec $I \times V$ $[0, I_{SC}] \times [0, V_{OC}]$), nous obtenons un point de fonctionnement PMPP où la puissance est maximale.

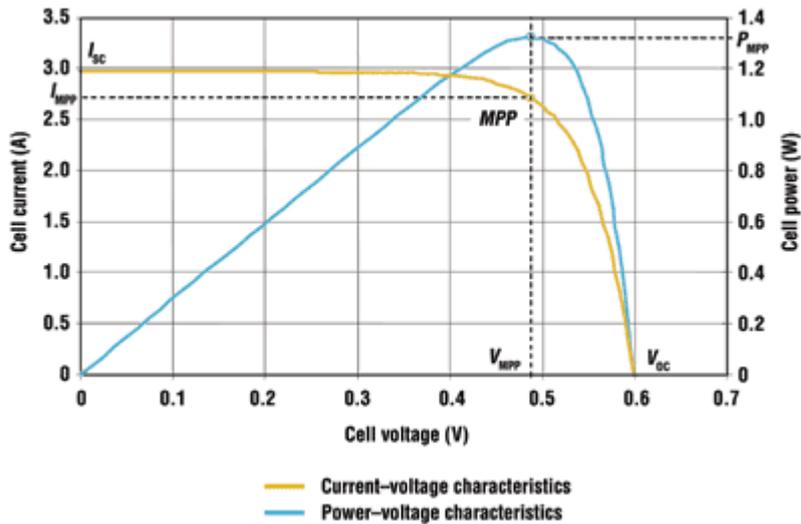


Fig.8 : Détermination de point de puissance maximale d'une cellule

b) Rendement

Nous pouvons définir le rendement d'une cellule photovoltaïque comme le quotient de la puissance maximale et de la puissance lumineuse reçue par la cellule. Cette puissance lumineuse correspond au produit de l'aire de la cellule par l'ensoleillement.

$$\text{Rendement} = \frac{P_{MPP}}{A_c \cdot E}$$

C) Facteur de forme

Il permet de juger de la qualité d'une cellule photovoltaïque. Il est défini comme le rapport entre le point de puissance maximum et la puissance à courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert.

$$\mathbf{FF} = \frac{P_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

A partir de cette définition, pour une cellule dont la caractéristique I-V est rectangulaire (source de courant), le facteur de forme sera donc unitaire. Le facteur de forme d'une bonne cellule photovoltaïque devra être compris entre 0,75 et 0,85.

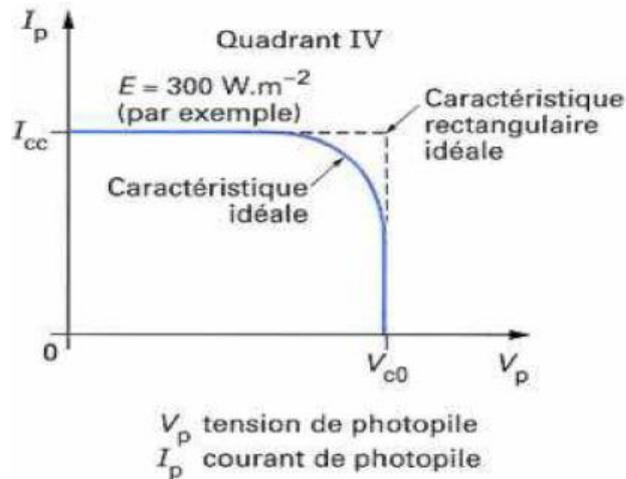


Fig. 9 : Caractéristique idéale d'une cellule P-V

C'est dans ce quatrième quadrant où la jonction PN fonctionne en générateur, que la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0,5 à 0,8 V pour Si). La caractéristique dans le quatrième quadrant de la jonction est donc celle de la cellule photovoltaïque.

L'intersection de cette caractéristique avec celle de la charge donne le point de fonctionnement de la cellule.

La caractérisation de la cellule photovoltaïque ayant été présentée, nous définirons dans la suite, quelques facteurs pouvant influencer son fonctionnement.

5. Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque

a) Influence de l'ensoleillement ou irradiation

L'apport d'énergie permettant la séparation électron-trou étant assuré par l'énergie lumineuse, il est donc normal que l'augmentation de l'ensoleillement E entraîne automatiquement l'augmentation des paires électron-trou séparées. Le courant débité I_{Ph} est donc proportionnel à l'ensoleillement E

$$I_{Ph} \propto E$$

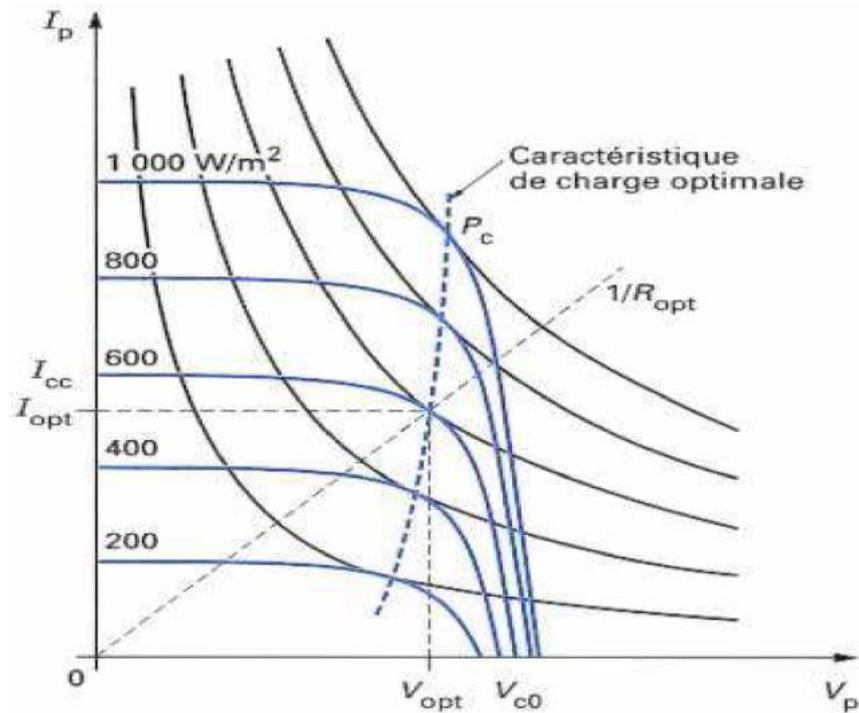


Fig.10 : Influence de l'ensoleillement

b) Influence de la température

La température a une influence notable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque. De manière générale, nous pouvons définir le coefficient de température pour une variable y de la façon suivante :

$$T_c = \frac{1}{y} \cdot \frac{dy}{dT}$$

Expérimentalement, on remarque que le courant de court circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée (de l'ordre de $-0,4\%/K$). La température a donc une influence non négligeable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque (perte de puissance de l'ordre de 9-15% pour une augmentation de 30°) ; [Cedric Cebal et Paul Sebatier, thèse 08]

Pour le même éclairement, les courbes I-V changent avec la température des cellules

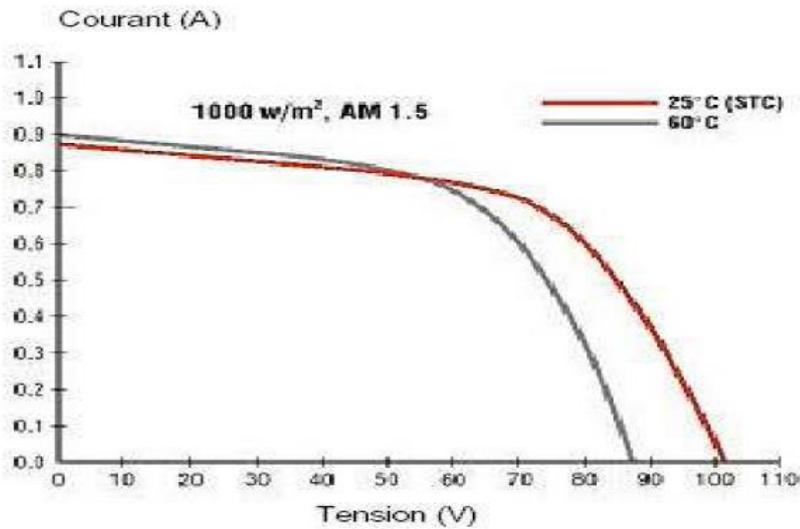


Fig.11 : Influence de la température sur un module

6. Caractéristique d'un module photovoltaïque

Pour utiliser les cellules dans un système photovoltaïque, on est amené à les associer en série pour augmenter la tension. Le courant est fixe par la surface de chaque cellule élémentaire mais aussi par le nombre de cellule en parallèle. Cette association série-parallèle doit se faire suivant des précautions car, même si les cellules sont identiques, il existe des dispersions au niveau de leurs paramètres internes.

L'ajout d'une cellule en silicium en série correspond à une augmentation de la tension totale d'environ 0,6 V (tension de la jonction).

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

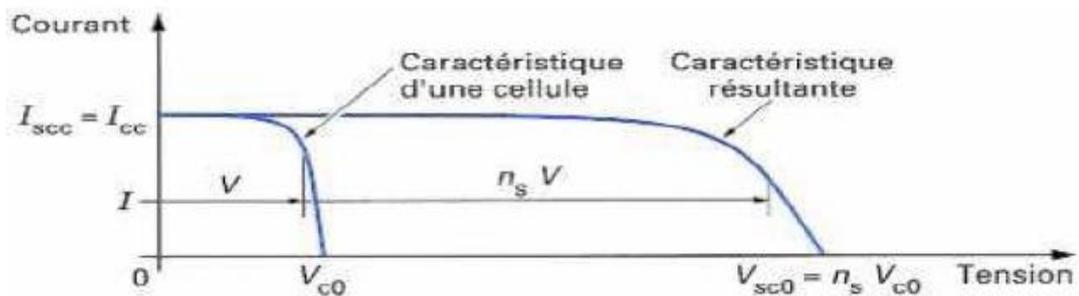


Fig.12 : Association en série de cellules identiques

Les expressions de la tension (V_{mod}) et du courant (I_{mod}) du module PV sont :

$$V_{mod} = \sum V_{cel}$$

$$I_{mod} = I_{cel}$$

V_{cel} et I_{cel} sont respectivement la tension et le courant d'une cellule PV.

Au cas où toutes les cellules ne sont pas identiques, c'est la cellule la plus faible qui impose ses performances à tout le module, dégradant ainsi les performances de ce dernier.

A titre d'exemple, on observe ce phénomène lorsque le module est en partie ombragé.

Pour une association en parallèle, nous avons un fonctionnement semblable à celui de l'association en série.

Finalement, la caractéristique d'une association série-parallèle se présente comme suit :

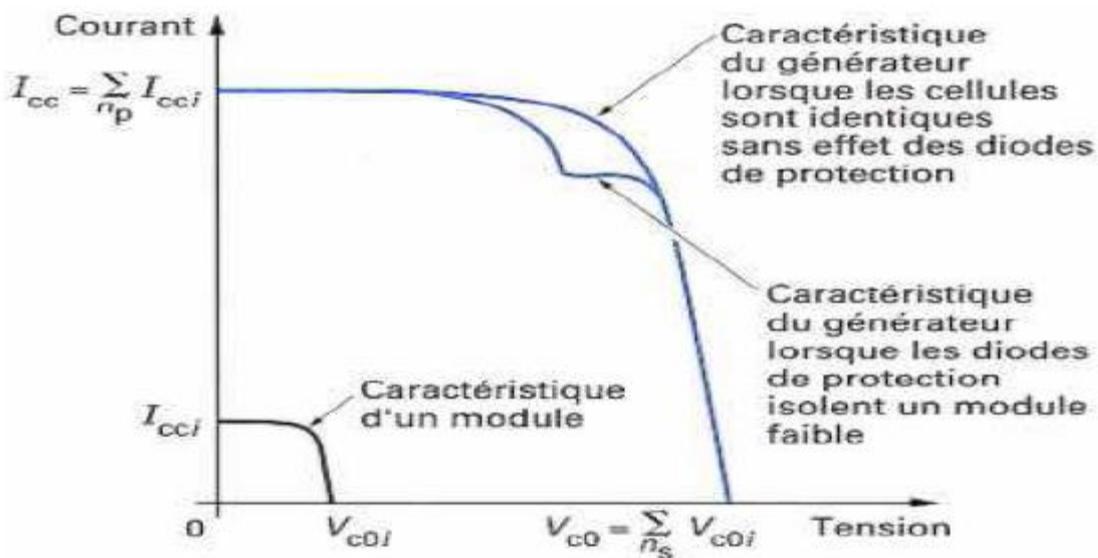


Fig.13 : Caractéristiques résultantes d'un générateur associant n_p cellules en parallèle et n_s cellules en série (identiques ou éventuellement disparates)

Il apparaît donc qu'une association série-parallèle de cellules PV doit respecter des règles de sécurité rigoureuses sous peine de voir dégrader les performances du module.

A travers ce chapitre, nous avons dressé un état des lieux de la production d'électricité photovoltaïque. Nous avons également pu constater l'évolution avec laquelle le marché progressait dans ce contexte de crise énergétique où l'on cherche à remplacer les énergies fossiles par le photovoltaïque, et où l'on assiste à une diversification des applications de cette énergie. En effet, réservée au début pour de petits sites isolés, on remarque de plus en plus l'accroissement des watt-crêtes par installation modifiant aussi les habitudes des utilisateurs.

Pour faire face à cette demande croissante de puissance, on peut avoir recours à plusieurs solutions :

- augmenter la surface des panneaux PV ;
- utiliser les plaques à haute rendement énergétique.

Dans le chapitre suivant, nous dresserons les caractéristiques des équipements de la station de Nakalgo et le profil de production de la dite station.

B. Caractéristiques et profil de production des équipements de la station.

Nakalgo est situé à la périphérie Nord à 10 Km du centre ville. Sa situation géographique fait d'elle l'une des stations les plus importantes dans le réseau de production de la ville de Koupéla. Elle réunit en son sein deux forages d'un débit cumulé de 20m³/h, constant sur toute l'année. Les eaux des forages ont une turbidité moyenne de 0,2NTU et un PH compris entre 7 et 7,8. Toutes ces caractéristiques respectent les normes OMS en matière de l'eau potable.

1. Caractéristiques des équipements de production.

Les équipements qui sont installés sur la station de Nakalgo sont des équipements standards de production ; il s'agit :

- ✓ D'un groupe électrogène triphasé de caractéristique :
 - Moteur de marque IVECO, couplé à un Alternateur de type meccalte
 - Puissance apparente $S = 30\text{KVA}$
 - Tension nominale $U = 230/400\text{ V}$
 - Courant nominal $I = 75,3/43,3\text{ A}$
 - Fréquence = 50Hz-1500tr/mn
 - Service S1; IP 23; température =40°C



Photo1 Groupe électrogène utilisé sur le site Nakalgo.

- ✓ De deux électropompes immergés de marque grundfoss

- L'une de Puissance 1,1KW

Tension : 380 V

Courant : 3 A

Débit : 8 m³/h

Hauteur de refoulement : 28m

- L'autre de Puissance 4KW

Tension : 380 V

Courant : 9 A

Débit : 12 m³/h

Hauteur de refoulement : 30m

- ✓ De deux coffrets de commande de pompe, constitué de disjoncteur, de contacteur de relais, de transformateur de sécurité.
- ✓ D'un compteur d'eau magnétique.
- ✓ D'un dispositif d'éclairage de 10 réglettes néon de 1,20m
- ✓ De cinq prises de courant monophasé de 16A et d'une prise triphasé de 32A



Photo 2 : L'une des deux forages de la station

2. Profil de production

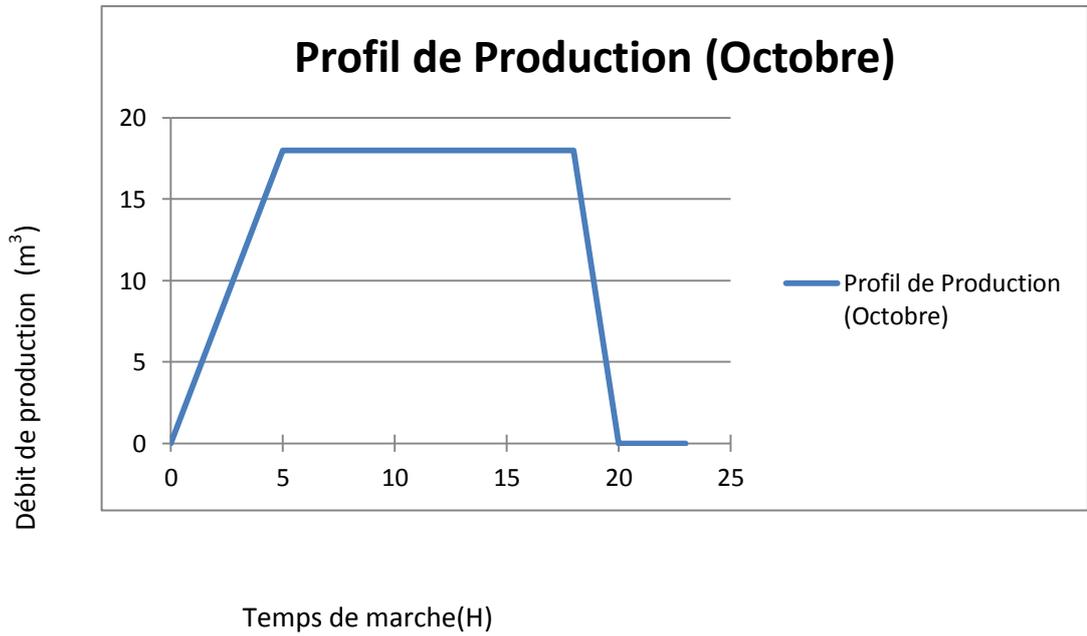
Pour rendre compte de la production, nous avons défini un profil basé sur le volume d'eau pompé et le temps réel de fonctionnement du groupe électrogène.

Ce profil tient compte des heures de pompage au cours de la journée. Deux plages se dégagent : les heures de faible consommation pendant les nuits et les heures de forte consommation.

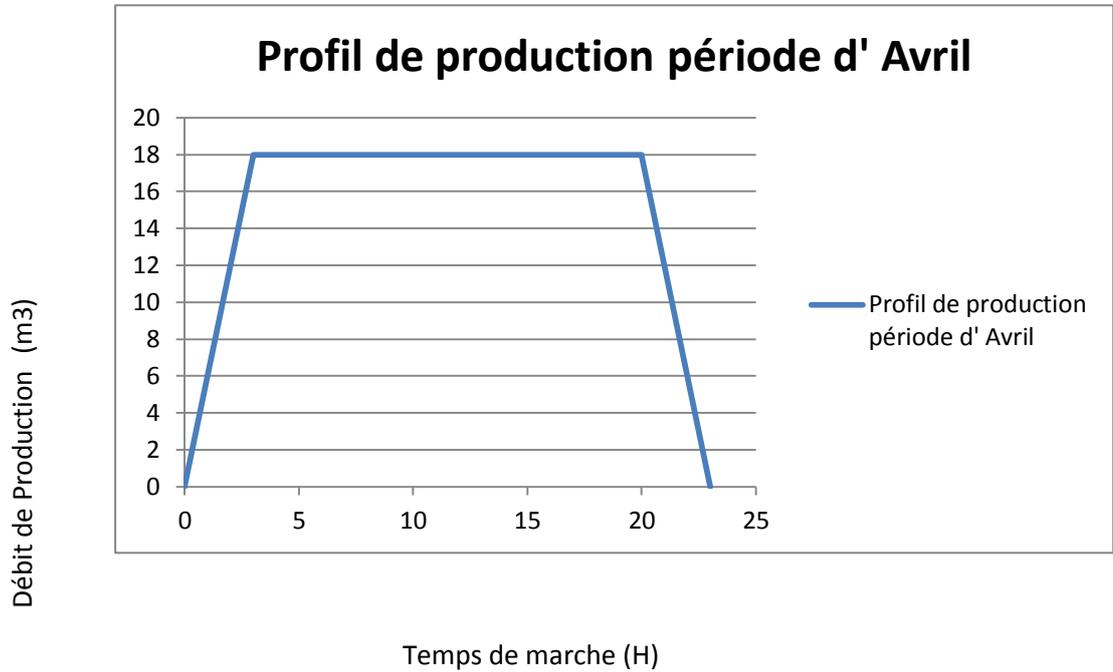
Les forages alimentent une bache de 90 m³ situé en plein centre ville ; la mise en place d'un programme de pompage permettra sans doute d'atténuer l'impact de la demande de pointe sur la production.

Nous allons proposer dans cette partie, les courbes de débit des forages, les temps de marche ainsi que les puissances délivrées par le groupe électrogène afin de justifier la puissance des panneaux solaires à installer dans le cadre de l'hybridation.

Profil de production mois d'Octobre



Profil de Production mois d'Avril



La production des forages est essentiellement basée sur les habitudes de consommation saisonnière. Dans la période du mois d'octobre, la demande est relativement faible au niveau du site de Nakalgo parce que les autres forages dissimulés à travers la ville renforcent la production, ce qui explique le fonctionnement moyen de 12h par jour.

Par compte dans la période du mois Avril, période de forte demande, la production des forages cités plus haut ont un débit faible dû à la baisse du niveau des nappes souterraines. La régularité du débit des forages de Nakalgo fait d'elle un site important dans le système d'approvisionnement en eau de la ville. Le temps moyen de fonctionnement des forages se situe entre 20h et 22h par jour.

3. Relevés expérimentales sur les équipements de la station

Afin de s'assurer des puissances réelles délivrées par le groupe électrogène nécessaire pour la marche des équipements, nous avons procédé par un essai expérimental du fonctionnement des électropompes immergés des forages. Les paramètres (tension, courant, puissance) ont été enregistrés grâce à un analyseur de réseau FLUKE 435.

Première étape : nous avons procédé à la mise en marche d'un seul forage (F11) après avoir relevé l'index initial, nous l'avons fait fonctionner durant 1h de temps.

Les valeurs enregistrées sont dans le tableau ci-dessous :

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Total
U (v)	231,53	231,39	231,49	
I (A)	8,3	9	8,4	
P (Kw)	1,2	1,5	1,2	3,9
S (KVA)	1,5	2,0	1,6	5,1
I pic (A)	11	15	13	
Index initial (m3)	131567		Production : 11m3	
Index final (m3)	131578			

Deuxième étape : nous avons procédé à l'arrêt du forage F11 et la mise en service du forage (F10) après avoir pris l'index initial ; après un temps de marche, nous reprenons l'index du forage et les valeurs enregistrées sont les suivantes :

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Total
U (v)	231,53	231,39	231,49	
I (A)	5	6	4	
P (Kw)	0,8	1,0	0,7	2,5
S (KVA)	1,1	1,4	1,0	3,5
I pic (A)	10	11	8	
Index initial (m3)	77987		Production : 10m3	
Index final (m3)	77997			

Enfin la dernière étape a consisté au fonctionnement simultané des deux forages (F10 et F11) ;

Ce sont ces paramètres qui seront utilisés pour le dimensionnement énergétique du système Photovoltaïque.

Paramètres enregistrés au cours du fonctionnement normal

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Total
U (v)	231,53	231,39	231,49	
I (A)	12	15	12	
P (Kw)	2,1	2,5	2,1	6,7
S (KVA)	2,8	3,4	2,8	9,0
I pic (A)	19	23	19	
Index initial (m3)	444243		Production : 64 m3	
Index final (m3)	444307			

Grace à ces essais expérimentaux, nous avons obtenus des valeurs fiables sur lesquelles nous pouvons nous baser sans nous tromper pour le dimensionnement du système PV.

Ces essais ont permis de mettre en évidence les pics de courant lors du démarrage des équipements, notamment les électropompes de forage, que nous devons prendre en compte pour un bon dimensionnement du système PV.

C. Dimensionnement énergétique, modélisation du système hybride et choix des composants.

Dans cette partie, nous avons fait ressortir les productions journalières du site de Nakalgo, la puissance maximale délivrée par le groupe électrogène pour satisfaire la demande en eau de la population.

Nous nous proposons de présenter dans cette partie, une description de l'architecture du système photovoltaïque adaptée à la situation du site ; le dimensionnement du système hybride proprement dit et enfin un choix justifié des différents composants nécessaire pour la bonne marche de l'installation.

1. Synthèse des architectures de systèmes photovoltaïques autonomes.

Un système photovoltaïque (PV) autonome est composé dans son ensemble d'un:

- Générateur photovoltaïque (panneaux photovoltaïques),
- moyen de stockage : électrochimique (batteries) ou électrique (supercapacités),
- convertisseur continu/continu (CC) permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximum,
- transformateur permettant d'élever la tension pour la conversion continu/alternative,
- convertisseur CC/CA permettant d'alimenter les charges alternatives,
- module de contrôle pour la charge des batteries et l'acquisition des différentes grandeurs physique du système.

Le schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque se présente alors comme suit :

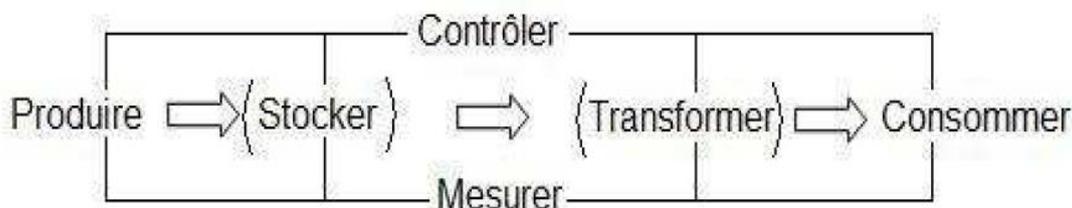


Fig.14 : Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque.

Dans un système PV basique, l'énergie produite est directement consommée par l'utilisateur ; les fonctions de « Stocker » et « Transformer » dépendent de l'application visée.

La figure ci-dessous détaille les différentes configurations de systèmes photovoltaïques [Cours 2ie, 11].

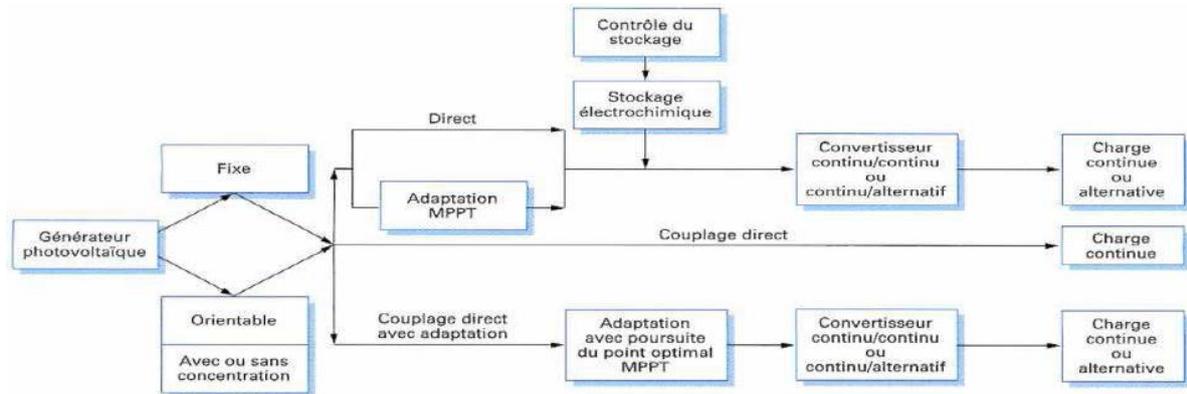


Fig.15 : Présentation générale d'un système photovoltaïque.

a) Alimentation directe sans transformation

Dans un système avec alimentation directe sans transformation, les panneaux photovoltaïques sont directement couplés à la charge. En se référant à la figure 3.1., les fonctions du système se limitent dès lors à PRODUIRE et CONSOMMER.

Ce cas de figure présente autant d'avantages que d'inconvénients ; en effet, le système présente l'avantage d'être simple et d'un coût relativement bas et s'avère très intéressant pour des applications pour lesquelles les besoins en énergie coïncident avec la présence de lumière (exemple d'un ventilateur). Par contre le fait que les panneaux soient directement couplés à la charge entraîne un surdimensionnement puisqu'il faudra produire autant d'énergie lors de faibles ensoleillement.

b) Alimentation directe avec transformation

L'alimentation directe avec transformation est similaire au cas précédent à la seule différence qu'il existe un étage d'adaptation de l'énergie entre la source (panneaux photovoltaïques) et la charge. Cet étage d'adaptation permet de transformer l'énergie produite afin d'alimenter la charge. Ainsi, selon le type de charge, nous avons comme étage d'adaptation des convertisseurs DC/DC et/ou DC/AC. Malheureusement, l'alimentation directe impose un

fonctionnement au fil du soleil, c'est-à-dire que l'énergie produite est fonction du rayonnement solaire.

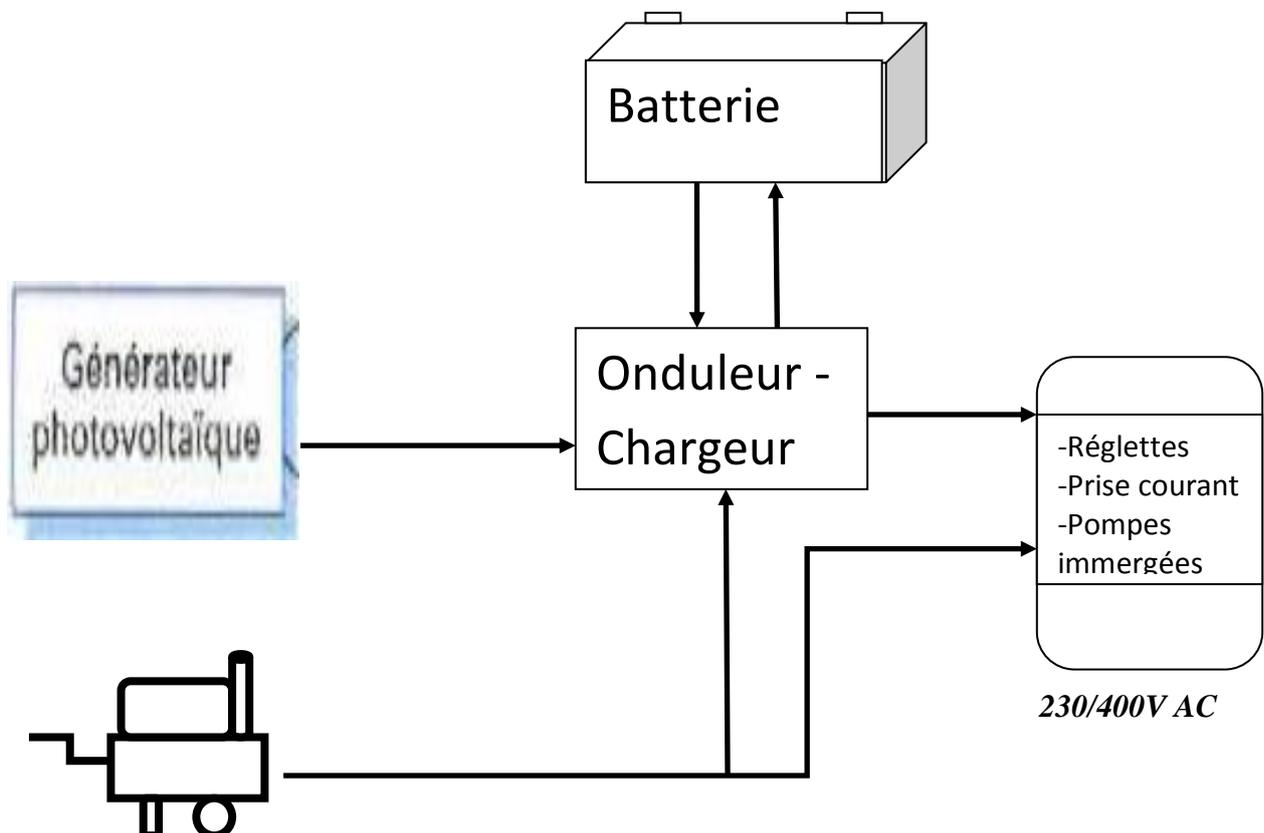
c) *Système autonome avec stockage*

C'est le système le plus répandu. Le composant de stockage permet d'emmagasiner de l'énergie et de le restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit). Il existe divers composants de stockage dont les plus répandus, sont les batteries électrochimiques, le stockage d'hydrogène, les volants d'inerties, et les supercapacités.

Dans le cas du site de Nakalgo, nous proposons deux systèmes d'alimentation qui prendront en compte l'aspect sécurité d'éclairage durant les nuits en cas de non fonctionnement du groupe électrogène dont le démarrage est fortement dépendant du niveau d'eau dans la bêche de stockage

Le besoin de diversification de l'alimentation par la mise en place d'un système hybride avec comme source principale l'énergie solaire pour réduire la vulnérabilité de la station de pompage.

2. **Structure du système de génération électrique hybride**



Groupe électrogène

Fig. 16 : Schéma général du système hybride PV/Diesel.

a) Fonctionnement

Le générateur électrique hybride PV / diesel est composé comme son nom l'indique d'un ensemble de panneaux photovoltaïques (champ solaire), d'un groupe électrogène comme source secondaire et d'onduleur-chargeur.

L'onduleur-chargeur est l'élément principal de ce système hybride. Il gère tout le transfert de l'énergie électrique en assurant :

- La charge des batteries à partir des panneaux ou du 230 v AC généré par le groupe électrogène.
- La conversion de la tension continue des panneaux ou de la batterie en 230 v AC destiné aux récepteurs.
- La surveillance de l'état de charge des batteries et éventuellement le démarrage du groupe électrogène.

Pendant la journée, les panneaux solaires fournissent l'énergie nécessaire pour l'alimentation de l'installation.

Lorsque le rayonnement solaire disponible est insuffisant pour supporter la charge (les nuits ou bien ciel nuageux) et que la demande en eau est toujours forte, l'ordre sera donné pour le démarrage du groupe électrogène pour prendre le relais.

3. Dimensionnement énergétique du système photovoltaïque

Le fonctionnement du groupe est calqué sur la production des forages ; en effet le temps de marche du groupe électrogène est étroitement lié au temps de fonctionnement des forages environ 20 à 22 h par jour.

a) Bilan énergétique de la station

Récepteurs	Nb	Puissance unitaire	Fréquence/Durée d'utilisation	Puissance totale	Energie
Eclairage Réglottes complètes fluo compates	10	36 * 1,25 W	Fonctionnement permanent 12h	450 W	5400 Wh
Prises électriques -Prise électrique monophasé -Prise électrique triphasé	3	500 W	Fonctionnement permanent 10h	600 W	6000 Wh
	1	1500 W	Fonctionnement 1h	1500 W	1500 Wh
Pompes eau potable -Pompes immergées pour forage	1	2500 W	Fonctionnement 10h	2500 W	25000 Wh
TOTAL				5050 W	37900 Wh

NB :-Pour le calcul de la puissance totale des prises, nous avons introduit le facteur de simultanéité qui est défini comme suit : $0.1 + \frac{0.9}{N}$ avec N= nombre de prise

-Les puissances unitaires utilisées pour le calcul sont des puissances relevées par phase d'alimentation.

Besoins quotidiens en énergie (courant alternatif)	37,90 kWh
--	-----------

b) Facteur régional d'ensoleillement.

La terre est divisée en cinq catégories de différents facteurs régionaux d'ensoleillement

- Asie, Afrique : Catégorie 5
- Europe centrale : Catégorie 4 ,3 et 2
- Etats Unis : Catégorie 6,5 et 4
- Canada et URSS : Catégorie 2

Ces facteurs régionaux prennent en compte la durée quotidienne du rayonnement du soleil et les températures locales annuelles [météo France, 12].

Une recherche effectuée au sein de la direction Générale de la météorologie nous a permis d'obtenir les valeurs moyennes mensuelles de l'ensoleillement dans la ville de Ouagadougou Aéroport qui se présente comme suit :

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ej(kWh/m ² /j)	5,8	6,0	5,9	5,4	5,4	5,2	5,0	4,9	5,2	6,0	5,7	5,7

En se basant sur le tableau, nous allons considérer 5,51Kwh/m²/J comme valeur moyenne de l'ensoleillement pour le dimensionnement des équipements.

c) Dimensionnement des panneaux photovoltaïque

Pour déterminer l'énergie à produire (Ep) nécessaire à la satisfaction des besoins de l'utilisateur, il faut que l'énergie consommée (Ec) soit égale à l'énergie produite à un coefficient près.

La détermination de ce coefficient tient compte de :

- L'incertitude météorologique ;
- L'inclinaison non corrigé des modules suivant la saison ;
- Point de fonctionnement des modules qui est rarement optimal et qui peut être aggravé par la baisse des caractéristiques des modules (vieillessement et poussières) ;
- Rendement de l'onduleur-chargeur (90 à 95%) ;
- Pertes dans les câbles et les connexions.

Pour les systèmes avec parc batteries, le coefficient k est en général compris entre 0,55 et 0,75. La valeur approchée que nous allons utiliser sera de 0,75 du fait que le système est prioritairement « fil du soleil » Suivant la formule, $E_p = \frac{E_c}{K} = \frac{37,90}{0,75} = 50,53 \text{ kWh}$

Energie quotidienne à fournir par les panneaux	50,53kWh
--	----------

Energie fournie par un panneau solaire de 125W ;

$$W_j = P * E_j = 125 * 5,51 = 688,75 \text{ Wh}$$

Nombre de panneaux solaire de 125W nécessaire pour alimenter le système

$$N = E_p / W_j = 50530 / 688,75 = 74 \text{ modules de } 125 \text{ Wc par phase}$$

Détermination de la puissance crête du générateur photovoltaïque :

Nous considérerons une irradiation moyenne (I_r) de 5,51 Kwh/m²/j comme annoncer plus haut

$$\text{Puissance crête : } P_c = \frac{E_p}{I_r} = \frac{50,53}{5,51} = 9,17 \text{ kWc}$$

Puissance crête du générateur photovoltaïque par phase	9,17kWc
--	---------

Pour des questions de performance et d'accessibilité, le choix s'est porté sur les panneaux BP solar 3125U de puissance 125Wc (voir caractéristique en annexe).

Détermination du réseau de module :

Le nombre N_s de module à mettre en série est déterminé par la tension d'utilisation

$$N_s = \frac{\text{tension "utilisation}}{\text{tension du module}} = \frac{48}{12} = 4 \quad (\text{4 modules de 12V à mettre en série})$$

Connaissant la puissance crête d'une phase et le nombre de module en série, le nombre de branche en parallèle est défini comme suite :

$$N// = \frac{\text{Puissance crête phase}}{\text{Puissance crête module}} \times \frac{1}{N_s} = \frac{9170}{125 \times 4} = 18,34$$

(19 branches parallèle à connecter par phase)

Nombre de modules à installer par phase	74 modules de 125 Wc
---	----------------------

d) Détermination et choix des éléments du système.

➤ **Batterie**

L'installation des batteries est très importante dans la mesure où le fonctionnement du groupe électrogène est dépendant du niveau d'eau de la bache pendant les nuits ou les temps de faible ensoleillement. La capacité des batteries sera déterminée en tenant compte uniquement de l'éclairage et des prises monophasées.

Le calcul de la capacité des batteries à installer tient compte :

- De l'énergie consommée E_c par jour (wh/j) ;
- Nombre de jour d'autonomie (N)
- De la décharge maximale admissible D (0,8 pour les batteries au plomb) ;

- De la tension U aux bornes de la batterie (48VCC).

Les batteries seront de type accumulateur au plomb [Net 4 sun ; 12] ; chaque élément de la rame de batterie a une capacité de 75Ah et la tension au borne d'un élément de la rame est de 12Vcc. Au regard de la configuration de l'installation et de la présence du groupe électrogène, l'autonomie des batteries est fixée à 2jours.

Besoin en énergie pour assurer l'autonomie : $W_t = 11400 \cdot 2 = 22800 \text{ Wh}$

Capacité de la rame de batterie : $C_1 = W_t/U = 22800/48 = 475 \text{ Ah}$

Perte à l'intérieur de la rame estimée à 30% C_1 : $C_p = 0,30 \cdot 475 = 142,5 \text{ Ah}$

Capacité de sécurité de la rame de batterie 30% ($C_1 + C_p$) : $C_s = 0,30 \cdot 617,5 = 185,25 \text{ Ah}$

Capacité totale de la batterie : $C_t = C_1 + C_p + C_s = 802,75 \text{ Ah}$

Capacité totale de la batterie à installer :	802,75 Ah
--	-----------

➤ Onduleur

Notre choix c'est porté sur les onduleurs-chargeur de type compact Studer conçu spécialement pour les systèmes hybrides. Ils sont composés d'onduleur sinusoïdal possédant une capacité de surcharge élevée, de chargeur de parc à batterie et d'un système de transmission de commande. Les connexions multifonctionnelles intégrées permettent de commander le démarrage du générateur diesel pour recharger les batteries ou de couper le courant pour des charges non prioritaire lorsque la charge des batteries est inférieure à un seuil prédéterminé.

Grace à la fonction de répartition de la puissance intégrée, le système de transmission est à mesure de toujours fournir la puissance nécessaire pour le bon fonctionnement des équipements.

Référence : onduleur-chargeur compact **XTENDER 6000-48 (XTH – 6000-48)**
Tension 48 V

Puissance en continue à 25°C : 5000W

Puissance en 30 min : 6000W

Courant de charge réglable : 0-100A

(Voir Annexe 07)

➤ **Section des câbles**

Le choix de la section des câbles est capital dans le transfert des puissances surtout dans la partie courant continu c'est-à-dire la partie panneaux solaires- onduleur- batterie. C'est la partie où les intensités sont les plus importantes ; il va sans doute se poser le problème de pertes joules et de chutes de tensions. L'objectif recherché est de réduire les chutes de tension dans la partie courant continu.

En considérant que la chute de tension admissible dans les câbles est de 2% ; la puissance à transiter par phase entre panneaux et l'onduleur est de 5050 W.

Le conducteur utilisé est le cuivre ; la résistivité est : $\rho=1,6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$.

Courant : $I = \frac{P_c}{U} = \frac{5050}{48} = 105,20 \text{ A}$

La chute de tension $\Delta U = 2\% \cdot 48 = 0,96\text{V}$

La résistance maximale de la ligne est définie comme suit : $R_{\text{max}} = \frac{\Delta U}{I} = \frac{0,96}{105,20} = 0,00912\Omega$

La longueur prévisionnelle entre les panneaux et l'onduleur est de 50m.

La section $S = \frac{\rho \cdot L}{R} = (50 \cdot 1,6 \cdot 10^{-8}) / 0,00912 = 87 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 87 \text{ mm}^2$ (section non normalisée).

Pour la réalisation pratique, nous utiliserons un câble de 90 mm² par phase.

Les câbles utilisés dans la partie courant alternatif pour l'alimentation des équipements restent sans changement.

Section par phase	90 mm ²
-------------------	--------------------

➤ **Structure de support**

Les modules solaires sont montés sur des structures en aluminium anodisés standard et surélevées de 1,5 m du sol. Ces structures sont très résistantes et s'adaptent à toutes les conditions. Les panneaux seront orientés vers le sud avec une pente d'inclinaison de 14° par rapport à l'horizontal.

➤ **Coffret de connexion**

Le coffret de connexion contient des dispositifs de surtension, de protection contre la foudre, des diodes de blocage, des rupteurs d'isolation et des borniers. il est choisit en fonction de la tension et du courant à transiter.

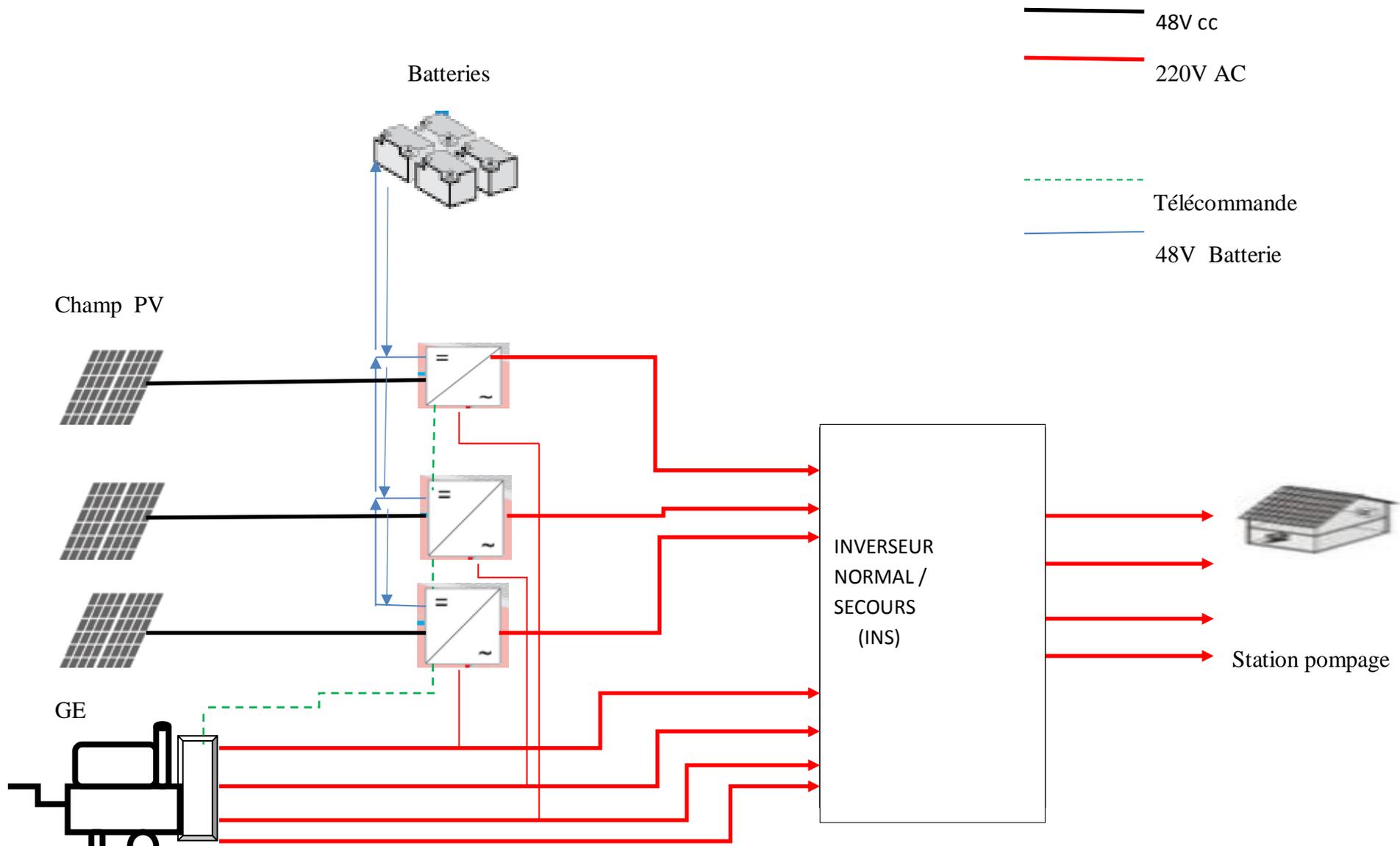


Fig.17 : Synoptique du système hybride de Nakalgo

e) Devis estimatif pour l'installation photovoltaïque

Désignation	Nombre	Prix unitaire HT	Sous total HT
Panneaux photovoltaïques et support	228	358 219,5	81674046
Batteries accumulateurs	1	166 487,9	166 487,9
Onduleurs chargeurs	3	1 045 904	3 137 712
Câbles 2*2,5 mm ²	300	484,7	145 410
Câbles 25 mm ²	100	1965	196 500
Câbles 90 mm ²	100	3930	393 000
Boîtes de raccordement des panneaux	3	49125	147 375
		RIX TOTAL (hors Taxes)	85860530,9
		RIX TOTAL TTC (TVA 18%)	98779232,4

En rappel le coût d'acquisition du groupe électrogène de 30KVA est estimé à 19 650 000 FTTC avec son l'inverseur de source.

V. Analyse comparative entre générateur diesel et système PV hybride.

Dans le chapitre 3, nous avons dimensionné le système photovoltaïque en vue d'une hybridation énergétique du système de pompage de la station. Dans cette même lancée, nous avons choisi les composants nécessaires au bon fonctionnement du système mis en place. A la suite de cette partie, nous allons mener une analyse comparative pour présenter l'option la plus économiquement rentable à court et moyen terme pour l'entreprise.

A. Analyse comparative entre générateur et système PV hybride

1. Fonctionnement du générateur diesel.

Association d'un moteur à combustion interne et d'un générateur de courant, un groupe électrogène converti l'énergie stockée dans le combustible en énergie mécanique, avant de la transformer en énergie électrique (générateur de courant).

Les groupes électrogènes sont fréquemment intégrés à des systèmes hybrides en guise d'unités de secours afin d'optimiser la capacité des générateurs exploitant les sources d'énergies renouvelables. La disponibilité du combustible et le rendement des machines constituent deux facteurs non négligeables lors de la planification d'un système hybride. En effet, un dimensionnement inadapté du moteur à combustion interne peut engendrer des frais considérables de fonctionnement et de maintenance, par exemple en raison d'une surconsommation de combustible. Les générateurs diesel jouent actuellement un rôle non négligeable dans les systèmes hybrides. Si cela peut sembler paradoxal à première vue, l'explication est pourtant simple : pour qu'un système soit alimenté à 100 % par de l'énergie solaire, il est impératif que le nombre de panneaux solaires soit suffisant pour assurer la production d'électricité nécessaire même pendant les saisons les moins ensoleillées, comme l'hivernage.

En raison des dimensions démesurées du générateur photovoltaïque qu'il imposerait, un tel système ne serait pas économiquement viable. L'intégration d'un générateur diesel offre une source d'énergie rapidement disponible et fiable, qui permet de réduire considérablement la taille de l'installation solaire.

2. Aspects économiques des systèmes hybrides

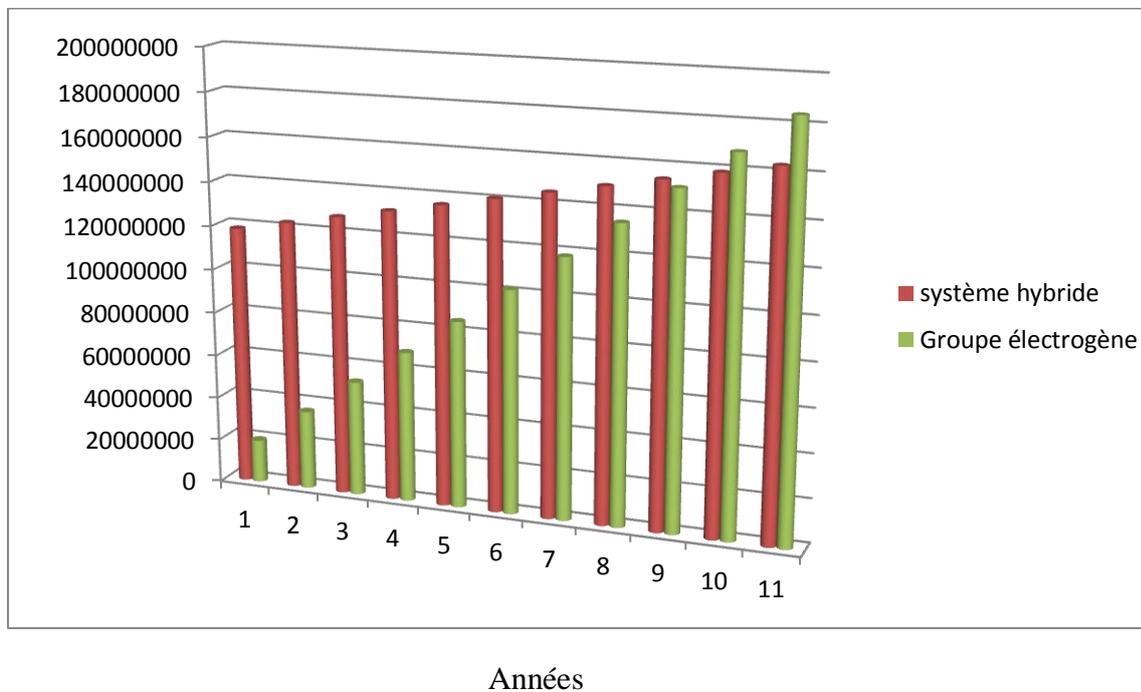
D'un point de vue économique, les systèmes hybrides sont nettement avantageux dans une plage de puissance limitée que les installations alimentées exclusivement par des générateurs

diesel. En raison de la longévité accrue et des besoins de maintenance réduits, la taille d'un système hybride dépend des charges potentielles à alimenter.

L'avantage économique des systèmes photovoltaïques hybrides sur les systèmes exclusivement diesel devient clairement visible si l'on compare leurs coûts sur l'ensemble de leur durée de vie. L'exemple de la station de Nakalgo met en évidence que le surcoût de l'investissement initial d'un système photovoltaïque hybride est compensé dès la neuvième année d'exploitation en raison des coûts de fonctionnement nettement supérieurs des générateurs diesel.

Plus le temps passe plus le recours à un système photovoltaïque hybride s'avère avantageux. Les systèmes photovoltaïques hybrides peuvent d'ores et déjà être exploités avec une garantie de rentabilité à long terme. À la lumière des coûts croissants des matières premières énergétiques, les systèmes hybrides exploitant des énergies renouvelables apparaissent comme une véritable alternative, qui sera progressivement mise en œuvre dans un nombre croissant de domaine d'application.

Fig. 18 Coût sur la durée d'exploitation



B. Performances du Système Hybride dans la Production d'Electricité.

Dans le domaine des énergies renouvelables, le coût de production du Watt photovoltaïque est assez élevé ; cela constitue un frein pour la vulgarisation de cette technologie combien bénéfique pour l'Afrique de part sa situation géographique.

Le projet de production d'énergie solaire pour l'alimentation de la station participe à la lutte contre le réchauffement climatique par la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En effet la diminution d'une partie de la fourniture d'énergie du groupe électrogène par les panneaux photovoltaïques moins polluant demeure une alternative qui a de multiples avantages :

- Diminution de la dépendance à l'énergie fossile (pétrole) ;
- Mise en place d'une technologie respectueuse de l'environnement (moins de pollution) ;
- Diversification des sources d'approvisionnement énergétiques.

La réduction du dioxyde de carbone (CO₂) est bien visible à travers cette petite simulation :

Consommation horaire de gas-oil du groupe électrogène	5 L/h
Temps de marche moyen du groupe	15h
Consommation annuelle du groupe électrogène	27000 L
Densité du gas-oil diesel	843,9kg/m ³
Masse de gas-oil	22,76 tonne (1t= 1,035Tep)
Quantité d'énergie produite	23,56 Tep
1 tonne équivalent pétrole (Tep)	41,8GJ
La quantité d'énergie en giga joule	984,80 GJ
Sachant que la combustion dans un groupe électrogène produit 74 Kg de CO ₂ par Gj ;	
Quantité de CO ₂ produite normalement par le groupe	72,87 t CO ₂
La réduction de CO ₂ en mode hybridation sera de.	48,58 tCO ₂ soit les 2/3 de la production initiale du groupe.

VI. CONCLUSION GENERALE

Nous nous sommes fixés comme objectif dans le présent travail la combinaison de deux sources l'une renouvelables et l'autre fossile (pétrole), pour apporter une amélioration dans le système énergétique de la station, que ce soit du point de vue énergies, fiabilité et autonomie de fonctionnement et préservation de l'environnement

Le travail effectuée a permis de faire une étude détaillée pour la mise en place d'un système hybride énergétique pour alimenter la station de pompage de Nakalgo à Koupéla. Pour ce faire, nous avons apporté une attention particulière à l'élaboration des profils de production en fonction des habitudes de la station, et à la détermination de la puissance des panneaux photovoltaïques et bien sûr au choix optimal des composants du système.

La première difficulté majeure que nous avons rencontrée été comment déterminer la consigne pour la commutation des sources en tenant compte de la tension et de la fréquence des onduleurs. La fonction intégrée « droop mode » des onduleurs pour site isolé permet de résoudre la question, tout en restituant intégralement la puissance maximale des modules photovoltaïques.

La mise en place des batteries de stockage a été d'un grand intérêt tant du point de vue sécuritaire que confort. Les batteries sont chargées par un courant optimal jusqu'au voisinage de la tension de pleine charge ou le dispositif intégré de charge passe en floating (régulation en tension). Cette énergie sera restituée pour alimenter les lampes et les prises monophasées durant les temps mort de fonctionnement.

L'investissement dans les énergies renouvelables est très prometteur pour les pays comme le notre (très bon ensoleillement) ; et aussi cela participe à la lutte contre les changements climatiques dont les effets sont destructeur pour notre planète Les systèmes hybrides sont une alternative pour juguler le problème de la dépendance à l'énergie fossile surtout pour les sites isolés possédant des groupes électrogènes au diesel pour assurer l'approvisionnement en énergie. Les défis liés à la sécurité énergétique et à la lutte contre les changements climatiques, exigent des changements immédiats dans la structure énergétique africaine Néanmoins certaines difficultés demeurent quant au coût acquisition élevé du kit solaire. Nous recommandons à nos gouvernants de doter notre pays d'un cadre réglementaire et d'une stratégie de développement des énergies renouvelables, à l'instar de certains pays de la sous-région pour que le Burkina Faso et l'Afrique profitent mieux de ce potentiel énergétique pour nourrir une économie africaine émergente.

VII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

❖ Ouvrages et articles

[Tchapo Singo, 10]

- Tchapo Singo, Février 2010 ;Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour habitat énergétique autonome ;Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré Nancy-I.

[Alain Papa Ndiana SARR, 09]

- Alain Papa Ndiana SARR , Mars 2009 ; Contribution des énergies renouvelables à la promotion du développement durable et la lutte contre la pauvreté : cas des cuisinières solaires de Méckhe au Sénégal. Mémoire de fin d'étude de l'école Nationale d'Economie Appliquée.
- “Convertisseurs photovoltaïques” Ludovic Protin, Stephane Astier, Traite Génie Electrique Dunod 3360, Techniques de l'ingénieur.

[Alain Ricaud, 02]

- « Photopiles solaires », Alain Ricaud, Edition Presses polytechniques et universitaires romandes. Mars 2002

[Ariane Neusser, 04]

- “Système photovoltaïque autonome: étude d'une structure modulaire à gestion répartie ” Ariane Neusser, Thèse soutenue le 24 septembre 2004.

[Cedric Cebal et Paul Sabatier, 08]

- “Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédiée à la conversion photovoltaïque”, Cedric Cabal, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, Thèse soutenue le 15 décembre 2008.
- Analyse technico économique d'un système hybride (photovoltaïque/diesel) autonome sur le site d'Adrar en Alger ; Revue des énergies renouvelables vol.9, N°3 (2006) 127-134
- Revue sur les thèmes abordés à la 1^{ère} conférence Internationale « Energie Solaire : Enjeux, Potentiels et contraintes pour l'Afrique » organisé du 13 au 15 décembre 2012 à Ouagadougou.

[Bernard Bassemel, 08]

- Revue systèmes solaire : méthode simple de dimensionnement des éléments d'une installation solaire Avril 2008 ; Bernard Bassemel Expert Ingénieries Energie et Environnement.
E mail « bassemel-bernard@yahoo.fr ».

❖ Site internet

[Cours 2ie, 11]

- <http://www.2ie-edu.org> site officiel de l'institut international d'ingénierie de l'eau de l'environnement 2iE.
Sujet : Faire connaissance des projets sur les énergies renouvelables en cours : le prototype de centrale hybride PV/Diesel ; une plate-forme hybride d'expérimentation de gestion de l'énergie de kamboinsé. (Date de consultation 28-12-2012).

[riaed, 11]

- <http://www.riaed.net>/les énergies renouvelables en Afrique
Sujet : potentialité énergétique de l'Afrique ; Taux de pénétration des énergies renouvelables. (Date de consultation 10-09-2012).

[iea, 12]

- <http://www.iea.org/> Agence internationale de l'Energie.
Sujet : Contribution des énergies renouvelables dans la fourniture d'énergie mondiale.
- <http://www.cder.dz> centre de développement des énergies renouvelables Algérie.
Bulletin des énergies renouvelables Semestriel N°13 juin 2008
Sujet : Comprendre les avantages liés aux énergies renouvelables (Solaire, Eolienne...)

[Météo France, 12]

- Le rayonnement solaire, <http://comprendre.meteofrance.com/>
Sujet : explication sur les facteurs qui influencent sur le rendement des panneaux solaires.(Date de consultation 01-10-2012)

[Net4Sun, 12]

- <http://www.Net4sun.com> Batterie de stockage pour installation photovoltaïque ;
Sujet : choix du type de batterie pour le stockage de l'énergie. (Date de consultation 14-09-2012)
- <http://www.inseversor-AFR.com> système de production d'énergie renouvelable en site isolé.
Sujet : conseil pratique sur les systèmes hybrides en site isolé (date de consultation le 15-11-2012).
- <http://sonabel.bf/> site officiel de la Société Nationale d'Electricité du Burkina ;
Sujet : information sur les projets d'énergie renouvelable au Burkina et la part des renouvelables dans la production nationale d'énergie.

[emsolar.ee.tu-berlin ; 12]

- <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/lehre/english/pv1/> Données sur les caractéristiques des cellules photovoltaïques. (Date de consultation 01-10-2012)

VIII. ANNEXES

Annexe 1 : Caractéristique de panneaux photovoltaïque choisis pour cette installation

Annexe 2 : Prix HT des composants pour installation photovoltaïque

Annexe 3 : Performance des batteries à plomb

Annexe 4 : La notice de coût sur la durée d'exploitation du système

Annexe 5 : Tableau d'équivalence KVA / Ampères / Consommation Gas oil d'un groupe électrogène

Annexe 6 : Relevé des paramètres du Groupe électrogène en fonctionnement.

Annexe 7 : Caractéristiques des onduleurs « Séries COMPACT »

Annexe 8 : Analyseur de réseau FLUKE 435

Annexe 9 : Vue de la station de pompage de NAKALGO.

Annexe 1 : Caractéristique de panneaux photovoltaïque choisis pour cette installation

Caractéristiques des panneaux photovoltaïques choisis pour cette installation



BP 3125

125 Watt Photovoltaic Module

High-efficiency photovoltaic module using silicon nitride coated multicrystalline silicon cells.

Performance

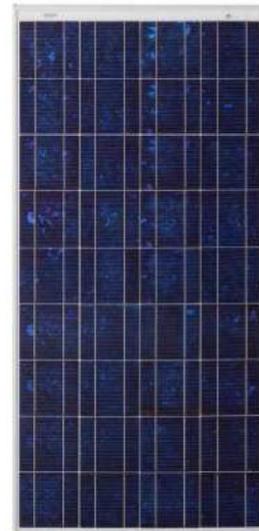
Rated power (P_{max})	125W
Power tolerance	± 5%
Nominal voltage	12V
Limited Warranty ¹	25 years

Configuration

S BP 3125S	Clear universal frame with LoPro J-Box and polarized Multicontact (MC) connectors
U BP 3125U	Clear universal frame and standard J-Box

Electrical Characteristics²

	BP 3125
Maximum power (P_{max}) ³	125W
Voltage at Pmax (V_{mp})	17.6V
Current at Pmax (I_{mp})	7.1A
Warranted minimum P_{max}	118.75W
Short-circuit current (I_{sc})	7.54A
Open-circuit voltage (V_{oc})	22.1V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C
Temperature coefficient of V_{oc}	-(80±10)mV/°C
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C
NOCT (Air 20°C; Sun 0.8kW/m ² ; wind 1m/s)	47±2°C
Maximum series fuse rating	15A (S); 20A (U)
Maximum system voltage	600 V (US NEC rating) 1000V (IEC rating)



Mechanical Characteristics

Dimensions	S,U	Length: 1510mm (59.4") Width: 674mm (26.5") Depth: 50mm (1.97")
Weight	S,U	12.0 kg (26.5 pounds)
Solar Cells	S,U	36 cells (157mm x 157mm) in a 4x9 matrix connected in series
Output Cables	S	RHW AWG# 12 (4mm ²) cable with polarized weatherproof DC rated Multicontact connectors; asymmetrical lengths - 900mm (-) and 800mm (+)
Junction Box	U	U-Version junction box with 6-terminal connection block; IP 54, accepts PG 13.5, M20, ½ inch conduit, or cable fittings accepting 6-12mm diameter cable. Terminals accept 2.5 to 10mm ² (8 to 14 AWG) wire.
Diodes	S,U	IntegraBus™ technology includes for every 18 cells, a Schottky by-pass diode integrated into the printed circuit board bus
Construction	S,U	Front: High-transmission 3mm (1/8 th inch) tempered glass; Back: Tedlar; Encapsulant: EVA
Frame	S,U	Clear anodized aluminum alloy type 6063T6 Universal frame; Color: silver

1. Module Warranty: 25-year limited warranty of 80% power output; 12-year limited warranty of 90% power output; 5-year limited warranty of materials and workmanship. See your local representative for full terms of these warranties.
2. These data represent the performance of typical BP 3125 products, and are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (STC.)
3. During the stabilization process that occurs during the first few months of deployment, module power may decrease by up to 3% from typical P_{max} .

©BP Solar 2003

4025-3 10/03

Annexe 2 :Prix HT des composants pour installation photovoltaïque

Prix HT des composants pour installations photovoltaïques

Panneaux photovoltaïques	
<i>Désignation / caractéristiques</i>	<i>Prix unitaire HT</i>
Module monocristallin 12 V/ 24 100 watts	546,9 €
Module polycristallin BP 3125U 24 V / 120 watts	656,3 €

Accumulateurs au plomb 2V	
<i>Désignation / caractéristiques</i>	<i>Prix unitaire HT</i>
Batterie 2V / 735 Ah	268,39 €
Batterie 2V / 900 Ah	254,18 €
Batterie 2V / 1200 Ah	264,18 €

Onduleur chargeur	
<i>Désignation / caractéristiques</i>	<i>Prix unitaire HT</i>
Studer Inno Compact C 2324S Régulé	1596,80 €

Câbles / Matériel de raccordement	
<i>Désignation / caractéristiques</i>	<i>Prix unitaire HT</i>
Câble 2G 2,5 mm ²	0,74 € / m
Câble unipolaire 25 mm ²	3 € / m
Câble unipolaire 50 mm ²	4 € / m
Articles de connexions et de pontage des batteries	150 €
Boîte de raccordement des panneaux et cosses	75 €
Presses étoupes panneaux	3 € pièce

Annexe 3 : Performance des batteries à plomb

Température de fonctionnement	-20 à +50 °C
Énergie	25/45 Wh/kg 60/120 Wh/dm ³
Nombre de cycles profonds	300/1500
Puissance massique	80/150 W/kg
Rendement (a)	<ul style="list-style-type: none"> • énergétique : de 60 à 95% • faradique : de 65 à 100%
Auto-décharge	2 à 10 % par mois à 25°C
Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • surveiller le niveau d'eau pour les batteries (ouvertes) non étanches tous les 2 mois • sulfatation de l'électrolyte en cas de stockage prolongé ⇒ brassage
Impact environnemental	<p>Le plomb est toxique ⇒ recyclage (≅ 100%) par réduction des oxydes de plomb et tri pneumatique ou hydraulique des plastiques (polypropylène)</p>
Sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • acide sulfurique : corrosif • problèmes de surpression de l'hydrogène en cas de surcharge

Fig. 1.22. Principales données techniques de la batterie au plomb [1.18.]

(a) Rendement :

- i. énergétique = énergie effectivement disponible en décharge / énergie injectée dans la batterie au cours de la charge
- ii. faradique = capacité en décharge / capacité en charge.

Annexe 4 : La notice de coût sur la durée d'exploitation du système

Données relatives au calcul des coûts d'exploitation du groupe électrogène comparativement à l'installation d'un système hybride sur une période de 10 ans tout en sachant que la durée de vie des plaques solaires est prévue sur 25 ans.

Années	Charges liées à Exploitation du système hybride PV	Charges liées à Exploitation du Groupe électrogène
0	118429232	19650000
1	122929232	36150000
2	127429232	52650000
3	131929232	68850000
4	136429232	85350000
5	140929232	101850000
6	145429232	118350000
7	149929232	134850000
8	154429232	151350000
9	158929232	167850000
10	163429232	184350000

NB :- le coût du système hybride prend en compte le groupe électrogène, inverseur de source et le système photovoltaïque

-La charge d'exploitation du groupe électrogène est essentiellement basée sur le coût du gas-oil et un coût de maintenance forfaitaire.

Annexe 5 : Tableau d'équivalence KVA / Ampères / Consommation Gas oil d'un groupe électrogène

Tableau d'équivalence KVA / Ampères / Consommation Gas oil d'un groupe électrogène.

Puissances cos 0,8	Ampérage / phase sous :		Section des câbles pour une longueur de 20 mètres		Consommation Gas-oil / h en pleine charge
	400 V	230 V	400 V	230 V	
	Ampères				
10 KVA	14,5	25	25	25	3 litres
15 KVA	21,6	37,5	25	25	3,5 litres
25 KVA	36	63	25	25	5 litres
35 KVA	50,5	88	25	25	7 litres
40 KVA	58	104	25	25	8 litres
50 KVA	72	125,5	25	25	10 litres
70 KVA	101	176	25	50	14 litres
85 KVA	123	213	25	70	16 litres
100 KVA	144	251	35	95	20 litres
125 KVA	180	314	50	9S	25 litres
150 KVA	216	376,5	70	120	30 litres
180 KVA	325	452	1 x 95	1 x 185	36 litres
200 KVA	289	502	1 x 95	1 x 240	40 litres
225 KVA	325	565	1 x 95	1 x 240	46 litres
250 KVA	361	627,5	1 x 120	2 x 95	50 litres
275 KVA	397	690	1 x 150	2 x 120	55 litres
300 KVA	433	753	1 x 150	2 x 120	60 litres
350 KVA	505	878,5	1 x 240	2 x 185	70 litres
450 KVA	650	1130	2 x 95	2 x 240	90 litres
550 KVA	794	1380	2 x 150	3 x 185	110 litres
650 KVA	938	1601	2 x 185	2 x 240	146 litres
850 KVA	1227	2134	3 x 150	4 x 240	180 litres
1000 KVA	1443	2510	3 x 185	5 x 240	220 litres
1250 KVA	1804		4 x 185		298 litres
1500 KVA	2165		4 x 240		338 litres
1650 KVA	2382		5 x 185		365 litres
2000 KVA	2887		5 x 240		400 litres

Annexe 6 : Relevé des paramètres du Groupe électrogène en fonctionnement.



Annexe 7 : Caractéristiques des onduleurs « Séries COMPACT »

/ convertisseur DC-AC + chargeur
12V - 24V - 48V



/ Caractéristiques techniques

	XTENDER 3500-24	XTENDER 4000-48	XTENDER 5000-24	XTENDER 6000-48	XTENDER 8000-48
réf.	XTM-3500-24	XTM-4000-48	XTH-5000-24	XTH-6000-48	XTH-8000-48
Onduleur					
Tension nominale de la batterie	24V	48V	24V	48V	48V
Plage de la tension d'entrée	19-34V	38-68V	19-34V	38-68V	38-68V
Puissance continue à 25°C	3000W	3500W	4500W	5000W	7000W
Puissance 30 min à 25°C	3500W	4000W	5000W	6000W	8000W
Puissance 5 sec à 25°C	9000W	10500W	12000W	15000W	21000W
Puissance Smart-Boost 30 min à 25°C	3500W	4000W	5000W	6000W	8000W
Charge maximale	jusqu'au court-circuit				
Charge asymétrique max.	jusqu'à Pcont				
Détection de charge (stand-by)	2 à 25W				
Cos	0,1-1				
Rendement max	94%	96%	94%	96%	96%
Puissance à vide OFF/Stand-by/ON	1.4W/1.6W/12W	1.8W/2.1W/14W	1.4W/1.8W/18W	1.8W/2.2W/22W	1.8W/2.4W/30W
Tension de sortie	Sinus 230Vac (+/- 2%) / 190-245Vac (disponible aussi en 120Vac sauf XTH 8000-48)				
Fréquence de sortie	50Hz / 60Hz (-01) réglable 45-65Hz +/- 0.05% (contrôlée par quartz)				
Distorsion harmonique	<2%				
Correction dynamique	0.5 ms (saut de charge 0 à 100%)				
Protection de surcharge et de court-circuit	Déconnection automatique puis 3 essais de démarrage				
Protection de surchauffe	Alarme avant coupure et redémarrage automatique				

/ Caractéristiques techniques (suite)

	XTENDER 3500-24	XTENDER 4000-48	XTENDER 5000-24	XTENDER 6000-48	XTENDER 8000-48
réf.	XTM-3500-24	XTM-4000-48	XTH-5000-24	XTH-6000-48	XTH-8000-48
Chargeur de batterie 6 étages programmables : I-U-Uo-Egalisation-Uo(low)-U(periodique)					
Courant de charge réglable	0 - 90A	0 - 50A	0 - 140A	0 - 100A	0 - 120A
Répartiteur de courant d'entrée	1 - 50A				
Tension maximum d'entrée	265Vac / 150Vac (-01)				
Plage d'entrée tension AC	Niveau de détection réglable de 150 à 230Vac / 50 à 140Vac (-01)				
Fréquence d'entrée admissible	45 - 65Hz				
Détection d'élément en court-circuit	EN 61000-3-2				
Contrôle de la batterie (valeur d'usine/plage réglable avec RCC-02 ou RCC-03)					
Fin d'absorption	Par durée : 2h / 0.25 - 10h ou par courant - / 4 - 30A				
Tension d'absorption	28.8 / 19 - 34V	57.6 / 38 - 68V	28.8 / 19 - 34V	57.6 / 38 - 68V	57.6 / 38 - 68V
Tension d'absorption périodique	- / 19 - 34V	- / 38 - 68V	- / 19 - 34V	- / 38 - 68V	- / 38 - 68V
Tension de maintien	27.2 / 19 - 34V	54.4 / 38 - 68V	27.2 / 19 - 34V	54.4 / 38 - 68V	54.4 / 38 - 68V
Tension de maintien réduit	- / 19 - 34V	- / 38 - 68V	- / 19 - 34V	- / 38 - 68V	- / 38 - 68V
Egalisation	Par nombre de cycle (- / 1-100) ou à intervalle fixe (- / 52 semaines)				
Fin d'égalisation	Par durée 4 / 0.25 - 10 h ou par courant - / 4 - 30A				
Tension d'égalisation	- / 19 - 34V	- / 38 - 68V	- / 19 - 34V	- / 38 - 68V	- / 38 - 68V
Protection contre la décharge	21.6V / 19 - 34V	43.2V / 38 - 68V	21.6V / 19 - 34V	43.2V / 38 - 68V	43.2V / 38 - 68V
Durée de maintien réduit	- / 0 - 32 jours				
Durée d'absorption réduite	- / 0 - 10 heures				
Compensation de la température (option BTS-01)	-5 / 0 à -8mV/°C/Cellule (seulement avec option BTS-01)				
Données générales					
Contacts multifonctionnel programmable	Deux contacts indépendants 16A/240Vac, 20 A-24 Vdc / 16A/140Vac (-01) (libres de potentiel 3 points)				
Courant max. du relais de transfert	50A				
Vitesse de commutation du relais de transfert	<15ms				
Poids	21.2kg	22.9kg	40kg	42kg	46kg
Dimensions	133x322x466mm	230x300x500mm	230x300x500mm	230x300x500mm	230x300x500mm
Indice de protection	IP20				
Conformité	EN 61000-6-1, EN 61000-6-3, EN 55014, EN 55022, EN 61000-3-2, Dir. 89/336/EEC, LVD 73/23/EEC				
Plage de température de travail	-20 à 55°C				
Humidité relative de fonctionnement	95% sans condensation				
Ventilation	Forcée dès 55°C				
Niveau acoustique	<40dB / <45dB (sans / avec ventilation)				
Garantie	5 ans				
Marque	SAMLEX				
Fabricant	STUDER				
Options					
Télécommande et centre de programmation pour montage mural (RCC-02) ou encastrable (RCC-03)					
Câble de communication 3ph et // (CAB-RJ45-8-2)					
Sonde de température de batterie BTS-01					
Module de commande à distance RCM-10 (n'existe pas pour les XTH)					

Annexe 8 : Analyseur de reseau FLUKE 435



Annexe 9 : Vue de la station de pompage de NAKALGO

